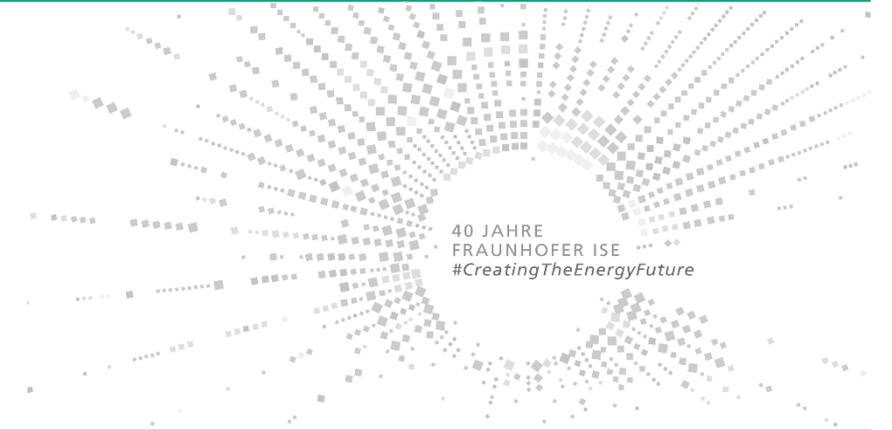


# WÄRMEPUMPEN

Stand der Technik, Markt und aktuelle Forschung



Dr. Gerrit Földner, Fraunhofer ISE

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.  
Frühjahrssitzung des Arbeitskreis Energie

11./12. April 2024, Physikzentrum Bad Honnef

---

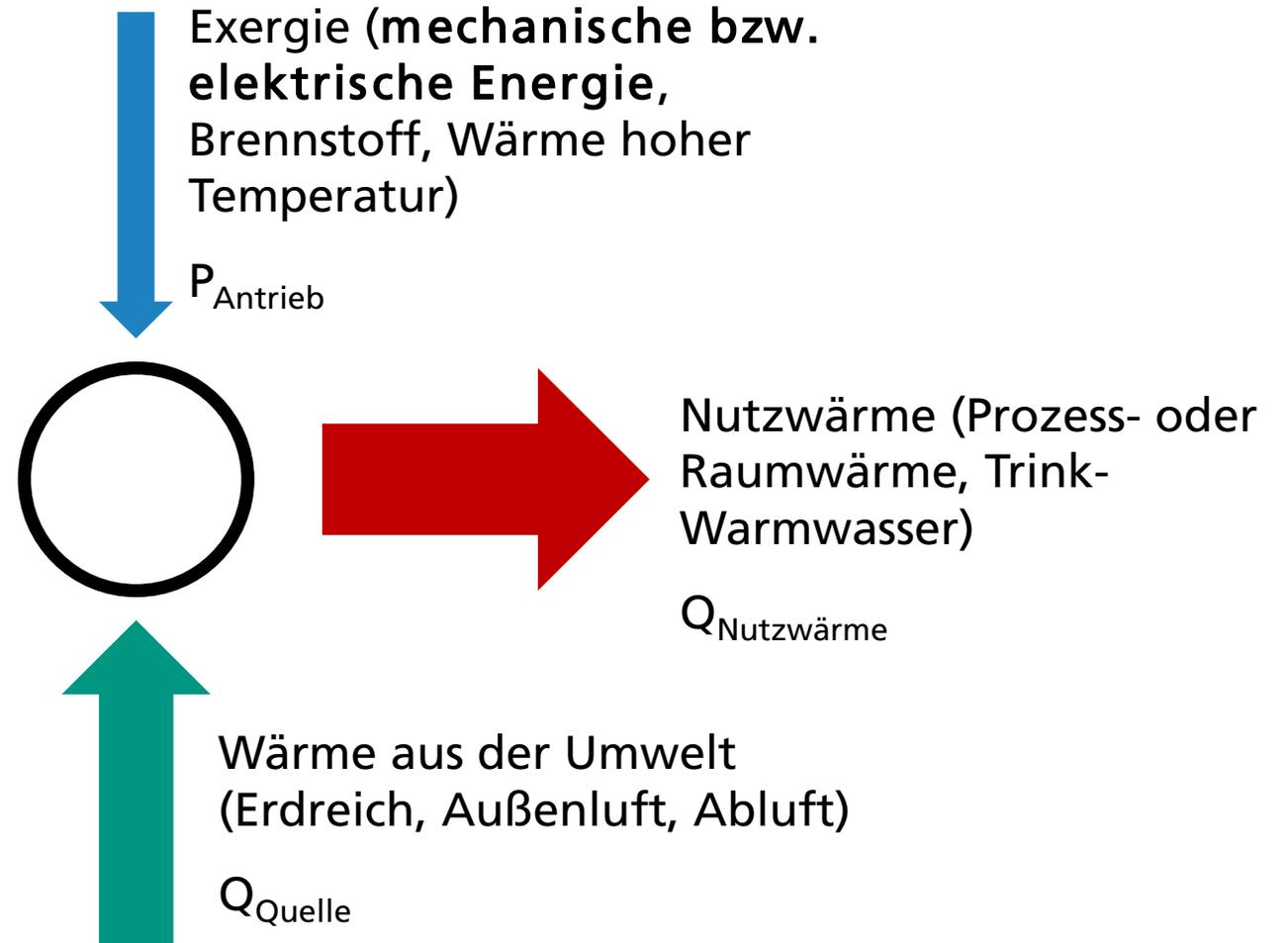
# AGENDA

---

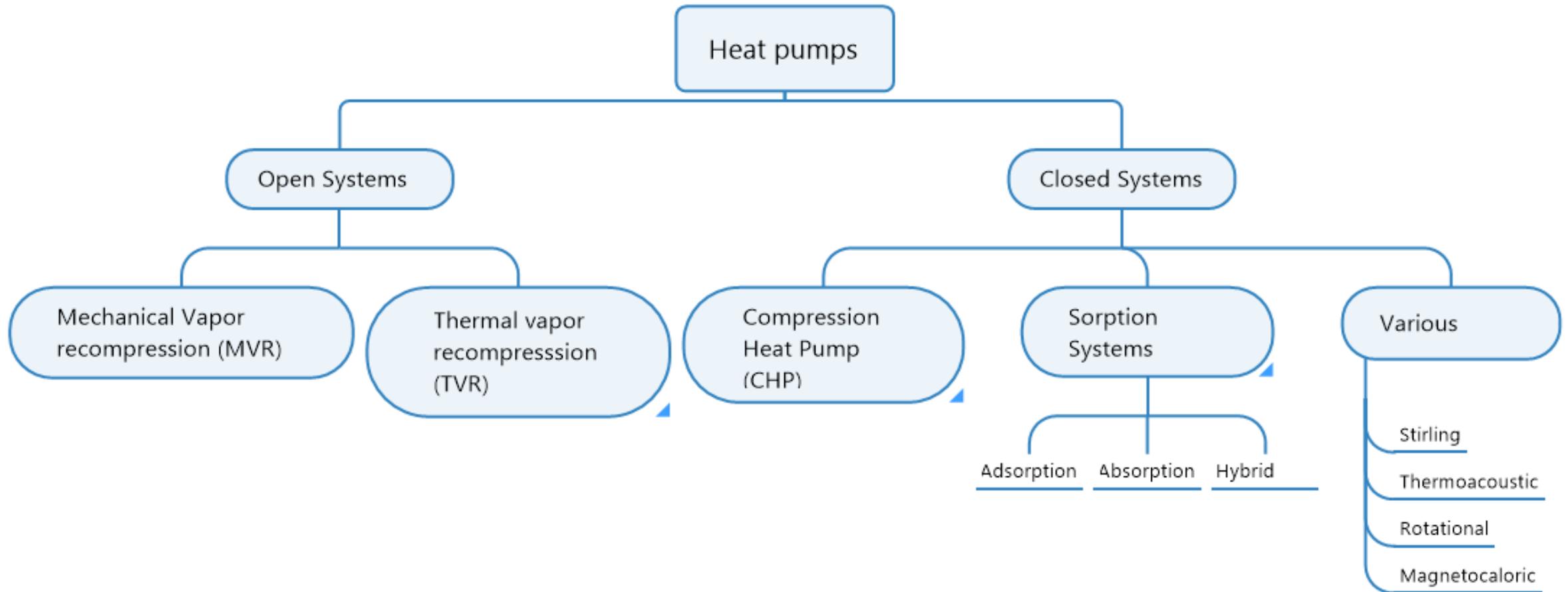
- Einleitung
  - Was ist eine Wärmepumpe?
- Stand der Technik
  - Klassifizierung, thermodynamisches Prinzip, Umsetzungen und Grenzen
  - Kaltdampfkompensation
    - Komponenten, Temperaturbereiche, Anwendungen
  - Thermisch angetriebene WP (Sorptions-WP)
  - Kalorische WP, weitere
- Markt und Rolle in der Wärmewende
- Aktuelle Forschung
  - Überblick und Beispiele

# Was ist eine Wärmepumpe?

- Wärme fließt von einem höheren zu einem niedrigeren Temperaturniveau (2. Hauptsatz)
- Um einen Wärmestrom von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben ist ein thermodynamischer Prozess notwendig, der von außen zugeführte Antriebsenergie (Exergie) benötigt
- Antriebsenergie: reine Exergie (mechanische Energie, elektrische Energie) oder Wärme höherer Temperatur (Energie mit Anteil Exergie)
- Verfahren, bei denen ein Wärmestrom von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau angehoben wird, sollen hier unter dem Oberbegriff »**Wärmepumpe**« verstanden werden

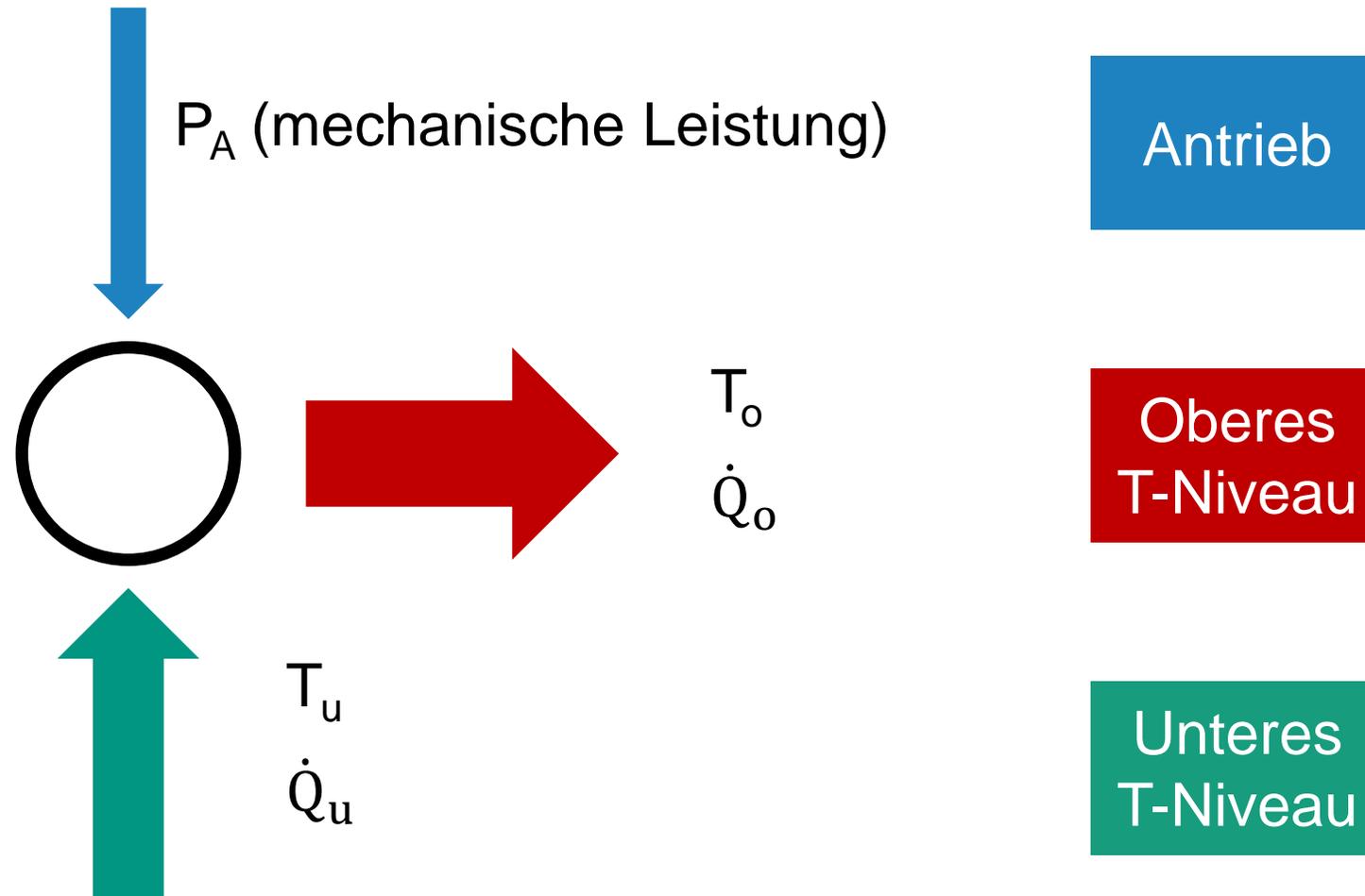


# Klassifizierung



# Allgemeine Betrachtung – mechanischer Antrieb (Kompressions-WP)

## Linksläufiger Clausius-Rankine Kreisprozess



# Definition Arbeitszahl

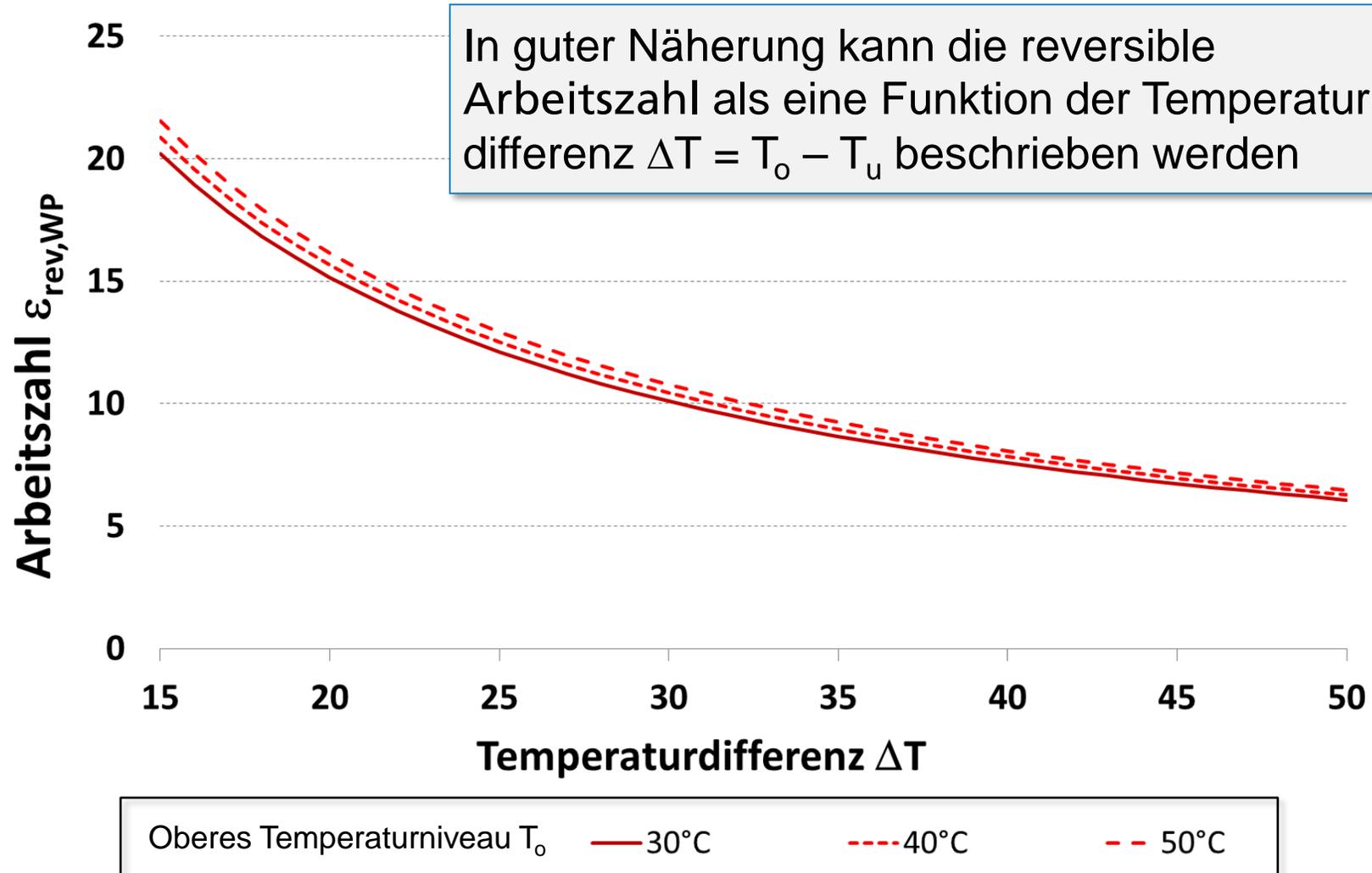
- Wärmepumpe

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutzwärme}}}{P_{\text{Antrieb}}}$$

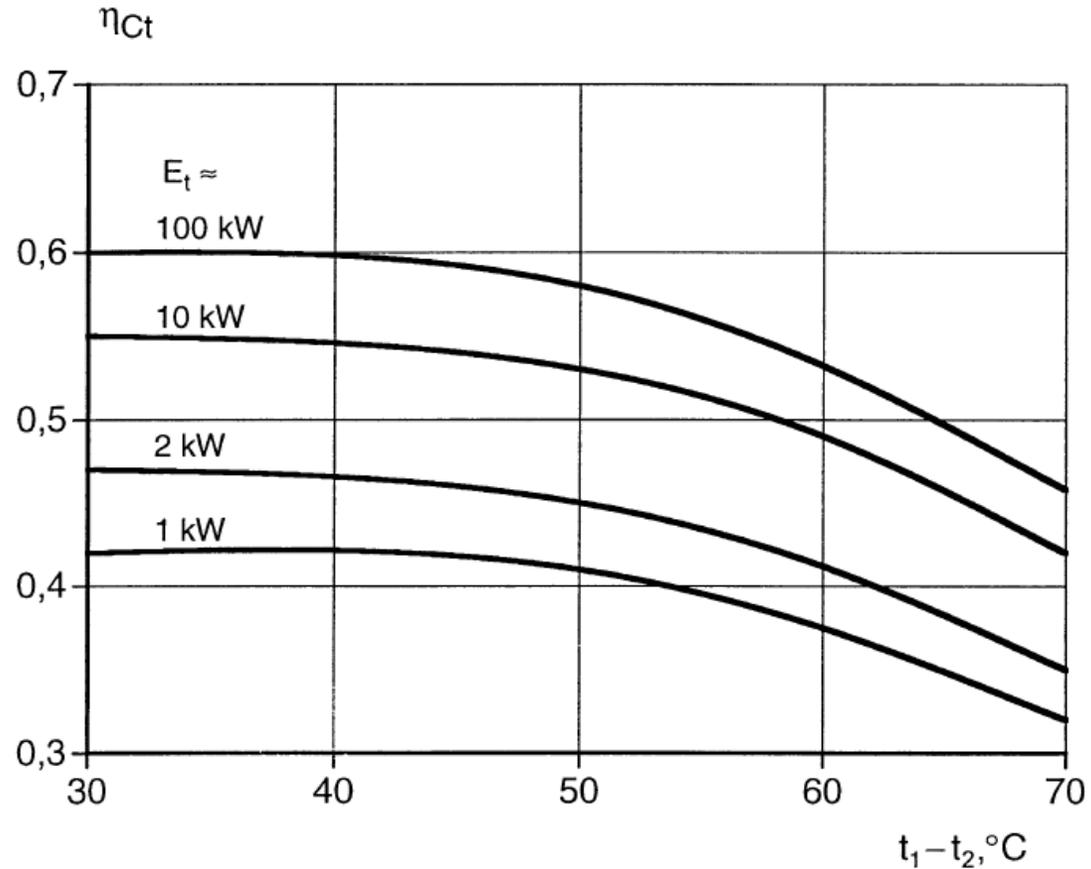
- Thermodynamische Grenze aus 1. und 2. Hauptsatz (reversibler Prozess, Carnot-Wirkungsgrad)

$$\varepsilon_{WP,rev} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutzwärme}}}{P_{\text{Antrieb}}} = \frac{T_o}{T_o - T_u}$$

# Reversible Arbeitszahl über $\Delta T = T_o - T_u$



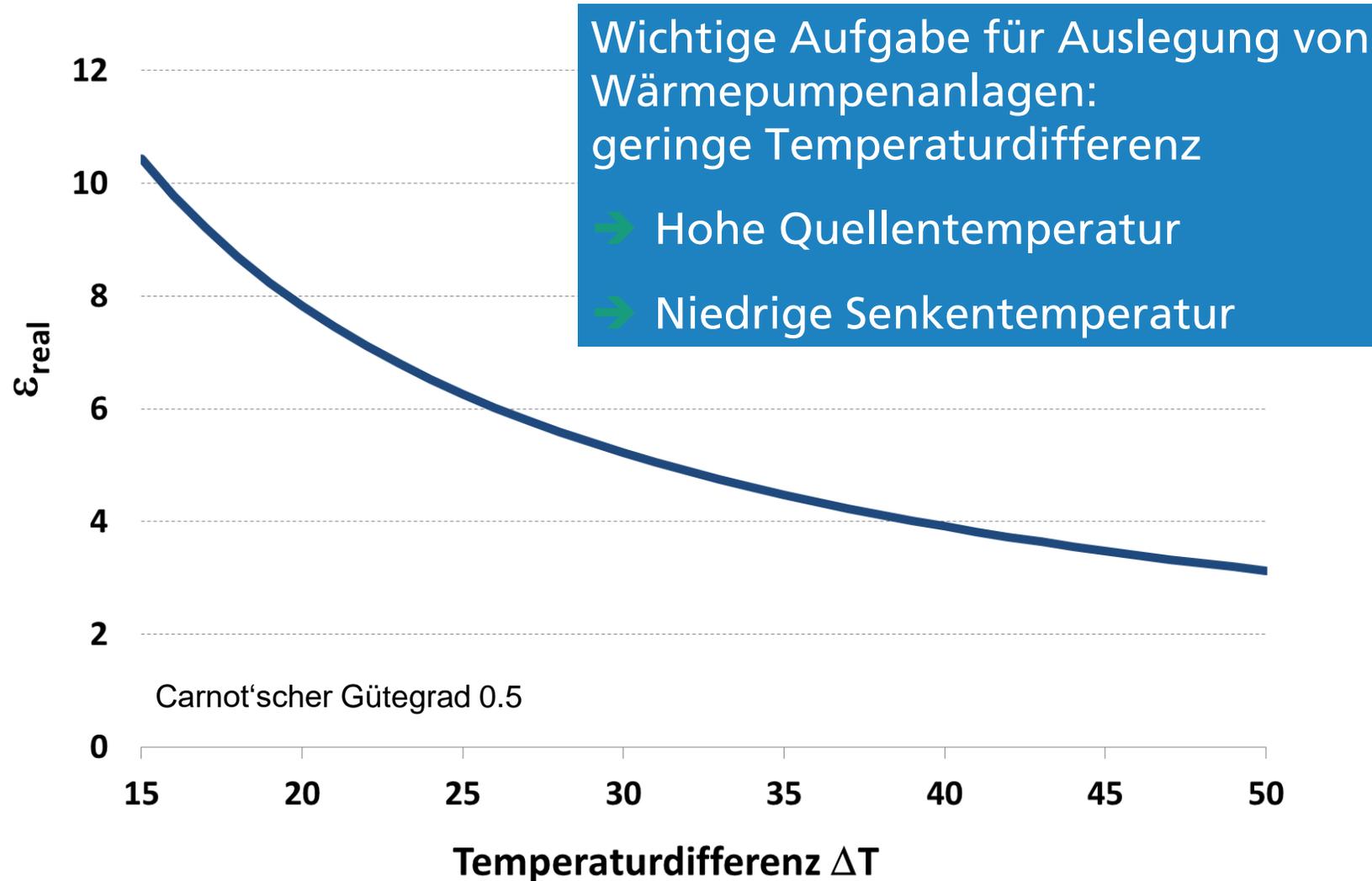
# Typische Werte des Carnot'schen Gütegrades Kompressions-WP



Quelle: Eric Granryd et al., REFRIGERATING ENGINEERING. Department of Energy Technology. Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration Royal Institute of Technology, KTH Stockholm, 2005

Figure 2.16. Approximate "rule of thumb"- values for the Carnot efficiency of practical vapor compression systems (for  $t_1 \cong 35^\circ\text{C}$ ). Data includes an electric motor

# Bedeutung T-Differenz



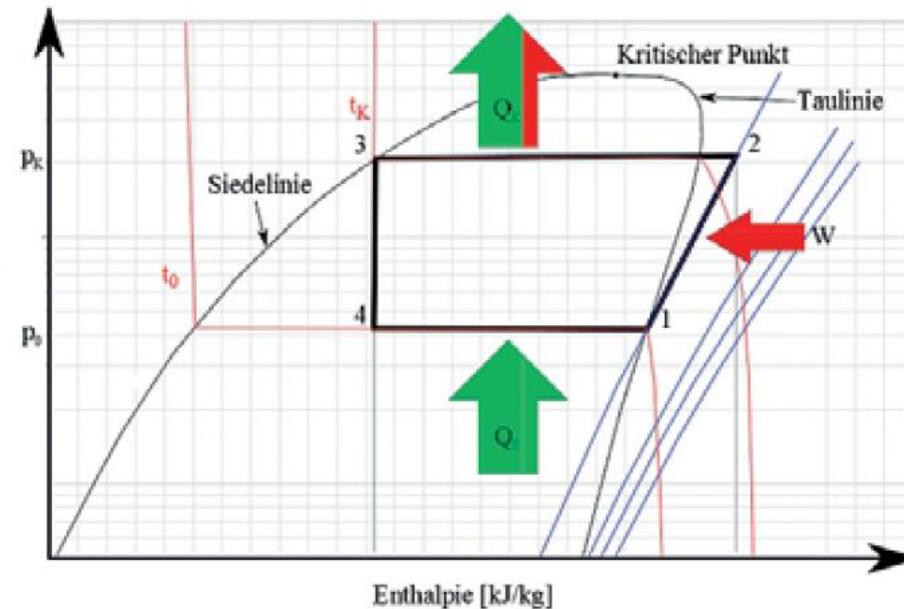
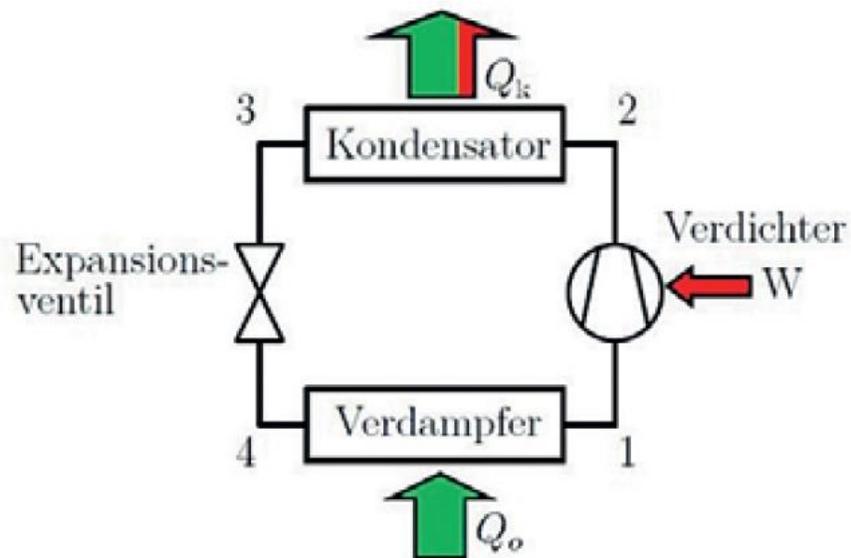
# Idealer Prozess im $\log(p)$ - $h$ -Diagramm

4→1 isotherme Verdampfung

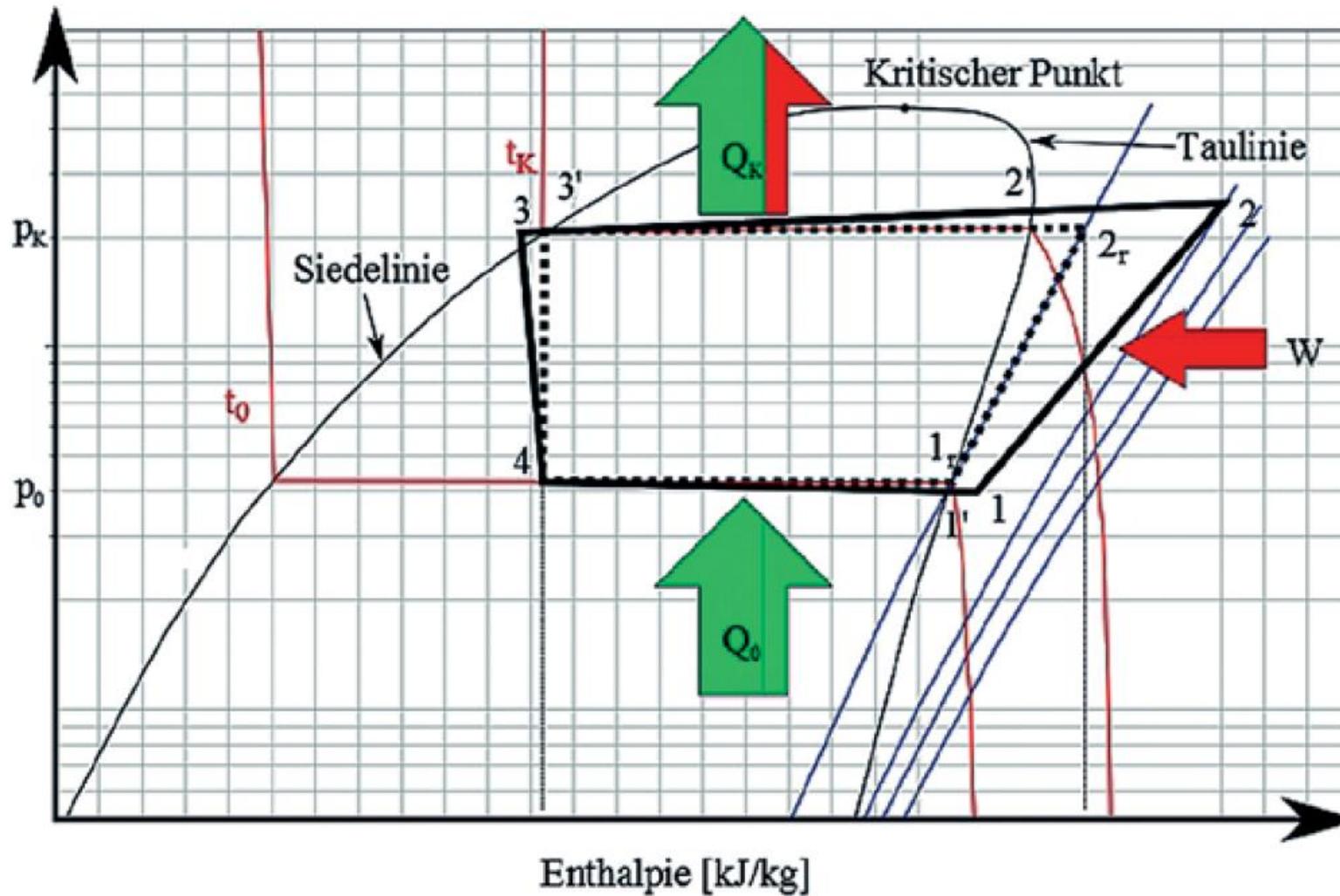
1→2 isentrope Verdichtung (in der Gasphase)

2→3 isobare Kondensation

3→4 isenthalpe Expansion (des Kondensats)

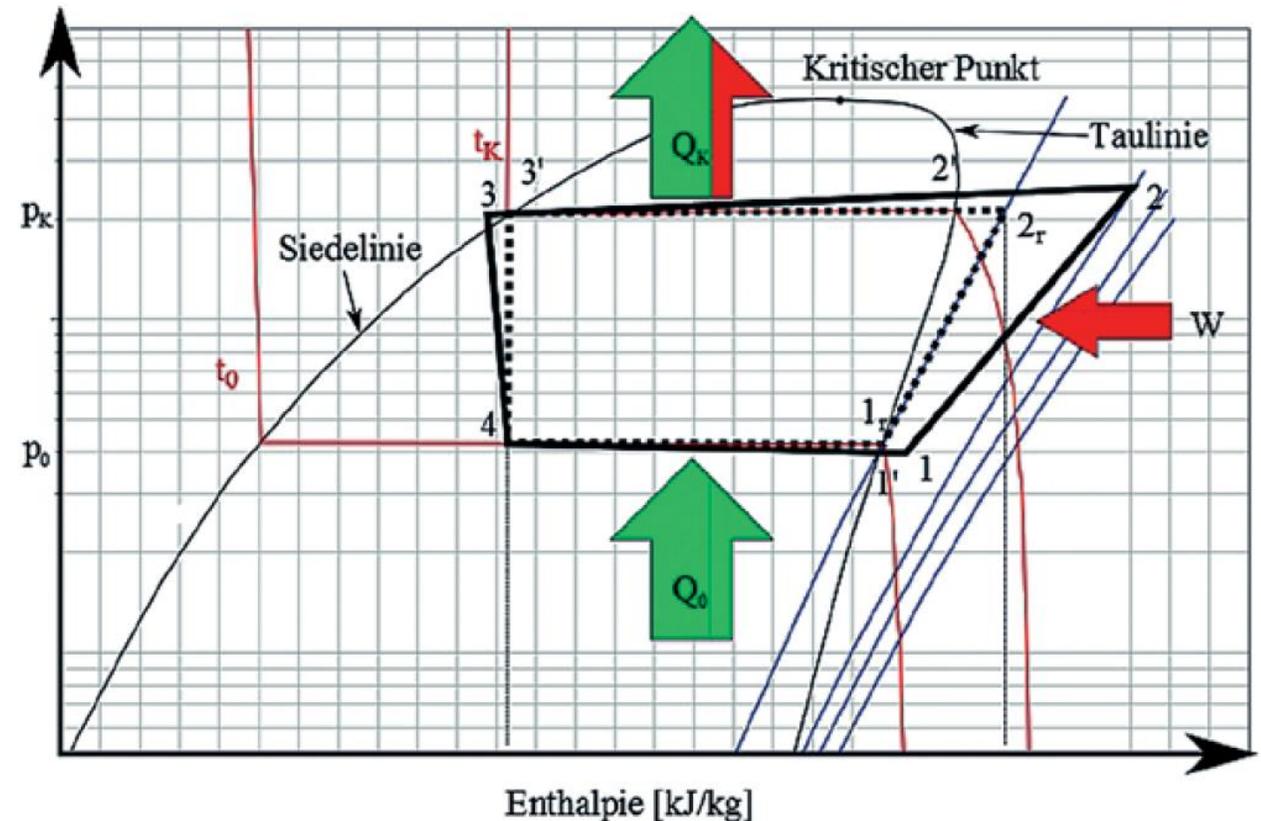


# Realer Prozess im $\log(p)$ - $h$ -Diagramm



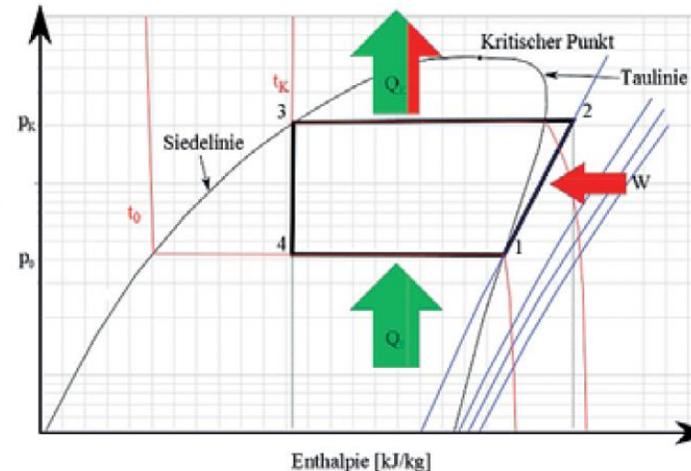
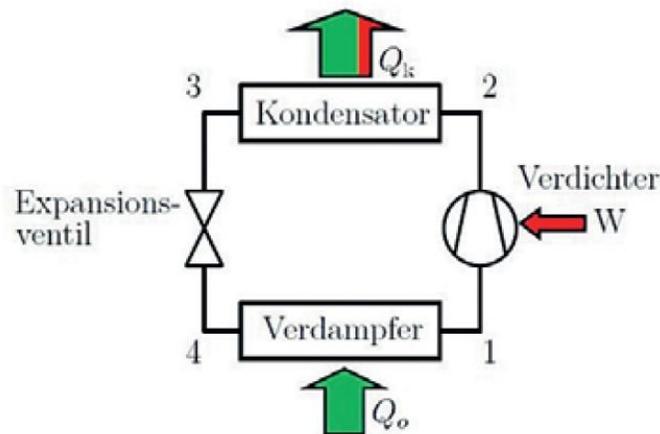
# Realer Prozess im $\log(p)$ - $h$ -Diagramm

- 4-1' Druckverluste in Leitungen, Verdampfung mit Temperaturänderung
- 1'-1 Überhitzung im Verdampfer
- 1-2 polytrope Verdichtung mit zusätzlicher Überhitzung
- 2-2' Wärmeabgabe im Bereich des überhitzten Dampfes
- 2'-3' Verluste in Leitungen und Verflüssiger, Kondensation mit Temperaturänderung
- 3'-3 Unterkühlung: ca. 5 K
- 3-4 Entspannung bei sich geringfügig ändernder Enthalpie

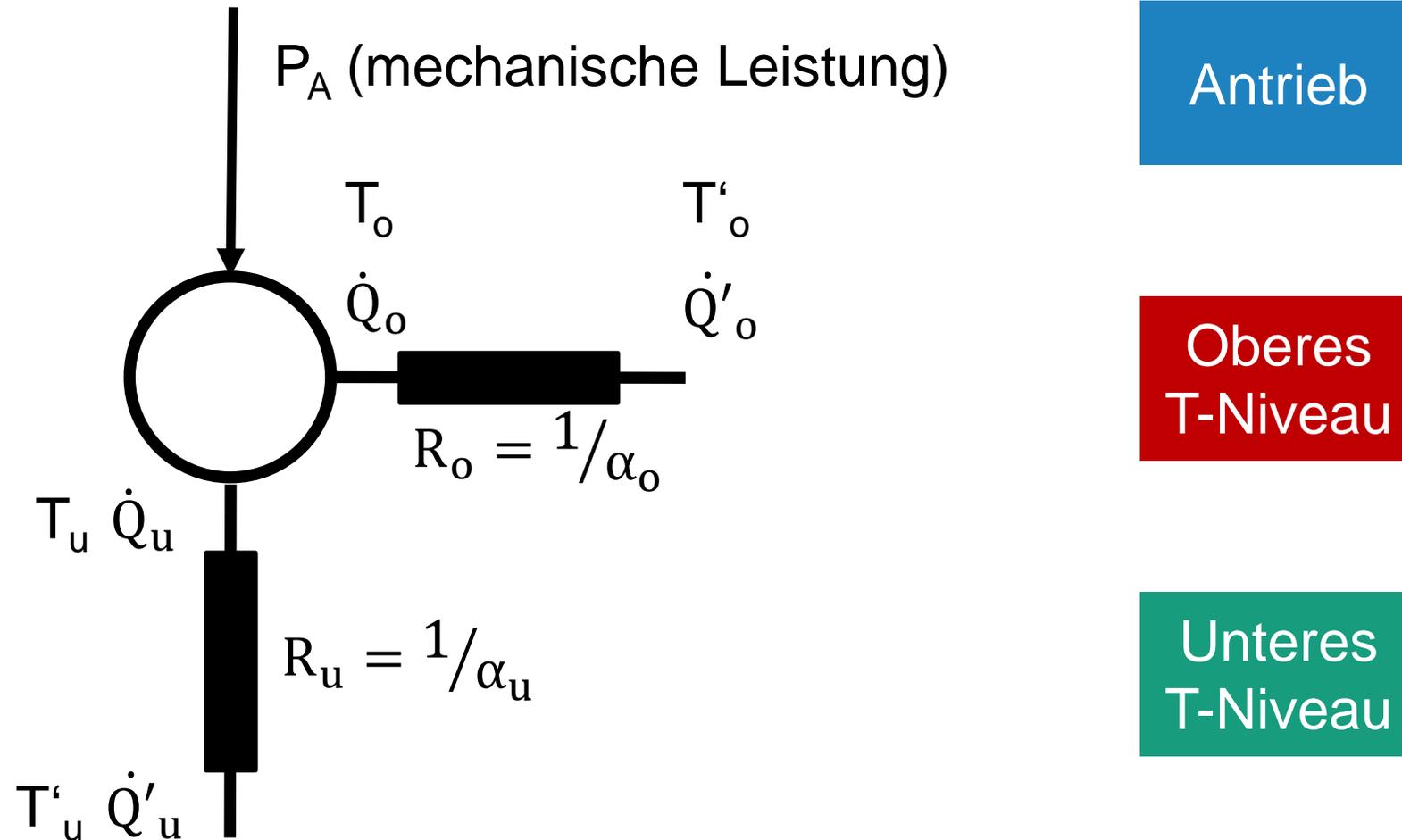


# Wichtigste Irreversibilitäten im realen Prozess

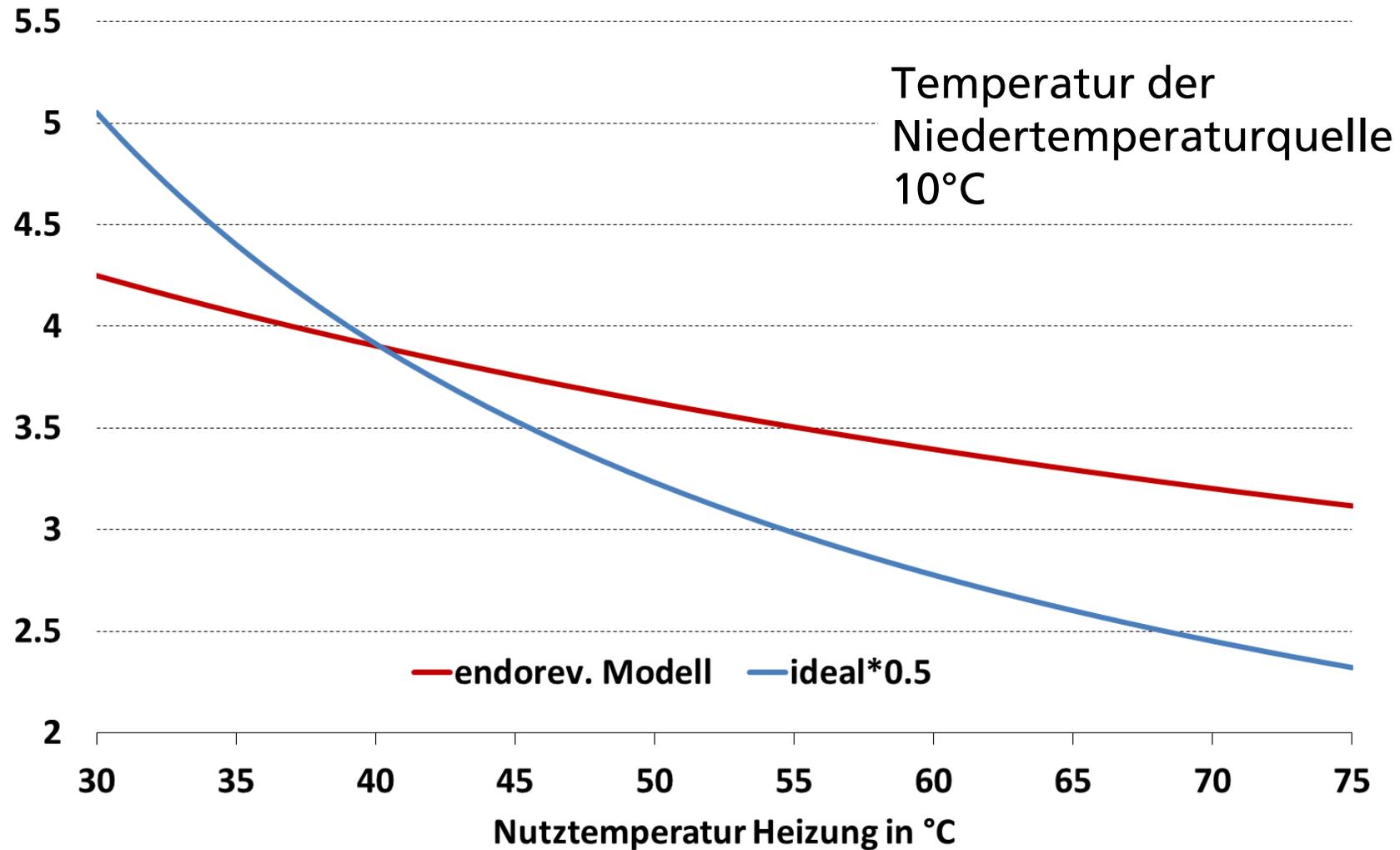
- Kompression vollständig in Gasphase → Überhitzung, d.h. 2-10 K höhere Temperaturen als Kondensationstemperatur, um Tropfenbildung zu vermeiden
- Nicht-ideale (nicht-isentrope) Kompression: Isentrope Kompressoreffizienz →  $\eta \sim 0.8 - 0.9$  für Hubkolben
- Treibende Temperaturdifferenzen bei Wärmeübertragung (Verdampfer, Kondensator), d.h. äußere Temperatur  $\neq$  innere Temperatur
- Entspannung durch Drossel → irreversible Entspannung ohne Nutzung des Arbeitspotenzials der Druckdifferenz



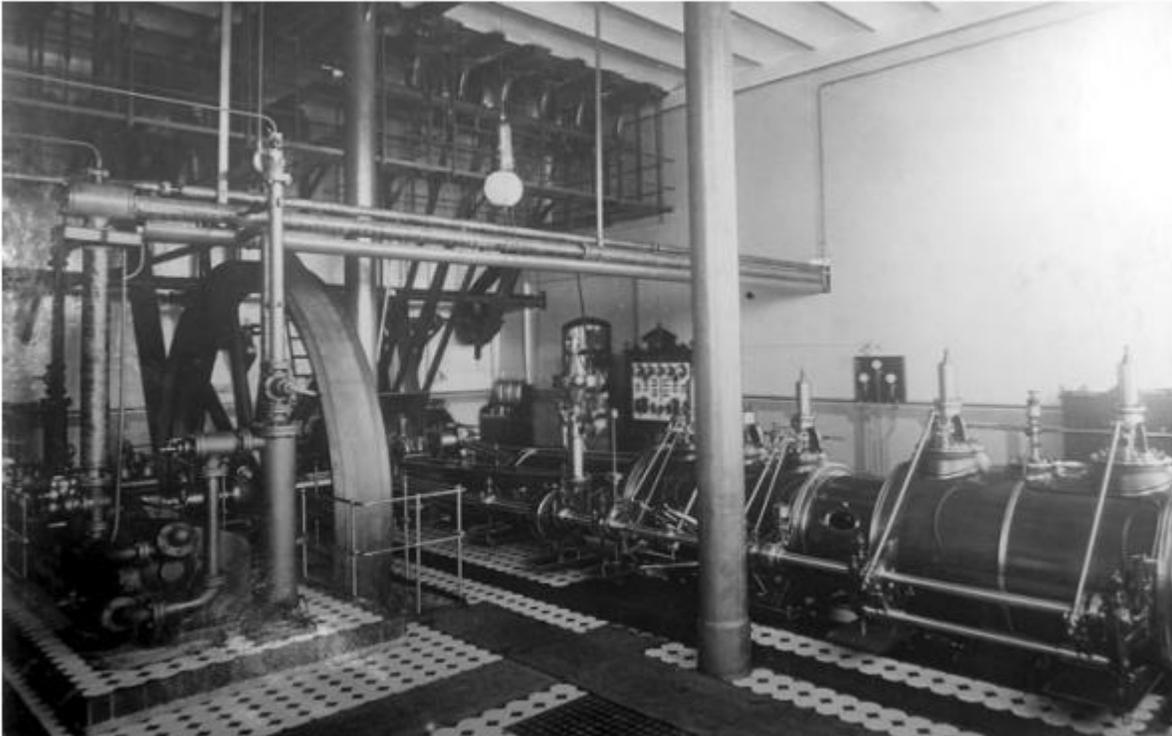
# Endo-reversibles Ersatzschaltbild mechanische (elektrische) Wärmepumpe



# Modellvergleich

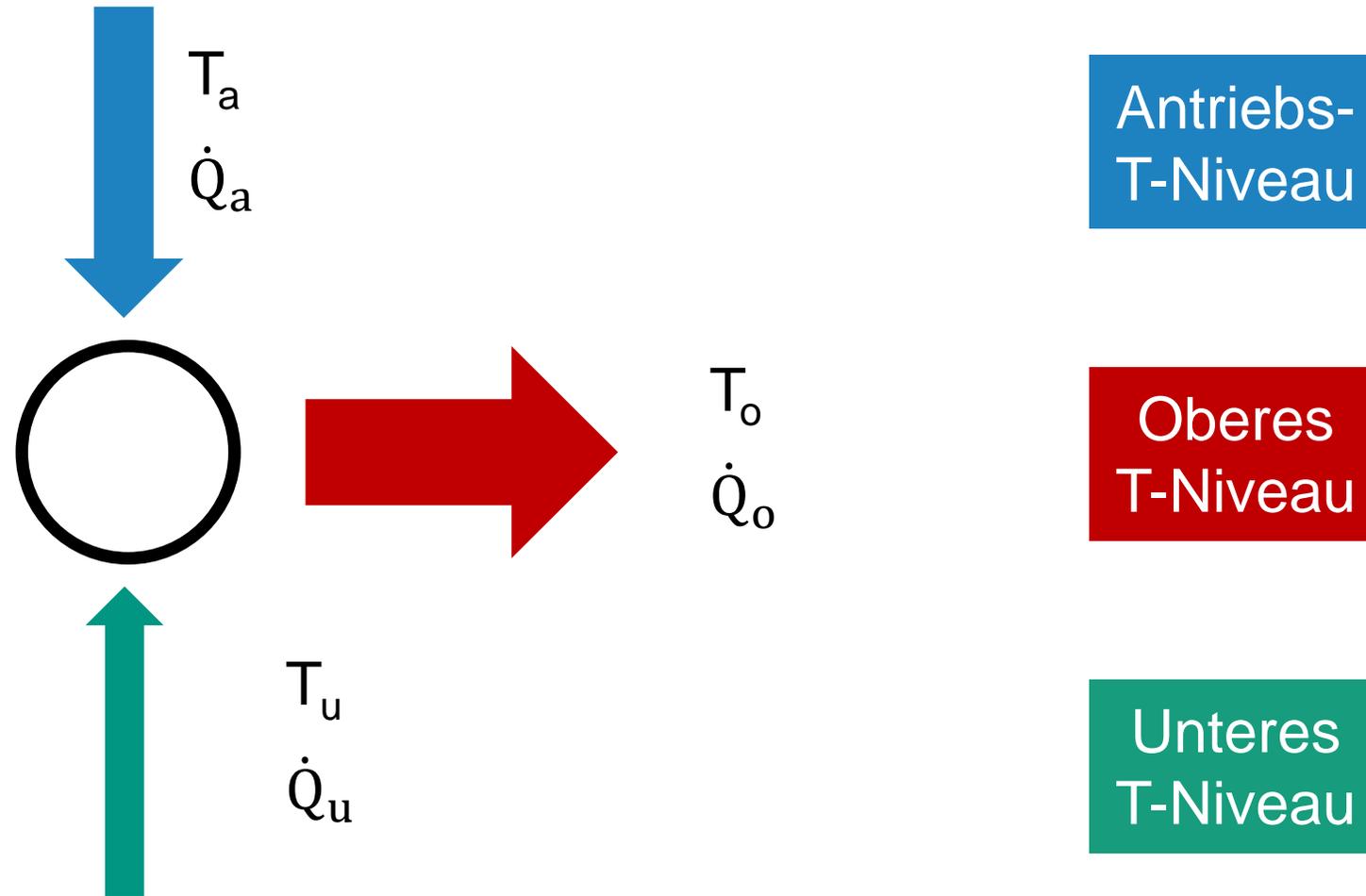


# Frühe Anwendungen Kompressions-WP



**Figure 4-1** Impression of a Sulzer piston compressor (left) driven by a Sulzer steam engine (right), around 1905  
[Archive Sulzer, CH-8401 Winterthur]

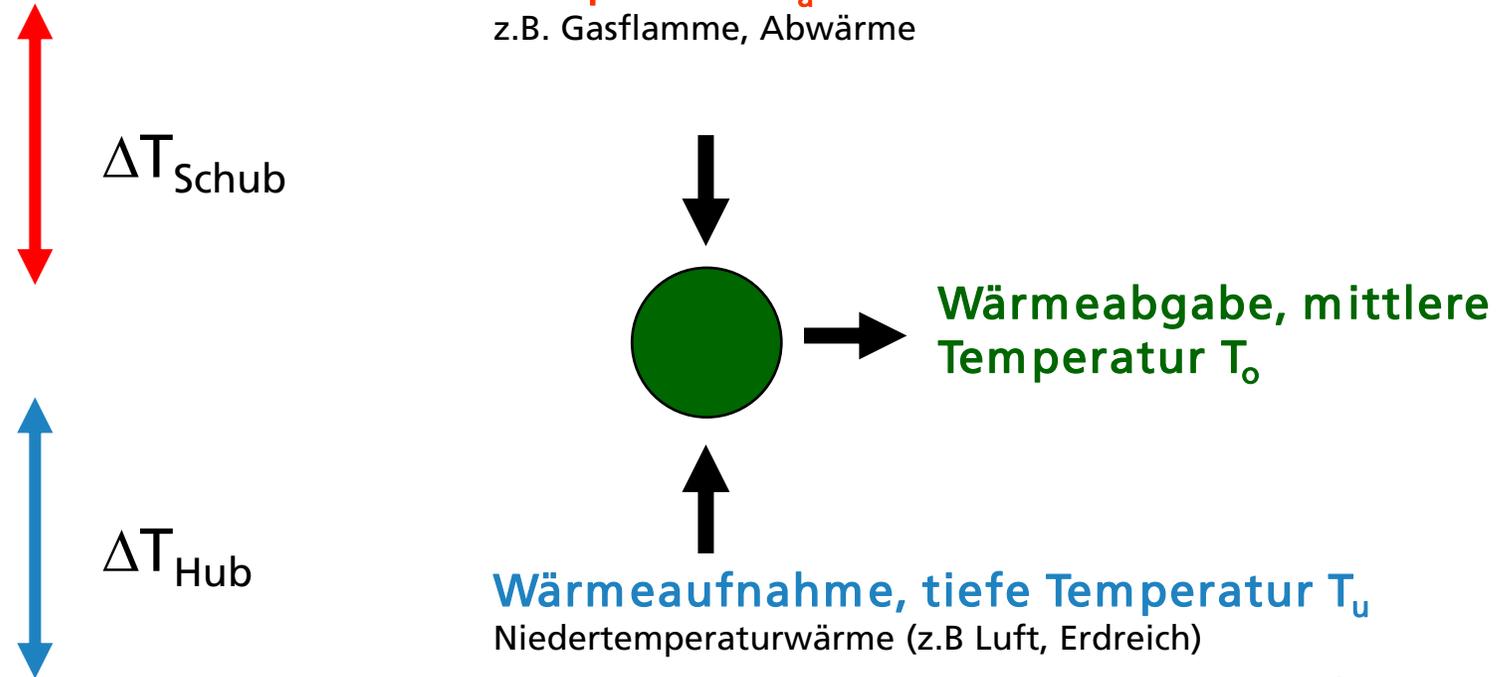
# Allgemeine Betrachtung – thermischer Antrieb



# Thermisch angetriebene Wärmepumpe

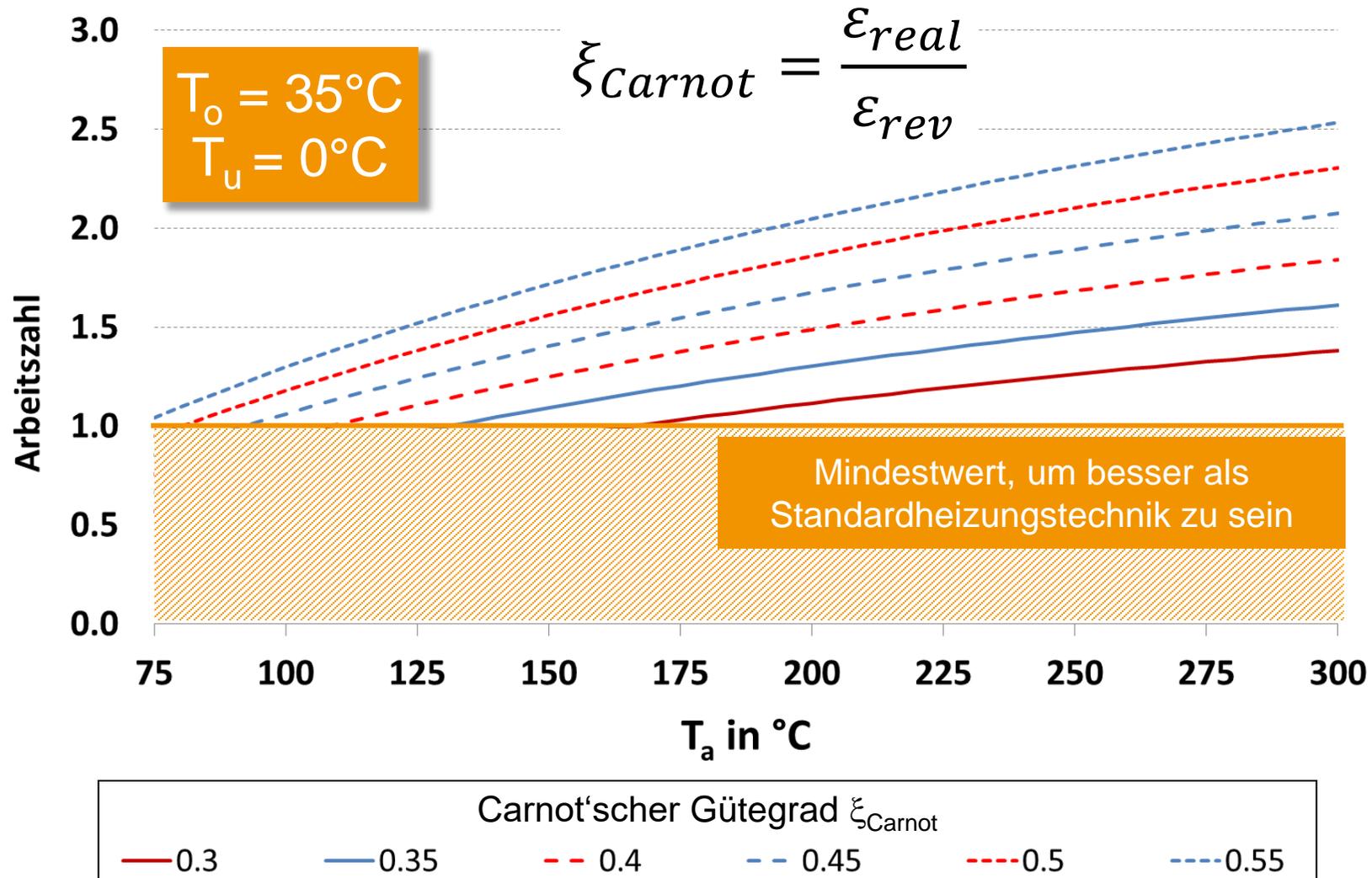
## Verbindung aus Wärmekraft- und Kraftwärmeprozess

Antriebswärme, hohe  
Temperatur  $T_a$   
z.B. Gasflamme, Abwärme



$$\varepsilon_{WP,th,rev} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutzwärme}}}{\dot{Q}_{\text{Antrieb}}} = \frac{1 - \frac{T_u}{T_a}}{1 - \frac{T_u}{T_o}} = \frac{\eta_C(T_u, T_a)}{\eta_C(T_u, T_o)}$$

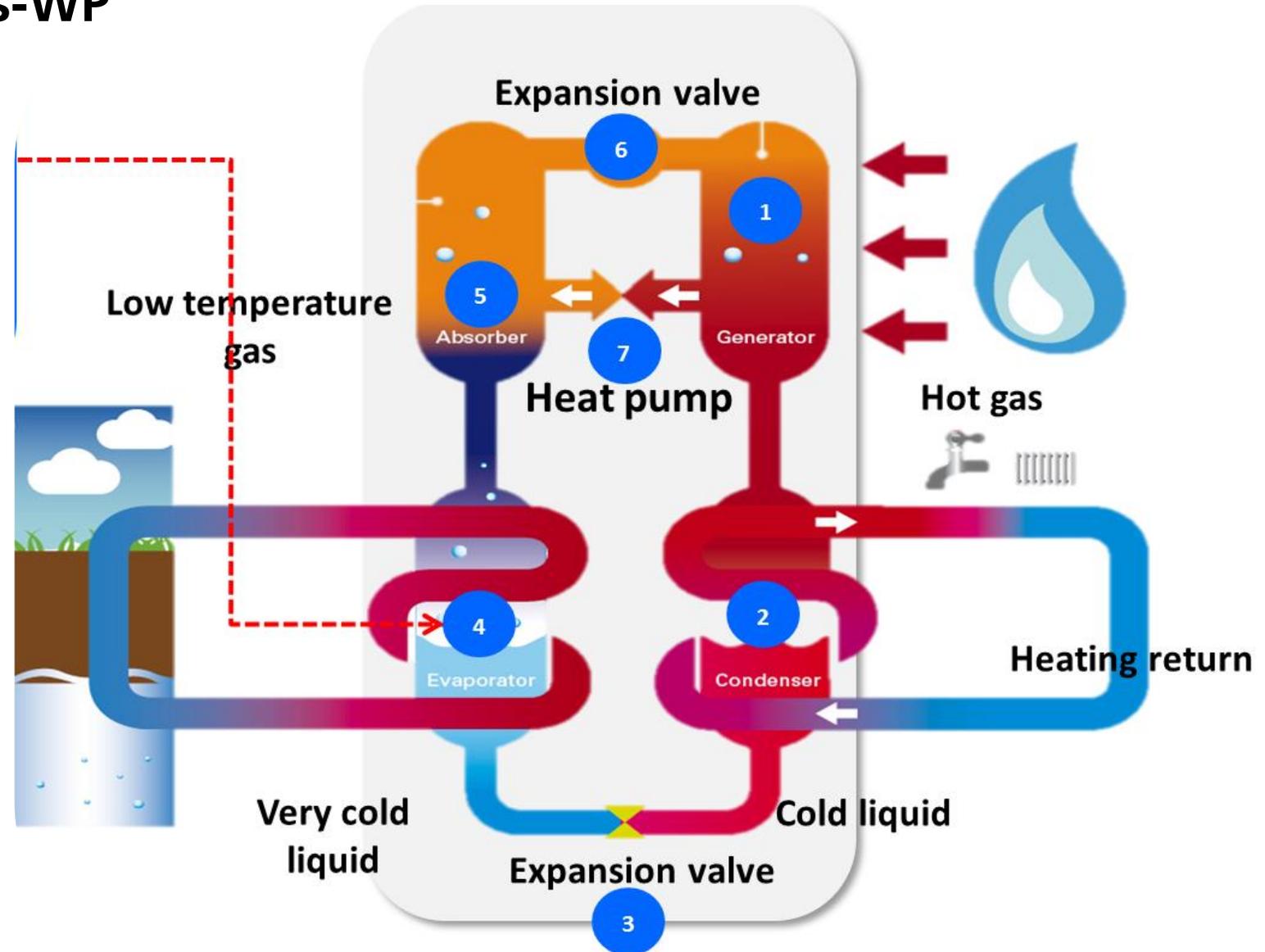
# Arbeitszahl thermisch angetriebene Wärmepumpe





# Funktionsprinzip Absorptions-WP

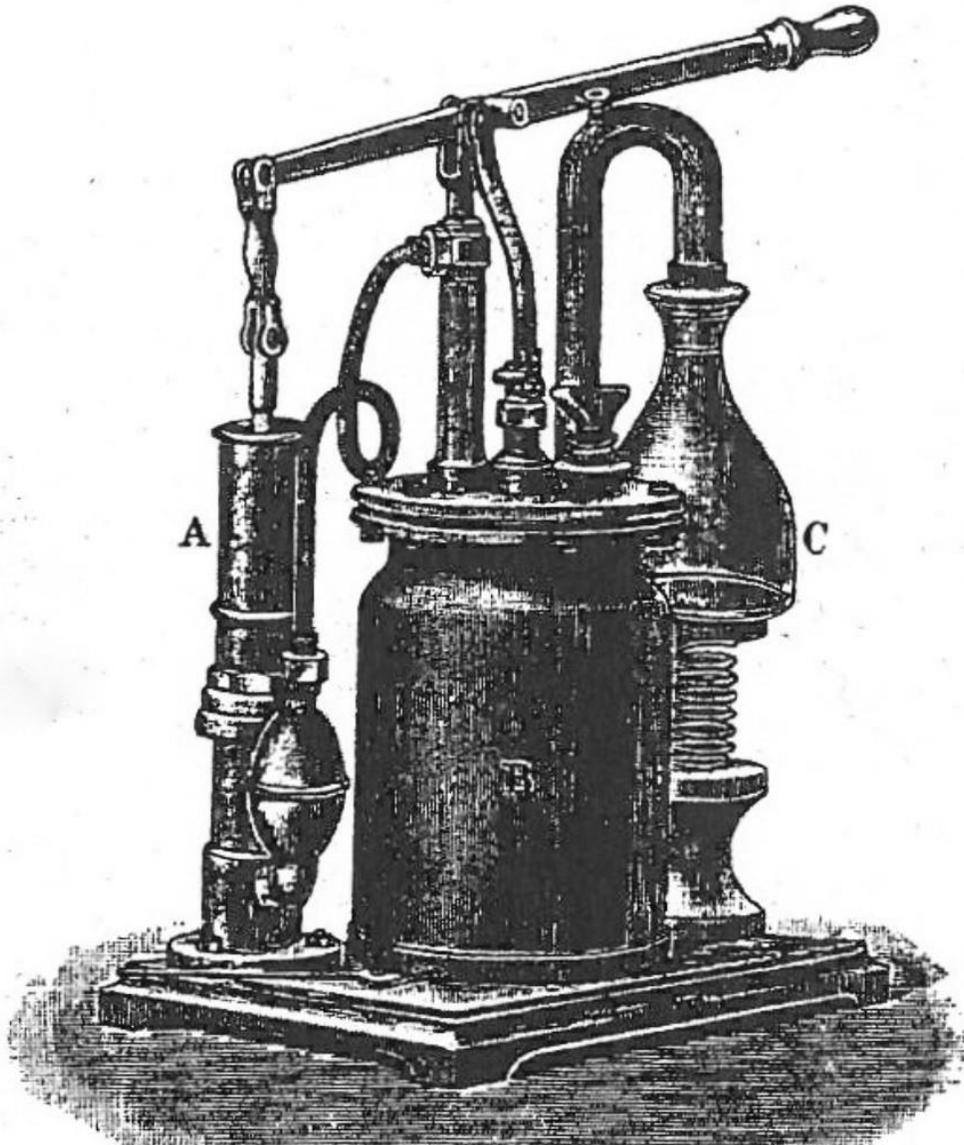
- Für Heizungsanwendungen:  
Wasser-Ammoniak
- Marktverfügbare Produkte  
verschiedener Anbieter
- Thermische Effizienz/Gas-  
Wirkungsgrad 1,3 – 1,7 bei  
hohen Heiztemperaturen  
(Vergleich Brennwertgerät: 0,95  
bezogen auf Brennwert)
- Auch mit EE-Gasen betreibbar ->  
wo und wann?



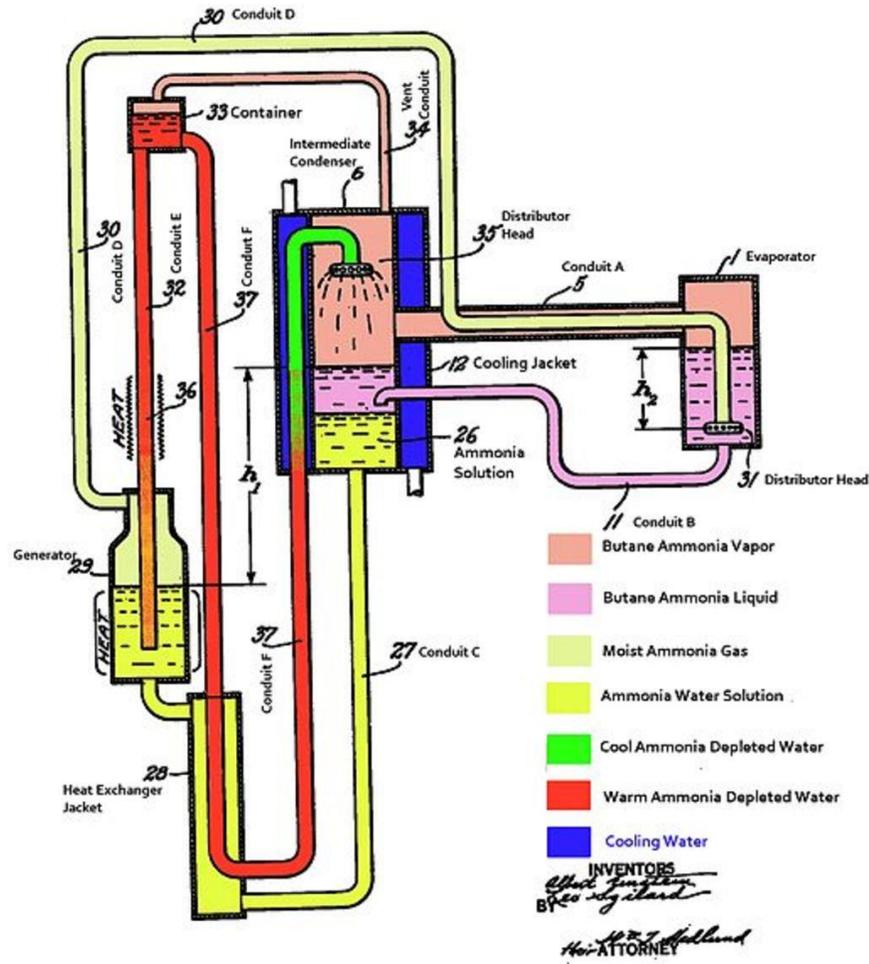
# Eismaschine von Edmond Carré (1850)

(aus Plank: Handbuch der Kältetechnik Bd.1)

- Ammoniak-Wasser  
Absorptionskältemaschine
- Erster kommerzieller Erfolg



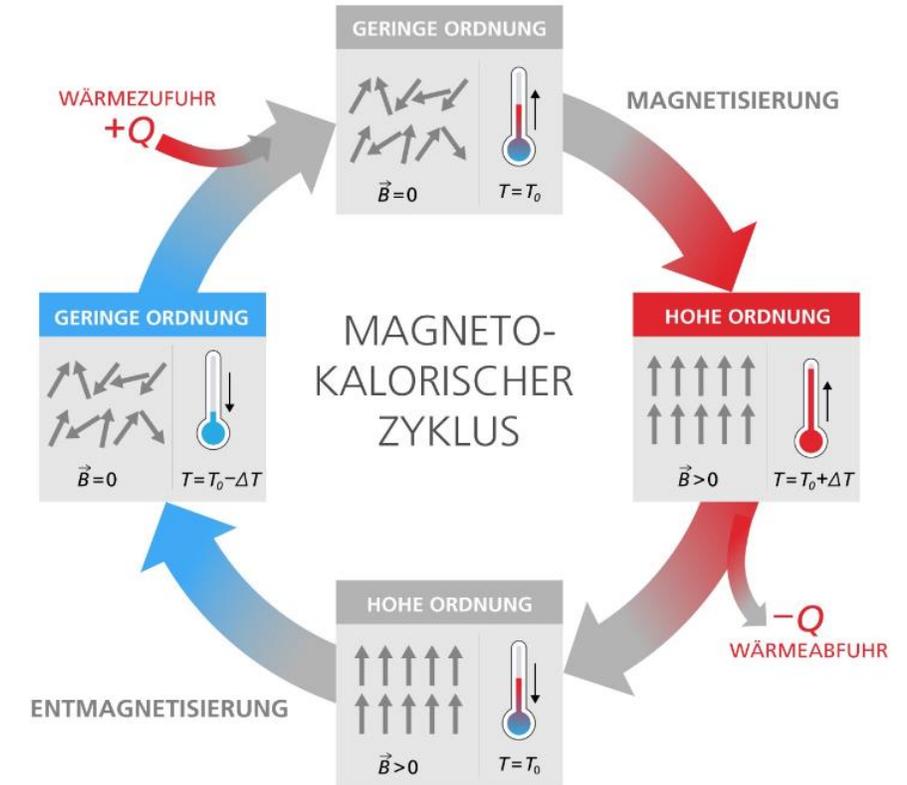
# Einsteins Kühlschranks



- Albert Einstein und Leo Szilard in den 20er-Jahren: Entwicklung neuartige Varianten des Haushalts-Kühlschranks (Diffusions-Absorptions-Prozess, kondensierendes Hilfsgas)
- Kühlschrank = Wärmepumpe
- Variante einer thermisch angetriebenen Absorptionswärmepumpe – waren seit Ende des 19. Jahrhunderts auch als Heizgeräte im Einsatz

# Kalorische Wärmepumpen

- Feststoffbasierte Wärmepumpen
- Elektro-, Magneto- und Elastokalorik
- Materialien zeigen reversible Erwärmung/Abkühlung bei Anlegen eines elektrischen/magnetischen Feldes bzw. unter mechanischem Druck
- Potentiell hohe Effizienzen, kommen ohne Kältemittel aus, geringer TRL -> geringe Temperaturhübe und Effizienzverluste durch Wärmeübertragung

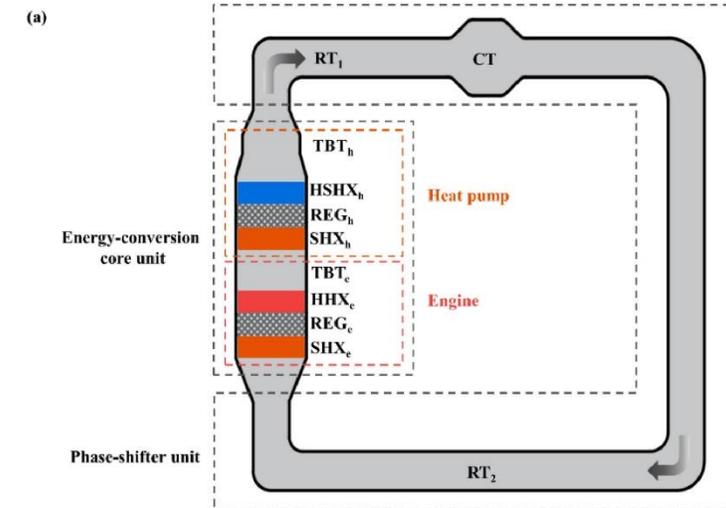


© Fraunhofer IPM

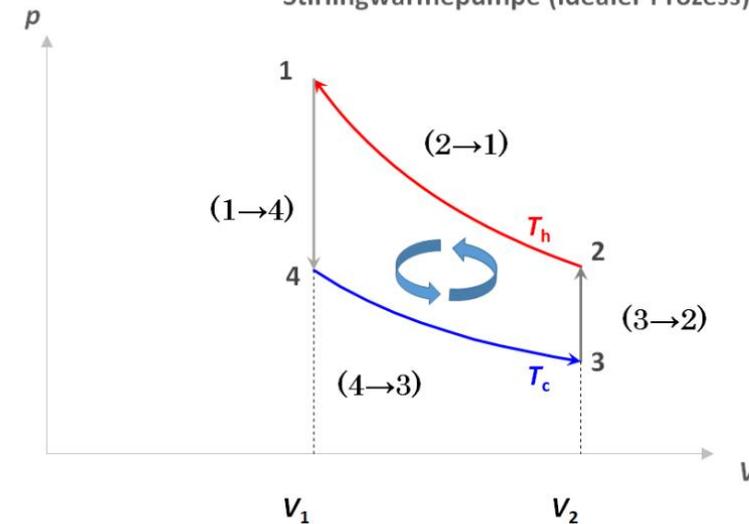
# Weitere Wärmepumpen

- Rotations-WP
- Thermoakustische WP
- Stirling-WP
- Vuilleumier-WP (thermisch angetrieben, ähnlich Stirling)
- Ericsson-WP: Thermische Verdichtung überkritisches CO<sub>2</sub>
- Gasmotorische WP -> siehe Kompressions-WP

## Thermoakustische Wärmepumpe

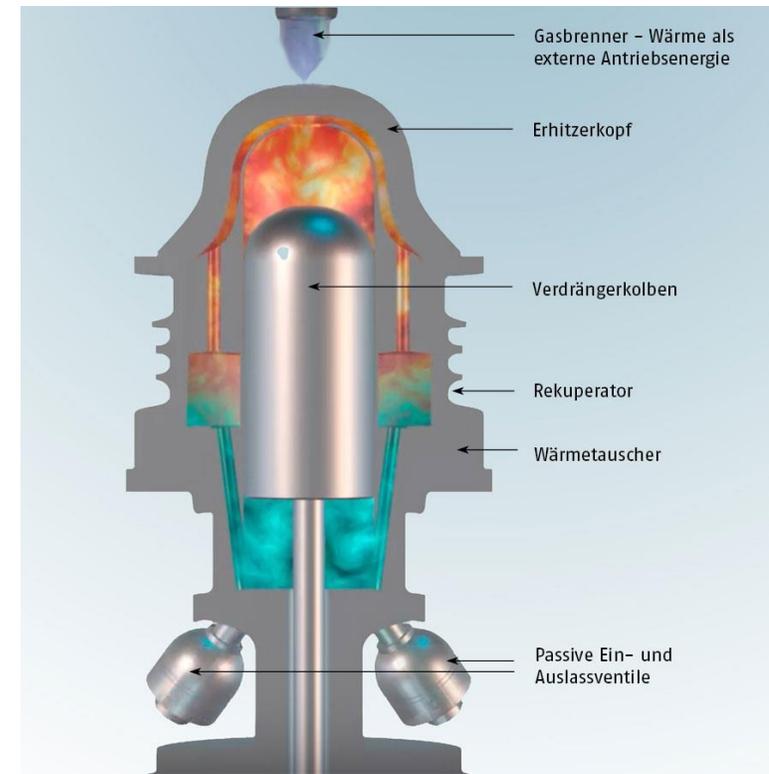
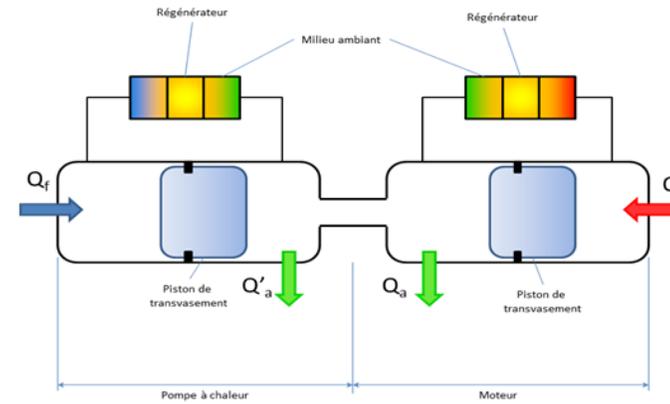


## Stirlingwärmepumpe (idealer Prozess)



# Weitere Wärmepumpen

- Rotations-WP
- Thermoakustische WP
- Stirling-WP
- Vuilleumier-WP (thermisch angetrieben, ähnlich Stirling)
- Ericsson-WP: Thermische Verdichtung überkritisches  $\text{CO}_2$
- Gasmotorische WP -> siehe Kompressions-WP

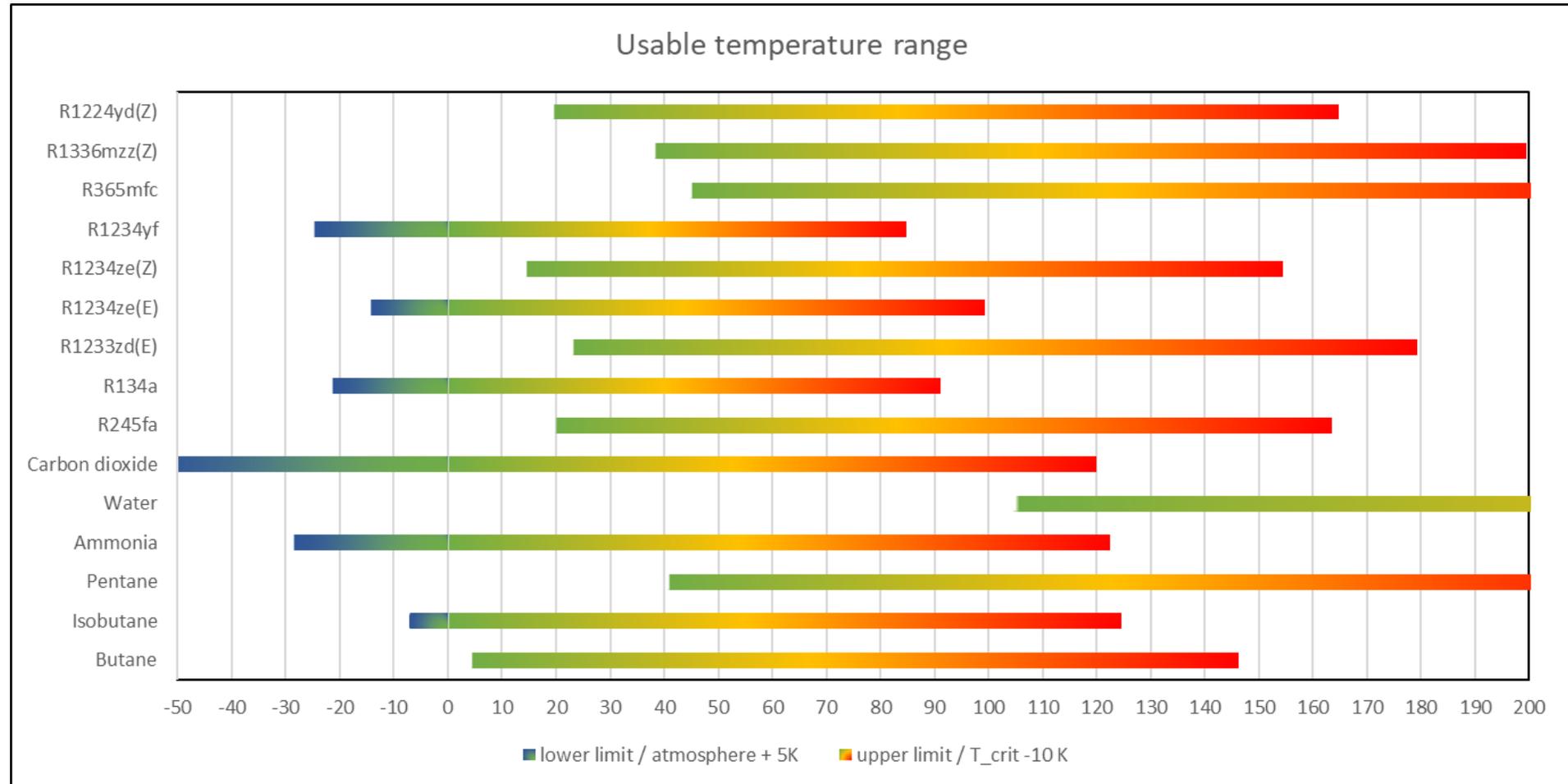


# Kältemittel

- Ausnutzen des Phasengleichgewichts Flüssigkeit-Gas von geeigneten Materialien
- Wichtigste Größen
  - Dampfdruckkurve in „vernünftigen“ Arbeitsbereich
    - Quell- und Senktemperaturen
    - Nicht zu hohe Drücke, nicht zu niedrige Drücke
  - Möglichst hohe Verdampfungsenthalpie → viel Wärmeumsatz beim Phasenübergang
- Wichtigste Klassen von Kältemitteln
  - Ammoniak
  - HFCKW und FCKW: halogenierte Kohlenwasserstoffe mit Chlor und Fluor (verboten)
  - FKW (HFO): halogenierte Kohlenwasserstoffe mit Fluor
  - KW: Kohlenwasserstoffe (i.d.R. brennbar) -> Propan, Butan, ....
  - Kohlendioxid
  - Wasser

# Kältemittel – Temperaturbereiche

- Unteres Limit definiert durch atmosphärischen Druck + 5 K
- Oberes Limit definiert durch  $T_{crit} - 10K$
- $CO_2$  Tripelpunkt bis transkritisch
- Ammoniak Limit  $110^\circ C$  (76 bar) für Kompressoren



# Verdichter

## ■ Funktion

- kontinuierliche Aufrechterhaltung der Verdampfung des Kältemittels
- Aufbau der Druckdifferenz zwischen Verdampferdruck und Kondensatordruck

## ■ Wirkungsweise

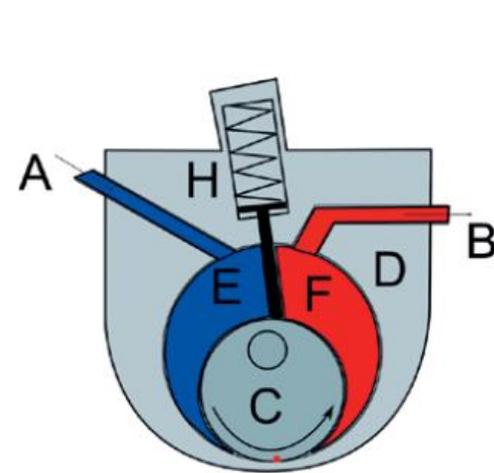
- Änderung des druckdicht umschlossenen Volumens des Arbeitsmediums in der Gasphase

## ■ Wichtigste Bauformen von Verdrängungsverdichtern

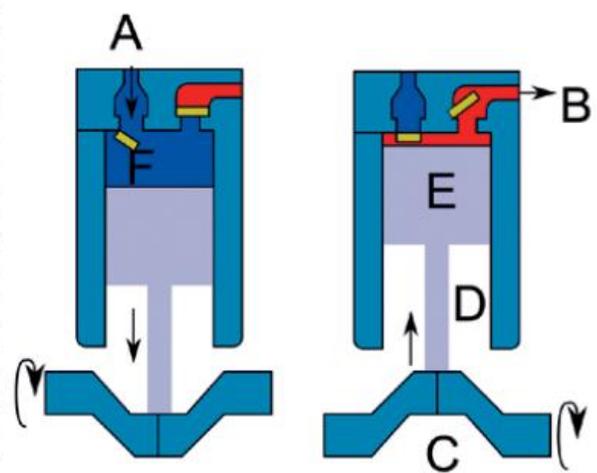
- Hubkolben
- Scroll-/Spiralverdichter
- Rollkolben-Verdichter
- Schraubenverdichter
- Turboverdichter

# Verdichterbauformen

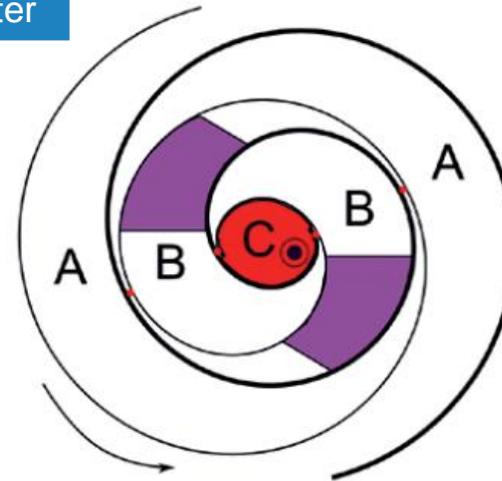
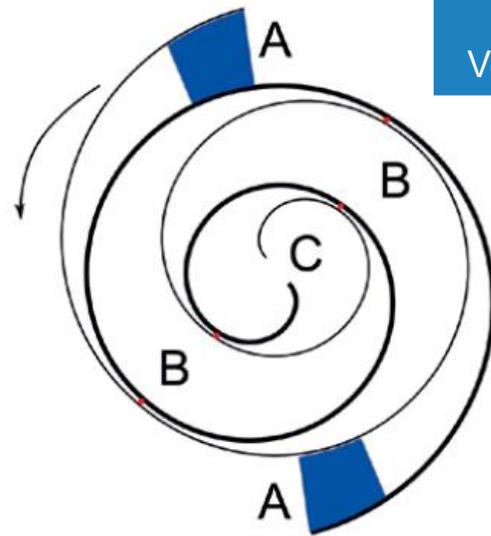
Rollkolben-Verdichter



Hubkolben-Verdichter

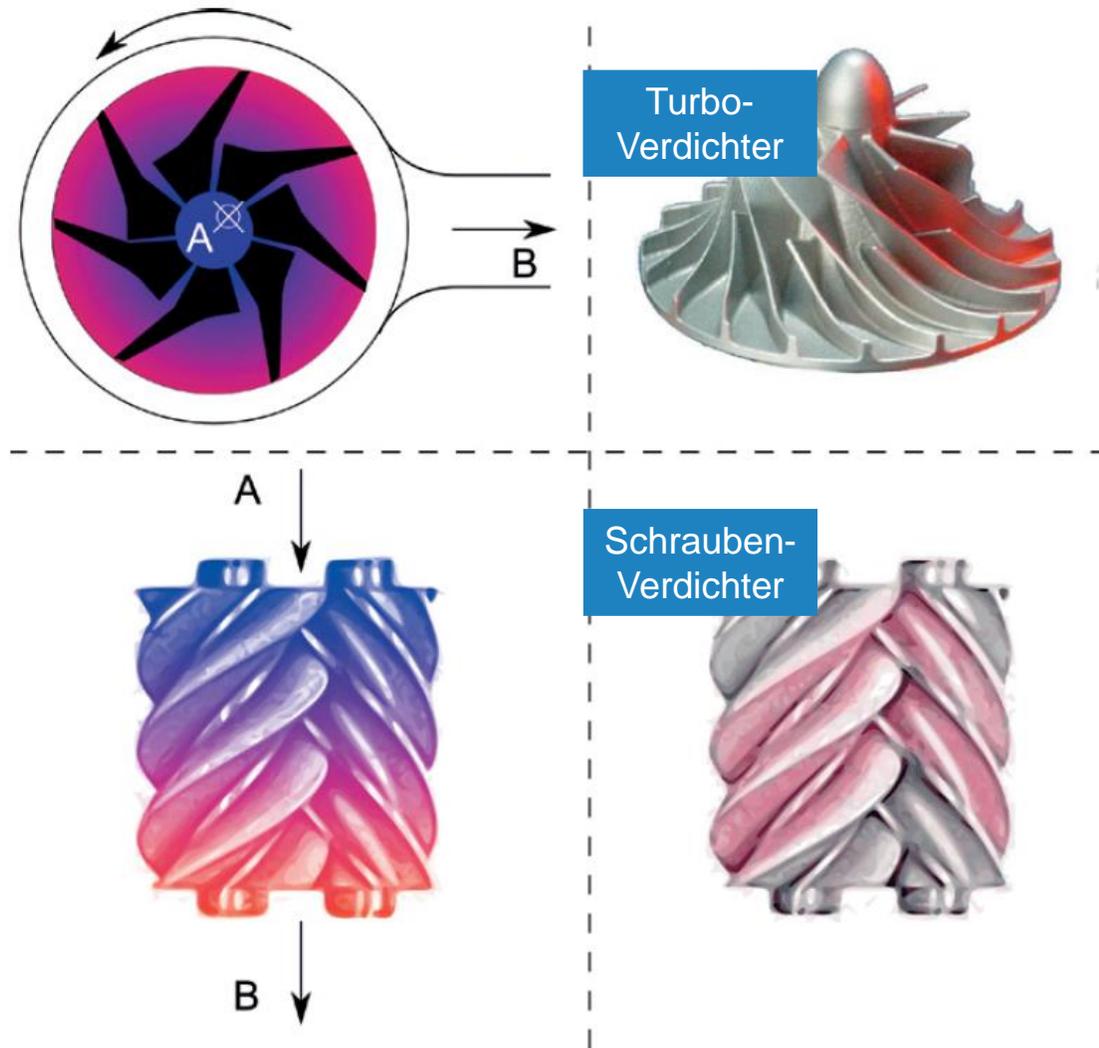


Spiral-Verdichter



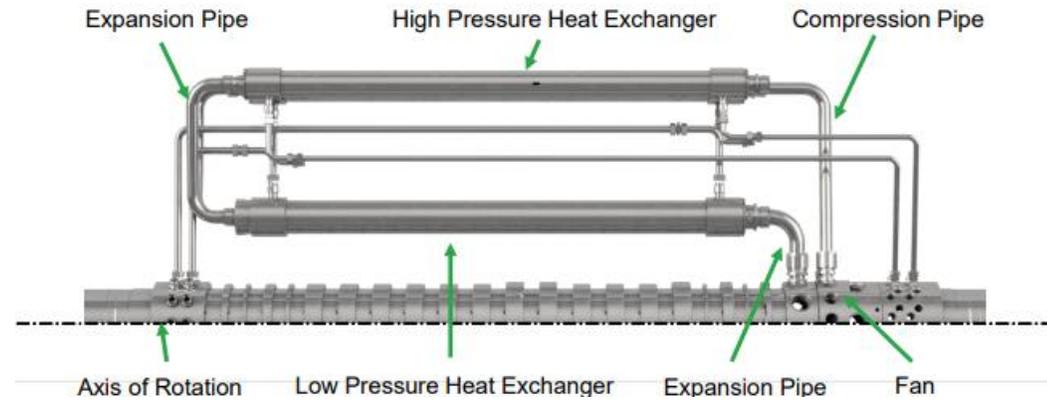
Quelle: Miara u.a., Wärmepumpen – Heizen, Kühlen, Umweltenergie nutzen. BINE-Fachbuch, erschienen im Fraunhofer IRB Verlag

# Verdichterbauformen



Quelle: Miara u.a., Wärmepumpen –  
Heizen, Kühlen, Umweltenergie nutzen.  
BINE-Fachbuch, erschienen im  
Fraunhofer IRB Verlag

# Rotationsverdichter



Source:ECOP

- Linksläufiger Joule-Prozess, kein Phasenübergang
- Kältemittel in geschlossenem Kreislauf rotiert um Achse
- Kompression durch Zentrifugalkraft, WÜ als Senke sind am Rand angeordnet = höhere Rotationsgeschwindigkeit
- Fluidzirkulation durch Ventilator, Expansion entgegen Zentrifugalkraft, Wärmequelle nahe Achse

+ potenziell hoher COP  
+ anpassbare Temperaturdifferenz  
(Rotationsgeschwindigkeit)  
+ ölfreie Kompression

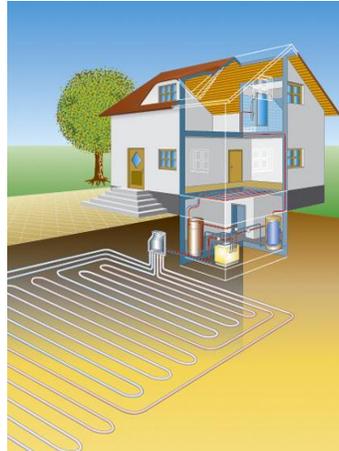
- max. Rotationsgeschwindigkeit limitiert das  
Druckverhältnis ~1800 Umin  
- Edelgas als Kältemittel  
- Rotierendes Gerät muss evakuiert sein

# Wärmequellen für Wärmepumpen



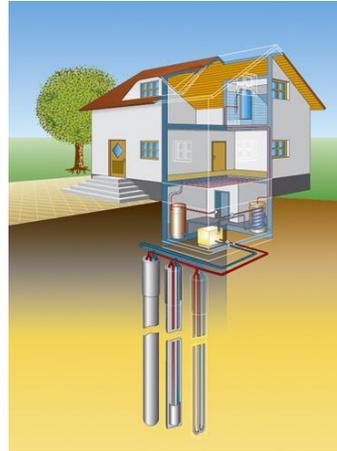
## □ Luft

- ✓ hervorragende Verfügbarkeit
- ✓ geringste Investition



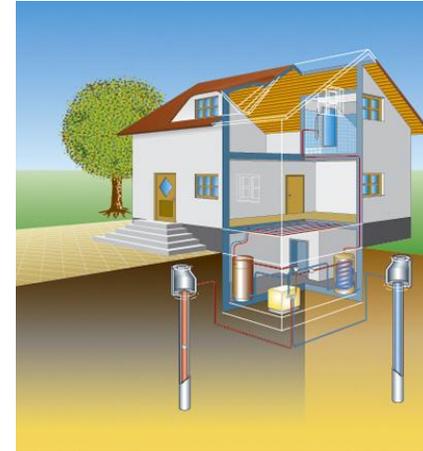
## □ Erdreich

- ✓ gute Verfügbarkeit
- ✓ hohe Effizienz
- ✓ Flachkollektoren oder Erdsonden



## □ Wasser

- ✓ selten verfügbar
- ✓ hohe Effizienz



## ■ Weitere Quellen:

- Niedertemperatur-Wärmenetze
  - Bisher selten verfügbar
  - Hohe Effizienz
- Solarkollektor/PVT
  - Ähnlich Luft
  - In Gebäudehülle integriert
  - Leise

# Verdampfer in Wärmepumpen

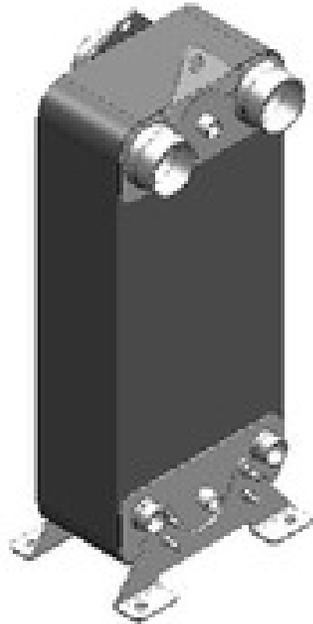
## ■ Bauformen

- Luftbeaufschlagte Verdampfer
  - Lamellenwärmeübertrager mit erzwungener Konvektion
  - Lamellenwärmeübertrager mit freier Konvektion
- Flüssigkeitsbeaufschlagte Verdampfer (Sole, Wasser-Glykol)
  - Rohrbündelverdampfer
  - Koaxialverdampfer
  - Verdampfer in Platten-WÜ-Bauweise
- Sonderbauformen
  - z.B. Multiquellen-Verdampfer (Kombiverdampfer)

## ■ Wärmeübertragung

- Sieden auf Innenseite (Kältemittel) → hohe Wärmeübertragungskoeffizienten
- Konvektive Wärmeübertragung auf Fluid- bzw. Luftseite

# Verdampfer-Bauformen



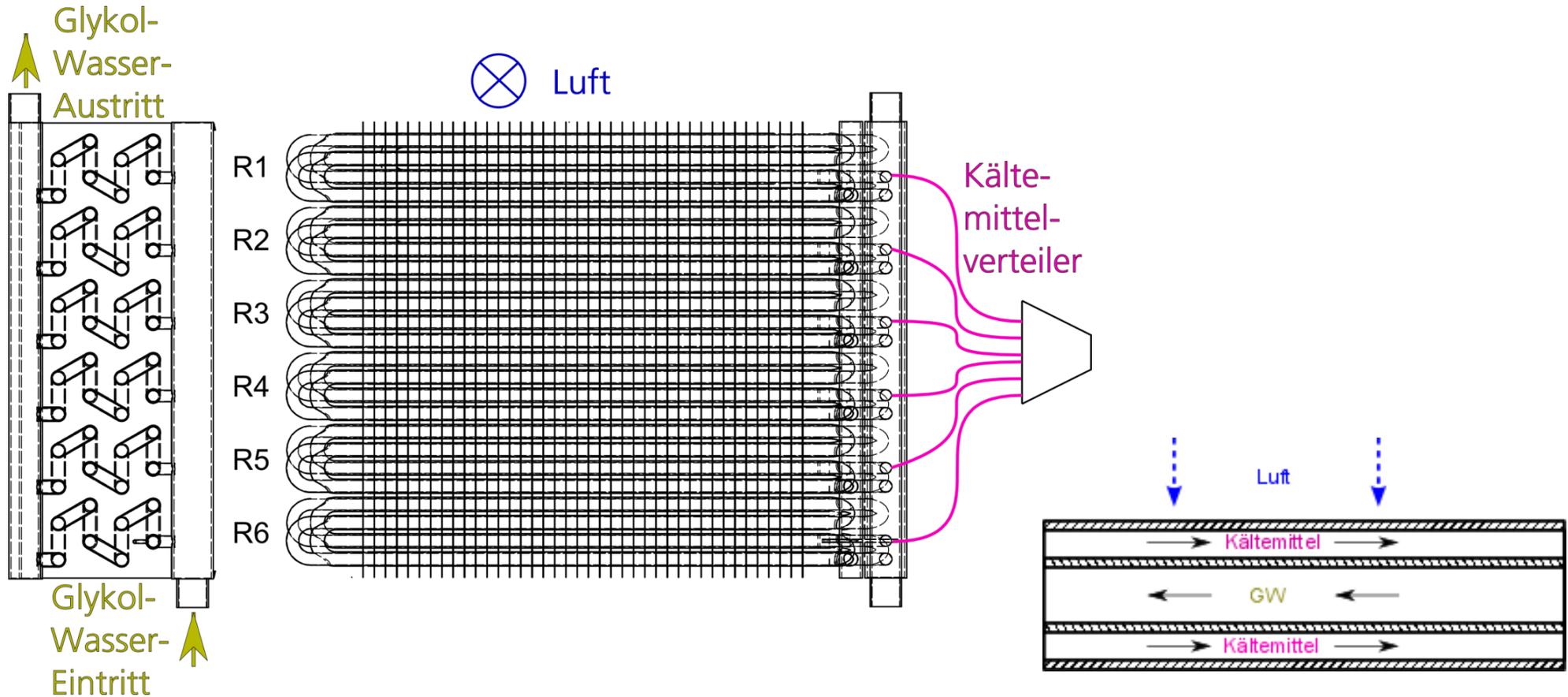
Verdampfer  
in Platten-  
WÜ-Bauweise

Luftbeauf-  
schlagter  
Verdampfer



Rohrbündel-Verdampfer

# Kombi-Verdampfer (3-Fluid-Verdampfer)



Entwicklung am Fraunhofer ISE

# Aktuelle Forschung

## Verwendung natürlicher Kältemittel: Propan-Wärmepumpen für Gebäude

- Projekte LC150 und LCR290: Propan-WP mit minimaler Kältemittelbeladung

- 10 kW aus 150 g

- Weitere Themen: Akustik, Sicherheit, höhere Temperaturen, NT-Quellen, Alterung, LCA

LC150 beim Besuch des Bundeskanzlers am Fraunhofer ISE, 27.2.2024. © Fraunhofer ISE

Effiziente Wärmepumpen

Propan-Kältekreis erreicht Rekordwerte



Kältekreis sind nachhaltig und kostengünstig. In LC150 arbeiten Forschende an der Entwicklung eines effizienten Kältekreises.

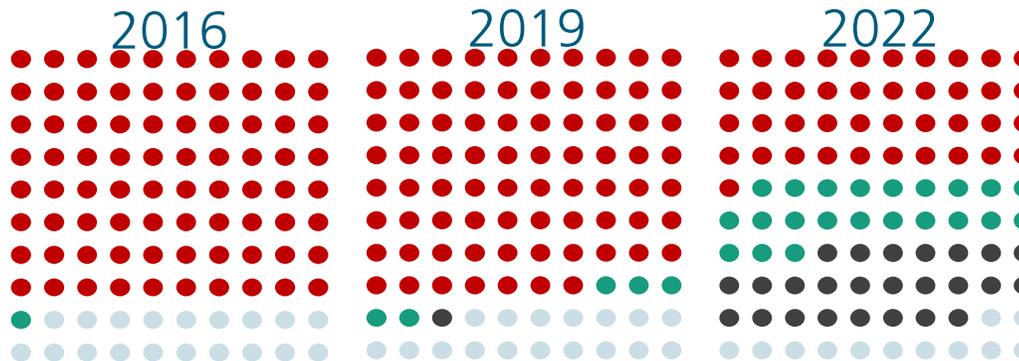
LC150 entwickelt ein Team des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE einen energieeffizienten Kältekreis für Wärmepumpen. Als Kältemittel verwenden die Forschenden eine geringe Menge Propan. Nun gelang ihnen ein Effizienzrekord.

Das ist die Kältemittelmenge, mit der die Forschenden von LC150 eine maximale Heizleistung erreichen konnten. Pro Kilowatt Heizleistung entspricht das rund 10 Gramm Propan mit der Propanmenge von nur fünf Feuerzeugen.

📌 LC150: Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan

Förderkennzeichen: 03EN4001A

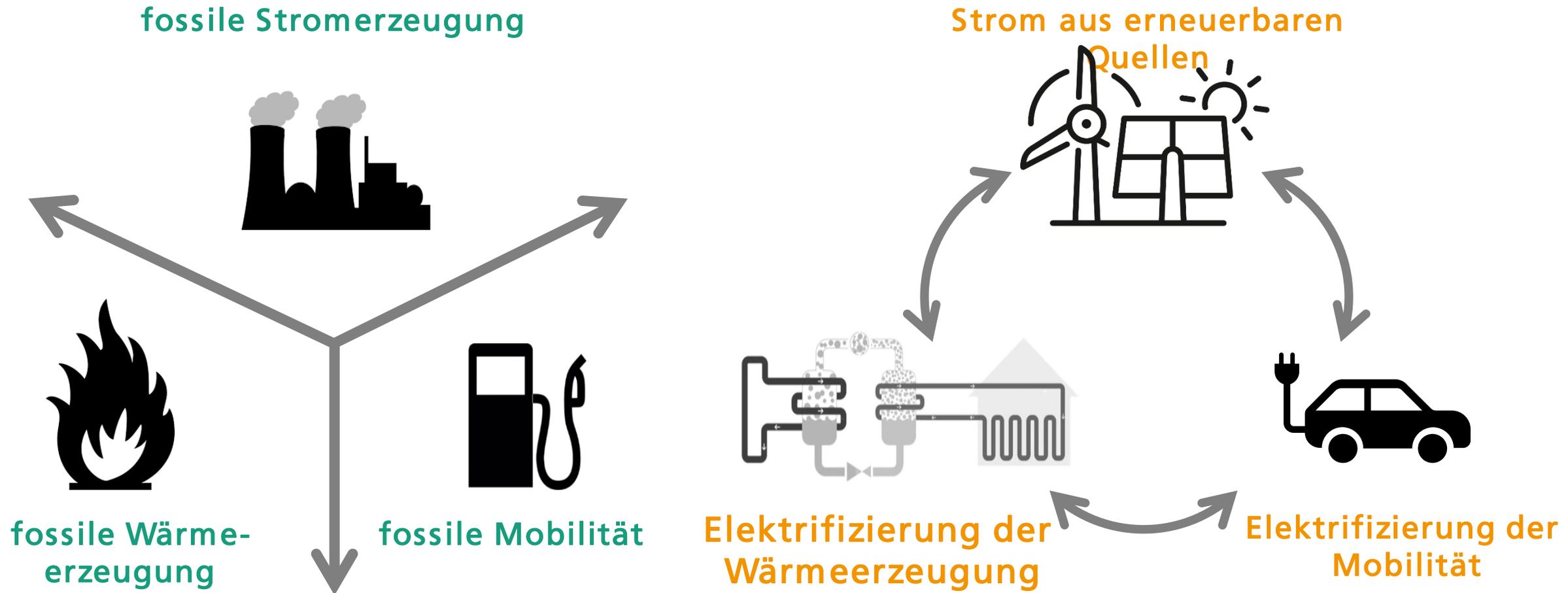
🕒 Projektlaufzeit



- R290
- R32
- R410A
- Andere

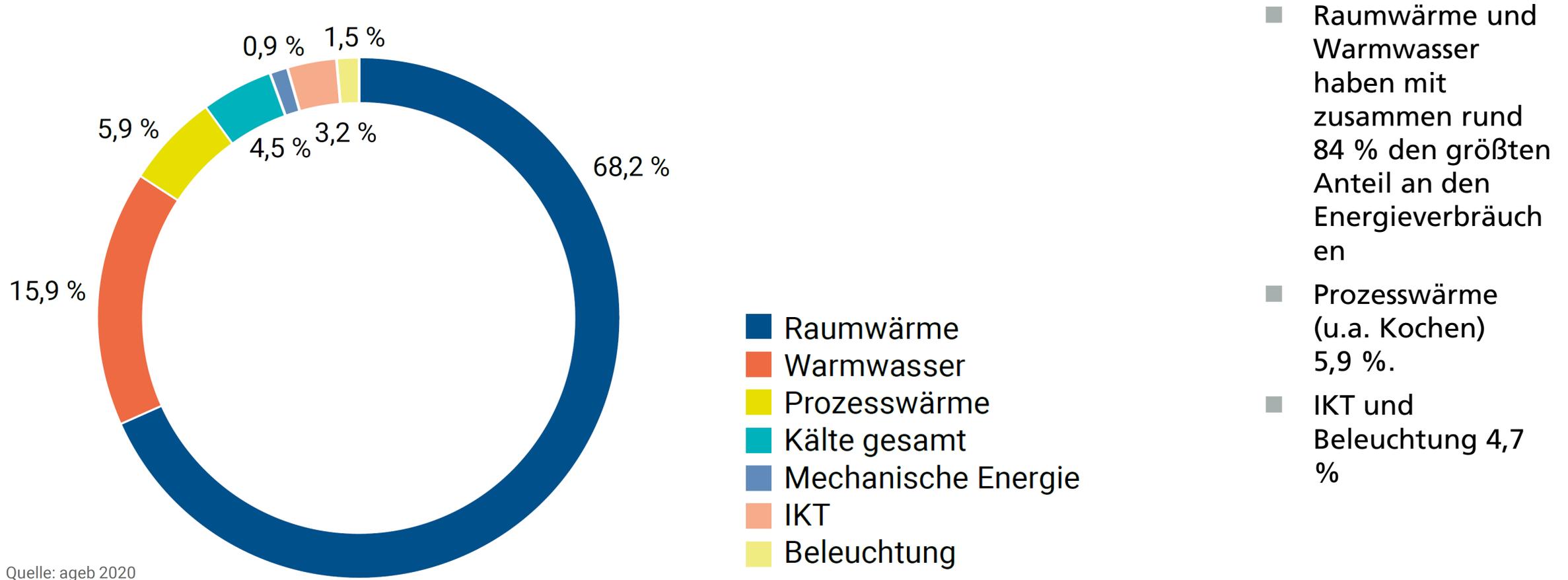
# Transformation des Wärmesektors

zentral zu dezentral, entkoppelt zu interaktiv



# Energieverbrauch und Klimaemissionen im Gebäudesektor

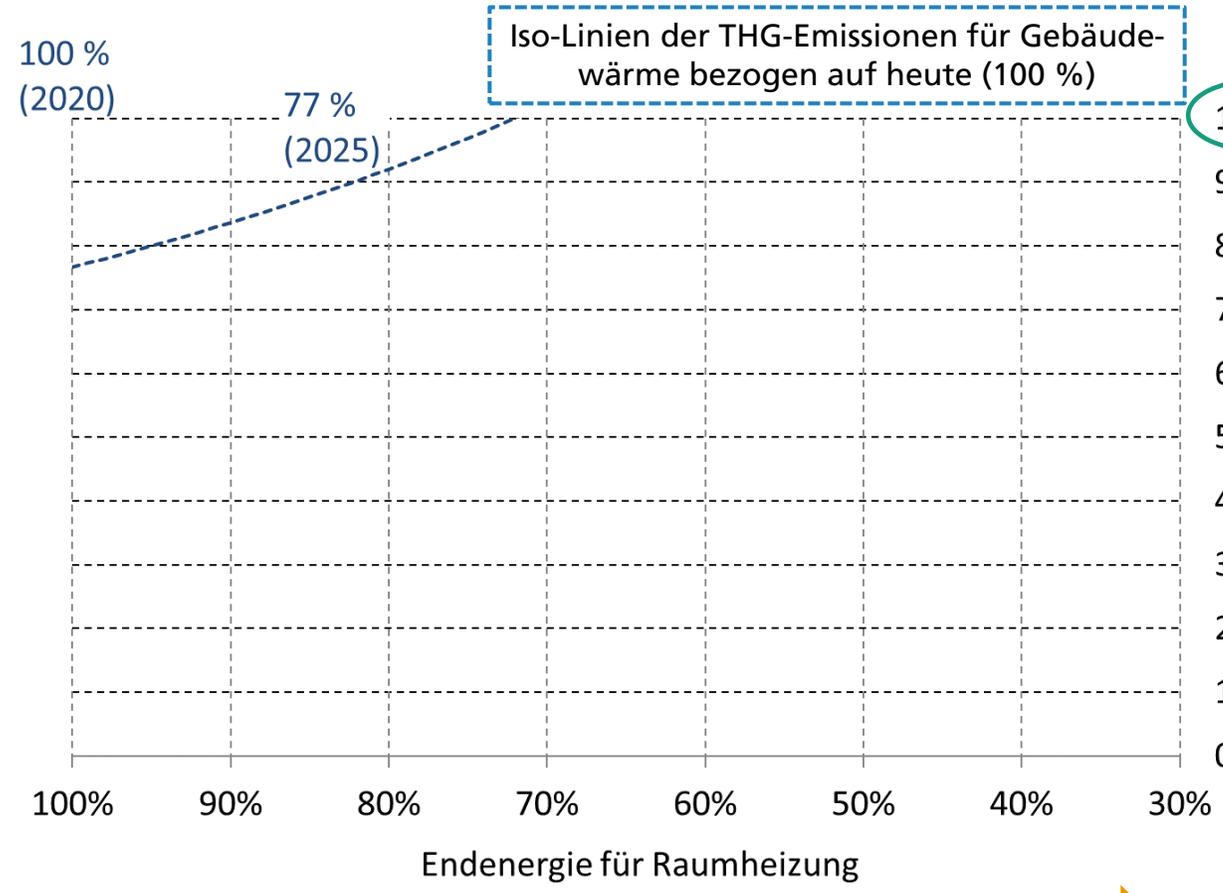
## Anteile der Anwendungen am Endenergieverbrauch der Haushalte 2019



Quelle: ageb 2020

# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



Heute: rund 150 g/kWh

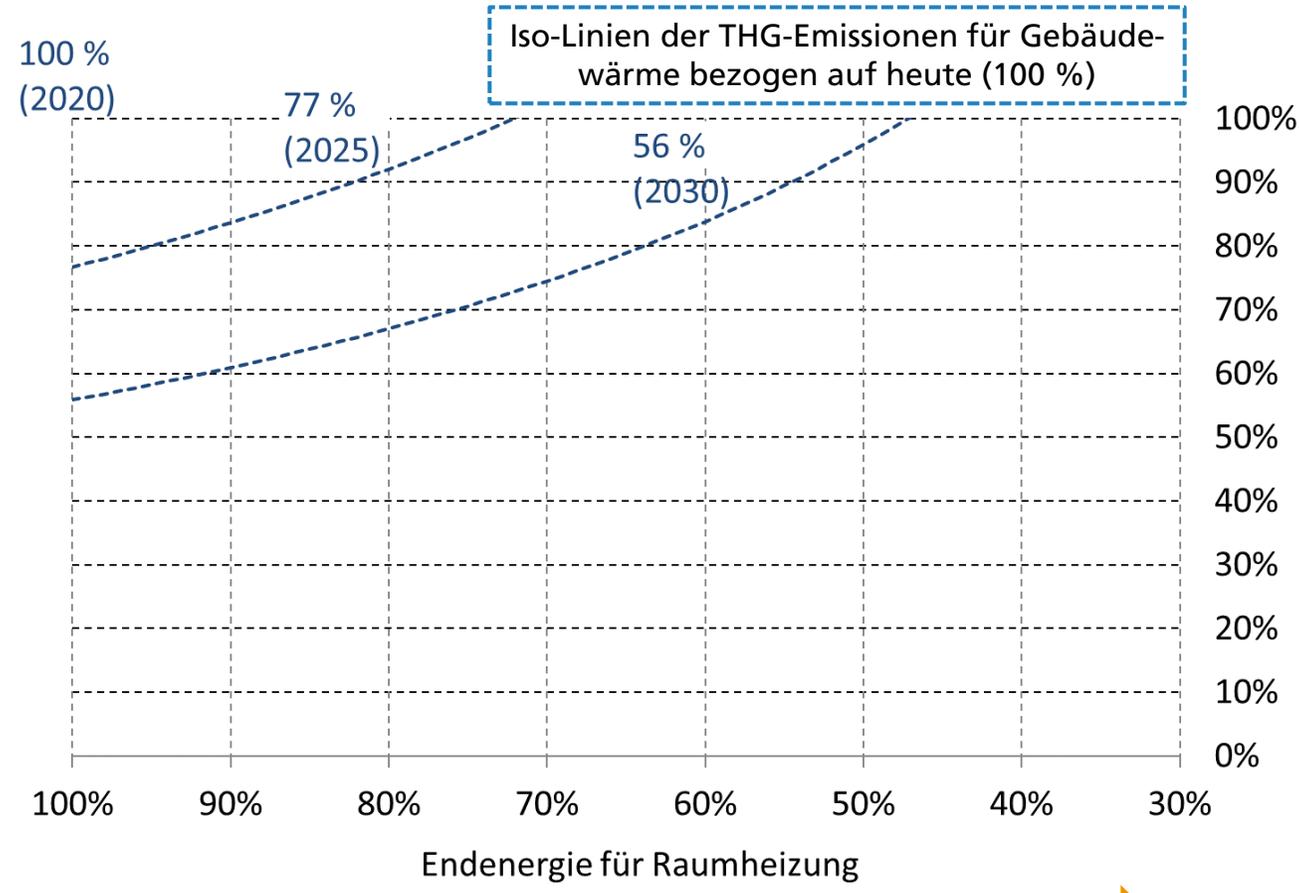
Einsatz klimaschonender Wärmetechnik

Energetische Sanierung Gebäudehülle

Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92

# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen Wärmebereitstellung

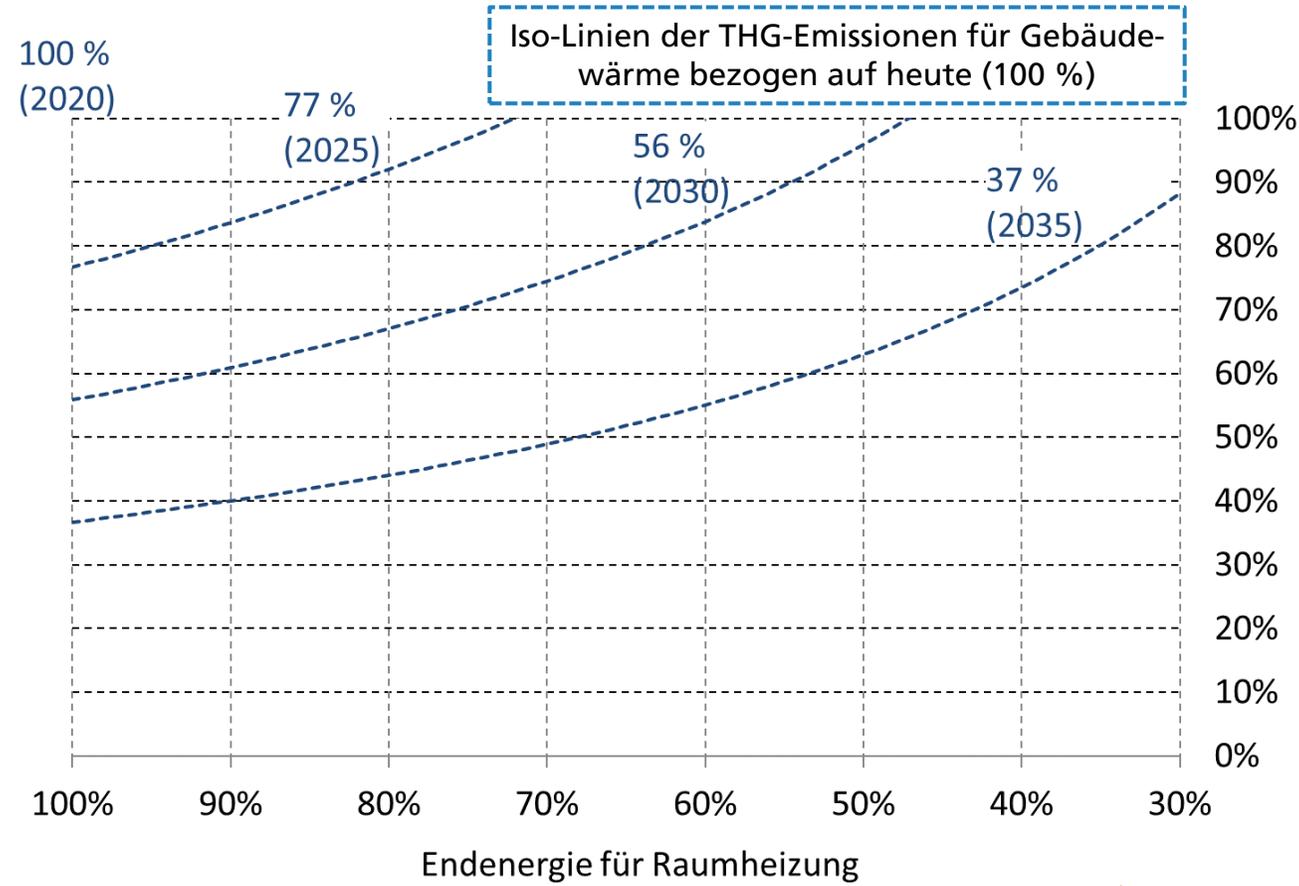


Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67



# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen Wärmebereitstellung

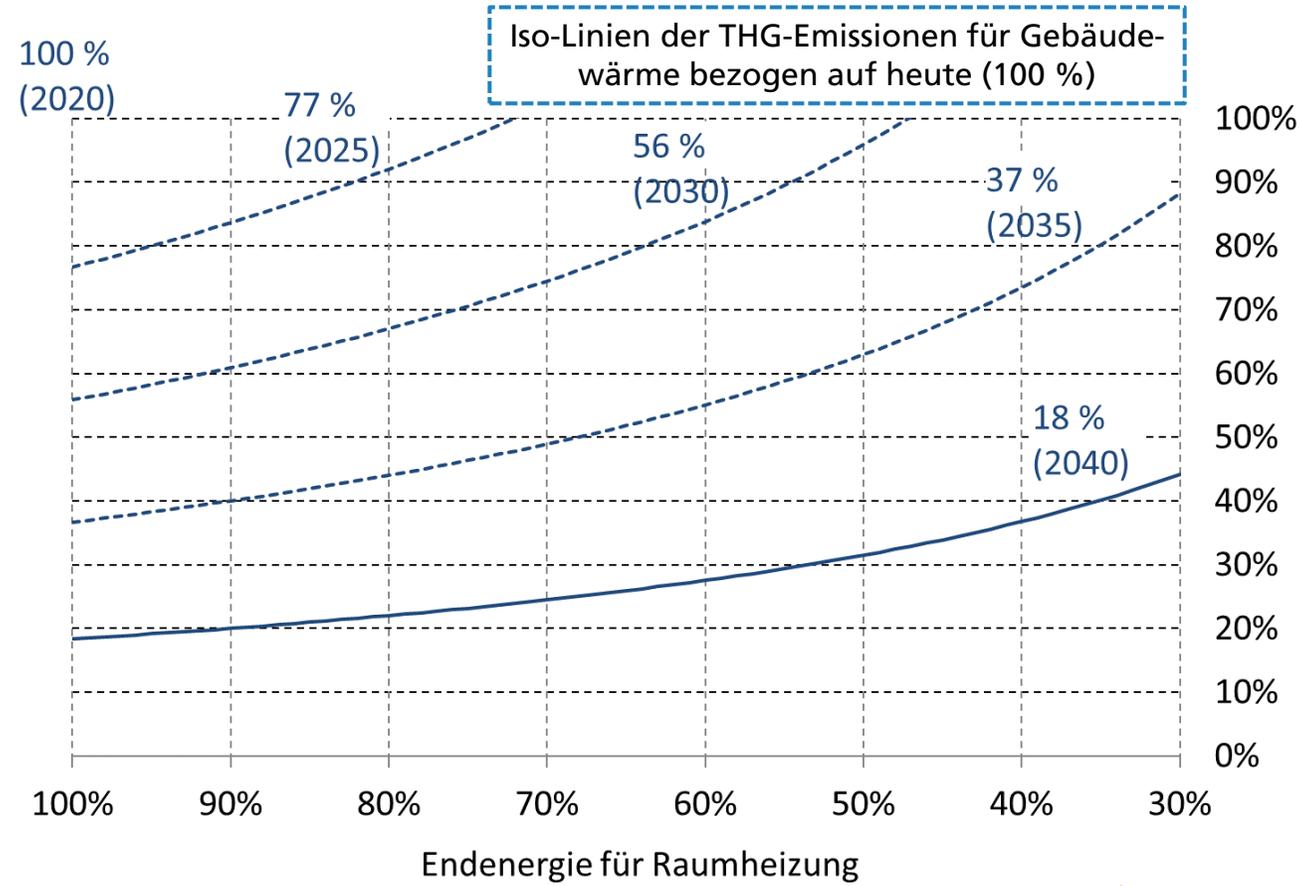


Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67
2035	44



# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen Wärmebereitstellung

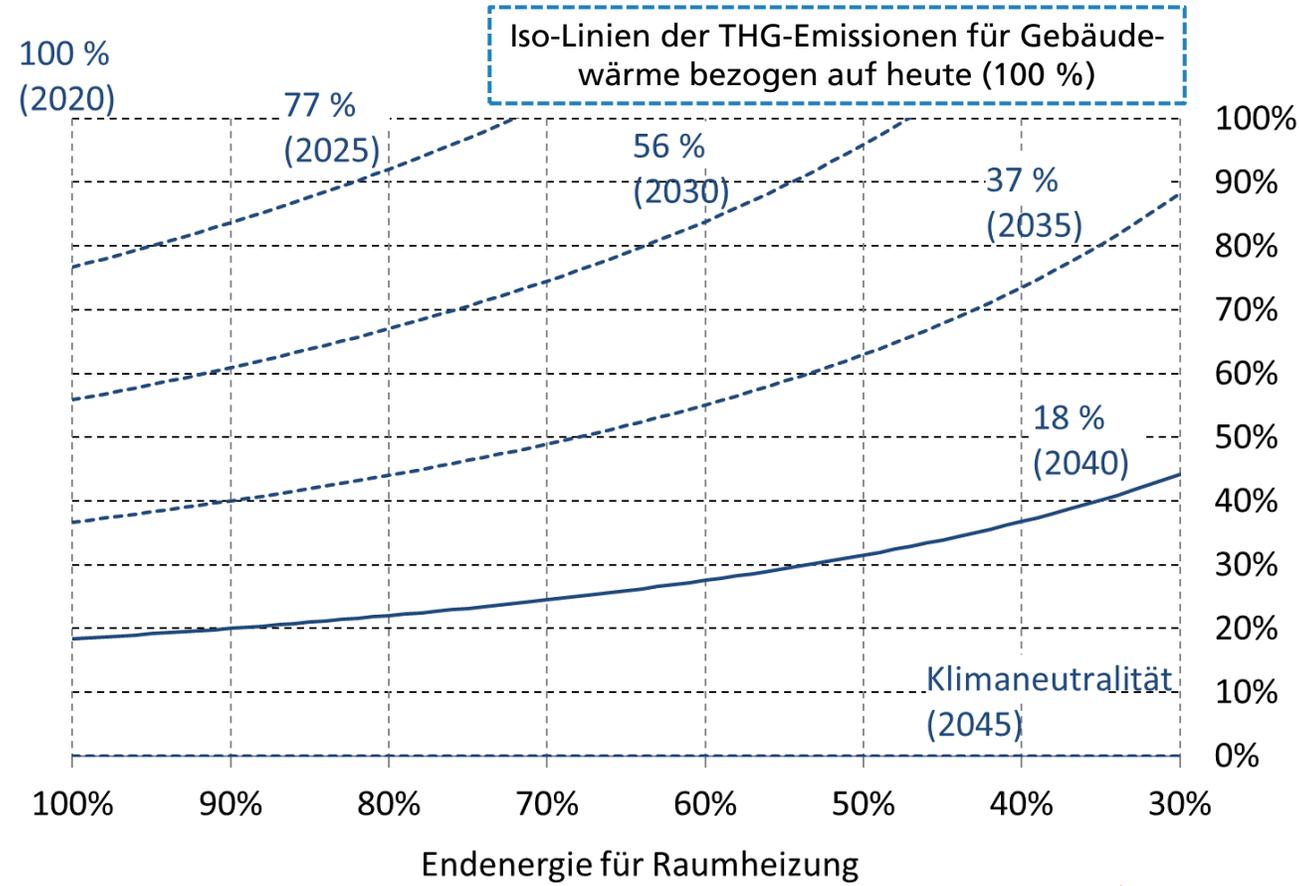


Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67
2035	44
2040	22



# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen Wärmebereitstellung

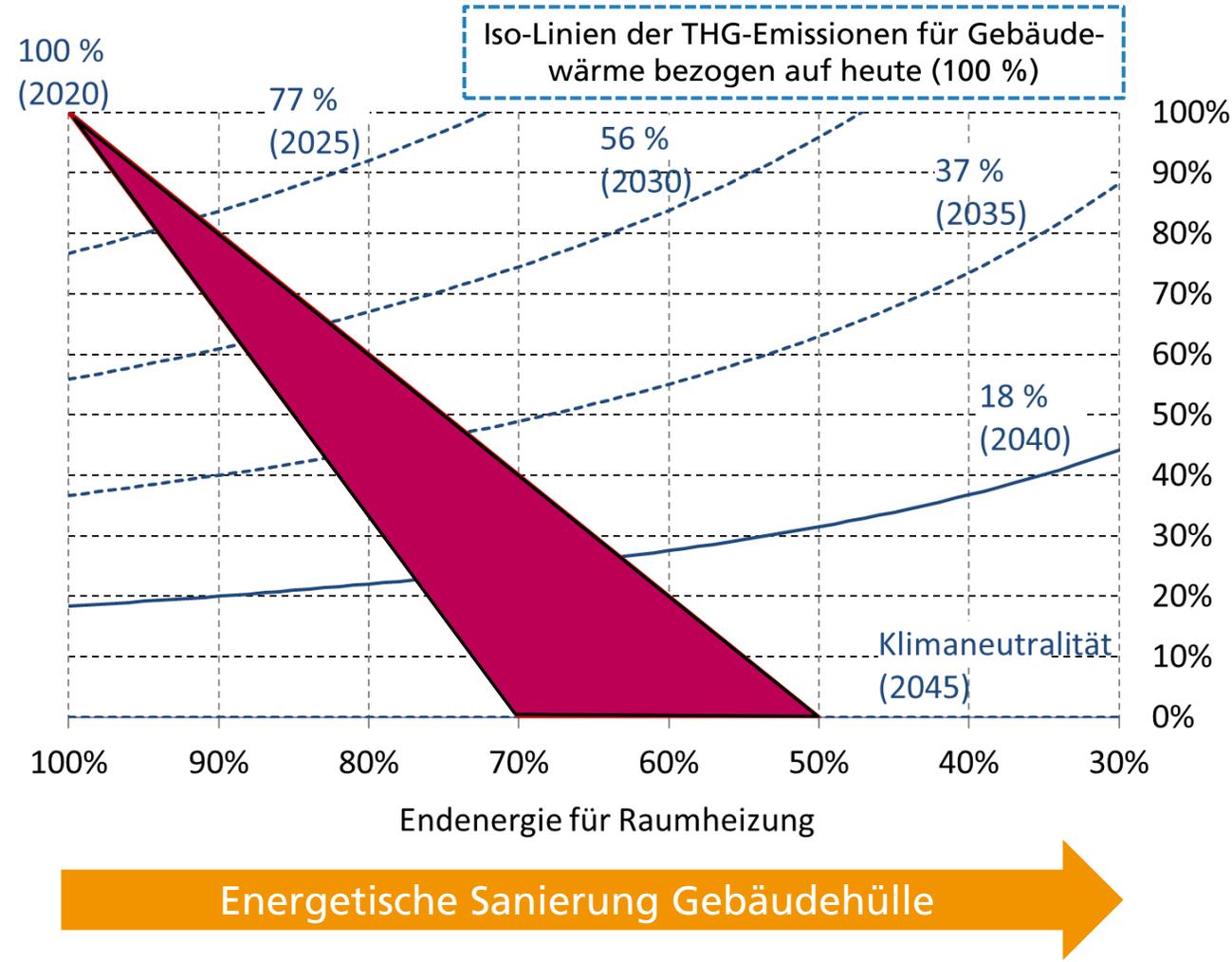


Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67
2035	44
2040	22
2045	0



# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

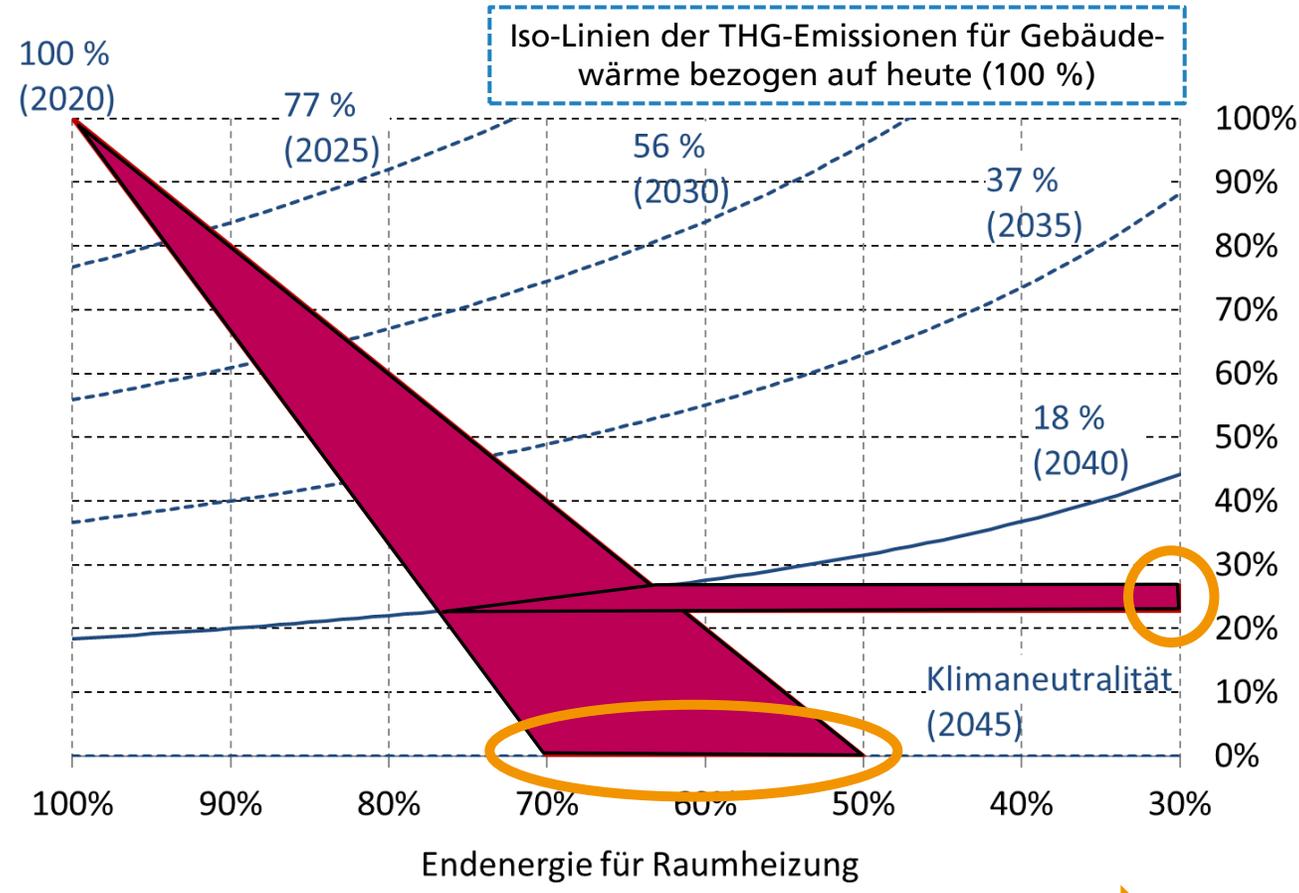
## Zielpfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67
2035	44
<b>2040</b>	<b>22</b>
2045	0

# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Zielfade zur Klimaneutralität (Raumwärme und Warmwasser)



spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen Wärmebereitstellung



Jahr	(Ziel-)Wert Bundes-Klimaschutzgesetz (Mio t CO <sub>2</sub> e)
2020	120
2025	92
2030	67
2035	44
<b>2040</b>	<b>22</b>
2045	0



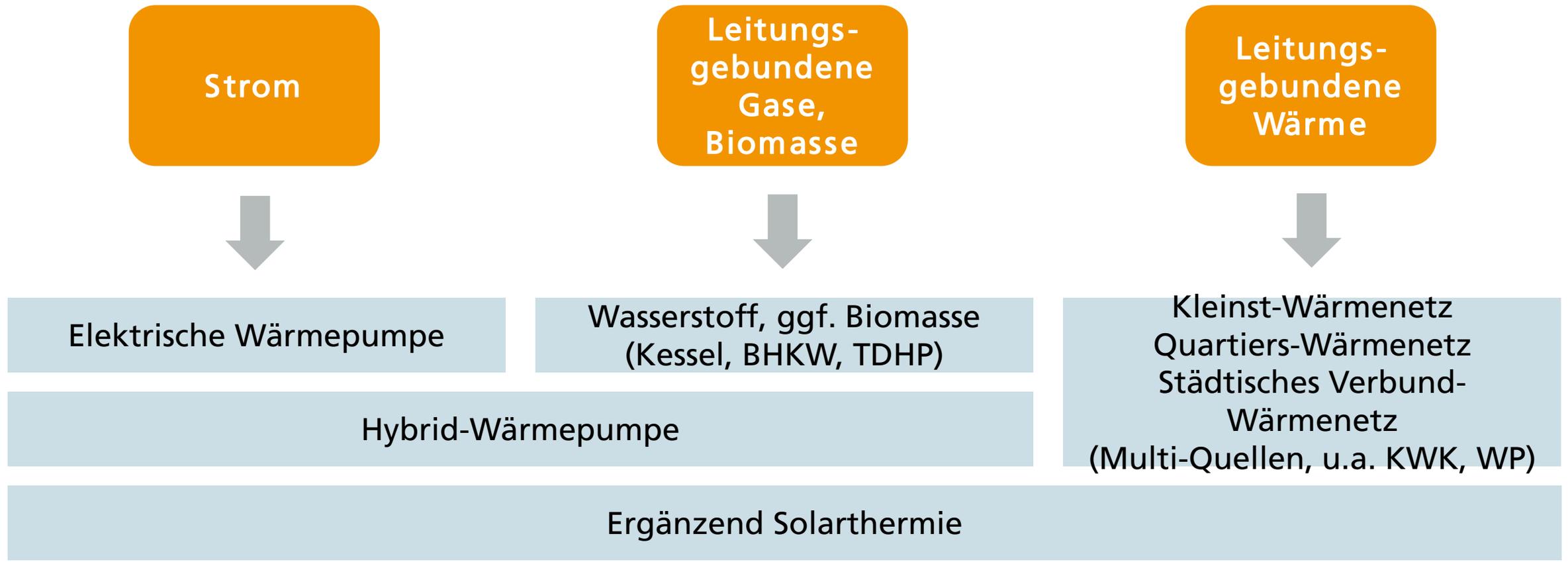
# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Anmerkungen zur energetischen Sanierung

- Kosten pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub> steigen überproportional bei hoher Sanierungstiefe
  - Sanierung von Bestandsgebäuden dennoch notwendig
    - Begrenzung des Energiebedarfs und damit des Einsatzes erneuerbarer Energien für Raumheizung
    - Absenkung von Heiztemperaturen (vorteilhaft für Einsatz von Wärmepumpen und Solarthermie)
  
- Sicherstellung einer ausreichenden energetischen Sanierung des Gebäudebestands bis 2045

# Lösungsansätze für einen klimaneutralen Gebäudesektor

## Grundsätzliche Optionen für eine klimaneutrale Wärmeversorgung



# Drei Phasen mit Grundsatzfragen

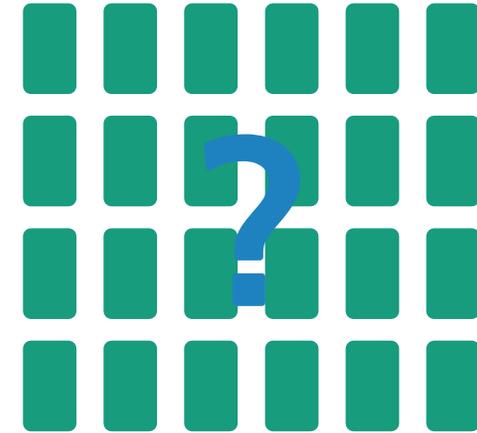
## Fragestellungen zum Thema Wärmepumpen



Funktionieren  
Wärmepumpen  
überhaupt?



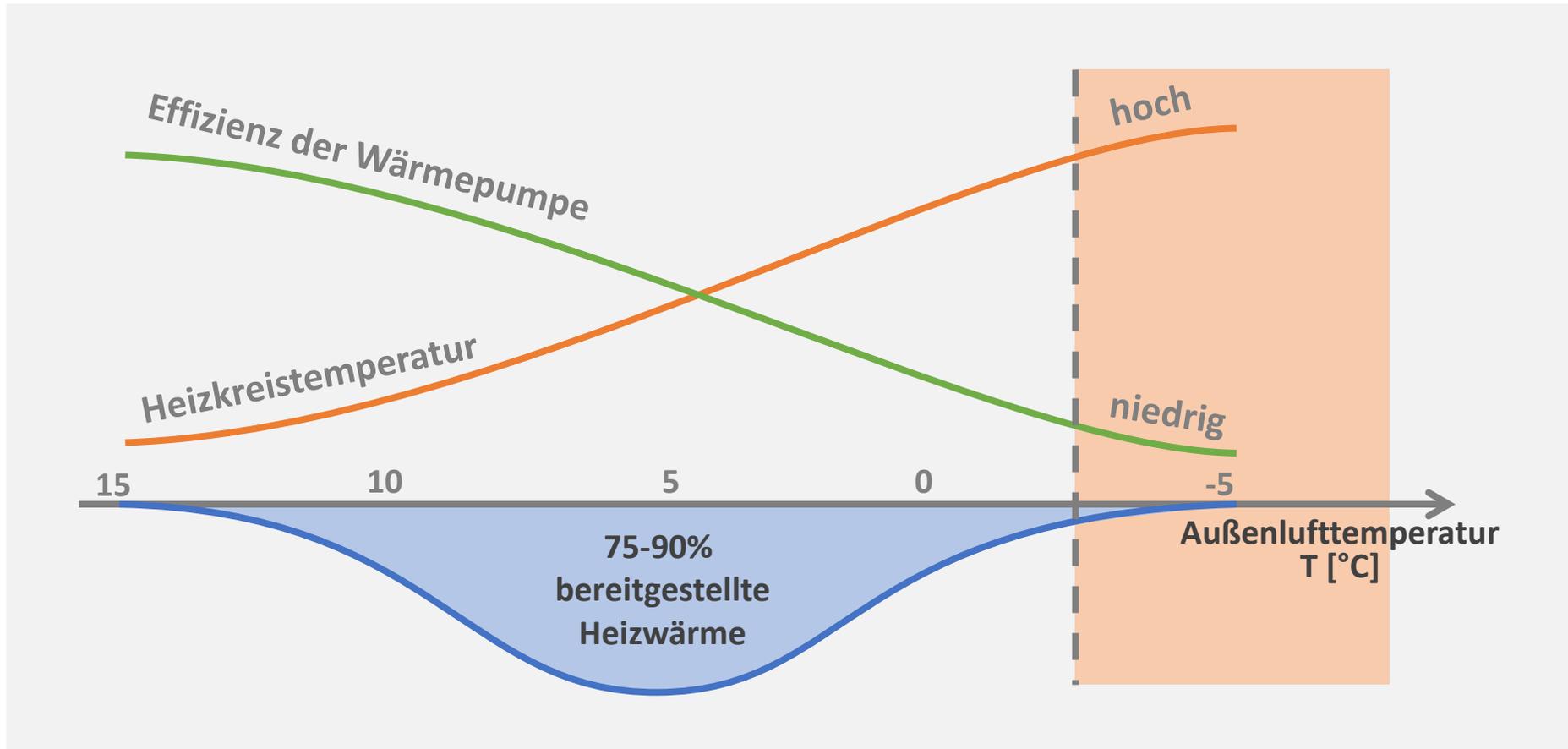
Wie gut  
funktionieren  
Wärmepumpen?



Wie schaffen wir  
einen schnellen  
Hochlauf?

# Effizienz von Wärmepumpen - Randbedingungen

## Wann wird die Heizenergie bereitgestellt?





**4**  
abgeschlossene  
Feldtests seit  
20 Jahren, ein  
laufendes  
Projekt

von  
**Neubau**  
bis  
nicht sanierter  
**Bestand**

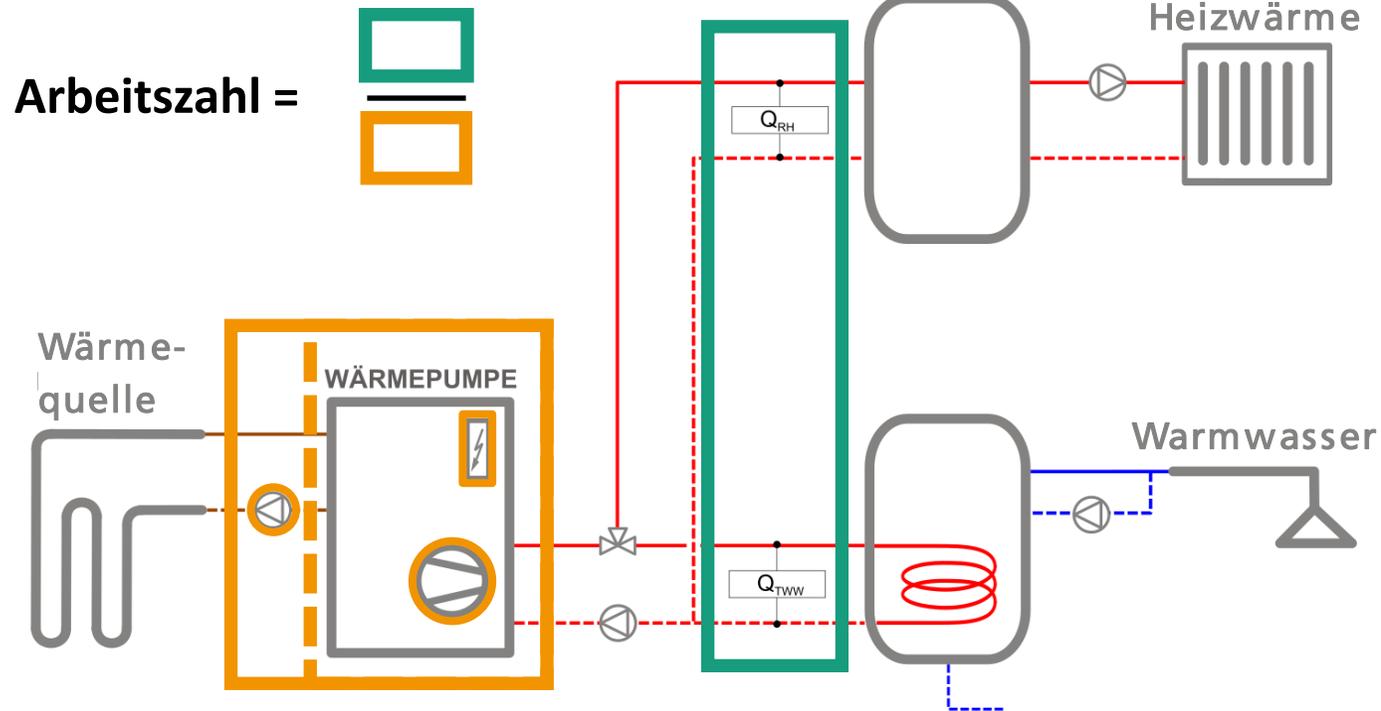
alle Anlagen  
für **WW-**  
**Bereitung**  
und  
**Heizung**

mehr als  
**300**  
Wärmepumpen-  
anlagen  
vermessen

Wärmequellen  
**Luft**  
und  
**Erdreich**

# Effizienzbewertung bei Feldmessungen

## Systemgrenzen und Ermittlung von Kennzahlen



- einheitliche Sensorik zur Erfassung der Energieströme, einheitliche Bilanzierung und Bewertungsmethodik
- Bewertung instationärer Betrieb (im Unterschied zu (S)COP (=Prüfstand))
- Berücksichtigung verschiedener Quellen und Übergabesysteme
- Messungen in Neubau und Bestandsgebäuden mit unterschiedlichem Sanierungsstand
- Einbeziehung weiterer Wärmeerzeuger (bivalente Systeme)

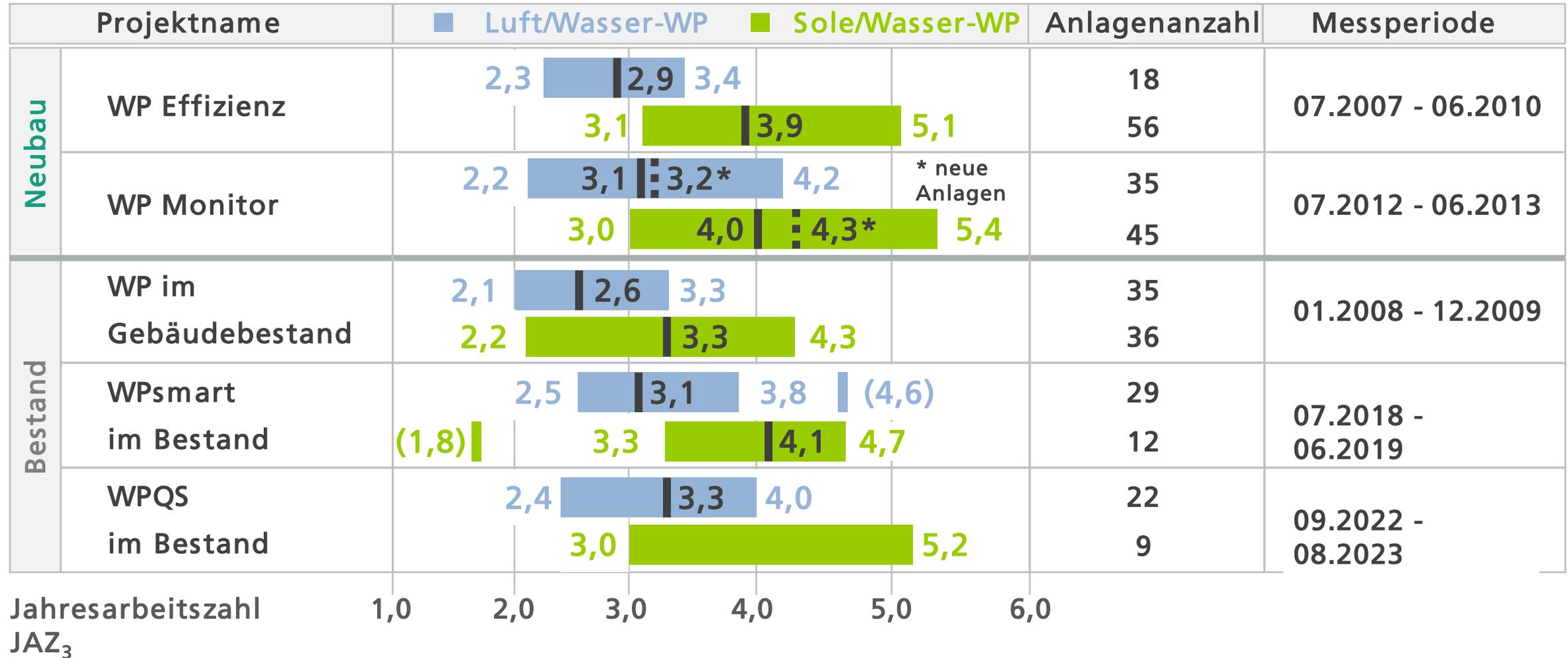
# Wärmepumpen – Monitoring

## Arbeitszahlen: Ergebnisse für Ein- und Zweifamilienhäuser

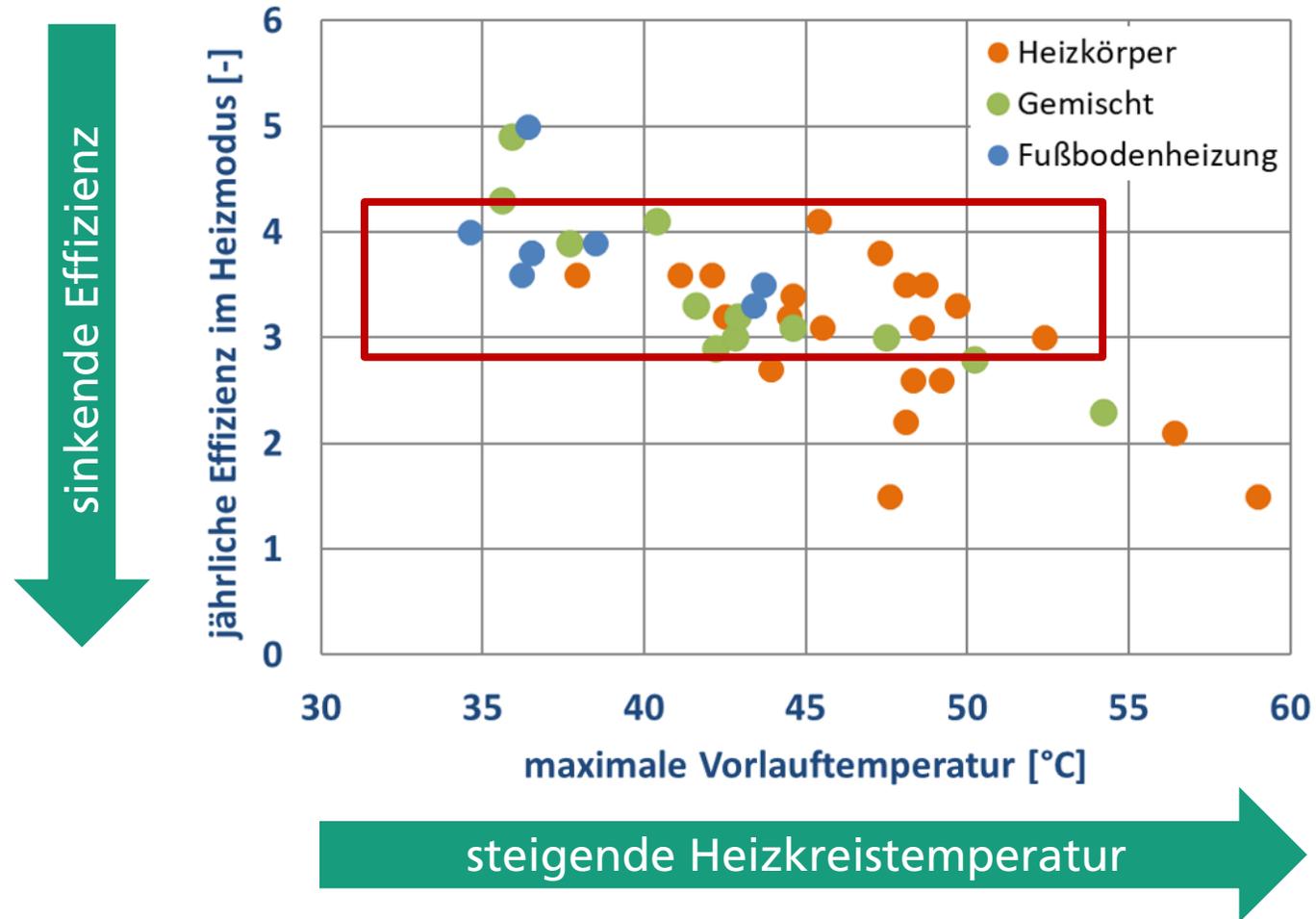
Gefördert durch:



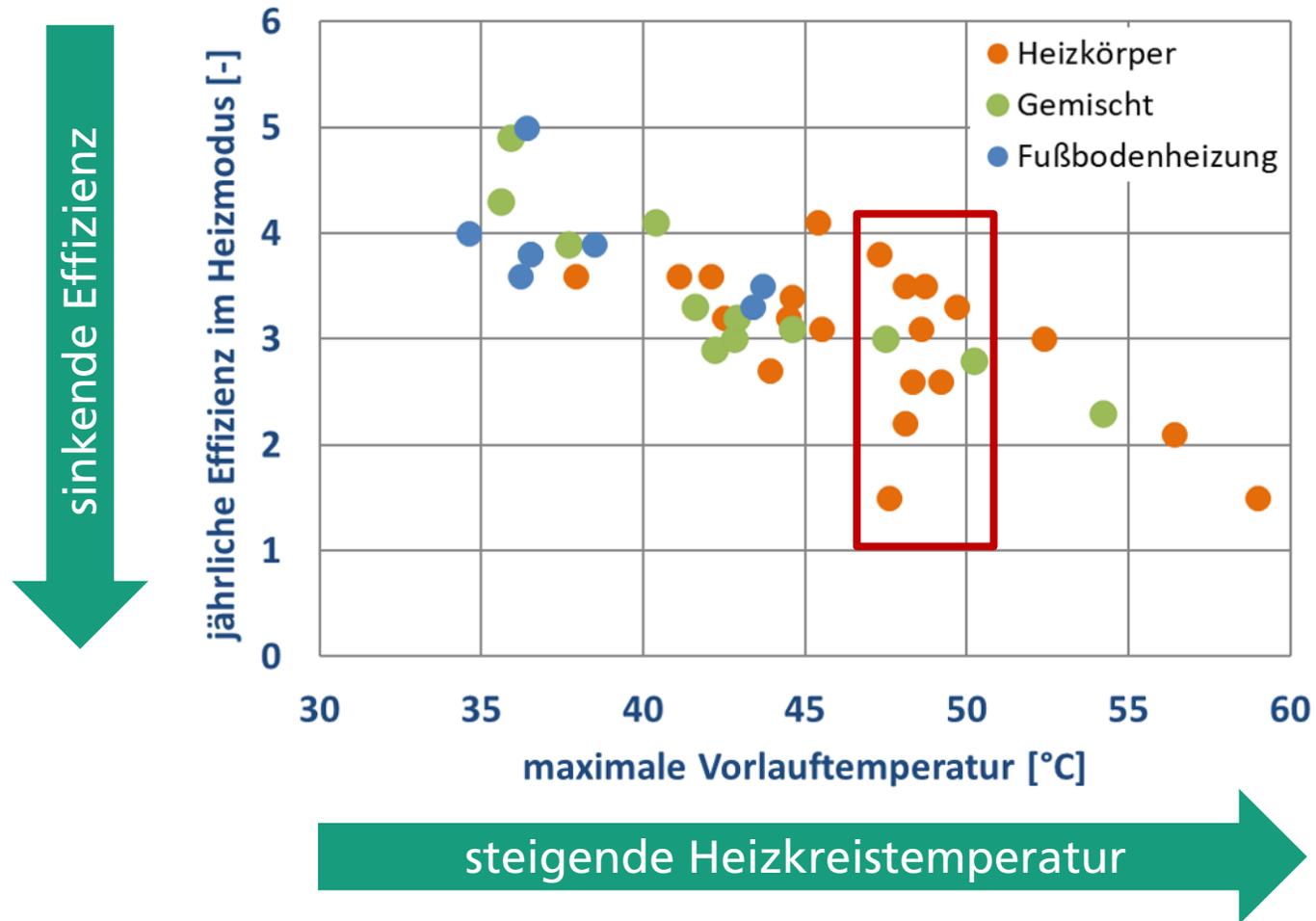
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Effizienz und Wärmeübergabesystem (Luft/Wasser-WP)



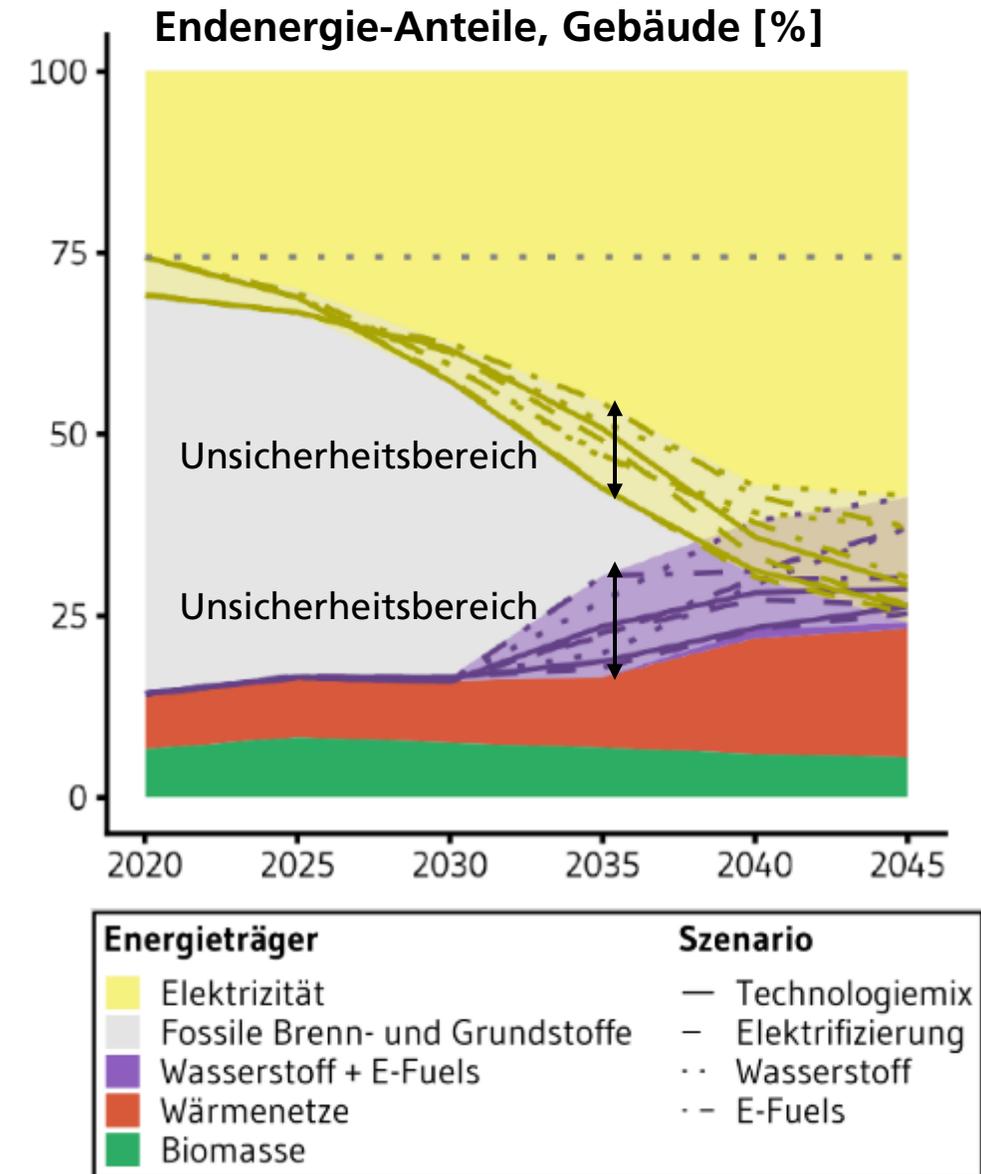
# Effizienz und Wärmeübergabesystem (Luft/Wasser-WP)



# Energieträger im Gebäudesektor

## Ergebnisse der Energiesystemanalyse – Top-Down Ansatz

- Direkte Elektrifizierung vs. Wasserstoff u. E-Fuels
  - Vergleich aktueller Studien (Ariadne, BDI, DENA, Agora, Langfristszenarien) zeigt übereinstimmend, dass bis zum Jahr 2030 indirekte Elektrifizierung im Gebäudesektor keine Rolle spielen wird
  - Einigkeit besteht auch, dass direkte Elektrifizierung (Wärmepumpen) und Wärmenetze zentrale Bestandteile der Wärmewende sind
  - Ab 2030 gibt es einen größeren Unsicherheitsbereich:
    - Einige Szenarien gehen davon aus, dass Wasserstoff und E-Fuels nahezu keine Rolle im Gebäudesektor spielen
    - Andere Szenarien sehen relevante Anteile im Jahr 2045
  - Auswirkung auf Infrastrukturen nur in Verbindung mit Bottom-Up Betrachtung abzuleiten

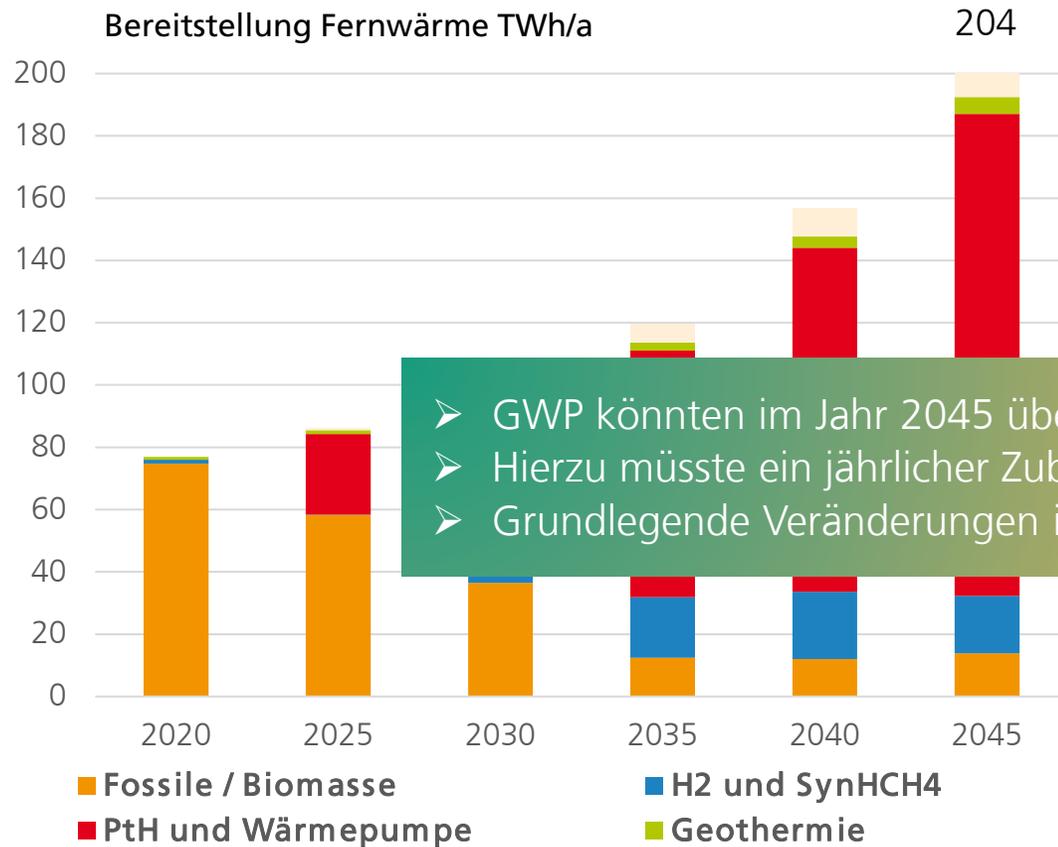


# Entwicklung Leistung und Energie Fernwärme nach Energieträgern

## Szenarien

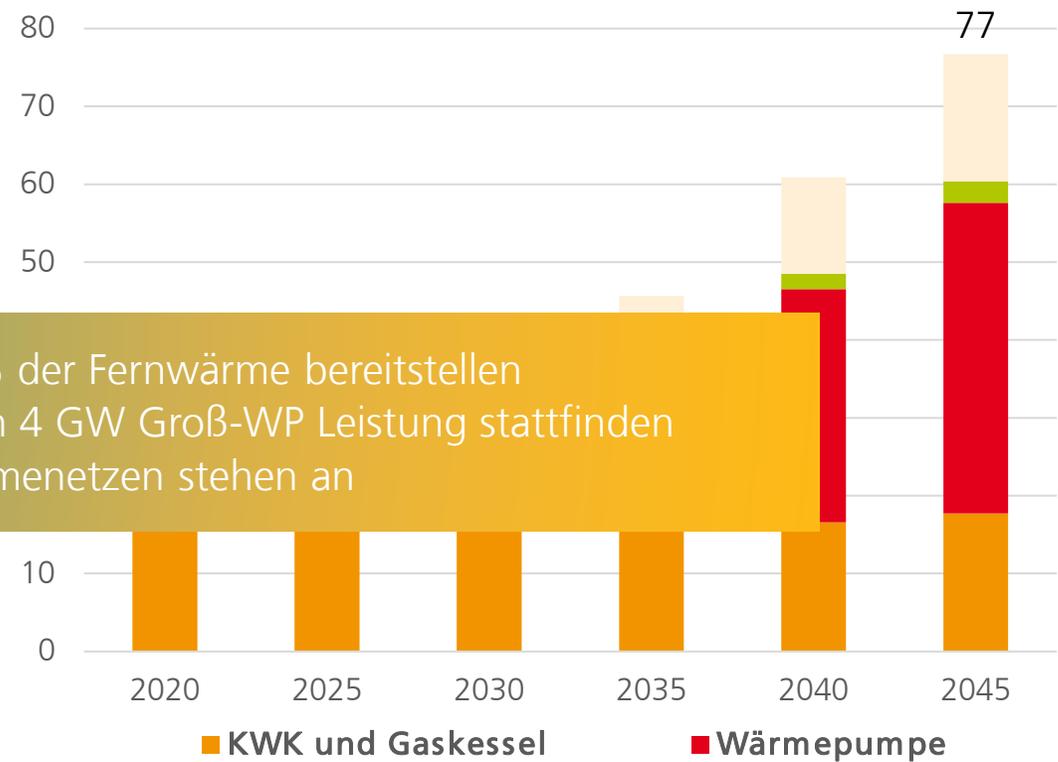
Szenario Balance

Bereitstellung Fernwärme TWh/a



Szenario Balance

Leistung Fernwärme GW/a

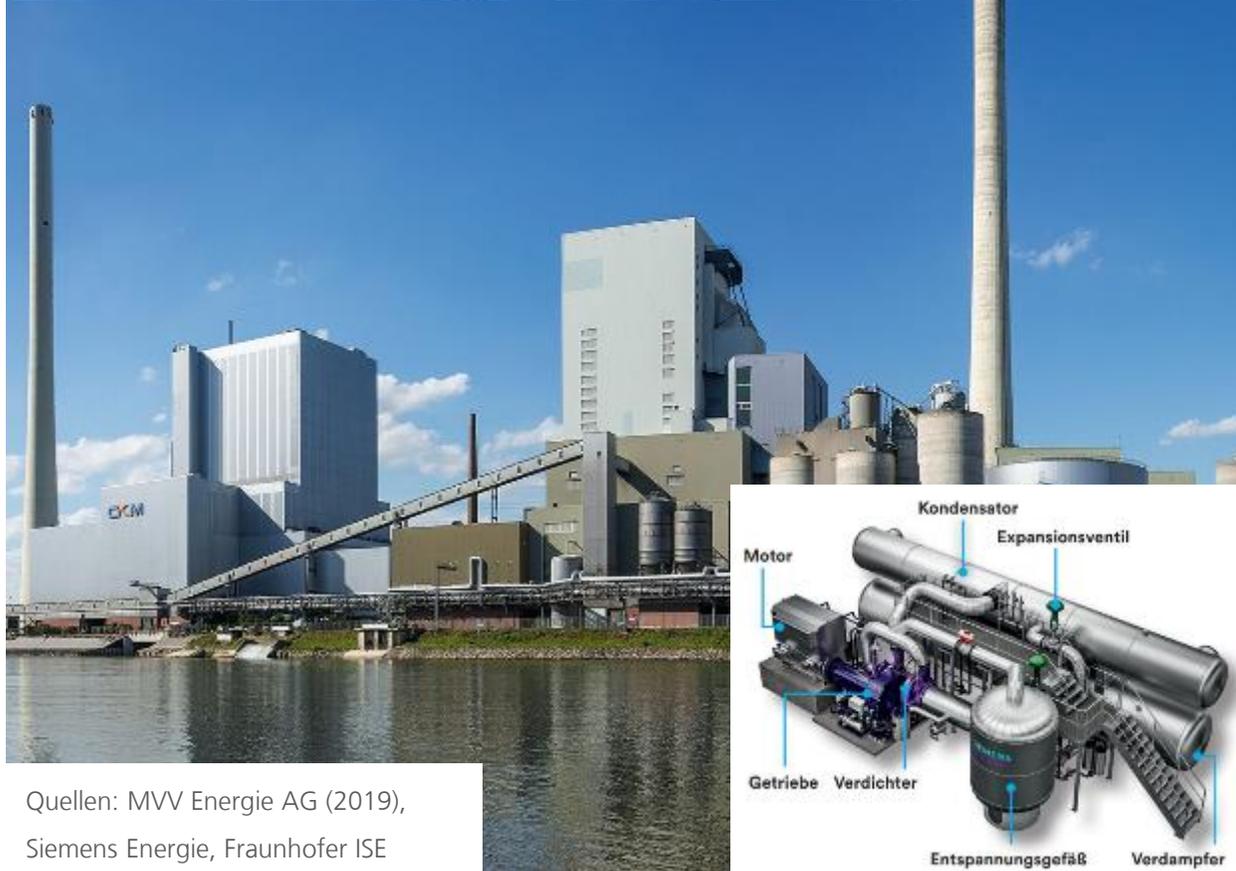


- GWP könnten im Jahr 2045 über 70% der Fernwärme bereitstellen
- Hierzu müsste ein jährlicher Zubau von 4 GW Groß-WP Leistung stattfinden
- Grundlegende Veränderungen in Wärmenetzen stehen an

# Flußwärmepumpe Mannheim

## MVV RHE GmbH als Teilhaber am GKM

- Aktuell: 4 Heizkraftwerksblöcke mit Steinkohle
  - $P_{el} = 1.958 \text{ MW}_{el} \mid P_{th} = 1.500 \text{ MW}_{th}$
- Großwärmepumpe  $20 \text{ MW}_{th}$ ;  $7 \text{ MW}_{el}$ ; COP 2.7
  - Siemens Energy, 2-stufiger Turboverdichter
  - Kältemittel: R1234ze (HFO, 12 t, mit Auffangsystem)
  - Quelle: Rheinwasser / Kühlwasser ( $3 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ );
  - 2-5 K Abkühlung
  - Senke: Rücklauf Fernwärme ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ )
  - Vorlauf WP:  $83 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $99 \text{ }^\circ\text{C}$
- Kurze Leitungswege, sehr gute Infrastruktur am Standort vorhanden,  $43.000 \text{ m}^3$  ( $1.500 \text{ MWh}$ ) Fernwärmespeicher



Quellen: MVV Energie AG (2019),  
Siemens Energy, Fraunhofer ISE



# HT-/Industrie-/Groß-Wärmepumpen

## Aktuelle FuE Vorhaben

### Projekt KETEC

- Hochtemperatur-WP mit A2L-A3 KM: Fernziel vollautomatischer, remote steuerbarer HT-WP-Versuchskreis



### Projekt Reallabor Großwärmepumpen

- Integration von Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen an fünf Standorten (B, S, MA, ROS)
- Installation, Betrieb, Monitoring und Systemeinbindung



<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/reallabor-grosswaermepumpen.html>

### Projekt FernWP

- Fernwärmeversorgung durch Wärmepumpen als Ersatz der Kohleverbrennung
- Groß-WP: Demonstration und Aufbau Prototyp mit industriellem Partner
- HTWP: Bewertung versch. KM und Evaluation von möglichen Kreisprozessen und Bauteilen, Pinch-Analyse



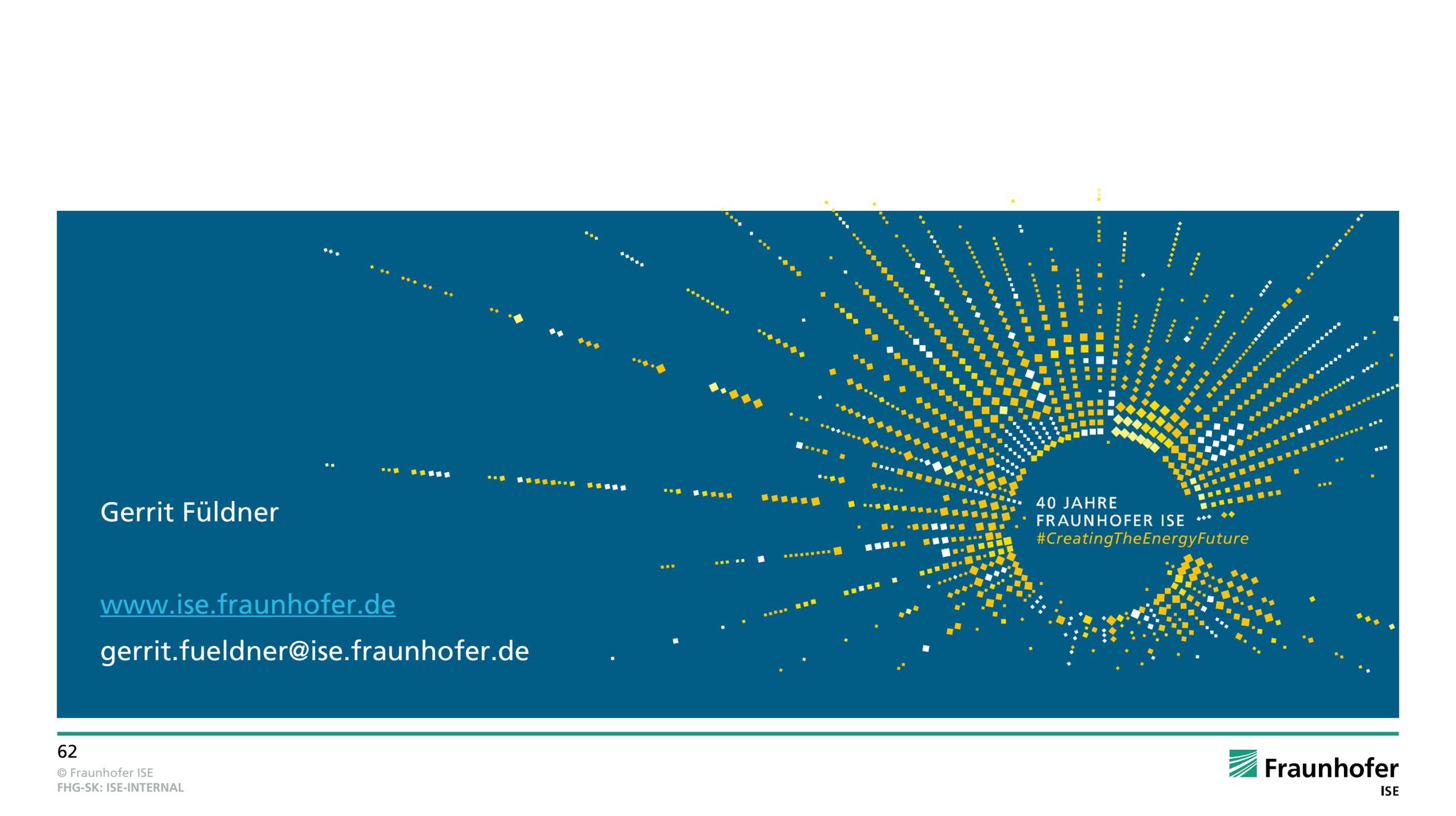
# Technologie- und Marktübersicht Wärmepumpen für Prozesswärme

## Wärmepumpen ab 100°C Senktemperatur



# Fazit

- Viele Möglichkeiten des Wärmepumpens
- Exergie sinnvoll nutzen
- Praktische Begrenzung meist durch Wärmeübertragung
- Wärmepumpen funktionieren in vielen Anwendungsbereichen und Leistungsklassen: Niedertemperaturwärme (Heizen von Gebäuden), Fernwärme, Prozesswärme
- Entwicklungsbedarf im Gebäudebereich: Nutzung natürlicher Kältemittel, Akustik, Alterung, Sicherheit, Quellen und vor allem Systemintegration



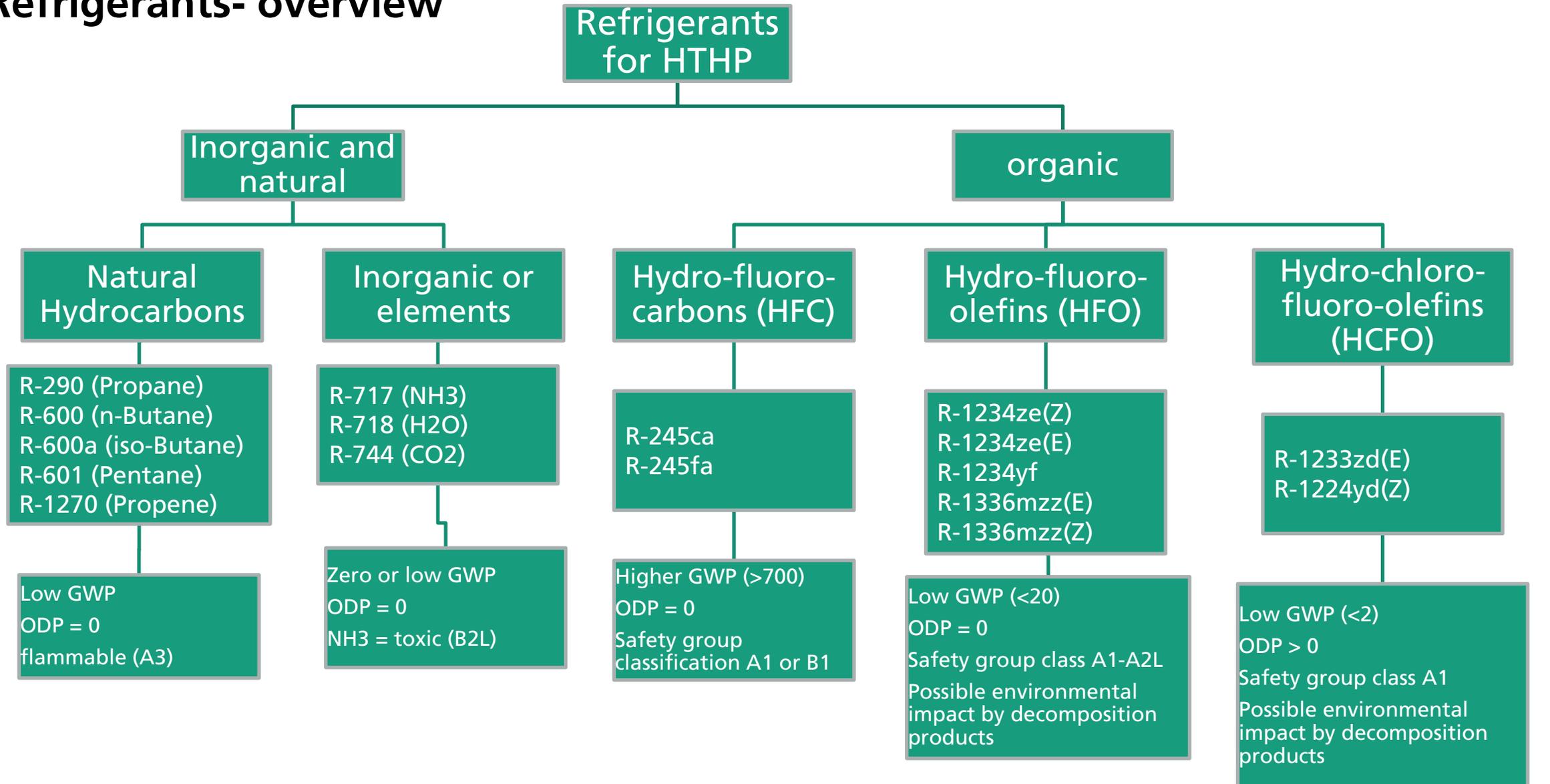
Gerrit Földner

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[gerrit.fueldner@ise.fraunhofer.de](mailto:gerrit.fueldner@ise.fraunhofer.de)

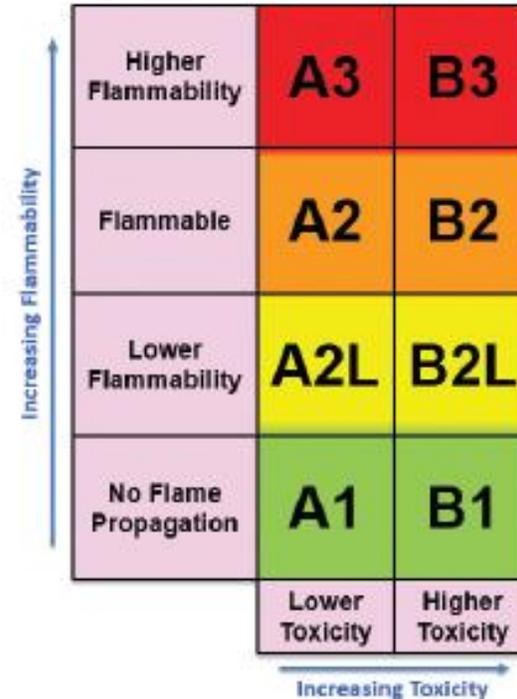
40 JAHRE  
FRAUNHOFER ISE  
*#CreatingTheEnergyFuture*

# Refrigerants- overview



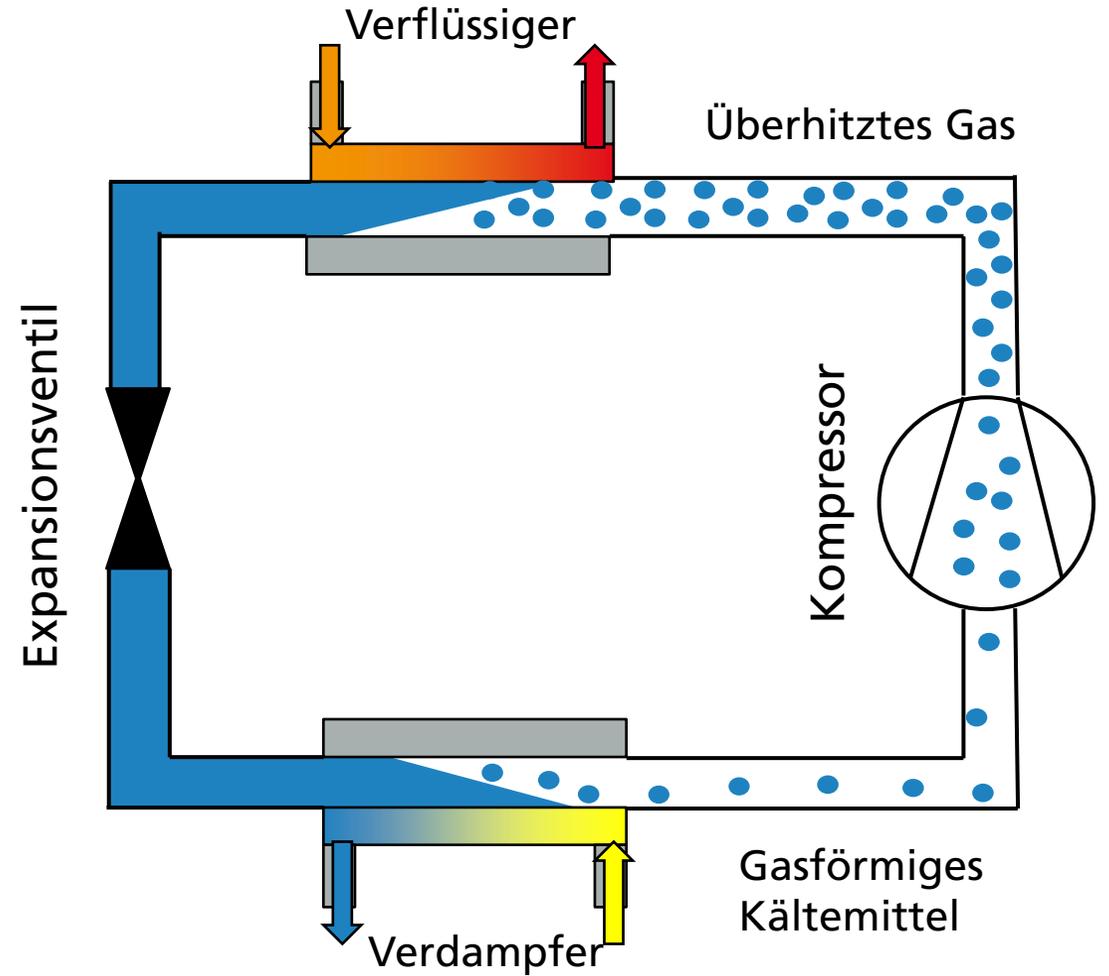
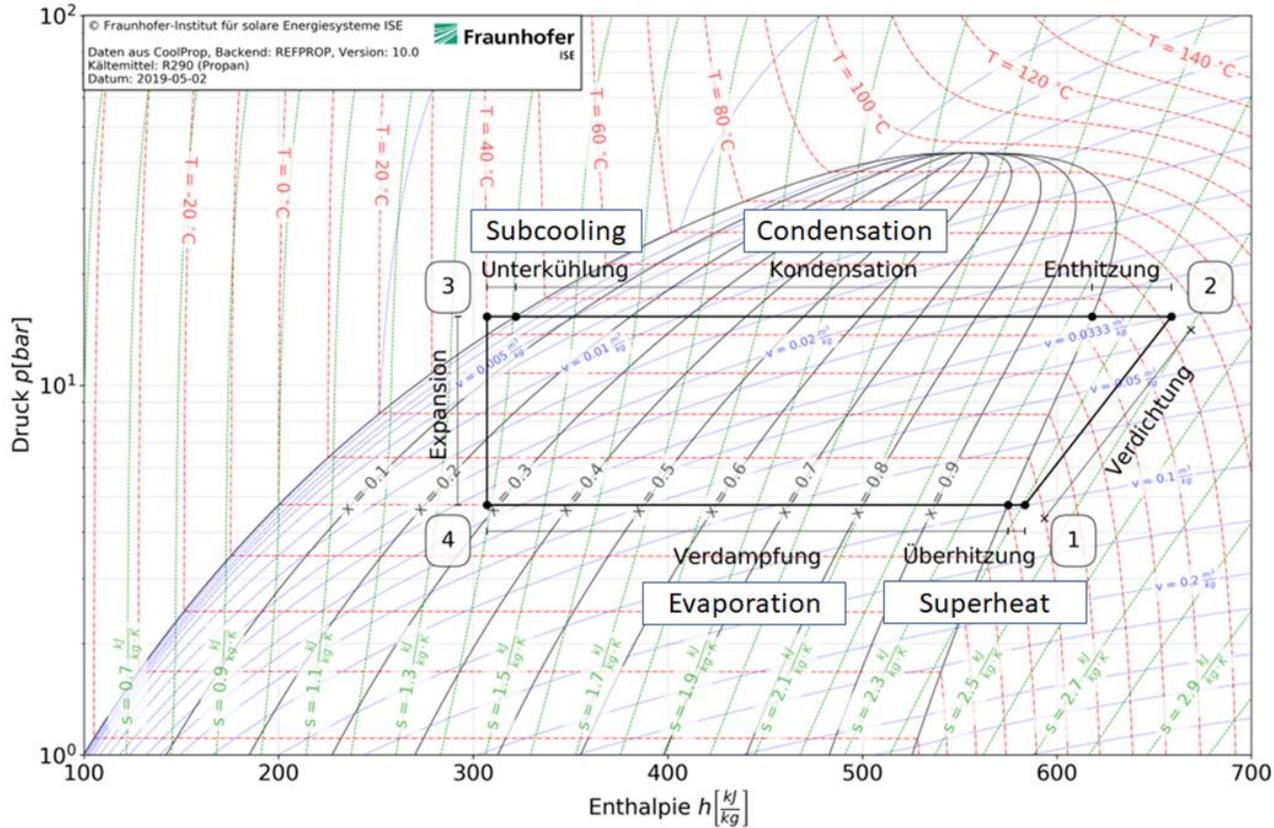
# Refrigerants – safety group classification

<b>Flammability</b>	<b>higher</b>	<b>A3</b>	R290, R1270, R601, R600, R600a, E170	<b>B3</b>	
	<b>lower</b>	<b>A2</b>	R142b, R152a, R365mfc, SES36, R1234ze(Z)	<b>B2</b>	
		<b>A2L</b>	R1234ze(E), R1234yf	<b>B2L</b>	R717
	<b>no flame propagation</b>	<b>A1</b>	R113, R114, R124, R134a, R236fa, R227ea, R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E), R1224yd(Z), R718, R744	<b>B1</b>	R123, R21, R245ca, R245fa
		<b>lower</b>		<b>higher</b>	
		<b>Toxicity</b>			



<p><b>Class 3 Requirements</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Exhibit flame propagation @ 60°C &amp; 101.3 kPa</li> <li>LFL ≤ 0.10 kg/m<sup>3</sup> or HOC ≥ 19,000 kJ/kg</li> </ol>
<p><b>Class 2 Requirements</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Exhibit flame propagation @ 60°C &amp; 101.3 kPa</li> <li>LFL &gt; 0.10 kg/m<sup>3</sup></li> <li>HOC &lt; 19,000 kJ/kg</li> </ol>
<p><b>Class 2L Requirements</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Exhibit flame propagation @ 60°C &amp; 101.3 kPa</li> <li>LFL &gt; 0.10 kg/m<sup>3</sup></li> <li>HOC &lt; 19,000 kJ/kg</li> <li>S<sub>u</sub> ≤ 10 cm/s</li> </ol>
<p><b>Class 1 Requirements</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>No flame propagation @ 60°C &amp; 101.3 kPa</li> </ol>

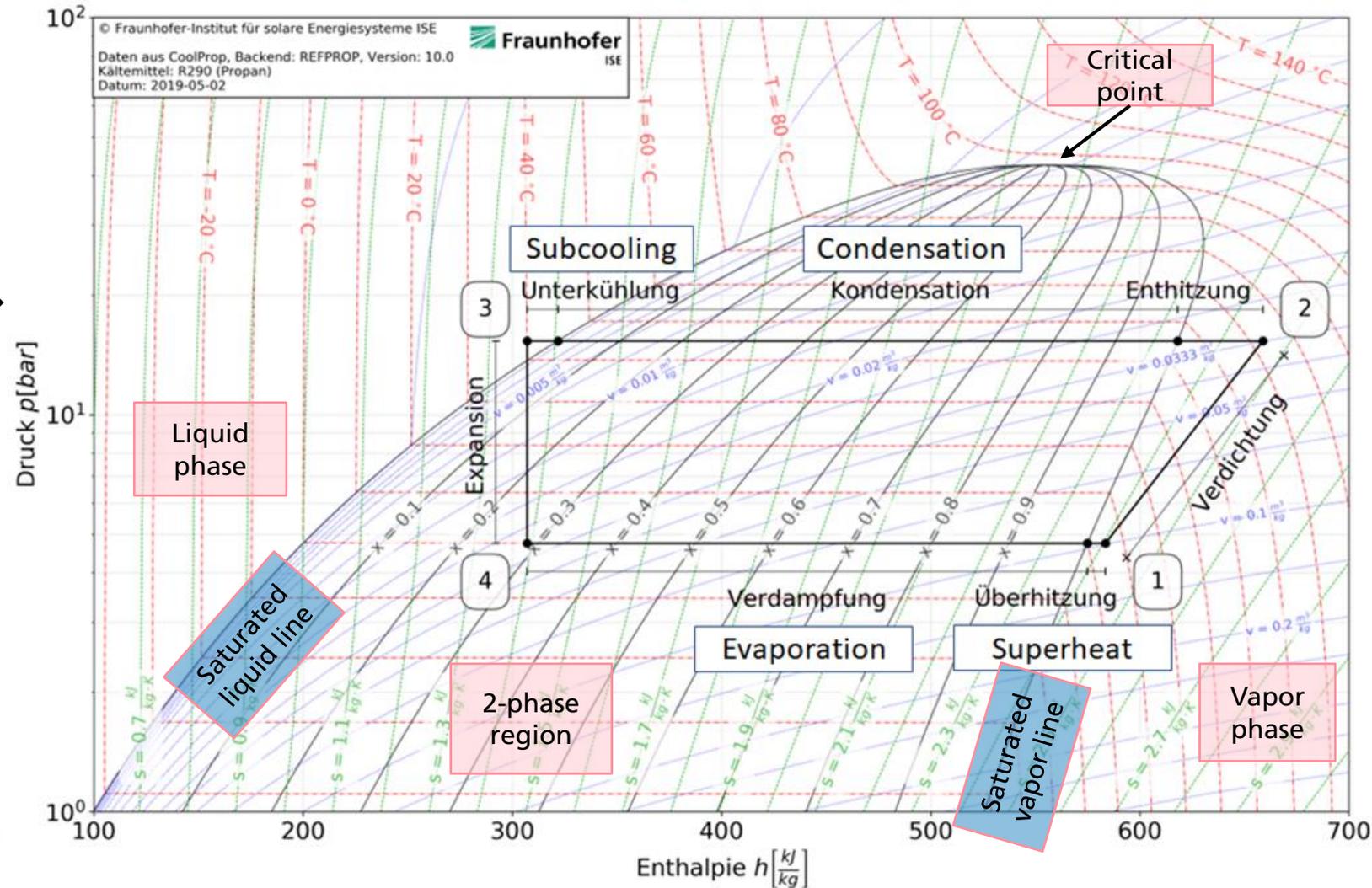
# Prozess Kompressions-WP



# Prozess im Log-p-h Diagramm

## Kreisprozess:

- 1-2: Kompression (nicht isentrop)
  - In der Dampfphase
  - Isentrope Kompressoreffizienz  $\rightarrow \eta \sim 0.8 - 0.9$  für Hubkolben
- 2-3: Enthitzung, Kondensation und Unterkühlung
  - Unterkühlung  $\sim 5\text{K}$ , um Verdampfung durch Druckverluste zu vermeiden
- 3-4: Expansion (isenthalp)
- 4-1: Verdampfung + Überhitzung
  - $\sim 2-10\text{ K}$  Überhitzung, um Tropfeneintrag in Kompressor zu vermeiden



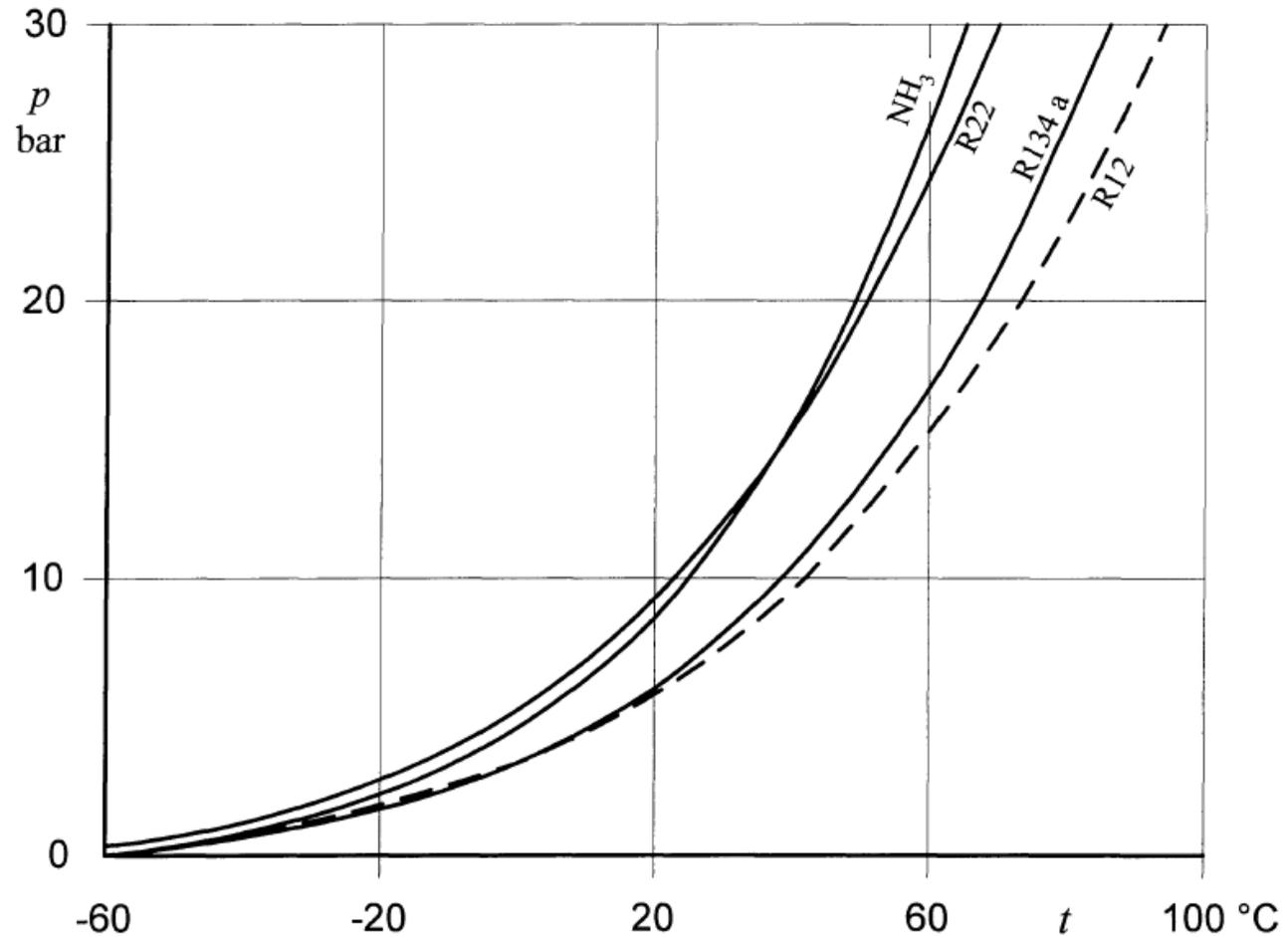
# Übersicht heute gängiger Kältemittel

Kältemittel	Chemische Formel / Zusammensetzung <sup>16</sup>	GWP <sup>17</sup> [35]	Brennbarkeit / Gruppe	Toxizität <sup>18</sup>	Siedepunkt (Temperaturleit <sup>19</sup> )
R134a	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	1 430	Nein/1	gering	-26,1
R404A	R125:44, R134a:4, R143a:52 CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> / CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> / CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	3 922	Nein/1	gering	-46,2
R407C	R32:23, R125:25, R134a:52 CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> / CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> / CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	1 774	Nein/1	gering	-43,6 (Gleit 7,2 K)
R410A	R32:50, R125:50 CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> / CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	2 088	Nein/1	gering	-51,4 (Gleit 0,2 K)
R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3	Ja/3	gering	-42,1
R1270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3	Ja/3	gering	-47,6
R717	NH <sub>3</sub>	0	Ja/3	ja	-33,3
R718	H <sub>2</sub> O	0	Nein/1	nein	100
R744	CO <sub>2</sub>	1	Nein/1	gering	-

# Bezeichnung von Kältemitteln (R...)

- Benennung **organische Kältemittel** erfolgt nach DIN 8960 Abs. 6.1:  
 $R - |c - 1| h + 1 | f$  (R für Refrigerant)
- Die erste Ziffer ist um 1 kleiner als die Anzahl  $c$  der Kohlenstoffatome, die zweite Ziffer ist um 1 größer als die Anzahl  $h$  der Wasserstoffatome, und die dritte Ziffer ist gleich der Anzahl  $f$  der Fluoratome je Molekül; die Anzahl der Chloratome ist gleich der Anzahl der restlichen Bindungen
- Beispiel R-123 (Dichlortrifluorethan)  
 $c = 1 + 1 = 2$  Kohlenstoffatome  
 $h = 2 - 1 = 1$  Wasserstoffatome  
 $f = 3$  Fluoratome (+ 2 Chloratome, um alle 6 Bindungen zu füllen)
- Verschiedene Ausnahmen und Sonderfälle (z.B. bei anderen Halogenen wie Brom) und bei Gemischen (beginnend mit Ziffer 4)
- Benennung **anorganischer Verbindungen** erfolgt nach DIN 8960 Abs. 6.3.2: R-7zz
- Die erste Ziffer, 7, bezeichnet generell die Gruppe der Anorganischen Verbindungen; die beiden folgenden Ziffern geben die Molmasse an.  
Beispiel R-717,  $\text{NH}_3$  (Ammoniak) hat eine Molmasse von 17 g

# Dampfdruckkurve einiger Kältemittel



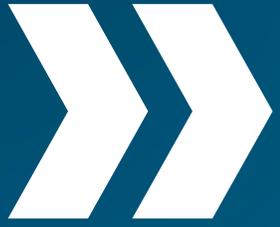
Quelle: Eric Granryd et al., REFRIGERATING ENGINEERING. Department of Energy Technology. Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration Royal Institute of Technology, KTH Stockholm, 2005

Fig. 3.03. Saturated vapor pressure versus temperature for some pure refrigerants.

# Vergleich von Verdichtertypen

Verdichter	Wärmequellen	Typischer Leistungsbereich	Geräuschentwicklung	Effizienz	Druckerhöhung
Scroll/Spiral	alle Typen	> 5 kW	gering	hoch	mittel
Hubkolben	alle Typen	< 5 kW	mittel	mittel bis hoch	hoch
Rollkolben	vor allem Luft	< 20 kW	gering	hoch	mittel
Schrauben	Erdreich, Grund-/Abwasser	> 100 kW	gering	hoch	mittel
Turbo	alle Typen	7 kW < X < 20 kW (bisher nur Forschung) > 300 kW	hoch	mittel bis hoch	gering

Quelle: Miara u.a., Wärmepumpen – Heizen, Kühlen, Umweltenergie nutzen. BINE-Fachbuch, erschienen im Fraunhofer IRB Verlag



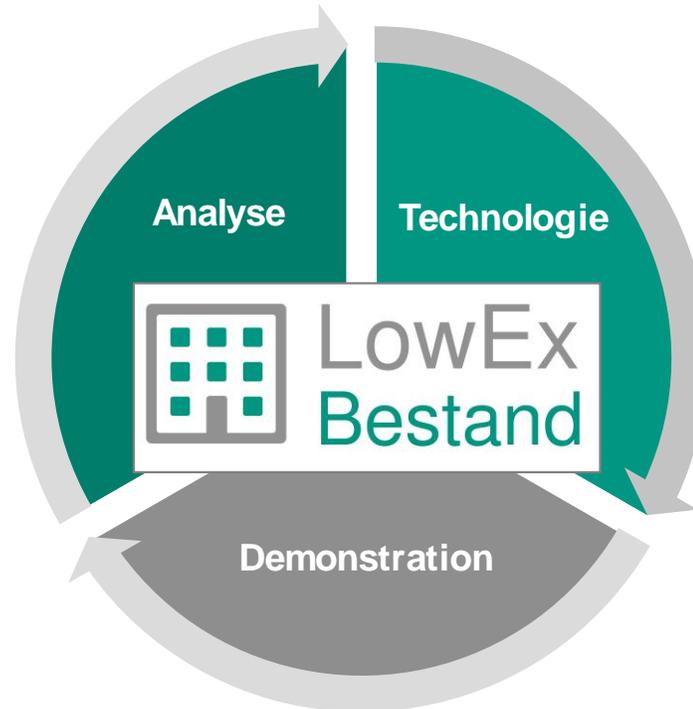
# ■ Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern



# Projekt LowEx-Bestand

## Konsortium und Ansatz

### Analyse



### Demonstration



- Wohnungsgesellschaft Adorf
- Smartes Quartier KA-Durlach
- SanBest, Freiburg

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Technologieentwicklung

- HTWP
- FIHLS
- HEAVEN
- NK4HTWP
- AdoSan

Ergebnisse und Schlussbericht:  
[www.lowex-  
bestand.de](http://www.lowex-bestand.de)

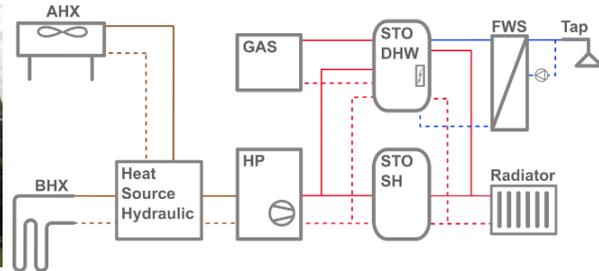
# LowEx-Bestand: Demonstrationsgebäude

## Erfahrungen und Herausforderungen

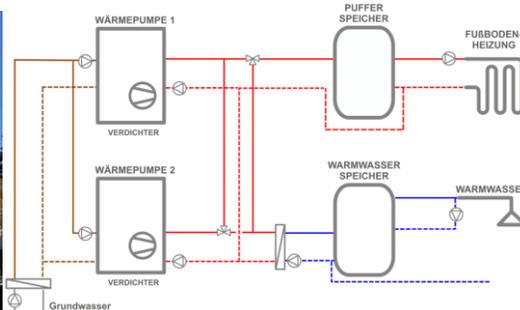
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



JAZ<sub>3</sub> 3,3

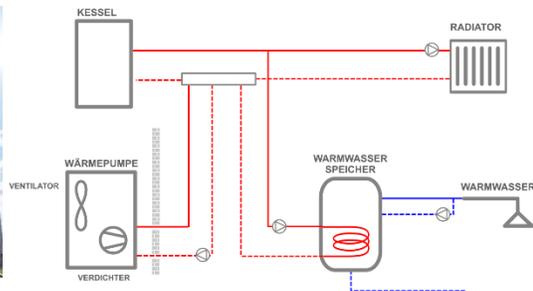


JAZ<sub>1</sub> 5,6



JAZ<sub>1</sub> 2,7

JAZ<sub>3,ges</sub> 3,5



AZ<sub>3</sub> 3,0\*

\* nach Sanierung, kein ganzes Jahr erfasst

- Gebäudehülle häufig bereits thermisch ertüchtigt
- Heizkörper oft überdimensioniert, Temperaturabsenkung möglich, raumweise Heizlastberechnung zum gezielten Austausch einzelner Heizkörper
- Trinkwassererwärmung: Herausforderung durch Anforderungen an TW-Hygiene
- Wärmequellen: FuE Bedarf für Konzepte zur Quellerschließung
- typische Herausforderungen:
  - Platz für Anlagentechnik
  - Elektrische Anschlussleistung
  - Wenig Betriebserfahrung mit WP in Mehrfamilienhäusern

# Wärmepumpen in Mehrfamilien(bestands)gebäuden

## Herausforderungen



Platzbedarf  
Anlagentechnik und  
Speicher



Kosten der  
Anlagentechnik  
und Installation  
(Zeit)

begrenzte  
Erfahrung bei  
Installations-  
betrieben

Akustik und Ästhetik:  
Akzeptanz der NutzerInnen

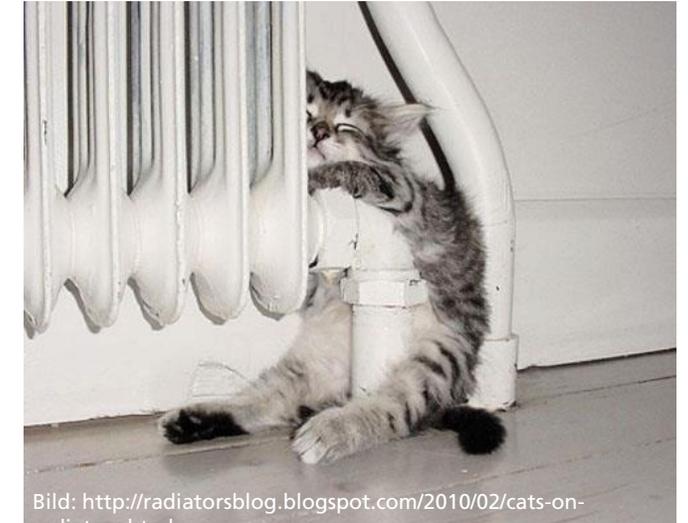


Bild: <http://radiatorsblog.blogspot.com/2010/02/cats-on-radiators.html>

komplexe hydraulische Systeme

hohe Temperaturen bei TWW  
Systemen

# Wärmepumpen in Mehrfamilien(bestands)gebäuden

## Lösungsansätze und Forschungsbedarf

- Aus technischer Sicht gibt es kaum Gründe, Wärmepumpen in Bestandsgebäuden *nicht* einzusetzen
- Wärmepumpen können auch mit Heizkörpern sehr gut arbeiten
- Umfangreiche Betriebserfahrung in Ein- bis kleinen Mehrfamilienhäusern

### aber:

- Kaum wissenschaftlich ausgewertete Daten für Mehrfamiliengebäude
- Große Herausforderungen bei der Quellerschließung im urbanen, verdichteten Bestand
- Kapazitätsengpässe führen zu hohen Kosten für Geräte, zusätzlich höherer Zeitaufwand bei der Installation

- **Planung:** Bestandsaufnahme aufwändig
  - Welche Anlagenteile können bleiben?
  - Absenkung / Optimierung der Heizkreistemperatur:
  - FuE: digitale Bestandserfassung, Methoden zum hydraulischen Abgleich
- **Umbau:** Umbauzeit noch zu lange (und teuer)
  - Platzbedarf (Wärmepumpe, Speicher, Quelle)
  - Hüllsanierung und Austausch der Heizungsanlage können auch zeitlich unabhängig voneinander erfolgen
  - FuE: Effizienzsteigerung durch Digitalisierung von Prozessen; einheitliche, standardisierte Komponenten
- **Betrieb:** Effizienzüberwachung wichtig
  - Datengestützte Inbetriebnahme und laufendes Monitoring sichern Effizienz der Anlage
  - FuE: Monitoring Kampagnen für (große) MFH

# 65%-EE-Pflicht und Übergangsregelungen (§71)

## GEG

- Die 65%-EE-Pflicht gilt ab dem 1.1.2024 zunächst nur für **Neubauten in Neubaugebieten** (Gebäude, für die ab dem **1.1.2024** ein Bauantrag gestellt wird).
- Für Heizungen in **Neubauten außerhalb von Neubaugebieten** und in allen **Bestandsgebäuden** gelten die Regelungen erst, wenn die Fristen für die Erstellung der kommunalen Wärmepläne ablaufen. Dies soll in Kommunen ab 100.000 Einwohnern bis zum **30.6.2026** und in kleineren Kommunen bis zum **30.6.2028** verbindlich sein.
- Liegt die kommunale Wärmeplanung vor Ablauf dieser Fristen vor, gilt die 65%-EE-Pflicht einen Monat nach der Bekanntgabe der Kommune über die "Ausweisung als Gebiet zum Neu- oder Ausbau eines Wärmenetzes oder als Wasserstoffnetz-ausbauggebiet".
- **H2-Ready / Gaskessel:** Zulässig wenn ab **1.1.2029** mindestens **15 %**, ab **2035** mindestens **30 %** und ab **2040** mindestens **60 % Biomasse** oder grünem oder blauem **Wasserstoff** erzeugt wird.
- Anschluss an ein neues **Wärmenetz** oder eine **Wasserstoffnetz**
- **Beratungspflicht** ab **1.1.2024** bei Einbau von **Verbrennungsheizungen** im Hinblick auf Kosten CO<sub>2</sub>-Bepreisung durch Schornsteinfeger, Installateure und Heizungsbauer, Ofen- und Luftheizungsbauer sowie alle Energieberater von der Expertenliste.