7. Internationaler
Grosswärmepumpen Kongress
24./25.05.2023 | Zürich

OST
Ostschweizer Fachhochschule

Kältemittel heute und in der Zukunft – Neue Vorgaben, neue Kältemittel

25. Mai 2023, Zürich

Dr. Cordin Arpagaus
cordin.arpagaus@ost.ch
Tel. +41 81 377 94 34

Institut für Energiesysteme IES
www.ost.ch/ies

Co-Autoren:
- Dr. Paul-M. Bever
- Leon Brendel, PhD
- Prof. Stefan Bertsch, PhD

Übersicht

- Umfrage zu Kältemitteln in Grosswärmepumpen (Resultate)
- Statistik der Anlagen mit Kältemitteln und Füllmengen in der Schweiz
- Umweltaspekte (F-Gase, PFAS, TFA)
- Kältemittel in Hochtemperatur-Wärmepumpen und Grosswärmepumpen
- Fazit

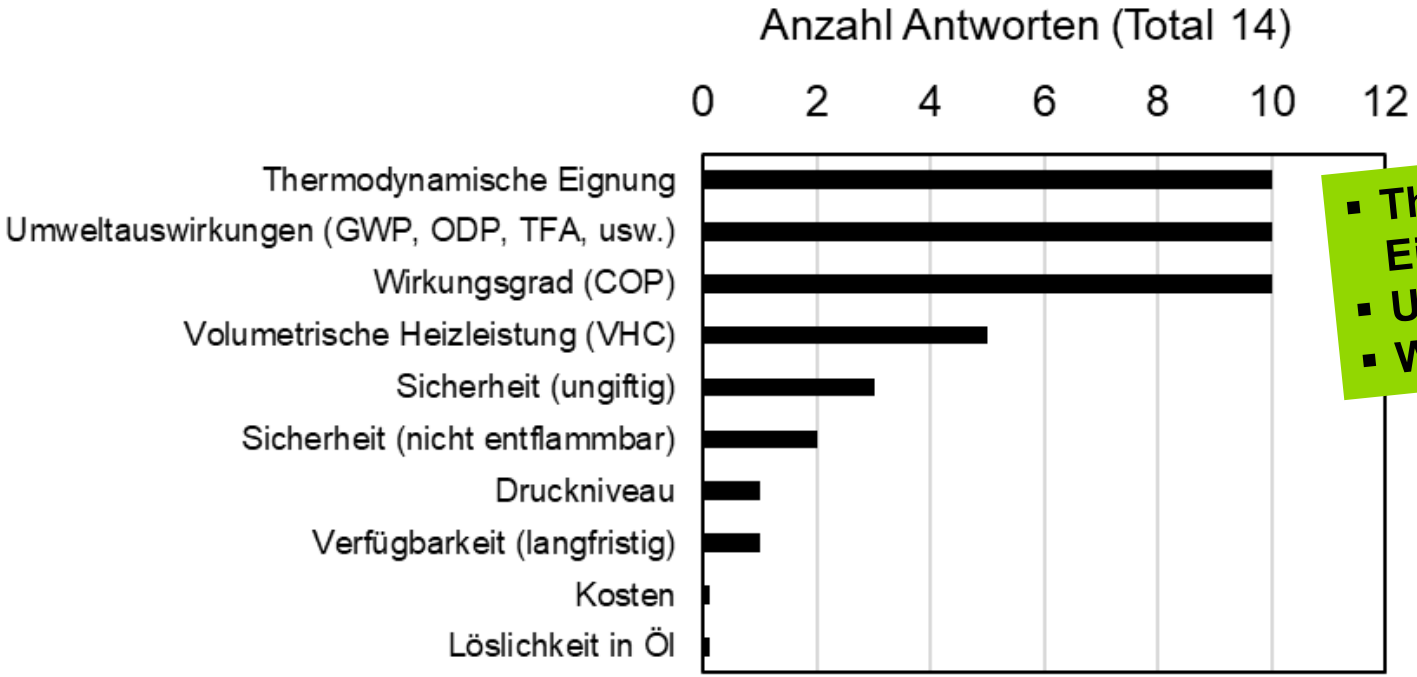
cordin.arpagaus@ost.ch

Umfrage zu Kältemitteln in Grosswärmepumpen (Resultate)

cordin.arpagaus@ost.ch

Umfrage zu Kältemitteln in Grosswärmepumpen – Resultate

Frage 1: Was sind Ihre 3 Hauptkriterien für die Auswahl des Kältemittels?
(Multiple choice, Antworten anonym)

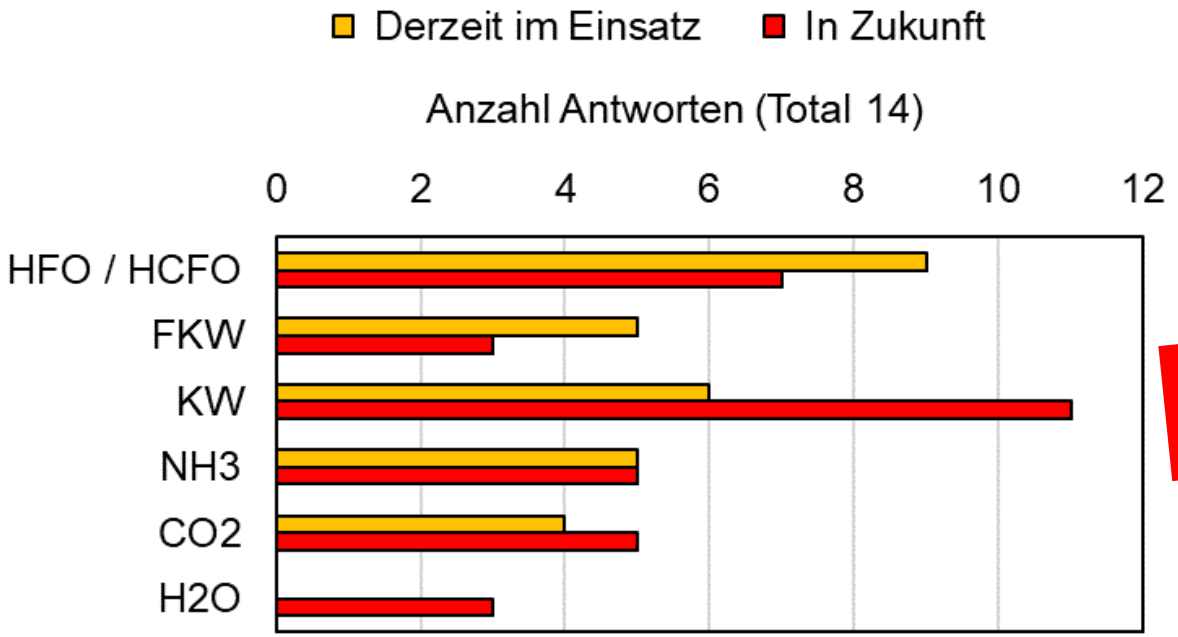


- **Thermodynamische Eignung**
- **Umweltauswirkungen**
- **Wirkungsgrad**

cordin.arpagaus@ost.ch

Umfrage zu Kältemitteln in Grosswärmepumpen – Resultate

Frage 2: Welche Kältemittel verwenden Sie derzeit in Ihren Wärmepumpen?
Frage 3: Welche Kältemittel planen Sie in Zukunft zu verwenden?



Trend zu Kohlenwasserstoffen

cordin.arpagaus@ost.ch

Umfrage zu Kältemitteln in Grosswärmepumpen – Resultate

Frage 4: Wieviel Entwicklungszeit benötigen Sie, um von einem synthetischen auf ein natürliches Kältemittel umzustellen?

Antworten (anonym):
6 Monate bis 5 Jahre

1) **6 Monate bis 1 Jahr**
2) Wir haben **bereits umgestellt**
3) Wir betreiben praktisch **nur Anwendungen mit natürlichen Kältemitteln**
4) **2 bis 3 Jahre**
5) Wir beabsichtigen **nicht das KM zu wechseln**, weder auf Ammoniak, noch auf Kohlenwasserstoffe (KW), noch auf CO_2
6) Das Beispiel R32 (GWP <750) hat sich erst in den letzten Jahren auf dem Markt etabliert. Nach der Umstellung ihrer dezentralen Heizungs-WP sind die Hersteller, die dieses Medium verwenden, jedoch erst jetzt dabei, auch ihre großen VRF-Systeme umzustellen.
7) WP für Wohngebäude: Für F&E mit Feldtests bis zur Freigabe eines Produkts kann es **bis zu 3 Jahre dauern**. Bei kundenspezifischen WPs nimmt der Planungsprozess für die Umwelt aus Sicherheitsgründen den größten Teil der Zeitspanne ein. Abgesehen davon können die Änderungen der Prozesse in Verwaltung, Organisation, Planung, Fertigung, Prüfung und Außendienst **etwa 1 Jahr** in Anspruch nehmen.
8) Wir verwenden **bereits CO_2**. Für HC haben wir bereits die Kompressortechnologie und die Erfahrung mit X-Zone und so weiter. Das Problem ist hier eher die Kundenakzeptanz und die Gesetzgebung.
9) Unsere Wärmepumpe basiert **bereits auf natürlichem Kältemittel**
10) Wir sehen **nur Wasser R718** als mögliches nachhaltiges natürliches Kältemittel auf lange Sicht für WP. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Verdichtern benötigen wir **etwa 5 Jahre** bis zur Marktreife. Daher versuchen wir, einen neuen Verdichtertyp zu entwickeln.
11) **Etwa 2 Jahre**, aber bereits auf einem guten Weg, und in Erwartung ausreichender Testzeit, um die Integrität/Sicherheit einer neuen, voll qualifizierten ATEX-Konstruktion zu prüfen.
12) **6 bis 12 Monate**, hauptsächlich für die Sicherheitstechnik. Der Kompressor ist KW-ready
13) Wir arbeiten **bereits mit natürlichen Kältemitteln.** Aber manchmal braucht es Jahre, um neue Komponenten zu entwickeln!
14) **Prinzipiell können wir die Verwendung von natürlichen KM umsetzen**, aber oft können die Sicherheits- und Temp.anforderungen nicht erfüllt werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Anforderungen, wie z.B. bei KW, für die Techniker sehr anspruchsvoll sind.

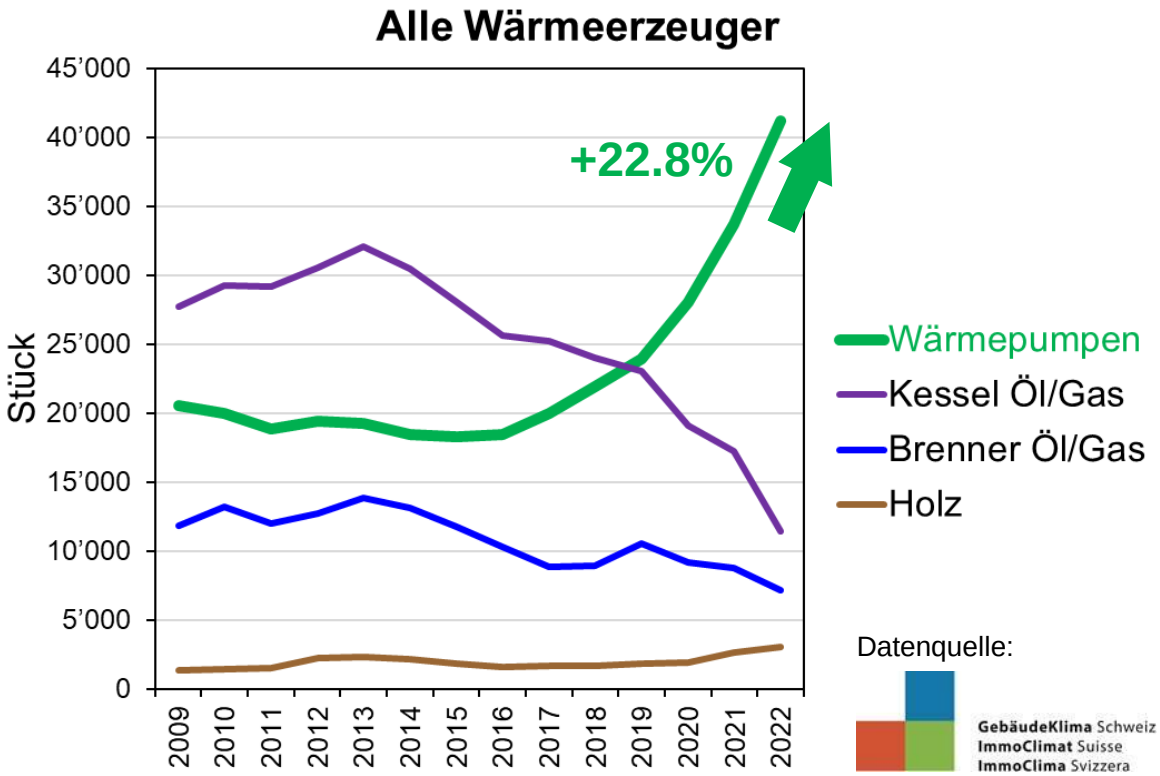
cordin.arpagaus@ost.ch

Statistik der Anlagen mit Kältemitteln und Füllmengen in der Schweiz

cordin.arpagaus@ost.ch

Zum Einstieg

Wärmepumpen sind auf dem Vormarsch in der Schweiz



Datenquelle:

GebäudeKlima Schweiz
ImmoClimat Suisse
ImmoClima Svizzera

- **+22.8% Wachstumsrate von 2021 bis 2022**
- **2022: 41'209 Stück**
- 2021: 33'554 Stück

davon

85% Luft/Wasser WP

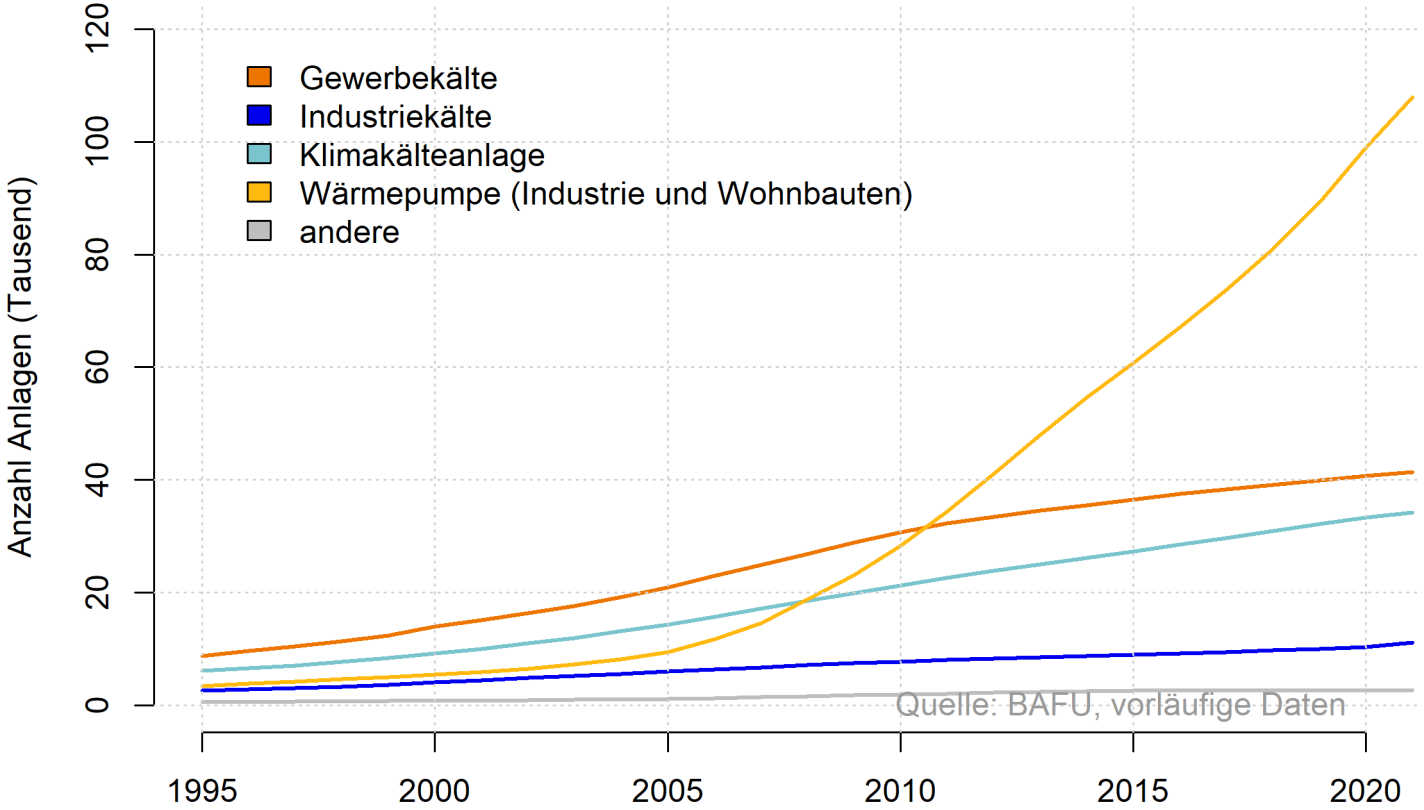
14% Sole/Wasser WP

1% Grundwasser WP

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Steigende Anzahl Wärmepumpen Anlagen in der Schweiz

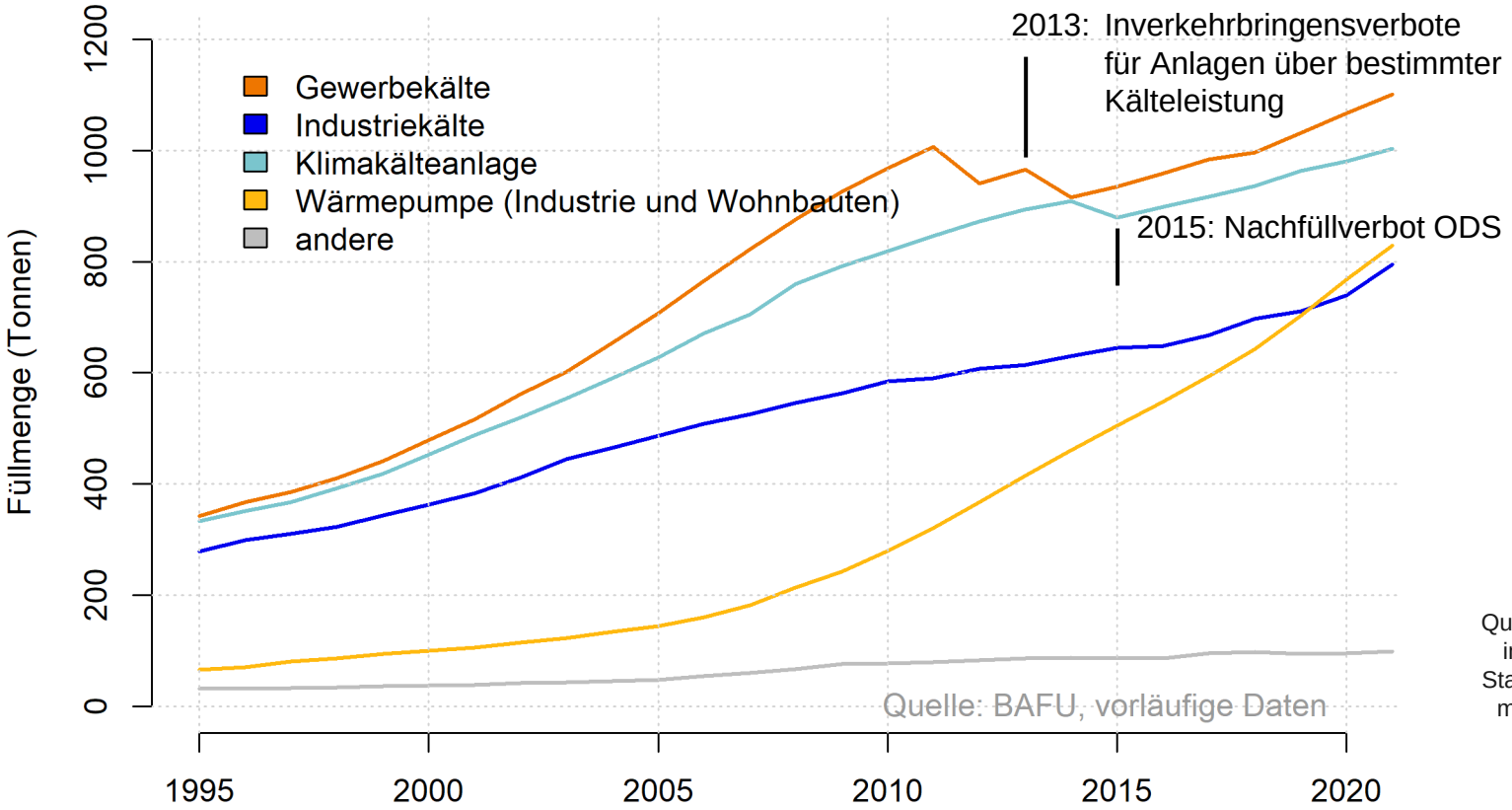


Meldepflicht
(ChemRRV,
Anhang 2.10 Ziffer 5.1):
Wer eine stationäre Anlage mit **>3 kg Kältemitteln** in Betrieb genommen hat, in Betrieb nimmt oder ausser Betrieb nimmt, muss dies dem BAFU melden.

Quelle: BAFU (2023, in Vorbereitung): Statistik der Anlagen mit Kältemitteln in der Schweiz

cordin.arpagaus@ost.ch

Zunehmende Kältemittel Füllmenge in Wärmepumpen Anlagen

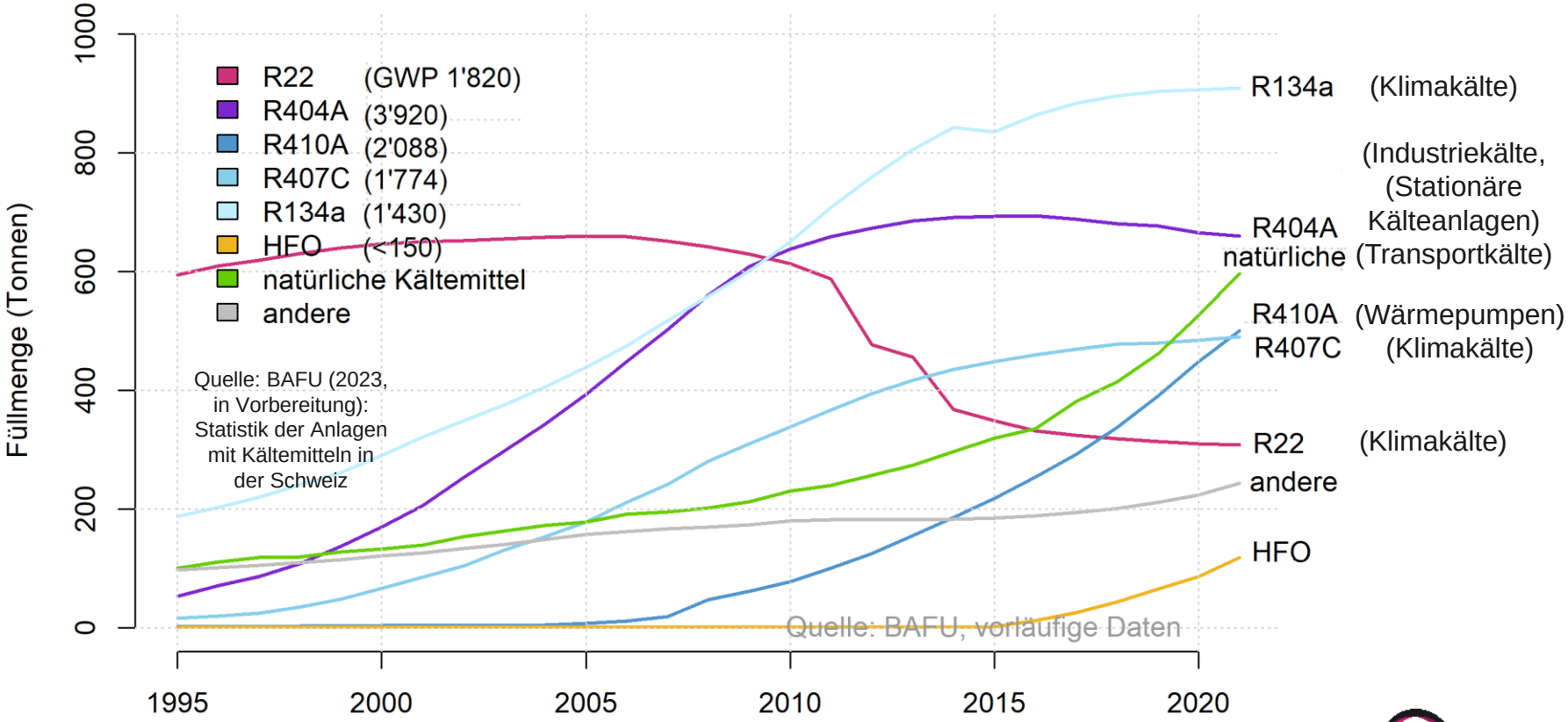


Quelle: BAFU (2023, in Vorbereitung): Statistik der Anlagen mit Kältemitteln in der Schweiz

cordin.arpagaus@ost.ch

Kältemittel heute und in der Zukunft

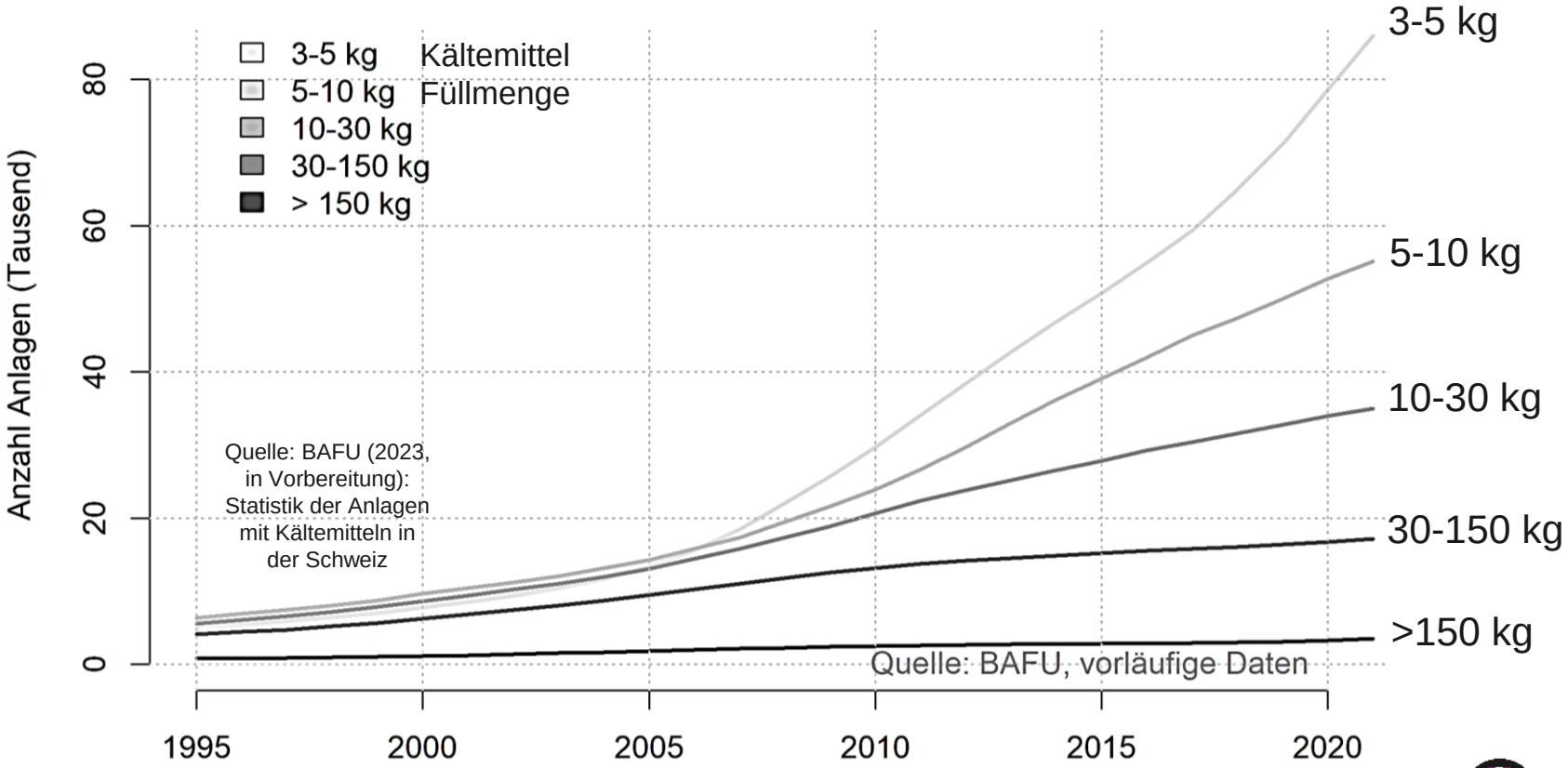
Starker Anstieg an natürlichen Kältemitteln



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

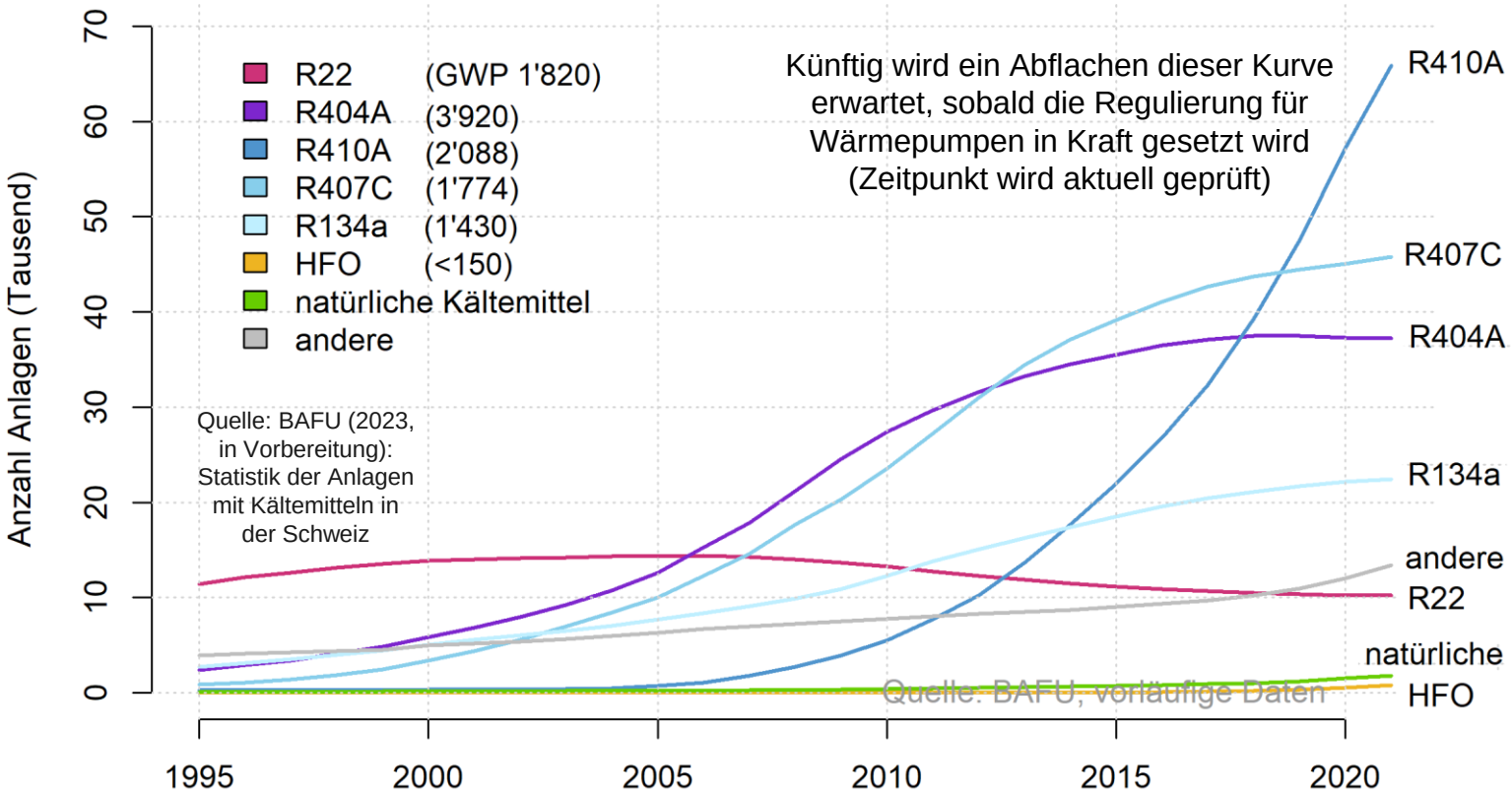
Anstieg an kleinen Wärmepumpen Anlagen in der Schweiz



cordin.arpagaus@ost.ch

Kältemittel heute und in der Zukunft

Anstieg der Wärmepumpen mit Kältemittel R410A



cordin.arpagaus@ost.ch

Regelung in der Luft stabiler Kältemitteln in stationären Kälteanlagen und Wärmepumpen gemäss ChemRRV Anhang 2.10

4. Wärmepumpen (Nutzung hauptsächlich zur Wärmeerzeugung)

GWP ≤ 2100	zulässig	Füllmengenbegrenzung für Luftwärmetauscher zur Wärmeabgabe (siehe Punkt 6)	nicht zulässig*	R410A, R32
GWP > 2100	nicht zulässig*			R417A
	Q_{0K} ≤ 100 kW	100 kW < Q_{0K} ≤ 600 kW	Q_{0K} > 600 kW	

ozonschichtabbauende Kältemittel

ODP ≤ 0.0005	wenn kein Ersatz nach dem Stand der Technik**** und Massnahmen zur Emissionsreduktion getroffen werden	R1233zd
ODP > 0.0005	nicht zulässig	R22

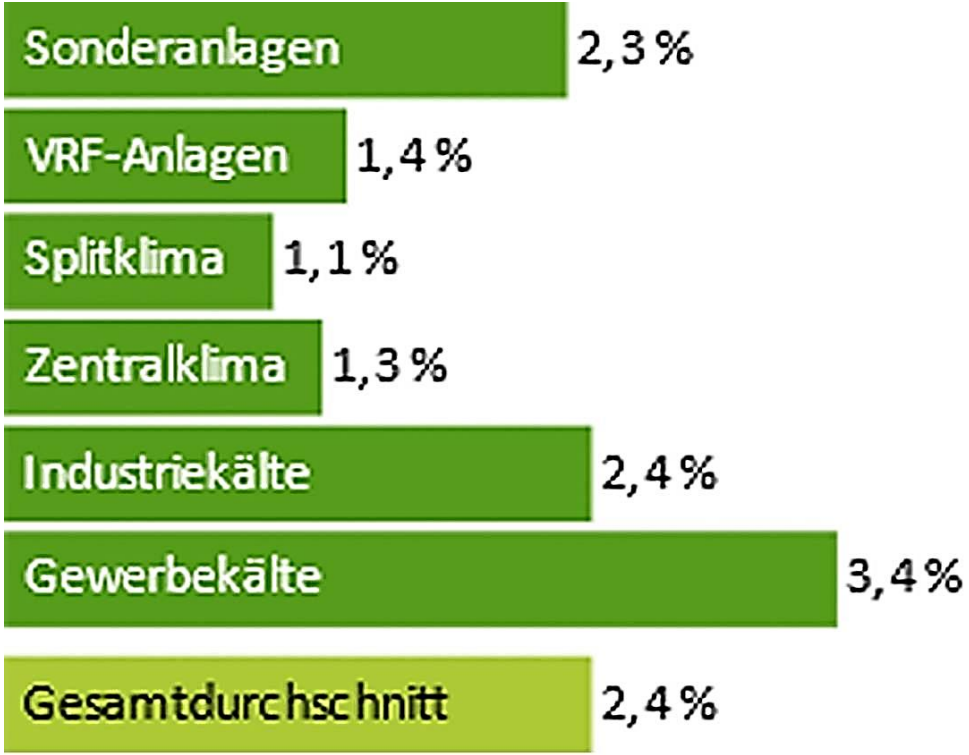
in der Luft nicht stabile und nicht ozonschichtabbauende Kältemittel

zulässig	NH_3, Propan, CO_2, HFO

Quelle: BAFU (2020): Regelung in der Luft stabiler Kältemitteln in stationären Kälteanlagen und Wärmepumpen, Graphische Zusammenfassung und ChemRRV: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de

cordin.arpagaus@ost.ch

Jährliche Leckageraten in Deutschland (gem. VDKF, 2016 – 2020)



- Durchschnittliche Nachfüllmengen und jährliche Leckageraten von Kältemitteln in Kälte- und Klimaanlagen wurden für die Jahre 2016 bis 2020 erhoben und veröffentlicht.
- Die **Gesamtfüllmenge aller untersuchten Anlagen** betrug dabei **1’887 t** und die gesamte **Nachfüllmenge** lag bei knapp **45 t (2.4%).**

Quelle: https://www.haustec.de/klima-lueftung/kaeltetechnik/novellierung-der-f-gase-verordnung-eu-vorschlag-foerdert-co2, 15.09.2022

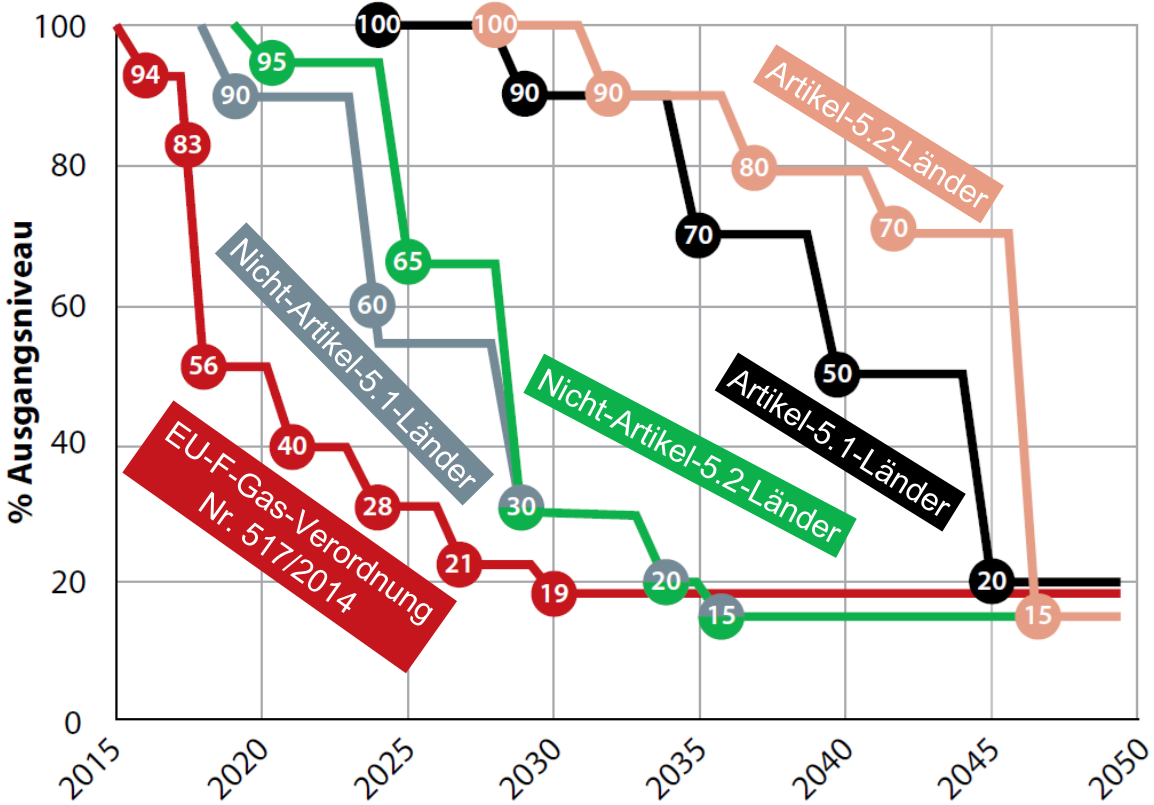
Umweltaspekte (F-Gase, PFAS, TFA)

cordin.arpagaus@ost.ch

Umweltaspekte (F-Gase, PFAS, TFA)

Schrittweise Reduktion von FKW

Die F-Gase Verordnung zielt darauf ab, den Einsatz von Kältemitteln mit tiefem GWP (Treibhauspotential) zu fördern.



- EU-F-Gas-V.
- Nicht-Artikel-5.1- Länder
- Nicht-Artikel-5.2- Länder
- Artikel-5.1-Länder
- Artikel-5.2-Länder

Alle Nicht-Artikel-5-Länder mit Ausnahme von Nicht-Artikel-5.2- und EU-Ländern

Weissrussland, Russland, Kasachstan, Tadschikistan, Usbekistan

Alle Artikel-5-Länder mit Ausnahme von Artikel-5.2-Ländern

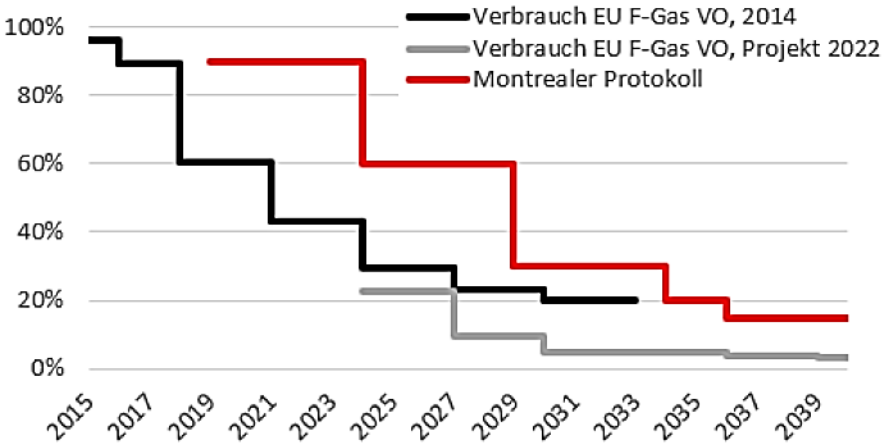
Indien, Pakistan, Iran, Irak, Bahrain, Kuwait, Oman, Katar, Saudi-Arabien, Vereinigte Arabische Emirate

cordin.arpagaus@ost.ch
OST

In der Schweiz haben die europäischen Vorschriften (F-Gase Verordnung, REACH-Verordnung) keine rechtliche Wirkung.

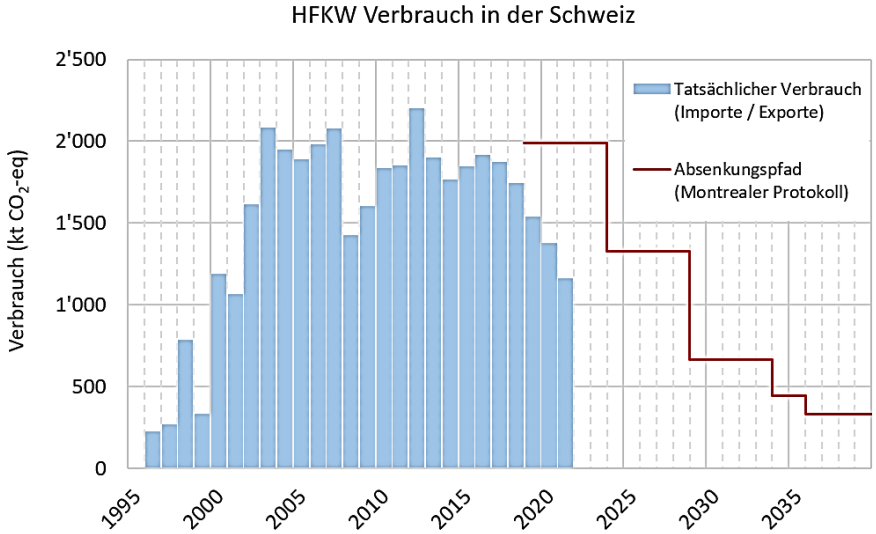
Fluorierte Treibhausgase – Nationale Umsetzung

EU: 2022 Entwurf der neuen F-Gas Verordnung



- Einfuhrquoten
- Verbote für das Inverkehrbringen

Schweiz: 2023 Revision Anhang 2.10 ChemRRV (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung)



- Verbote für das Inverkehrbringen

Quelle: Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023)
BAFU Website

cordin.arpagaus@ost.ch

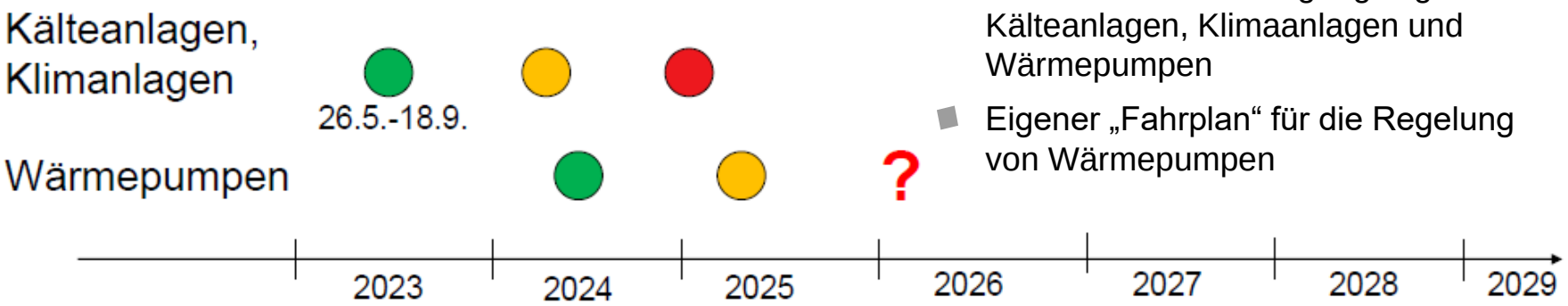
OST

Vorgehen in der Schweiz: Revision Anhang 2.10 ChemRRV

Inkrafttreten

Bundesratsbeschluss

Vernehmlassung



Stand der Technik:

- Arbeitsgruppe zur Feststellung des Standes der Technik von Anlagen mit Kältemitteln
- Übergang zu natürlichen Kältemitteln, Zwischenlösung HFO und HFKW mit tiefem Treibhauspotenzial
- Unterschiedliche Ausgangslage für Kälteanlagen, Klimaanlagen und Wärmepumpen
- Eigener „Fahrplan“ für die Regelung von Wärmepumpen

Quelle: Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023)

cordin.arpagaus@ost.ch

Umweltaspekte (F-Gase, PFAS, TFA)

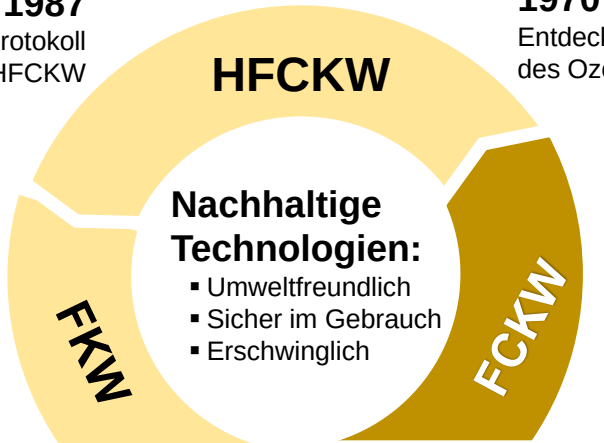
Historische Entwicklung von Kältemitteln

FKW =	Fluorkohlenwasserstoffe
HFCKW =	„Teilhalogenierte“ Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FCKW =	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFO =	Hydrofluorolefine
PFAS =	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
REACH =	Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals (Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien)

Inspiriert von Danfoss (2020): Kältemittel – jetzt und in Zukunft

1987
Montrealer Protokoll
für FCKW und HFCKW

1970
Entdeckung
des Ozonabbaus



1995
Globale Erwärmung
wird zu einem Problem

1930 – 1950
Erfindung von
sicheren Kältemitteln

Natürliche Kältemittel

HFO und Natürliche Kältemittel

1834
Erfindung des Dampfverdichtungsprozesses
Natürliche Kältemittel

Steigende Nachfrage
nach sicheren
Kältemittel

2015
EU Reduktions-
plan für FKW

2019
Montrealer
Protokoll für
FKW

2022
Überarbeitung
F-Gase Verordnung
zu FKW der EU

2023
PFAS Beschränkung
der EU unter
REACH

cordin.arpagaus@ost.ch

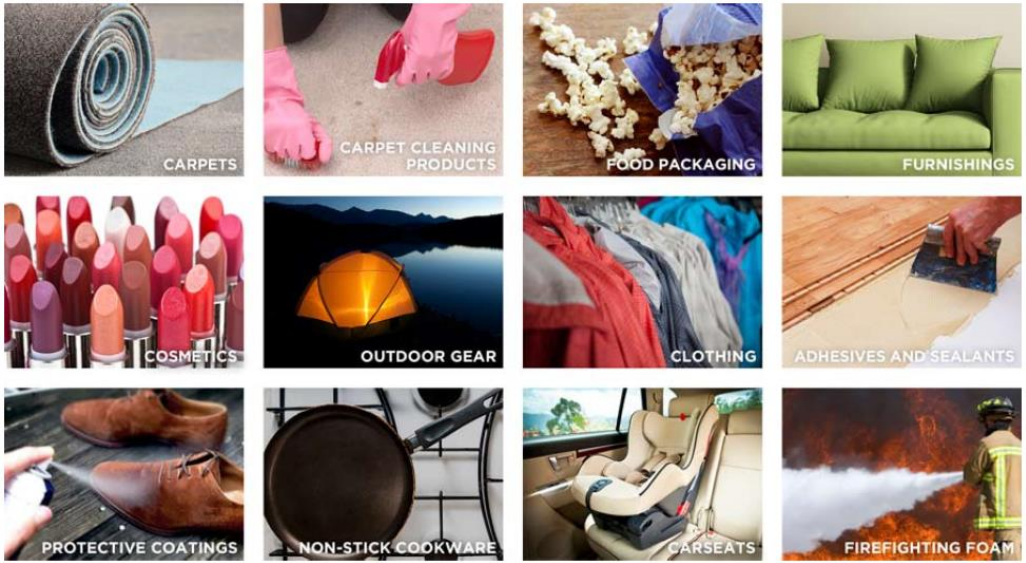
OST

ECHA setzt Rechtsvorschriften der EU zu Chemikalien zum Schutz von Gesundheit und Umwelt um.

Vorschlag für Regelung PFAS-Beschränkung in der EU

Die Beschränkung umfasst rund 10’000 PFAS in der REACH-Verordnung und betrifft folgende Anwendungsbereiche:

- Textilien
- Löschmittel
- Skiwachse
- Kosmetika
- Lebensmittelverpackung
- Kältemittel, etc.



Fotos: Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023)

Im Vorschlag werden PFAS definiert als Stoffe, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- (CF_3-) oder Methylen- (-CF_2-) Kohlenstoffatom (ohne daran gebundenes H/Cl/Br/I) enthält.

cordin.arpagaus@ost.ch

Vorschlag für Regelung PFAS-Beschränkung in der EU

Betroffene Kältemittel (auch deren Mischungen):

HFC
- **R125** (Pentafluorethan, CF_3CHF_2)
- **R134a** (1,1,1,2-Tetrafluorethan)
- **R143a** (1,1,1-Trifluorethan, CF_3CH_3)
- **R404A, R410A** (da R125 enthalten)

HFO
- **R1234yf**
- **R1234ze(E)**
- **R1336mzz(E)**
- **R1336mzz(Z)**

HCFO
- **R1224yd**
- **R1233zd(E)**

Nicht betroffene Kältemittel:

- R32 (Difluormethan, CH_2F_2)
- R23 (Trifluormethan, CHF_3)
- LFR3 (Mischung: CO_2/R32/R1132a)
- R290 (Propan, C_3H_8)
- R600 (n-Butan, C_4H_{10})
- R600a (Isobutan, C_4H_{10})
- R601 (n-Pentan, C_5H_{12})
- R717 (NH_3, Ammoniak)
- R744 (CO_2)
- …

Quelle: In Anlehnung an Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023)

cordin.arpagaus@ost.ch

Vorschlag für Regelung PFAS-Beschränkung in der EU

Übergangsfristen für das Inverkehrbringen von Kältemitteln (ab Inkrafttreten der Regelungen):

▪ Alle Anwendungen:	1.5 Jahre
▪ Tieftemperaturkühlung < -50 °C:	+5 Jahre
▪ Transportkühlung und Klimaanlagen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor:	+5 Jahre
▪ Gekühlte Zentrifugen, Test- und Messeinrichtungen im Labor:	+12 Jahre
▪ Wartung und Nachfüllung bestehender Anlagen ohne Drop-In:	+12 Jahre
▪ Anlagen in Gebäuden, für welche ohne PFAS-Kältemittel die Sicherheitsnormen nicht eingehalten werden können:	unbegrenzt

Quelle: Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023) basierend auf ANNEX XV RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), 22.03.2023

cordin.arpagaus@ost.ch

Vorschlag für Regelung PFAS-Beschränkung in der EU

Weiteres Vorgehen

EU:

- Vorschlag umfassende PFAS-Beschränkung (Februar 2023)
- Öffentliche Vernehmlassung (März – September 2023)
- …

Schweiz:

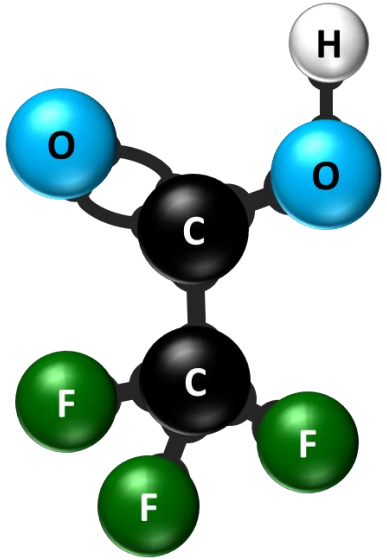
- Das BAFU (Bundesamt für Umwelt) verfolgt eng die aktuelle fachliche Diskussion sowie die einschlägigen rechtlichen Entwicklungen im EU-Raum und wird zu gegebener Zeit die Regulierung in der Schweiz überprüfen.

Quelle: Henry Wöhrnschimmel, BAFU (2023)

cordin.arpagaus@ost.ch

Bildung von Trifluoressigsäure (TFA, CF_3COOH)

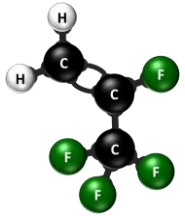
Trifluoressigsäure (TFA)
CF_3-C(O)OH



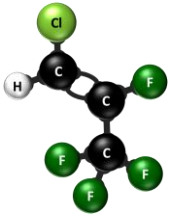
- TFA ist ein Endprodukt des atmosphärischen Abbaus halogenierter Kältemittel
- Ist in der Umwelt persistent und zudem mobil in der aquatischen Umwelt
- TFA kann grundsätzlich aus verschiedenen Substanzklassen organischer Moleküle entstehen, wobei das Vorhandensein einer **CF_3-CF= Gruppe** als Voraussetzung für das Potential zur TFA-Bildung angesehen wird

cordin.arpagaus@ost.ch

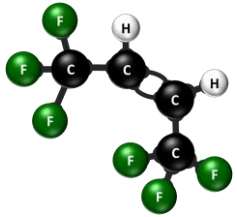
Molare Ausbeute an TFA beim Abbau von HFOs in der Atmosphäre



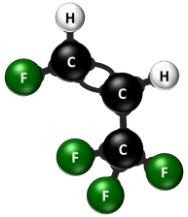
R1234yf
CF_3-CF=CH_2



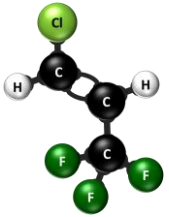
R1224yd(Z) [1]
Z-**CF_3-CF=**CHCl



R1336mzz(Z) [2]
Z-**CF_3-CH=**$CHCF_3$



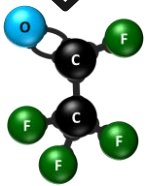
R1234ze(Z)
Z-**CF_3-CH=**CHF



R1233zd(E) [3]
E-**CF_3-CH=**CHCl

CF_3-CF=
Gruppe

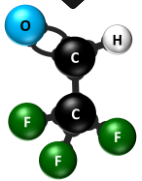
Trifluoracetylfluorid (TFF)
CF_3-C(O)F



[1] 97%
(Guo et al., 2019)

~ 100%

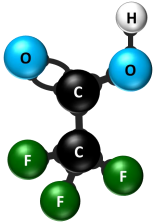
CF_3-CH=
Gruppe



Trifluoracetaldehyd
CF_3-C(O)H

< 10%

[2] < 20%, weil 2 x CF_3-CH=
(Henne et al., 2012)
[3] ~2% (Sulbaek Andersen
et al., 2018)



Trifluoressigsäure (TFA)
CF_3-C(O)OH

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Molare Ausbeute an TFA beim atmosphärischen Abbau

Stoffname	Molare TFA-Ausbeute	Quelle
HFKW-245fa	<10 %	WMO (2010)
HFKW-134a	7-20 %	Wallington et al. (1996)
HFKW-143a	<10 %	Eigene Schätzung
HFKW-365mfc	<10 %	WMO (2010)
HFKW-227ea	100 %	WMO (2010)
u-HFKW-1234yf	100 %	Hurley et al. (2008)
u-HFKW-1234ze(E)	<10 %	WMO (2010)
u-HFKW-1336mzz(Z)	<20 %[97]	Qing et al. (2018)
u-HFKW-1225ye(E und Z)	100 %	Eigene Schätzung
u-HFCKW-1233zd(E)	2 %	Sulbaek Andersen et al. (2018)
u-HFCKW-1224yd(Z)	100 %	Eigene Schätzung

Quelle: Behringer et al. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenierter Kälte- und Treibmittel in der Umwelt, Herausgeber: Umweltbundesamt

cordin.arpagaus@ost.ch

Aktuelle Entwicklungen und HTHP Produkte für Versorgungstemperaturen über 100 °C

cordin.arpagaus@ost.ch

R717/R600 Wärmepumpe für Fernwärmeanwendungen

- **R717 im unteren Kreislauf (Sabroe HeatPAC) und R600 im oberen Kreislauf**
- Belüftet im Falle einer Leckerkennung
- Beheiztes ATEX-konformes Gehäuse zur Vermeidung von Vereisung im Winter während der Stillstandszeiten
- **Getestet mit n-Butan (R600) und Isobutan (R600a) und an den Kunden ausgeliefert**
- Finaler Test vor Ort: 2023
- COP = 5,7 bei 40 °C/90 °C, 500 kW

Foto mit freundlicher Genehmigung von Johnson Controls

cordin.arpagaus@ost.ch

Butan (R600) Wärmepumpe von Mayekawa Europe NV

Foto mit freundlicher Genehmigung von Mayekawa Europe NV

- Heizleistung rund 750 kW
- Hubkolbenkompressor
- 18 m^2 Stellfläche
- Heiße Sole bis zu 120 °C (70 °C Einlass) für Fernwärmeanwendungen
- Wärmequelle: 72 °C (Eingang), 45 bis 65 °C (Ausgang)
- COP 3,2 bis 4,8

$T_{source,in}$ [°C]	$T_{source,out}$ [°C]	$T_{sink,in}$ [°C]	$T_{sink,out}$ [°C]	$COP_{heating}$ [-]
72	65	70	120	4.8
72	60	70	120	4.4
72	55	70	120	4
72	50	70	120	3.7
72	45	70	120	3.2

cordin.arpagaus@ost.ch

CO_2 Wärmepumpe for Heisswasser Produktion

FENAGY®
FUTURE ENERGY SOLUTIONS

H600-WW

Foto mit freundlicher Genehmigung von FENAGY

- Heizleistung von 0,3 bis 1,8 MW
- Warmwassererwärmung von 30 bis 120 °C
- Wärmequelle: Luft (AW) oder Wasser (WW)
- Hubkolbenverdichter (Dorin oder Bitzer)
- Niedrige Vorlauftemperatur der Wärmesenke zur Steigerung der Effizienz im CO_2-Kreislauf erforderlich

Estimated performance

$T_{source,in}$	$T_{source,out}$	$T_{sink,in}$	$T_{sink,out}$	$COP_{heating}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]
0	-5	30	120	2,46
0	-5	30	120	2,61*
5	0	30	120	2,63
5	0	30	110	2,91*

*including expander

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Rotationswärmepumpe von ecop Technologies GmbH

Video mit freundlicher Genehmigung von ecop Technologies GmbH

- **Joule Prozess**
- **Arbeitsmedium: Edelgas Gemisch aus Argon, Helium, und Krypton**
- **GWP < 1, ODP = 0**
- **Nicht giftig**
- **Nicht brennbar**
- **Kein Thema mit PFAS bzw. TFA**
- Heizleistung: 700 kW thermisch (400 bis 800 kW)
- Flexible Temperaturbereiche von -20 °C bis 150 °C
- Temperaturspreizung bis 70 K (Quelle aus zu Senke aus)
- www.ecop.at

cordin.arpagaus@ost.ch

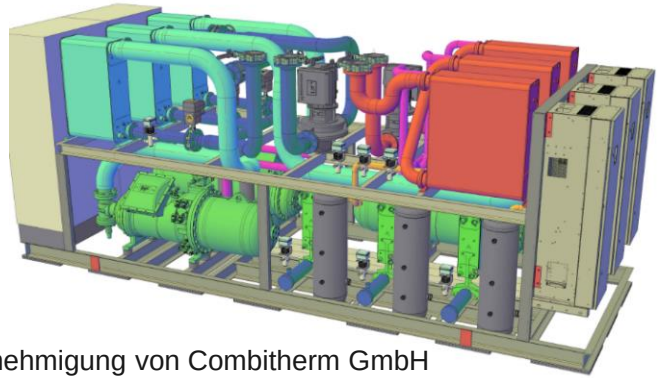
Anwendungsbeispiele für HTWP von Combitherm

APPARATE- UND ANLAGENBAU

Futtermittelproduktion
Max. 120 °C (Heißwasser)
2 x 750 kW (Heizleistung)
Abluft aus Trocknern
(Wärmequelle)

Aquafutterproduction
Max. 120 °C
3.5 MW
Abluft aus Trocknern

HWW 3/9573
Max. 120 °C
1’060 kW
R1233zd(E)



Reinigungstechnik
Max. 100 °C
400 kW
aus Abwärme

Foto mit freundlicher Genehmigung von Combitherm GmbH

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Anlagenentwickler in der Schweiz

Scheco AG	https://www.scheco.ch
Walter Wettstein AG Kältetechnik	https://www.wwag.ch
Zero-C	www.zero-c.ch
Friotherm AG	https://www.friotherm.com
MAN Energy Solutions	https://www.man-es.com

cordin.arpagaus@ost.ch

Anlagenentwickler in der Schweiz

Wettstein Kältetechnik

Kompressor	Kolben / Schraube	Kolben
Kältemittel	R717 (NH_3, Ammoniak)	R717 / R600 (n-Butan)
Heizleistung	0.2 to 20 MW	0.2 bis 2 MW
Quelle (ein → aus)	60 bis 10 °C → 50 to 0 °C	60 bis 30 °C → 50 bis 20 °C
Senke	bis 85 °C	bis 118 °C
Bemerkungen	▪ umgesetzt bis 1.4 MW ▪ bis 70 °C bis 6 MW pro Anlage ▪ bis 4 Anlagen parallel	in Planung

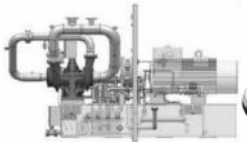
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Aktuelle Entwicklungen und HTWP Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C

Beispiele für Großwärmepumpen (>1 MW) für Fernwärme und industrielle Anwendungen

Friotherm (CH)	Turboden (IT)	MAN Energy (CH)	Mitsubishi MHPS (DE)	Siemens (DE)	Ochsner (AT)	Kobelco (JP)
FRIOTHERM Heat Pump	LHP30 LHP150	ETES	D-GWP	Gross-WP	IWWDSS R2R3b IWWHS ER3b TWIN	SGH 120/165
R1233zd(E) + R718 (Wasser)	**R601 + R718 (n-Pentan + Wasser)**	**R744 (CO_2)**	**R600a + R718 (Iso-Butan + Wasser)**	**HFOs**	**Öko (R245fa) R1233zd(E) (HFOs)**	**R245fa + R718**
25 MW	2.7 MW 14.4 MW	5 bis 100 MW	4.3 MW	4 bis 70 MW	bis 750 kW TWIN bis 2.4 MW	bis 624 kW Kaskade 2.5 MW
137 °C	115 °C	150 °C	174 °C	150 °C	130 °C	165 °C

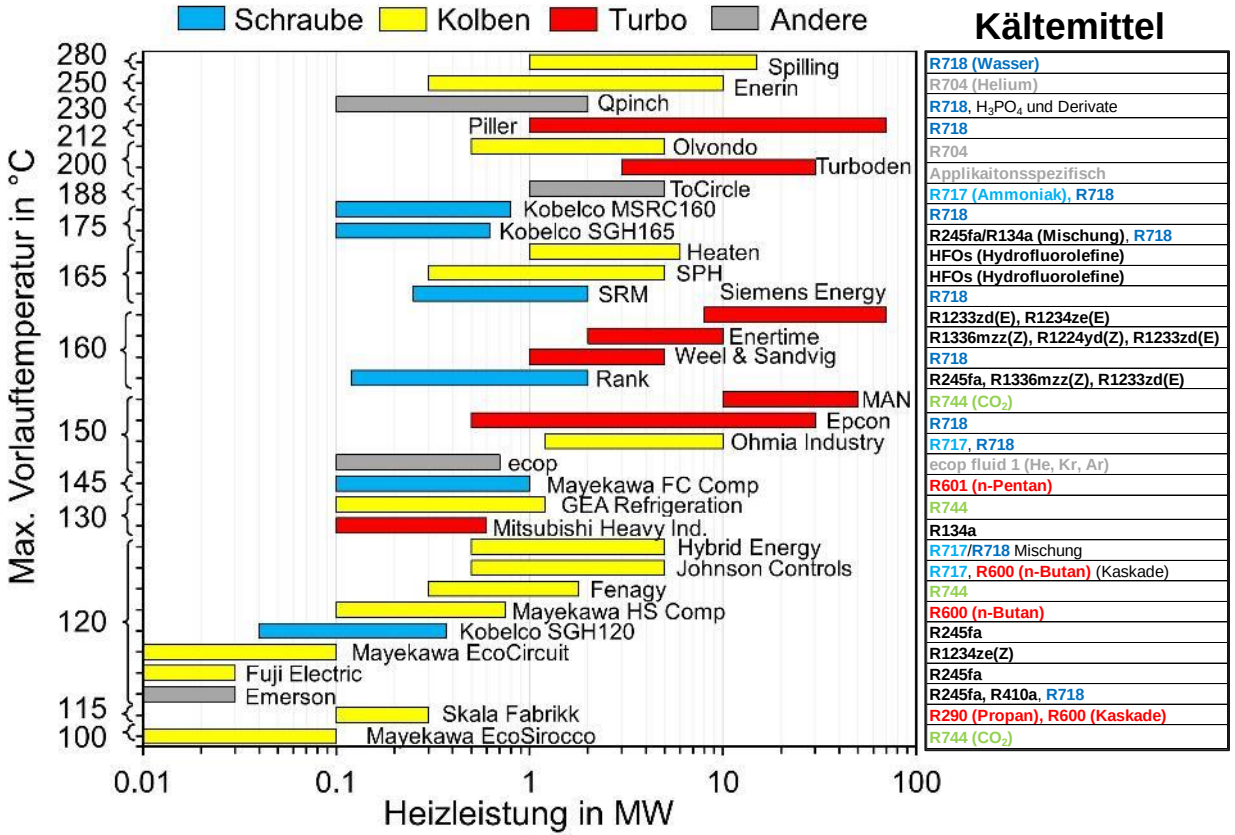


FRIOTHERM TURBODEN MAN MITSUBISHI POWER SIEMENS energy OCHSNER ENERGIE TECHNIK KOBELCO

cordin.arpagaus@ost.ch

Aktuelle Entwicklungen & HTWP Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C

Max. Vorlauftemperatur vs. Heizleistung verschiedener HTWP



Kältemittel

R718 (Wasser)
R704 (Helium)
R718, H_3PO_4 und Derivate
R718
R704
Applikaitonsspezifisch
R717 (Ammoniak), R718
R718
R245fa/R134a (Mischung), R718
HFOs (Hydrofluorolefine)
HFOs (Hydrofluorolefine)
R718
R1233zd(E), R1234ze(E)
R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R1233zd(E)
R718
R245fa, R1336mzz(Z), R1233zd(E)
R744 (CO_2)
R718
R717, R718
ecop fluid 1 (He, Kr, Ar)
R601 (n-Pentan)
R744
R134a
R717/R718 Mischung
R717, R600 (n-Butan) (Kaskade)
R744
R600 (n-Butan)
R245fa
R1234ze(Z)
R245fa
R245fa, R410a, R718
R290 (Propan), R600 (Kaskade)
R744 (CO_2)

Kältemittel

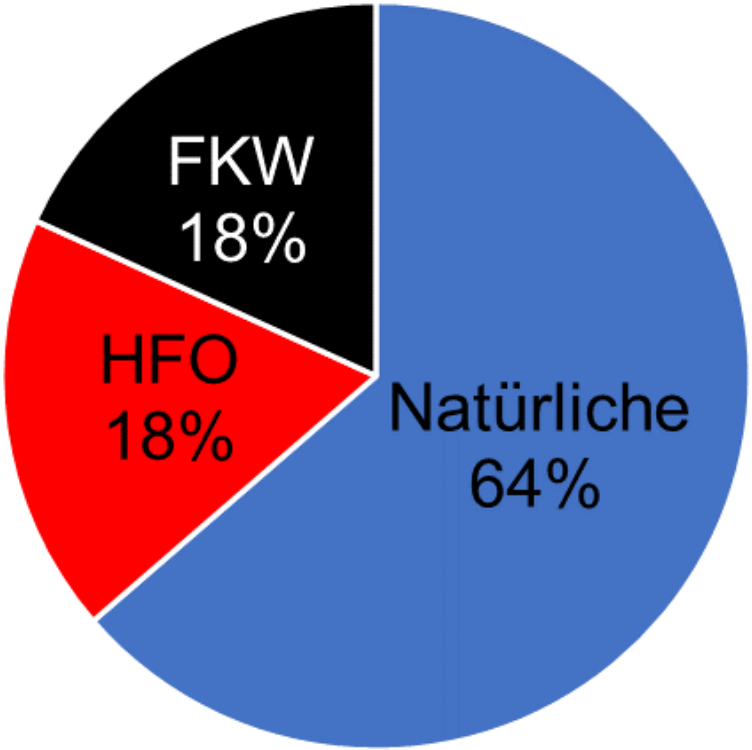
R718 (Wasser)
R704 (Helium)
R717 (Ammoniak)
HFOs (Hydrofluorolefine)
R744 (CO_2)
R601 (n-Pentan)
R600 (n-Butan)
R290 (Propan)

Quelle: Arpagaus et al. (2022): High-Temperature Heat Pumps for Industrial Applications - New Developments and Products for Supply Temperatures above 100 °C, China Heat Pump Conference (CHPC2022), Hangzhou, 24.-27. Oktober, 2022

Basiert auf Daten von IEA HPT Annex 58 https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1

cordin.arpagaus@ost.ch

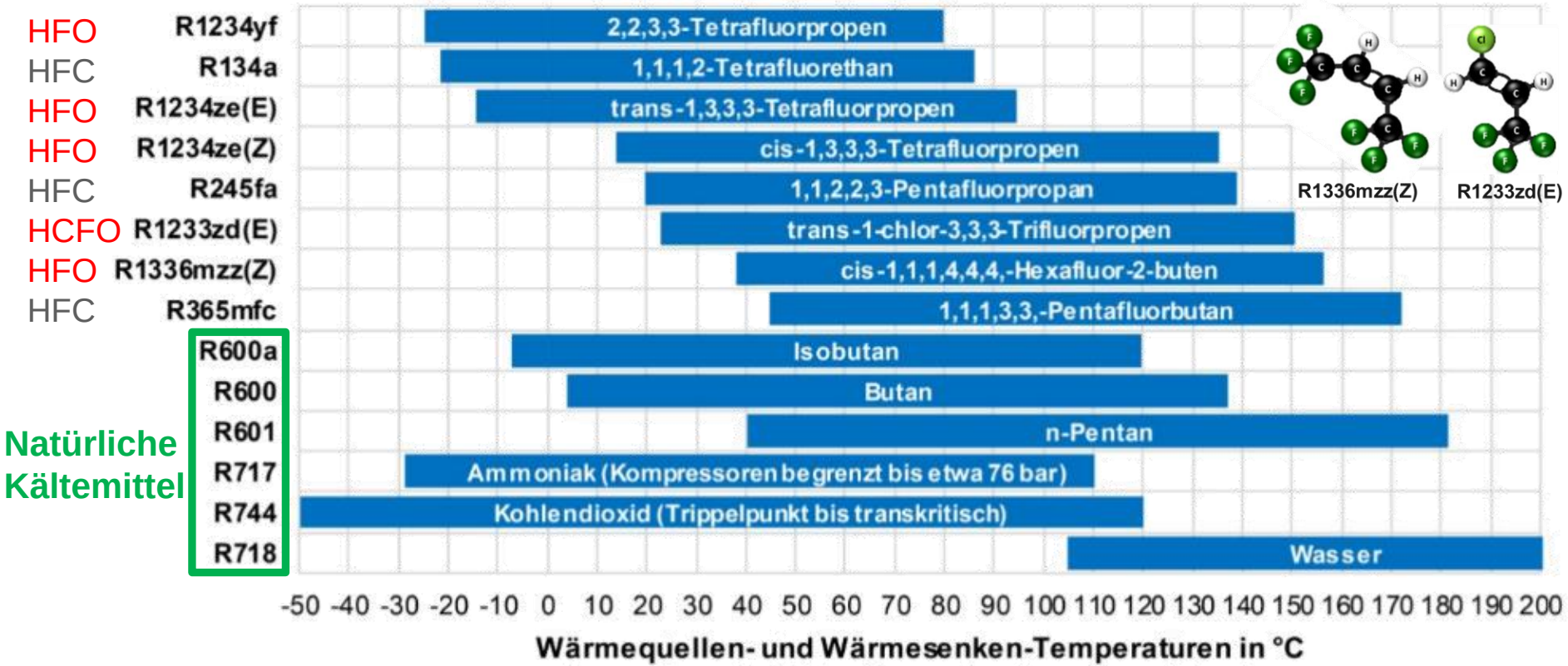
Kältemittel in Hochtemperatur-Wärmepumpen



R718 (Wasser)	12
R744 (CO2)	4
R717 (Amoniak)	4
R601 (n-Pentan)	1
R600 (n-Butan)	3
R290 (Propan)	1
R704 (Helium)	2
ecop (Edelgas)	1
R1336mzz(Z)	2
R1233zd(E)	3
R1234ze(E)	1
HFOs	2
R245fa	5
R410a	1
R134a	2
Natürliche	28
HFO	8
FKW	8

cordin.arpagaus@ost.ch

Einsatzbereiche von verschiedenen Kältemitteln für HTWP



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Vergleich verschiedener Kältemittel für Grosswärmepumpen

Kriterium	R717 (Ammoniak)	R744 (CO_2)	R718 (Wasser)	R600a (Isobutan)	R600 (Butan)	R601 (Pentan)	R1233zd(E) (HCFO)	R1336mzz(Z) (HFO)
Entflammbar	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Giftig	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Sicherheitsklasse	B2L	A1	A1	A3	A3	A3	A1	A1
TFA Bildung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja, ~2%	Ja, <20%
ODP	0	0	0	0	0	0	0.00034	0
GWP	0	1	0	3	4	5	1	2
Krit. Temp. (°C)	132.3	31.0	373.9	134.7	152.0	196.6	166.5	171.3
Krit. Druck (bar)	113.3	73.8	220.6	36.3	38.0	33.7	36.2	29.0
Siedepunkt (°C)	-33.3	-78.5	100.0	-11.8	-0.5	36.1	18.0	33.4

cordin.arpagaus@ost.ch

Fazit

- Wichtig bei der Kältemitteln Auswahl: thermodynamische Eignung, Umweltauswirkungen, Wirkungsgrad
- Steigende Anzahl Wärmepumpen Anlagen und Kältemittel Füllmenge in der Schweiz
- Starker Anstieg an natürlichen Kältemitteln, Trend zu Kohlenwasserstoffen
- F-Gase Schweiz: Revision Anhang 2.10 ChemRRV ab 2024
- Vorschlag für Regelung PFAS-Beschränkung in der EU: Ein Verbot zahlreicher Kältemittel (HFC, HCFO/HFO, etc.) hätte erhebliche Auswirkungen auf die Kälte- und Wärmepumpenbranche (Übergangsfristen und Konsultationsphase für Ausnahmen spezieller industrieller Anwendungen)
- Molare Ausbeute an TFA beim atmosphärischen Abbau hängt vom Kältemittel ab
- Zahlreiche Kompressionswärmepumpen von verschiedenen Herstellern am Markt erhältlich: Vorlauftemperaturen > 100°C, HTWP im Großmaßstab (MW Leistungsbereich)
- Aktueller Trend zu natürlichen Kältemitteln wie R600 (Butan), R601 (Pentan), R744 (CO_2), R718 (H_2O), R717 (NH_3) und synthetischen HFO / HCFO mit niedrigem GWP wie R1233zd(E), R1336mzz(Z), R1224yd(Z)

cordin.arpagaus@ost.ch

Dank für die Unterstützung

sweet swiss energy research for the energy transition

DeCarbCH

www.sweet-decarb.ch

Project: Annex 58 HTHP-CH
Integration of High-Temperature Heat Pumps (HTHPs) in Swiss Industrial Processes
(SI/502336-01)

Push2Heat
Pushing forward the market potential of heat upgrading technologies in the industrial sector

Funded by the European Union

Grant Agreement No. 101069689
https://push2heat.eu

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Federal Office of Energy SFOE

cordin.arpagaus@ost.ch

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

OST
Ostschweizer
Fachhochschule

IES INSTITUT FÜR ENERGIESYSTEME

Dr. Cordin Arpagaus

Ostschweizer Fachhochschule
Departement Technik
Institut für Energiesysteme IES

cordin.arpagaus@ost.ch
Tel. +41 58 257 34 94
www.ost.ch/ies