CLIMATE CHANGE
48/2026

Abschlussbericht

Umwelt- und Klimaauswirkungen natürlicher und halogenierter Kältemittel in Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen

Vergleichende Bewertung der Umwelt- und Klimaauswirkungen von natürlichen und halogenierten Kältemitteln in Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlagen

von:

David Behringer, Barbara Gschrey

Öko-Recherche GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland

Michael Kauffeld

Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland

Alexander Cohr Pachai

Alexander Cohr Pachai Global Consultancy, Aarhus, Dänemark

Unter Mitarbeit von

David Robin, Ann-Kathrin Weith
Öko-Recherche GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 48/2026

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

Forschungskennzahl 3721 41 301 0

Abschlussbericht

Umwelt- und Klimaauswirkungen natürlicher und halogenierter Kältemittel in Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen

Vergleichende Bewertung der Umwelt- und Klimaauswirkungen von natürlichen und halogenierten Kältemitteln in Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlagen

von

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

Michael Kauffeld
Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland

Alexander Cohr Pachai
Alexander Cohr Pachai Global Consultancy, Aarhus, Dänemark

Unter Mitarbeit von

David Robin, Ann-Kathrin Weith
Öko-Recherche GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

Durchführung der Studie:
Öko-Recherche Büro für Umweltforschung und –beratung GmbH
Münchener Str. 23a
60329 Frankfurt am Main

Abschlussdatum:
April 2025

Redaktion:
Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Kerstin Martens

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2026

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

Kurzbeschreibung: Umwelt- und Klimaauswirkungen natürlicher und halogenierter Kältemittel

Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels ist eine Senkung der Treibhausgasemissionen dringend notwendig. Gesättigte fluorierte Kältemittel sind starke Treibhausgase, die bei der Verwendung in Kälte- und Klimaanlagen zum Teil in die Atmosphäre emittieren. Das wirksamste Mittel, diese Emissionen zu unterbinden, ist der Einsatz alternativer Kältemittel, die wenig bis kein Treibhauspotential aufweisen. Darunter fallen so genannte natürliche Kältemittel, wie Propan und Ammoniak, aber auch ungesättigte fluorierte (und teilweise chlorierte) Kohlenwasserstoffe (uHF(C)KW). Neben den Emissionen des Kältemittels als direkten Beitrag zum Treibhauspotential beim Betrieb einer Kälte- oder Klimaanlage, müssen die indirekten Emissionen, die bei der Erzeugung der benötigten elektrischen Energie anfallen, betrachtet werden.

In diesem Projekt wurde der „Total Equivalent Warming Impact" (TEWI) von Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen, die mit Kältemitteln mit einem Treibhauspotential unter 750 betrieben werden, berechnet. Dazu wurden technische Datenblätter von luft- und wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Temperaturbereich sowie Verflüssigungssätzen im mittleren Temperaturbereich mit teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) und Gemischen aus HFKW und uHFKW, reinen uHF(C)KW und natürlichen Kältemitteln verglichen. Insgesamt gab es nur geringe Unterschiede zwischen den Kältemittelarten hinsichtlich des TEWI innerhalb der verschiedenen Anlagentypen. Lediglich für einige kleinere wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit dem Kältemitteln HFKW-32 und Propan konnten deutlich höhere TEWIs im Vergleich zu anderen Kältemitteln beobachtet werden.

Diverse fluorierte Kältemittel können zur persistenten Trifluoressigsäure (TFA) abgebaut werden. Neuere Studien zeigen zudem, dass fluorierte Kältemittel das hochwirksame Treibhausgas HFKW-23 bilden können. TFA reichert sich im Grund- und Trinkwasser an und ist mit den heute verwendeten Wasseraufbereitungsverfahren nicht daraus entfernbar. Die langfristigen Umwelt- und Gesundheitsfolgen einer chronischen Exposition von Organismen mit TFA sind nicht abschließend geklärt. Der HFKW-23 trägt dagegen erheblich zur globalen Erwärmung bei. Für eine bessere Einschätzung der Umweltwirkung der untersuchten Kältemittel wurden in diesem Projekt deren theoretisch maximal möglichen TFA-Bildungsmengen berechnet.

Betrachtet man neben dem TEWI die Umweltauswirkungen der Abbauprodukte fluorierter Kältemittel, ist der Einsatz von natürlichen Kältemitteln in Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen aus der Perspektive des Klima- und Umweltschutzes klar vorzuziehen.

Abstract: Environmental and climate impacts of natural and halogenated refrigerants

Against the backdrop of global climate change, there is an urgent need to reduce greenhouse gas emissions. Fluorinated saturated refrigerants are powerful greenhouse gases that are emitted into the atmosphere to some degree when used in refrigeration and air conditioning systems. The most effective way of preventing these emissions is to use alternative refrigerants that have little or no global warming potential. These include so-called natural refrigerants, such as propane and ammonia, but also unsaturated fluorinated (and in some cases chlorinated) hydrocarbons. In addition to the emissions of the refrigerant as a direct contribution to the global warming potential when operating a refrigeration or air conditioning system, the indirect emissions that occur during the generation of the electrical energy needed must also be considered.

In this project, the "Total Equivalent Warming Impact" (TEWI) of chillers and condensing units operated with refrigerants with a global warming potential below 750 was calculated. For this purpose, technical data sheets of air-cooled and water-cooled chillers in the high (process) and low (comfort) temperature range and condensing units in the medium temperature range with partially fluorinated hydrocarbons (HFCs) and mixtures of saturated HFCs and unsaturated HFCs, pure unsaturated HFCs and HCFCs, and natural refrigerants were compared. Overall, there were only minor differences between the refrigerant types in terms of TEWI within the various system types. Only for some small water-cooled chillers with the refrigerants HFC-32 and propane were considerably higher TEWI observed compared to other refrigerants.

Various fluorinated refrigerants can degrade to form the persistent trifluoroacetic acid (TFA). Recent studies also show that fluorinated refrigerants can form the highly potent greenhouse gas HFC-23. TFA accumulates in groundwater and drinking water and cannot be removed from it. The long-term environmental and health consequences of chronic exposure of organisms to TFA have not been conclusively clarified. HFC-23, on the other hand, contributes significantly to global warming. For a better assessment of the environmental impact of the analysed refrigerants, their theoretical maximum possible TFA formation quantities were calculated.

If the environmental impact of degradation products of fluorinated refrigerants is considered alongside the TEWI, the use of natural refrigerants in chillers and condensing units is clearly preferable from the perspective of climate and environmental protection.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 9
Tabellenverzeichnis ... 11
Abkürzungsverzeichnis ... 12
Zusammenfassung ... 13
Summary ... 24
1 Hintergrund und Problemstellung ... 35
2 Ziel und Herangehensweise ... 39
2.1 Zielsetzung ... 39
2.2 Methodisches Vorgehen ... 39
2.2.1 Expertenbefragungen und Messebesuche ... 39
2.2.2 Theoretische Betrachtungen zur Effizienz ... 39
2.2.3 Analyse der technischen Datenblätter von Anlagenherstellern ... 40
3 Marktübersicht für Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze ... 45
3.1 Relevante Kältemittel ... 45
3.2 Marktsituation ... 49
3.3 Analyse der technischen Datenblätter ... 51
4 Vergleich und ökologische Bewertung – Technische Datenblätter ... 55
4.1 TEWI-Analyse ... 55
4.1.1 Flüssigkeitskühlsätze ... 55
4.1.1.1 Saisonaler TEWI ... 60
4.1.2 Verflüssigungssätze ... 63
4.1.3 TEWI im Verhältnis zur Kälteleistung ... 64
4.1.3.1 Saisonaler TEWI ... 67
4.2 Theoretische Betrachtungen zum TEWI ... 70
4.3 Energieeffizienz ... 74
4.3.1 Flüssigkeitskühlsätze ... 74
4.3.2 Verflüssigungssätze ... 77
4.4 Atmosphärischer Abbau fluorierter Kältemittel ... 79
4.4.1 Quantifizierung der potenziellen Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) ... 81
5 Synthese und Ausblick ... 85
6 Quellenverzeichnis ... 87
A Anhang ... 92
A.1 Spezifikationen und Ergebnisse der CYCLE_D-HX Berechnungen ... 92

A.2 Zusätzliche Auswertung der technischen Datenblätter..... 93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Berechnete Kälteleistungszahl (COP) und volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) verschiedener Kältemittel mit einem GWP <750 im Verhältnis zu R-410A 48
Abbildung 2: Gemeldete Gesamtverwendungsmengen von uHFKW, HFKW und FKW als Kältemittel nach UStatG in Deutschland 50
Abbildung 3: Angebot von HFKW und F-Gasen insgesamt in der EU (ohne Vereinigtes Königreich) 51
Abbildung 4: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart.....57
Abbildung 5: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart.....58
Abbildung 6: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart mit einer Kälteleistung <2.500 kW.....59
Abbildung 7: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart mit einer Kälteleistung >2.500 kW.....60
Abbildung 8: Saisonaler TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart 61
Abbildung 9: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für Verflüssigungssätze im mittleren Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart.63
Abbildung 10: TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel.....65
Abbildung 11: TEWI pro kW Kälteleistung über Nutzungsphase und Entsorgung für Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur.....67
Abbildung 12: Saisonaler TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel.....68
Abbildung 13: Berechnungen zum Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI in Abhängigkeit der Betriebsstunden der Anlage pro Jahr für alle untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze mit HFKW und Gemischen als Kältemittel 71

Abbildung 14: Mittlerer Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI in Abhängigkeit der CO_2-Belastung des Stroms und der Betriebsdauer der Anlagen pro Jahr....73
Abbildung 15: Energieeffizienz von Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur laut technischen Datenblättern nach Kältemittel....75
Abbildung 16: Energieeffizienz von Verflüssigungssätzen mit mittlerer Betriebstemperatur laut technischen Datenblättern nach Kältemittel....78
Abbildung 17: Stark vereinfachte schematische Darstellung der möglichen Wege des atmosphärischen Abbaus von uHFKW-1234ze(E), die zu TFA oder HFKW-23 führen können....81
Abbildung 18: Berechnete maximale TFA-Menge aus Emissionen von Kältemitteln aus den betrachteten Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen über die Nutzungsphase und bei der Entsorgung....82
Abbildung 19: Berechnete maximale TFA-Menge pro kW Kälteleistung aus Emissionen von Kältemitteln aus den betrachteten Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen über die Nutzungsphase und bei der Entsorgung....83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Modellierungen in dem Programm CYCLE_D-HX 40
Tabelle 2: Übersicht der Anlagenspezifikationen nach Ökodesign-Verordnungen.....41
Tabelle 3: TEWI-Berechnung.....42
Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Parameter je Gerät 43
Tabelle 5: Übersicht der potenziell verwendeten Kältemittel in Verflüssigungssätzen und Flüssigkeitskühlsätzen mit einem GWP unter 750 45
Tabelle 6: Physikalische Parameter und berechnete idealisierte Kälteleistungszahl (COP) und volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) verschiedener Kältemittel mit einem GWP <750.....47
Tabelle 7: Übersicht der analysierten Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze 52
Tabelle 8: Übersicht der Hersteller, Kältemittel und Kälteleistungsbereiche der untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze 53
Tabelle 9: Statistische Parameter der berechneten TEWI-Werte und Kälteleistungen für Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze 56
Tabelle 10: Saisonaler TEWI und Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel 62
Tabelle 11: TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur und Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur.....66
Tabelle 12: Saisonaler TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel 69
Tabelle 13: Parameter der TEWI-Simulation für die untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze mit HFKW und Gemischen als Kältemittel.....72
Tabelle 14: Effizienzparameter und Kälteleistung der untersuchten Flüssigkeitskühlsätze laut technischen Datenblättern 76
Tabelle 15: Effizienzparameter der untersuchten Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich laut technischen Datenblättern 79
Tabelle 16: Maximale TFA-Menge aus Emissionen über Nutzungsphase und Entsorgung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur und Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur.....84

Abkürzungsverzeichnis

CO_2eq	Kohlendioxid-Äquivalente
COP	Coefficient of Performance (Kälteleistungszahl)
ECHA	European Chemicals Agency (Europäische Chemikalienagentur)
EER	Energy Efficiency Ratio (Leistungszahl)
EL-LCCP	Enhanced and Localized Life Cycle Climate Performance (Evaluierungsmethode des CO_2-Fußabdrucks von u.a. Kälte- und Klimageräten über den Lebenszyklus)
EU	Europäische Union
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
F-Gas	Fluoriertes Treibhausgas
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon (Teilhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff)
HFC	Hydrofluorocarbon (Teilhalogenierter Fluorkohlenwasserstoff)
HFCKW	Teilhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff
HFE	Hydrofluorether
HFKW	Teilfluorierter Kohlenwasserstoff
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LCCP	Life Cycle Climate Performance (Klimaleistung über den gesamten Lebenszyklus)
ODS	Ozone Depleting Substance (Ozonabbauender Stoff)
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (per- and polyfluoroalkyl substances)
Q_{vol}	Volumetrische Kältekapazität
REACH	REACH-Verordnung (EG) 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Beschränkung und Zulassung von chemischen Stoffen in der EU („Registration, Evaluation, Restriction and Authorisation of Chemicals“)
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio (Jahresarbeitszahl im Kühlbetrieb; Komfortkühler)
SEPR	Seasonal Energy Performance Ratio (Jahresarbeitszahl; Prozesskühler)
TEWI	Total Equivalent Warming Impact (Gesamt-Treibhausäquivalente)
TFA	Trifluoressigsäure
UBA	Umweltbundesamt
uH(C)FC	Unsaturated hydro(chloro)fluorocarbon (ungesättigter Fluor(chlor)kohlenwasserstoff)
uHF(C)KW	Ungesättigter Fluor(chlor)kohlenwasserstoff
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention)
UStatG	Umweltstatistikgesetz

Zusammenfassung

Die Klimaziele der Europäischen Union sehen eine Senkung der Treibhausgasemissionen auf netto null bis 2050 vor (DG CLIMA 2019). Die Reduzierung der F-Gas-Emissionen soll hierfür einen substanziellen Beitrag leisten. International werden Produktion und Verwendung von HFKW im Rahmen des Beschlusses von Kigali unter dem Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht reguliert. In Europa sieht die Verordnung (EU) 2024/573 über fluorierte Treibhausgase (F-Gas-Verordnung) einen schrittweisen Ausstieg (Phase out) der am Markt verfügbaren Mengen an teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) bis zum Jahr 2050 sowie zahlreiche Verwendungs- und Inverkehrbringensverbote für F-Gase vor. Vor allem in der Kälte- und Klimatechnik, dem größten Anwendungssektor von HFKW, hat in den letzten Jahren der Einsatz von HFKW mit niedrigerem Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) sowie natürlichen Kältemitteln stark zugenommen. In vielen Anwendungen werden Neuanlagen nur noch mit Niedrig-GWP-Kältemitteln auf den Markt gebracht.

Ziel dieses Vorhabens war es, fundierte Informationen über die Umweltauswirkungen von konventionellen F-Gas-Kältemitteln und alternativen Lösungen für die Umsetzung des Montrealer Protokolls und des Beschlusses von Kigali bereit zu stellen, um einen Umstieg auf Zwischenlösungen, nämlich von ozonabbauenden HFCKW auf gesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) bzw. ungesättigte teilfluorierte und teilweise chlorierte Kohlenwasserstoffe (uHF(C)KW) und dann erst auf natürliche Kältemittel, zu vermeiden und damit Ressourcen einzusparen. Eine ganzheitliche Betrachtung der verfügbaren Produkte erfolgte für Verflüssigungssätze (engl. „condensing units“) und Flüssigkeitskühlsätze (engl. „chiller“). Hierbei konzentrierte sich das Vorhaben auf Anlagen, die mit natürlichen Kältemitteln sowie neuen halogenierten Stoffen und Mischungen mit einem Treibhauspotenzial unter 750 (gemäß 4. IPCC-Sachstandsbericht) betrieben werden.

Neben den direkten Treibhausgasemissionen der Kältemittel muss die Umweltwirkung der möglichen Abbauprodukte betrachtet werden. Relevant sind bei halogenierten Kältemitteln hier insbesondere die Trifluoressigsäure (TFA) sowie HFKW-23.

TFA gehört zur Stoffgruppe der Perfluoralkylsäuren und damit zu den per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) die auch als „Ewigkeitschemikalien“ (engl. „forever chemicals“) bezeichnet werden. TFA ist sehr stabil und damit hochgradig persistent und ist mit herkömmlichen Aufbereitungsmethoden nicht aus dem Trinkwasser zu entfernen. Damit stellt es eine Herausforderung für den Schutz von Gewässern, Trinkwasserressourcen und Böden dar. Weitere Einträge von TFA sollten daher so weit wie möglich vermieden werden, auch vor dem Hintergrund neuerer Toxizitätsstudien, die die Basis für eine beabsichtigte EU-verbindliche Einstufung von TFA und TFA-Salzen als „wahrscheinlich reproduktionstoxisch beim Menschen“ (ECHA 2024a) bilden.

Im März 2023 wurde von der Europäischen Chemikalienbehörde (ECHA) ein Vorschlag zur weitgehenden Beschränkung der Stoffgruppe der PFAS veröffentlicht (ECHA 2023). Der Vorschlag befindet sich derzeit im Konsultationsverfahren bei den Gremien der ECHA, eine Entscheidung wird im Jahr 2025 erwartet. Die Beschränkung würde EU-weit gelten. Viele Kältemittel, weitere fluorierte Gase und Perfluoralkylsäuren wie TFA zählen zur Gruppe der PFAS und würden nach einer Übergangsphase nicht oder nur noch beschränkt verwendet werden dürfen. Es ist daher sinnvoll, rechtzeitig Alternativen zu prüfen, die ohne PFAS auskommen.

HFKW-23 ist ein extrem starkes Treibhausgas mit einem Treibhauspotenzial („Global Warming Potential“, GWP) von 14.800 (IPCC 2007). Die Erkenntnis der möglichen Bildung von HFKW-23

als Abbauprodukt diverser, heute eingesetzter HFKW und uHF(C)KW ist relativ jung. Bisher werden die jeweiligen Abbauprodukte für die Berechnung der GWPs von Kältemitteln nicht berücksichtigt. Für halogenierte Stoffe, die HFKW-23 beim atmosphärischen Abbau bilden, wäre das GWP in jedem Fall höher als bisher berechnet. Dies könnte insbesondere für die als nicht bzw. kaum treibhausrelevant beworbenen uHF(C)KW von Bedeutung sein.

Methodik

Das methodische Vorgehen zur Bearbeitung des Vorhabens umfasste zunächst die Erstellung einer Marktübersicht, die auf Online-Recherchen und Messebesuchen beruht. Relevante Messen waren die „Chillventa“ in Nürnberg (Oktober 2022), die „EuroShop“ in Düsseldorf (März 2023) und die Internationale Sanitär- und Heizungsmesse „ISH“ in Frankfurt (März 2023). Es wurden technische Parameter für am Markt verfügbare Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze verschiedener Hersteller weltweit erhoben, in einer Übersichtstabelle zusammengeführt und um Angaben aus den technischen Datenblättern ergänzt, sofern möglich.

Die darauf aufbauende Datenauswertung stellt im Wesentlichen eine Analyse der technischen Datenblätter dar, die von Anlagenherstellern für alle Produkte veröffentlicht werden. Darauf basierend wurde der „Total Equivalent Warming Impact“ (TEWI) für jede Anlage errechnet, um Vergleichbarkeit herzustellen. Sofern bestimmte Parameter zur Berechnung nicht in den technischen Datenblättern genannt waren, wurden Annahmen getroffen bzw. Quellen jenseits der technischen Datenblätter herangezogen. Theoretische Berechnungen wurden zum besseren Verständnis der Haupteinflussfaktoren des Gesamt-TEWI (d.h. direkter plus indirekter Anteil) ergänzend für verschiedene Flüssigkeitskühlsätze mit verschiedenen Kältemitteln mit einem GWP <750 und verschiedenen Kälteleistungen durchgeführt.

Eine Marktübersicht wurde erstellt, die ausschließlich Anlagen mit den natürlichen Kältemitteln Kohlenwasserstoffe (z.B. Propan, R-290), Kohlendioxid (CO_2, R-744) und Ammoniak (NH_3, R-717) sowie neuen halogenierten Stoffen und Mischungen mit einem GWP <750 umfasst. Daten zu 46 Verflüssigungssätzen und 177 Flüssigkeitskühlsätzen wurden erhoben. Hiervon waren für 38 Verflüssigungssätze und 158 Flüssigkeitskühlsätze Informationen zur Füllmenge vorhanden, die notwendig war, um eine TEWI-Berechnung vorzunehmen. Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich und Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Temperaturbereich wurden mit allen drei untersuchten Kältemittelgruppen (HFKW und Gemische, uHF(C)KW sowie natürliche Kältemittel) identifiziert. Natürliche Kältemittel und uHF(C)KW waren für alle Anlagenarten verfügbar, deckten jedoch nicht immer den gesamten Kälteleistungsbereich ab.

Tabelle 0-1: Übersicht der analysierten Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze

Anlagenart	Betriebstemperaturbereich	Anzahl der Hersteller[1]	Anzahl der Anlagen[1]	Geräte mit HFKW und Gemischen[1]	Geräte mit uHF(C)KW[1]	Geräte mit natürlichen Kältemitteln[1]
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Niedrig (Prozesskühlung)	1 (1)	4 (4)	-	-	4 (4)
	Mittel (Prozesskühlung)	2 (2)	11 (11)	-	-	11 (11)
	Hoch (Prozess) / Niedrig (Komfort)	14 (15)	81 (91)	34 (34)	14 (16)	33 (41)
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Mittel (Prozess)	2 (2)	10 (10)	-	-	10 (10)
	Hoch (Prozess) / Niedrig (Komfort)	12 (14)	52 (61)	22 (22)	12 (12)	18 (27)
Summe Flüssigkeitskühlsätze	-	**20 (21)**	**158 (177)**	**56 (56)**	**26 (28)**	**76 (93)**
Verflüssigungssätze	Niedrig	2 (2)	9 (9)	-	-	9 (9)
	Mittel	5 (6)	29 (37)	12 (19)	2 (3)	15 (15)
Summe Verflüssigungssätze	-	**5 (6)**	**38 (46)**	**12 (19)**	**2 (3)**	**24 (24)**

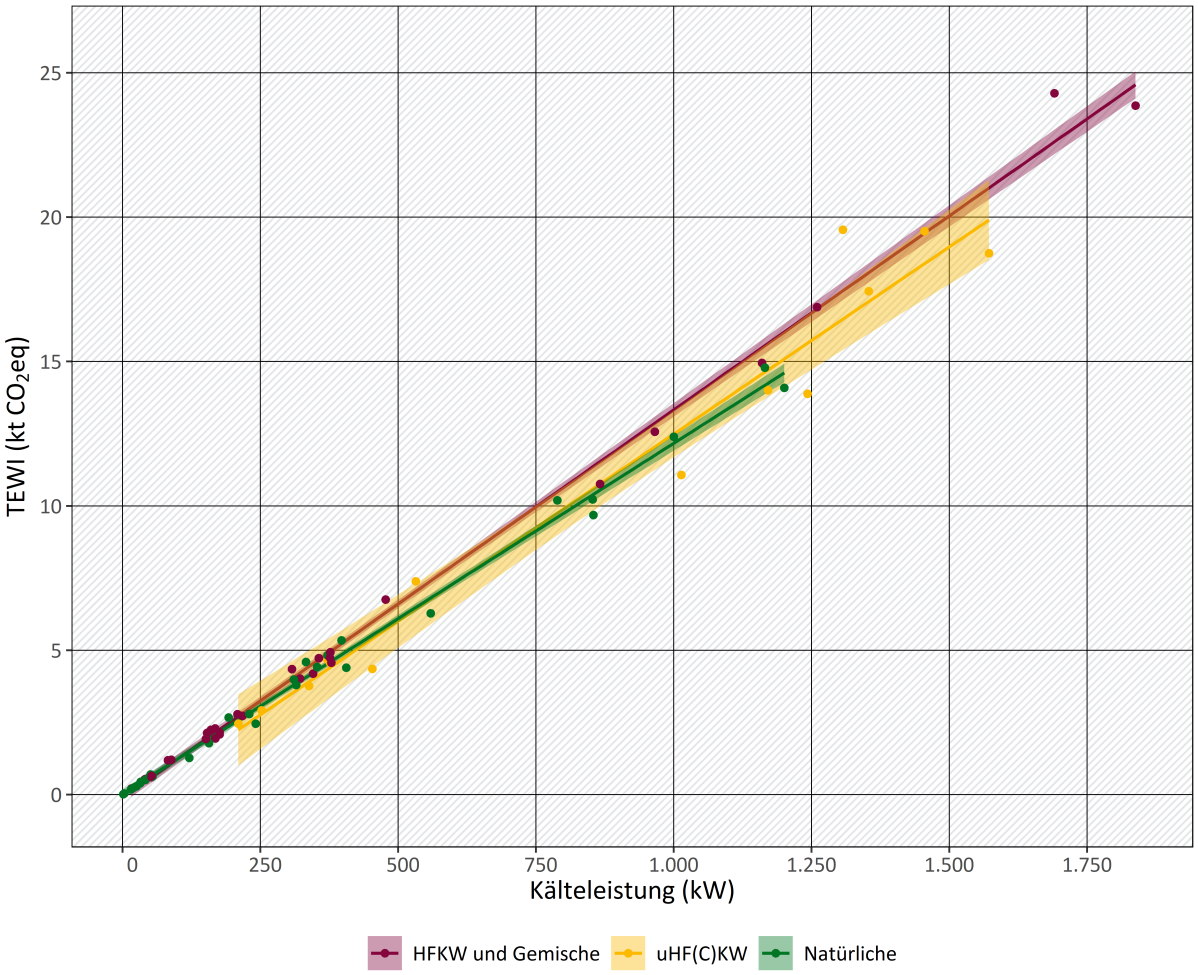
[1] In Klammern ist die Anzahl inklusive der Geräte, für die keine Füllmenge verfügbar war, angegeben.

Ergebnisse der TEWI-Berechnungen

Für luft- und wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. tiefen (Komfort) Temperaturbereich konnten genug Daten gesammelt werden, um TEWIs für die drei verschiedenen Kältemittelgruppen zu berechnen und diese zu vergleichen.

Für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze ließ sich mit zunehmender Kälteleistung ein marginal höherer TEWI von Geräten mit HFKW und Gemischen im Vergleich zu solchen mit uHF(C)KW und natürlichen Kältemitteln erkennen. Die Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen waren in den kleinen Leistungsbereichen noch geringer ausgeprägt, wobei keine uHF(C)KW-Anlagen im Leistungsbereich unter 210 kW vorlagen. Im größeren Leistungsbereich von mehr als 1.250 kW waren dagegen keine Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in der Auswertung enthalten. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und uHF(C)KW wiesen über den vergleichbaren Kälteleistungsbereich nur sehr geringe Unterschiede auf.

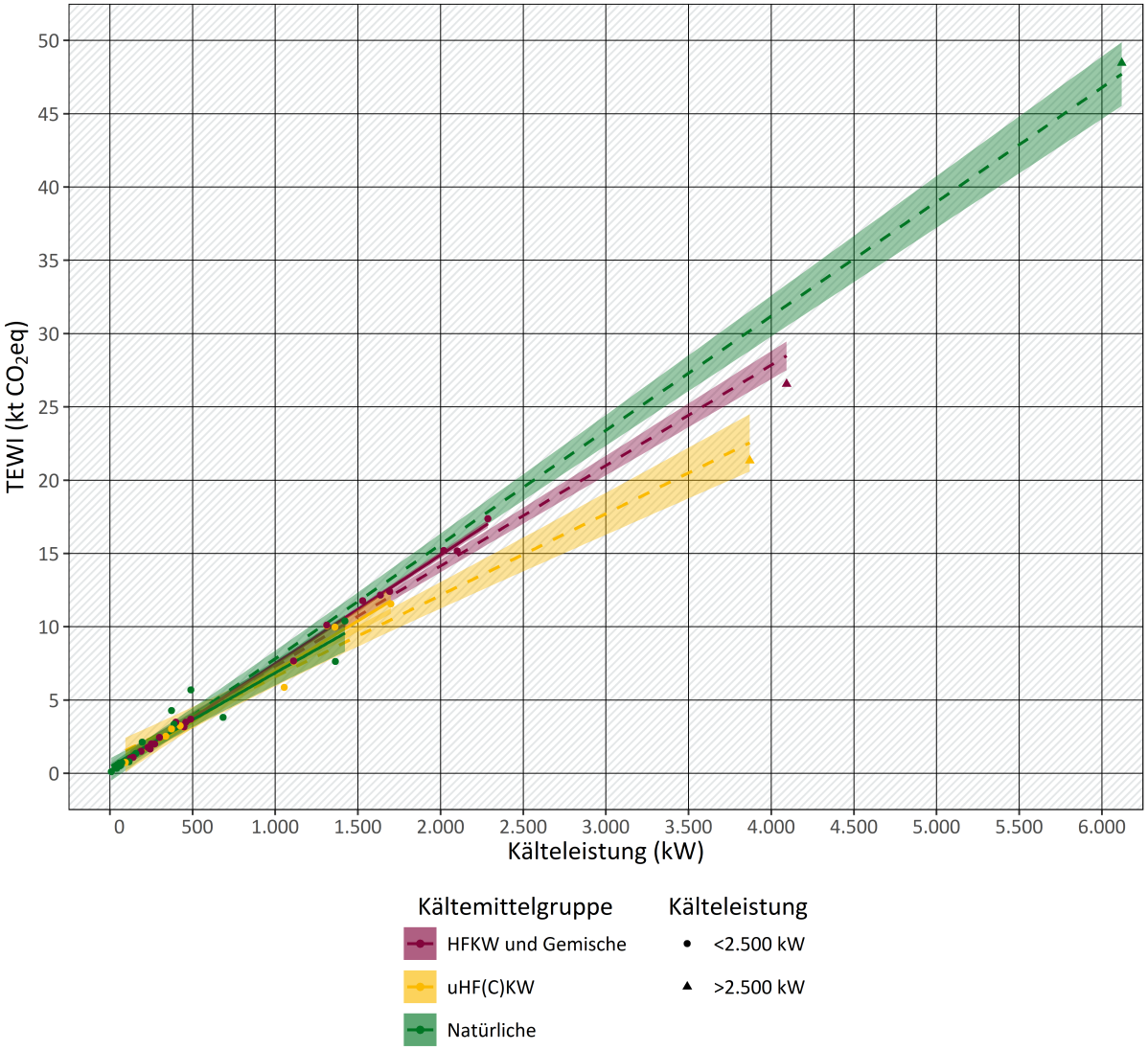
Abbildung 0-1: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung luftgekühlter Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

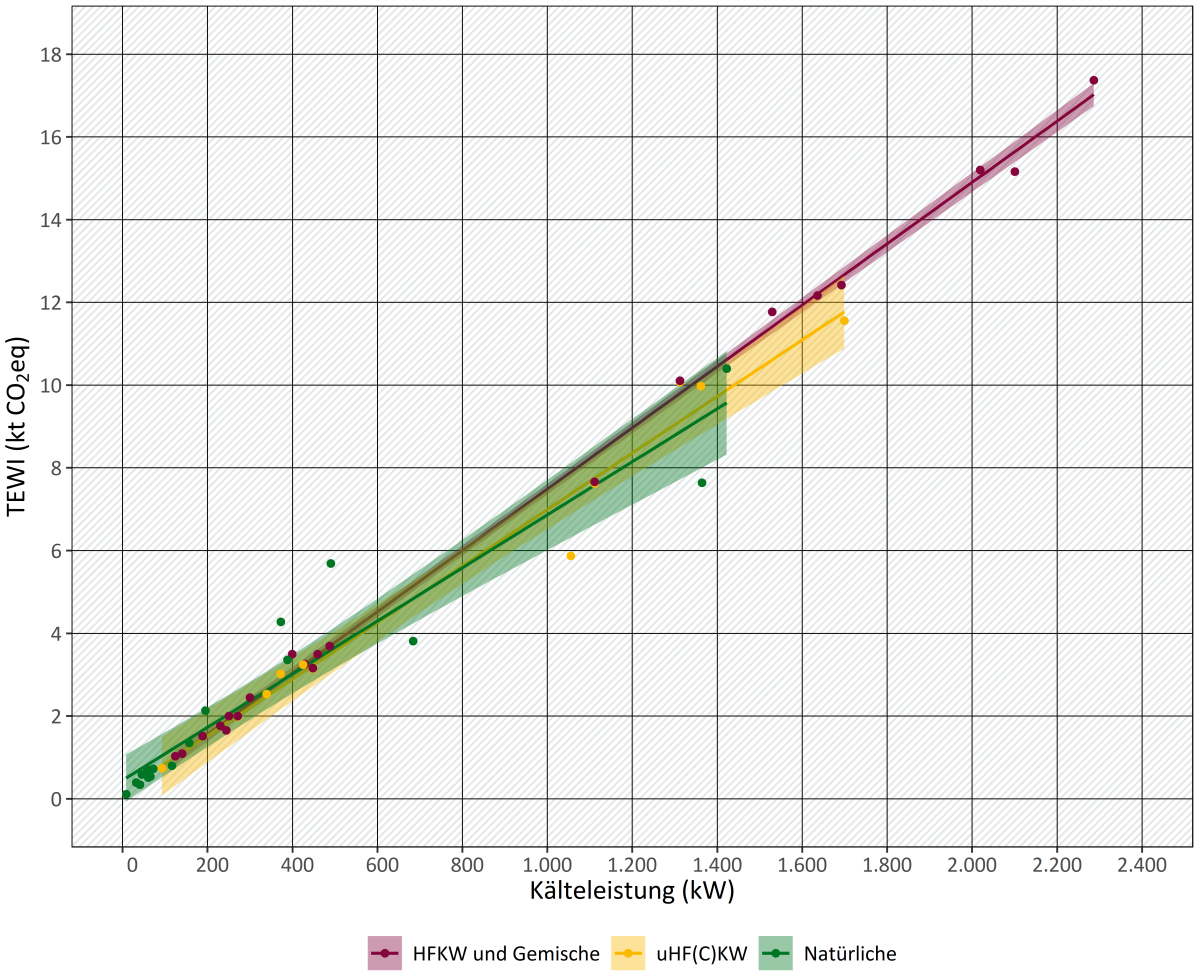
Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze gab es über den gesamten Leistungsbereich einen Trend zu höheren TEWIs für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln, der allein durch eine sehr große Anlage mit 6.119 kW bedingt wurde. Im Leistungsbereich <2.500 kW gab es nahezu keine Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen, mit einem Trend hin zu niedrigeren TEWIs für Anlagen mit natürlichen Kältemitteln. Insbesondere bis 500 kW Kälteleistung hatte die Auswahl des Kältemittels keinen erkennbaren Einfluss auf den TEWI. Im Leistungsbereich zwischen ca. 1.000 und 2.400 kW hatten HFKW und Gemisch-Anlagen die höchsten TEWIs bei einem kleinen Konfidenzintervall. Für uHF(C)KW-Anlagen und solche mit natürlichen Kältemitteln waren jedoch weniger Daten vorhanden und auch nicht über den gesamten Leistungsbereich. Daher kann ein Unterschied zwischen den Kältemittelarten hier nur sehr bedingt abgeleitet werden. Für Anlagen mit mehr als 2.500 kW Kälteleistung waren nur sehr wenige Daten verfügbar, was einen Vergleich erschwerte.

Abbildung 0-2: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien für alle Anlagen (durchgezogene Linien) und Anlagen mit einer Kälteleistung <2.500 kW (gestrichelte Linien) basieren auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

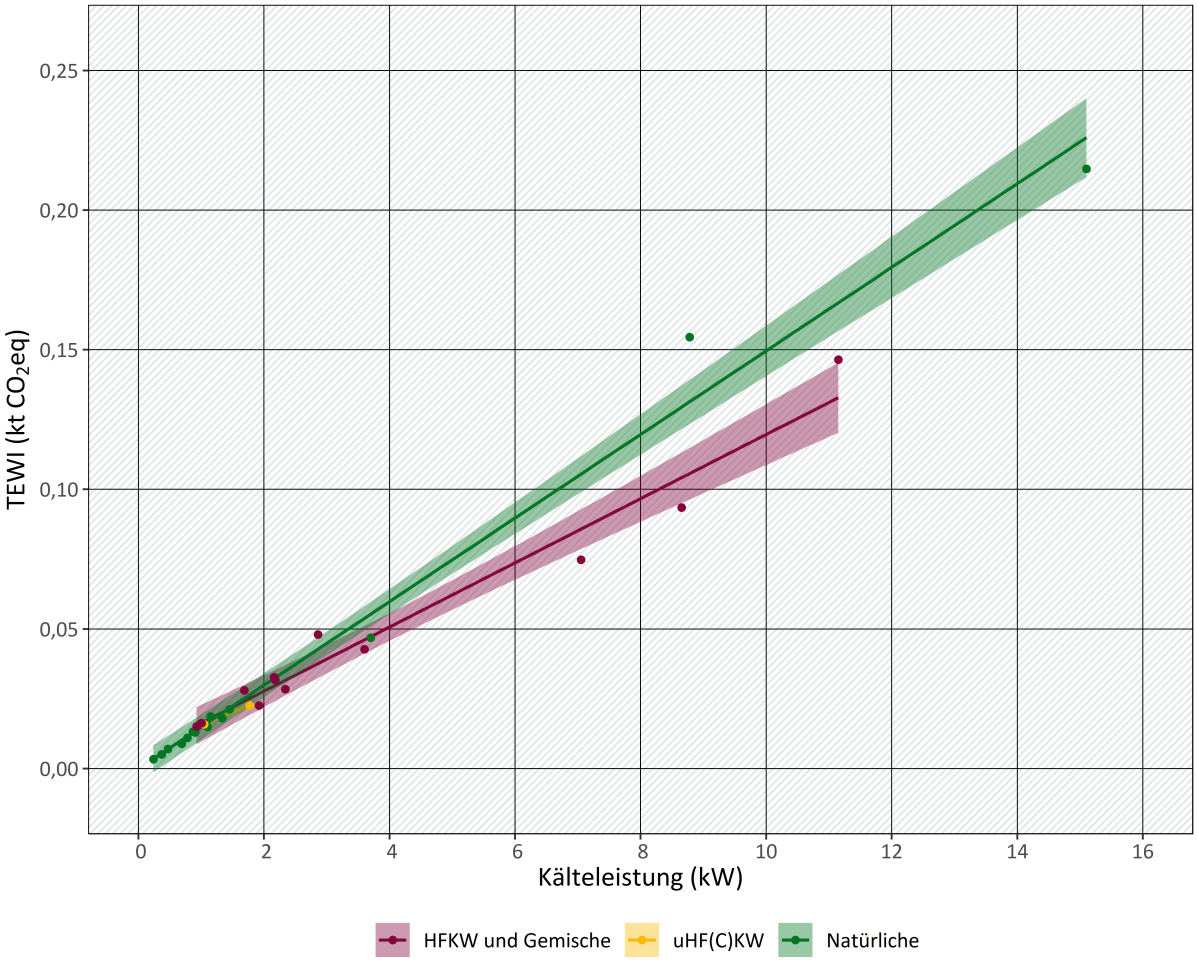
Abbildung 0-3: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart mit einer Kälteleistung <2.500 kW



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Im Bereich der Verflüssigungssätze lagen nur Daten für Anlagen mit verschiedenen Kältemittelarten im mittleren Temperaturbereich bis ca. 15 kW vor. Im Leistungsbereich unter ca. 2 kW waren erheblich mehr Anlagen mit natürlichen Kältemitteln vertreten, und es war kein Unterschied zwischen den Kältemittelarten erkennbar. Für die Gruppe der uHF(C)KW waren jedoch nur zwei Anlagen vertreten, was einen Vergleich erschwert. Mit zunehmender Kälteleistung zeigte sich im Trend ein höherer TEWI von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln im Vergleich zu solchen mit HFKW und Gemischen. Die Datengrundlage ist in diesem Leistungsbereich jedoch sehr klein – es konnten nur zwei Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und drei Anlagen mit HFKW und Gemischen über 4 kW Kälteleistung in den Vergleich einbezogen werden.

Abbildung 0-4: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung von Verflüssigungssätzen im mittleren Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

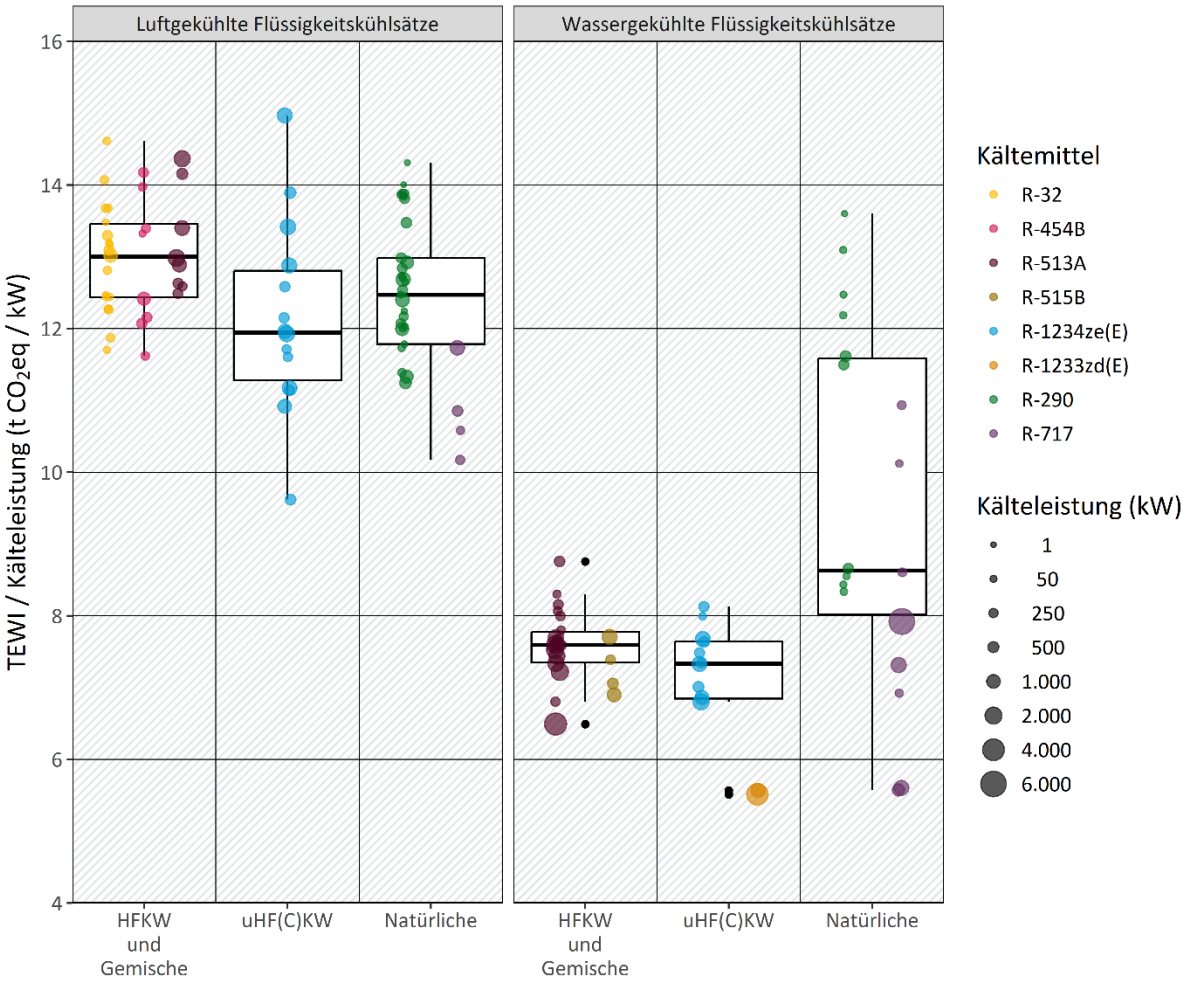
TEWI im Verhältnis zur Kälteleistung

Um die Kältemittelgruppen besser direkt miteinander vergleichen zu können, wurde ein Quotient aus dem TEWI und der Kälteleistung der jeweiligen Anlage für alle Geräte nach Anlagentyp gebildet. Dies wurde nur für jene Anlagentypen berechnet, für die ein Vergleich der Kältemittelart möglich war. Dieser Quotient ist ein Maß für die Emissionen in Kohlendioxid-Äquivalenten (CO_2eq), die eine Kälteanlage pro kW Kälteleistung über ihre Nutzungsphase und bei der Entsorgung erzeugt. Ein niedriger Quotient bedeutet damit eine geringere Umweltbelastung bei gleicher Kälteleistung.

Bei den luftgekühlten Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur wiesen Anlagen mit HFKW und Gemischen den höchsten Mittelwert und die kleinste Streuung auf. Für Anlagen mit uHF(C)KW, die in diesem Fall ausschließlich mit uHFKW-1234ze(E) befüllt waren, war die Streuung in den Daten erheblich größer und der Mittelwert niedriger. Bei den Anlagen mit natürlichen Kältemitteln zeigte sich eine Auftrennung nach Kältemittel. Geräte mit Propan (R-290) wiesen meist eine höhere Emission pro kW Kälteleistung auf als solche mit Ammoniak (R-717).

Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur zeigte sich ein heterogenes Bild bei Anlagen mit HFKW und Gemischen. Geräte mit R-513A und R-515B wiesen eine geringe Streuung im Bereich von ca. 7 bis 9 t CO_2eq pro kW Kälteleistung auf. Für Anlagen mit uHF(C)KW zeigte sich eine Aufspaltung im Quotienten, wobei uHFKW-1234ze(E)-Anlagen höhere Emissionen pro kW Kälteleistung erzeugten als Anlagen mit uHFCKW-1233zd(E). Ähnlich verhielt es sich bei Anlagen mit R-290 im Vergleich zu solchen mit R-717. Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak hatten mit wenigen Ausnahmen einen geringeren Quotienten als vergleichbare Geräte mit Propan, wobei diese meist eine kleinere Kälteleistung aufwiesen. Auffallend war auch die große Streuung im Quotienten bei Anlagen mit natürlichen Kältemitteln. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass für Propan teilweise noch keine ausreichende Optimierung der Technologie auf das Kältemittel stattgefunden hat, während das bei Ammoniak in der Regel der Fall ist.

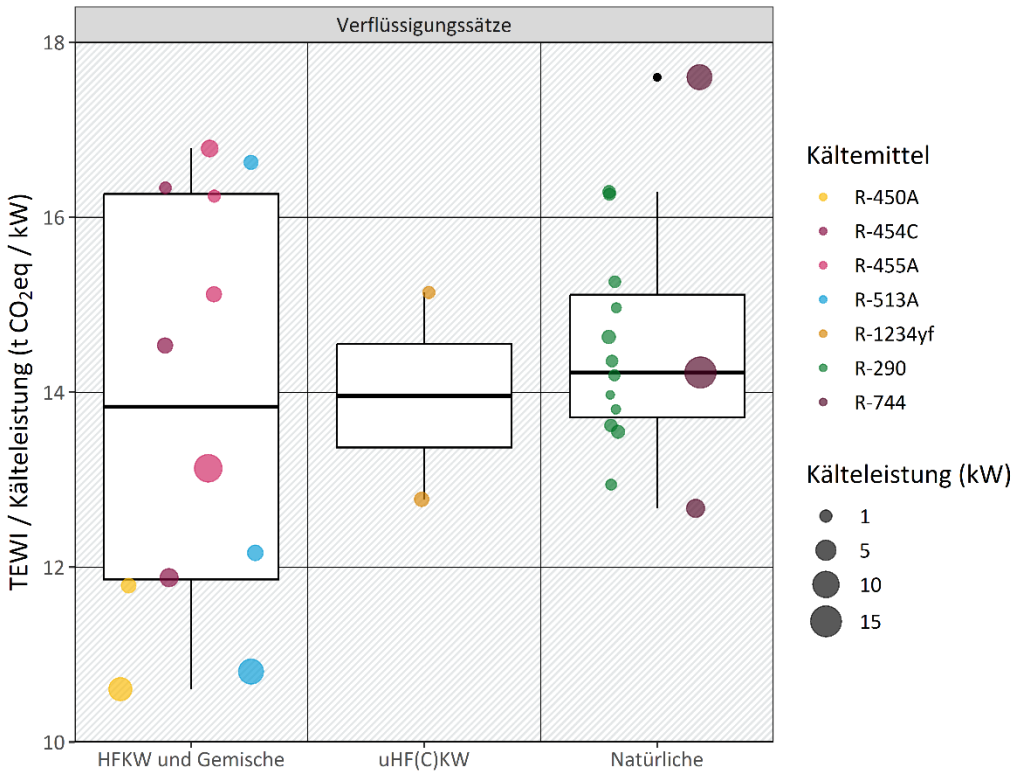
Abbildung 0-5: Emissionen in t CO_2eq pro kW Kälteleistung über Nutzungsphase und Entsorgung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur waren teilweise nur sehr wenige je Kältemittel zu ermitteln. Während Geräte mit HFKW und Gemischen eine große Streuung aufwiesen, hatten sie im Mittel den kleinsten Quotienten aus TEWI und Kälteleistung. Innerhalb dieser Kältemittelgruppe ließ sich lediglich ein gewisser Trend bezüglich Anlagen mit R-450A und R-455A erkennen, wobei erstere stets niedrigere Quotienten aufwiesen. Hinsichtlich natürlicher Kältemittel war klar erkennbar, dass Propan (R-290) nur in kleinen Anlagen Verwendung findet, während CO_2 (R-744) in größeren Anlagen eingesetzt wird. Die Auswahl des Kältemittels hat hier aber keinen Einfluss auf die Emissionen in CO_2eq pro kW Kälteleistung. Im direkten Vergleich hatten nur Anlagen mit R-450A einen geringeren TEWI pro kW Kälteleistung als Anlagen mit natürlichen Kältemitteln. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass nur zwei R-450A-Anlagen berücksichtigt werden konnten, was einen Vergleich erschwert.

Abbildung 0-6: Emissionen in t CO_2eq pro kW Kälteleistung über Nutzungsphase und Entsorgung für Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Energieeffizienz

Die weitere Datenauswertung zeigte, dass der direkte Anteil des Gesamt-TEWI mit zunehmenden Betriebsstunden exponentiell abfällt. Bereits ab 10 % (877 Stunden im Jahr) Betriebsdauer hatten alle Anlagen im Mittel einen direkten TEWI-Anteil von weniger als 10 %. Zwischen den Anlagentypen ließen sich Unterschiede erkennen, wobei luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze einen niedrigeren direkten TEWI-Anteil hatten als wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze. Verflüssigungssätze hatten im direkten Vergleich den höchsten direkten TEWI-Anteil, gefolgt von wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen. Luftgekühlte

Flüssigkeitskühlsätze hatten dagegen einen deutlich niedrigeren maximalen Anteil am direkten TEWI. Daraus folgt, dass der maßgebliche Beitrag zum Gesamt-TEWI dem indirekten TEWI entstammt. Folglich ist hinsichtlich der Klimarelevanz die Effizienz der Anlage von zentraler Bedeutung.

Die allgemeine (COP/EER) und saisonale (SEER und SEPR) Energieeffizienz der untersuchten Anlagen war laut Datenblättern relativ einheitlich je nach Gerätetyp und Kälteleistung. Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak (luft- und wassergekühlt) und uHFCKW-1233zd(E) (wassergekühlt) waren besonders effizient. Dieser Umstand war nicht unerwartet, da diese Kältemittel hohe theoretisch berechnete Effizienzen aufwiesen. Für Ammoniak lagen jedoch keine saisonalen Effizienzen für luftgekühlte Anlagen vor. Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak wiesen eine große Streuung in der allgemeinen Energieeffizienz auf, hatten jedoch die höchsten saisonalen Energieeffizienzen. Propan als Kältemittel wurde nur in eher kleinen Anlagen gefunden, wobei die allgemeine und saisonale Energieeffizienz für luftgekühlte Anlagen vergleichbar mit denen der F-Gas-Anlagen war. Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze waren die Effizienzen im Schnitt niedriger als die vergleichbarer Anlagen mit R-515B und teilweise uHFKW-1234ze(E). Anlagen mit R-513A hatten im Median einen höheren SEER als Propananlagen, zeigten jedoch eine große Streuung, die alle Propananlagen einschloss. Der SEPR war vergleichbar zwischen R-513A- und Propananlagen, wobei der Median bei Propananlagen höher lag.

Abbauprodukte fluorierter Kältemittel

Als weiterer Parameter für die ökologische Bewertung wurden mögliche Abbauprodukte der untersuchten Kältemittel betrachtet. Fluorierte Kältemittel können über verschiedene Abbaupfade in der Atmosphäre das extrem starke Treibhausgas HFKW-23 bzw. das hochpersistente PFAS Trifluoressigsäure (TFA) bilden. Während ein atmosphärischer Abbau initiiert durch OH-Radikale zur Bildung von HFKW-23 oder TFA führen kann, besteht die Möglichkeit einer Bildung von HFKW-23 bei einem durch Ozon (O_3) initiierten Abbau.

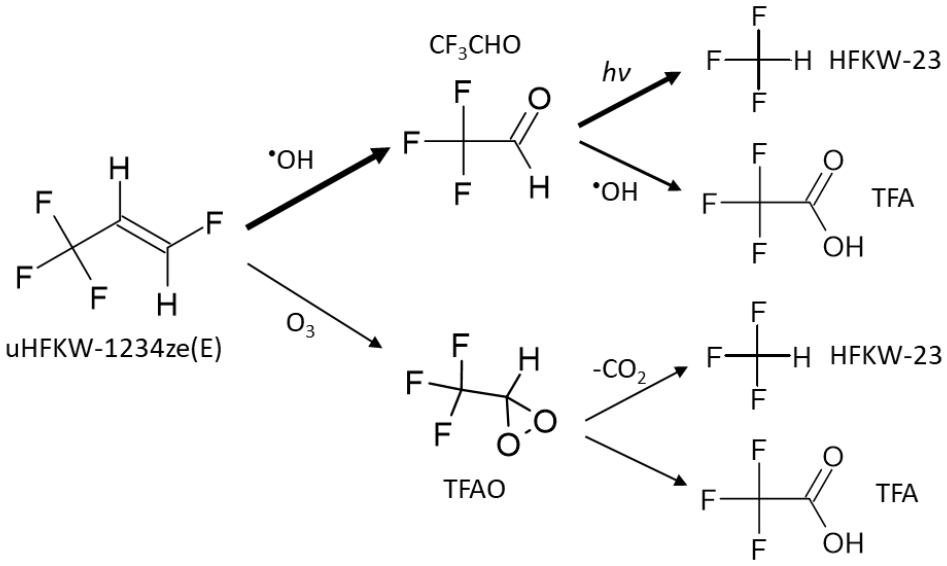
Für den uHFKW-1234ze(E) haben Thomson et al. (2024) ein indirektes GWP über den Ozonabbau zu HFKW-23 von ca. 6 ermittelt und kommen unter Einbeziehung aller Abbaupfade zu einem Gesamt-GWP (direkt und indirekt) von ca. 20.

Basierend auf errechneten TFA-Bildungspotenzialen wurden für die untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze jeweils die theoretisch möglichen maximalen TFA-Mengen aus den Emissionen während der Nutzungsphase und bei der Entsorgung ermittelt.

Während natürliche Kältemittel kein TFA bilden, führen die Emissionen aus Anlagen mit HFKW und Gemischen sowie uHF(C)KW zu teilweise großen Mengen an TFA. Besonders hervorstechend ist das Kältemittelgemisch R-513A, das aus 44 % HFKW-134a und 56 % uHFKW-1234yf besteht. Beide Komponenten bilden beim atmosphärischen Abbau TFA. Von den hier untersuchten HFKW bildet nur HFKW-32 kein TFA beim atmosphärischen Abbau.

Flüssigkeitskühlsätze mit uHF(C)KW waren zumeist größere Anlagen mit großen Füllmengen und entsprechend höheren Emissionen. Die maximal gebildete TFA-Menge ist daher trotz einer Bildungsrate von nur 10 % relativ hoch. Verflüssigungssätze haben dagegen eine deutlich kleinere durchschnittliche Füllmenge, weshalb die gebildete TFA-Menge je Anlage im Vergleich mit den Flüssigkeitskühlsätzen gering ausfällt. Auf die Kälteleistung bezogen weisen Verflüssigungssätze mit fluorierten Kältemitteln jedoch die höchsten TFA-Mengen auf.

Abbildung 0-7: Stark vereinfachte schematische Darstellung der möglichen Wege des atmosphärischen Abbaus von uHFKW-1234ze(E), die zu TFA oder HFKW-23 führen können



Anmerkung: Abbaupfad über OH-Radikale (•OH) zu Trifluoracetaldehyd (CF_3CHO) und Photolyse (*hv*) zu HFKW-23 aus Pérez-Peña et al. (2023), über OH-Radikale zu CF_3CHO und OH-Radikale zu TFA aus Sulbaek Andersen et al. (2004), und über Ozon (O_3) zu Trifluormethyldioxiran (TFAO) und HFKW-23 sowie TFA aus McGillen et al. (2023).
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den genannten Quellen, Öko-Recherche

Bezogen auf die gesamte Nutzungsphase und die Entsorgung einer Anlage erzeugen luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze 11-27 kg TFA, was ca. 0,01-0,03 kg pro kW Kälteleistung entspricht. Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze waren die Werte mit 15-104 kg TFA, bzw. 0,01-0,1 kg/kW Kälteleistung etwas höher. Verflüssigungssätze wiesen die niedrigste absolute TFA-Menge mit 0,4-1,5 kg auf, hatten jedoch bezogen auf die Kälteleistung mit 0,3-0,5 kg/kW die größten Mengen.

Abschließende Betrachtung

Die Auswertung der technischen Datenblätter verschiedener Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze ergab weitreichend vergleichbare TEWIs, wobei nicht für alle Leistungsbereiche und Temperaturbereiche genügend Anlagen für einen Vergleich verfügbar waren. In den untersuchten Bereichen zeigte sich, dass in allen Fällen Anlagen mit natürlichen Kältemitteln mit vergleichbaren Effizienzen und damit TEWIs zur Verfügung stehen. Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im niedrigen (Prozess) bzw. hohen (Komfort) Temperaturbereich konnten Verbesserungspotenziale für Anlagen mit dem Kältemittel Propan ausgemacht werden. Ebenso für Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich, für Anlagen mit Propan und CO_2, wobei der Unterschied zu Anlagen mit fluorierten Kältemitteln hier nicht sehr ausgeprägt war.

Die verfügbare Literatur zu den Emissionen in CO_2-Äquivalenten, die bei der Herstellung der verschiedenen Kältemittel anfallen, war stark limitiert, ergab jedoch eine klare Tendenz hin zu deutlich niedrigeren Emissionen für natürliche im Vergleich zu fluorierten Kältemitteln.

Bezieht man die potenziellen umweltgefährdenden Abbauprodukte der fluorierten Kältemittel mit ein, ergibt sich für Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze aus Umweltsicht somit eine klare Empfehlung zur Verwendung natürlicher Kältemittel.

Summary

The European Union's climate targets envisage a reduction in greenhouse gas emissions to net zero by 2050 (DG CLIMA 2019). The reduction of F-gas emissions should make a substantial contribution to this. Internationally, the production and use of HFCs is regulated as part of the Kigali Amendment to the Montreal Protocol to protect the ozone layer. In Europe, Regulation (EU) 2024/573 on fluorinated greenhouse gases (F-gas Regulation) provides for a gradual phase-out of the quantities of hydrofluorocarbons (HFCs) available on the market by 2050 as well as numerous bans on the use and placing on the market of F-gases. Particularly in refrigeration and air conditioning technology, the largest application sector for HFCs, the use of HFCs with a lower global warming potential (GWP) and natural refrigerants has increased significantly in recent years. In many applications, new systems are only brought onto the market with low-GWP refrigerants.

The aim of this project was to provide sound information on the environmental impact of conventional F-gas refrigerants and alternative solutions for the implementation of the Montreal Protocol and its Kigali Amendment in order to avoid a switch to intermediate solutions, namely from ozone-depleting HCFCs to saturated hydrofluorocarbons (HFCs) or unsaturated hydrofluorocarbons and partially chlorinated hydrofluorocarbons (uH(C)FCs) and only then to natural refrigerants, and thus save resources. A holistic analysis of the available products was carried out for condensing units and chillers. The project focussed on systems that are operated with natural refrigerants as well as new halogenated substances and mixtures with a global warming potential of less than 750 (according to the 4th IPCC Assessment Report).

In addition to the direct greenhouse gas emissions of the refrigerants, the environmental impact of the possible degradation products must also be considered. In the case of halogenated refrigerants, trifluoroacetic acid (TFA) and HFC-23 are particularly relevant here.

TFA belongs to the perfluoroalkyl acids group of substances and thus to the per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), which are also known as ‘forever chemicals’. TFA is very stable and therefore highly persistent and cannot be removed from drinking water using conventional treatment methods. This makes it a challenge for the protection of water bodies, drinking water resources and soils. Further inputs of TFA should therefore be avoided as far as possible, also against the background of recent toxicity studies, which form the basis for an intended EU-binding classification of TFA and TFA salts as ‘probably toxic to reproduction in humans’ (ECHA 2024a).

In March 2023, the European Chemicals Agency (ECHA) published a proposal for the extensive restriction of the PFAS substance group (ECHA 2023). The proposal is currently undergoing a consultation process with the ECHA committees, and a decision is expected in 2025. The restriction would apply throughout the EU. Many refrigerants, other fluorinated gases and perfluoroalkyl acids such as TFA belong to the PFAS group and would be banned or restricted after a transitional phase. It therefore makes sense to examine alternatives that do not contain PFAS in good time.

HFC-23 is an extremely powerful greenhouse gas with a global warming potential (GWP) of 14,800 (IPCC 2007). The realization of the possible formation of HFC-23 as a degradation product of various HFCs and uH(C)FCs used today is relatively recent. To date, the respective degradation products have not been taken into account when calculating the GWPs of refrigerants. For halogenated substances that form HFC-23 during atmospheric degradation, the GWP would in any case be higher than previously calculated. This could be of particular significance for uH(C)FCs, which are advertised as having little or no greenhouse effect.

Methods

The methodological approach to the project initially involved creating a market overview based on online research and trade fair visits. Relevant trade fairs were “Chillventa” in Nuremberg (October 2022), “EuroShop” in Düsseldorf (March 2023) and the International Sanitary and Heating Trade Fair “ISH” in Frankfurt (March 2023). Technical parameters for condensing units and liquid chillers available on the market from various manufacturers worldwide were collected, compiled in an overview table and supplemented with information from the technical data sheets where possible.

The data evaluation based on this is essentially an analysis of the technical data sheets published by system manufacturers for all products. Based on this, the “Total Equivalent Warming Impact” (TEWI) was calculated for each system in order to ensure comparability. If certain parameters for the calculation were not mentioned in the technical data sheets, assumptions were made or sources beyond the technical data sheets were used. Theoretical calculations were also carried out for various chillers with different refrigerants with a GWP <750 and different cooling capacities in order to better understand the main influencing factors of the total TEWI (i.e. direct plus indirect share).

A market overview was compiled that only includes systems with the natural refrigerants hydrocarbons (e.g. propane, R-290), carbon dioxide (CO_2, R-744) and ammonia (NH_3, R-717) as well as new halogenated substances and mixtures with a GWP <750. Data was collected on 46 condensing units and 177 chillers. Of these, information on the filling quantity was available for 38 condensing units and 158 chillers, which was necessary to carry out a TEWI calculation. For condensing units, units with all three refrigerant groups examined (HFCs and mixtures, uH(C)FCs and natural refrigerants) were found for systems in the medium temperature range and for liquid chillers in the high (process) and low (comfort) temperature range. Natural refrigerants and uH(C)FC were available for all system types, but did not always cover the entire refrigeration capacity range.

Table 0-1: Overview of the analyzed condensing units and liquid chillers

Type of equipment	Operating temperature	Number of manufacturers[1]	Number of units[1]	Units with HFCs and mixtures[1]	Units with uH(C)FCs[1]	Units with natural refrigerants[1]
Air-cooled liquid chillers	Low (process cooling)	1 (1)	4 (4)	-	-	4 (4)
	Medium (process cooling)	2 (2)	11 (11)	-	-	11 (11)
	High (process) / Low (comfort)	14 (15)	81 (91)	34 (34)	14 (16)	33 (41)
Water-cooled liquid chillers	Medium (process)	2 (2)	10 (10)	-	-	10 (10)
	High (process) / Low (comfort)	12 (14)	52 (61)	22 (22)	12 (12)	18 (27)
Sum of liquid chillers	-	**20 (21)**	**158 (177)**	**56 (56)**	**26 (28)**	**76 (93)**
Condensing units	Low	2 (2)	9 (9)	-	-	9 (9)
	Medium	5 (6)	29 (37)	12 (19)	2 (3)	15 (15)
Sum of condensing units	-	**5 (6)**	**38 (46)**	**12 (19)**	**2 (3)**	**24 (24)**

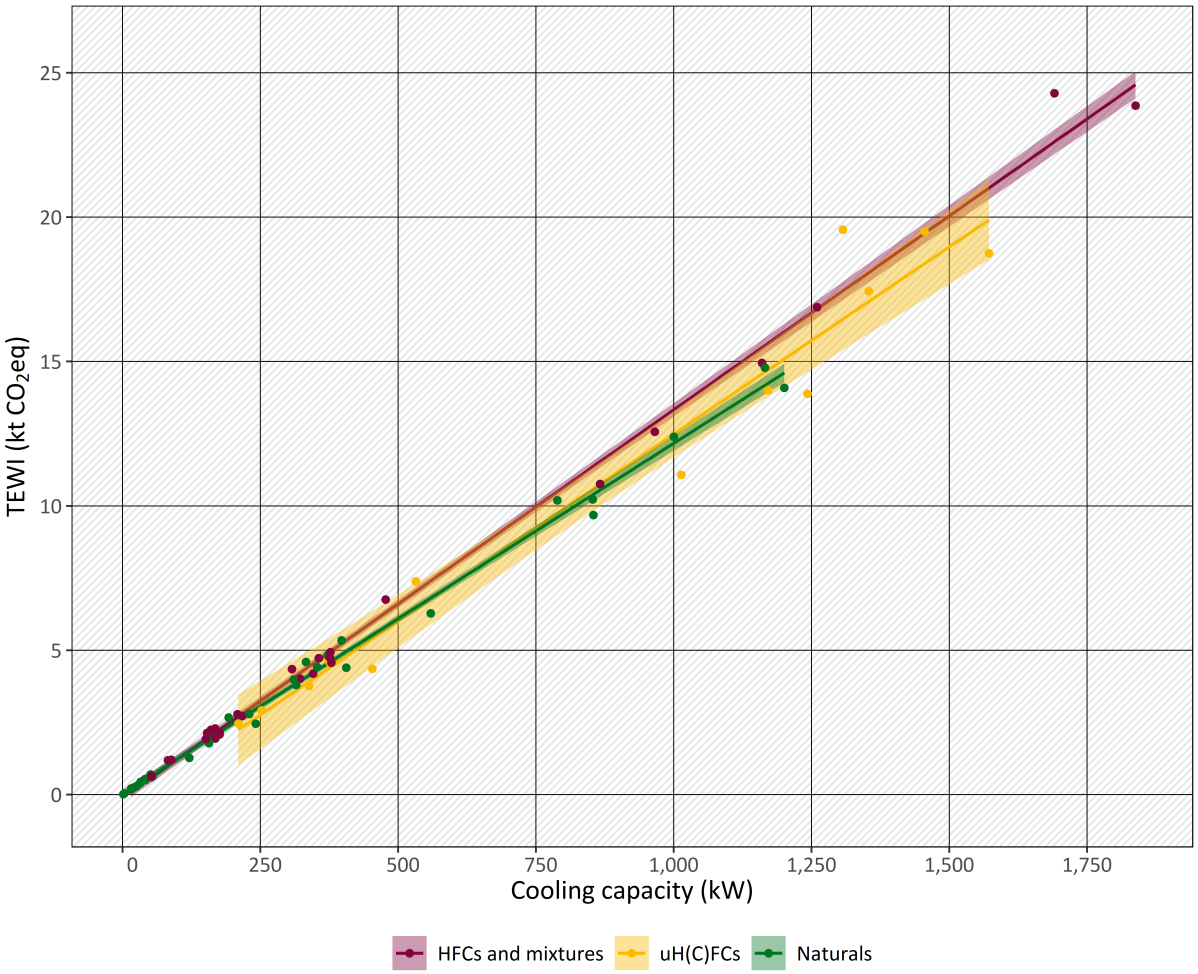
[1] The number of appliances for which no filling quantity was available is shown in brackets.

Results of the TEWI calculations

For air-cooled and water-cooled chillers in the high (process) and low (comfort) temperature ranges, enough data could be collected to calculate TEWIs for the three different refrigerant groups and compare them.

For air-cooled chillers, a marginally higher TEWI of appliances with HFCs and blends compared to those with uH(C)FCs and natural refrigerants could be identified with increasing cooling capacity. The differences between the refrigerant groups were even less pronounced in the small capacity ranges, with no uH(C)FC systems in the capacity range below 210 kW. In the larger capacity range of more than 1,250 kW, on the other hand, no systems with natural refrigerants were included in the evaluation. Systems with natural refrigerants and uH(C)FCs showed only very slight differences across the comparable cooling capacity range.

Figure 0-1: TEWI as a function of the cooling capacity for air-cooled liquid chillers in the high (process) or low (comfort) operating temperature range by refrigerant type

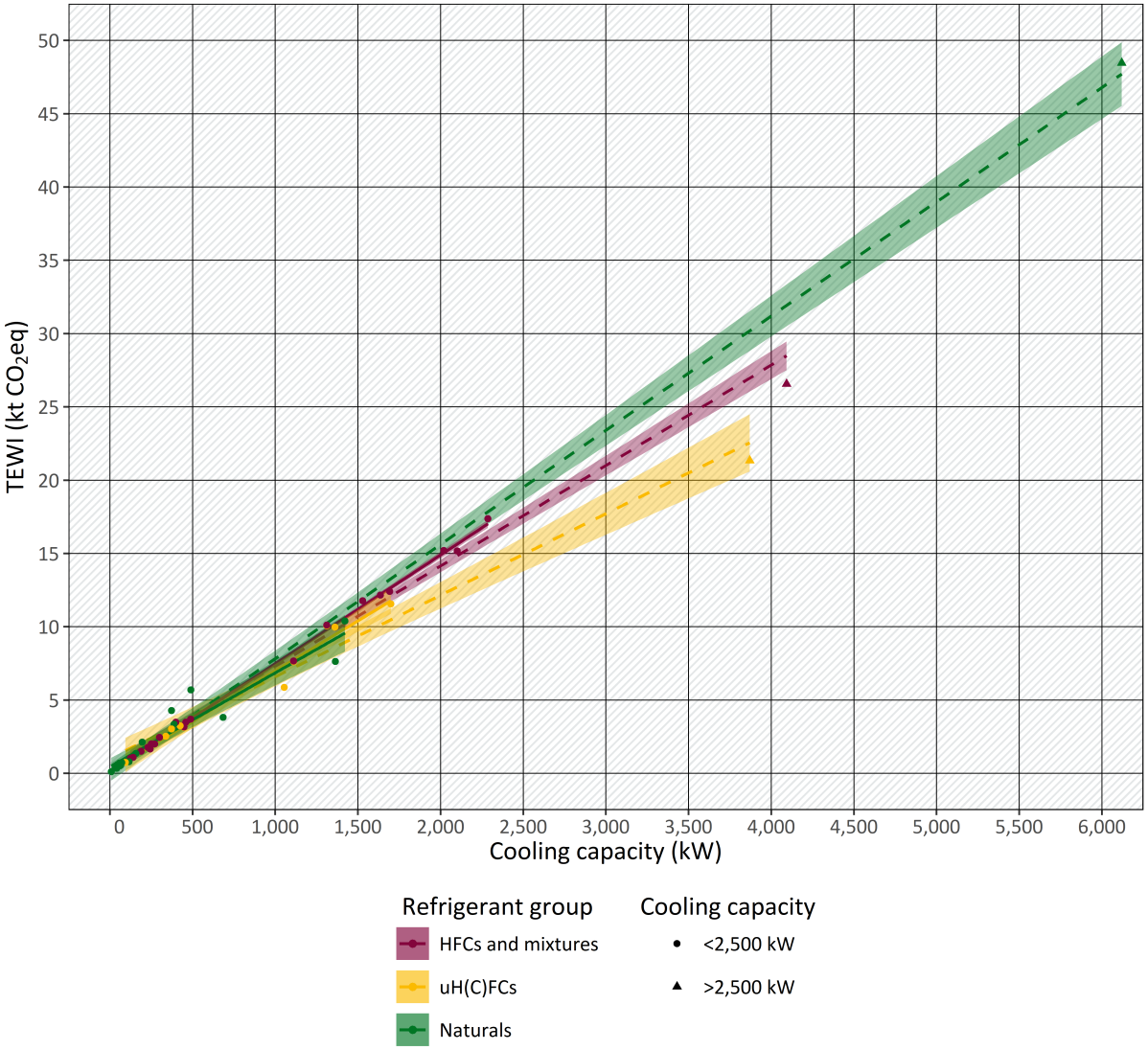


Note: Trend lines based on linear regressions with 95 % confidence intervals.

Source: Own illustration, Öko-Recherche

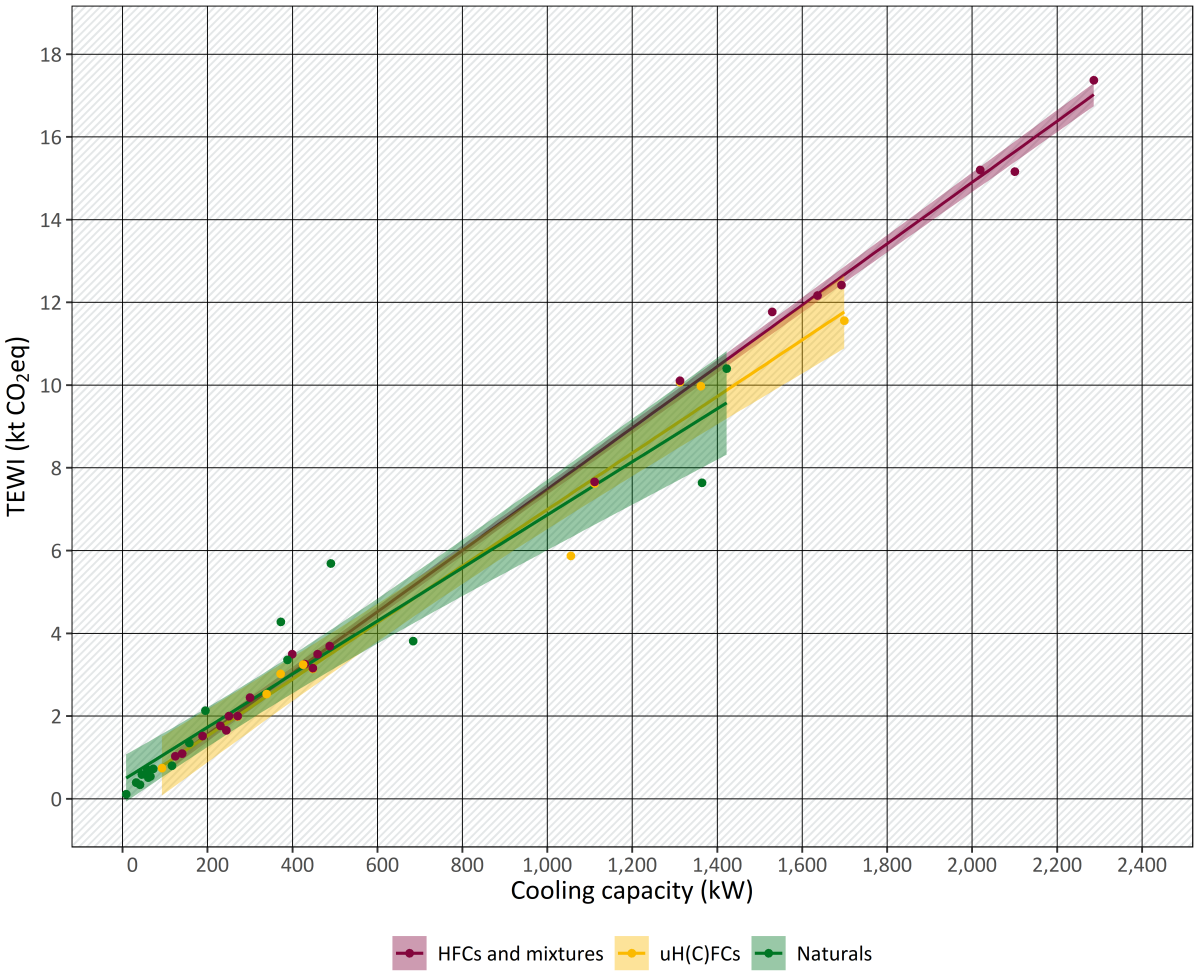
For water-cooled chillers, there was a trend towards higher TEWIs for systems with natural refrigerants across the entire capacity range, which was solely due to one very large system with 6,119 kW. In the capacity range <2,500 kW, there were almost no differences between the refrigerant groups, with a trend towards lower TEWIs for systems with natural refrigerants. In particular, the choice of refrigerant had no recognizable influence on the TEWI up to 500 kW cooling capacity. In the capacity range between approx. 1,000 and 2,400 kW, HFC and mixture systems had the highest TEWIs with a small confidence interval. For uH(C)FC systems and those with natural refrigerants, however, less data was available and also not over the entire capacity range. Therefore, a difference between the refrigerant types can only be derived to a very limited extent. Very little data was available for systems with a cooling capacity of more than 2,500 kW, which made a comparison difficult.

Figure 0-2: TEWI as a function of the cooling capacity for water-cooled liquid chillers in the high (process) or low (comfort) operating temperature range by refrigerant type



Note: Trend lines for all systems (solid lines) and systems with a cooling capacity <2,500 kW (dashed lines) are based on linear regressions with 95 % confidence intervals.
Source: Own illustration, Öko-Recherche

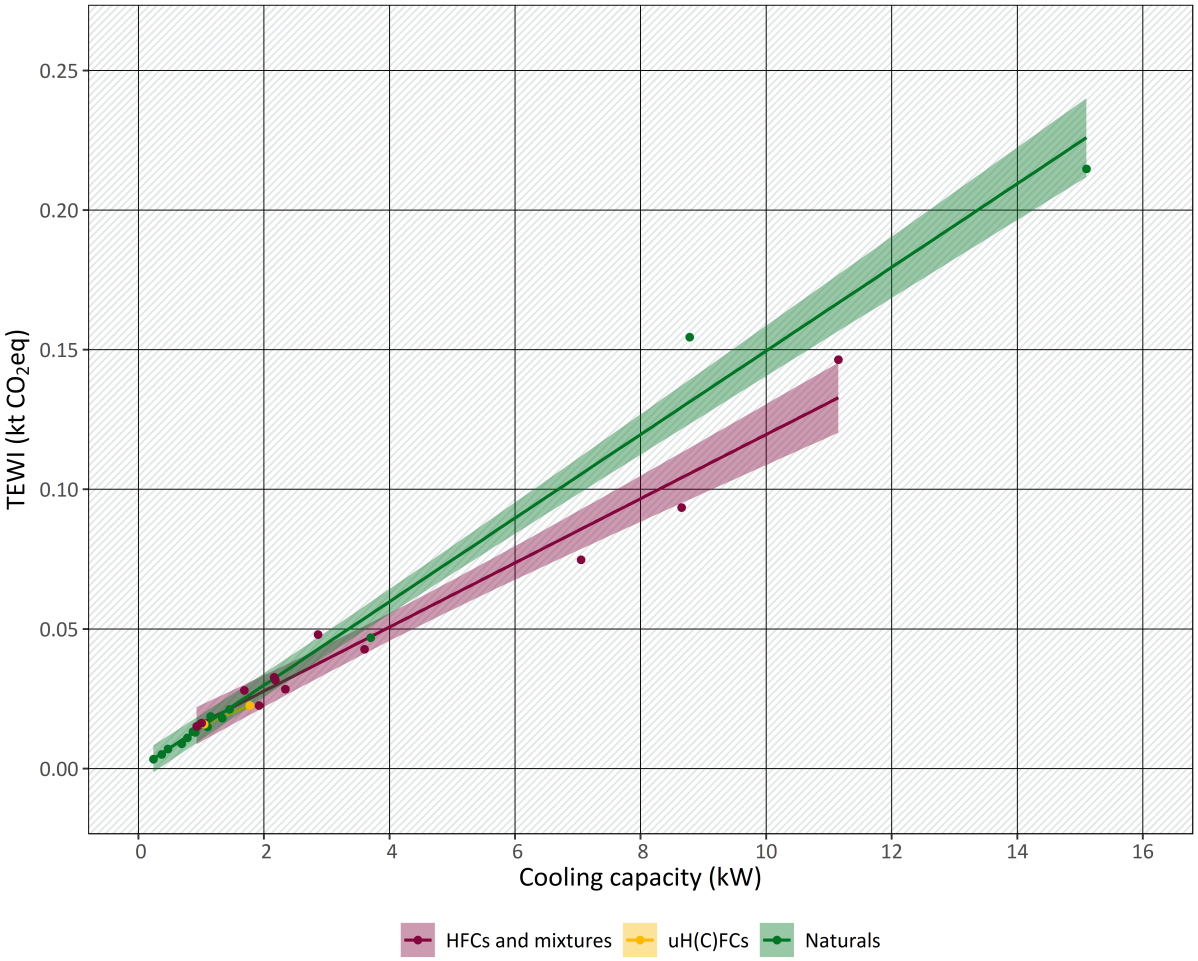
Figure 0-3: TEWI depending on the cooling capacity for water-cooled liquid chillers in the high (process) or low (comfort) operating temperature range by refrigerant type with a cooling capacity <2,500 kW



Note: Trend lines based on linear regressions with 95 % confidence intervals.
Source: Own illustration, Öko-Recherche

Regarding condensing units, data was only available for systems with different refrigerant types in the medium temperature range up to approx. 15 kW. In the capacity range below approx. 2 kW, considerably more systems with natural refrigerants could be identified, and no difference between the refrigerant types was discernible. For the uH(C)FC group, however, only two systems were represented, which makes a comparison difficult. With increasing refrigeration capacity, there was a trend towards a higher TEWI of systems with natural refrigerants compared to those with HFCs and mixtures. However, the data basis in this capacity range is very small - only two systems with natural refrigerants and three systems with HFCs and mixtures over 4 kW cooling capacity could be included in the comparison.

Figure 0-4: TEWI as a function of the cooling capacity for condensing units in the medium operating temperature range by refrigerant type



Note: Trend lines based on linear regressions with 95 % confidence intervals.
Source: Own illustration, Öko-Recherche

TEWI relative to cooling capacity

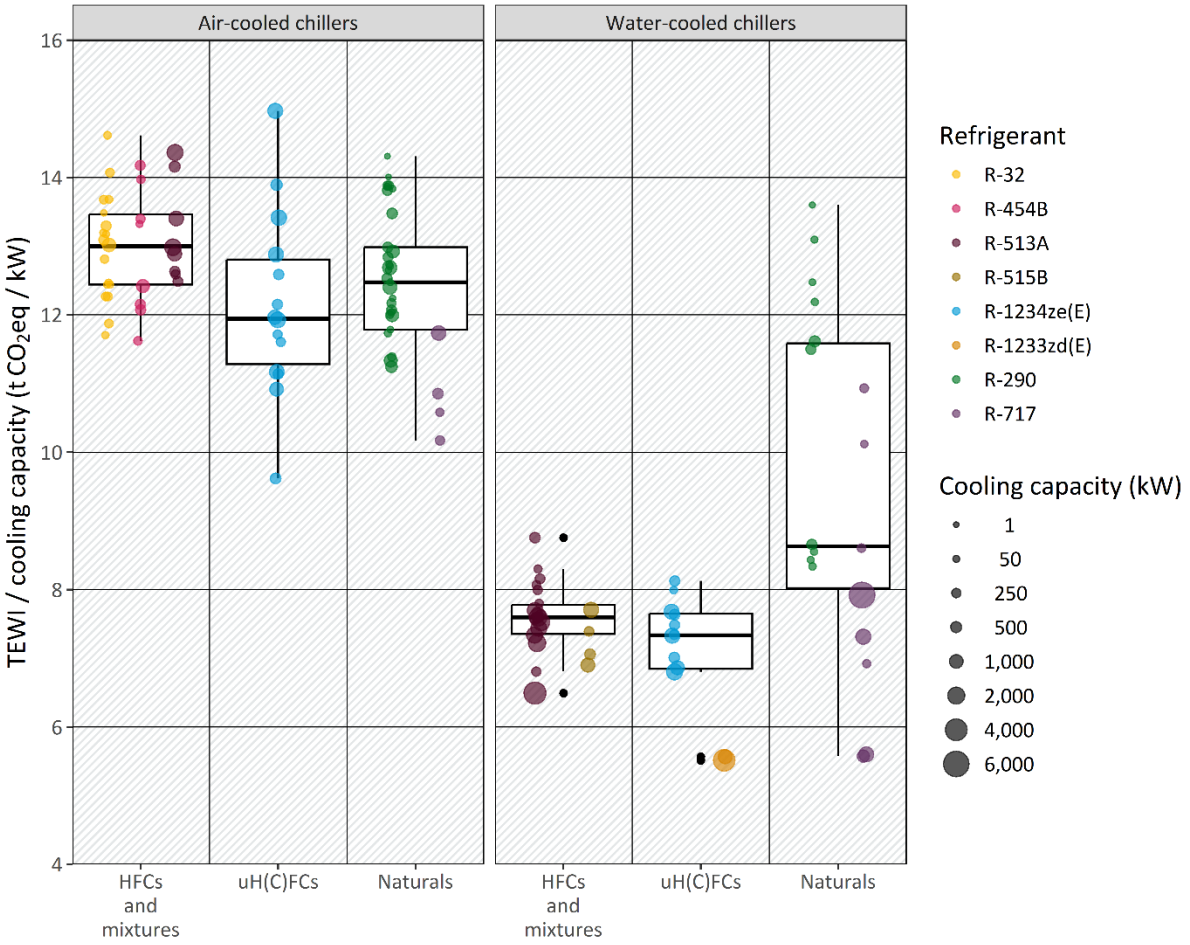
In order to better compare the refrigerant groups directly with each other, a ratio was formed between the TEWI and the cooling capacity of the respective system for all appliances by system type. This was only calculated for those system types for which a comparison of the refrigerant type was possible. This ratio is a measure of the emissions in carbon dioxide equivalents (CO_2eq) that a refrigeration system generates per kW of cooling capacity over its utilization phase and during disposal. A low ratio therefore means a lower environmental impact for the same cooling capacity.

For air-cooled chillers with a high (process) or low (comfort) operating temperature, systems with HFCs and mixtures had the highest mean value and the smallest dispersion. For systems with uH(C)FCs, which in this case were filled exclusively with uHFC-1234ze(E), the scatter in the data was considerably greater and the mean value lower. In the systems with natural refrigerants, there was a breakdown by refrigerant. Units with propane (R-290) usually had higher emissions per kW of cooling capacity than those with ammonia (R-717).

For water-cooled chillers with a high (process) or low (comfort) operating temperature, a heterogeneous picture emerged for systems with HFCs and mixtures, while units with R-513A

and R-515B showed small variation in the range of approx. 7 to 9 t CO_2eq per kW cooling capacity. For systems with uH(C)FCs, there was a split in the ratio, with uHFC-1234ze(E) systems generating higher emissions per kW cooling capacity than systems with uHCFC-1233zd(E). The situation was similar for systems with R-290 compared to those with R-717. With a few exceptions, water-cooled chillers with ammonia had a lower ratio than comparable units with propane, although these usually had a lower cooling capacity. The large variation in the ratio for systems with natural refrigerants was also striking. This could be an indication that the technology for propane has not yet been sufficiently optimized for the refrigerant, whereas this is generally the case for ammonia.

Figure 0-5: Emissions in t CO_2eq per kW cooling capacity over use phase and disposal for chillers with high (process) or low (comfort) operating temperature

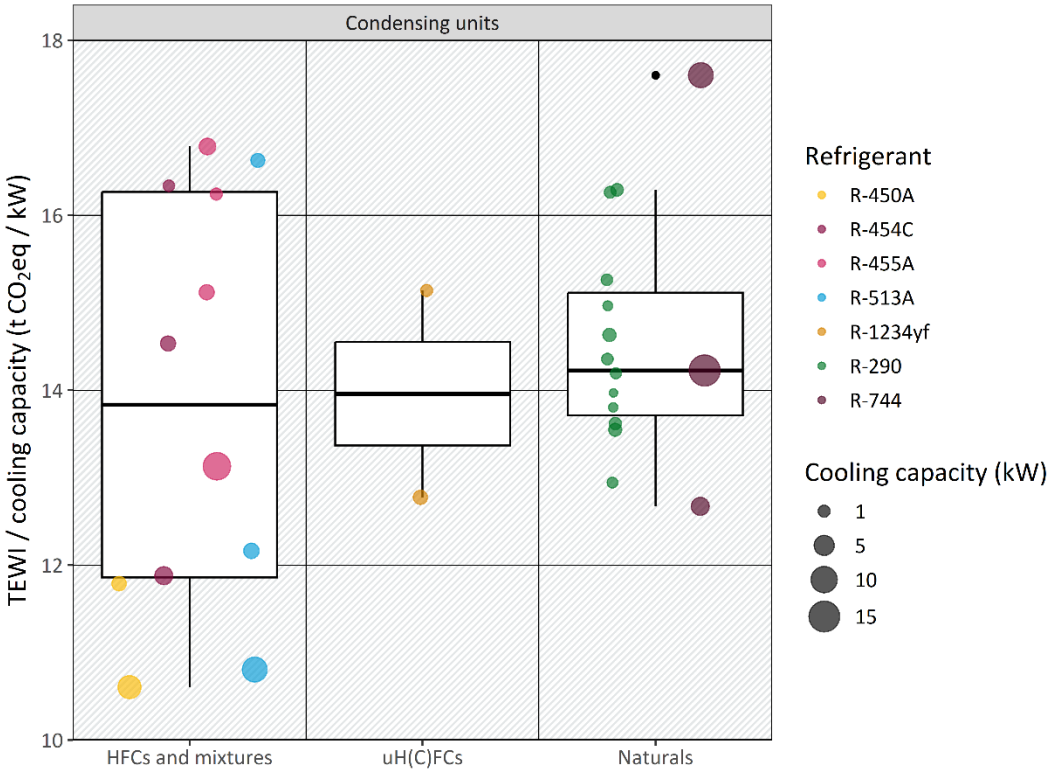


Notes: Box-whisker plot with median (thick line within the box) across all refrigerants within a refrigerant group, range from lower to upper quartile (box, includes half of the data points), and antennae (whiskers) that include 1.5 times the interquartile range. Values outside this range are shown as black dots. The individual data points of the refrigerants are shown in transparent color.
Source: Own illustration, Öko-Recherche

For condensing units with a medium operating temperature, there were sometimes only very few units per refrigerant. While units with HFCs and mixtures exhibited a wide variation, they had the smallest average ratio of TEWI and refrigerating capacity. Within this refrigerant group, only a certain trend could be identified with regard to systems with R-450A and R-455A, with the former always having lower ratios. With regard to natural refrigerants, it was clear that

propane (R-290) is only used in small systems, while CO_2 (R-744) is used in larger systems. However, the choice of refrigerant has no influence on the emissions in CO_2eq per kW cooling capacity. In a direct comparison, only systems with R-450A had a lower TEWI per kW cooling capacity than systems with natural refrigerants. Nevertheless, it must be noted here that only two R-450A systems could be considered, which makes a comparison difficult.

Figure 0-6: Emissions in t CO_2eq per kW cooling capacity over the use phase and disposal for condensing units in the medium operating temperature



Notes: Box-whisker plot with median (thick line within the box) across all refrigerants within a refrigerant group, range from lower to upper quartile (box, includes half of the data points), and antennae (whiskers) that include 1.5 times the interquartile range. Values outside this range are shown as black dots. The individual data points of the refrigerants are shown in transparent color.
Source: Own illustration, Öko-Recherche

Energy efficiency

Further data analysis showed that the direct share of the total TEWI decreases exponentially with increasing operating hours. From as little as 10 % (877 hours per year) operating time, all systems had an average direct TEWI share of less than 10 %. There were differences between the system types, with air-cooled chillers having a lower direct TEWI share than water-cooled chillers. Condensing units had the highest direct TEWI share in direct comparison, followed by water-cooled chillers. Air-cooled chillers, on the other hand, had a significantly lower maximum share of direct TEWI. This means that the main contribution to the overall TEWI comes from the indirect TEWI. Consequently, the efficiency of the system is of central importance in terms of climate relevance.

According to the data sheets, the general (COP/EER) and seasonal (SEER and SEPR) energy efficiency of the analyzed systems was relatively uniform depending on the unit type and cooling capacity. Chillers with ammonia (air- and water-cooled) and uHCFC-1233zd(E) (water-cooled) were particularly efficient. This was not unexpected, as these refrigerants had high theoretically

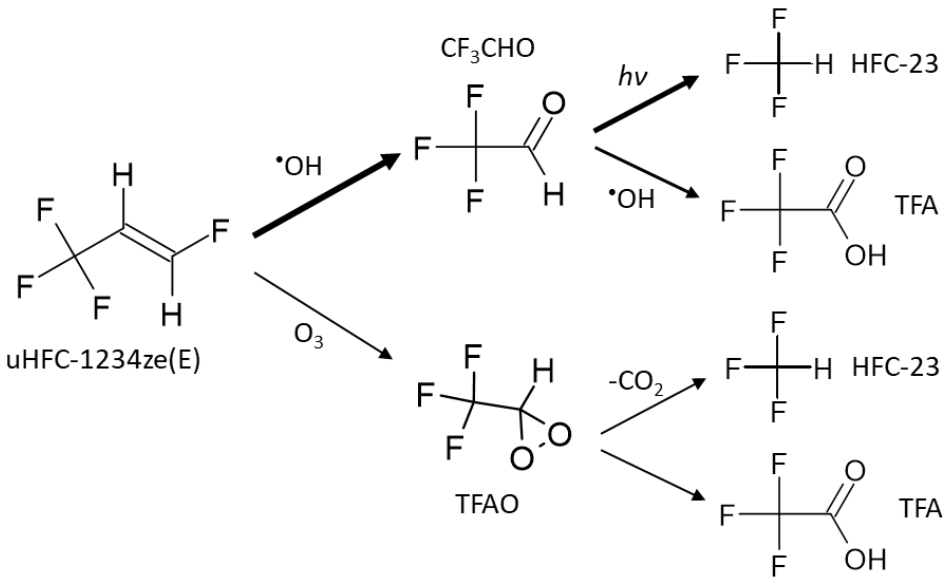
calculated efficiencies. For ammonia, however, no seasonal efficiencies were available for air-cooled systems. Water-cooled chillers with ammonia showed a wide variation in overall energy efficiency, but had the highest seasonal energy efficiencies. Propane as a refrigerant was only found in rather small systems, whereby the general and seasonal energy efficiency for air-cooled systems was comparable to that of the F-gas systems. For water-cooled chillers, the efficiencies were on average lower than those of comparable systems with R-515B and in some cases uHFC-1234ze(E). Systems using R-513A had a higher median SEER than propane systems, but showed a wide variation that included all propane systems. The SEPR was comparable between R-513A and propane systems, with the median being higher for propane systems.

Degradation products of fluorinated refrigerants

Possible degradation products of the refrigerants examined were considered as a further parameter for the ecological assessment. Fluorinated refrigerants can form the extremely strong greenhouse gas HFC-23 or the highly persistent PFAS trifluoroacetic acid (TFA) via various degradation pathways in the atmosphere. While atmospheric degradation initiated by OH radicals can lead to the formation of HFC-23 or TFA, the possibility of HFC-23 formation exists in the case of degradation initiated by ozone (O_3).

For the uHFC-1234ze(E), Thomson et al. (2024) determined an indirect GWP via ozone-initiated degradation to HFC-23 of approximately 6, and, including all degradation pathways, arrived at a total GWP (direct and indirect) of approximately 20.

Figure 0-7: Highly simplified schematic representation of the possible pathways of atmospheric degradation of uHFC-1234ze(E), which can lead to TFA or HFC-23



Notes: Degradation pathway via OH radicals (•OH) to trifluoroacetaldehyde (CF_3CHO) and photolysis (hv) to HFC-23 from Pérez-Peña et al. (2023), via OH radicals to CF_3CHO and OH radicals to TFA from Sulbaek Andersen et al. (2004), and via ozone (O_3) to trifluoromethyldioxirane (TFAO) and HFC-23 as well as TFA from McGillen et al. (2023).
Source: Own illustration based on the sources listed above, Öko-Recherche

Based on calculated TFA formation potentials, the theoretically possible maximum TFA quantities from the emissions during the use phase and during disposal were determined for each of the chillers and condensing units examined.

While natural refrigerants do not form TFA, the emissions from systems with HFCs and mixtures as well as uH(C)FCs sometimes lead to large quantities of TFA. The refrigerant mixture R-513A,

which consists of 44 % HFC-134a and 56 % uHFC-1234yf, is particularly prominent. Both components form TFA during atmospheric degradation. HFC-32 is the only HFC under scrutiny in this project that does not form TFA during atmospheric degradation.

Chillers with uH(C)FCs were mostly larger systems with large charge sizes and correspondingly higher emissions. The maximum amount of TFA formed is therefore relatively high despite a formation rate of only 10 %. Condensing units, on the other hand, have a significantly smaller average charge size, which is why the amount of TFA formed per system is low compared to the chillers. In terms of cooling capacity, however, condensing units with fluorinated refrigerants have the highest TFA quantities.

Relative to the entire use phase and the disposal of a system, air-cooled chillers generate 11-27 kg TFA, which corresponds to approx. 0.01-0.03 kg per kW cooling capacity. For water-cooled chillers, the values were somewhat higher at 15-104 kg TFA, or 0.01-0.1 kg/kW cooling capacity. Condensing units had the lowest absolute amount of TFA at 0.4-1.5 kg but had the largest amounts relative to the cooling capacity at 0.3-0.5 kg/kW.

Final considerations

The evaluation of the technical data sheets of various liquid chillers and condensing units revealed largely comparable TEWIs, although not enough systems were available for comparison for all capacity ranges and temperature ranges. In the areas examined, it was found that systems with natural refrigerants with comparable efficiencies and therefore TEWIs are available in all cases. For water-cooled chillers in the low (process) and high (comfort) temperature ranges, potential for improvement was identified for systems using propane as a refrigerant. The same applies to condensing units in the medium temperature range, for systems with propane and CO_2, although the difference to systems with fluorinated refrigerants was not very pronounced here.

The available literature on the emissions in CO_2 equivalents generated during the production of the various refrigerants was very limited but showed a clear tendency towards lower emissions for natural refrigerants compared to fluorinated refrigerants.

If the potentially environmentally hazardous degradation products of fluorinated refrigerants are taken into account, a clear recommendation for the use of natural refrigerants for condensing units and chillers can be made from an environmental perspective.

1 Hintergrund und Problemstellung

Mit der Veröffentlichung des sechsten Sachstandberichts des IPCC (2021) wurde der internationalen Staatengemeinschaft die Dringlichkeit internationalen Handelns erneut vor Augen geführt: Sämtliche der im Bericht enthaltenen Modellierungen zu zukünftigen Emissionsszenarien prognostizieren ein Erreichen der 1,5 °C Marke bereits im Jahr 2030, der Einfluss anthropogenen Handelns auf das Klima ist unbestritten. Vor dem Hintergrund der sich hieraus ergebenden existentiellen Bedrohungen hat sich die Europäische Union (EU) ambitionierte Ziele gesetzt: Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen auf netto null gesenkt und wirtschaftliches Wachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt werden (DG CLIMA 2019). Um dies zu schaffen, ist ein Erreichen der Etappenziele nicht minder wichtig: Bis 2030 strebt die EU an, Emissionen um 55 % zu verringern. Deutschland wiederum, größter Emittent von Treibhausgasen innerhalb der EU im Jahr 2019 (Europäisches Parlament 2021), beabsichtigt seine Emissionen im gleichen Zeitraum gegenüber 1990 um mindestens 65 % zu reduzieren (BKS 2019).

Einen substanziellen Beitrag zu diesen Zielen sollte nicht zuletzt durch die bis Anfang 2024 geltende EU F-Gas-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) erreicht werden, die dem Beschluss von Kigali den Weg bereitet hatte. Der Beschluss von Kigali ist eine der wesentlichen Änderungen („Amendments“) des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht (Ozone Secretariat 2020), welches der Liste an regulierten Stoffen auch HFKW hinzufügt, deren Verwendung seit den 1990er Jahren einen starken Anstieg erfahren haben, u.a. als Ersatzstoffe für FCKW und HFCKW als Kältemittel in stationären und mobilen Anwendungen. Denn wenngleich HFKW die Ozonschicht nicht schädigen, weisen sie ein erhebliches Treibhauspotenzial („Global Warming Potential“, GWP) auf, das im Vergleich zu CO_2 bis zu 14.800-mal höher ausfallen kann[1]. Konkret sieht der Beschluss von Kigali deshalb eine schrittweise Reduktion der Produktion und des Verbrauchs von HFKW vor, einen sogenannten *Phase-Down*, wobei differenzierte Ausstiegsszenarien für Industrie- und Entwicklungsländer gelten. Die jüngste Novellierung der EU F-Gas-Verordnung hat unter anderem zum Ziel, eine Emissionsminderung aller Treibhausgasemissionen in der EU in Höhe von mindestens 55 % abzusichern. Diese Zielvorgabe ist im Europäischen Klimagesetz (Verordnung (EU) 2021/1119) festgeschrieben und als sogenanntes „Fit für 55“-Paket von der Europäischen Kommission ausformuliert (Europäische Kommission 2021). Daher wurden den bisherigen Regelungen eine Reihe weiterer Verbote und Maßnahmen hinzugefügt, die den technischen Innovationen der letzten Jahre Rechnung tragen.

Am 7. Februar 2024 wurde die Verordnung (EU) 573/2024 des Europäischen Parlaments und des Rates über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 im offiziellen Journal der EU veröffentlicht. Sie ist am 11. März 2024 als neue F-Gas-Verordnung in Kraft getreten. Damit einher geht ein verschärfter Reduktionsplan für das Inverkehrbringen von HFKW in der EU in Tonnen CO_2-Äquivalent sowie diverse Verbote für die Verwendung von F-Gasen in verschiedenen Sektoren. Hierzu zählen gemäß Annex IV verschiedene Inverkehrbringensverbote für stationäre Kälteanlagen, ab dem Jahr 2030 etwa solche, die F-Gase mit einem GWP >150 enthalten. Ab dem Jahr 2027 gelten dann Inverkehrbringensverbote für kleine Flüssigkeitskühlsätze mit einer Nennleistung bis zu 12 kW, die F-Gase mit GWP >150 enthalten, sowie größere Flüssigkeitskühlsätze mit einer Nennleistung ab 12 kW, die F-Gase mit GWP >750 enthalten. Ab

[1] Im gesamten Bericht werden, wenn möglich, Annex I, II und VI der Verordnung (EU) 2024/573 als Basis für Treibhauspotenziale verwendet. Hierbei dient der 4. IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2007) als Grundlage für HFKW und der 6. IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2021) als Basis für uHF(C)KW und natürliche Kältemittel.

dem Jahr 2030 dürfen schließlich generell keine Flüssigkeitskühlsätze bis zu 12 kW Nennleistung mit F-Gasen in den Verkehr gebracht werden.

Im Zuge der Umsetzung der F-Gas-Verordnung, vorrangig bedingt durch den HFKW-*Phase-down* und damit verbundenen Preissteigerungen sowie einige Verbote zur Verwendung von Kältemitteln mit hohen Treibhauspotenzialen in bestimmten Anwendungen, unterliegt der Kältemittelmarkt in der EU seit mehreren Jahren starken Veränderungen. Ungesättigte HFKW und Gemische mit gesättigten und ungesättigten HFKW mit niedrigeren GWP-Werten werden als Ersatzkältemittel zu den konventionell genutzten Hoch-GWP HFKW-Kältemitteln auf den Markt gebracht. Daneben spielen natürliche Kältemittel eine immer größere Rolle in verschiedenen Anwendungen. Beispielhaft hierfür sind Supermarkt-Kälteanlagen, in denen heute in weiten Teilen Nord- und Mitteleuropas standardmäßig CO_2 (R-744) als Kältemittel im Tief- und Normalkühlbereich als energieeffiziente Lösung verwendet wird (ATMOsphere 2023). Bestandsanlagen, ursprünglich für den Betrieb mit R-404A (GWP 3.922) ausgelegt, wurden oft vor dem Jahr 2020 auf Ersatzkältemittel mit etwas niedrigeren GPWs umgestellt, meist R-448A (GWP 1.386) oder R-449A (GWP 1.396). In Split-Klimaanlagen wird mittlerweile fast ausschließlich das Kältemittel R-32 (GWP 675) in Neuanlagen eingesetzt, und die früher gängigen HFKW-Gemische R-410A (GWP 2.088) und R-407C (GWP 1.774) kommen nur noch in Bestandsanlagen vor. Das natürliche Kältemittel Propan (R-290, GWP 0,02) wird voraussichtlich in Zukunft auch bei Single-Split-Klimaanlagen in Europa eingesetzt werden. Auch bei Wärmepumpen vollzieht sich eine Abkehr von den traditionell eingesetzten Kältemitteln R-410A und R-407C hin zu HFKW-32 und insbesondere zu Propan.

Fundierte Informationen über die Umweltauswirkungen von konventionellen F-Gas-Kältemitteln und alternativen Lösungen sind für die Umsetzung des Montrealer Protokolls und des Beschlusses von Kigali erforderlich, um einen Umstieg auf Zwischenlösungen (von HFCKW auf HFKW und dann erst auf natürliche Kältemittel) zu vermeiden und damit Zeit und Kosten einzusparen. Eine ganzheitliche Betrachtung der verfügbaren Produkte mit halogenierten als auch natürlichen Kältemitteln wird daher benötigt und im Rahmen dieses Vorhabens für Flüssigkeitskühlsätze (engl. „chiller“) und Verflüssigungssätze (engl. „condensing units“) vorgenommen. Darüber hinaus stellt diese Analyse politischen Entscheidungsträgern neutrale und umfassende Hintergrundinformationen zur Verfügung.

Grundsätzlich sind Lebenszyklus-Analysen („Life Cycle Assessment“, LCA) oder Ökobilanzen Konzepte, die der Ermittlung der gesamten Umweltauswirkungen eines Produktes dienen. Sie umfassen sowohl direkte als auch indirekte Umweltauswirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg und drücken diese in übergeordneten Kategorien wie zum Beispiel Treibhausgasemissionen, Eutrophierungspotenzial von Böden und Gewässern oder Humantoxizität aus. Neben dem Energieverbrauch spielt die Wahl des Kältemittels eine wichtige Rolle bei Lebenszyklus-Analysen von Kälte- und Klimaanlagen.

Mehrere Metriken für ganzheitliche Betrachtungen von Kälte- und Klimaanlagen stehen zur Verfügung: Ursprünglich wurden für Kälte- und Klimaanlagen die Kälteleistungszahl („Coefficient of Performance“, COP) oder der saisonale Energiewirkungsgrad („Seasonal Energy Efficiency Ratio“, SEER) berechnet, welche jedoch nicht das Treibhauspotenzial der verwendeten Kältemittel einbeziehen, sondern sich nur auf den Energieverbrauch konzentrieren. Der „Total Equivalent Warming Impact“ (TEWI) wurde als Ergänzung und Erweiterung der früheren Ansätze entwickelt und bezieht neben den indirekten Emissionen durch den Betrieb der Anlage auch die direkten Emissionen der Kältemittel über die Laufzeit und bei Entsorgung der Anlagen ein. Weiterhin besteht für Kälteanlagen auch die Methode der „Life Cycle Climate Performance“ (LCCP)-Analyse. Hierbei werden nicht nur direkte und indirekte Emissionen während der Lebensdauer von Kälte- und Klimaanlagen betrachtet,

sondern auch die so genannten „eingebetteten Emissionen“ oder „grauen Emissionen“ (engl. „embodied emissions“), die bei Herstellung, Transport, Lagerung, Installation, Entsorgung und Verwertung von allen verwendeten Materialien und Anlagenbauteilen entstehen (engl. „cradle to grave“) (IIR 2016). Die LCCP-Analyse war ursprünglich entwickelt worden, um die Beiprodukt-Emissionen von HFKW-23 bei der Produktion von HFCKW-22 abzubilden. Die neueste Weiterentwicklung ist die so genannte “Enhanced and Localized Life Cycle Climate Performance”-Analyse (EL-LCCP), die tatsächliche Betriebsparameter, die Kohlenstoffintensität der Energiegewinnung und -verteilung sowie spezifische Aufstellbedingungen, die sich auf die Anlagenenergieeffizienz auswirken, und örtliche Klimabedingungen einbezieht (Andersen & Wolf 2018). Für die Erstellung von LCCP und EL-LCCP-Analysen sind sehr detaillierte und umfängliche Daten zum Lebenszyklus der Anlagen und aller Betriebsmittel und Komponenten erforderlich, die in den meisten Fällen nicht vollständig verfügbar sind. Dieses Vorhaben beschränkt sich daher auf TEWI-Analysen zur Abbildung der Klimawirkungen der Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze.

Die TEWI-Metrik beinhaltet zwar bereits die Emissionen des Kältemittels bei der Entsorgung der Anlage, die freigesetzten CO_2-Äquivalente bei der Produktion des Kältemittels werden jedoch nicht berücksichtigt. Im Zuge dieses Vorhabens wurde versucht, eine Einschätzung hierzu abzugeben, was sich aufgrund der mangelnden Datenlage jedoch als schwierig herausstellte.

Für Flüssigkeitskühlsätze sind Vorgaben zur Energieeffizienz in den Verordnungen „(EU) 2015/1095 der Kommission vom 5. Mai 2015 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von gewerblichen Kühllagerschränken, Schnellkühlern/-frostern, Verflüssigungssätzen und Prozesskühlern“ und „(EU) 2016/2281 der Kommission vom 30. November 2016 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte im Hinblick auf Luftheizungsprodukte, Kühlungsprodukte, Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur und Gebläsekonvektoren“ enthalten. Das Umweltzeichen Blauer Engel für Flüssigkeitskühlsätze (RAL gGmbH 2023) setzt die Verwendung eines natürlichen Kältemittels voraus und stellt höhere Anforderungen an die Mindesteffizienz als die Verordnungen (EU) 2015/1095 und (EU) 2016/2281, wobei nach verschiedenen Einsatzbereichen unterschieden wird.

Im Kontext von Kälte- und Klimaanlagen stellt neben den Treibhausgasemissionen die Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) als Abbauprodukt von verschiedenen halogenierten Kältemitteln eine zunehmend relevante Umweltauswirkung der Verwendung von F-Gasen dar. Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), zu denen TFA als Perfluoralkylsäure zählt, wurden mittlerweile weltweit in zahlreichen Umweltkompartimenten nachgewiesen und können nach derzeitigem Kenntnisstand nicht abgebaut werden (Adlunger et al. 2021). TFA gelangt bis in die Nahrungskette und ist bereits in menschlichem Blut und Urin nachweisbar (Zheng et al. 2023). TFA ist sehr stabil und damit hochgradig persistent und ist mit herkömmlichen Aufbereitungsmethoden nicht aus dem Trinkwasser zu entfernen. Damit stellt es eine Herausforderung für den Schutz von Gewässern, Trinkwasserressourcen und Böden dar. Weitere Einträge von TFA sollten daher so weit wie möglich vermieden werden, auch vor dem Hintergrund neuerer Toxizitätsstudien, die die Basis für eine beabsichtigte EU-verbindliche Einstufung von TFA und TFA-Salzen als „wahrscheinlich reproduktionstoxisch beim Menschen“ (ECHA 2024a) bilden.

Der Vorschlag zur Beschränkung der Stoffgruppe der PFAS (ECHA 2023) im Rahmen der REACH-Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Beschränkung und Zulassung von

chemischen Stoffen in der EU („Registration, Evaluation, Restriction and Authorisation of Chemicals“, REACH) enthält Verbote zur Verwendung von PFAS. Unter die dort verwendete PFAS-Definition fallen nahezu alle F-Gase, mit Ausnahme weniger HFKW wie HFKW-23, HFKW-32 und HFKW-152a. Die ECHA bearbeitet derzeit alle Kommentare, die im Laufe des Konsultationsverfahrens eingereicht wurden und wird im Laufe des Jahres 2024 drei Ausschusssitzungen abhalten, die den Weg für die weiteren Schritte bis zur Umsetzung der aktualisierten REACH-Verordnung bestimmen werden (ECHA 2024b).

2 Ziel und Herangehensweise

2.1 Zielsetzung

Ziel dieses Vorhabens war es, die Kenntnisse über die Umwelt- und Klimaauswirkungen von natürlichen im Vergleich zu halogenierten Kältemitteln zu erweitern, vor allem bezüglich der Betrachtungen der Energieeffizienz verschiedener Kältemittel in ausgewählten Anlagentypen für Verflüssigungssätze („condensing units“) und Flüssigkeitskühlsätze („chiller“). Hierbei konzentrierte sich das Vorhaben auf Anlagen, die mit natürlichen Kältemitteln sowie neuen halogenierten Stoffen und Mischungen mit einem Treibhauspotenzial unter 750 gemäß 4. IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2007) betrieben werden.

Für die hier vorgenommene Analyse wurden technische Produktdatenblätter von Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen als Datenquelle herangezogen. Die Annahme hierbei war, dass Hersteller die Angaben in diesen Datenblättern nach bestem Wissen und Gewissen unter vergleichbaren Konditionen erhoben haben. Damit ist ein Vergleich verschiedener Kältemittel hinsichtlich der Effizienz der Anlagen grundsätzlich möglich. Diese Analyse erhebt nicht den Anspruch, eine qualitative Aussage über jede individuelle Anlage spezifischer Auslegung treffen zu können. Sie ist vielmehr eine quantitative Auswertung, um generelle Trends abzubilden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung der Energieeffizienz und der Gesamttreibhausgasemissionen ausgewählter stationärer Kälteanwendungen mit verschiedenen Kältemitteln entsprechend dem aktuellen Stand der Technik.

2.2 Methodisches Vorgehen

2.2.1 Expertenbefragungen und Messebesuche

Im Rahmen von Messebesuchen wurden Produktinnovationen identifiziert und technisches Fachpersonal der jeweiligen Hersteller befragt. Relevante Messen waren die „Chillventa“ in Nürnberg (Oktober 2022), die „EuroShop“ in Düsseldorf (März 2023) und die „ISH“ in Frankfurt (März 2023).

2.2.2 Theoretische Betrachtungen zur Effizienz

Basierend auf den grundsätzlichen physikalischen Eigenschaften verschiedener Kältemittel lassen sich theoretische Vorhersagen zur Effizienz ableiten.

Um eine Abschätzung hinsichtlich der theoretischen Effizienz der verschiedenen Kältemittel vorzunehmen, wurden die Kälteleistungszahl (COP) und die volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) unter den idealisierten Bedingungen in Tabelle 1 mit der Software CYCLE_D-HX berechnet (Domanski 2017). Zielwerte für die Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur waren 40 °C und 10 °C sowie 45 °C und 2 °C. Die Temperaturdifferenz ΔT wurde entsprechend je Kältemittel angepasst, um diese Zielwerte zu erreichen. Die genannten Temperaturen entsprechen einer Nutzung in der Komfortklimatisierung (40 °C/10 °C) bzw. in Flüssigkeitskühlsätzen im industriellen Bereich (45 °C/2 °C). Die berechneten Parameter (COP und Q_{Vol}) wurden anschließend zu denen des fluorierten Hoch-GWP Kältemittels R-410A (GWP 2.088) ins Verhältnis gesetzt, in Anlehnung an die Analyse in McLinden et al. (2017). Dies erlaubte eine einfachere Bewertung der relativen Effizienz der verschiedenen Kältemittel.

Tabelle 1: Parameter der Modellierungen in dem Programm CYCLE_D-HX

	Verdichter	Verdampfer (40/10 °C)	Verdampfer (45/2 °C)	Verflüssiger (40/10 °C)	Verflüssiger (45/2 °C)
Isentropische Effizienz	1,0				
Volumetrische Effizienz	1,0				
Effizienz des elektrischen Motors	1,0				
Wärmeüberträger					
Konfiguration		Cross	Cross	Cross	Cross
Eingangstemperatur (°C)		20	12	27	30
Ausgangstemperatur (°C)		15	7	35	35
Druckabfall der Sättigungstemperatur (°C)		0	0	0	0
Überhitzung/Unterkühlung (°C)		0	0	0	0

2.2.3 Analyse der technischen Datenblätter von Anlagenherstellern

Für einen Vergleich verschiedener Anlagen wurden technische Datenblätter der Hersteller verschiedener Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze analysiert. Dabei wurde die Auswahl auf Anlagen mit Kältemitteln mit einem GWP unter 750 beschränkt. Weiterhin wurden nur Daten erhoben, die den europäischen Ökodesign-Anforderungen, also den Spezifikationen der Verordnungen (EU) 2015/1095 und (EU) 2016/2281 für Verflüssigungssätze und Prozesskühler entsprachen (Tabelle 2). Dies war zwingend notwendig, um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

Tabelle 2: Übersicht der Anlagenspezifikationen nach Ökodesign-Verordnungen

Betriebstemperaturbereich	Umgebungs-temperatur (°C)	Verdampfungs-temperatur (°C)	Quelle
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze			
Niedrig (Prozesskühlung)	35	-25	Verordnung (EU) 2015/1095
Mittel (Prozesskühlung)	35	-8	Verordnung (EU) 2015/1095
Mittel (Komfortkühlung)	30	18	Verordnung (EU) 2016/2281
Hoch (Prozesskühlung) / Niedrig (Komfortkühlung)	35	7	Verordnung (EU) 2015/1095, Verordnung (EU) 2016/2281
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze			
Mittel (Prozesskühlung)	30	-8	Verordnung (EU) 2015/1095
Mittel (Komfortkühlung)	30	18	Verordnung (EU) 2016/2281
Hoch (Prozesskühlung) / Niedrig (Komfortkühlung)	30	7	Verordnung (EU) 2015/1095, Verordnung (EU) 2016/2281
Verflüssigungssätze			
Niedrig	32	-35	Verordnung (EU) 2015/1095
Mittel	32	-10	Verordnung (EU) 2015/1095

Die Anlagen wurden über eine Internetrecherche identifiziert, und relevante Leistungsparameter wurden erfasst. Für eine Beurteilung der Energieeffizienz und der Umweltauswirkungen wurde für jede untersuchte Anlage der „Total Equivalent Warming Impact“ (TEWI) entsprechend der Formel in Tabelle 3 berechnet. Der TEWI ist die Summe der direkten Emissionen über die gesamte Laufzeit und bei der Entsorgung der Anlage sowie der indirekten Emissionen durch den Betrieb der Anlage. Die direkten Emissionen beziehen sich dabei auf das eingesetzte Kältemittel, während die indirekten Emissionen die CO_2eq-Emissionen bei der Erzeugung der elektrischen Energie, die zum Betrieb der Kälteanlage benötigt wird, berücksichtigen.

Die für die Marktübersicht erfassten Parameter sind in Tabelle 4 gelistet. Einige Parameter beruhen auf Annahmen bzw. Quellen jenseits der technischen Datenblätter. So wurden beispielsweise für die indirekten TEWI-Berechnungen Emissionswerte von 498 g CO_2eq/kWh_{el} für das Jahr 2022 unter Berücksichtigung von Vorketten nach Icha & Lauf (2023) angenommen.

Um möglichst viele Anlagen zu vergleichen, wurden bei der Aufnahme der Parameter laut technischen Datenblättern jeweils für einen Gerätetyp die kleinste und größte Anlage berücksichtigt. Um zu überprüfen, ob diese Auswahl zu einer Verzerrung der Analyse, insbesondere bei Anlagenserien mit einem großen Kälteleistungsspektrum, führt, wurden für einige Flüssigkeitskühlsatzserien diverse Anlagenvarianten ausgewertet. Es zeigte sich, dass Kälteleistung und Energiebedarf äußert linear skalieren und die Methode der Auswahl jeweils nur der kleinsten und größten Anlage methodisch vertretbar ist (siehe Abbildung A 2 im Anhang).

Zum besseren Verständnis der Haupteinflussfaktoren des Gesamt-TEWI (direkter plus indirekter Anteil) wurde der direkte Anteil für die untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze berechnet. Um den Effekt der Betriebsdauer auf den TEWI zu ermitteln, wurde für alle Anlagen der Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI in Abhängigkeit der Betriebsstunden im Jahr von Null bis 8.766 Stunden (volle Stundenanzahl eines Jahres, 24 Stunden * 365,25 Tage) ermittelt. Die Berechnungen folgten der Beschreibung in Tabelle 3 unter Annahme der Parameter in Tabelle 4, mit Ausnahme der Betriebsstunden. Für diese Analyse wurden nur Geräte mit HFKW und Gemischen als Kältemittel berücksichtigt, da uHF(C)KW und natürliche Kältemittel keinen nennenswerten direkten Beitrag zum Gesamt-TEWI leisten.

Der TEWI berücksichtigt den jährlichen Energieverbrauch einer Anlage, jedoch nicht deren Kälteleistung. In den technischen Datenblättern sind gemäß Verordnung (EU) 2015/1095 und 2016/2281 die Energieverbräuche der Anlagen angegeben, die benötigt werden, um die jeweilige Kälteleistung zu erreichen. Daraus errechnet sich die Energieeffizienzrate (EER) bzw. die Kälteleistungszahl (COP). Diese Energieverbräuche wurden für die Berechnung der TEWIs herangezogen. Über den Verlauf eines Jahres variieren jedoch die Konditionen sowohl hinsichtlich der Umwelt (Außentemperatur etc.), als auch des Kältebedarfs (Teillastbetrieb etc.). Um dies besser abzubilden, kann eine saisonale Energieeffizienz berechnet werden, die die Variation in der Außentemperatur sowie die Auslastung der Anlage über das Jahr berücksichtigt. Für Komfortkühler (Flüssigkeitskühlsätze zur Kühlung von Räumen für menschliche Nutzung) gilt laut Verordnung (EU) 2016/2281 die Jahresarbeitszahl SEER als saisonaler Effizienzparameter, für Prozesskühler (Flüssigkeitskühlsätze, die nicht der Kühlung menschlich genutzter Räume dienen) die Jahresarbeitszahl SEPR. Gemäß Verordnung (EU) 2015/1095 gilt für Verflüssigungssätze ebenfalls die Jahresarbeitszahl SEPR.

Anhand der Jahresarbeitszahl kann ein saisonaler Energieverbrauch berechnet werden, indem man die Kälteleistung durch die Jahresarbeitszahl teilt und mit den Betriebsstunden pro Jahr multipliziert. Dieser saisonale Energieverbrauch kann dann alternativ zur Berechnung des TEWI, wie in Tabelle 3 beschrieben, herangezogen werden.

Die Datenanalyse wurde in R (R Core Team 2023) vorgenommen. Grafiken wurden mit dem R-Paket „ggplot2“ (Wickham 2016) erstellt.

Tabelle 3: TEWI-Berechnung

TEWI	**= Direkte Kältemittelemissionen im Betrieb und bei Entsorgung + Indirekte Emissionen = $L_{jährl}$ * n * GWP + m * (1 – α_R) * GWP + $E_{jährl}$ * n * ß**	
GWP	Treibhauspotenzial des Kältemittels	CO_2eq nach Verordnung (EU) 2024/573
M	Kältemittelmenge	kg
$L_{jährl}$	Leckagemenge während der Nutzung p.a.	kg/Jahr
n	Betriebszeit der Anlage	Jahre
α_R	Rückgewinnungsfaktor bei Entsorgung	dimensionslos
$E_{jährl}$	Energiebedarf pro Jahr	kWh_{el}/Jahr
ß	CO_2-Emissionen der Energieerzeugung	kg CO_2eq/kWh_{el}

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Parameter je Gerät

Nummer	Parameter	Beschreibung
[1]	Gerätetyp	Flüssigkeitskühlsatz oder Verflüssigungssatz
[2]	Hersteller-Bezeichnung	Laut technischem Datenblatt
[3]	Für Flüssigkeitskühlsätze: Arte der Kühlung	Luftgekühlt/wassergekühlt
[4]	Temperaturtyp laut Verordnungen zur Umsetzung der Ökodesign-Richtline 2009/2015/EG	Verordnung (EU) 2016/2281 für Komfortkühler (Flüssigkeitskühlsätze) und Verordnung (EU) 2015/1095 für Verflüssigungssätze und Prozesskühler (Flüssigkeitskühlsätze)
[5]	Umgebungstemperatur in °C	Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze: 30 °C Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze: 35 °C Verflüssigungssätze: 32 °C
[6]	Verdampfungstemperatur in °C	Luft- und wassergekühlte Prozesskühler: • Niedrige Betriebstemperatur: -25 °C • Mittlere Betriebstemperatur: -8 °C • Hohe Betriebstemperatur: 7 °C Luft- und wassergekühlte Komfortkühler: • Niedrige Betriebstemperatur: 7 °C • Mittlere Betriebstemperatur: 18 °C Verflüssigungssätze: • Niedrige Betriebstemperatur: -35 °C • Mittlere Betriebstemperatur: -10 °C
[7]	Kälteleistung in kW	Laut technischem Datenblatt
[8]	Energiebedarf in kW	Laut technischem Datenblatt
[9]	COP/EER (coefficient of performance/energy efficiency ratio)	Laut technischem Datenblatt oder wenn nicht vorhanden berechnet aus [7] und [8]
[10]	SEER („seasonal energy efficiency ratio“, Jahresarbeitszahl im Kühlbetrieb) für Komfortkühler (Flüssigkeitskühlsätze) SEPR („seasonal energy performance ratio“, Jahresarbeitszahl) für Prozesskühler (Flüssigkeitskühlsätze)	Laut technischem Datenblatt, wenn verfügbar
[11]	Kältemittel	Laut technischem Datenblatt oder wenn nicht vorhanden über Nachfrage beim Hersteller
[12]	GWP des Kältemittels	Berechnet nach Verordnung (EU) 2024/573
[13]	Füllmenge in kg	Laut technischem Datenblatt oder wenn nicht vorhanden über Nachfrage beim Hersteller
[14]	Jährliche Leckagerate während der Laufzeit in %	Annahmen: 2,4 % für Flüssigkeitskühlsätze 4,3 % für Verflüssigungssätze
[15]	Jährliche Leckagemenge in kg	[14] * [13]
[16]	Rückgewinnungsanteil bei der Entsorgung in %	Annahme: 80 %
[17]	Betriebsdauer der Anlage	Annahmen: Flüssigkeitskühlsätze: 15 a Verflüssigungssätze: 12 a
[18]	Mittlere jährliche Laufzeit der Anlage in Stunden pro Jahr (h/a)	Annahmen: 5.190 h/a für Flüssigkeitskühlsätze

Nummer	Parameter	Beschreibung
		4.383 h/a für Verflüssigungssätze
[19]	Energiebedarf pro Jahr in Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a)	[8] * [18]
[20]	CO_2-Emissionen des Stromverbrauchs in kg CO_2eq/kWh mit Vorketten	498 g CO_2eq/kWh (Icha & Lauf 2023)
[21]	TEWI indirekt in kg CO_2eq	[19] * [20] * [17]
[22]	TEWI direkt in kg CO_2eq	[12] * [13] * [14] * [17] + [12] * [13] * (1 – [16])
[23]	TEWI gesamt in kg CO_2eq	[21] + [22]

3 Marktübersicht für Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze

3.1 Relevante Kältemittel

Im Rahmen dieser Studie wurden ausschließlich Anlagen betrachtet, die mit den natürlichen Kältemitteln Kohlenwasserstoffe (z.B. Propan, R-290), Kohlendioxid (CO_2, R-744), Ammoniak (NH_3, R-717) und Wasser (H_2O, R-718) sowie halogenierten Stoffen und Mischungen mit einem GWP unter 750 befüllt waren.

In Tabelle 5 sind relevante fluorierte und natürliche Kältemittel mit einem GWP unter 750 in Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungsätzen gelistet.

Tabelle 5: Übersicht der potenziell verwendeten Kältemittel in Verflüssigungssätzen und Flüssigkeitskühlsätzen mit einem GWP unter 750

Kältemittel	Zusätzliche Information	Sicherheits-klasse	GWP_{100}[1]	TFA-Bildungs-potenzial[2]	HFKW-23-Bildungs-potenzial[3]
Gesättigte HFKW und Gemische					
R-32	Reinstoff, gesättigt	A2L	675	-	-
R-125	*Reinstoff, gesättigt, nur in Mischungen*	*A1*	*3500*	-	-
R-134a	*Reinstoff, gesättigt, nur in Mischungen*	*A1*	*1430*	*7-20 %*	-
R-227ea	*Reinstoff, gesättigt, nur in Mischungen*	*A1*	*3220*	*100 %*	-
R-450A	Gemisch aus R-134a und R-1234ze(E)	A1	601	Bis zu 14 %	0,8-2,6 %
R-452B	Gemisch aus R-125, R-32 und R-1234yf	A2L	697	26 %	-
R-454B	Gemisch aus R-32 und R-1234yf	A2L	465	31 %	-
R-454C	Gemisch aus R-32 und R-1234yf	A2L	146	79 %	-
R-455A	Gemisch aus R-32, R-1234yf und R-744	A2L	146	76 %	-
R-513A	Gemisch aus R-134a und R-1234yf	A1	629	Bis zu 65 %	-
R-515B	Gemisch aus R-227ea und R-1234ze(E)	A1	288	Bis zu 18 %	1,2-4,0 %
Ungesättigte HFKW und HFCKW (uHF(C)KW)					
R-1234yf	Reinstoff, ungesättigt	A2L	0,501	100 %	-
R-1234ze(E)	Reinstoff, ungesättigt	A2L	1,37	Bis zu 10 %	1,3-4,4 %
R-1233zd(E)	Reinstoff, ungesättigt, chloriert	A1	3,88	Bis zu 10 %[4]	1,3-4,4 %
Natürliche					
R-717	Ammoniak (NH_3)	B2	0	-	-
R-718	Wasser (H_2O)	A1	0	-	-

Kältemittel	Zusätzliche Information	Sicherheits-klasse	GWP_{100}[1]	TFA-Bildungs-potenzial[2]	HFKW-23-Bildungs-potenzial[3]
R-744	Kohlendioxid (CO_2)	A1	1	-	-
R-290	Propan (C_3H_8)	A3	0,02	-	-
R-1270	Propen (C_3H_7)	A3	0	-	-

[1] Als Quelle für die GWPs wurden Annex I, II und VI aus Verordnung (EU) 2024/573 verwendet. TFA-Bildungspotenziale entstammen Behringer et al. (2021) bzw. sind daraus berechnet.

[2] Berechnet aus den TFA-Bildungsraten in Behringer et al. (2021).

[3] Berechnet aus den HFKW-23-Bildungsraten in Pérez-Peña et al. (2023).

[4] In Behringer et al. (2021) wurde für alle Stoffe, die beim atmosphärischen Abbau das Zwischenprodukt CF_3CHO bilden, eine TFA-Bildungsrate von 10 % angenommen. Einzige Ausnahme war der uHFCKW-1233zd(E), für den eine Rate von 2 % angenommen wurde, basierend auf der Publikation von Sulbaek Andersen et al. (2018). Sulbaek Andersen et al. (2023) kamen jedoch zu dem Ergebnis, dass die potenzielle TFA-Ausbeute u.a. des uHFCKW-1233zd(E) höher ist als zuvor angenommen. Daher werden in der vorliegenden Studie bis zu 10 % angenommen.

Vergleicht man die physikalischen Parameter der verschiedenen Kältemittel (Tabelle 6), so sollte Ammoniak (R-717), aufgrund seiner hohen kritischen Temperatur von 132,2 °C, in Anlagen mit hohen Enddrücken, wie beispielsweise luftgekühlten Flüssigkeitskühlsätzen, effizienter sein als andere Kältemittel (Eckert et al. 2019). Der uHFCKW-1233zd(E) weist eine noch höhere kritische Temperatur auf, findet in Anlagen mit hohen Enddrücken jedoch aufgrund des geringen kritischen Drucks des Gases keine Anwendung.

Die berechneten Kälteleistungszahlen (COPs) in Tabelle 6 sind theoretische Werte, die nicht den Anspruch erheben, reale Anlagen abzubilden, sondern lediglich einem Vergleich bei konstanten Bedingungen in einem idealisierten Kältekreislauf dienen. Der uHFCKW-1233zd(E) weist hier mit einem COP von 8,39 bzw. 5,36 die höchsten COPs auf, dicht gefolgt von Ammoniak mit 8,32 bzw. 5,36 (Tabelle 6 und Abbildung 1). Auffallend ist die im Verhältnis zu R-410A deutlich höhere Effizienz von Ammoniak und, weniger ausgeprägt, von uHFCKW-1233zd(E), bei Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen von 45 °C und 2 °C im Verhältnis zu 40 °C und 10 °C, im Vergleich zu anderen Kältemitteln. Dies sollte eine Präferenz von Ammoniak und uHFCKW-1233zd(E) in Flüssigkeitskühlsätzen zur Folge haben. Alle Berechnungen wurden ohne inneren Wärmeübertrager (Sauggaswärmeüberträger) durchgeführt. Für Ammoniak macht ein solcher keinen Sinn, er verbessert aber die Energieeffizienz von Anlagen mit Propan (R-290) und Propen (R-1270).

Das fluorierte Gemisch R-455A weist mit 7,51 bzw. 4,66 die niedrigsten COPs für beide Temperaturniveaus auf, gefolgt von uHFKW-1234yf und den HFKW/uHFKW Gemischen R-454C, R-452B und R-454B.

Tabelle 6: Physikalische Parameter und berechnete idealisierte Kälteleistungszahl (COP) und volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) verschiedener Kältemittel mit einem GWP <750

Kältemittel	Kritische Tempera-tur (°C)[1]	Kritischer Druck (bar)[1]	40 °C Verflüssigungs- und 10 °C Verdampfungstemperatur[2]				45 °C Verflüssigungs- und 2 °C Verdampfungstemperatur[3]			
			COP	COP/ COP_{R-410A}	Q_{Vol} (MJ/m³)	Q_{Vol}/ $Q_{Vol, R-410A}$	COP	COP/ COP_{R-410A}	Q_{Vol} (MJ/m³)	Q_{Vol}/ $Q_{Vol, R-410A}$
HFKW und Gemische										
R-32	78,1	57,8	7,68	1,04	7,29	1,10	4,85	1,05	5,40	1,13
R-450A	104,5	38,2	7,93	1,07	2,61	0,39	4,98	1,08	1,82	0,38
R-452B	77,1	52,2	7,96	1,02	6,49	0,98	4,77	1,03	4,73	0,99
R-454B	78,1	52,7	7,62	1,03	6,43	0,97	4,79	1,04	4,70	0,99
R-454C	85,7	43,2	7,58	1,02	4,38	0,66	4,71	1,02	3,07	0,64
R-455A	85,6	46,5	7,51	1,01	4,82	0,73	4,66	1,01	3,37	0,70
R-513A	94,9	36,5	7,75	1,05	3,01	0,45	4,81	1,04	2,10	0,44
R-515B	108,5	35,8	7,90	1,07	2,23	0,34	4,93	1,07	1,54	0,32
uHF(C)KW										
R-1234yf	94,7	33,8	7,63	1,03	2,79	0,42	4,70	1,02	1,98	0,42
R-1234ze(E)	109,4	36,3	7,94	1,07	2,24	0,34	4,97	1,08	1,55	0,32
R-1233zd(E)	165,6	35,7	8,39	1,13	0,68	0,10	5,36	1,16	0,46	0,10
Natürliche										
R-290	96,7	42,5	7,81	1,05	3,84	0,58	4,91	1,06	2,80	0,59
R-1270	91,1	45,5	7,76	1,05	4,60	0,70	4,89	1,06	3,40	0,71
R-717	132,2	113,3	8,32	1,12	5,26	0,79	5,36	1,16	3,89	0,82

[1] Entnommen aus CYCLE_D-HX, Version 1.0 (Domanski 2017).

[2] Berechnet mit CYCLE_D-HX, Version 1.0 (Domanski 2017) für 40 °C Verflüssigungs- und 10 °C Verdampfungstemperatur, keine Überhitzung und keine Unterkühlung, isentropische Effizienz 100 %. Vergleich mit R-410A mit COP von 7,41 und Q_{Vol} von 6,62.

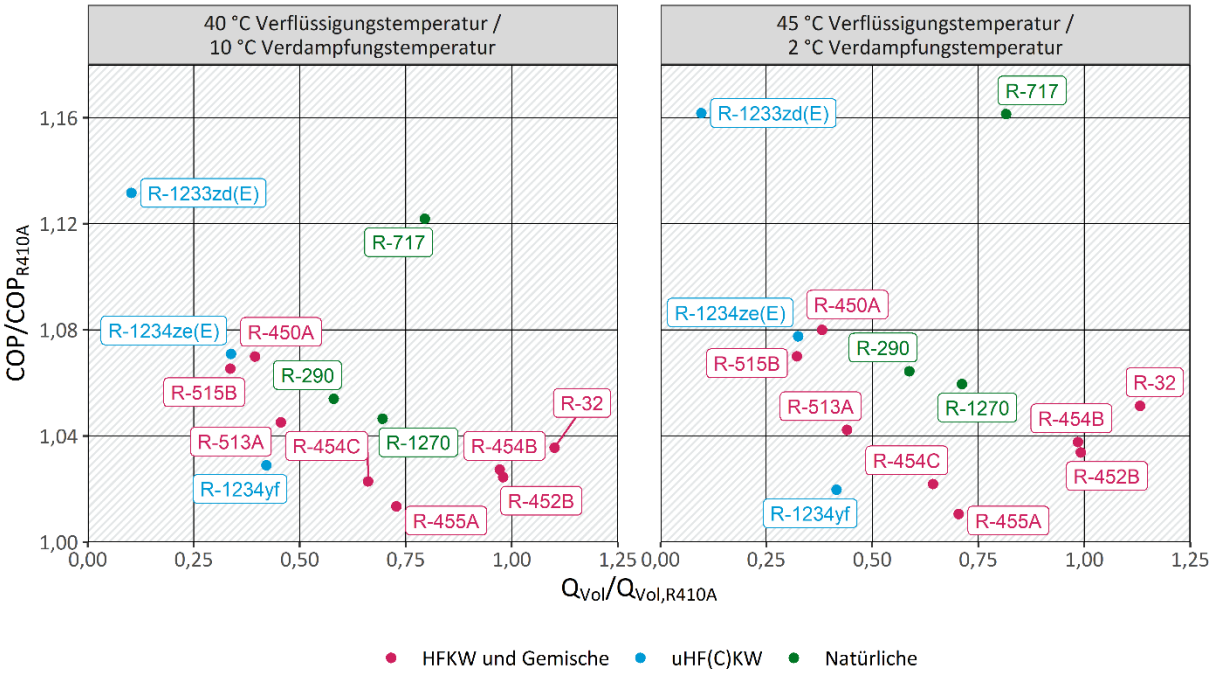
[3] Berechnet mit CYCLE_D-HX, Version 1.0 (Domanski 2017) für 45 °C Verflüssigungs- und 2 °C Verdampfungstemperatur, keine Überhitzung und keine Unterkühlung, isentropische Effizienz 100 %. Vergleich mit R-410A mit COP von 4,61 und Q_{Vol} von 4,77.

Die volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) erlaubt eine Aussage über den Volumenstrom im Verhältnis zur Kälteleistung. Größere volumetrische Kälteleistungen erlauben bei gleicher Kälteleistung den Einsatz kleinerer Kompressoren. So sind R-1270 und R-513A ähnlich effizient aber Propenanlagen können kompakter dimensioniert werden. Die Sicherheitsklasse des Kältemittels (Tabelle 5) spielt ebenfalls eine Rolle bei der Dimensionierung einer Anlage. Da Propen als leicht entflammbares Kältemittel in der Sicherheitsklasse A3 eingestuft ist, können

erhöhte Sicherheitsanforderungen im Vergleich zu Anlagen mit dem nicht entflammbaren R-513A wiederum eine größere Dimensionierung erfordern. Bedacht werden muss jedoch stets, dass eine reduzierte Entflammbarkeit in aller Regel mit einem höheren Treibhauspotenzial einhergeht. So hat R-513A mit 629 ein erheblich höheres GWP als R-1270, welches kein GWP aufweist.

Die mit Abstand niedrigste volumetrische Kältekapazität hat uHFCKW-1233zd(E). Das bedeutet, dass es trotz seiner hohen Effizienz, die vergleichbar mit Ammoniak ist, einen deutlich höheren Platzbedarf mit sich bringt. Ammoniakanlagen können bei gleicher Kälteleistung kleiner dimensioniert werden.

Abbildung 1: Berechnete Kälteleistungszahl (COP) und volumetrische Kältekapazität (Q_{Vol}) verschiedener Kältemittel mit einem GWP <750 im Verhältnis zu R-410A



Anmerkungen: Berechnet mit CYCLE_D-HX, Version 1.0 (Domanski 2017) für 40 °C bzw. 45 °C Verflüssigungs- und 10 °C bzw. 2 °C Verdampfungstemperatur, jeweils keine Überhitzung und keine Unterkühlung sowie isentropische Effizienz von 100 %. COP von R-410A 7,41 (40/10 °C) und 4,61 (45/2 °C). Q_{Vol} von R-410A 6,62 (40/10 °C) und 4,77 (45/2 °C).
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 1 wurde in Anlehnung an McLinden et al. (2017) entworfen, die für verschiedene Kältemittel u.a. COPs berechnet haben. Um die hier berechneten COPs mit denen aus McLinden et al. (2017) zu vergleichen, wurde der COP einer R-410A-Anlage nach den Kriterien in Abschnitt 2.2.2 in CYCLE_D-HX analog zu allen anderen untersuchten Kältemitteln berechnet. Die COPs der Kältemittel, die auch McLinden et al. untersuchten, wurden zu dem hier berechneten COP von R-410A von 7,41 ins Verhältnis gesetzt, den auch McLinden et al. in ihrer Arbeit berechnet hatten, und gegen die entsprechenden Werte aus McLinden et al. aufgetragen (Abbildung A 1 in Anhang A.1). Für alle Kältemittel ergeben sich identische Werte.

Wichtig ist hierbei zu beachten, dass es sich bei den oben dargestellten Parametern um theoretische Ergebnisse für einen idealisierten Kältekreis mit Verdichter, Verflüssiger, Expansionsventil und Verdampfer handelt. Spezielle Anpassungen an das eingesetzte Kältemittel wurden nicht berücksichtigt. Wie McLinden et al. (2017) zu entnehmen ist, kann jedoch die Effizienz von Kohlenwasserstoffen (z.B. Propan und Propen) erheblich verbessert werden,

indem ein interner Wärmeüberträger (Sauggaswärmeüberträger) eingesetzt wird. Für 40 °C Verflüssigungs- und 10 °C Verdampfungstemperatur wurden in McLinden et al. (2017) bei Einsatz eines internen Wärmeübertragers, über alle untersuchten Kältemittel, die höchsten COPs für Propen und Propan berechnet – ca. 2 bis 3 % höher als ohne inneren Wärmeüberträger.

3.2 Marktsituation

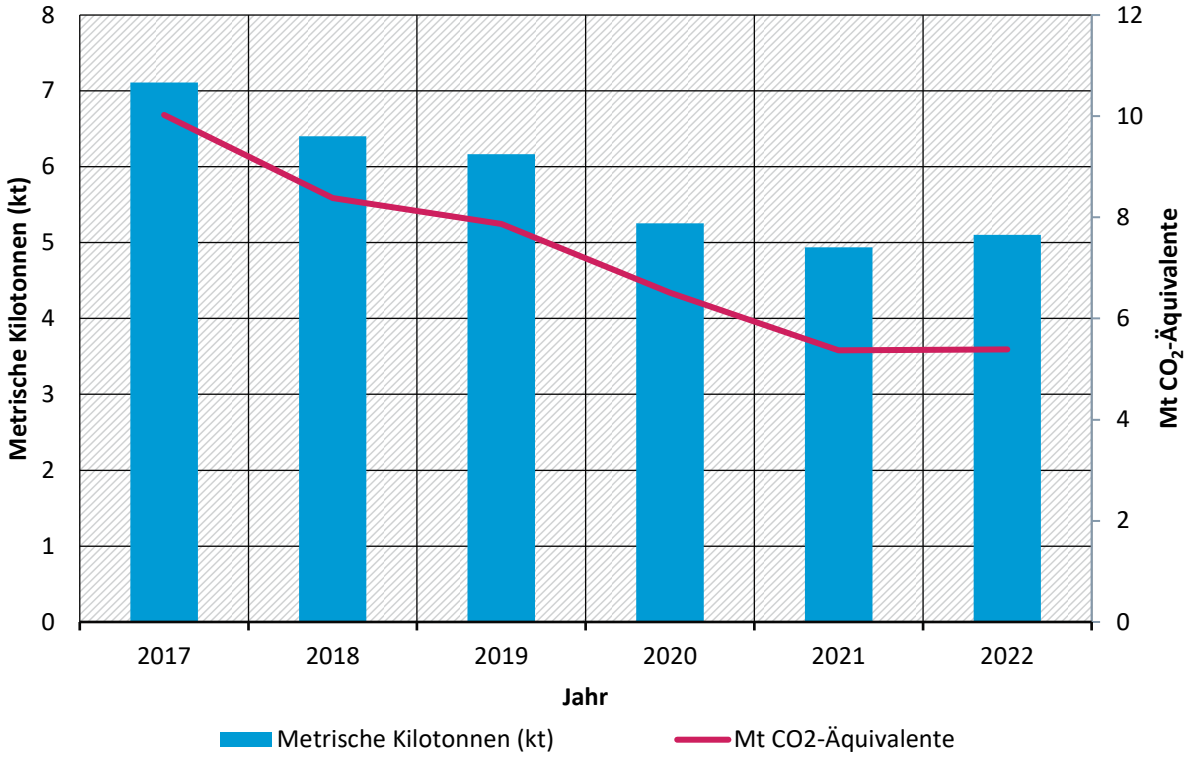
In den letzten Jahren hat sich in der EU die Verbreitung von Alternativen mit niedrigerem GWP im Vergleich zu den konventionellen HFKW in vielen Anwendungen stark beschleunigt. In einigen Bereichen, wie z.B. in Supermarktzentralanlagen, dominieren die Alternativen sogar den Markt (Directorate-General for Climate Action (European Commission), Ricardo, Öko-Institut e.V, Öko-Recherche, Birchby, et al., 2022; Directorate-General for Climate Action (European Commission), Ricardo, Öko-Institut e.V, Öko-Recherche, Gschrey, et al., 2022). In vielen F-Gas-Anwendungen haben natürliche Alternativen bedeutende Marktanteile erreicht, da sie langfristige technische Lösungen darstellen, die unabhängig vom HFKW-*Phase-down* gemäß der EU F-Gas-Verordnung und weiteren Verboten dauerhaft zur Verfügung stehen werden (ebd.). Europa ist im Vergleich zu anderen Regionen der Welt führend bei der Reduktion des GWP und bei der verstärkten Anwendung von natürlichen Kältemitteln, wie die Marktforschungsorganisation BSRIA bereits 2020 allgemein feststellte (cci Dialog 2020).

Das im Auftrag der EU-Kommission durchgeführte Preismonitoring beobachtet die Preisentwicklung für relevante Kältemittel auf Basis von Unternehmensangaben auf allen Ebenen der Lieferkette. Durch die Verknappung der Marktverfügbarkeit von HFKW ist es in der EU in den letzten Jahren zu deutlichen Preissteigerungen gekommen, vor allem seit etwa 2018. Die Preise für F-Gas-freie und Niedrig-GWP-Kältemittel sind hingegen nahezu konstant geblieben.

In Deutschland zeigen die Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG) (Destatis o.J.-a, o.J.-b) ebenfalls eine Verringerung der Verwendung von HFKW als Kältemittel (Abbildung 2). Die Erhebung erfasst dabei die Erstfüllung in Neuanlagen, die Erstfüllung von umgerüsteten Anlagen und die Instandhaltung von bestehenden Anlagen. Die Abbildung zeigt die Gesamtverwendungsmengen. FKW hatten dabei in allen Jahren einen minimalen Anteil, uHFKW hingegen machten seit 2017 etwa ein Viertel der Verwendungsmengen aus, wobei der, vor allem in Fahrzeugklimaanlagen eingesetzte, uHFKW-1234yf den größten Anteil hatte.

Abbildung 2 verdeutlicht den Trend hin zu Kältemitteln mit niedrigerem GWP. Daten zur Verwendung von natürlichen Kältemitteln werden in der Erhebung nach UStatG nicht erfasst. Das heißt, in einer Vollabbildung aller verwendeten Stoffe wäre der Trend noch deutlicher zu sehen.

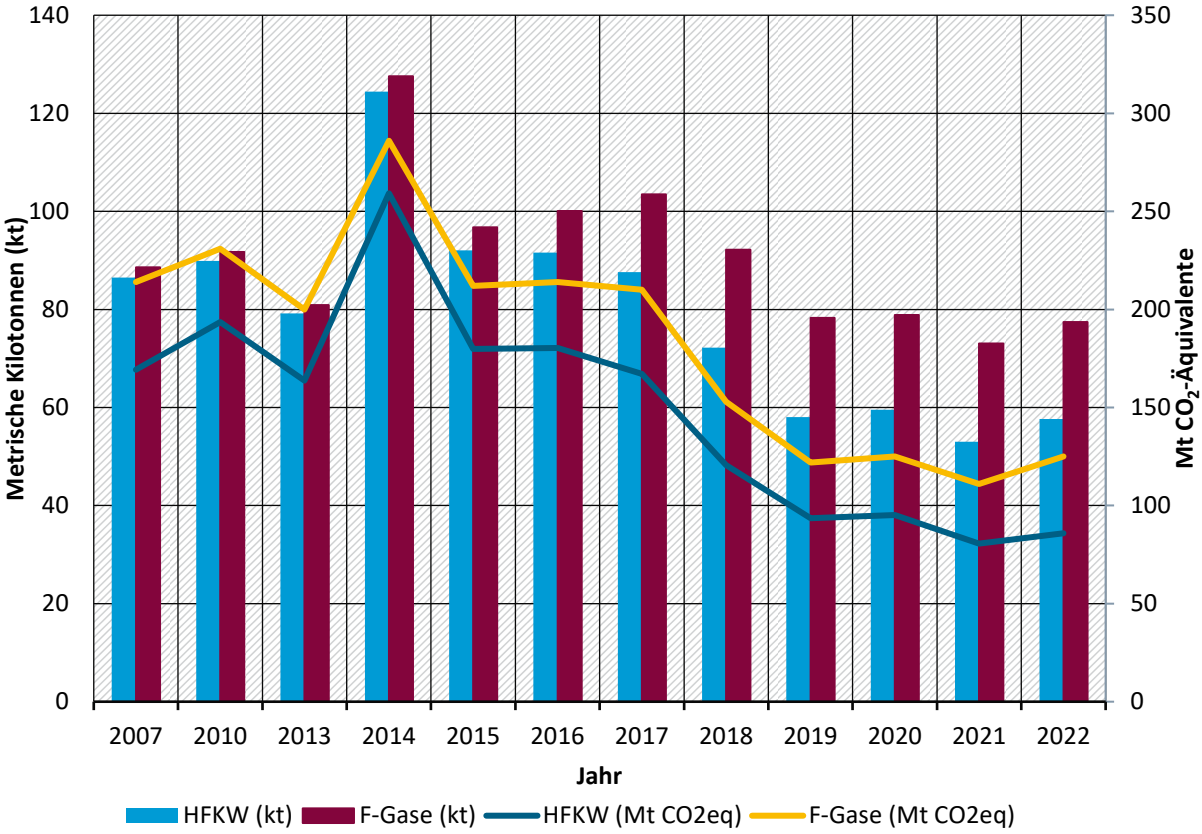
Abbildung 2: Gemeldete Gesamtverwendungsmengen von uHFKW, HFKW und FKW als Kältemittel nach UStatG in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Destatis (o.J.-a, o.J.-b)

Das Angebot von HFKW und F-Gasen insgesamt nahm auf dem EU-Markt von 2017 bis 2019 deutlich ab (Abbildung 3). Während im Jahr 2017 noch 88 kt HFKW bzw. 103 kt F-Gase angeboten wurden, waren es im Jahr 2019 nurmehr 58 kt bzw. 78 kt. Ähnlich verhielt sich die Abnahme im Angebot in CO_2-Äquivalenten, die sich 2017 auf 167 Mt CO_2eq für HFKW und 210 Mt CO_2eq für F-Gase belief. Zwischen 2019 und 2022 blieben die Mengen relativ konstant und stiegen im Jahr 2022, im Verhältnis zum Vorjahr, wieder leicht an auf 58 kt (9 % Anstieg) bzw. 86 Mt CO_2eq (6 %) für HFKW und 77 kt (7 %) bzw. 125 Mt CO_2eq (13 %) für F-Gase.

Abbildung 3: Angebot von HFKW und F-Gasen insgesamt in der EU (ohne Vereinigtes Königreich)



Anmerkung: F-Gase sind HFKW, FKW, SF_6, uHF(C)KW, HFE und Alkohole sowie NF_3 und andere perfluorierte Verbindungen.
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Ludig et al. (2023)

3.3 Analyse der technischen Datenblätter

Insgesamt wurden 46 Verflüssigungssätze und 177 Flüssigkeitskühlsätze analysiert (Tabelle 7). Davon waren für 38 Verflüssigungssätze und 158 Flüssigkeitskühlsätze Füllmengen dokumentiert. Gemäß Ökodesign-Verordnung wurde nach den verschiedenen Anlagentypen unterschieden (Art der Kühlung und Betriebstemperaturbereich). Wie man sieht, sind insbesondere die Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich sowie luftgekühlte und wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Temperaturbereich vertreten. Bezüglich der eingesetzten Kältemittel sticht hervor, dass im Bereich der Verflüssigungssätze im niedrigen Temperaturbereich und bei luft- und wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen im mittleren Temperaturbereich keine Modelle mit fluorierten Treibhausgasen im untersuchten Datensatz vorhanden sind.

Tabelle 7: Übersicht der analysierten Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze

Anlagenart	Betriebstemperaturbereich	Anzahl der Hersteller[1]	Anzahl der Anlagen[1]	Geräte mit HFKW und Gemischen[1]	Geräte mit uHF(C)KW[1]	Geräte mit natürlichen Kältemitteln[1]
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Niedrig (Prozesskühlung)	1 (1)	4 (4)	-	-	4 (4)
	Mittel (Prozesskühlung)	2 (2)	11 (11)	-	-	11 (11)
	Hoch (Prozess) / Niedrig (Komfort)	14 (15)	81 (91)	34 (34)	14 (16)	33 (41)
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Mittel (Prozess)	2 (2)	10 (10)	-	-	10 (10)
	Hoch (Prozess) / Niedrig (Komfort)	12 (14)	52 (61)	22 (22)	12 (12)	18 (27)
Summe Flüssigkeitskühlsätze	-	**20 (21)**	**158 (177)**	**56 (56)**	**26 (28)**	**76 (93)**
Verflüssigungssätze	Niedrig	2 (2)	9 (9)	-	-	9 (9)
	Mittel	5 (6)	29 (37)	12 (19)	2 (3)	15 (15)
Summe Verflüssigungssätze	-	**5 (6)**	**38 (46)**	**12 (19)**	**2 (3)**	**24 (24)**

[1] In Klammern ist die Anzahl inklusive Geräte, für die keine Füllmenge verfügbar war, angegeben.

Diverse Hersteller gingen in die Analyse mit ein und sind in Tabelle 8 für den jeweiligen Gerätetyp nach Art des Kältemittels gelistet. Natürliche Kältemittel sind für alle Anlagenarten von verschiedenen Herstellern verfügbar und decken jeweils den gesamten Kälteleistungsbereich ab, mit Ausnahme von luftgekühlten Flüssigkeitskühlsätzen im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich, in denen für Anlagen mit mehr als 1.200 kW Kälteleistung keine verwertbaren Daten vorlagen. Diese existieren, beispielsweise von der Firma GEA, mit dem Kältemittel Ammoniak (GEA 2023), jedoch beziehen sich die Angaben in den technischen Datenblättern auf Verdampfungstemperaturen von 6 °C und nicht wie hier ausgewertet auf 7 °C.

Tabelle 8: Übersicht der Hersteller, Kältemittel und Kälteleistungsbereiche der untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze

Art der Anlage	Art von Kältemittel	Kältemittel	Leistungs-bereich (kW)	Hersteller
Flüssigkeitskühlsätze				
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich	HFKW und Gemische	R-32	16-966	Carrier, Daikin, Panasonic, Systemair
		R-454B	40-866	Mitsubishi
		R-513A	217-1.838	Mitsubishi, Stulz
	uHF(C)KW	R-1234ze(E)	79-1.572	Carrier, Mitsubishi, Thermo-Tec, Trane
	Natürliche	R-290	1-1.166	Felzer, MTA, Secon, Skadec, Swegon, Systemair, Thermo-Tec
		R-717	121-1.201	Mayekawa, Star Refrigeration
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze im niedrigen (Prozess) Betriebstemperaturbereich	Natürliche	R-717	131-387	Intarcon
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze im mittleren (Prozess) Betriebstemperaturbereich	Natürliche	R-1270	10-1.102	Secon
		R-717	555	Star Refrigeration
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich	HFKW und Gemische	R-513A	124-4.092	Airedale, Hitachi, Mitsubishi, Stulz
		R-515B	271-1.312	Carrier
	uHF(C)KW	R-1233zd(E)	1.055-3.869	Carrier
		R-1234ze(E)	93-1.699	Carrier, Mitsubishi, Trane
	Natürliche	R-290	8-490	Felzer, Futron, Intarcon, Secon, Thermo-Tec
		R-717	72-6.119	Engie, Sabroe, Mayekawa
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im mittleren (Prozess) Betriebstemperaturbereich	Natürliche	R-1270	22-328	Secon
		R-717	59-3.406	Sabroe
Verflüssigungssätze				
Verflüssigungssätze im niedrigen Betriebstemperaturbereich	Natürliche	R-290	0,1-0,7	Danfoss, Secop
		R-450A	2-7	Bitzer, Emerson

Art der Anlage	Art von Kältemittel	Kältemittel	Leistungs-bereich (kW)	Hersteller
Verflüssigungssätze im mittleren Betriebstemperaturbereich	HFKW und Gemische	R-454C	1-14	Danfoss, Emerson, Tecumseh
		R-455A	1-15	Danfoss, Emerson, Tecumseh
		R-513A	2-9	Bitzer, Emerson, Secop
	uHF(C)KW	R-1234yf	1-4	Bitzer, Tecumseh
	Natürliche	R-290	0,2-1,4	Danfoss, Secop
		R-744	4-15	Emerson, Panasonic

4 Vergleich und ökologische Bewertung – Technische Datenblätter

4.1 TEWI-Analyse

4.1.1 Flüssigkeitskühlsätze

Aus technischen Datenblättern konnten für luft- und wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. tiefen (Komfort) Temperaturbereich genug Daten gesammelt werden, um TEWIs für die drei verschiedenen Kältemittelgruppen (HFKW und Gemische, uHF(C)KW sowie natürliche Kältemittel) zu berechnen und diese zu vergleichen.

In den folgenden Abbildungen sind die TEWIs nach Kälteleistung für luft- und wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze sowie Verflüssigungssätze aufgetragen.

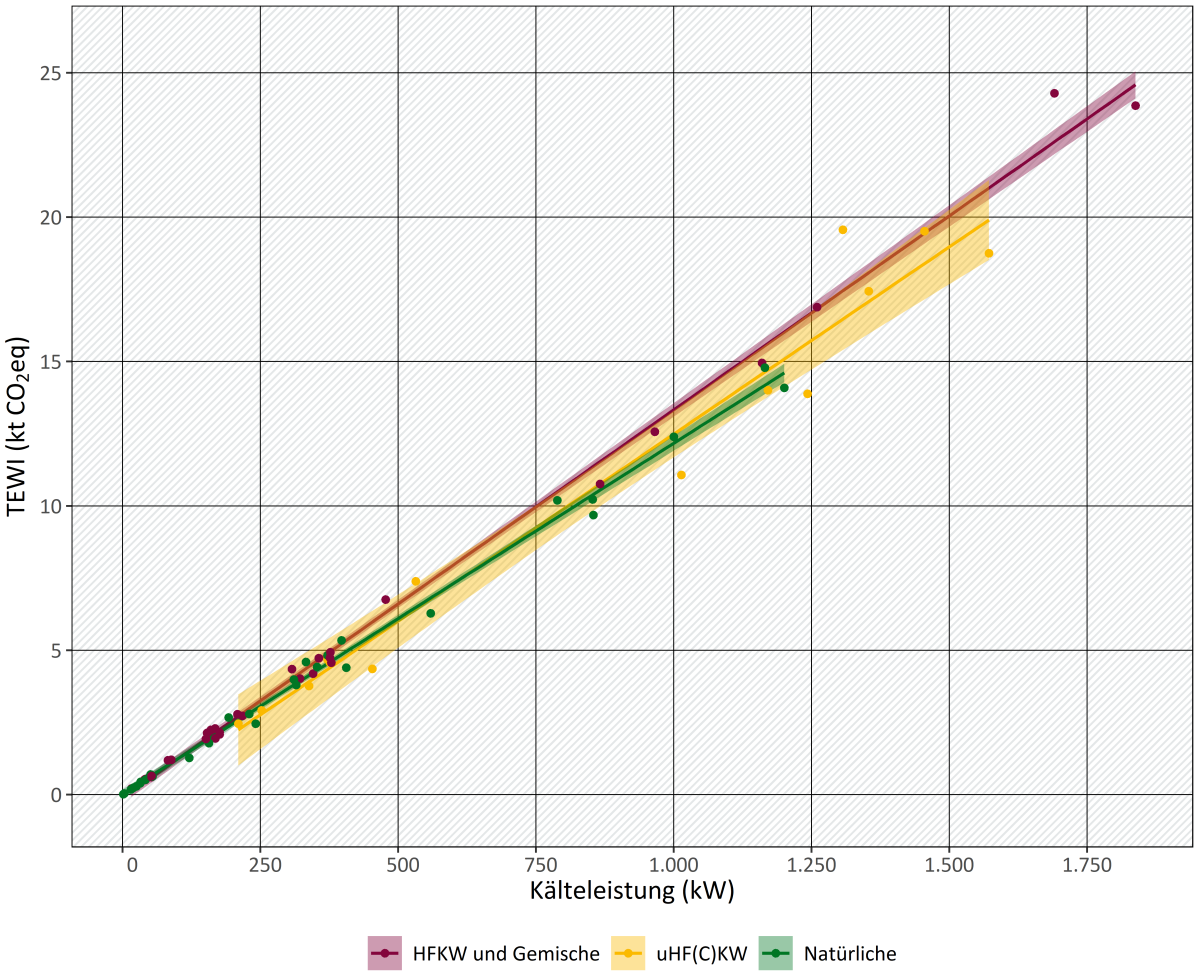
Für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze ließ sich mit zunehmender Kälteleistung ein marginal höherer TEWI von Geräten mit HFKW und Gemischen im Vergleich zu solchen mit uHF(C)KW und natürlichen Kältemitteln erkennen (Tabelle 9 und Abbildung 4). Die Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen waren in den kleinen Leistungsbereichen noch geringer ausgeprägt, wobei keine uHF(C)KW-Anlagen im Leistungsbereich unter 210 kW vorlagen. Im größeren Leistungsbereich von mehr als 1.250 kW waren dagegen keine Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in der Auswertung enthalten. Insgesamt wiesen Anlagen mit natürlichen Kältemitteln und uHF(C)KW über den vergleichbaren Kälteleistungsbereich nur sehr geringe Unterschiede auf.

Tabelle 9: Statistische Parameter der berechneten TEWI-Werte und Kälteleistungen für Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze

Kältemittelgruppe	Anzahl Anlagen	TEWI (kt CO_2eq)				Kälteleistung (kW)	
		Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze							
HFKW und Gemische	34	5,024	2,275	0,214	24,294	381,779	176,000
uHF(C)KW	14	10,315	9,233	2,460	19,564	832,100	773,000
Natürliche	33	3,882	2,671	0,017	14,790	317,229	192,400
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze							
HFKW und Gemische	22	7,230	3,498	1,028	26,570	988,468	453,500
uHF(C)KW	12	6,759	4,560	0,743	21,333	1.029,533	751,500
Natürliche	18	5,104	1,077	0,113	48,462	649,372	136,500
Verflüssigungssätze							
HFKW und Gemische	12	0,048	0,032	0,015	0,146	3,794	2,260
uHF(C)KW	2	0,019	0,019	0,016	0,023	1,409	1,409
Natürliche	15	0,038	0,015	0,003	0,215	2,527	0,976

Anmerkungen: Hohe (Prozess) bzw. niedrige (Komfort) Betriebstemperatur für Flüssigkeitskühlsätze und mittlere Betriebstemperatur für Verflüssigungssätze.

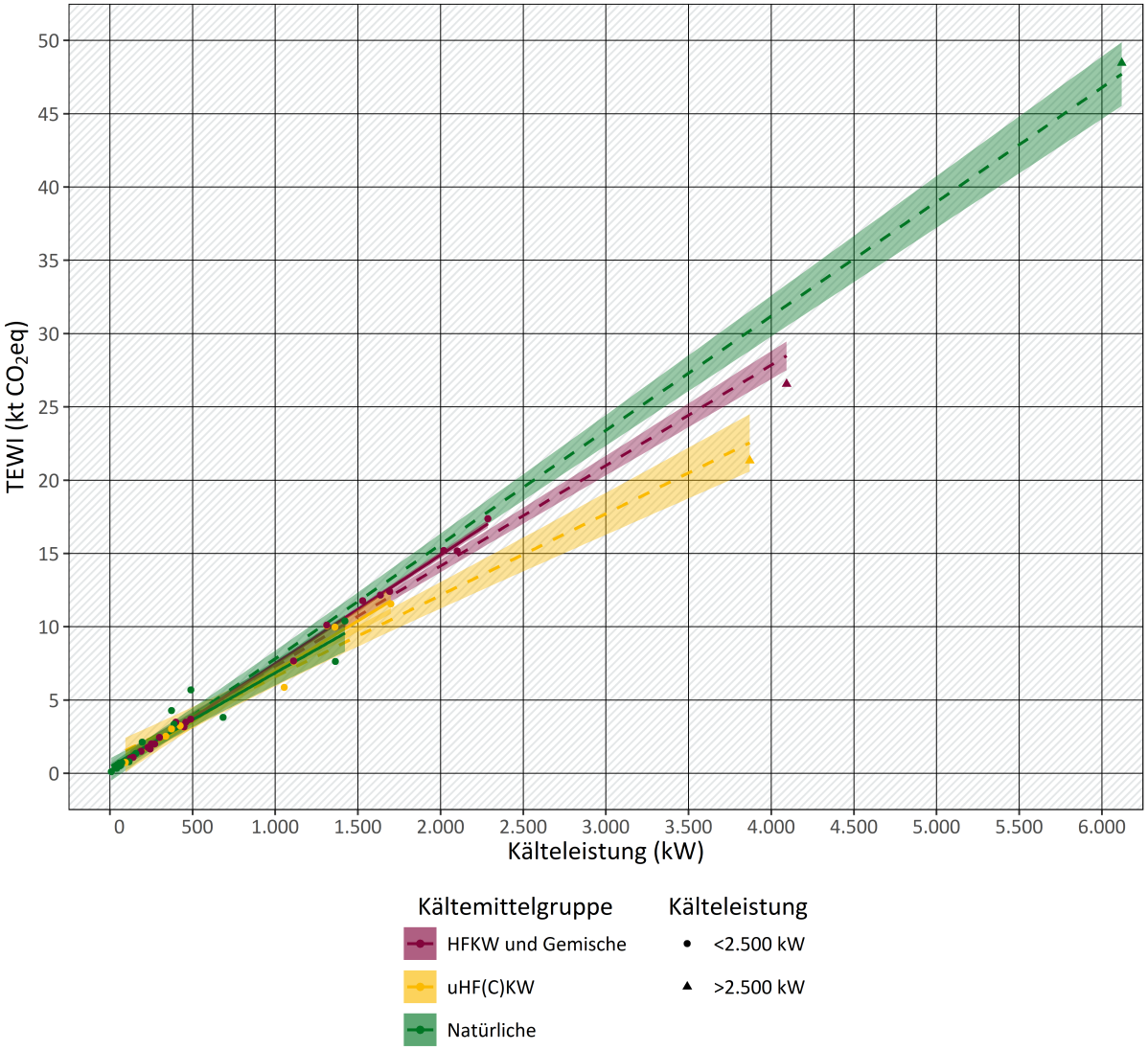
Abbildung 4: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

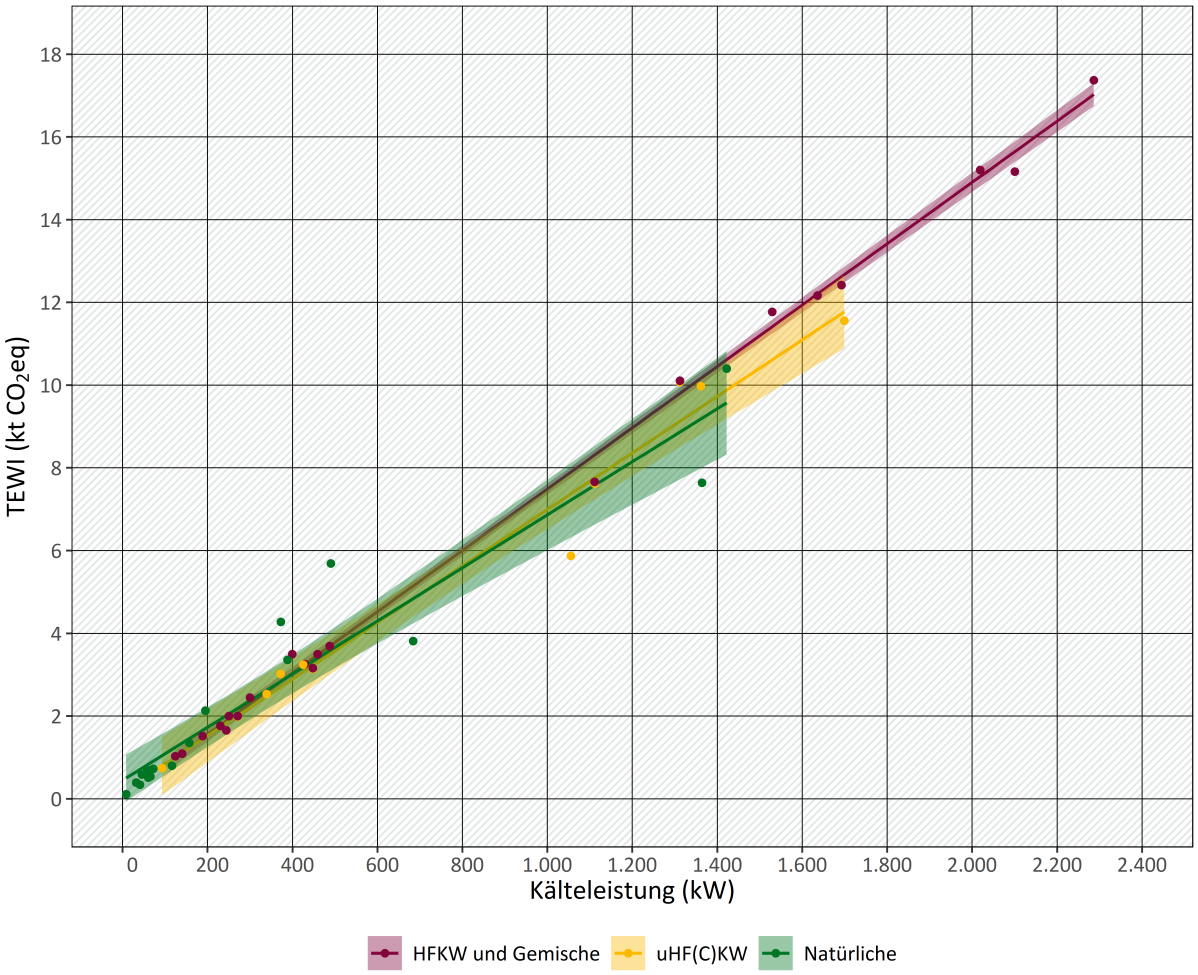
Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze waren für Kälteleistungen unter 2.500 kW diverse Anlagen je Kältemittelgruppe verfügbar, für Anlagen mit mehr als 2.500 kW nur je eine Anlage pro Kältemittelgruppe (Abbildung 5). Die linearen Regressionen über den gesamten Kälteleistungsbereich zeigten dabei andere Trends im Vergleich zu jenen über Anlagen mit einer Kälteleistung kleiner 2.500 kW. Über alle Anlagen hinweg hatten Geräte mit natürlichen Kältemitteln im höheren Leistungsbereich höhere TEWIs, gefolgt von Anlagen mit HFKW und Gemischen, und uHF(C)KW. Betrachtet man dagegen nur Anlagen mit <2.500 kW Kälteleistung, zeigte sich nahezu kein Unterschied zwischen den Kältemittelgruppen (Abbildung 6 und Tabelle 9). Insbesondere bis 500 kW Kälteleistung hatte die Auswahl des Kältemittels keinen Einfluss auf den TEWI. Im Leistungsbereich zwischen ca. 1.000 und 2.400 kW hatten HFKW und Gemisch-Anlagen die höchsten TEWIs bei einem kleinen Konfidenzintervall. Für uHF(C)KW-Anlagen und solche mit natürlichen Kältemitteln waren jedoch weniger Daten vorhanden, und auch nicht über den gesamten Leistungsbereich. Daher kann ein Unterschied zwischen den Kältemittelarten hier nur sehr bedingt abgeleitet werden.

Abbildung 5: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien für alle Anlagen (durchgezogene Linien) und Anlagen mit einer Kälteleistung <2.500 kW (gestrichelte Linien) basieren auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 6: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart mit einer Kälteleistung <2.500 kW

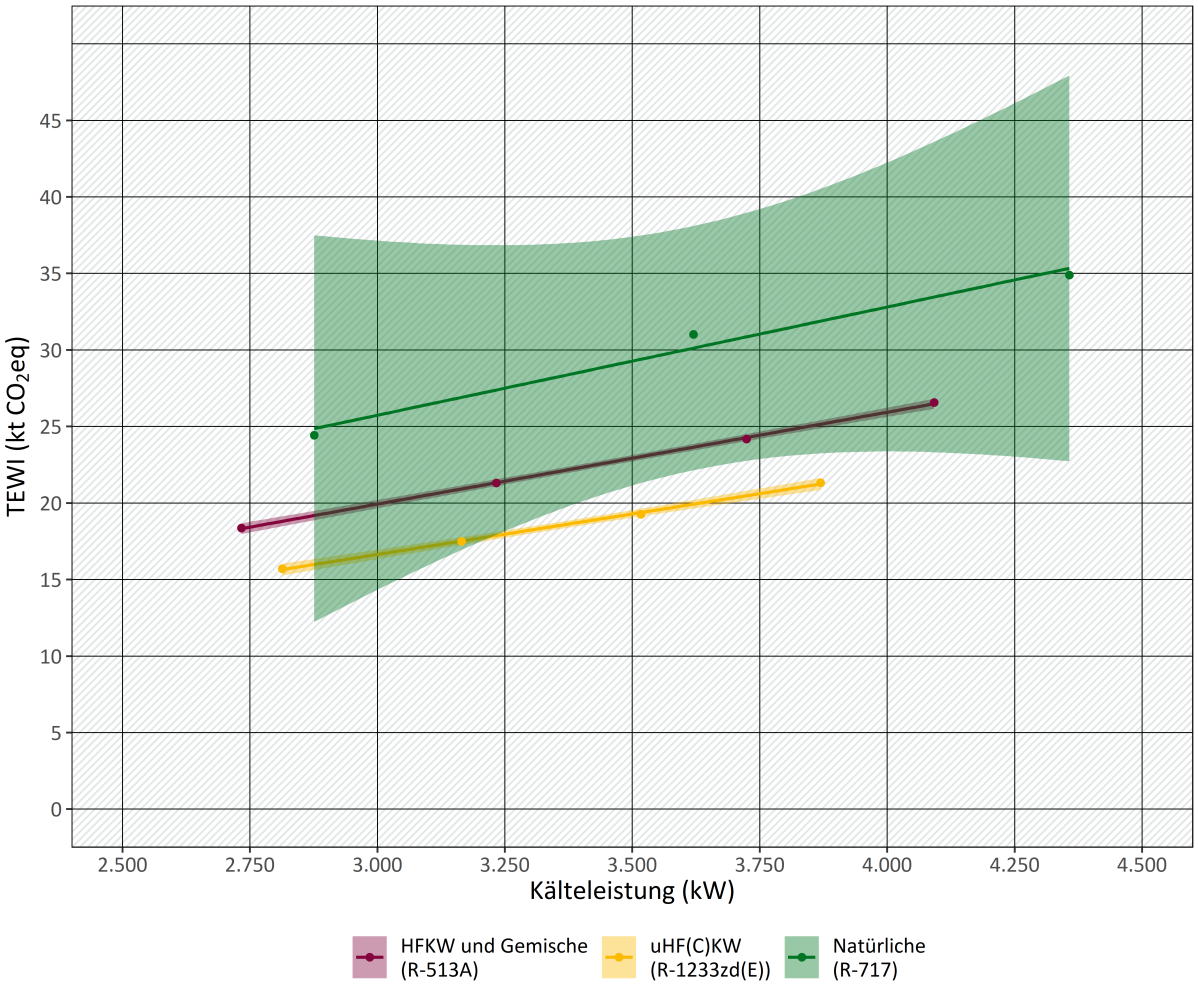


Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Für Anlagen mit mehr als 2.500 kW Kälteleistung war nur je ein Gerät pro Kältemittelgruppe im Datensatz vorhanden (Tabelle 6). Um dennoch einen Vergleich zu ermöglichen, wurde jeweils eine Anlage eines Herstellers mit je einem Kältemittel pro Kältemittelgruppe genauer analysiert (Abbildung 7). Die Anlagen mit Ammoniak (R-717) wiesen hierbei die höchsten TEWIs auf, gefolgt von den R-513A- und schließlich den uHFCKW-1233zd(E)-Anlagen.

Insgesamt ist die Datengrundlage bei Flüssigkeitskühlsätzen mit mehr als 2.500 kW Kälteleistung aber zu klein, um klare Schlussfolgerungen zu ziehen.

Abbildung 7: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart mit einer Kälteleistung >2.500 kW

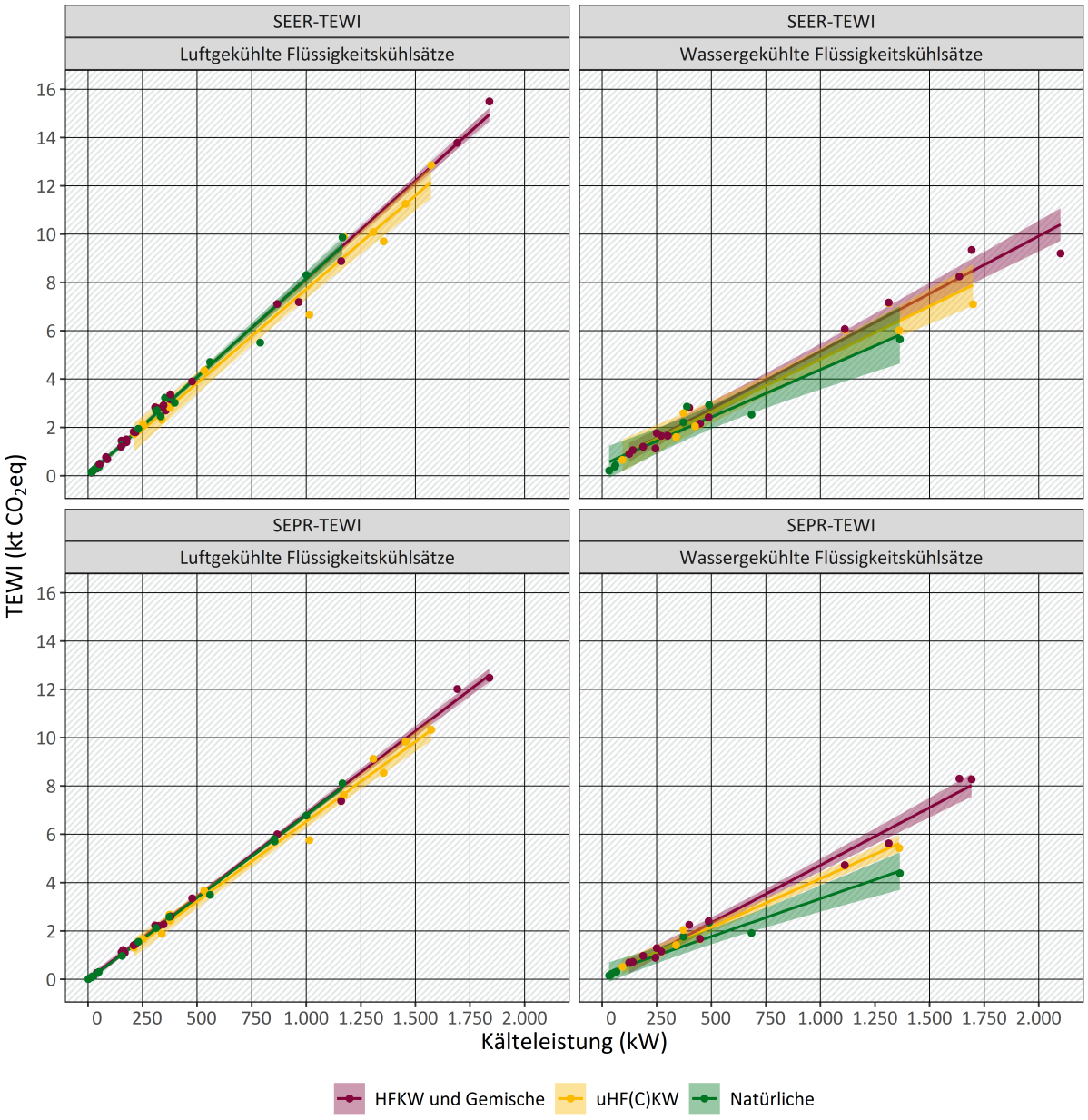


Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen. Daten für die verschiedenen Kältemittelgruppen entstammen jeweils einer Baureihe von einem von drei verschiedenen Herstellern.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

4.1.1.1 Saisonaler TEWI

Der mit den SEERs bzw. SEPRS berechnete saisonale TEWI für Flüssigkeitskühlsätze ergibt ein sehr ähnliches Bild zu den oben gezeigten Ergebnissen (Abbildung 8 und Tabelle 10). Für luftgekühlte Anlagen ergeben sich nahezu keine Unterschiede im saisonalen TEWI für Komfort- und Prozesskühler gleichermaßen. Für wassergekühlte Anlagen gab es für den direkten Vergleich der Kältemittelgruppen nur SEERs bzw. SEPRs für Anlagen mit weniger als 1.500 kW. In diesem Bereich gab es einen Trend hin zu niedrigeren saisonalen TEWIs bei Anlagen mit natürlichen Kältemitteln, jedoch waren im Leistungsbereich über 500 kW nur jeweils zwei Anlagen verfügbar. Im Bereich unter 500 kW gab es keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen.

Abbildung 8: Saisonaler TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze im hohen (Prozess) bzw. niedrigen (Komfort) Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Tabelle 10: Saisonaler TEWI und Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel

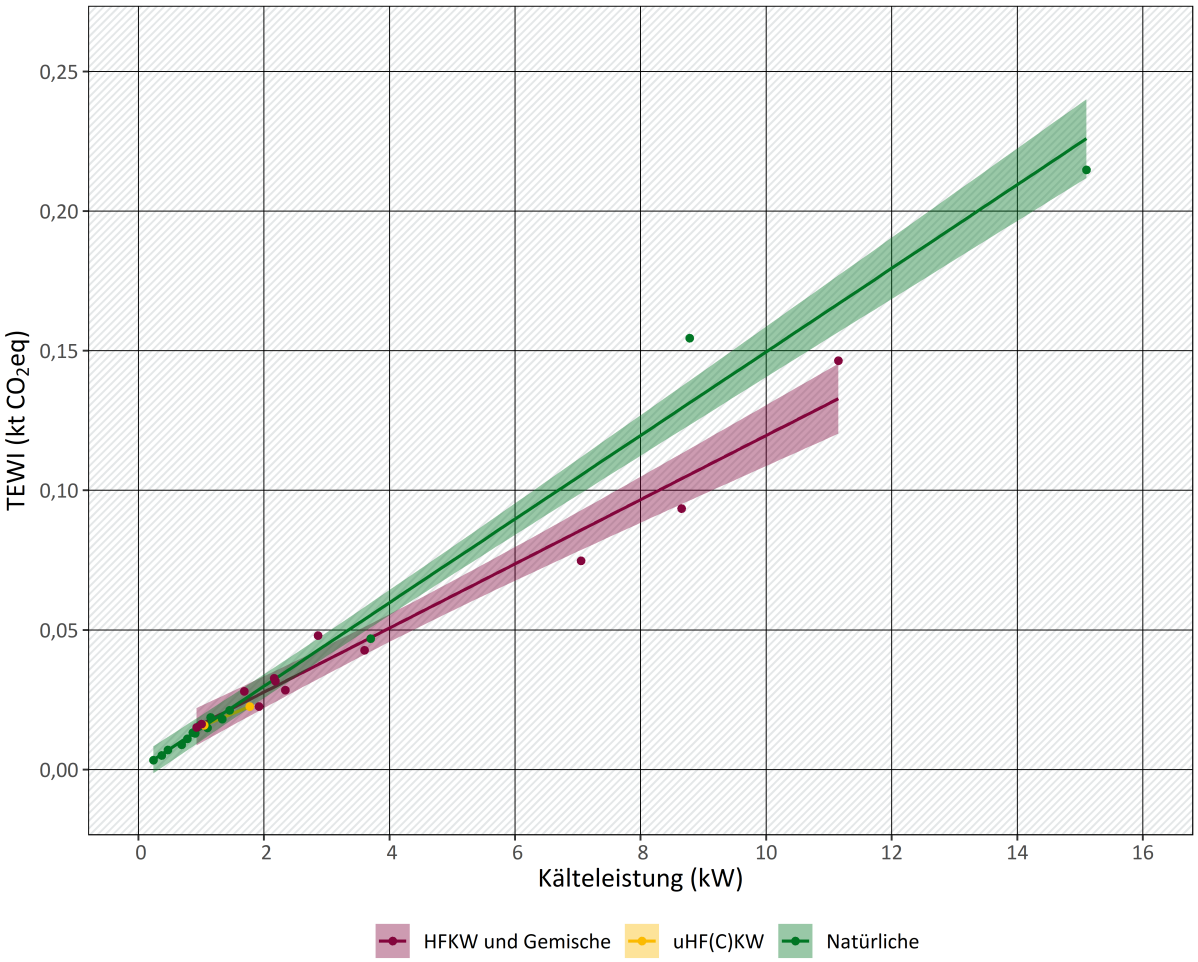
Kältemittel	Variable	Anzahl Anlagen	TEWI (kt CO_2eq)				Kälteleistung (kW)	
			Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-32	SEER-TEWI	17	1,43	0,77	0,12	7,19	176,70	88,30
	SEPR-TEWI	2	0,73	0,73	0,26	1,21	100,85	100,85
R-454B	SEER-TEWI	8	2,63	2,33	0,34	7,11	308,41	257,70
	SEPR-TEWI	8	2,13	1,82	0,27	6,00	308,41	257,70
R-513A	SEER-TEWI	6	7,78	6,40	1,80	15,50	950,88	818,65
	SEPR-TEWI	6	6,49	5,37	1,46	12,48	950,88	818,65
R-1234ze(E)	SEER-TEWI	12	6,40	5,52	1,75	12,86	829,45	773,00
	SEPR-TEWI	12	5,41	4,72	1,31	10,33	829,45	773,00
R-290	SEER-TEWI	21	2,48	1,94	0,14	9,87	301,41	230,00
	SEPR-TEWI	15	2,52	1,55	0,01	8,11	374,23	230,00
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-513A	SEER-TEWI	11	3,62	1,77	0,90	9,35	687,30	300,00
	SEPR-TEWI	9	2,87	1,29	0,69	8,31	573,37	250,00
R-515B	SEER-TEWI	4	4,26	4,12	1,65	7,17	785,50	779,50
	SEPR-TEWI	4	3,29	3,20	1,15	5,63	785,50	779,50
R-1234ze(E)	SEER-TEWI	10	3,70	2,37	0,66	7,13	743,04	436,50
	SEPR-TEWI	8	2,81	1,85	0,51	5,59	663,30	409,95
R-290	SEER-TEWI	6	1,51	1,32	0,21	2,94	233,37	216,25
	SEPR-TEWI	6	0,84	0,30	0,16	2,36	176,30	61,50
R-717	SEER-TEWI	2	4,09	4,09	2,53	5,65	1.024,00	1.024,00
	SEPR-TEWI	2	3,15	3,15	1,91	4,39	1.024,00	1.024,00

4.1.2 Verflüssigungssätze

Im Bereich der Verflüssigungssätze lagen nur Daten für Anlagen mit verschiedenen Kältemittelarten im mittleren Temperaturbereich vor (siehe Tabelle 7). Im Leistungsbereich unter ca. 2 kW waren erheblich mehr Anlagen mit natürlichen Kältemitteln vertreten, und es war kein Unterschied zwischen den Kältemittelarten erkennbar (Abbildung 9 und Tabelle 9). Im Datensatz waren nur zwei Anlagen mit uHF(C)KW als Kältemittel vorhanden, daher konnten hier keine Konfidenzintervalle berechnet werden, und eine Analyse ist nur schwer möglich. Diese beiden Anlagen enthielten uHFKW-1234yf und waren im TEWI vergleichbar mit Anlagen mit HFKW und Gemischen sowie natürlichen Kältemitteln.

Bis 4 kW Kälteleistung ließ sich ebenfalls kein Unterschied im TEWI erkennen. Mit zunehmender Kälteleistung zeigte sich im Trend ein höherer TEWI von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln im Vergleich zu solchen mit HFKW und Gemischen. Die Datengrundlage war in diesem Leistungsbereich jedoch sehr klein.

Abbildung 9: TEWI in Abhängigkeit der Kälteleistung für Verflüssigungssätze im mittleren Betriebstemperaturbereich nach Kältemittelart



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervall.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

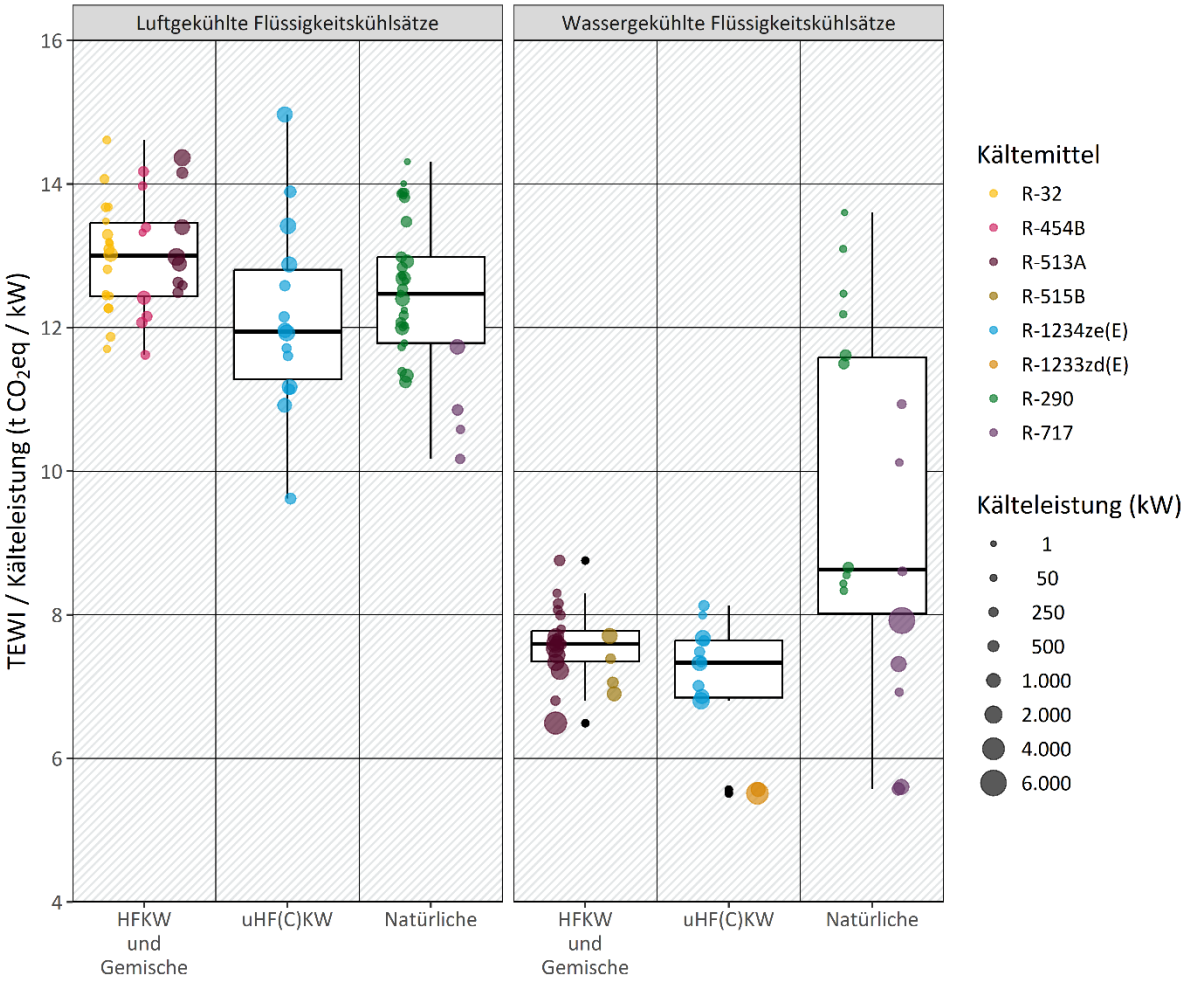
4.1.3 TEWI im Verhältnis zur Kälteleistung

Um die Kältemittelgruppen besser direkt miteinander vergleichen zu können, wurde ein Quotient aus dem TEWI und der Kälteleistung der jeweiligen Anlage für alle Geräte nach Anlagentyp gebildet; jeweils nur für jene Anlagentypen, für die ein Vergleich der Kältemittelart möglich war. Dieser Quotient ist ein Maß für die Emissionen in CO_2eq, die eine Kälteanlage pro kW Kälteleistung über ihre Nutzungsphase und bei der Entsorgung verursacht. Ein niedriger Quotient bedeutet damit eine geringere Umweltbelastung bei gleicher Kälteleistung.

Bei den luftgekühlten Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur wiesen Anlagen mit HFKW und Gemischen den höchsten Mittelwert sowie Median, und die kleinste Streuung auf (Abbildung 10 und Tabelle 11). Für Anlagen mit uHF(C)KW, die in diesem Fall ausschließlich mit uHFKW-1234ze(E) befüllt waren, war die Streuung in den Daten erheblich größer und der Mittelwert sowie Median niedriger. Bei den Anlagen mit natürlichen Kältemitteln zeigte sich eine Auftrennung nach Kältemittel. Geräte mit Propan (R-290) wiesen meist eine höhere Emission pro kW Kälteleistung auf als solche mit Ammoniak (R-717).

Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur zeigte sich ein heterogenes Bild bei Anlagen mit HFKW und Gemischen. Geräte mit R-513A und R-515B wiesen eine geringe Streuung im Bereich von ca. 7 bis 9 Tonnen CO_2eq pro kW Kälteleistung auf. Für Anlagen mit uHF(C)KW zeigte sich eine Aufspaltung im Quotienten, wobei uHFKW-1234ze(E)-Anlagen höhere Emissionen pro kW Kälteleistung erzeugten als Anlagen mit uHFCKW-1233zd(E). Ähnlich verhielt es sich bei Anlagen mit R-290 im Vergleich zu solchen mit R-717. Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak hatten mit wenigen Ausnahmen einen geringeren Quotienten als vergleichbare Geräte mit Propan, wobei diese meist eine kleinere Kälteleistung aufwiesen. Auffallend war auch die große Streuung im Quotienten bei Anlagen mit natürlichen Kältemitteln. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass für Propan teilweise noch keine ausreichende Optimierung der Technologie auf das Kältemittel stattgefunden hat, während das bei Ammoniak in der Regel der Fall ist.

Abbildung 10: TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

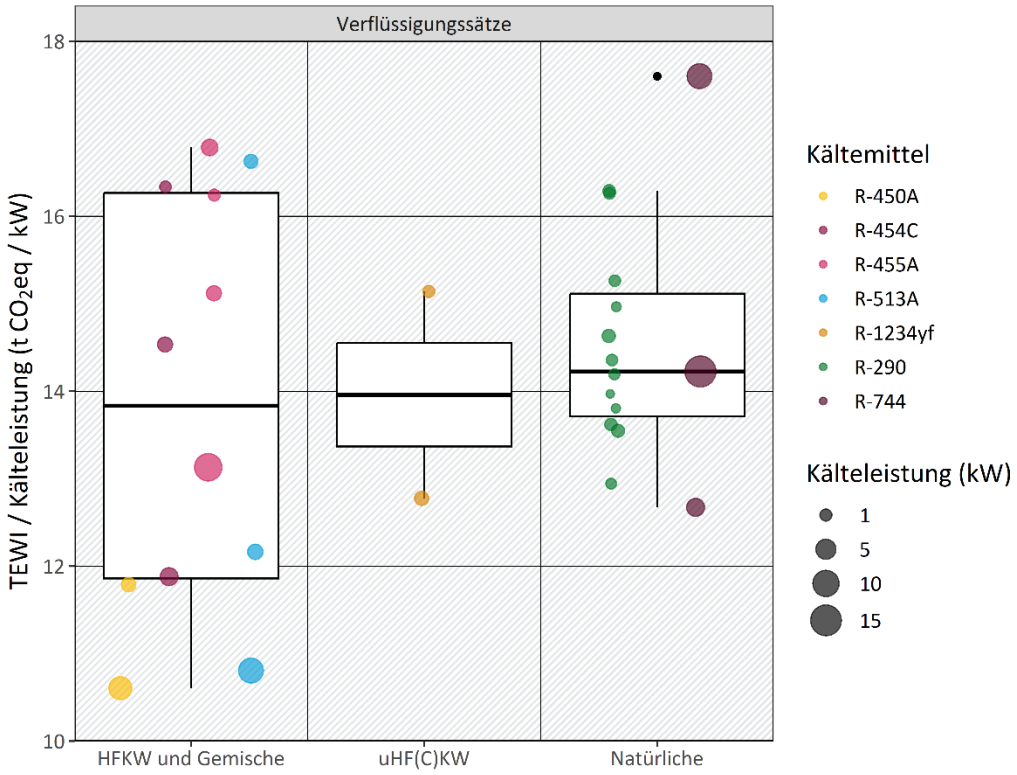
Tabelle 11: TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur und Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur

Kältemittel-gruppe	Anzahl Anlagen	TEWI pro kW Kälteleistung (t CO_2eq / kW)					Kälteleistung (kW)	
		Mittel-wert	Gewichteter Mittelwert[1]	Median	Minimum	Maximum	Mittel-wert	Median
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
HFKW und Gemische	34	13,0	13,0	13,0	11,6	14,6	381,8	176,0
uHF(C)KW	14	12,1	12,1	11,9	9,6	15,0	832,1	773,0
Natürliche	33	12,5	12,5	12,5	10,2	14,3	317,2	192,4
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
HFKW und Gemische	22	7,6	7,6	7,6	6,5	8,8	988,5	453,5
uHF(C)KW	12	7,1	7,1	7,3	5,5	8,1	1.029,5	751,5
Natürliche	18	9,5	9,5	8,6	5,6	13,6	649,4	136,5
Verflüssigungssätze								
HFKW und Gemische	12	13,8	13,8	13,8	10,6	16,8	3,8	2,3
uHF(C)KW	2	14,0	14,0	14,0	12,8	15,1	1,4	1,4
Natürliche	15	14,6	14,6	14,2	12,7	17,6	2,5	1,0

[1] Gewichtet nach Kältemittel und Hersteller

Für Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur waren teilweise nur sehr wenige Anlagen je Kältemittel vorhanden (Abbildung 11). Während Geräte mit HFKW und Gemischen eine große Streuung aufwiesen, hatten sie im Mittel den kleinsten Quotienten aus TEWI und Kälteleistung (Tabelle 11). Innerhalb dieser Kältemittelgruppe ließ sich lediglich ein gewisser Trend bezüglich Anlagen mit R-450A und R-455A erkennen, wobei erstere stets niedrigere Quotienten aufwiesen. Hinsichtlich natürlicher Kältemittel war klar erkennbar, dass Propan (R-290) nur in kleinen Anlagen Verwendung findet, während CO_2 (R-744) in größeren Anlagen eingesetzt wird. Die Auswahl des Kältemittels hat hier aber keinen Einfluss auf die Emissionen in CO_2eq pro kW Kälteleistung. Im direkten Vergleich hatten Anlagen mit HFKW und Gemischen einen geringeren TEWI pro kW Kälteleistung im Mittelwert und Median als Anlagen mit natürlichen Kältemitteln. Anlagen mit uHF(C)KW hatten dagegen einen etwas niedrigeren Mittelwert, aber gleichzeitig einen etwas höheren Median. Für uHF(C)KW waren jedoch nur zwei Anlagen verfügbar, was einen Vergleich erschwert.

Abbildung 11: TEWI pro kW Kälteleistung über Nutzungsphase und Entsorgung für Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur

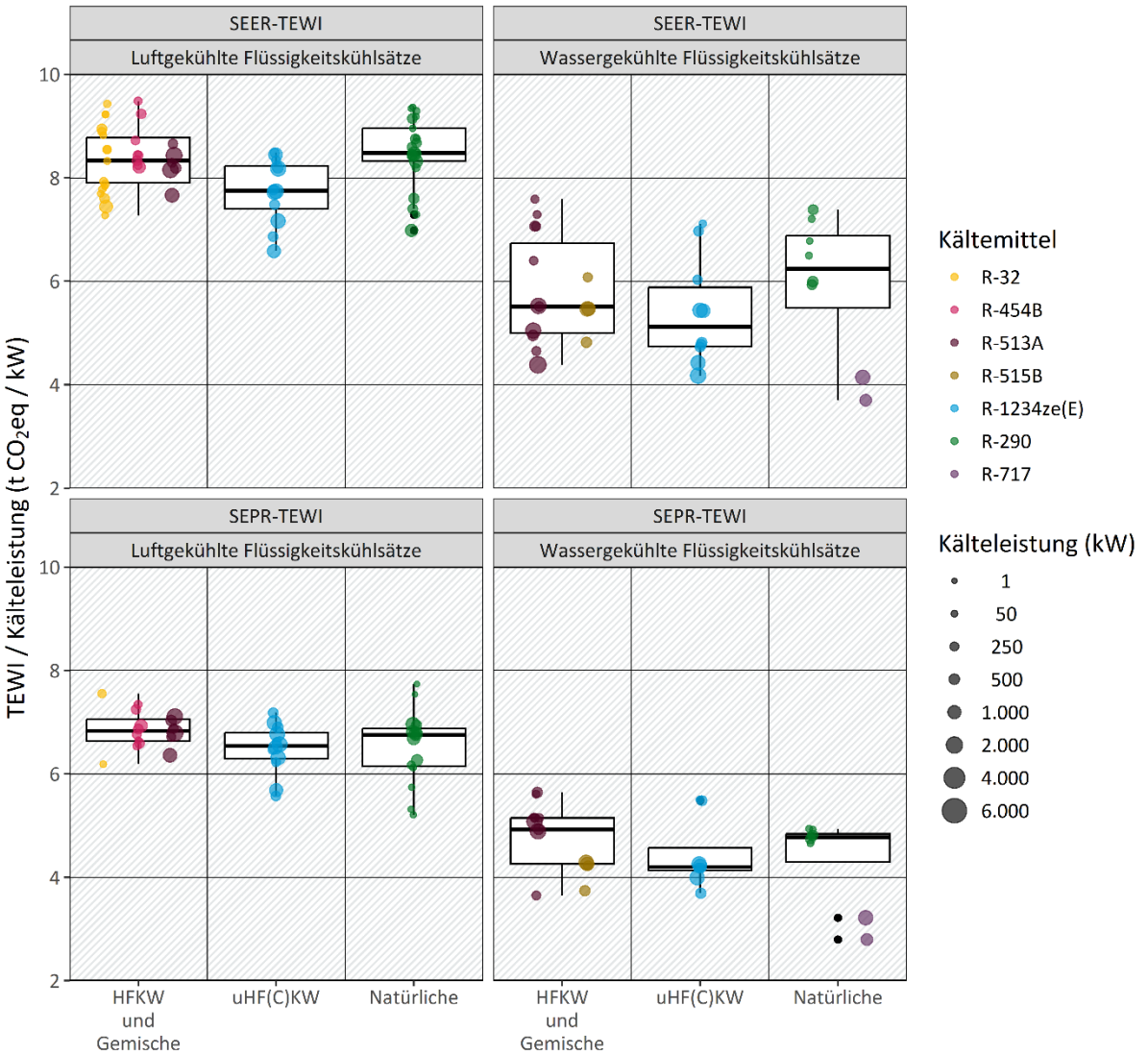


Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

4.1.3.1 Saisonaler TEWI

Wie schon weiter oben beschrieben, ergaben die saisonalen TEWIs ähnliche Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen wie die klassischen TEWIs. Für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze waren jedoch keine SEERs verfügbar (Abbildung 12 und Tabelle 12). Alle anderen Kältemittel streuten über einen vergleichbaren Bereich, während Anlagen mit uHFKW-1234ze(E) die niedrigsten SEER-TEWIs aufwiesen und Anlagen mit Propan die niedrigsten SEPR-TEWIs. Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze hatten einige wenige Anlagen mit R-513A die höchsten SEER- als auch SEPR-TEWIs und Anlagen mit Ammoniak die niedrigsten. Anlagen mit Propan hatten im Vergleich zu Ammoniakanlagen deutlich höhere saisonale TEWIs, die für den SEER-TEWI im mittleren bis oberen Bereich der SEER-TEWIs von Anlagen mit fluorierten Kältemitteln rangierten, und für den SEPR-TEWI im mittleren Bereich.

Abbildung 12: Saisonaler TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Tabelle 12: Saisonaler TEWI pro kW Kälteleistung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel

Kältemittel	Variable	Anzahl	TEWI pro kW Kälteleistung (t CO_2eq/kW)				Kälteleistung (kW)	
		Anlagen	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-32	SEER-TEWI	17	8,32	8,32	7,28	9,43	176,70	88,30
	SEPR-TEWI	2	6,87	6,87	6,19	7,55	100,85	100,85
R-454B	SEER-TEWI	8	8,64	8,45	8,21	9,49	308,41	257,70
	SEPR-TEWI	8	6,87	6,81	6,54	7,34	308,41	257,70
R-513A	SEER-TEWI	6	8,23	8,24	7,66	8,66	950,88	818,65
	SEPR-TEWI	6	6,81	6,83	6,36	7,11	950,88	818,65
R-1234ze(E)	SEER-TEWI	12	7,75	7,75	6,58	8,48	829,45	773,00
	SEPR-TEWI	12	6,48	6,54	5,57	7,18	829,45	773,00
R-290	SEER-TEWI	21	8,48	8,48	6,99	9,36	301,41	230,00
	SEPR-TEWI	15	6,52	6,75	5,21	7,74	374,23	230,00
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-513A	SEER-TEWI	11	5,95	5,52	4,39	7,59	687,30	300,00
	SEPR-TEWI	9	5,03	5,15	3,65	5,64	573,37	250,00
R-515B	SEER-TEWI	4	5,46	5,47	4,82	6,08	785,50	779,50
	SEPR-TEWI	4	4,13	4,24	3,74	4,29	785,50	779,50
R-1234ze(E)	SEER-TEWI	10	5,39	5,12	4,18	7,11	743,04	436,50
	SEPR-TEWI	8	4,44	4,20	3,70	5,50	663,30	409,95
R-290	SEER-TEWI	6	6,63	6,64	5,94	7,38	233,37	216,25
	SEPR-TEWI	6	4,81	4,81	4,66	4,94	176,30	61,50
R-717	SEER-TEWI	2	3,92	3,92	3,70	4,14	1.024,00	1.024,00
	SEPR-TEWI	2	3,01	3,01	2,80	3,22	1.024,00	1.024,00

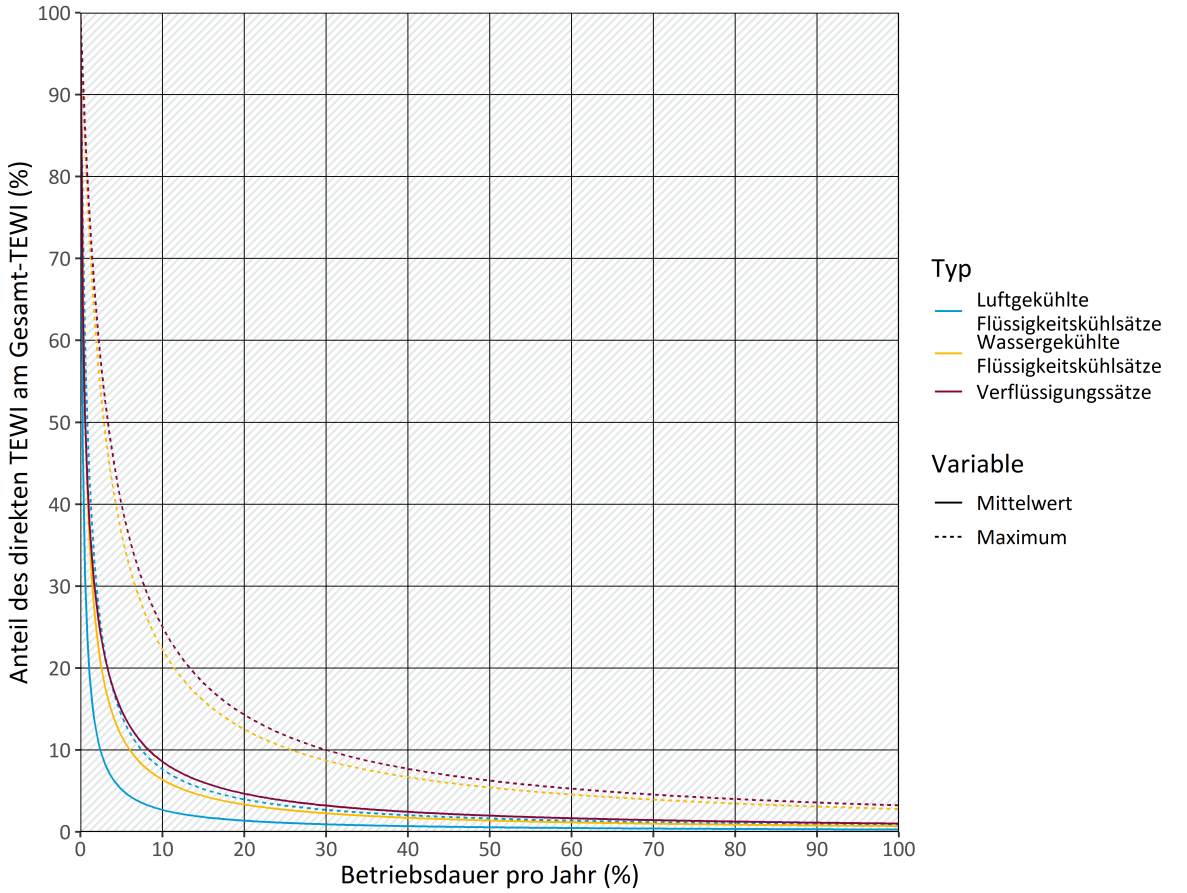
4.2 Theoretische Betrachtungen zum TEWI

In Abbildung 13 sind die Mittelwerte und Maximalwerte des direkten TEWI in Prozent des Gesamt-TEWI über die Betriebsstunden in Prozent von 8.766 Stunden (alle Stunden eines Jahres) für die unterschiedlichen Gerätetypen aufgetragen. Es zeigte sich, dass der direkte Anteil des Gesamt-TEWI mit zunehmenden Betriebsstunden exponentiell abfiel. Bereits ab 10 % (877 Stunden im Jahr) Betriebsdauer hatten alle Anlagen im Mittel einen direkten TEWI-Anteil von weniger als 10 %. Zwischen den Anlagentypen ließen sich Unterschiede erkennen, wobei luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze einen niedrigeren direkten TEWI-Anteil hatten als wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze. Verflüssigungssätze hatten im direkten Vergleich den höchsten direkten TEWI-Anteil, gefolgt von wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen. Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze hatten dagegen einen deutlich niedrigeren maximalen Anteil.

Bei den beiden Geräten mit den höchsten Anteilen des direkten TEWI am Gesamt-TEWI, die in Abbildung 13 die jeweils höchsten maximalen Anteile hatten, handelte es sich um einen wassergekühlten 244 kW Flüssigkeitskühlsatz mit dem Kältemittel R-513A mit einer Füllmenge von 215 kg und einem 1,92 kW Verflüssigungssatz mit dem Kältemittel R-450A mit einer Füllmenge von 3,3 kg.

Den hier vorgenommenen TEWI-Berechnungen liegen Annahmen zur Laufzeit der Anlagen zugrunde, die für alle untersuchten Verflüssigungssätze und Flüssigkeitskühlsätze gleich sind (Tabelle 4). Sehr große Flüssigkeitskühlsätze mit Turboverdichtern können jedoch teilweise Laufzeiten von 25 Jahren erreichen, was deutlich über den angenommenen 15 Jahren liegt. Dies wurde jedoch im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt, da der Einfluss der Laufzeit auf den TEWI zu gering ist, wie eine kurze Kalkulation belegt: Betrachtet man eine 4.092 kW Anlage mit 1.699 kg R-513A und einer Laufzeit von 15 Jahren, errechnet sich ein Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI, unter Berücksichtigung der Annahmen in Tabelle 4, von 0,38 %. Bei ansonsten gleicher Berechnung, aber 25 Jahren Laufzeit, ergibt sich ein Anteil von 0,32 %.

Abbildung 13: Berechnungen zum Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI in Abhängigkeit der Betriebsstunden der Anlage pro Jahr für alle untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze mit HFKW und Gemischen als Kältemittel



Anmerkungen: Hohe (Prozess) bzw. niedrige (Komfort) Betriebstemperatur für Flüssigkeitskühlsätze und mittlere Betriebstemperatur für Verflüssigungssätze. Mittelwert und Maximum: Mittlerer und maximaler Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI je Betriebsdauer pro Jahr für die jeweilige Anlagenart.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Für die angenommenen Betriebsdauern von 59 % (5.190 Stunden im Jahr) für Flüssigkeitskühlsätze und 50 % (4.383 Stunden im Jahr) für Verflüssigungssätze lag der mittlere Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI bei 0,47 % für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze, 1,17 % für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze und 1,98 % für Verflüssigungssätze (Tabelle 13).

Dieser Modellierung folgend kann also davon ausgegangen werden, dass der maßgebliche Beitrag zum Gesamt-TEWI dem indirekten TEWI entstammt. Folglich ist hinsichtlich der Klimarelevanz die Effizienz der Anlage von zentraler Bedeutung.

Tabelle 13: Parameter der TEWI-Simulation für die untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze mit HFKW und Gemischen als Kältemittel

Art der Anlage	Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze	Verflüssigungssätze
Emissionsraten (in Prozent der Erstfüllmenge, geschätzt)			
Nutzungsphase	2,4 % p.a.		4,3 % p.a.
Entsorgung	20 %		
Dauer der Nutzungsphase			
Jahre	15 a		12 a
Emissionen pro kWh elektrische Energie nach Icha & Lauf (2023)			
Mit Vorketten	498 g CO_2eq/kWh		
Kältemittelfüllmenge laut technischem Datenblatt			
Minimale Füllmenge	3,0 kg	19,0 kg	0,6 kg
Mittlere Füllmenge	78,2 kg	264,0 kg	2,9 kg
Mittlere Füllmenge (gewichtet)	70,1 kg	314,0 kg	2,9 kg
Maximale Füllmenge	580,0 kg	1.699,0 kg	5,1 kg
GWP der Kältemittel			
Minimales GWP	465	288	146
Mittleres GWP	615	567	342
Mittleres GWP (gewichtet)	600	590	338
Maximales GWP	675	629	
Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI bei 59 % Betriebsdauer pro Jahr für Flüssigkeitskühlsätze und 50 % für Verflüssigungssätze			
Minimaler Anteil	0,17 %	0,30 %	0,36 %
Mittlerer Anteil	0,47 %	1,17 %	1,98 %
Maximaler Anteil	1,40 %	4,66 %	6,38 %

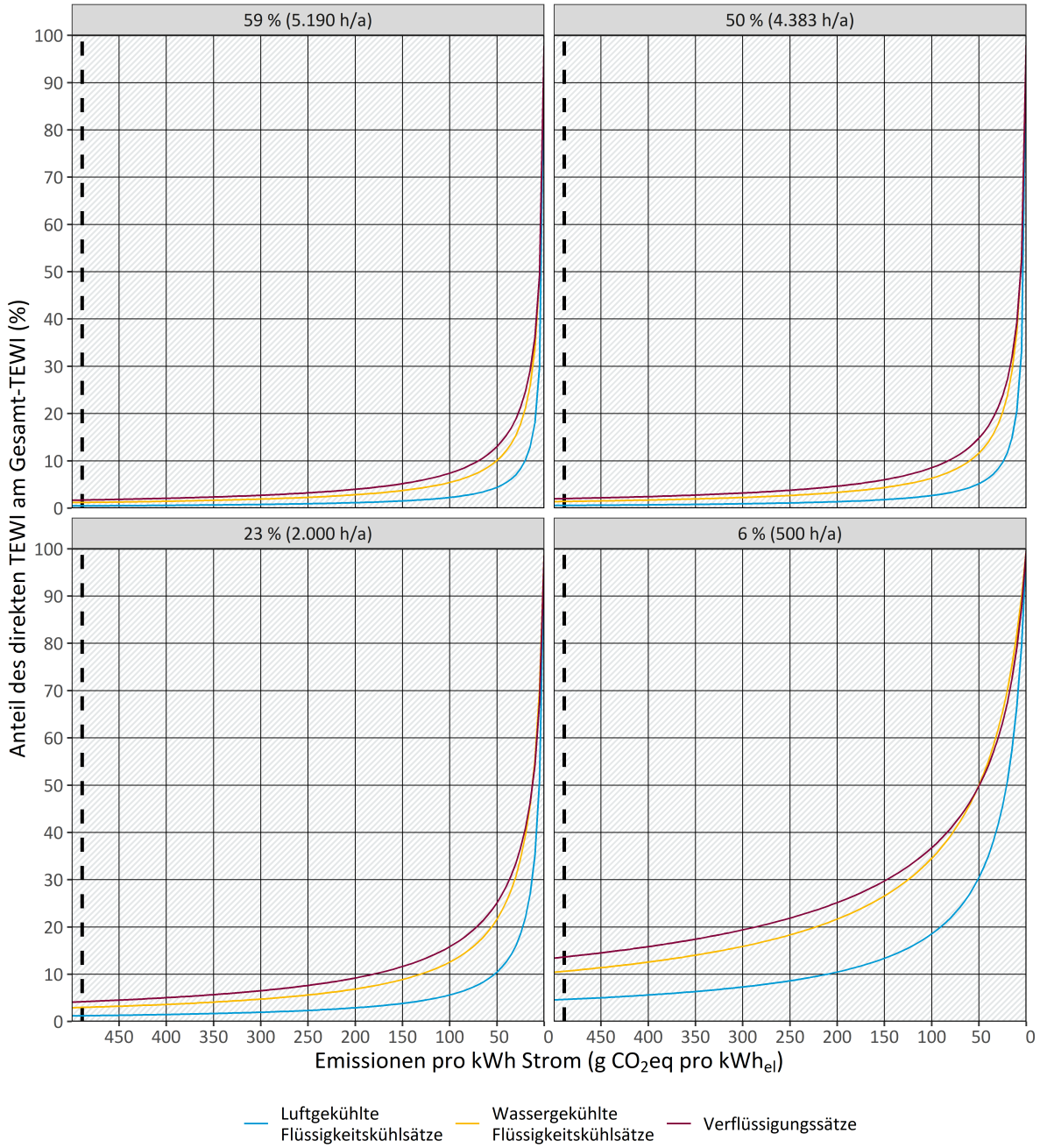
Anmerkung: Hohe (Prozess) bzw. niedrige (Komfort) Betriebstemperatur für Flüssigkeitskühlsätze und mittlere Betriebstemperatur für Verflüssigungssätze. Gewichtete Mittelwerte sind nach Kältemittel und Hersteller gewichtet.

In der Zukunft sollen die Treibhausgasemissionen Deutschlands erheblich reduziert werden, bis auf Netto-Null bis zum Jahr 2045 (BKS 2019). Das betrifft auch die mit der Erzeugung elektrischer Energie einhergehenden CO_2-Emissionen. In Folge wird der indirekte Anteil der hier berechneten TEWIs zurückgehen und der direkte Anteil, also die Emissionen des Kältemittels, an Wichtigkeit gewinnen. Weiterhin hat die Betriebsdauer der Anlagen einen nicht zu unterschätzenden Effekt auf den TEWI einer Anlage. Je länger die Betriebsdauer pro Jahr, desto größer fällt der indirekte Anteil des TEWI ins Gewicht. Die Betriebsdauer einer Anlage ist dabei stark vom individuellen Einsatz abhängig und kann nur wenige Stunden pro Jahr betragen, wenn die Anlage beispielsweise nur als Rückfalloption zur Abfangung von Lastspitzen eingesetzt wird. Den Normalfall stellt ein solcher Einsatz jedoch nicht dar.

Um die Dynamik und Interaktion der sich reduzierenden CO_2-Belastung der Stromerzeugung und der Variabilität der Betriebsstunden pro Jahr abzubilden, sind in Abbildung 14 die mittleren

Anteile des direkten TEWI am Gesamt-TEWI für alle untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze analog zu den Berechnungen für Abbildung 13 aufgetragen. Beispielhaft wurden vier verschiedene Betriebsstunden pro Jahr angenommen (5.190, 4.383, 2.000 und 700) und direkte TEWI-Anteile bei einer CO_2-Belastung des Strommixes von 500 bis 0 g CO_2eq pro kWh_{el} berechnet.

Abbildung 14: Mittlerer Anteil des direkten TEWI am Gesamt-TEWI in Abhängigkeit der CO_2-Belastung des Stroms und der Betriebsdauer der Anlagen pro Jahr



Anmerkung: Die heutige CO_2-Belastung des Stroms von 498 g CO_2eq pro kWh_{el} ist durch die gestrichelte schwarze Linie gekennzeichnet.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Wie oben beschrieben, spielt der direkte Anteil des TEWI bei 5.190 bzw. 4.383 Betriebsstunden pro Jahr und dem heutigen Strommix eine untergeordnete Rolle. Bei 500 Betriebsstunden pro

Jahr beträgt der direkte Anteil jedoch bereits 6 bis 15 %, je nach Anlagentyp. Für alle Betriebsstunden nimmt der direkte Anteil mit abnehmender CO_2-Belastung des Stromes exponentiell zu, bis er schließlich 100 % erreicht wenn der Strom emissionsneutral ist. Für eine individuelle Anlage kann dies bedeuten, dass bei beispielsweise 50 g CO_2eq pro kWh_{el} der Anteil des Kältemittels am Gesamt-TEWI zwischen 6 und 50 % betragen kann.

4.3 Energieeffizienz

4.3.1 Flüssigkeitskühlsätze

Für Flüssigkeitskühlsätze lagen teilweise Informationen zur saisonalen Effizienz vor. Die Auswertung dieser Daten ist in den folgenden Abbildungen für die verschiedenen Kältemittel dargestellt. Generell lagen die SEER- bzw. SEPR-Werte jeweils über den entsprechenden COP- bzw. EER-Werten (Abbildung 15).

Für luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze streuten die einzelnen Anlagen mit verschiedenen Kältemitteln in einem vergleichbaren Bereich für den SEER und den SEPR. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln wiesen dabei die niedrigsten Mediane für den SEER und den SEPR auf, wobei keine Werte für Ammoniakanlagen vorlagen (Tabelle 14).

Bei den wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen ergab sich ein ähnliches Bild, wobei die Unterschiede zwischen den Kältemittelgruppen hier deutlicher ausgeprägt waren. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln lagen im Median unter den vergleichbaren Werten für Anlagen mit fluorierten Kältemitteln bezogen auf den COP/EER als auch den SEER. Für den SEPR war der Median jedoch etwas höher als jener der HFKW und Gemisch-Anlagen.

Blickt man detaillierter auf die einzelnen Kältemittel, zeigt sich, dass Ammoniak bei luftgekühlten Anlagen mit 4,04 im Median den höchsten COP aufwies. Hier lagen jedoch nur wenige Datenpunkte vor und einige Propan- und uHFKW-1234ze(E)-Anlagen hatten ähnliche COPs. Die übrigen Kältemittel außer Ammoniak hatten in etwa vergleichbare COPs.

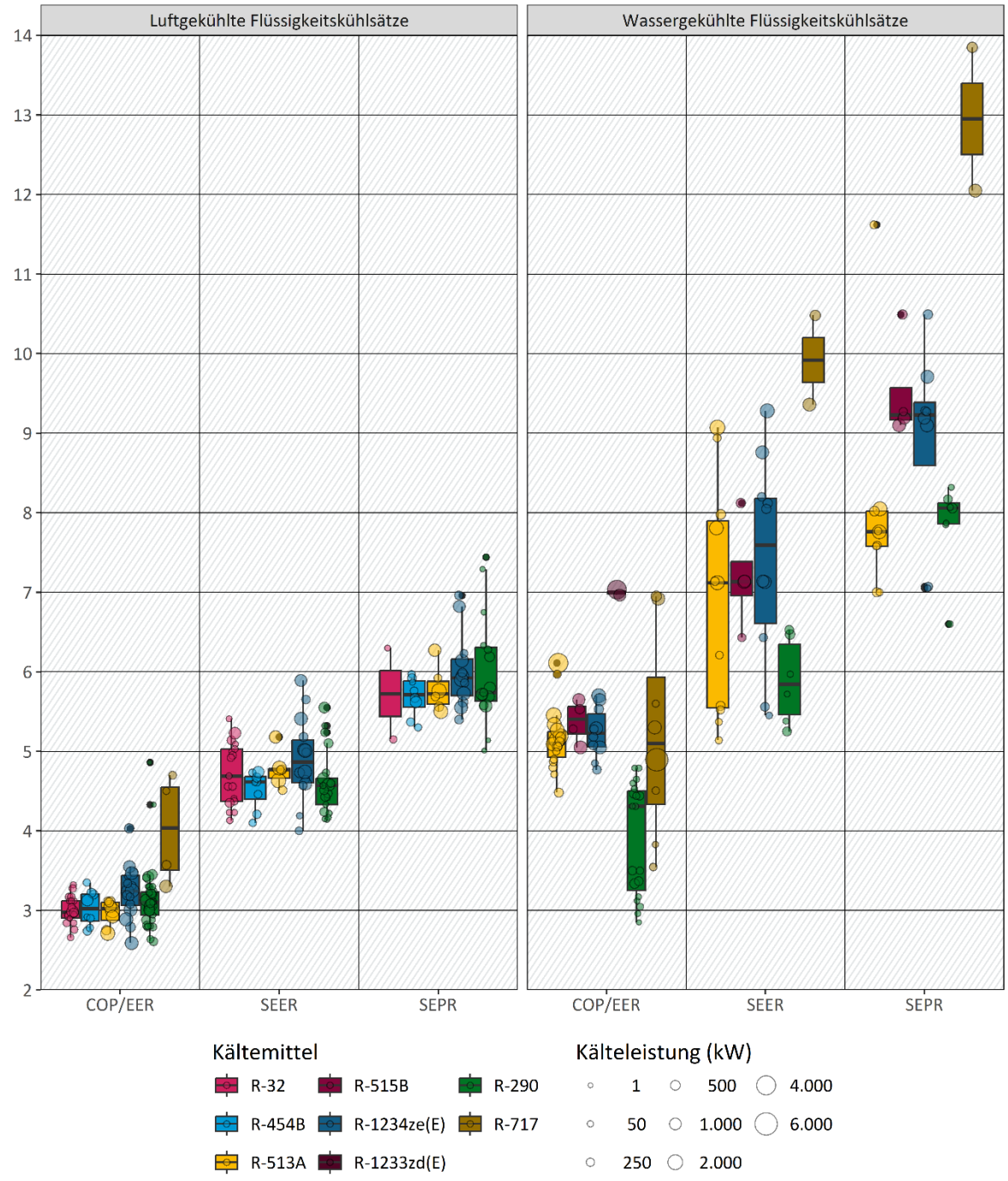
Bei den SEER- bzw. SEPR-Werten fiel auf, dass keine Anlagen mit Ammoniak vertreten waren. Grund hierfür ist möglicherweise, dass Ammoniak hier häufig in sonderangefertigten Geräten eingesetzt wird, die von der Verordnung (EU) 2015/1095 ausgenommen sind. Die übrigen Kältemittel überlagerten sich in der Streuung der COPs der Anlagen, wobei R-454B- und Propananlagen im Trend etwas niedrigere SEERs aufwiesen als Anlagen mit anderen Kältemitteln. Hinsichtlich der SEPRs gab es nur geringe Unterschiede im Median zwischen den Kältemitteln. Propananlagen wiesen eine große Streuung auf und hatten die höchsten (7,44) und niedrigsten (5,01) SEPRs im untersuchten Datensatz.

Anders verhielt es sich bei den wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen. Hier wiesen Propananlagen mit im Median 4,31 deutlich niedrigere COPs auf als Anlagen mit anderen Kältemitteln. Die Propanlagen streuten jedoch in den Bereich der COPs von R-513A- und uHFKW-1234ze(E)-Anlagen. Die effizientesten Anlagen waren hier solche mit uHFCKW-1233zd(E) und Ammoniak. Für uHFCKW-1233zd(E) lagen jedoch ebenfalls nur sehr wenige Datenpunkte vor, während Ammoniakanlagen eine große Streuung im COP aufwiesen. Die restlichen Kältemittel hatten ähnliche COPs, wobei R-513A-Anlagen im Trend etwas niedrigere Werte hatten als Anlagen mit R-515B und uHFKW-1234ze(E).

Bei den SEER-Werten wiesen R-513A-Anlagen eine sehr große Streuung von 5,14 bis 9,07 auf, die fast alle Werte der übrigen Anlagen einschlossen. Anlagen mit uHFKW-1234ze(E) zeigten eine ähnlich große Streuung im SEER, wobei der Median mit 7,60 deutlich über dem der

Propananlagen von 5,84 lag. Ammoniakanlagen hatten mit 9,92 im Median die höchsten SEERs, auch wenn hier nur eine Anlagenreihe verfügbar war.

Abbildung 15: Energieeffizienz von Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur laut technischen Datenblättern nach Kältemittel



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker schwarzer Strich innerhalb der Box), Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereiches werden als schwarze Punkte dargestellt. Zusätzlich sind die einzelnen Datenpunkte in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Für den SEPR wiesen Anlagen mit R-513A den niedrigsten Median mit 7,76 auf, gefolgt von Propananlagen mit 8,07. Die R-515B- und uHFKW-1234ze(E)-Anlagen hatten einen identischen Median-SEPR von 9,23, wobei eine uHFKW-1234ze(E)-Anlage einen SEPR von nur 7,05 aufwies. Auffallend war eine R-513A-Anlage von Mitsubishi, die laut Datenblatt einen SEPR von 11,62 erreichte. Anlagen mit Ammoniak hatten mit einem Median von 12,95 mit Abstand die höchsten SEPRs.

Tabelle 14: Effizienzparameter und Kälteleistung der untersuchten Flüssigkeitskühlsätze laut technischen Datenblättern

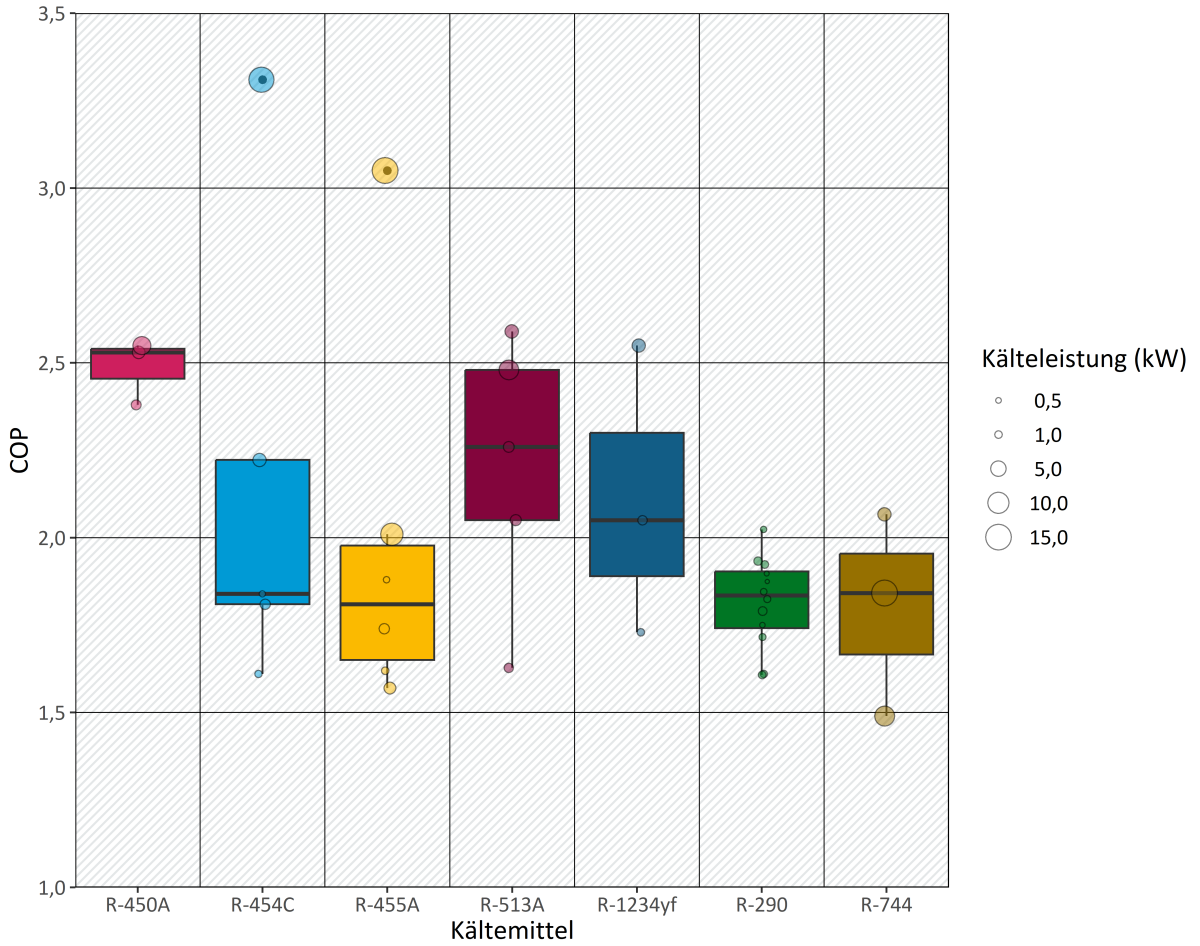
Kältemittel	Parameter	Anzahl der Anlagen	Effizienzparameter					Kälteleistung (kW)
			Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung	Median
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-32	COP/EER	18	3,01	2,98	2,66	3,32	0,18	119,65
	SEER	17	4,72	4,69	4,13	5,41	0,40	88,30
	SEPR	2	5,72	5,72	5,15	6,30	0,81	100,85
R-454B	COP/EER	8	3,03	3,02	2,74	3,35	0,22	257,70
	SEER	8	4,52	4,62	4,10	4,74	0,24	257,70
	SEPR	8	5,68	5,72	5,30	5,97	0,25	257,70
R-513A	COP/EER	8	2,97	3,02	2,71	3,12	0,16	818,65
	SEER	6	4,77	4,77	4,51	5,18	0,23	818,65
	SEPR	6	5,78	5,72	5,50	6,27	0,28	818,65
R-1234ze(E)	COP/EER	16	3,24	3,24	2,59	4,03	0,34	492,50
	SEER	14	4,90	4,86	4,00	5,89	0,52	454,05
	SEPR	12	6,01	5,93	5,40	6,96	0,47	773,00
R-290	COP/EER	37	3,15	3,10	2,61	4,86	0,41	144,20
	SEER	21	4,60	4,57	4,14	5,55	0,40	230,00
	SEPR	15	6,01	5,74	5,01	7,44	0,71	230,00
R-717	COP/EER	4	4,02	4,04	3,30	4,70	0,68	323,70
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze								
R-513A	COP/EER	18	5,15	5,11	4,48	6,11	0,40	444,00
	SEER	11	6,90	7,12	5,14	9,07	1,43	300,00
	SEPR	9	8,04	7,76	7,00	11,62	1,39	250,00

Kältemittel	Parameter	Anzahl der Anlagen	Effizienzparameter					Kälteleistung (kW)
			Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung	Median
R-515B	COP/EER	4	5,38	5,40	5,05	5,65	0,27	779,50
	SEER	4	7,20	7,14	6,43	8,12	0,69	779,50
	SEPR	4	9,51	9,23	9,10	10,49	0,66	779,50
R-1234ze(E)	COP/EER	10	5,24	5,23	4,77	5,70	0,32	436,50
	SEER	10	7,41	7,60	5,45	9,28	1,30	436,50
	SEPR	8	8,89	9,23	7,05	10,49	1,22	409,95
R-1233zd(E)	COP/EER	2	7,00	7,00	6,96	7,03	0,05	2.462,00
R-290	COP/EER	19	3,90	4,31	2,85	4,79	0,71	65,10
	SEER	6	5,89	5,84	5,25	6,53	0,54	216,25
	SEPR	7	7,85	8,06	6,60	8,32	0,57	65,10
R-717	COP/EER	8	5,19	5,10	3,55	6,95	1,28	439,50
	SEER	2	9,92	9,92	9,36	10,48	0,79	1.024,00
	SEPR	2	12,95	12,95	12,05	13,85	1,27	1.024,00

4.3.2 Verflüssigungssätze

Für Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich hatten Anlagen mit R-450A im Median mit einem COP von 2,53 die höchste Effizienz (Abbildung 16, Tabelle 15). Jeweils eine leistungsstarke Anlage mit R-454C und R-455A hatte ein COP von mehr als drei, während der Median für Verflüssigungssätze mit diesen Kältemitteln bei 1,84 bzw. 1,81 lag. Geräte mit den natürlichen Kältemitteln Propan (R-290) und CO_2 (R-744) hatten vergleichbare COPs von 1,84 im Median. CO_2-Anlagen waren jedoch deutlich seltener vertreten und hatten eher größere Kälteleistungen. Allgemein war die Datengrundlage für Propan mit 12 Geräten am besten, während für R-450A, uHFKW-1234yf und R-744 nur jeweils drei Anlagen verfügbar waren. Wie bereits in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, konnten unter 0,5 kW Kälteleistung nur Anlagen mit Propan identifiziert werden.

Abbildung 16: Energieeffizienz von Verflüssigungssätzen mit mittlerer Betriebstemperatur laut technischen Datenblättern nach Kältemittel



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker schwarzer Strich innerhalb der Box), Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereiches werden als schwarze Punkte dargestellt. Zusätzlich sind die einzelnen Datenpunkte in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Tabelle 15: Effizienzparameter der untersuchten Verflüssigungssätze im mittleren Temperaturbereich laut technischen Datenblättern

Kälte-mittel-gruppe	Kälte-mittel	Anzahl Geräte	COP					Kälteleistung (kW)
			Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard-abweichung	Median
HFKW und Gemische	R-450A	3	2,53	2,49	2,38	2,55	0,09	3,24
	R-454C	5	1,84	2,16	1,61	3,31	0,68	2,18
	R-455A	6	1,81	1,98	1,57	3,05	0,55	2,51
	R-513A	5	2,26	2,20	1,63	2,59	0,38	2,45
uHFKW	R-1234yf	3	2,05	2,11	1,73	2,55	0,41	1,77
Natürliche	R-290	12	1,84	1,82	1,61	2,02	0,13	0,88
	R-744	3	1,84	1,80	1,49	2,07	0,29	8,78

4.4 Atmosphärischer Abbau fluorierter Kältemittel

Gelangen fluorierte Gase in die Atmosphäre, sind sie dort Angriffen durch UV-Strahlung (Photolyse) und Radikalen ausgesetzt. Der Abbau von kurzlebigeren Substanzen wie uHF(C)KW erfolgt in der Regel in der untersten Atmosphärenschicht, der Troposphäre, während langlebigere Substanzen wie HFKW bis in die Stratosphäre vordringen können. Der Abbau der fluorierten Gase erfolgt meist über eine OH-Radikal-induzierte Reaktion, bei dem halogenierte Carbonylverbindungen entstehen (siehe Kapitel 2.7 in Behringer et al. 2021). Diverse HFKW und uHFKW zerfallen in diesem Schritt zu Trifluoracetylfluorid (CF_3CFO, TFF), das wiederum vollständig zu Trifluoressigsäure (TFA) hydrolysiert. Der uHFKW-1234yf ist ein Vertreter dieser Gruppe und reagiert beim atmosphärischen Abbau vollständig zu TFA. Andere HFKW und uHF(C)KW bilden dagegen als Zwischenprodukt Trifluoracetaldehyd (CF_3CHO), darunter uHFKW-1234ze und uHFCKW-1233zd. CF_3CHO wird wiederum u.a. über OH-Radikale oder Photolyse weiter abgebaut. Während beim OH-Radikalabbau zu einem gewissen Prozentsatz TFA entstehen kann, ist dies bei der Photolyse nicht der Fall. Je kürzer die Lebensdauer von CF_3CHO hinsichtlich des jeweiligen Abbaupfads (Photolyse oder OH-Radikale), desto wahrscheinlicher findet dieser Abbaupfad, also Photolyse oder OH-Radikal-Abbau, statt.

In Behringer et al. (2021) wurde für alle Stoffe, die beim atmosphärischen Abbau das Zwischenprodukt CF_3CHO bilden, eine TFA-Bildungsrate von bis zu 10 % angenommen. Diese Annahme wurde auch für die vorliegende Studie getroffen (siehe Tabelle 5). Einzige Ausnahme in Behringer et al. (2021) war uHFCKW-1233zd(E), für den eine Rate von 2 % angenommen wurde, da eine Publikation von Sulbaek Andersen et al. (2018) diese Rate angab. In Sulbaek Andersen et al. (2018) wurde die TFA-Ausbeute aus den Emissionen von uHFCKW-1233zd(E) modelliert mit der Annahme einer atmosphärischen Lebensdauer hinsichtlich des photolytischen Abbaus von ≤2 Tagen. Diese Annahme entstammte wiederum einer Veröffentlichung von Chiappero et al. (2006), die für CF_3CHO eine Lebensdauer hinsichtlich des photolytischen Abbaus in Höhen von Null bis 12 km von knapp unter sechs bis knapp über zwei Tagen ermittelten (die Annahme von ≤2 Tagen in Sulbaek Andersen et al. (2018) scheint ein Versehen zu sein). Zuvor hatten jedoch Sellevåg et al. (2004) eine Lebensdauer hinsichtlich

Photolyse von >27 Tagen bestimmt, was sehr nah an der in derselben Studie bestimmten Lebensdauer hinsichtlich eines OH-Radikalabbaus von ca. 26 Tagen lag.

In der Literatur wurde allerdings seit der Veröffentlichung von Chiappero et al. (2006) bevorzugt deren Annahme in anderen Studien verwendet (siehe Kapitel 2.7.3 in Behringer et al. (2021) für eine detailliertere Beschreibung). Die Lebensdauer von CF_3CHO hinsichtlich des photolytischen Abbaus ist relevant für die TFA-Bildungsrate, da dieser Abbauweg, wie oben erwähnt, kein TFA erzeugt. Während Sellevåg et al. (2004) davon ausgingen, dass beide Prozesse in etwa ähnlich wahrscheinlich sind, dominiert laut Chiappero et al. (2006) klar die Photolyse, und eine TFA-Bildung ist sehr unwahrscheinlich. Auf dieser Basis kamen dann Sulbaek Andersen et al. (2018) im Falle des Abbaus von uHFCKW-1233zd(E) auf eine TFA-Bildungsrate von ca. 2 %.

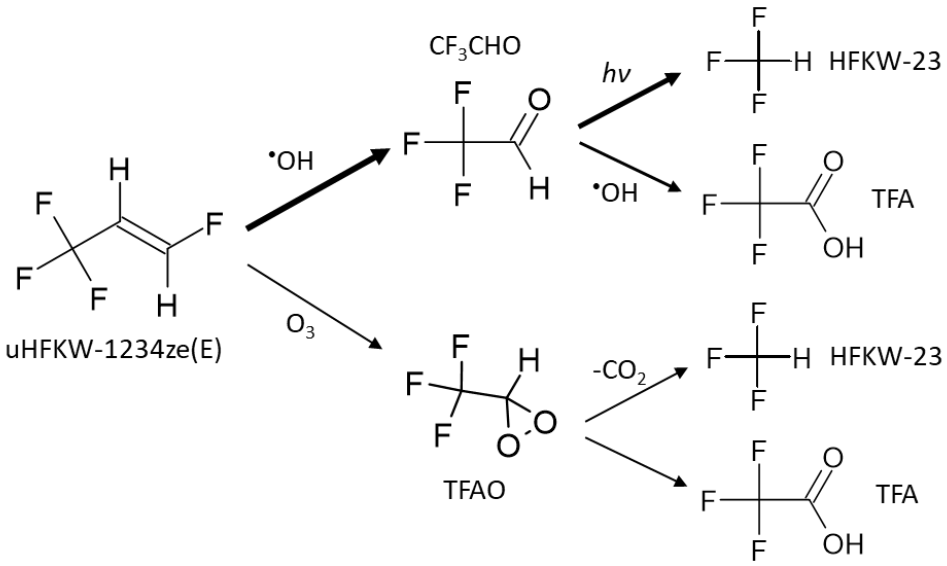
Im Jahr 2021 kam allerdings eine erste, nicht begutachtete Studie zu dem Ergebnis, dass beim photolytischen Abbau von CF_3CHO in der Atmosphäre zu einem gewissen Prozentsatz das extrem starke Treibhausgas HFKW-23 entstehen kann (Hansen et al. 2021). Als Reaktion veröffentlichten Sulbaek Andersen & Nielsen (2022) eine von Honeywell finanzierte Studie, die ergab, dass die Rate der HFKW-23-Ausbeute aus dem atmosphärischen Abbau von CF_3CHO zwar möglich, mit <0,3 % aber sehr gering sei. Basierend auf dieser Studie nahmen Pérez-Peña et al. (2023) Modellierungen zum Abbau von CF_3CHO in der Atmosphäre vor und berechneten eine potenzielle HFKW-23-Ausbeute von 1,3 bis 4,4 %. Im selben Jahr veröffentlichten Sulbaek Andersen et al. (2023) neue Untersuchungen, die – entgegen der Aussagen in Chiappero et al. (2006) und Sulbaek Andersen et al. (2018) – eine längere Lebensdauer von CF_3CHO in der Troposphäre bezüglich des photolytischen Abbaus von ca. 7-31 Tagen (im Mittel 13 Tage in 5 km Höhe) ergaben. Daher kamen Sulbaek Andersen et al. (2023) zu dem Ergebnis, dass der OH-Radikalabbau für CF_3CHO in der Troposphäre in Höhen bis ca. 12 km nun doch wahrscheinlicher ist als zuvor angenommen und aufgrund der geringen Photolyserate eine Bildung von HFKW-23 maßgeblich in der Stratosphäre in Höhen von mehr als 30-40 km stattfindet. Das hat laut Sulbaek Andersen et al. (2023) jedoch zur Folge, dass die TFA-Bildungsrate von Gasen, die beim Abbau CF_3CHO bilden (wie u.a. uHFKW-1234ze und uHFCKW-1233zd), höher sein kann als in Sulbaek Andersen et al. (2018) angenommen.

Neben dem Abbau über OH-Radikale besteht eine Möglichkeit des Abbaus von uHF(C)KW über Ozon (O_3). McGillen et al. (2023) konnten nachweisen, dass dabei ebenfalls HFKW-23 als Abbauprodukt entstehen kann. Der Reaktionsmechanismus erfolgt hierbei über die Bildung von Trifluormethyldioxiran (TFOA), das unter bestimmten Konditionen zur Bildung von HFKW-23 oder TFA führt. McGillen et al. (2023) errechneten ein GWP über einen 100-Jahre Zeitraum von HFKW-1234ze(E), unter Einbeziehung eines Ozonabbaus, von ca. 13,5. Hierbei ist zu beachten, dass der Abbau von uHF(C)KW über Ozon, im Vergleich zu dem über OH-Radikale, deutlich seltener stattfindet. Für den uHFKW-1234ze(E) hat der Abbau über Ozon, laut McGillen et al. (2023), global nur einen Anteil von 2,96 %. Wie oben beschrieben, kann der häufiger stattfindende Abbau über OH-Radikale aber, neben der Bildung von TFA, ebenfalls zur Bildung von HFKW-23 führen. Für den uHFKW-1234ze(E) haben Thomson et al. (2024) ein indirektes GWP über den Ozonabbau zu HFKW-23 von ca. 6 ermittelt und kommen unter Einbeziehung aller Abbaupfade zu einem Gesamt-GWP (direkt und indirekt) von ca. 20. Dabei gingen sie von einem direkten GWP von ca. 1 aus und einem indirekten GWP über den Ozonabbau von ca. 12. Werden Abbauprodukte in die Berechnung des GWP einbezogen, muss dies auch gleichermaßen für alle Stoffe erfolgen. Für Propan ergibt sich beispielsweise laut Hodnebrog et al. (2018) ein GWP inklusive möglicher atmosphärischer Abbauprodukte von 9,5.

Allgemein muss derzeit davon ausgegangen werden, dass uHF(C)KW beim Abbau in der Atmosphäre mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit TFA oder HFKW-23 bilden. Abbildung 17

gibt diesen Sachverhalt in stark vereinfachter Form am Beispiel des uHFKW-1234ze(E) wieder, wobei lediglich die Abbaupfade, die zu TFA oder HFKW-23 führen können, dargestellt sind.

Abbildung 17: Stark vereinfachte schematische Darstellung der möglichen Wege des atmosphärischen Abbaus von uHFKW-1234ze(E), die zu TFA oder HFKW-23 führen können



Anmerkung: Abbaupfad über OH-Radikale (•OH) zu CF_3CHO und Photolyse (*hv*) zu HFKW-23 aus Pérez-Peña et al. (2023), über OH-Radikale zu CF_3CHO und OH-Radikale zu TFA aus Sulbaek Andersen et al. (2004), und über Ozon (O_3) zu Trifluormethyldioxiran (TFAO) und HFKW-23 sowie TFA aus McGillen et al. (2023).
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den oben genannten Quellen, Öko-Recherche

4.4.1 Quantifizierung der potenziellen Bildung von Trifluoressigsäure (TFA)

Basierend auf den TFA-Bildungspotenzialen in Tabelle 5 wurden für die untersuchten Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze jeweils die theoretisch möglichen maximalen TFA-Mengen aus den Emissionen während der Nutzungsphase und bei der Entsorgung berechnet. Hier beispielhaft anhand des uHFKW-1234ze(E):

$$\text{TFA (kg)} = \text{uHFKW-1234ze(E)-Emissionen (kg)} * \text{TFA-Bildungsrate} * \frac{M_{TFA}}{M_{uHFKW\text{-}1234ze(E)}}$$

Die Emissionen wurden mit der jeweiligen TFA-Bildungsrate multipliziert und die sich daraus ergebende Menge über die molaren Massen (M) in die entsprechende TFA-Menge umgerechnet (114,02 g/mol für TFA und im Beispielfall oben 114,04 g/mol für uHFKW-1234ze(E)).

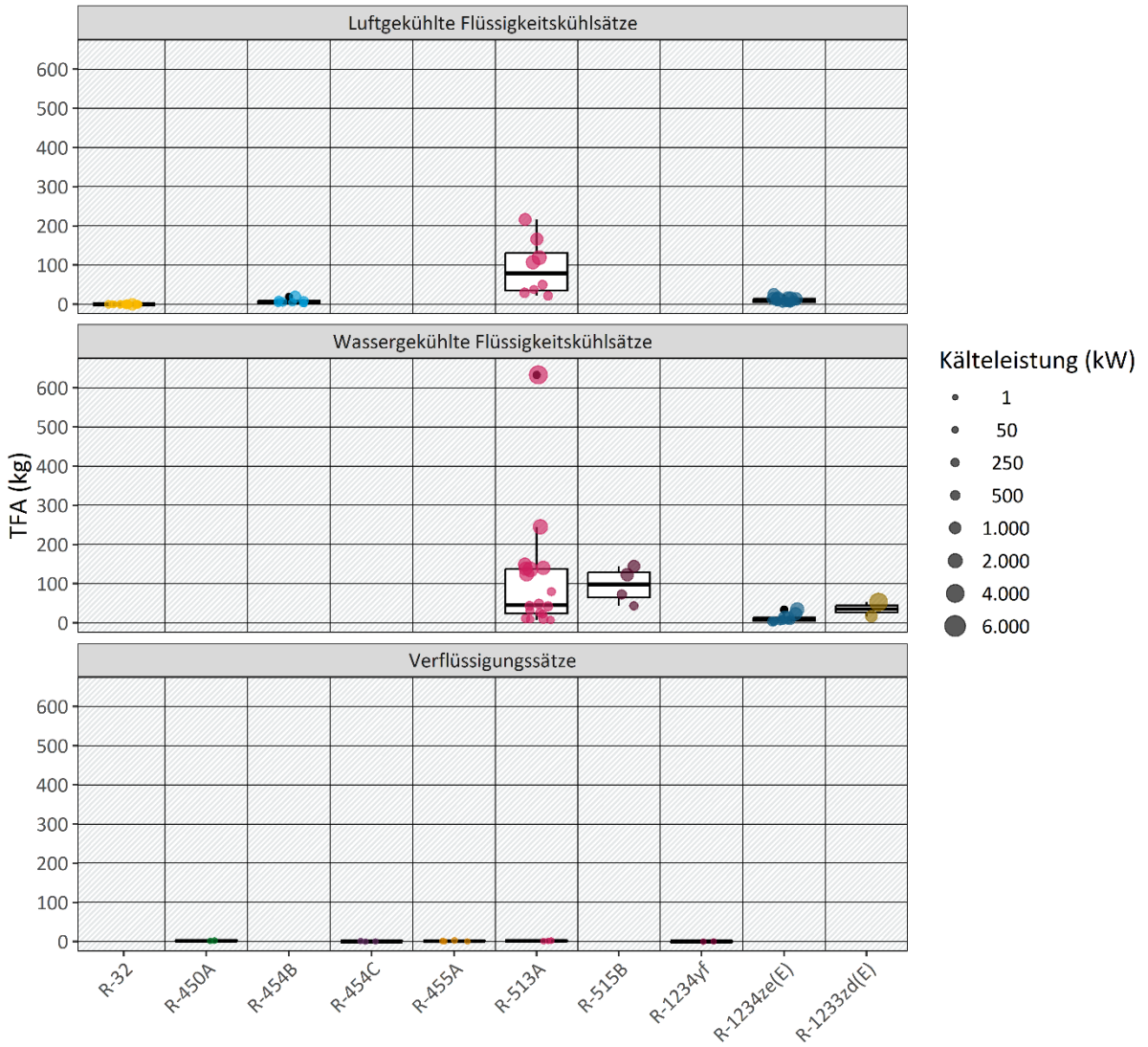
Da sich die Datenlage seit der Veröffentlichung von Behringer et al. (2021), wie oben beschrieben, geändert hat, wird für die vorliegende Analyse von einer Abbaurate von uHFCKW-1233zd(E) von bis zu 10 % TFA ausgegangen.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse für jede Anlage nach Art des Equipments und Kältemittels aufgetragen. Während natürliche Kältemittel kein TFA bilden, führen die Emissionen aus Anlagen mit HFKW und Gemischen sowie uHF(C)KW zu teilweise größeren Mengen an TFA, sowohl absolut als auch bezogen auf die Kälteleistung (Abbildung 19). Besonders hohe TFA-Mengen sind bei Anlagen mit dem Kältemittelgemisch R-513A zu erwarten, das zu 44 % aus HFKW-134a und zu 56 % aus uHFKW-1234yf besteht. Beide Komponenten bilden beim atmosphärischen Abbau TFA (siehe Tabelle 5). Als einziger der hier betrachteten HFKW bildet nur HFKW-32 kein TFA beim atmosphärischen Abbau.

Die betrachteten Flüssigkeitskühlsätze mit uHF(C)KW waren zumeist größere Anlagen mit entsprechend großen Kältemittelfüllmengen und höheren Emissionen. Trotz der relativ geringen TFA-Bildungsrate der verwendeten uHF(C)KW-Kältemittel (bis zu 10 %), ist die maximal gebildete TFA-Menge daher relativ hoch.

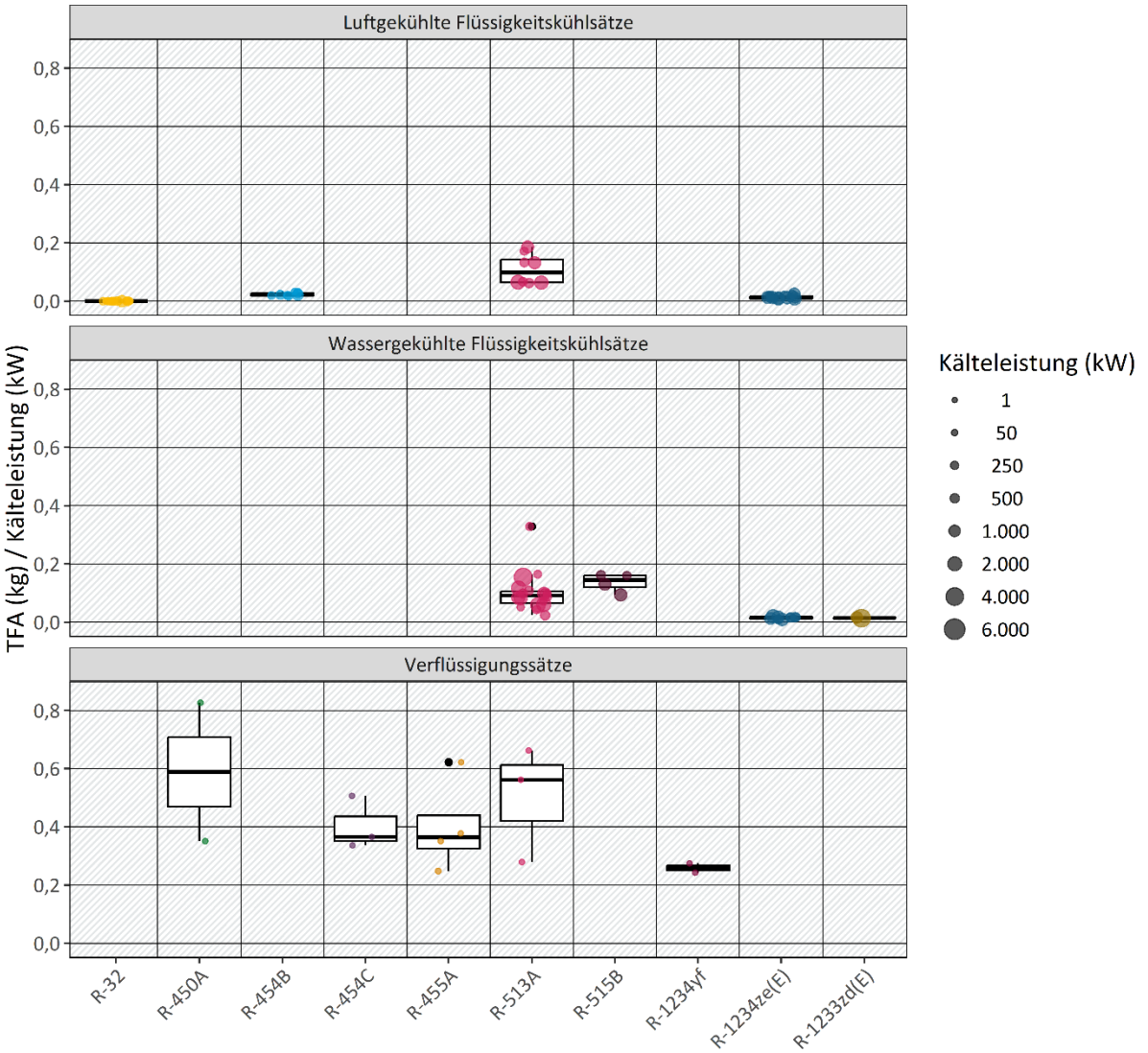
Verflüssigungssätze hatten dagegen eine deutlich kleinere durchschnittliche Füllmenge, weshalb die maximal gebildete TFA-Menge je Anlage im Vergleich mit den Flüssigkeitskühlsätzen geringer ausfiel. Bezogen auf die Kälteleistung stechen jedoch neben dem uHFKW-1234yf diverse Kältemittelgemische mit HFKW und uHFKW (R-450A, R-454C, R-455A und R-513A) hervor (siehe Abbildung 19).

Abbildung 18: Berechnete maximale TFA-Menge aus Emissionen von Kältemitteln aus den betrachteten Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen über die Nutzungsphase und bei der Entsorgung



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 19: Berechnete maximale TFA-Menge pro kW Kälteleistung aus Emissionen von Kältemitteln aus den betrachteten Flüssigkeitskühlsätzen und Verflüssigungssätzen über die Nutzungsphase und bei der Entsorgung



Anmerkung: Box-Whisker-Plot mit Median (dicker Strich innerhalb der Box) über alle Kältemittel innerhalb einer Kältemittelgruppe, Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil (Box, schließt je die Hälfte der Datenpunkte ein), und Antennen (Whisker), die den 1,5-fachen Interquartilsabstand einschließen. Werte außerhalb dieses Bereichs werden als schwarze Punkte dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte der Kältemittel sind in transparenter Farbe dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Gemittelt über alle untersuchten Anlagen führen HFKW und Gemische als Kältemittel zu den höchsten TFA-Mengen im Vergleich zu uHF(C)KW, sowohl bezogen auf die absoluten Emissionen als auch auf die Emissionen je kW Kälteleistung (Tabelle 16). Der Unterschied ist bei den wassergekühlten Flüssigkeitskühlsätzen am höchsten.

Tabelle 16: Maximale TFA-Menge aus Emissionen über Nutzungsphase und Entsorgung für Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur und Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur

Kältemittel	Mittelwert (kg)	Gewichteter Mittelwert (kg)	Mittelwert (kg/kW Kälteleistung)	Gewichteter Mittelwert (kg/kW Kälteleistung)
Luftgekühlte Flüssigkeitskühlsätze				
HFKW und Gemische	23,6	19,9	0,031	0,028
uHF(C)KW	10,7	10,5	0,014	0,014
Natürliche	0	0	0	0
Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze				
HFKW und Gemische	104,0	120,0	0,108	0,116
uHF(C)KW	15,4	12,9	0,015	0,015
Natürliche	0	0	0	0
Verflüssigungssätze				
HFKW und Gemische	1,5	1,5	0,457	0,451
uHF(C)KW	0,4	0,4	0,259	0,259
Natürliche	0	0	0	0

Anmerkung: Gewichtete Mittelwerte nach Kältemittel und Hersteller.

5 Synthese und Ausblick

Die Analyse der technischen Datenblätter ergab nur sehr geringe Unterschiede im TEWI von luftgekühlten Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur für verschiedene Kältemittel. Es ließ sich jedoch ein kleiner Trend erkennen, dass Anlagen mit Ammoniak und teilweise mit Propan und uHFKW-1234ze(E) niedrigere TEWIs aufwiesen als Anlagen mit HFKW und Gemischen mit einem GWP unter 750. Viele Propan- und uHFKW-1234ze(E)-Anlagen hatten jedoch vergleichbare TEWIs zu Anlagen mit HFKW und Gemischen.

Für wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur gab es nahezu keine Unterschiede im TEWI zwischen den Kältemitteln für Anlagen bis ca. 1.400 kW Kälteleistung. Im Detail wiesen jedoch einige Anlagen mit Propan und sehr wenige mit Ammoniak höhere TEWIs auf, als Anlagen mit den anderen untersuchten Kältemitteln. Propan war jedoch nur in kleineren Anlagen zu finden. Wassergekühlte Flüssigkeitskühlsätze mit dem uHFCKW-1233zd(E) sowie einige Ammoniakanlagen hatten dagegen die niedrigsten TEWIs im untersuchten Datensatz.

Für Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur gab es im Leistungsbereich von unter 4 kW keine Unterschiede im TEWI zwischen den Kältemitteln, wobei für Anlagen unter 1 kW nur natürliche Kältemittel identifiziert werden konnten. Für größere Anlagen mit mehr als 7 kW Kälteleistung hatten die wenigen analysierten Anlagen mit natürlichen Kältemitteln höhere TEWIs als die Anlagen mit HFKW und Gemischen. Hier war die Datengrundlage jedoch sehr gering und eine Trendableitung ist zweifelhaft. Nur sehr wenige Anlagen mit uHF(C)KW wurden gefunden, die TEWIs waren hier jedoch vergleichbar zu denen der anderen Kältemittelgruppen.

Eine Analyse des direkten Anteils am Gesamt-TEWI der untersuchten Anlagen ergab, dass dieser im Mittel mit ca. 0,5 bis 2 % nur eine untergeordnete Rolle spielt. Das bedeutet, dass die Emissionen des Kältemittels weit weniger relevant sind im Vergleich zu den CO_2-äquivalenten Emissionen, die sich aus der Erzeugung des verbrauchten Stroms für den Betrieb der Anlage ergeben. Mit abnehmenden CO_2-Emissionen des erzeugten Stroms wird sich diese Dynamik verändern und die direkten Emissionen des Kältemittels werden zunehmend relevanter. Unter den derzeitigen Bedingungen ist jedoch die Energieeffizienz, also die erzeugte Kälteleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie, der relevante Parameter bei der Betrachtung des TEWI einer Anlage.

Vergleicht man die Energieeffizienz der untersuchten Flüssigkeitskühlsätze laut technischen Datenblättern miteinander, ergibt sich die erwartet hohe Effizienz von Ammoniak und uHFCKW-1233zd(E). Für wassergekühlte Anlagen mit Propan legen die theoretischen COP-Berechnungen für einen idealisierten Kältekreislauf nahe, dass hier bessere Effizienzen erzielt werden könnten als jene, die bisher laut technischen Datenblättern erreicht werden. Weitere Verbesserungen der Komponenten und eine spezifischere Auslegung auf das Kältemittel Propan können in Zukunft zu einer verbesserten Effizienz führen.

Einschränkungen der Analyse

Es wurden nur technische Datenblätter von Geräten ausgewertet, für die Informationen zur TEWI-Berechnung verfügbar waren. Hierdurch war die Auswahl verfügbarer Anlagen reduziert, und es ist möglich, dass die Aussagen dieser Analyse nur für einen Teil der am Markt verfügbaren Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze repräsentativ sind. In jedem Fall können nur Aussagen zu Flüssigkeitskühlsätzen mit hoher (Prozess) bzw. niedriger (Komfort) Betriebstemperatur sowie Verflüssigungssätze mit mittlerer Betriebstemperatur getroffen werden sowie nur in Bezug auf die Angaben in den technischen Datenblättern.

Abbauprodukte

Unabhängig von der Effizienz der untersuchten Anlagen und dem sich daraus ergebenden TEWI müssen neben dem Effekt auf die globale Erderwärmung bei fluorierten Kältemitteln weitere Umweltaspekte berücksichtigt werden. Während natürliche Kältemittel in der Natur auch ohne menschliches Zutun vorkommen, handelt es sich bei fluorierten Stoffen um künstlich erzeugte chemische Verbindungen. Deren Auswirkung auf Menschen und Umwelt kann oft nur schwer eingeschätzt werden. Ungesättigte HFKW und HFCKW sind Ersatzstoffe für die Ozonschicht-abbauenden FCKW und HFCKW sowie die treibhausrelevanten gesättigten HFKW. Für diverse uHFKW, und insbesondere den uHFKW-1234yf, ist bekannt, dass sie erheblich zur Anreicherung des Grund- und Trinkwassers mit der persistenten Trifluoressigsäure (TFA) beitragen (u.a. Henne et al. 2012, Freeling et al. 2020, Behringer et al. 2021, Freeling & Björnsdotter 2023).

Als weiteres mögliches Abbauprodukt diverser uHF(C)KW hat sich nun das treibhausrelevanteste HFKW-23 mit einem sehr hohen GWP eingereiht. Es muss davon ausgegangen werden, dass praktisch alle uHF(C)KW umweltrelevante Abbauprodukte erzeugen. Damit folgen die uH(C)FKW der Tradition ihrer Vorgänger (FCKW, HFKW etc.), unerwartete und unerwünschte Konsequenzen für die Allgemeinheit mit sich zu bringen. Bei der Auswahl geeigneter Kältemittel sollte dieser Aspekt, jenseits aller TEWI-Bewertungen, Berücksichtigung finden.

In der Gesamtbetrachtung ergibt sich für Flüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze eine klare Empfehlung zur Verwendung natürlicher Kältemittel.

6 Quellenverzeichnis

Adlunger, K.; Anke, J.M.; Bachem, G.; Banning, H.; Biegel-Engler, A.; Blondzik, K.; Braun, U.; Eckhardt, A.; Gildemeister, D.; Hilliges, F.; Hoffmann, G.; Jentzsch, F.; Klitzke, S.; Kuckelkorn, J.; Martens, K.; Müller, A.; Pickl, C.; Pirntke, U.; Rechenberg, J.; … Wischer, R. (2021): Chemikalieneintrag in Gewässer vermindern – Trifluoracetat (TFA) als persistente und mobile Substanz mit vielen Quellen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chemikalieneintrag-in-gewaesser-vermindern (22.04.2024).

Amhamed, A.I.; Shuibul Qarnain, S.; Hewlett, S.; Sodiq, A.; Abdellatif, Y.; Isaifan, R.J.; u. a. (2022): Ammonia Production Plants—A Review. Fuels, 3, 408–435. https://doi.org/10.3390/fuels3030026 (17.04.2025).

Andersen, S.O. & Wolf, J. (2018): Improved Life-Cycle Climate Performance (LCCP) Metrics: Room AC Carbon Footprint. OEWG Side Event, Vienna, Austria. Carbon Metrics Vienna OEWG 10 July as delivered.pdf (17.04.2025).

ATMOsphere (2023): Natural Refrigerants: State of the Industry – Refrigeration in Europe, North America and Japan, Plus Heat Pumps in Europe. https://atmosphere.cool/atmo-market-report-2023/ (08.03.2024).

Baral, A.; Minjares, R.; Urban, R.A. (2013): Upstream climate impacts from production of R-134a and R-1234yf - Refrigerants used in mobile air conditioning systems, ICCT – The International Council On Clean Transportation, White Paper. https://theicct.org/publication/upstream-climate-impacts-of-r-134a-and-r-1234yf/ (16.07.2024).

Behringer, D.; Heydel, F.; Gschrey, B.; Osterheld, S.; Schwarz, W.; Warncke, K.; Freeling, F.; Nödler, K.; Henne, S.; Reimann, S.; Blepp, M.; Jörß, W.; Liu, R.; Ludig, S.; Rüdenauer, I.; Gartiser, S. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenierter Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogenierter Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial. Texte | 36/2021; Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogenierter-kaelte (02.05.2024).

BKS (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html (05.04.2024).

Destatis (o.J.-a): Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe in metrischen Tonnen. Statistisches Bundesamt (Destatis). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Tabellen/klima-metrisch.html (19.01.2024).

Destatis (o.J.-b): Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe in 1 000 Tonnen CO_2-Äquivalente. Statistisches Bundesamt (Destatis). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Tabellen/klima-co2-aequivalent.html (19.01.2024).

DG CLIMA (2019): Going climate-neutral by 2050 – A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral EU economy. European Commission, Directorate-General for Climate Action, Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2834/02074 (17.04.2025).

DIN e.V. (Hrsg.) (1998): DIN 8960:1998-11, Kältemittel - Anforderungen und Kurzzeichen, DIN Media, Berlin. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-8960/5146119 (16.07.2024).

Directorate-General for Climate Action (European Commission), Ricardo, Öko-Institut e.V, Öko-Recherche, Birchby, D.; Dubey, J.; Johansen, B.; Hekman, J.; Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N. (2022). Support contract for an evaluation and impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases: Evaluation final report. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2834/195860 (17.04.2025).

Directorate-General for Climate Action (European Commission), Ricardo, Öko-Institut e.V, Öko-Recherche, Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N.; Birchby, D.; Dubey, J.; Hekman, J. (2022). Support contract for an evaluation and impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases: Impact assessment final report. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2834/934036 (17.04.2025)

Domanski, P.A. (2017): CYCLE_D-HX: NIST Vapor Compression Cycle Model Accounting for Refrigerant Thermodynamic and Transport Properties. National Institute of Standards and Technology (NIST). https://www.nist.gov/services-resources/software/cycled-hx-nist-vapor-compression-cycle-model-accounting-refrigerant (03.01.2024).

ECHA (2023): Annex XV Restriction Report Proposal for a Restriction – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). Version number 2, 22.03.2024, Helsinki, Finland. https://echa.europa.eu/documents/10162/1c480180-ece9-1bdd-1eb8-0f3f8e7c0c49 (08.04.2024).

ECHA (2024a): Registry of CLH intentions until outcome. https://echa.europa.eu/de/registry-of-clh-intentions-until-outcome/-/dislist/details/0b0236e188e6e587#msdynttrid=XuTijdX8JNqFEGuNBOlPVRtfmPgEkJy-wokd-_Garfo (22.04.2024).

ECHA (2024b): Next steps for PFAS restriction proposal - The European Chemicals Agency (ECHA) outlines how its two scientific committees will progress in evaluating the proposal to restrict per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in Europe. Helsinki, 13 March 2024. https://echa.europa.eu/de/-/next-steps-for-pfas-restriction-proposal (08.04.2024).

Eckert, M.; Kauffeld, M.; Siegismund, V. (Hrsg.) (2019): Natürliche Kältemittel – Anwendungen und Praxiserfahrungen. VDE VERLAG GMBH und cci Dialog GmbH, Berlin und Karlsruhe.

Europäische Kommission (2021): „Fit für 55“: Unsere Bilanz. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_de (05.04.2024).

Europäisches Parlament (2021): Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic). Topics - European Parliament. https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic (05.04.2024).

Freeling, F.; Behringer, D.; Heydel, F.; Scheurer, M.; Ternes, T.A.; Nödler, K. (2020): Trifluoroacetate in Precipitation: Deriving a Benchmark Data Set. Environ. Sci. Technol., 54, 11210–11219, doi:10.1021/acs.est.0c02910.

Freeling, F. & Björnsdotter, M.K. (2023) Assessing the Environmental Occurrence of the Anthropogenic Contaminant Trifluoroacetic Acid (TFA). Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100807, doi:10.1016/j.cogsc.2023.100807.

GEA (2023): GEA Blue Chillers - GEA BluAstrum, GEA BluGenium, GEA BluAir: A new generation of compact ammonia chillers. https://www.gea.com/en/assets/271684/ (08.04.2025).

Göbelbecker, J. (2023): BASF und Yara wollen weitere Ammoniak-Anlage in den USA bauen. CHEMIE TECHNIK. https://www.chemietechnik.de/anlagenbau/basf-und-yara-wollen-weitere-ammoniak-anlage-in-den-usa-bauen-410.html (17.07.2024).

Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N.; Birchby, D.; Dubey, J.; Hekman, J. (2022): Impact assessment report for the Support contract for an Evaluation and Impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases. CLIMA.A2/ETU/2019/0016.

Gschrey, B.; Osterheld, S.; Kleinschmidt, J. (2020): Implementierung des EU-HFKW-Phase down in Deutschland – Realitätscheck und Projektion. UBA Texte 64/2020. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/implementierung-des-eu-hfkw-phase-down-in (08.03.2024).

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. Umweltbundesamt Climate Change/06/2015. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmen-zur-verbesserung-der-marktdurchdringung (08.03.2024).

Henne, S.; Shallcross, D.E.; Reimann, S.; Xiao, P.; Brunner, D.; O'Doherty, S.; Buchmann, B. (2012): Future Emissions and Atmospheric Fate of HFC-1234yf from Mobile Air Conditioners in Europe. Environmental Science & Technology, 46, 1650–1658, doi:10.1021/es2034608.

Hodnebrog, Ø.; Dalsøren, S.B.; Myhre, G. (2018): Lifetimes, direct and indirect radiative forcing, and global warming potentials of ethane (C_2H_6), propane (C_3H_8, and butane (C_4H_{10}). Atmospheric Science Letters, 19, e804. https://doi.org/10.1002/asl.804 (17.04.2025).

Icha P. & Lauf T. (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2022. Umweltbundesamt, Climate Change 20/2023, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf (08.03.2024).

IIR (2016): Harmonization of Life Cycle Climate Performance Methodology. International Institute of Refrigeration, 32nd Informatory Note on Refrigeration Technologies / October 2016. https://iifiir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940 (08.03.2024).

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

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

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896 (17.04.2025).

Ludig, S.; Jörß, W.; Liste, V. (2023): Fluorinated greenhouse gases 2023 - Data reported by companies on the production, import, export and destruction of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2022. European Environment Agency (EEA), European Topic Centre on Climate change mitigation. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cm-report-2023-04/@@download/file/2023-10-12_Fluorinated%20greenhouse%20gases%202023_public%20briefing_v2.pdf (04.04.2024).

McCulloch, A.; Lindley, A.A. (2003): From mine to refrigeration: a life cycle inventory analysis of the production of HFC-134a. International Journal of Refrigeration, 26, 865–872. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(03)00095-1 (22.07.2024).

McGillen, M.R.; Fried, Z.T.P.; Khan, M.A.H.; Kuwata, K.T.; Martin, C.M.; O'Doherty, S.; Pecere, F.; Shallcross, D.E.; Stanley, K.M.; Zhang, K. (2023): Ozonolysis Can Produce Long-Lived Greenhouse Gases from Commercial Refrigerants. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 120 (51), e2312714120. https://doi.org/10.1073/pnas.2312714120 (17.04.2025).

McLinden, M. O.; Brown, J. S.; Brignoli, R.; Kazakov, A. F.; Domanski, P. A. (2017): Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. Nature Communications 8:14476. https://doi.org/10.1038/ncomms14476 (22.07.2024).

NSTA (2024): Natural gas carbon footprint analysis. North Sea Transition Authority. https://www.nstauthority.co.uk/the-move-to-net-zero/net-zero-benchmarking-and-analysis/natural-gas-carbon-footprint-analysis/ (16.07.2024).

Ozone Secretariat (2020): Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Fourteenth edition). The Secretariat for the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer - United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol (29.04.2025).

Patenaude, A. (2024): CO2 as a Refrigerant – Properties of R-744. Copeland. https://e360blog.copeland.com/co2-as-a-refrigerant-properties-of-r-744/ (22.07.2024).

Pérez-Peña, M.P.; Fisher, J.A.; Hansen, C.; Kable, S.H. (2023): Assessing the atmospheric fate of trifluoroacetaldehyde (CF_3CHO) and its potential as a new source of fluoroform (HFC-23) using the AtChem2 box model. Environ. Sci.: Atmos., 3, 1767–1777. https://doi.org/10.1039/D3EA00120B (17.04.2025).

R Core Team (2023): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich. https://www.R-project.org/ (08.03.2024).

RAL gGmbH (2023): BLAUER ENGEL Das Umweltzeichen - Flüssigkeitskühler, DE-UZ 231, Version 1 2023. https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20231-072023-de-Kriterien-V1.pdf (08.03.2024).

Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR). (2009). *Official Journal*, L 285, 10-35. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj (17.04.2025).

Sato Y.; Kansha Y. (2022): An Energy-Saving Membrane Process for Carbon Dioxide Purification. Chemical Engineering Transactions, 94, 709–714. https://doi.org/10.3303/CET2294118 (22.07.2024).

Sellevåg, S.R.; Kelly, T.; Sidebottom, H.; Nielsen, C.J. (2004): A study of the IR and UV-Vis absorption cross-sections, photolysis and OH-initiated oxidation of CF_3CHO and CF_3CH_2CHO. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 6, 1243–1252. https://doi.org/10.1039/B315941H (17.04.2025).

cci Dialog (2020): BSRIA-Analyse: Kältemitteltrends 2020 bei Raumklima- und Wärmepumpentechnik. cci Dialog GmbH. https://cci-dialog.de/bsriaanalyse_kaeltemitteltrends_2020_bei_raumklima_und_waermepumpentechnik/ (08.03.2024).

Sulbaek Andersen, M.P.; Stenby, C.; Nielsen, O.J.; Hurley, M.D.; Ball, J.C., Wallington, T.J.; Martin, J.W.; Ellis, D.A.; Mabury, S.A. (2004): Atmospheric Chemistry of *n*-$C_xF_{2x+1}CHO$ (x = 1, 3, 4): Mechanism of the $C_xF_{2x+1}C(O)O_2$ + HO_2 Reaction. The Journal of Physical Chemistry A, 108, 6325–6330. https://doi.org/10.1021/jp0496598 (17.04.2025).

Sulbaek Andersen, M.P.; Schmidt, J.A.; Volkova, A.; Wuebbles, D.J. (2018): A three-dimensional model of the atmospheric chemistry of E and Z-CF_3CH=CHCl (HCFO-1233(zd) (E/Z)). Atmospheric Environment, 179, 250–259. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.018 (17.04.2025).

Sulbaek Andersen, M.P. & Nielsen, O.J. (2022): Tropospheric photolysis of CF_3CHO. Atmospheric Environment, 272, 118935. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118935 (17.04.2025).

Sulbaek Andersen, M.P.; Madronich, S.; Ohide, J.M.; Frausig, M.; Nielsen, O.J. (2023): Photolysis of CF_3CHO at 254 nm and potential contribution to the atmospheric abundance of HFC-23. Atmospheric Environment, 314, 120087. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120087 (17.04.2025).

Thomson, J.D.; Campbell, J.S.; Edwards, E.B.; Medcraft, C.; Nauta, K.; Pérez-Peña, M.P.; Fisher, J.A.; Osborn, D.L.; Kable, S.H.; Hansen, C.S. (2024): Fluoroform (CHF_3) Production from CF_3CHO Photolysis and Implications for the Decomposition of Hydrofluoroolefins and Hydrochlorofluoroolefins in the Atmosphere. J. Am. Chem. Soc., jacs.4c11776. https://doi.org/10.1021/jacs.4c11776 (17.04.2025).

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

UNFCCC (2023b): Nationale Inventarberichterstattung für die USA unter der Klimarahmenkonvention. Common Reporting Format (CRF) Table. https://unfccc.int/documents/627772 (08.03.2024).

Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). (2021). *Official Journal*, L 243, 1-17. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj (17.04.2025).

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 Text von Bedeutung für den EWR. (2014). *Official Journal*, L 150, 195-230. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj (17.04.2025).

Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Text von Bedeutung für den EWR). (2024). *Official Journal*, L 573, ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj (17.04.2025).

Verordnung (EU) 2015/1095 der Kommission vom 5. Mai 2015 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von gewerblichen Kühllagerschränken, Schnellkühlern/-frostern, Verflüssigungssätzen und Prozesskühlern (Text von Bedeutung für den EWR). (2015). *Amtsblatt*, L 177, 19-51. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2015/1095/oj (17.04.2025).

Verordnung (EU) 2016/2281 der Kommission vom 30. November 2016 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte im Hinblick auf Luftheizungsprodukte, Kühlungsprodukte, Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur und Gebläsekonvektoren (Text von Bedeutung für den EWR). (2016). *Amtsblatt*, L 346, 1-50. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2016/2281/oj (17.04.2025).

Wickham, H. (2016): ggplot: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. https://ggplot2.tidyverse.org (08.03.2024).

Wood, S.; Cowie, A. (2004): A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production. In: IEA Bioenergy Task 38. http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/yuan2/docs/wood.pdf (22.07.2024).

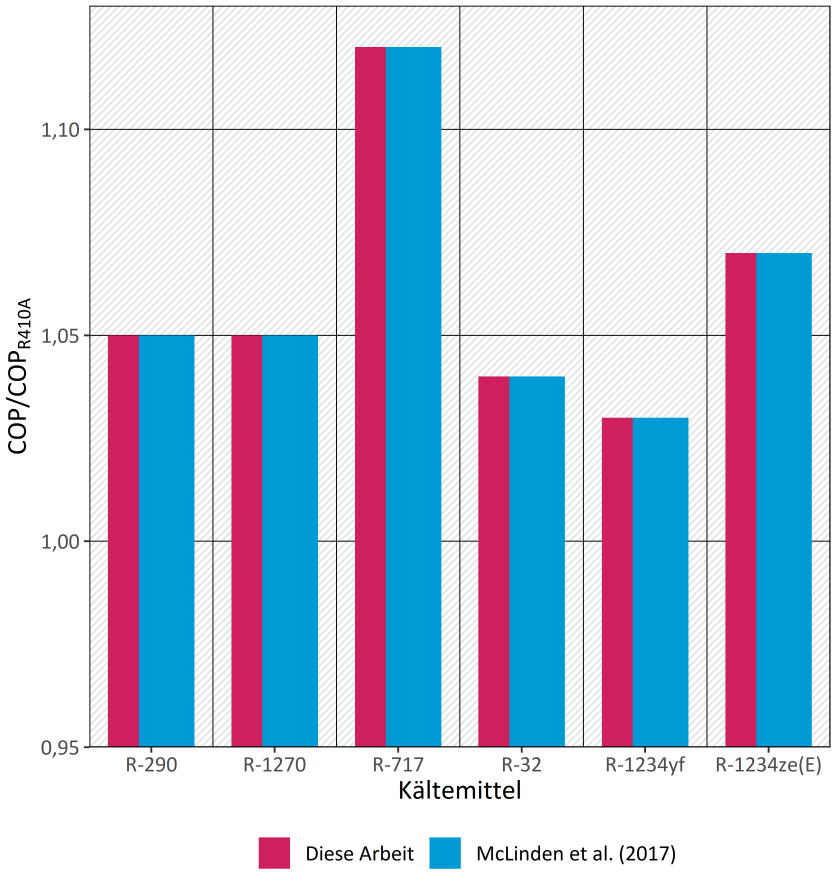
ZeroSottoZero (2023): Hydrocarbon refrigerants: for thirty years in our newspaper – ZeroSottoZero. https://www.zerosottozero.it/2023/03/30/refrigeranti-idrocarburi-da-trentanni-nel-nostro-quotidiano/ (16.07.2024).

Zheng, G.; Eick, S.M.; Salamova, A. (2023): Elevated Levels of Ultrashort- and Short-Chain Perfluoroalkyl Acids in US Homes and People. Environ. Sci. Technol., 57, 15782–15793. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06715 (17.04.2025).

A Anhang

A.1 Spezifikationen und Ergebnisse der CYCLE_D-HX Berechnungen

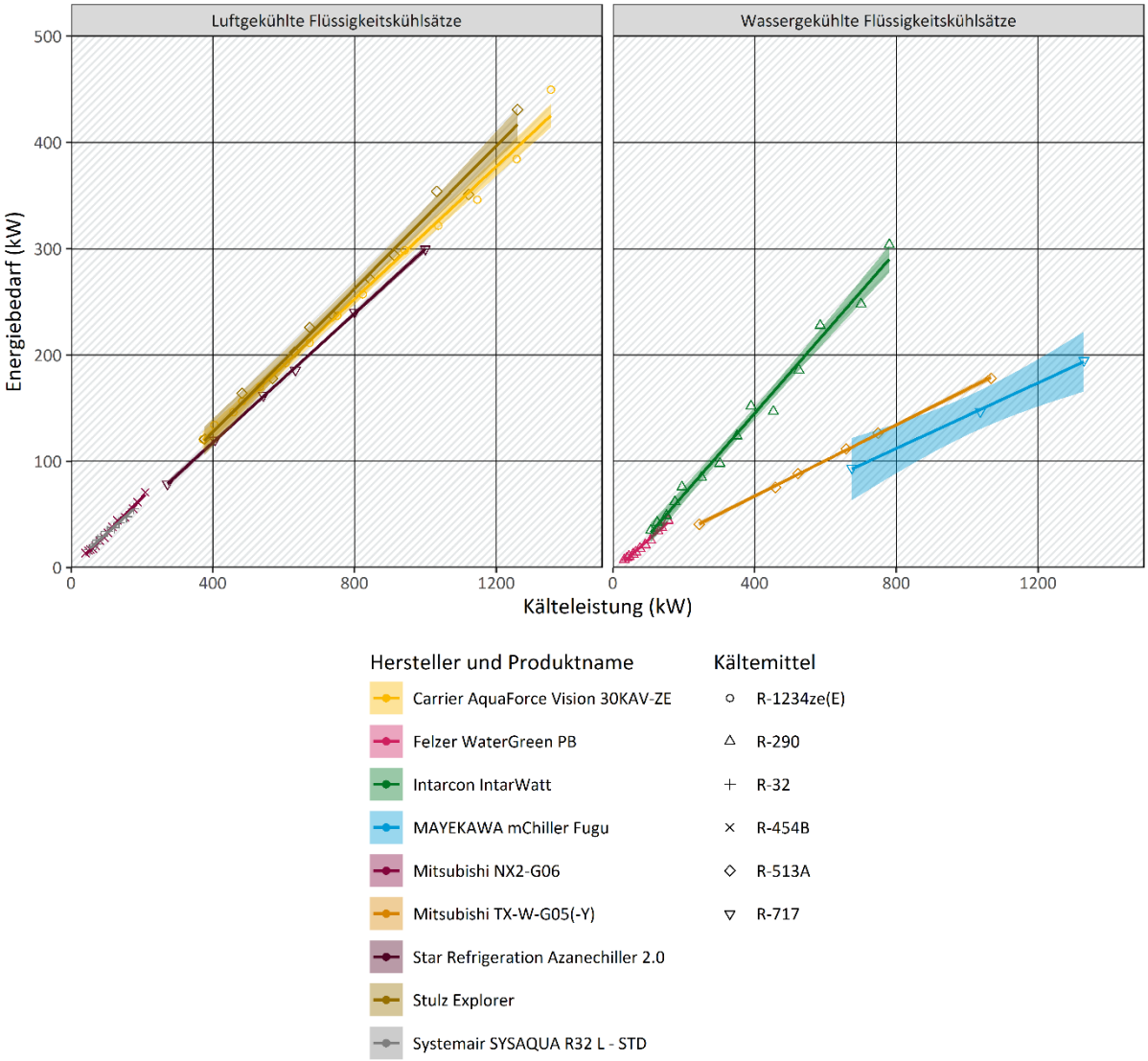
Abbildung A 1: Vergleich der berechneten Kälteleistungszahlen (COPs) verschiedener Kältemittel in einem idealen Kältekreislauf im Vergleich zu R-410A aus dieser Arbeit und McLinden et al. (2017)



Anmerkungen: COPs aus dieser Arbeit berechnet mit CYCLE_D-HX, Version 1.0 (Domanski 2017) für 40 °C Verflüssigungs- und 10 °C Verdampfungstemperatur, keine Überhitzung und keine Unterkühlung, isentropische Effizienz 100 %. COPs aus McLinden et al. (2017) berechnet mit CYCLE_D, Version 5.0 für 40 °C Verflüssigungs- und 10 °C Verdampfungstemperatur, keine Überhitzung und keine Unterkühlung, isentropische Effizienz 100 %.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

A.2 Zusätzliche Auswertung der technischen Datenblätter

Abbildung A 2: Auswertung der Abhängigkeit von Kälteleistung und Energiebedarf diverser Anlagen einer Baureihe für verschiedene Flüssigkeitskühlsätze und Kältemittel



Anmerkung: Trendlinien basierend auf linearen Regressionen mit 95 %-Konfidenzintervallen.
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche