

Fachtagung „Natürliche Kältemittel – sicher und effizient anwenden“
Nürnberg – 12.11.2018

Hintergrund der F-Gase-Verordnung und adäquate kältetechnische Konzepte



Hintergrund der F-Gase-Verordnung

The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing

Guus J. M. Velders^{a,1}, David W. Fahey^b, John S. Daniel^b, Mack McFarland^c, and Stephen O. Andersen^d

^aNetherlands Environmental Assessment Agency, PO Box 303, 3720 AH Bilthoven, The Netherlands; ^bNational Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Boulder, CO 80505; ^cDuPont Fluoroproducts, Wilmington, DE 19805; and ^dU.S. Environmental Protection Agency, Code 6202, 1200 Pennsylvania Avenue NW, Washington, DC 20460

Edited by Mark H. Thieme, University of California at San Diego, La Jolla, CA, and approved May 14, 2009 (received for review March 13, 2009)

The consumption and emissions of hydrofluorocarbons (HFCs) are projected to increase substantially in the coming decades in response to regulation of ozone depleting gases under the Montreal Protocol. The projected increases result primarily from sustained growth in demand for refrigeration, air-conditioning (AC) and insulating foam products in developing countries assuming no new regulation of HFC consumption or emissions. New HFC scenarios are presented based on current hydrochlorofluorocarbon (HCFC) consumption in leading applications, patterns of replacements of HCFCs by HFCs in developed countries, and gross domestic product (GDP) growth. Global HFC emissions significantly exceed previous estimates after 2025 with developing country emissions as much as 800% greater than in developed countries in 2050. Global HFC emissions in 2050 are equivalent to 9–19% (CO₂-eq. basis) of projected global CO₂ emissions in business-as-usual scenarios and contribute a radiative forcing equivalent to that from 6–13 years of CO₂ emissions near 2050. This percentage increases to 28–45% compared with projected CO₂ emissions in a 450-ppm CO₂ stabilization scenario. In a hypothetical scenario based on a global cap followed by 4% annual reductions in consumption, HFC radiative forcing is shown to peak and begin to decline before 2050.

HFC consumption | radiative forcing | scenarios

Global production and use of chlorofluorocarbons (CFCs) and halons have decreased significantly as a result of the phaseout schedules of the 1987 Montreal Protocol and its subsequent amendments and adjustments (1). The use of HCFCs and HFCs have increased as replacements for CFCs and halons in developed (non-A5) and developing (A5) countries that are parties to the Protocol (1, 2). HCFCs are low-ozone-depletion-potential substitutes for high-ozone-depleting-potential substances, particularly CFCs and halons, and were classified under the Protocol as “transitional substitutes” during the time it took to commercialize new ozone-safe alternatives and replacements. Ultimately, HCFCs will be phased out globally under the Montreal Protocol leaving much of the application demand for refrigeration, AC, heating and thermal-insulating foam production to be met by HFCs (2). The demand for HCFCs and/or HFCs in many applications is expected to increase in both developed and developing countries, but especially in Asia, in the absence of regulations. HFCs do not deplete the ozone layer but, along with CFCs and HCFCs, are greenhouse gases that contribute to the radiative forcing (RF) of climate (2, 3). Thus, the transition away from ozone depleting substances (ODSs) has implications for future climate.

The technical, economic and environmental trade-offs of replacing CFCs and HCFCs with HFCs and hydrocarbons have been analyzed for refrigerators, chillers, and AC (4–6). Hydrocarbons, ammonia and CO₂, which generally have lower Global Warming Potentials (GWPs) than HFCs, have been found suitable for systems with small refrigerant charges where a refrigerant leak would not pose an unacceptable flammability or toxicity risk and for industrial systems with large refrigerant charges expertly managed for fire and toxicity risk. HFCs are the

preferred refrigerant in consumer products requiring a large charge, where hydrocarbon flammability is problematic (6). The use of HFCs is expected to be minor in many other applications because other low-GWP compounds and not-in-kind (i.e., non-halocarbon based) technologies are available. Overall, not-in-kind technologies are not expected to initially satisfy as large a fraction of future demand as was the case during the CFC phaseout (7).

Multiple scenarios of global HFC emissions are available from SRES (8) and IPCC/TEAP (2). These scenarios are now of limited use because of limited range of years (IPCC/TEAP) or outdated assumptions concerning the transition from HCFCs to HFCs (SRES). The SRES GWP-weighted emissions for refrigeration and AC are ≈20% below what we infer here from observed atmospheric mixing ratios for 2007 (*SI Text*). The 2007 HFC emissions for these applications from IPCC/TEAP (2) are somewhat higher, but this scenario ends in 2015. Others (9–11) have reported HFC scenarios similar to the SRES assumptions and do not consider a more detailed market development as discussed here.

We report new baseline scenarios for the consumption and emissions of HFCs to 2050 based only on existing policies. As in the SRES scenarios, the growth in demand for these compounds is based on GDP and population (8, 12). However, the new scenarios incorporate more recent information such as (i) rapid observed growth in demand, substantiated by atmospheric observations, for products and equipment using HCFCs and HFCs in developing countries (see *SI Text*); (ii) reported increases in consumption of HCFCs in developing countries; (iii) replacement patterns of HCFCs by HFCs as reported in developed countries; (iv) accelerated phaseout schedules of HCFCs in developed and developing countries, and; (v) increases in reported use of HFC-134a in mobile AC in developed and developing countries. The analysis results in significantly larger emissions in 2050 than could be expected based on previous projections.

Montreal Protocol regulation of HCFCs and other ODSs already has protected both ozone and climate (13, 14). HFCs are in the “basket of gases” regulated under the 1997 Kyoto Protocol (15), a global treaty to reduce developed-country emissions of greenhouse gases. We use the new emission scenarios and GWPs of HFCs to calculate their CO₂-equivalent emissions and RF contributions to global climate forcing. The results are compared with “business-as-usual” SRES CO₂ emissions and those required to stabilize CO₂ concentrations at 450 and 550 parts per

Author contributions: G.J.M.V., D.W.F., J.S.D., M.M., and S.O.A. designed research; G.J.M.V. performed research; G.J.M.V. analyzed data; and G.J.M.V., D.W.F., J.S.D., M.M., and S.O.A. wrote the paper.

The authors declare no conflict of interest.

This article is a PNAS Direct Submission.

Freely available online through the PNAS open access option.

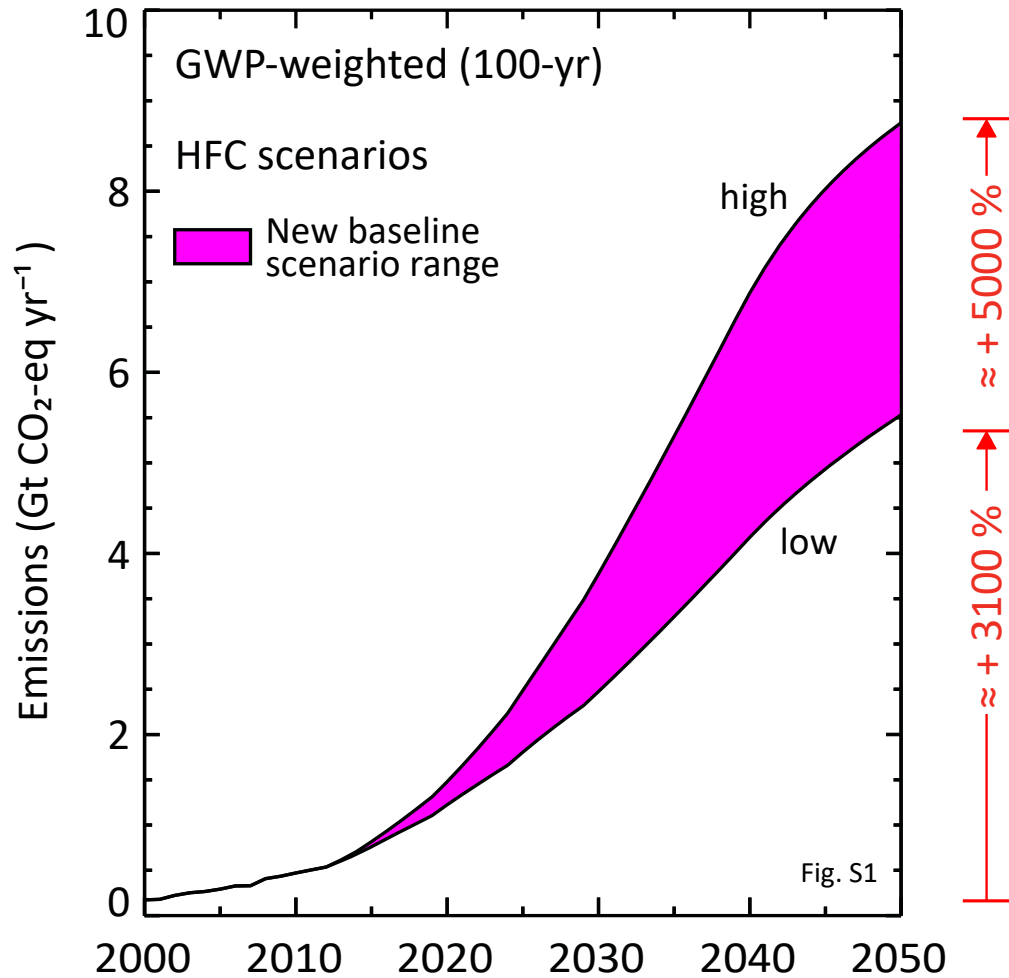
¹To whom correspondence should be addressed. E-mail: guus.velders@pbl.nl.

This article contains supporting information online at www.pnas.org/cgi/content/full/0902817106DCSupplemental.

„The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing“

“Der große Beitrag der projizierten HFKW-Emissionen zur zukünftigen Klimaveränderung“

Velders et al.; Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS), 2009



Ergebnis der Projektionen bis 2050

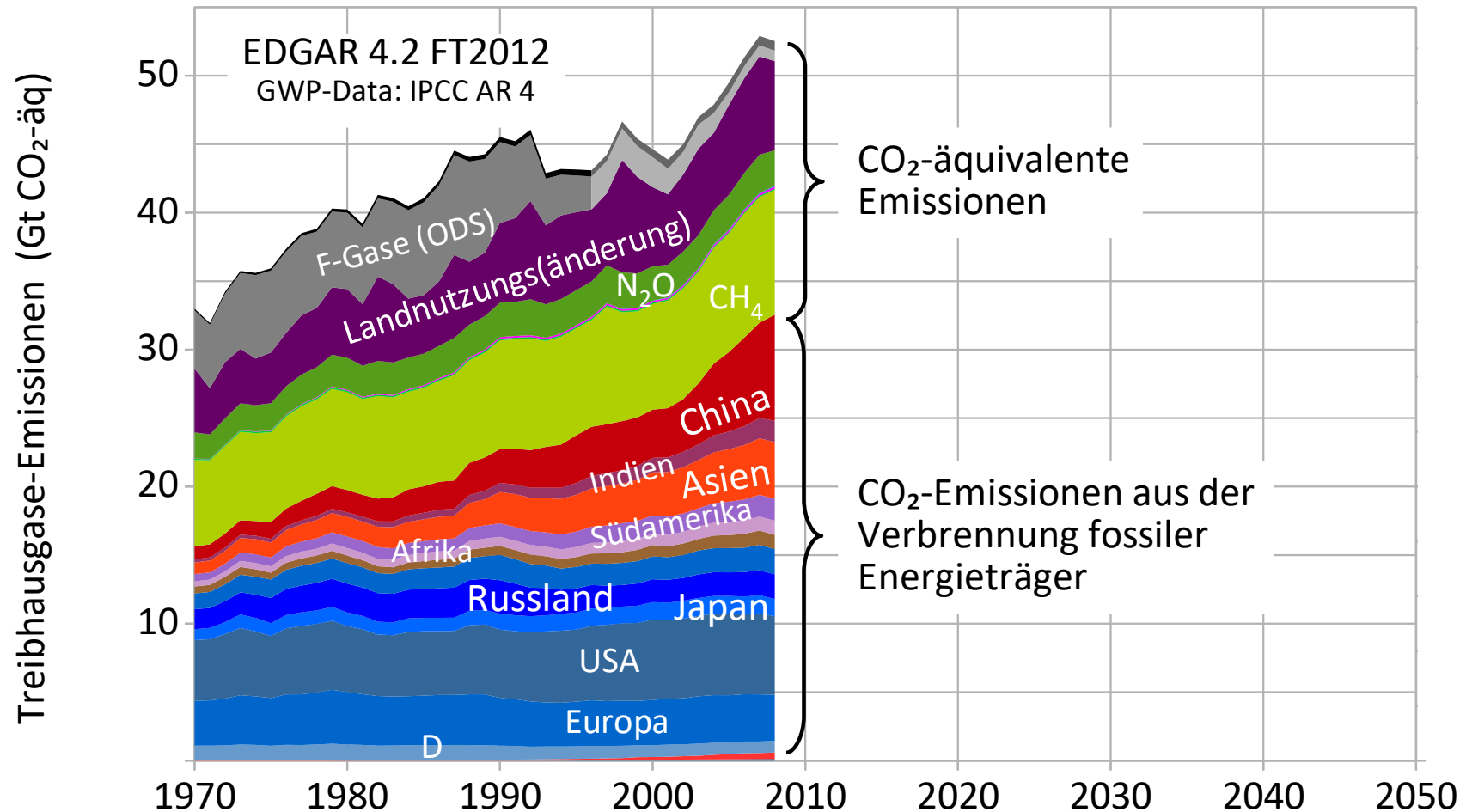
- Anstieg der CO₂-äquivalenten Emissionen um $\approx 3100 - 5000 \%$ (low, high)
- exponentieller Charakter bis ca. 2040
- danach Rückgang des Anstiegs

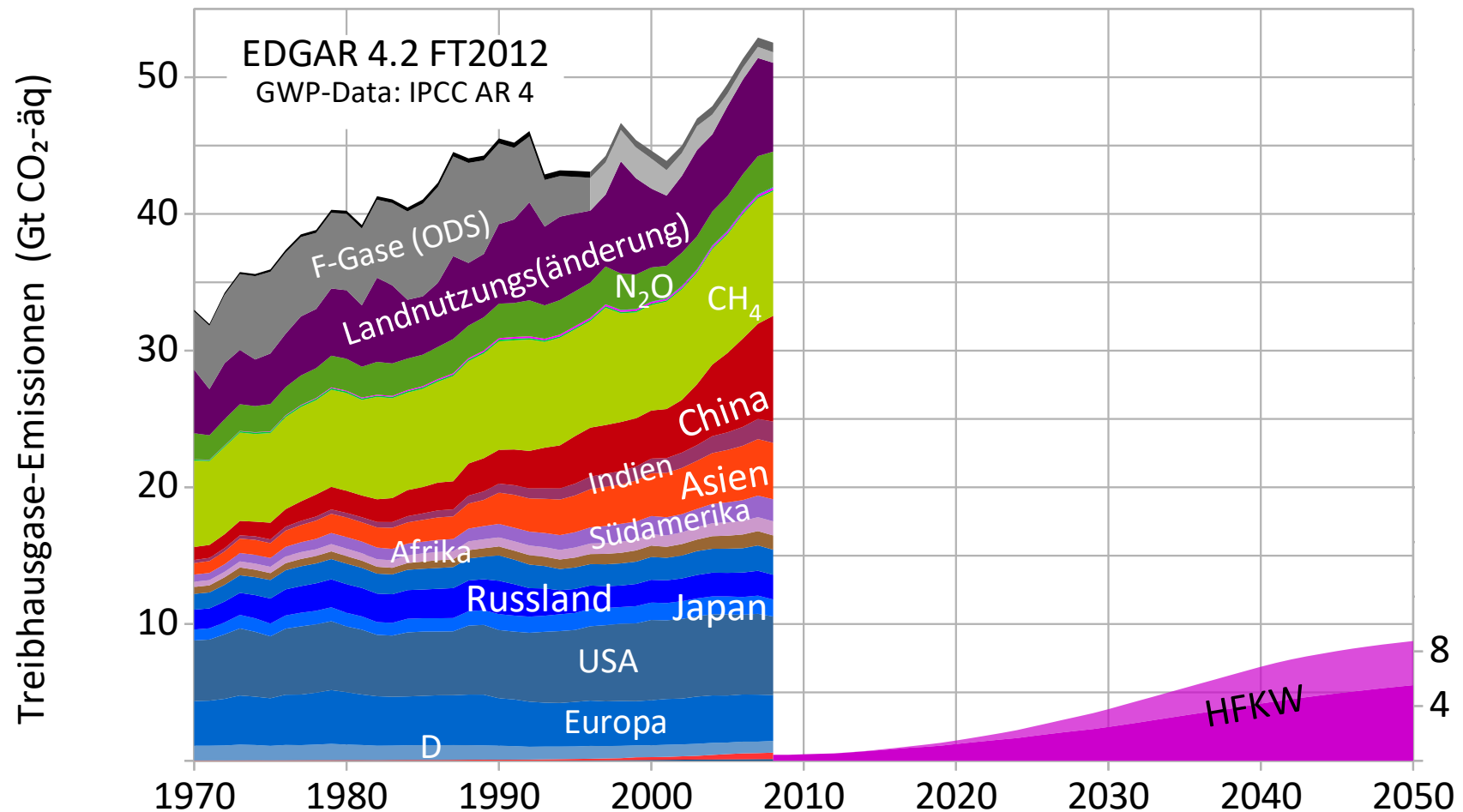
Emissionen anderer Treibhausgase?

- Vergleich auf Folgeseiten →

Globale Emissionen aller Treibhausgase bis 2008, JRC EU-Kommission

Emission Database for Global Atmospheric Research, F-Gase (Ozone Depleting Substances): UNEP





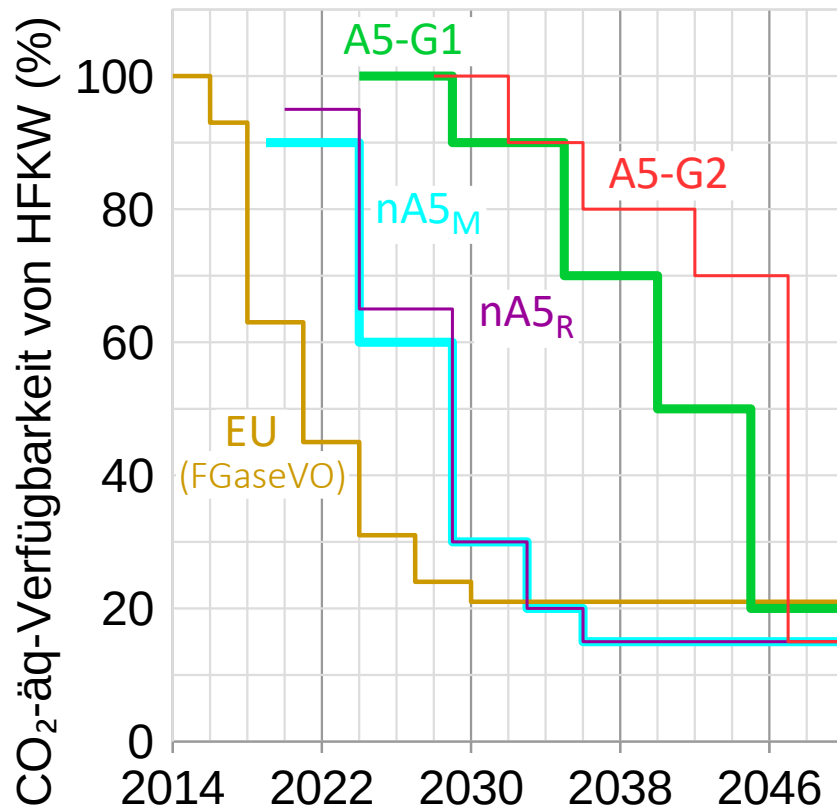
HFKW-Emissionen 2050 (Kälte- und Klimatechnik, Treibmittel für Schäume)

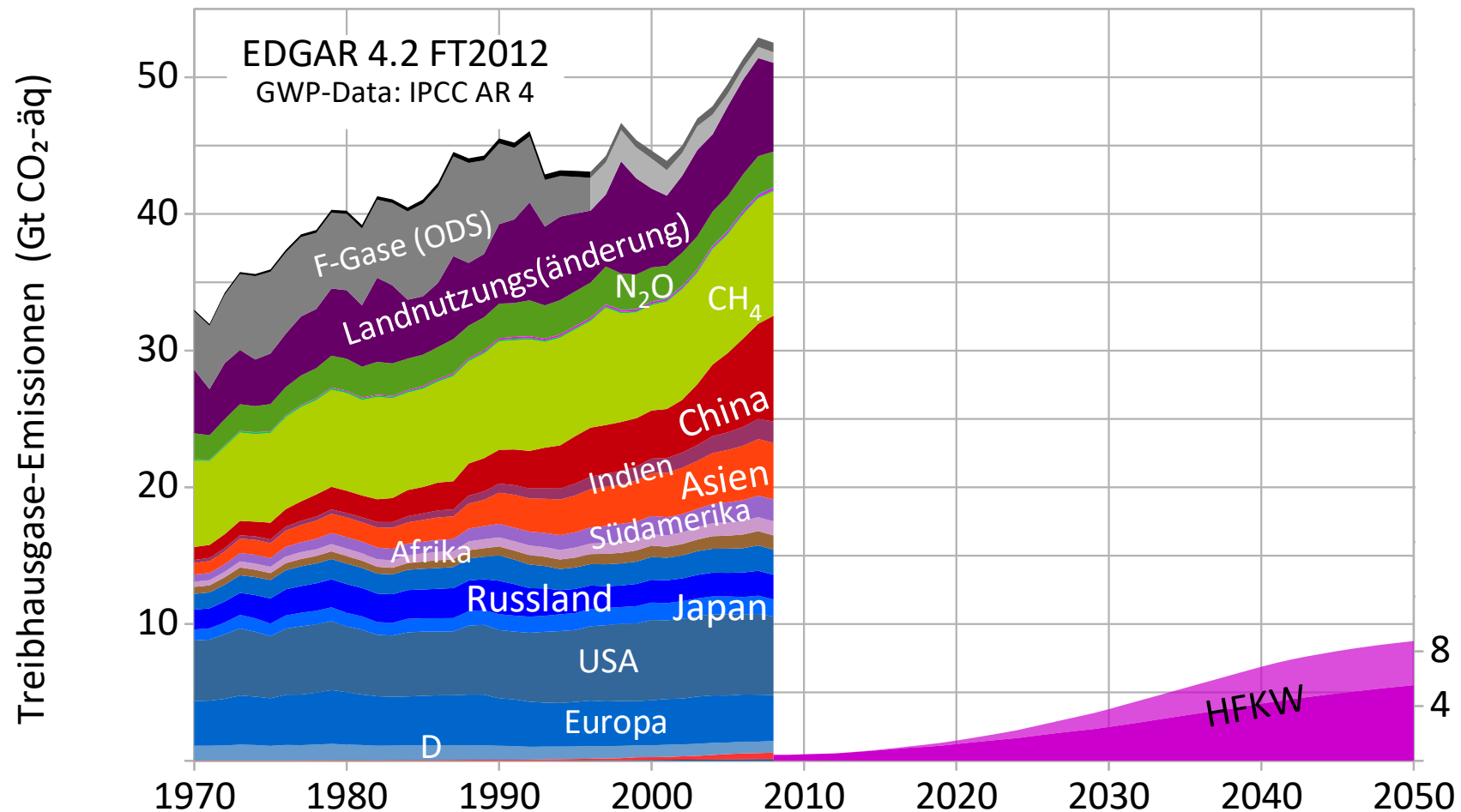
- Größenordnung von Methan (CH₄), Europa oder China, also: zusätzlicher Treibhauseffekt
- Forderung des UNEP: Globale „Regulierung“ der HFKW-Emissionen

Rückgang der Marktverfügbarkeit halogenierter Kältemittel von 2015 – 2047

für die EU sowie die Artikel-5- und Nicht-Artikel-5-Staaten des Montreal-Protokolls

- **EU:** alle Staaten (England?)
EU (FGaseVO)
- **Artikel-5-Gruppe 2:** Bahrain, Indien, Iran, Kuwait, Oman, Pakistan, Katar, Saudi Arabien, Vereinigte Arabische Emirate
A5-G2
- **Artikel-5-Gruppe 1:** alle anderen Entwicklungsländer
A5-G1
- **Non-Artikel-5_{Rest}:** Weißrussland, Russland, Kasachstan, Tadschikistan, Usbekistan
nA5_R
- **Non-Artikel-5_{Main}:** alle anderen UN-Staaten (ohne EU)
nA5_M





HFKW-Emissionen 2008

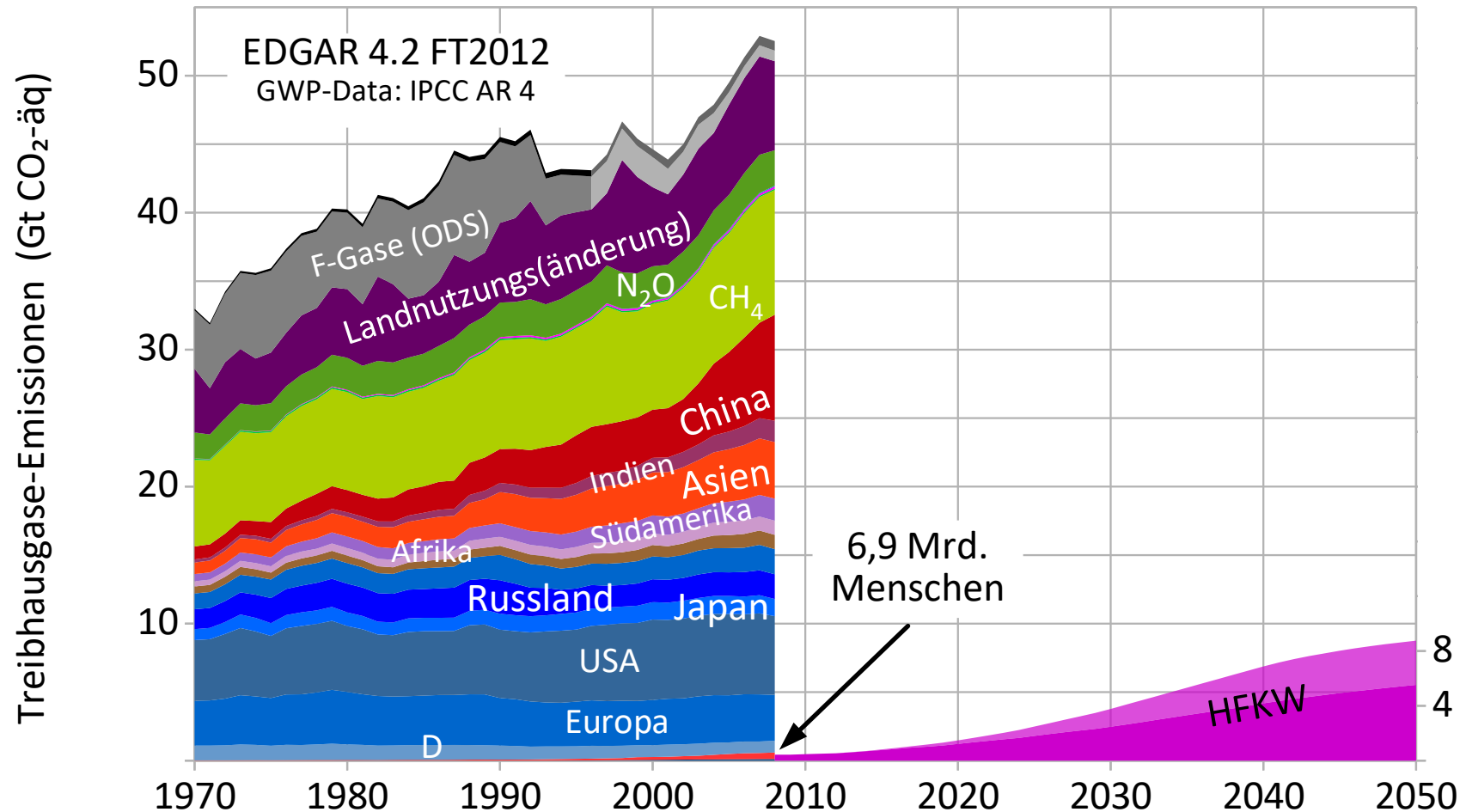
- kein exorbitantes Wachstum, ungefähr stationäre Verhältnisse in globaler Kälte- und Klimatechnik
- Emissionen werden verursacht von einer Weltbevölkerung von ca. 6,9 Mrd. Menschen

Globale Emissionen aller Treibhausgase + Projektion HFKW-Emissionen

EDGAR; UNEP; Velders

9

12.11.2018



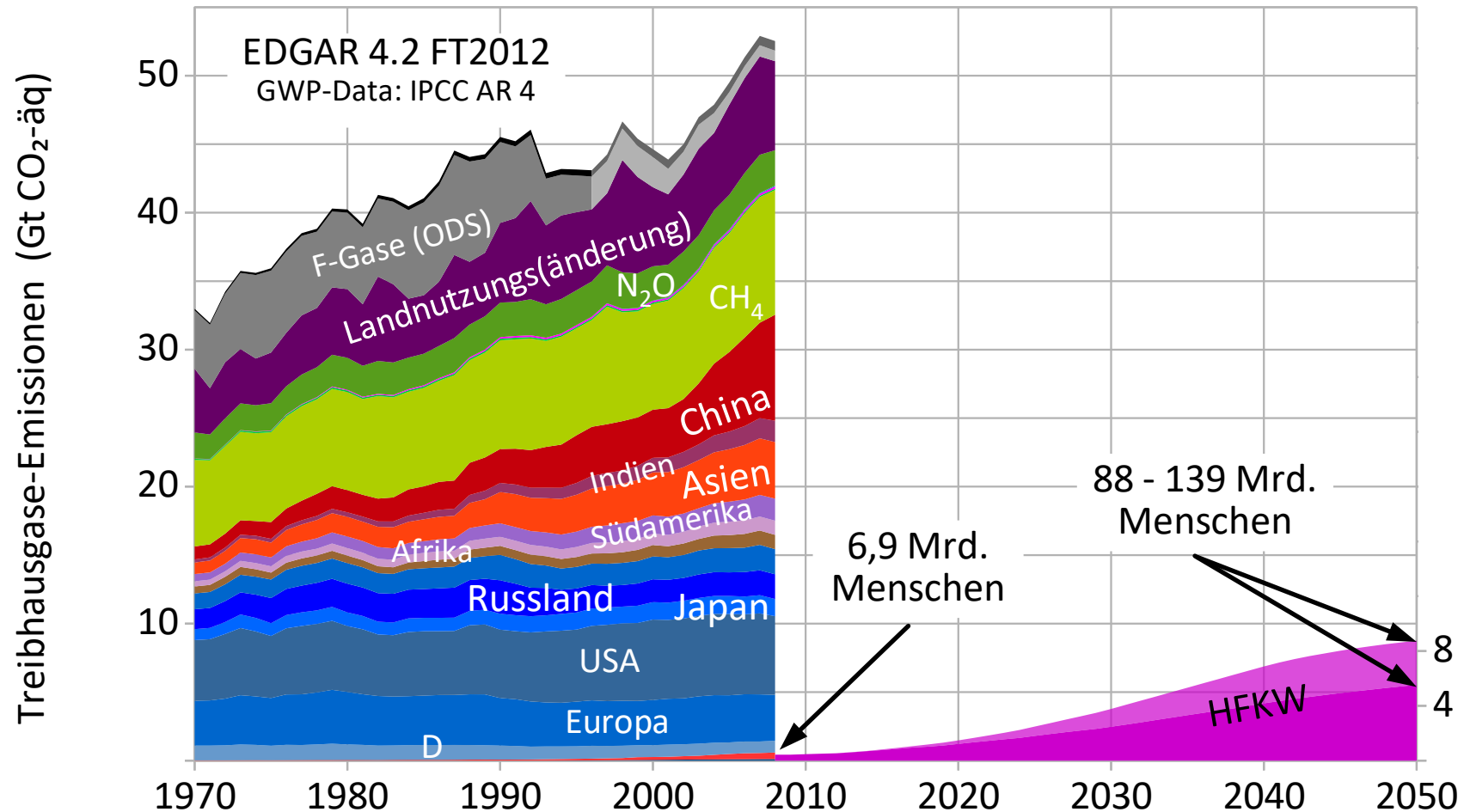
- **Annahme:** Pro-Kopf-Emissionen von HFKW bleiben ungefähr konstant
- **Frage:** Welche Weltbevölkerung würde 2050 Emissionen in Höhe von 5,5 – 8,8 Gt CO₂-äq verursachen?

Globale Emissionen aller Treibhausgase + Projektion HFKW-Emissionen

EDGAR; UNEP; Velders

10

12.11.2018



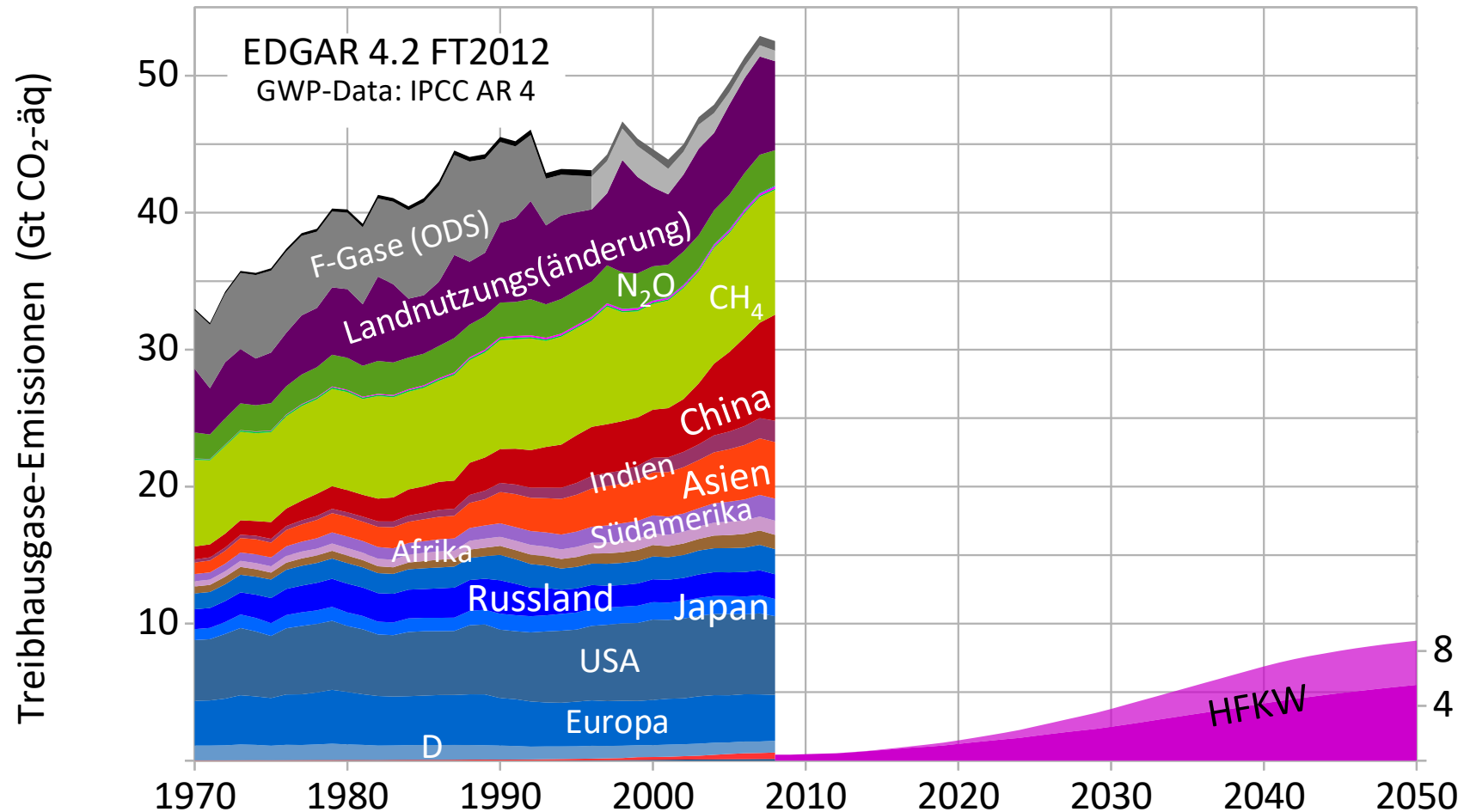
- **Antwort:** Es müsste in etwas über 40 Jahren eine *wahre* Bevölkerungsexplosion stattfinden
- ... aber das ist eher unwahrscheinlich!

Globale Emissionen aller Treibhausgase + Projektion HFKW-Emissionen

EDGAR; UNEP; Velders

11

12.11.2018



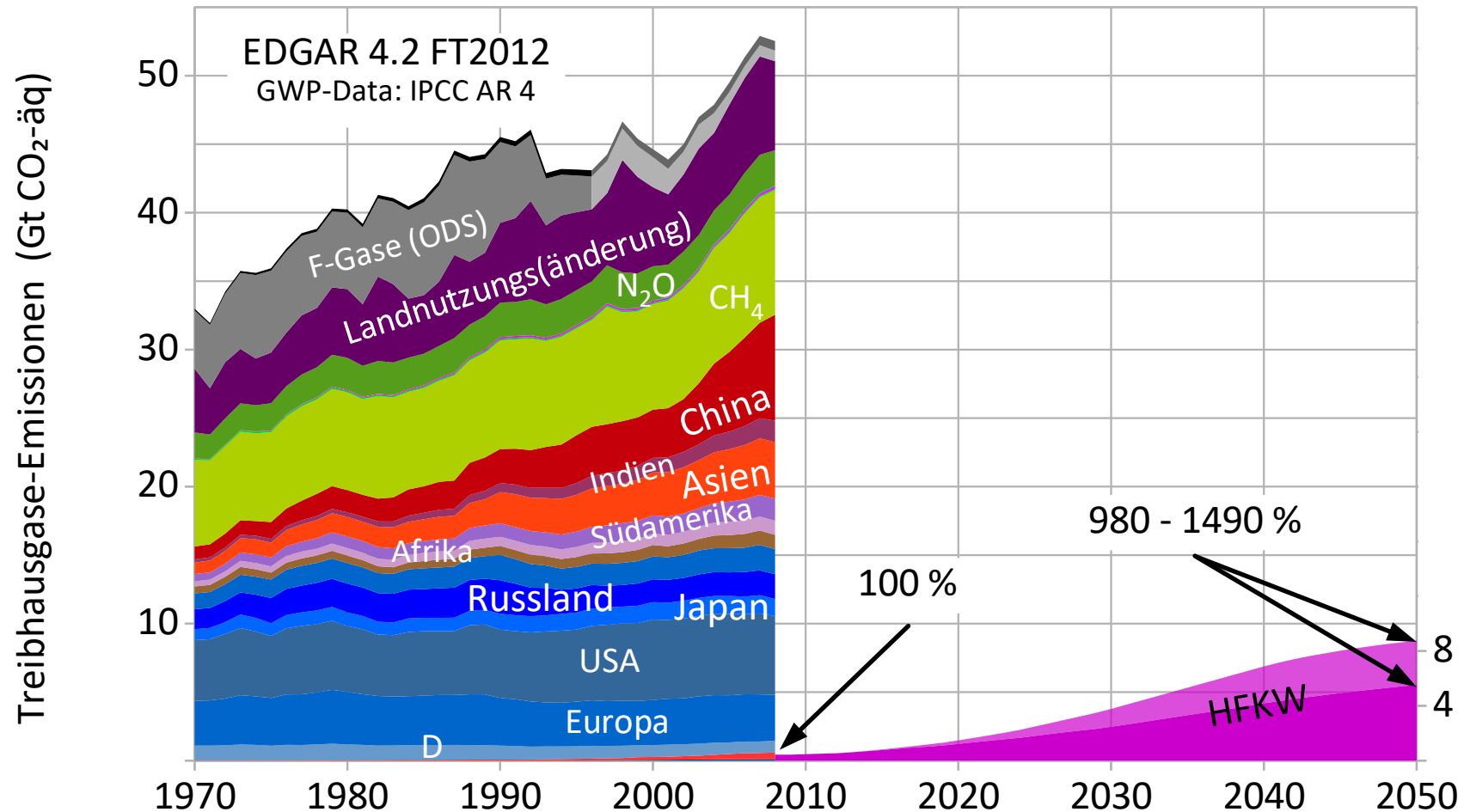
- **andere Annahme:** Die Weltbevölkerung steigt bis 2050 auf 10 Mrd. Menschen
- **andere Frage:** Wie verändern sich dann die Pro-Kopf-HFKW-Emissionen gemäß der Projektion?

Globale Emissionen aller Treibhausgase + Projektion HFKW-Emissionen

EDGAR; UNEP; Velders

12

12.11.2018



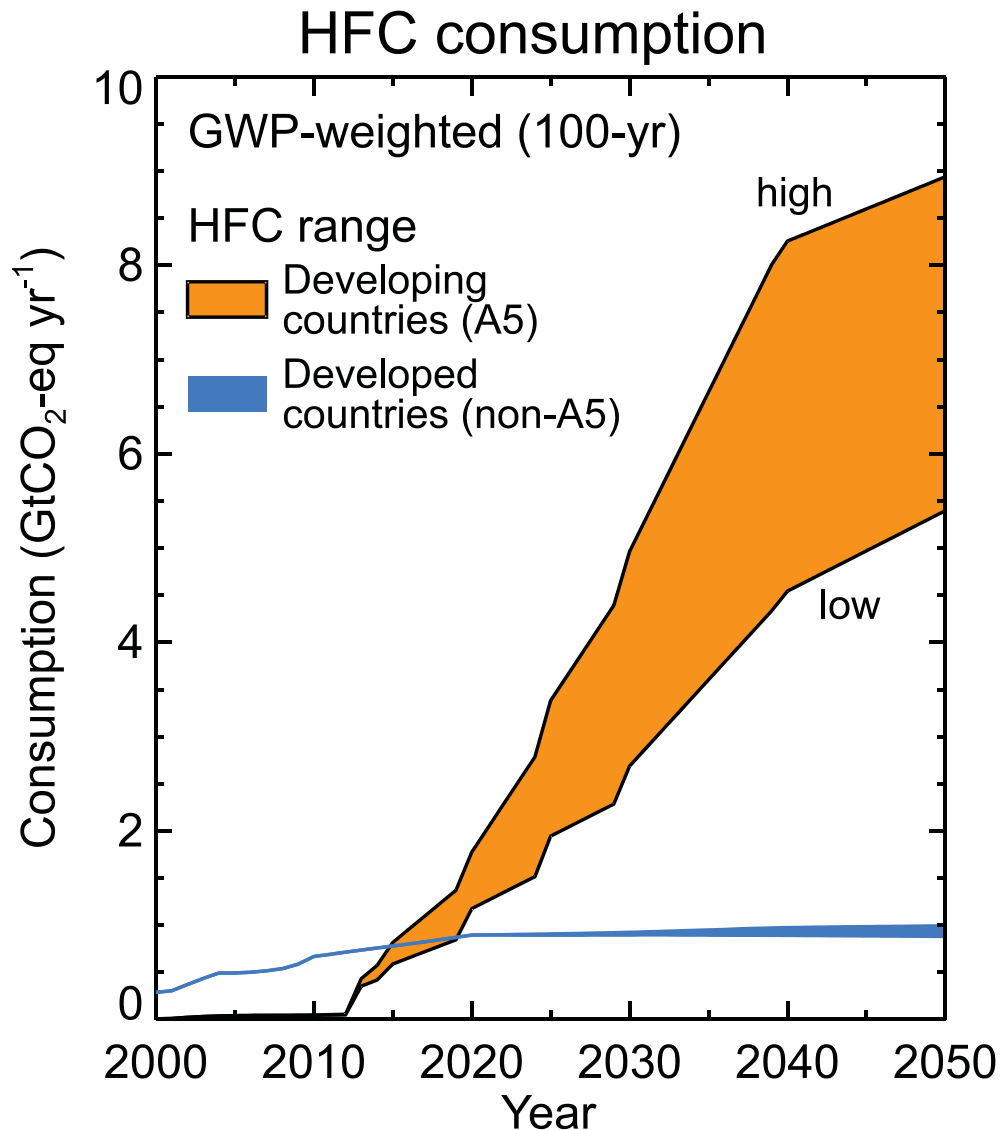
- **Ähnliche Antwort:** Die HFKW-Pro-Kopf-Emissionen müssten sich verzehn- bis verfünzfach!
- ... auch das ist mehr als unwahrscheinlich!

Projektion von *Velders* bis 2050: nicht belastbar!

- Wo liegt der Fehler?

Möglicher Weg zu einer Antwort

- HFKW-Emissionen resultieren aus vorherigem HFKW-Verbrauch (Verwendung!)
- → Analyse des HFKW-Verbrauchs in der *Velders*-Veröffentlichung



Entwickelte Länder (non-A5)

- geringer Verwendungsanstieg bis 2050
- (hier: keine weitere Betrachtung)

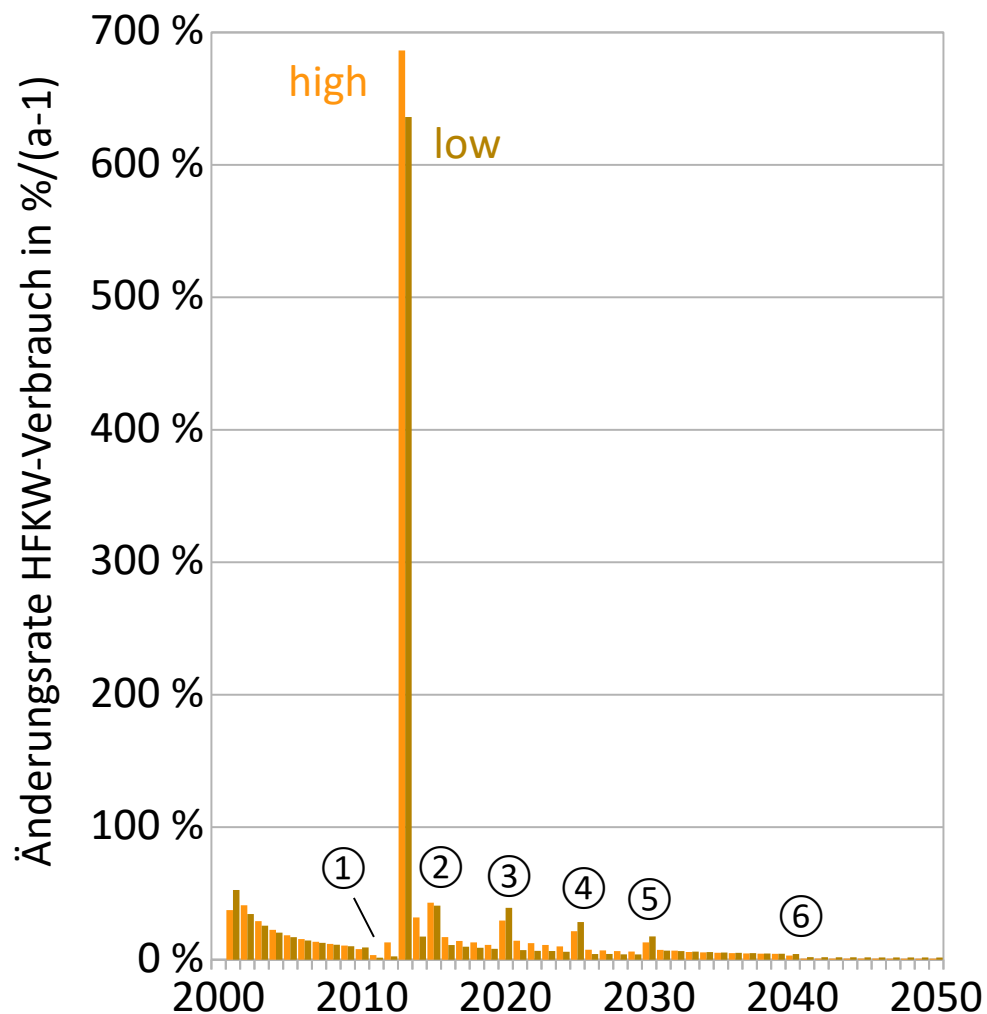
Entwicklungsländer (A5)

- Anstieg auf < 5,5 Gt CO₂-äq (low)
- Anstieg auf < 9 Gt CO₂-äq (high)
- auffällig: Steigungsänderungen
 - low, high: 2020, 2025, 2030, 2040
 - (mathematische Modelle erzeugen keine sprunghaften Steigungsänderungen)
- → Analyse der Steigungsänderungen

(ermöglicht durch veröffentlichte Vektor-Datei, die ein Auslesen der exakten Daten und damit eine exakte Berechnung der Änderungsraten ermöglicht)

„The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing“

2009, Velders et al., Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)



Änderungsraten des HFKW-Verbrauchs

(Velders: 95 – 99 % des Verbrauchs als Kältemittel)

Extremwerte 2012 auf 2013

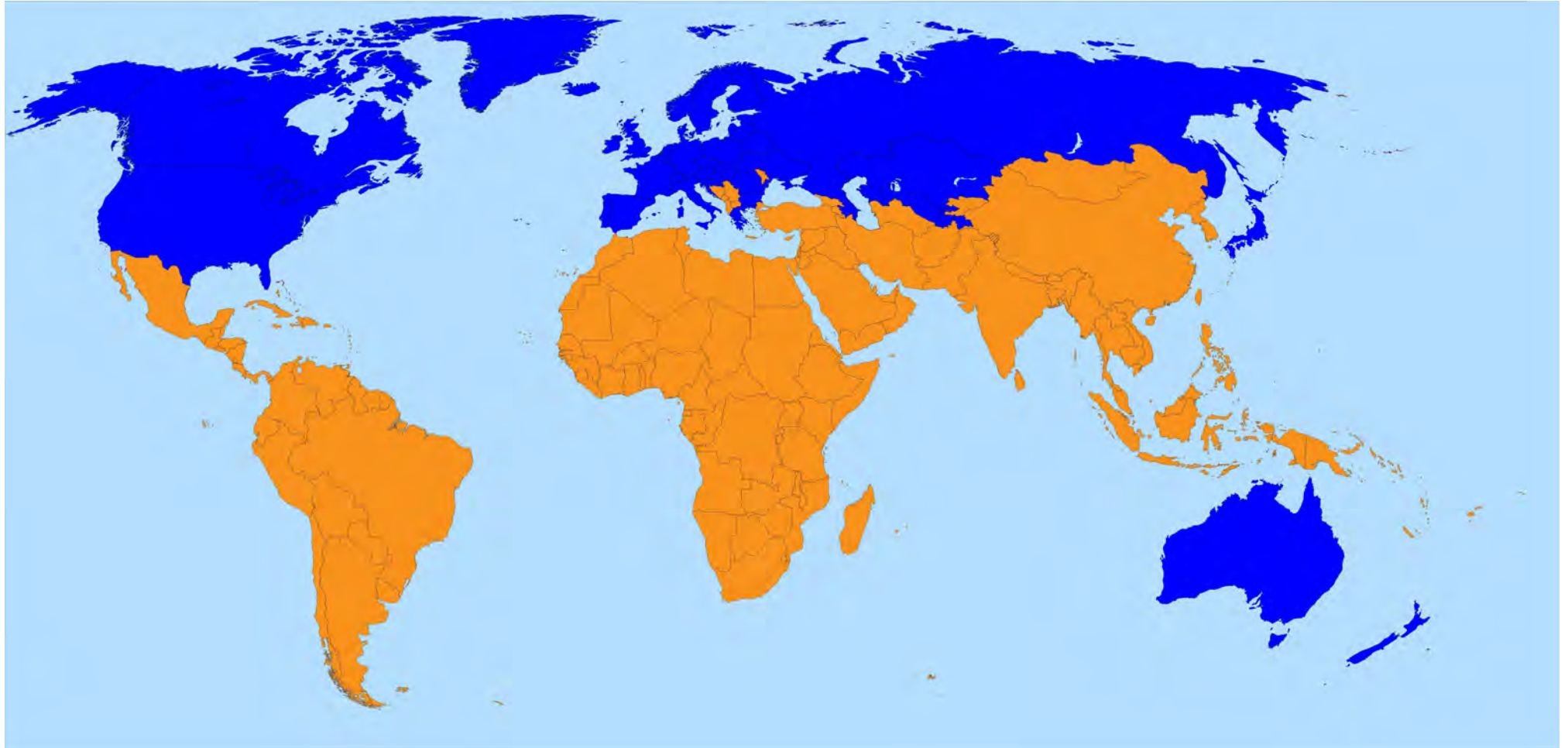
- 636 % (low)
- 686 % (high)

Zwischenmaxima

- ② – ⑤ = 43 – 13 %

Projektion für 147 Entwicklungsländer →

**50 entwickelte Länder mit 1,3 Mrd. Einwohnern,
147 Entwicklungsländer mit 6 Mrd. Einwohnern, 2013**



Projektion des HFKW-Verbrauchs 2012 auf 2013

- Steigerung auf 636 – 686 %
- Was ist dafür erforderlich?

Kältemittel

- sprunghafte Steigerung der Produktionsmenge und der dazugehörigen Transportbehälter

Kältetechnik

- Produktion von Verdichtern, Verflüssigern, Verdampfern, Expansionsventilen, Kältemittelleitungen, Regelungstechnik, Gehäuse, Gestelle, Schaltschränke
- Export in Entwicklungsländer
- Verkauf durch geschultes Personal
- Installation durch geschultes Personal
- ...

Elektroenergieversorgung

- Ausbau von Kraftwerkskapazitäten
- Ausbau elektrischer Netze

Finanzierung

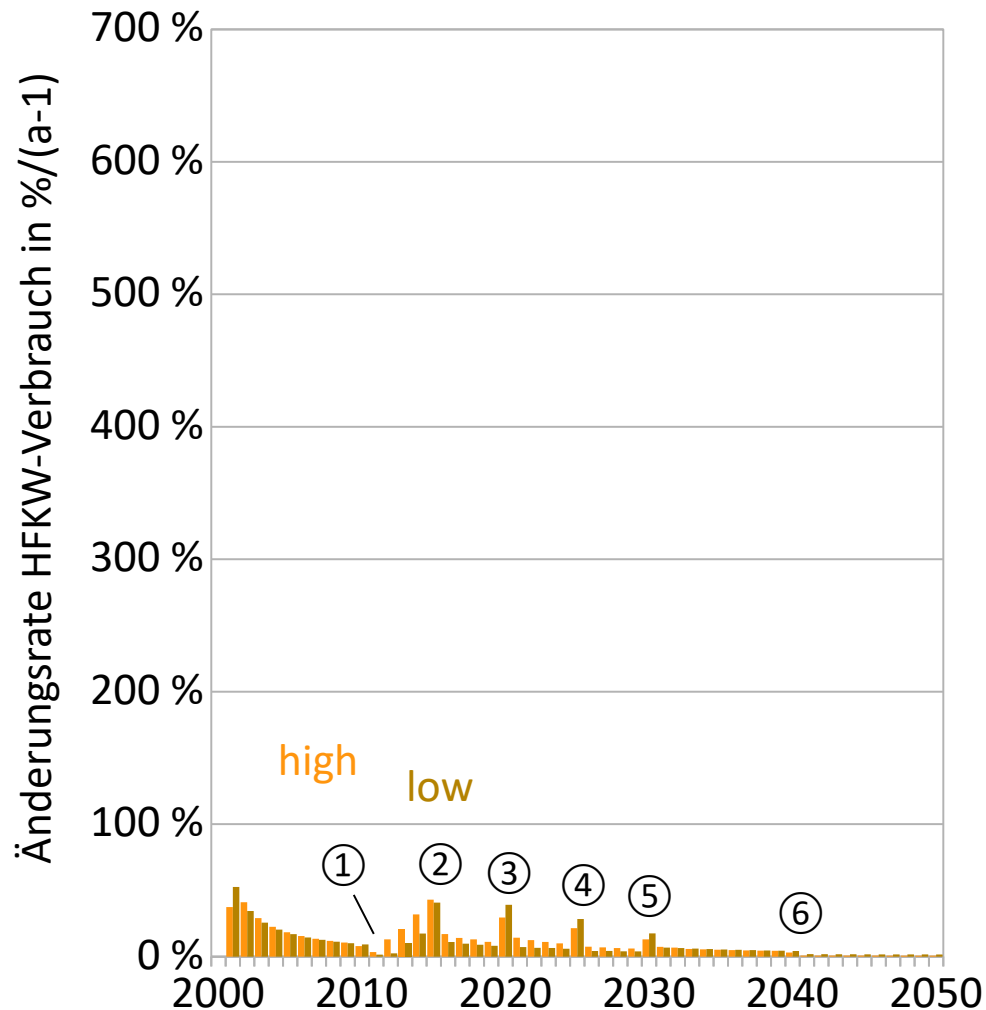
- Kältemittel
- Kältetechnik
- Elektroenergieversorgung

Resümee für 147 Entwicklungsländer

- der HFKW-Verbrauch kann nicht innerhalb eines Jahres auf über 600 % gesteigert werden
- selbst Steigerungsraten von deutlich über 10 % von 147 Ländern sind unwahrscheinlich

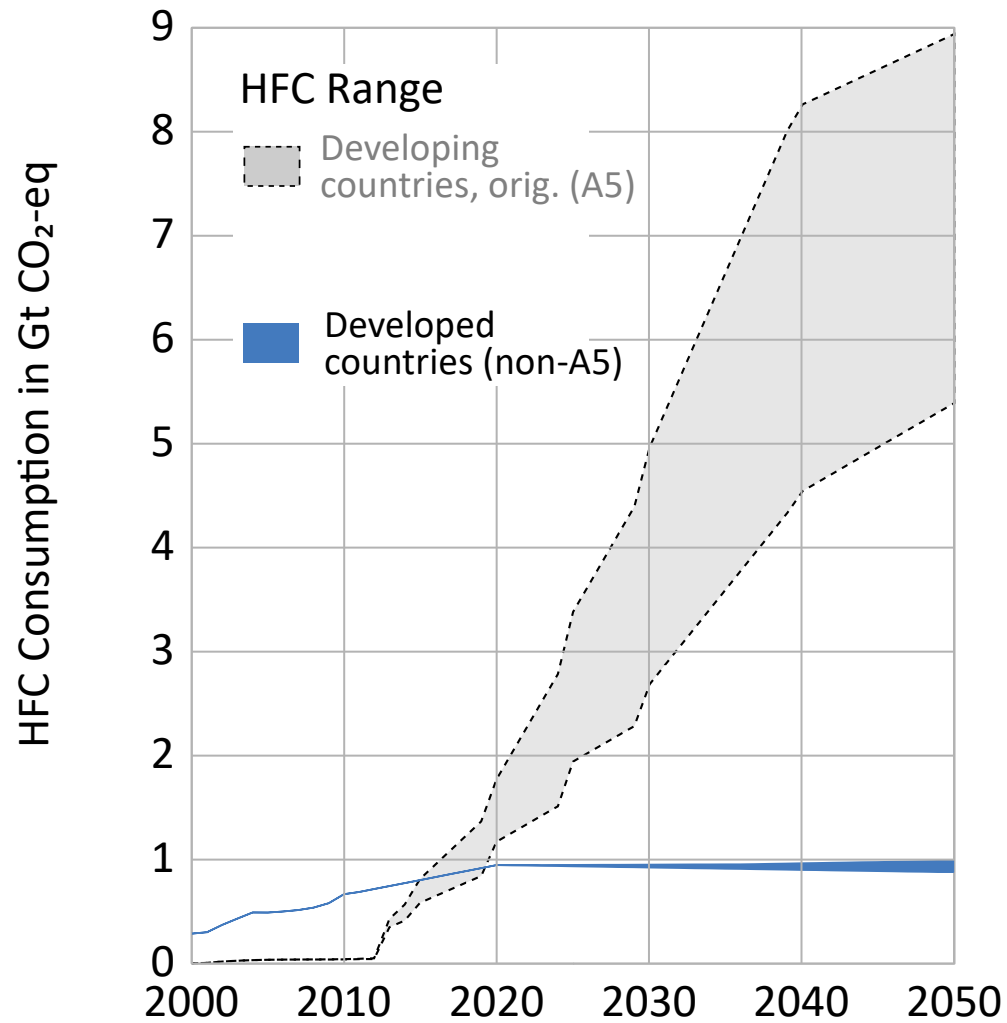
Konsequenz

- Neuberechnung des Verbrauchs mit geänderter Steigerungsrate → Folgeseiten



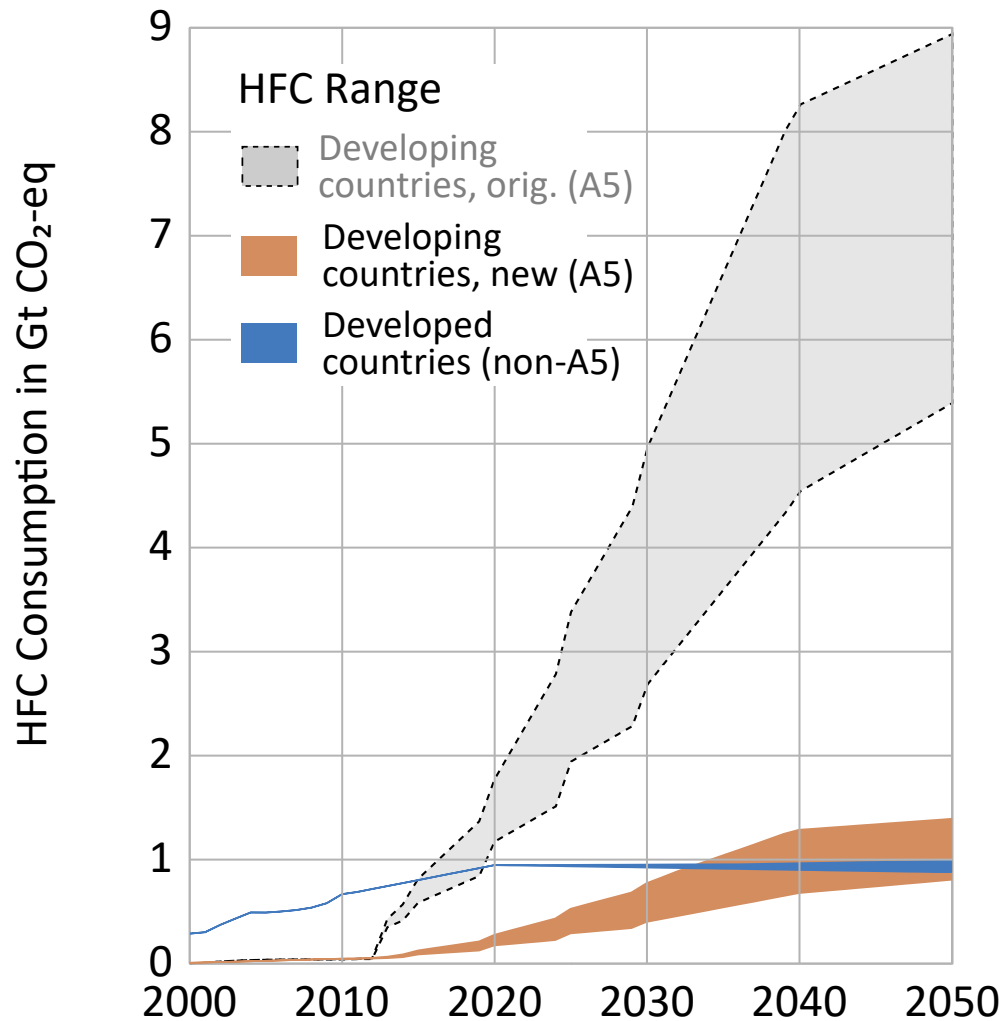
Randbedingungen für Neuberechnung

- 2012 auf 2013: Mittelwerte der vorherigen und der folgenden Steigerungsrate
- alle anderen Steigerungsraten: übernommen (wie unplausibel sie auch sind)



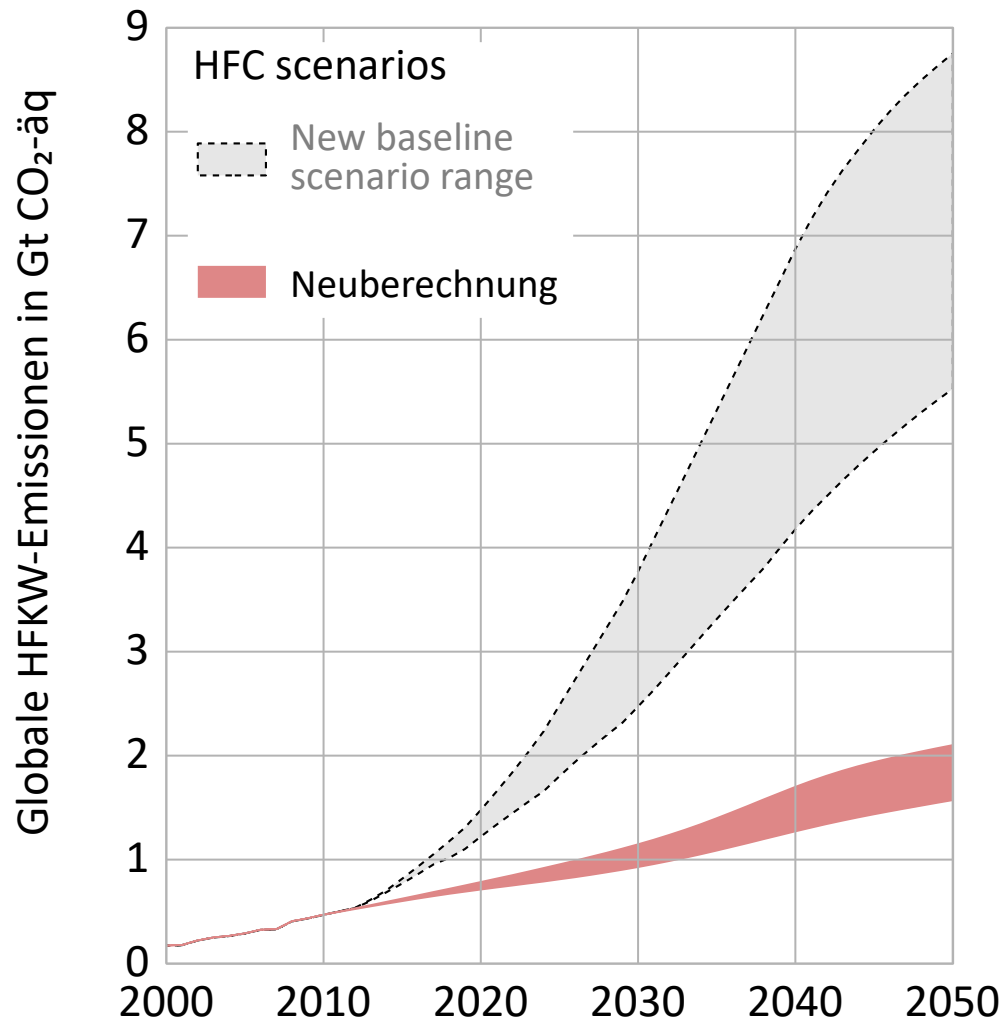
Verbrauchs-Projektion

- mit ursprünglichen Steigungsraten



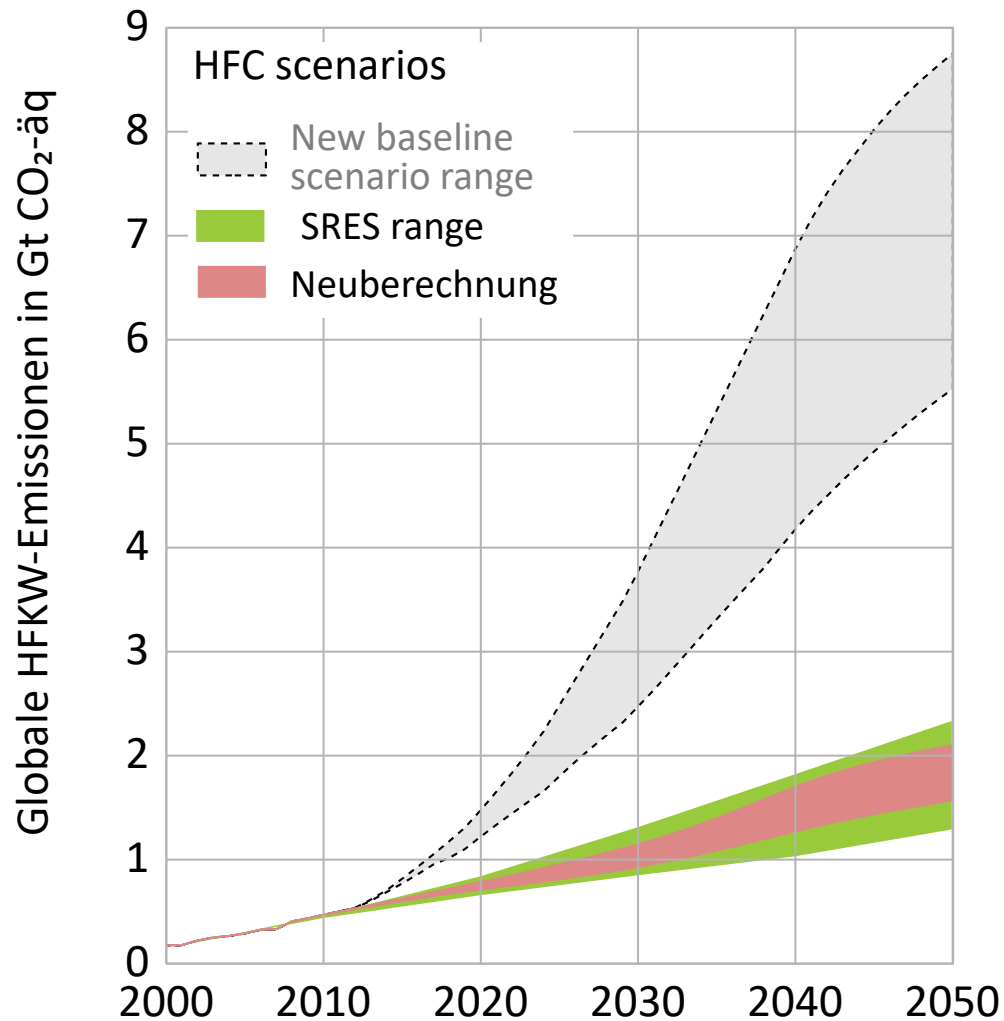
Verbrauchs-Projektion

- mit ursprünglicher Steigungsrate 2012/2013
- mit geänderter Steigungsrate 2012/2013
- Verringerung des Verbrauchs um 84 – 85 %
- Wie verändern sich dann die Emissionen? →



Emissions-Projektion

- Rückgang der Emissionen um 62 – 69 %



Emissions-Projektion

- Rückgang der Emissionen um 62 – 69 %
- Neuberechnung liegt noch innerhalb der Bandbreite einer vorherigen Projektion: Special Report Emission Scenarios (SRES)
- Dieser Report hatte keine Regulierungsmaßnahmen zur Folge

Erkenntnisse zum „**großen** Beitrag der projizierten HFKW-Emissionen zur zukünftigen Klimaveränderung“

Beitrag

- kann bei Überprüfung die reklamierte Größe nicht erreichen
- er beruht auf **einer** Steigerungsrate 2012 – 2013, die unter realwirtschaftlichen Bedingungen unmöglich ist

F-Gase-Verordnung und Kigali-Amendment sind aber ratifiziert

- die betroffenen Branchen müssen damit umgehen

DKV aktuell extra

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.

Nr. 1-2017



The Kigali Amendment to the Montreal
Protocol: HFC Phase-down



Die Staatengemeinschaft hat sich im Oktober 2016 in Kigali (Ruanda) auf einen schrittweisen, globalen Ausstieg aus der Verwendung der treibhauswirksamen HFKW geeinigt, die u. a. als Kältemittel eingesetzt werden.

Pressemeldungen dazu:

- „Der größte Klima-Durchbruch seit Paris“
www.unep.org
- „Damit erhalten wir die Möglichkeit, die Erderwärmung um ein halbes Grad Celsius zu verringern.“
US-Außenminister John Kerry, zitiert nach
www.zeit.de/politik/2016-10/weltgemeinschaft-treibhausgase-abkommen

DKV e.V.
T. 0511-8970814

Postfach 0420
E. info@dkv.org

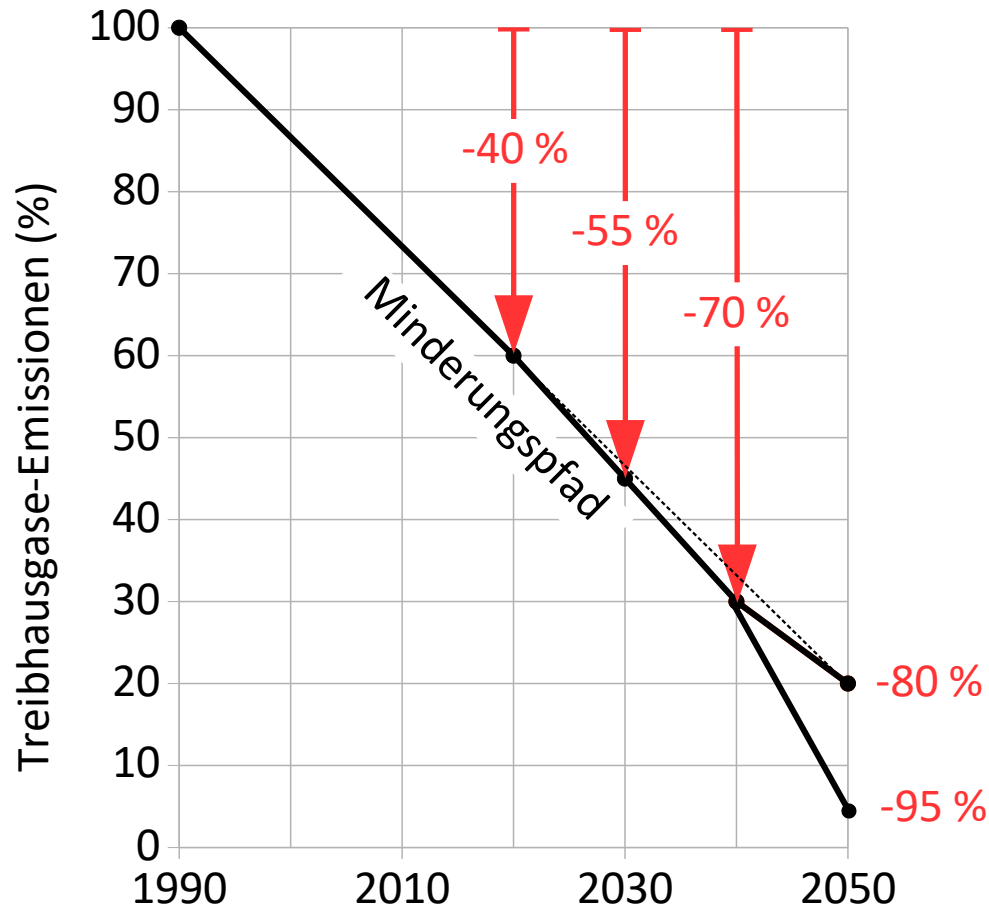
30004 Hannover
H. www.dkv.org

DKV akutell extra 2017

- Auf Anfrage per E-Mail: info@dkv.org
- Argumentum ad nauseam:
„Mit dem HFKW-Ausstieg erhalten wir die Möglichkeit, die Erderwärmung um ein halbes Grad zu verringern“
 - John Kerry, damaliger US-Außenminister
 - Barbara Hendriks, damalige Bundesumweltministerin

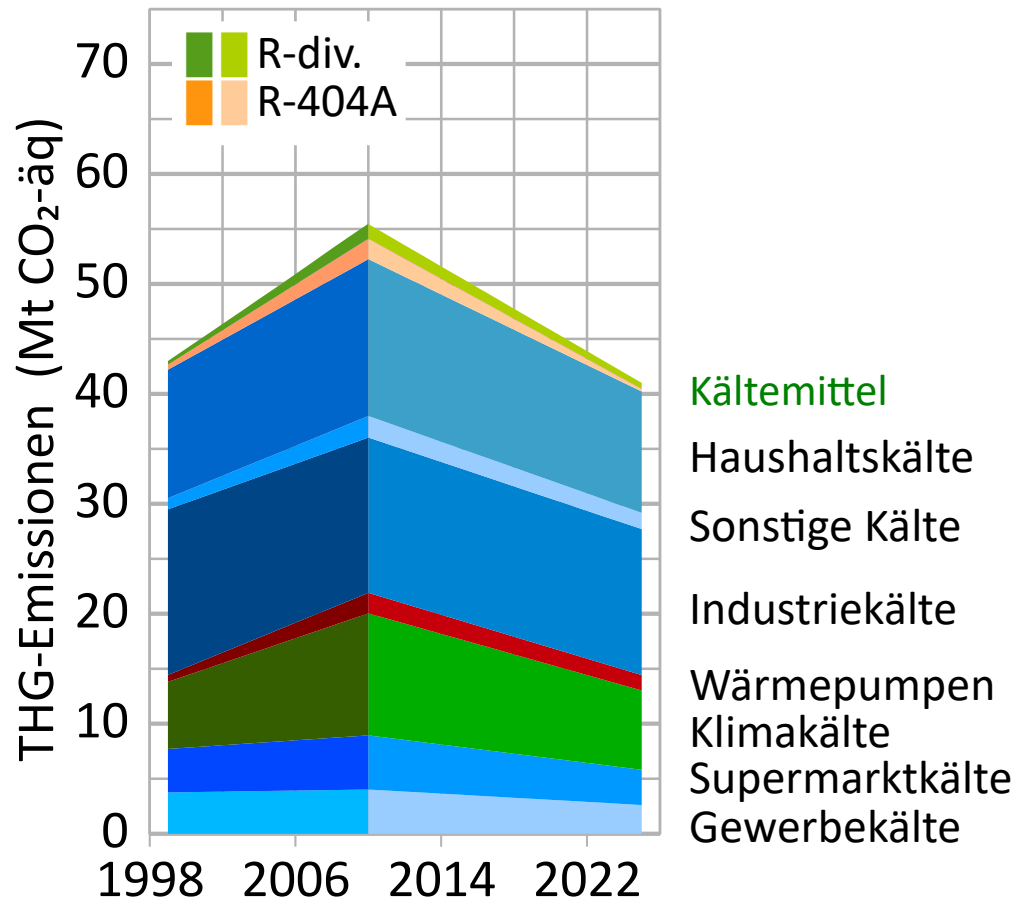
Kältetechnische Konzepte

nach F-Gase-Verordnung und Kigali-Amendment



Minderungspfad wird eingehalten

- wenn er von allen Emissions-Sektoren eingehalten wird,
- auch von der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik
- Wie hoch sind die Potenziale? →



Projektion „Minderungsoptimum“

- kein Anstieg des Kältebedarfs
- Ausschöpfung aller Effizienz-Potenziale
- Ausschöpfung aller Suffizienz-Potenziale
- HFKW-Phase-Down

Ergebnis

- Rückgang der Emissionen um ca. 26 %
- Emissionsminderungsziele können unter keinen Umständen erreicht werden, wenn nur der Nutzen „Kälte“ betrachtet wird

Stoffgruppen

HKFW fluorierte Kohlen- wasserstoffe Höchstdruck-KäM HFKW/HFO-Gemische	HFO HydroFluoroOlefine HFO/HFKW-Gemische	Kohlen- wasserstoffe	anorganische Kältemittel Gemisch
--	---	---------------------------------	--

Stoffgruppen

HKFW fluorierte Kohlen- wasserstoffe Höchstdruck-KäM HFKW/HFO-Gemische	HFO HydroFluoroOlefine HFO/HFKW-Gemische	Kohlen- wasserstoffe	anorganische Kältemittel Gemisch
--	---	---------------------------------	--

Sicherheitsklassen

A1 geringe Giftigkeit, keine Flammenausbreitung	A2L geringe Giftigkeit, schwer entzündlich	A3 geringe Giftigkeit, hohe Brennbarkeit	B2L erhöhte Giftigkeit, schwer entzündlich
--	---	---	---

F-Gase-Verordnung bewirkt

- erzwungenen Ausstieg aus den HFKW-Sicherheitskältemitteln
- Verwendung brennbarer, giftiger oder Höchstdruck-Kältemittel oder HFO

Position des Umweltbundesamtes

- vollständiger Zerfall von R-1234yf in der Atmosphäre innerhalb weniger Tage zur wassergefährdenden, persistenten Trifluoressigsäure (TFA)
- diese gelangt mit den Niederschlägen in den Boden und die Gewässer
- **schon heute: in Deutschland Trinkwasser mit TFA-Gehalten nahe oder über den 'gesundheitlichen Orientierungswerten' ***
- aus Wasser ist TFA durch die üblichen Reinigungsverfahren nicht entfernbar
- Einträge von TFA in die Umwelt müssen daher unbedingt vermieden werden
- durch den Einsatz halogenfreier Kältemittel kann der TFA-Eintrag vermieden werden

* In der Liste der vom UBA 2018 nach GOW bewerteten Stoffe ist Trifluoressigsäure *nicht* enthalten!

Position der EMPA – 2016

(Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Schweiz); „Environmental Impacts of the Refrigerant R-1234yf“, Stephan Henne

- im Regenwasser: erwartete TFA-Konzentrationen werden in HFO-Quellbereichen ansteigen aber keine Erwartungen, dass die Konzentrationen nachweislich schädliche ökotoxikologische Auswirkungen haben
- in Meeres-Oberflächengewässern: Worst-case-Anstieg von 200 auf 400 ng/dm³, Grenze ohne beobachtete Effekte: 120 µg/dm³
- in Endgewässern: 120 µg/dm³ nur an extrem trockenen Standorten innerhalb 50 Jahren
- Empfehlung: TFA-Werte in der Umwelt sollten überwacht werden, wenn HFO in großem Maßstab eingeführt werden

Verwendung in der Kältetechnik

- als Reinstoffe
 - Kfz-Klimaanlagen
 - stationäre Anlagen
- als Gemische mit HFKW
 - stationäre Anlagen

Verwendung außerhalb der Kältetechnik

- als Treibmittel

Herausforderungen

- Überschreiten der 'gesundheitlichen Orientierungswerte' von TFA gemäß UBA
- Phase-Down der HFKW

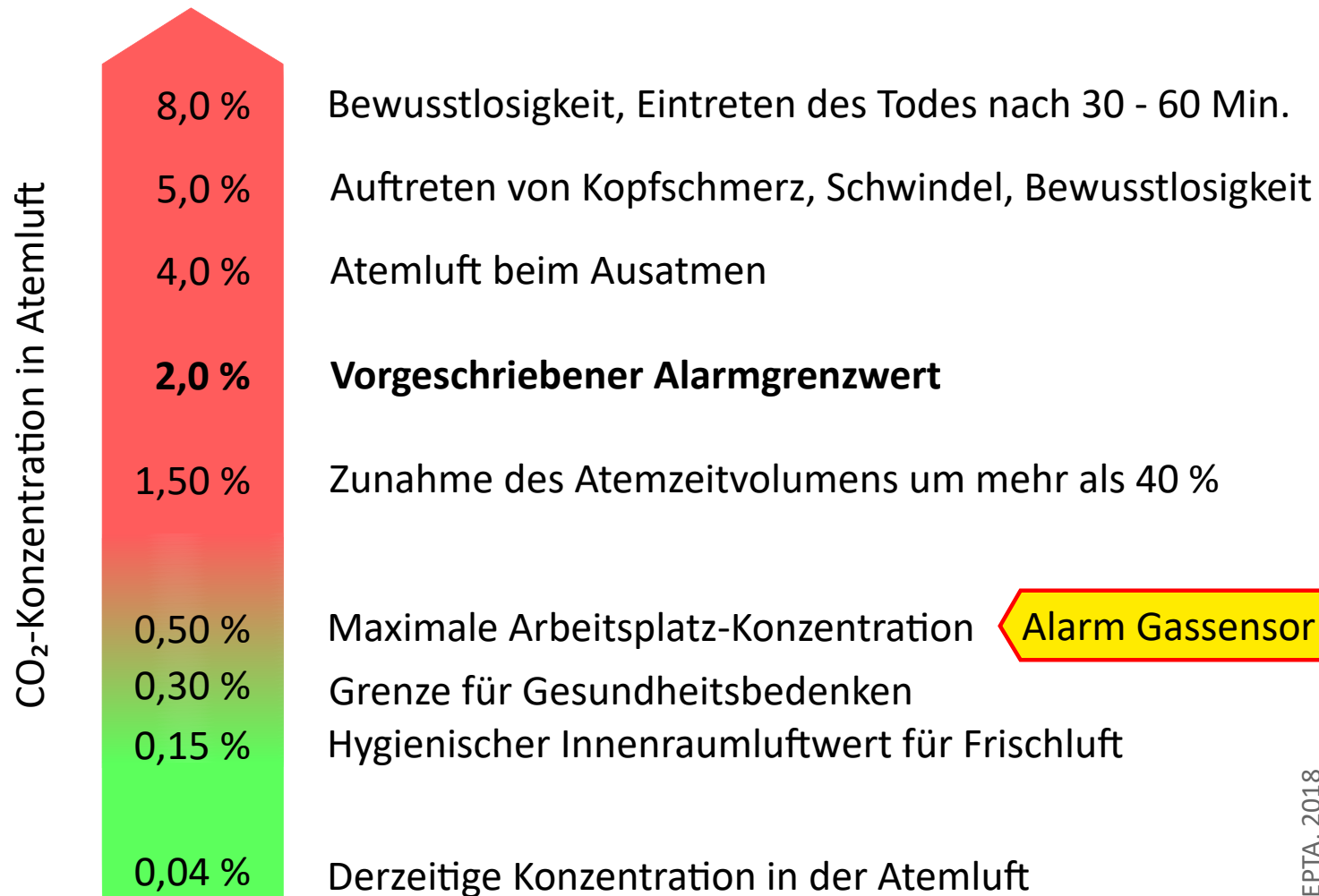
Mögliche Probleme für Kältetechnik

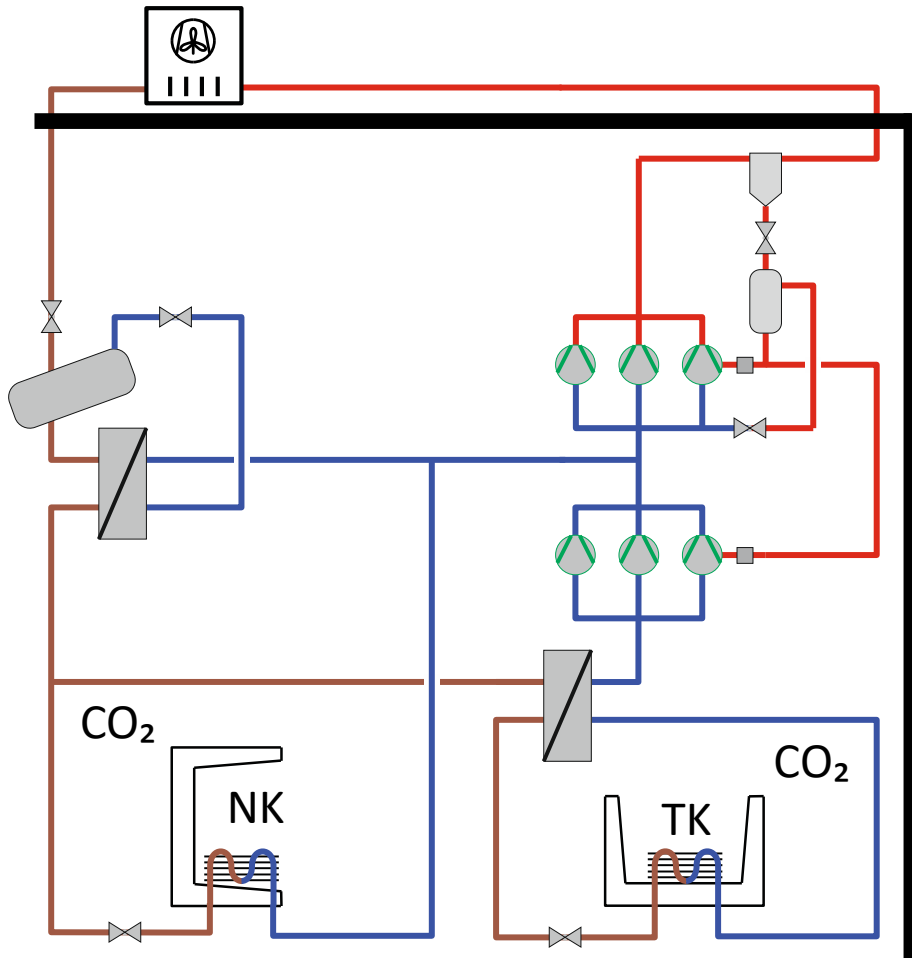
- Zukünftiger Ausstieg aus HFO möglich
- Lieferbarkeit, Kosten von HFO/HFKW-Gemischen

Mögliche Lösung

- Umgang mit 'kritischen' Kältemitteln
 - Höchstdruck (CO₂)
 - brennbar, giftig, panikerzeugend

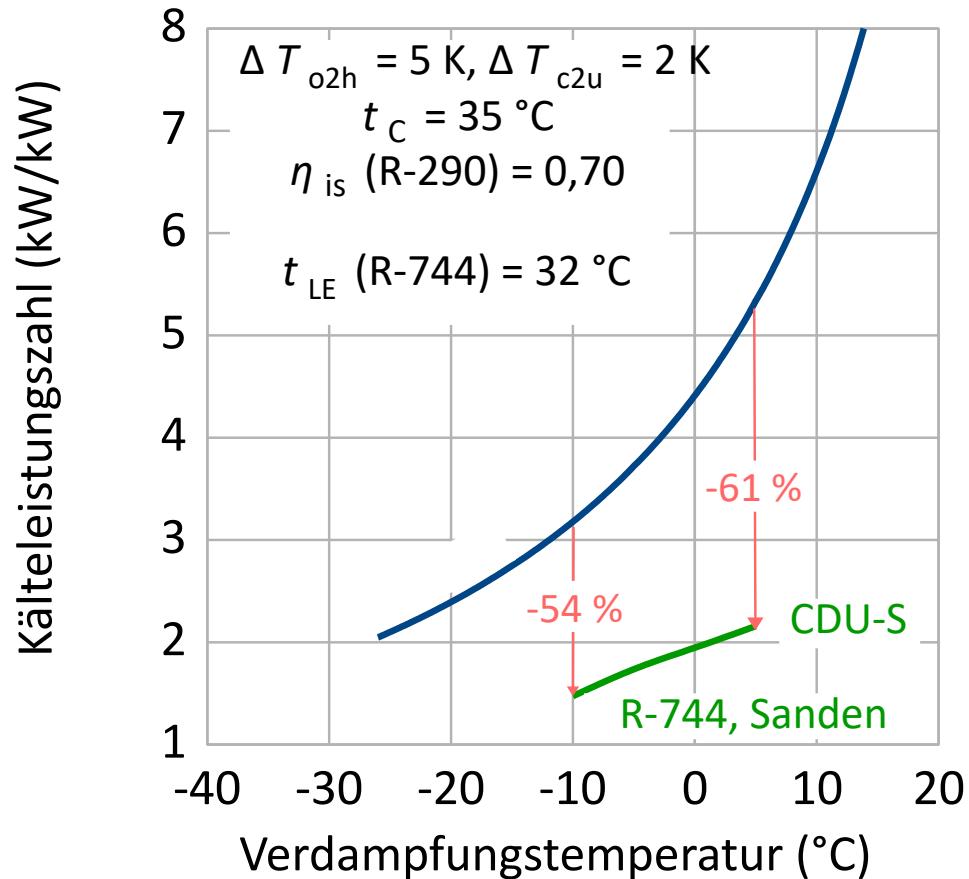
CO₂ als Kältemittel





Wesentliche Eigenschaften

- CO₂-Booster-Schaltung: Stand der Technik 2017
- Kältemittel-Sammler
- 2 innere Wärmeübertrager
- Ölabscheide-System (wgn. Wärmeübergang)
- aufwendige Regelungstechnik
- Sicherheitstechnik für Überdruck (bei Stillstand)
- Kältemittel-Leckagen (reduzieren Effizienz)
- Verkaufskühlmöbel verglast (Suffizienz)
- Gaskühlung/Verflüssigung
 - auf dem Gebäudedach: bei hohen Umgebungstemperaturen → Effizienzverluste
 - via Betonkernaktivierung (Bodenplatte): niedrige Temperaturen → Effizienzgewinne
- insgesamt: komplexe, kostenintensive Technik
- **aktuell: Effizienzsteigerung durch**
 - **Ejektoren, überflutete Verdampfer, ...**
- bisher: keine veröffentlichten Effizienzdaten →

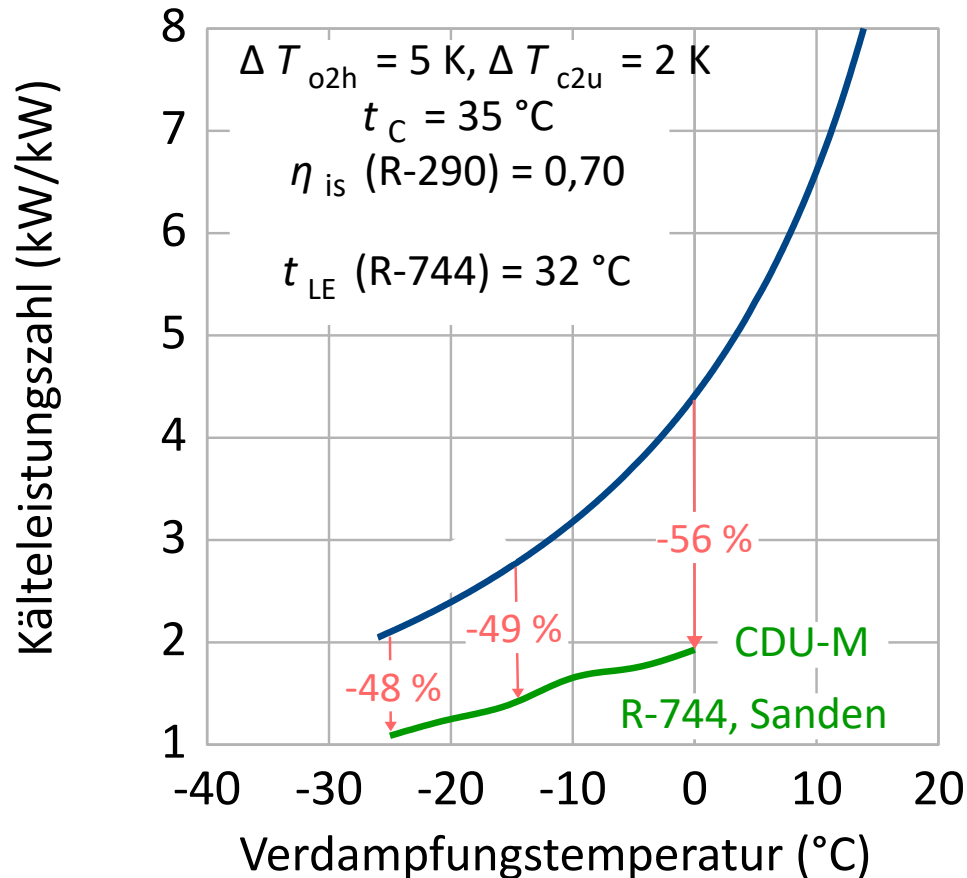


CDU-S = CO₂ Condensing Unit – S(mall)

- $\dot{Q}_0 = 2,8 - 4,1 \text{ kW}$ bei 80 Hz, transkritisch

R-290

- simuliert mit CoolPack
- $t_c = 35 \text{ °C}$ (nicht 32 °C)

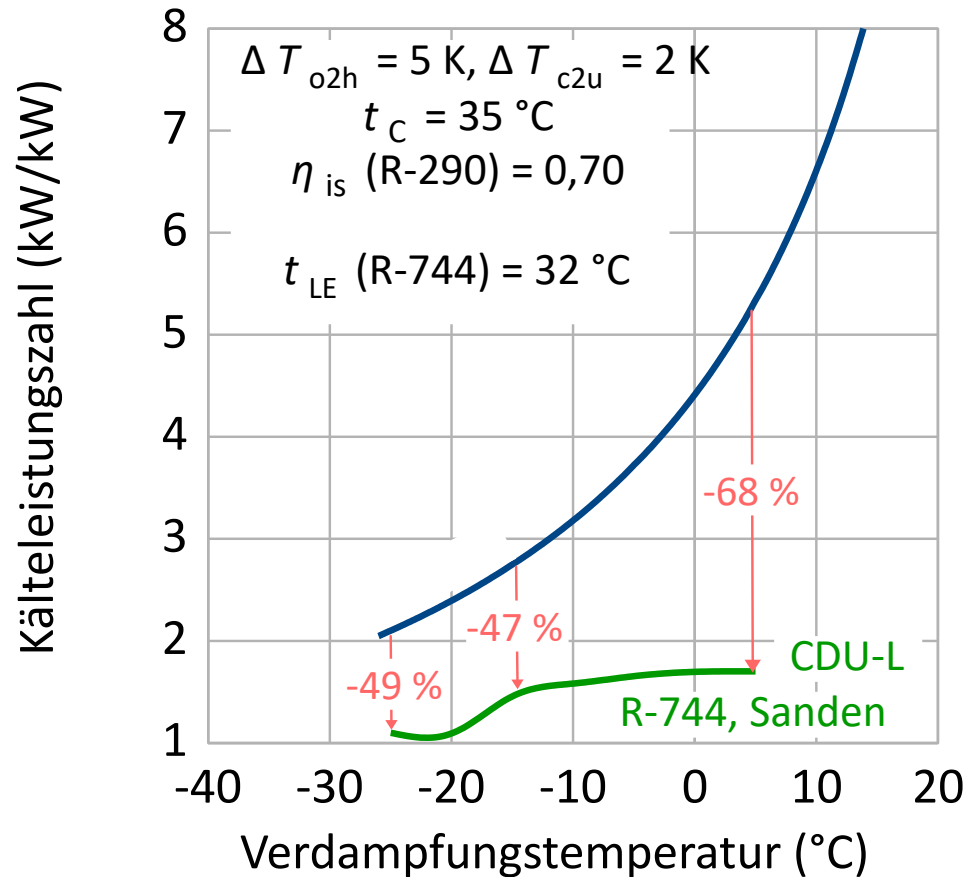


CDU-M = CO₂ Condensing Unit – M(edium)

- $\dot{Q}_o = 2,0 - 5,4 \text{ kW}$ bei 80 Hz, transkritisch
- die Daten in der Tabelle sind bei $t_o \geq -10 \text{ °C}$ nicht plausibel, die Grafik wurde daher mit den Quotienten aus \dot{Q}_o und P erstellt

R-290

- simuliert mit CoolPack
- $t_c = 35 \text{ °C}$ (nicht 32 °C)



CDU-L = CO₂ Condensing Unit – L(arge)

- $\dot{Q}_o = 3,6 - 9,7 \text{ kW}$ bei 80 Hz, transkritisch

R-290

- simuliert mit CoolPack
- $t_c = 35 \text{ °C}$ (nicht 32 °C)

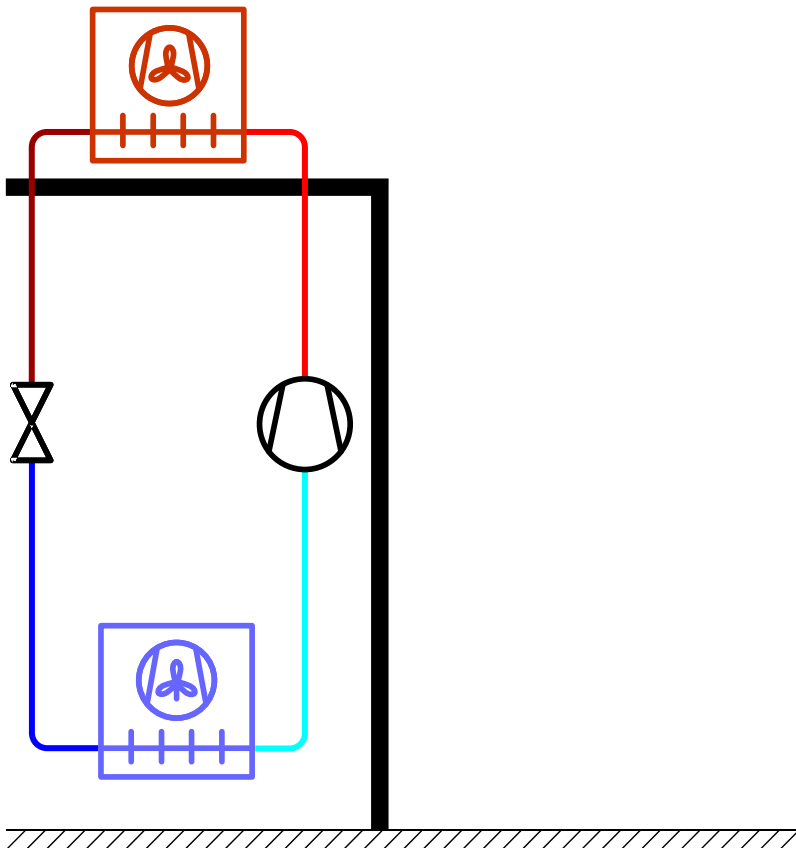
Supermarkt-Kälteanlagen

- Stand der Technik
- energieverbrauchsoptimiert durch
 - verglaste Verkaufskühlmöbel (Suffizienz)
 - Ejektoren (anspruchsvolle Technik)
 - überflutete Verdampfer
 - Ölabscheider
 - aufwendige Regelungstechnik ...

Gewerbekälte-Verflüssigungssätze (nur eine Veröffentlichung)

- wenig energieeffizient → hohe Betriebskosten
- Vorteil: „natürliches“ Kältemittel

Übergang auf Kälteanlagen mit 'kritischen' Kältemitteln

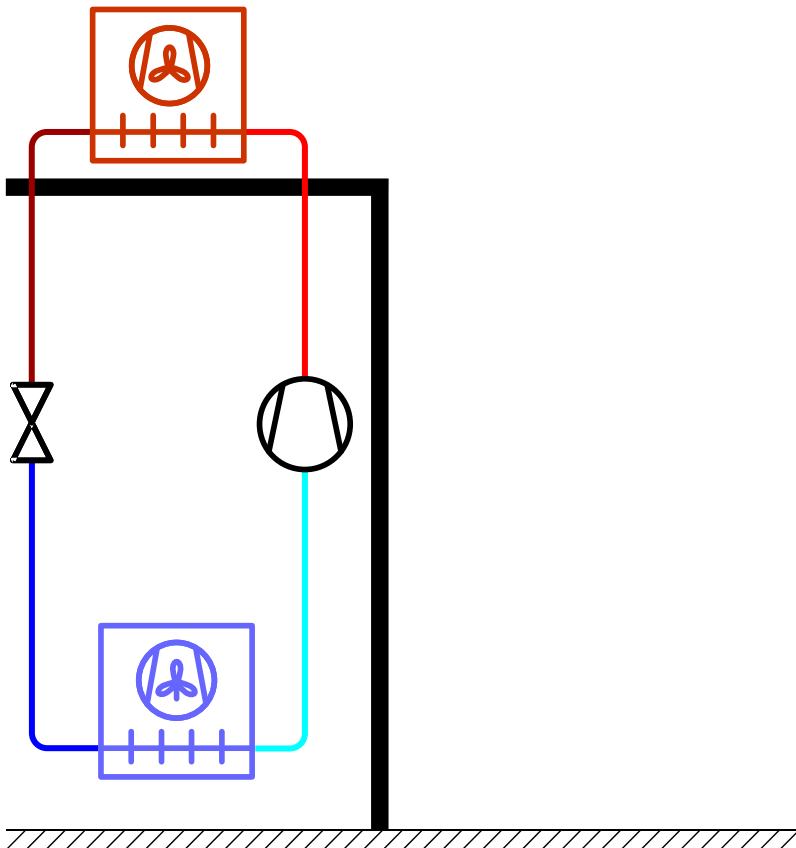


Gebäudesituation

- Kältetechnik innerhalb des Gebäudes:
 - Verdampfer
 - Verdichter
 - Expansionsorgan
- Kältetechnik außerhalb des Gebäudes:
 - Verflüssiger
- Sicherheitskältemittel (nicht-brennbar)
 - innerhalb und außerhalb des Gebäudes
 - lange Kältemittelleitungen → hohe Füllmengen
 - div. Fügstellen → hohe Leckwahrscheinlichkeit
 - → verhältnismäßig hohe Leckmengen

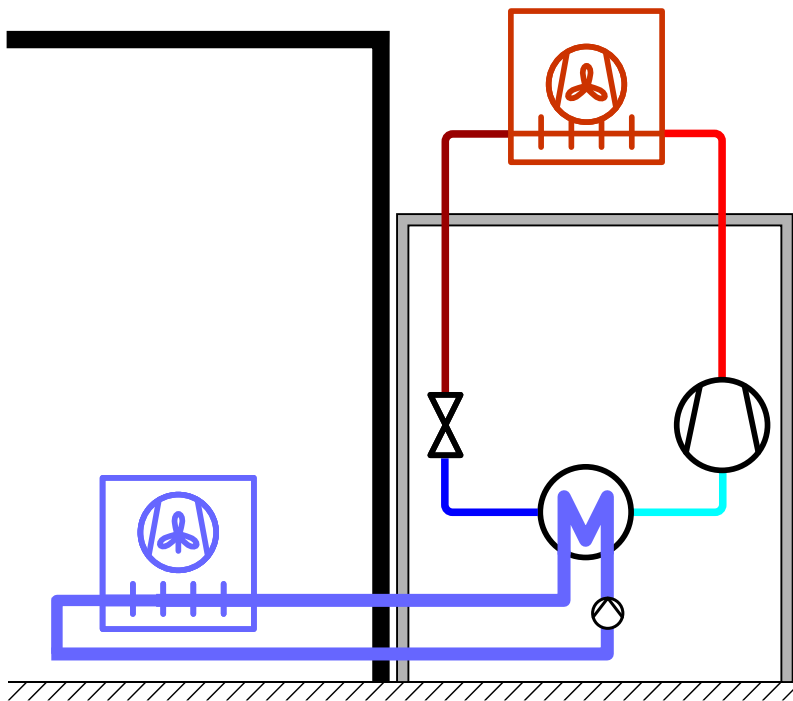
Installation komplexer Anlagen

- mehrere Verdichter und Verdampfer parallel
- dadurch sehr lange Kältemittelleitungen und große Kältemittelfüllmenge



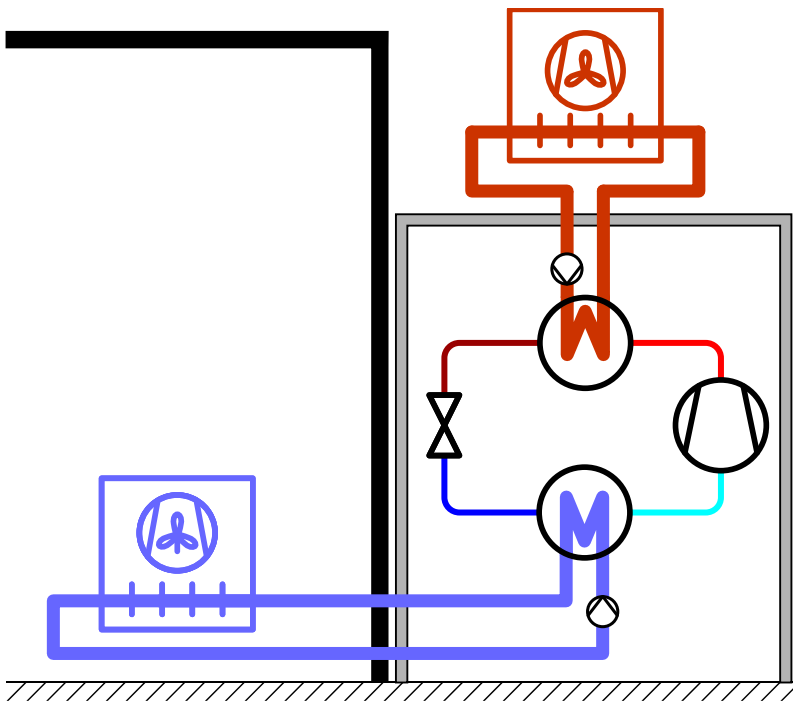
Gebäudesituation

- keine prinzipielle Änderung der Technik
- aber: geringere volumetrische Kälteleistung der HFO erfordert größere Verdichter
- ... und damit höhere Investkosten für Anlagen:
 $\approx +20 \cdots +25 \%$ bei Flüssigkeitskühlsätzen
 (CCI-Zeitung, 10, 2017, M. Stahl)



Gebäudesituation

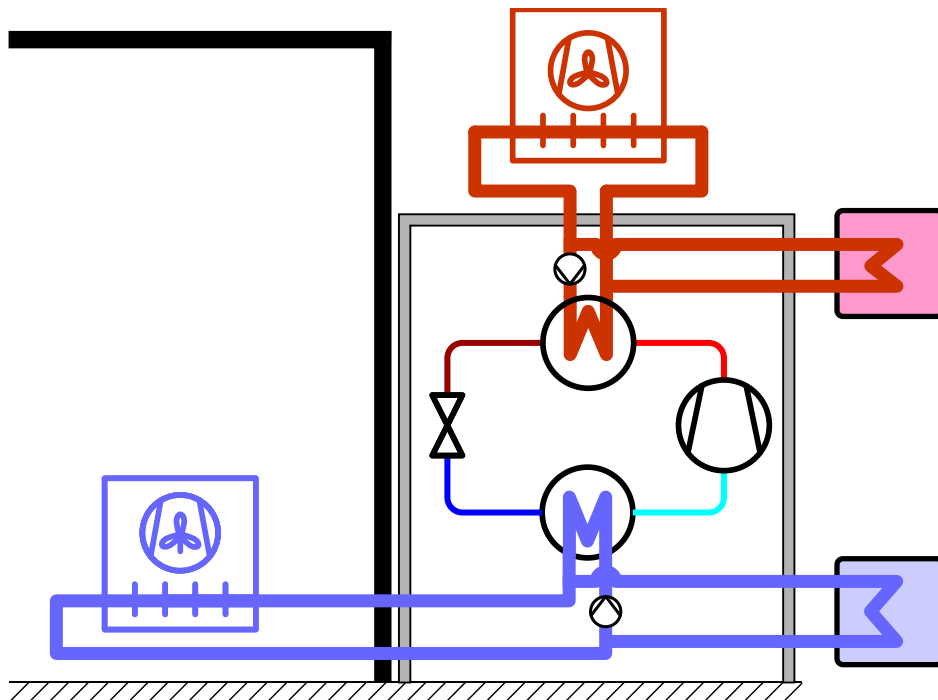
- Kapselung der Kälteanlage
 - mit Verdichter, Verdampfer, Expansionsorgan
- Kältemittelleitungen
 - zum Verflüssiger und zurück
- Kühlsolekreislauf
 - mit großem Leitungsdurchmesser
 - zusätzliche Wärmeübertrager + Umwälzpumpe zum Luft- (oder Flüssigkeits)kühler innerhalb des Gebäudes
 - hohes Kühlsolevolumen
- Kältemittel (brennbar, giftig/panikerzeugend)
 - innerhalb und außerhalb der Kapselung
 - kurze Leitungen → geringe Füllmengen
 - → geringe Leckmengen



Gebäudesituation

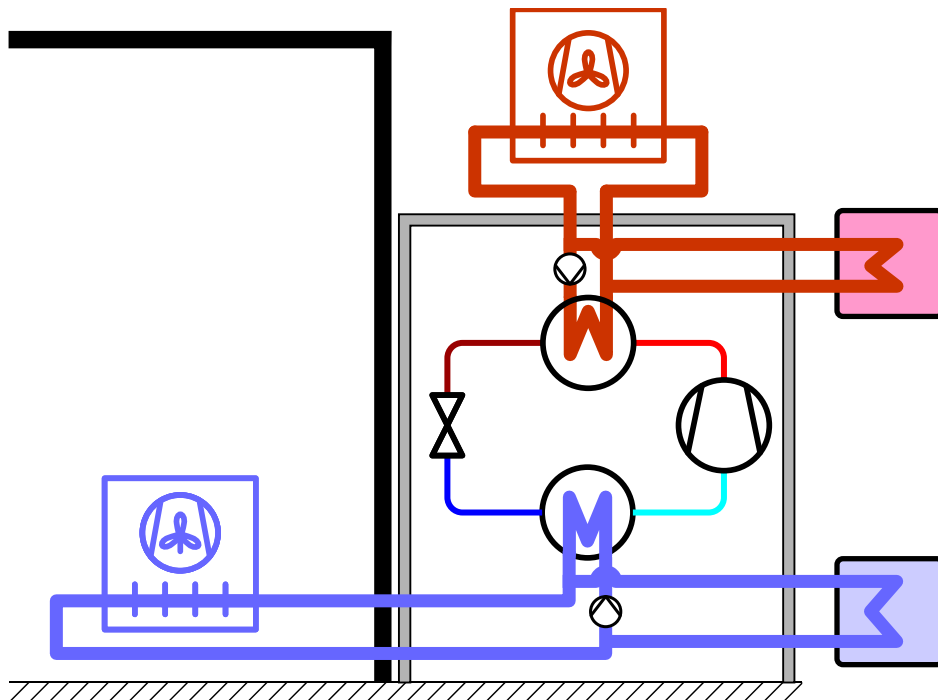
- Kapselung der Kälteanlage außerhalb oder innerhalb des Gebäudes
 - mit Verdichter, Verdampfer, Expansionsorgan (Bezeichnung: Flüssigkeitskühlsatz)
- Kühlsolekreislauf mit großem Leitungsdurchmesser
 - und zusätzlichem Wärmeübertrager + Umwälzpumpe zum Rückkühler außerhalb des Gebäudes (bzw. Kapselung)
- Kühlsolekreislauf mit großem Leitungsdurchmesser
 - und zusätzlichem Wärmeübertrager + Umwälzpumpe zum Luft- (oder Flüssigkeits)kühler innerhalb des Gebäudes
 - hohes Kühlmittelvolumen
- Kältemittel (brennbar, giftig)
 - nur innerhalb der Kapselung
 - kurze Kältemittelleitungen → geringe Füllmengen
 - → geringe Leckmengen

- Kapselung der Kälteanlagen außerhalb oder innerhalb des Gebäudes
 - mit Verdichter, Verdampfer, Expansionsorgan (Bezeichnung: Flüssigkeitskühlsatz bzw. Chiller)
- Verflüssiger-Wärmeübertrager + Kühlmittelkreislauf zum Rückkühler außerhalb der Kapselung
- Verdampfer-Wärmeübertrager + Kühlmittelkreislauf zum Kühler innerhalb des Gebäudes
- Explosionsschutz
- Zwangsbelüftung (Rohrleitung, Ventilator)
- zwei Umwälzpumpen
- komplexere Regelung



Zusätzliche Optionen indirekter Systeme

- Speicherung von Wärme und „Kälte“
 - Warm- und Kaltwasserspeicher
 - Phasenwechselspeicher (Eis, Paraffin etc.)
geringes Volumen, hohe Kapazität
 - Förderung im Rahmen der Kälterichtlinie
- → *grosse* Effekte im Rahmen der Energiewende
 - Speicherung fluktuierender Energien
 - → Entlastung elektrischer Netze
 - Eigenversorgung möglich (PV, Windkraft)



Vergleich mit direkten Systemen

- Mehraufwand erhöht Kosten
- geringere Kältemittelfüllmenge und kurze Kältemittleitungen verringern Leckagen
- Sole-Leitungen enthalten großes Volumen (teilweise im m³-Bereich) und damit viel Energie; durch Pufferwirkung: Reduktion der erforderlichen Kälteleistung
- Energieverbrauch
 - Erhöhung durch Wärmeübergänge, Umwälzpumpen
 - Minderung durch effizientes Kältemittel (Stoffdaten)
 - (insgesamt möglicherweise gleichwertig)

Zusammenfassung

F-Gase-Verordnung u. Kigali-Amendment

- erzwingen Ausstieg aus HFKW-Kältemitteln und bewirken Übergang auf andere Kältemittel
- Klimawirksamkeit: vernachlässigbar gering

Kältemittel-Alternativen

- HFO: TFA-Thematik noch nicht geklärt
 - eventuell: nur Kurzzeit-Alternative
- brennbare, giftige/panikerzeugende Kältemittel
 - erfordern andere Anlagenkonzepte
 - durch Hybrid-Anlagen große Effekte im Hinblick auf Energiewende möglich
- Höchstdruck-Kältemittel CO₂
 - im Prinzip weniger energieeffizient
 - suffiziente Lösungen im Supermarktbereich (Ölabscheider, Ejektoren, überflutete Verdampfer ...)

Kosten

- Kältetechnik für den reinen Nutzen der „Kälte“ wird kostenintensiver
- Betriebskosten nur für den Nutzen „Kälte“: fraglich
- Hybrid-Anlagen: Potenzial zur Verringerung der Betriebskosten und der Emissionen ist groß