



Hochtemperatur Wärmepumpe mit HFO und HCFO Kältemitteln – Systemdesign, Simulation und erste experimentelle Ergebnisse

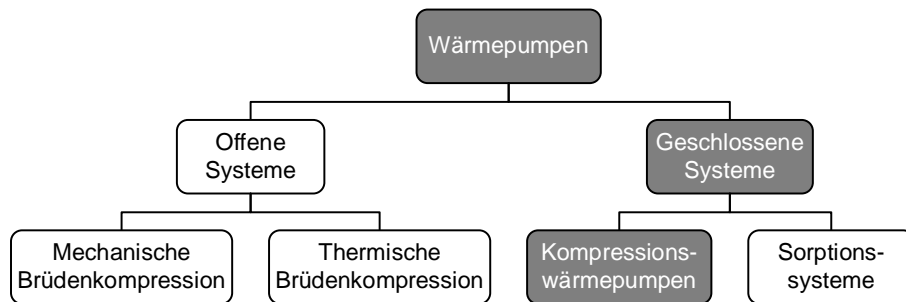
C. Arpagaus, M. Prinzing, F. Bless,
M. Uhlmann, E. Büchel, S. Frei, R.
Kuster, S.S. Bertsch, *NTB Buchs*

J. Schiffmann, *EPFL Neuchâtel*

- Einführung in die Thematik
- Systemdesign Laboranlage
- Theoretische Simulation
- Experimentelle Testergebnisse

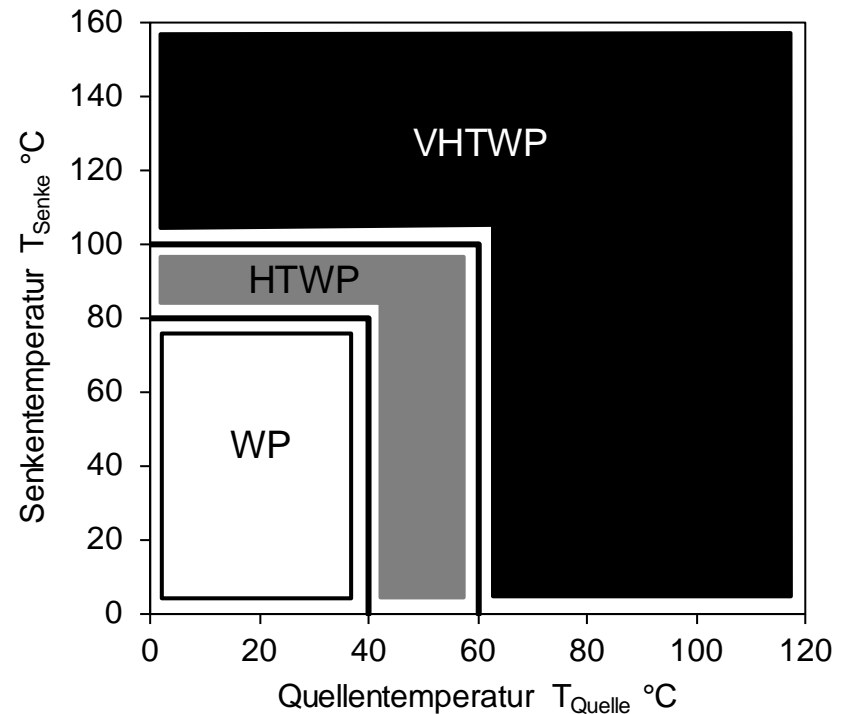


Fokus auf Kompressionswärmepumpen



Nellissen und Wolf (2015)

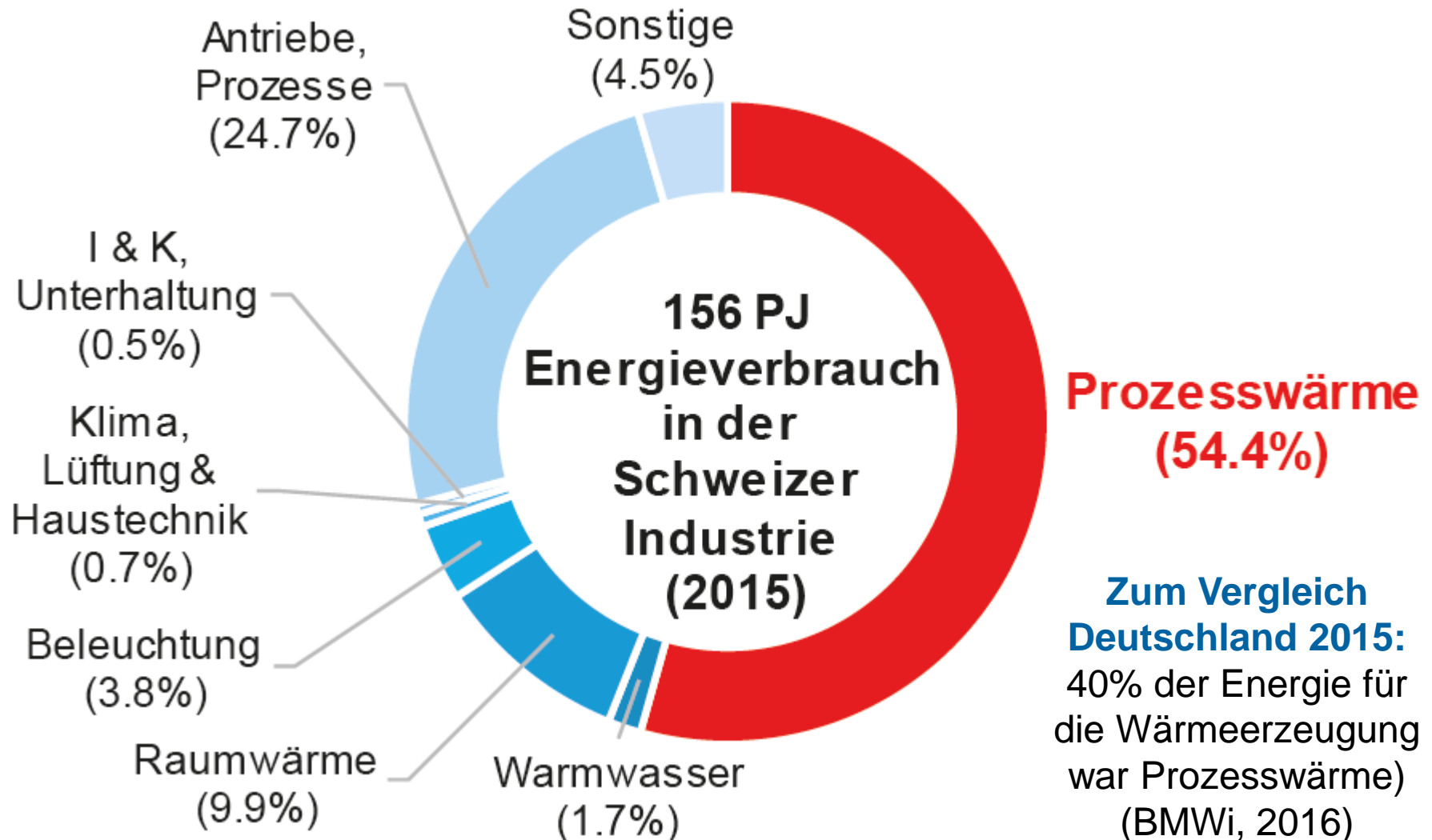
Entwicklung der Temperaturniveaus für Kompressionswärmepumpen



VHTHP: Höchsttemperatur Wärmepumpe ($> 100^\circ\text{C}$)
HTWP: Hochtemperatur Wärmepumpe (80 bis 100°C)
WP: konventionelle Wärmepumpe (bis etwa 80°C)

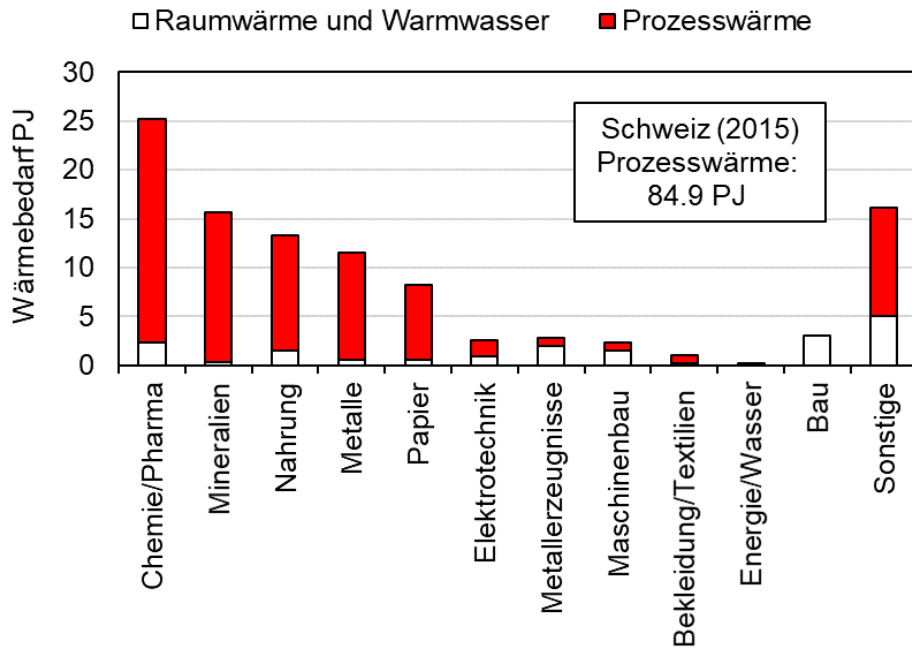
Bobelin et al. (2012), IEA (2014), Jakobs und Laue (2015), Peureux et al. (2012, 2014)

Industrieller Energieverbrauch der Schweiz (2015) nach Verwendungszweck



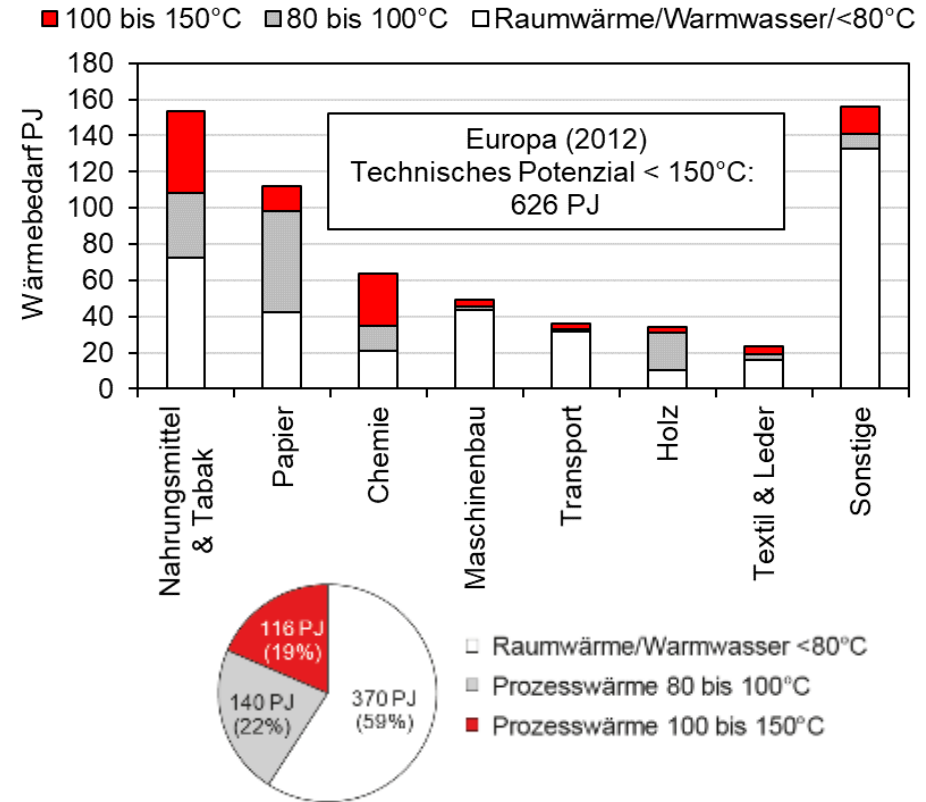
Potenzial für HTWP in verschiedenen Industriesektoren aufgeteilt nach Temperaturbereichen der Prozesswärme

Theoretisches Potenzial für HTWP in der Schweiz



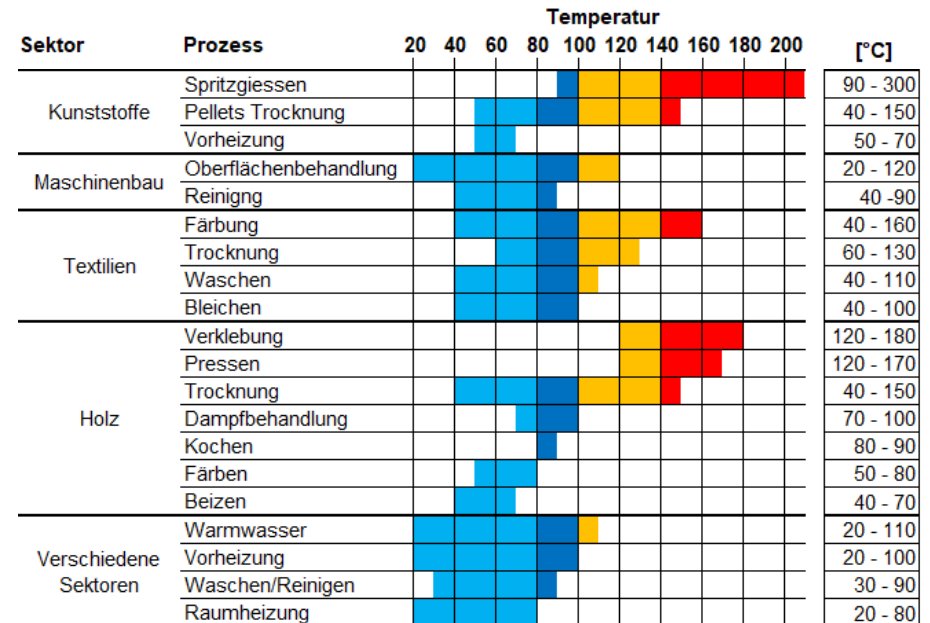
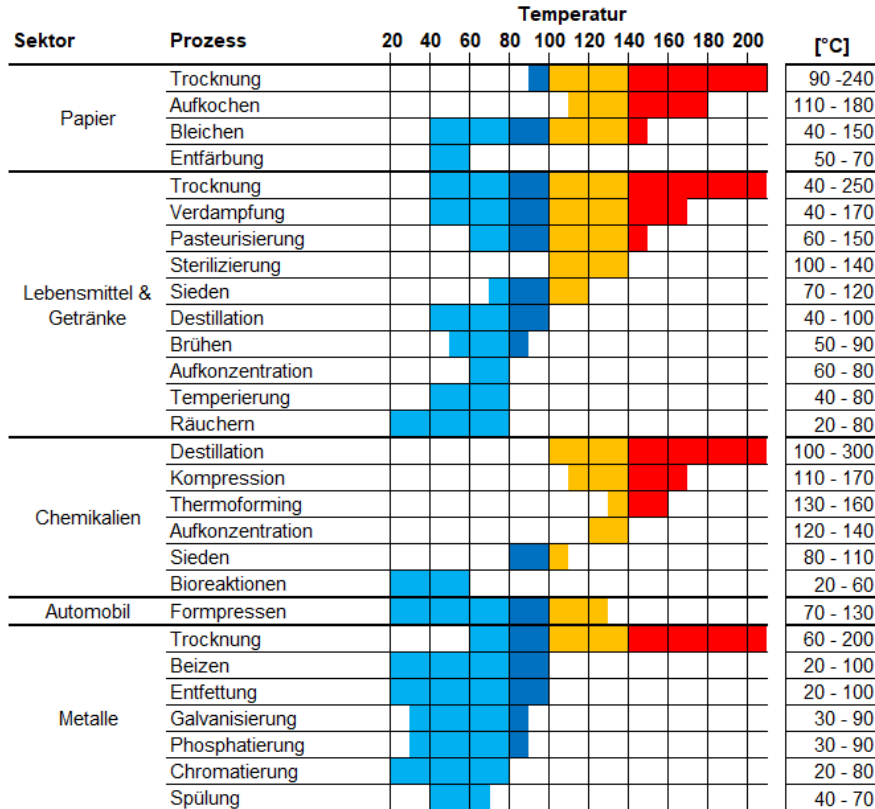
BFE (2016), Pulfer und Spirig (2015)

Technisches Potenzial in Europa, das mit industriellen Wärmepumpen erschlossen werden kann



Basiert auf Eurostat-Daten aus 2012 von 33 EU-Ländern, Nellissen und Wolf (2015)

Typische Temperaturniveaus industrieller Prozesse mit überlagertem Technologie Reifegrad von Wärmepumpen



Technologie Reifegrad von Wärmepumpen:

- konventionelle Wärmepumpen < 80°C, etabliert in der Industrie
- kommerziell erhältliche HTWP 80 - 100°C, Schlüsseltechnologie
- Prototypenstatus, Technologieentwicklung, HTWP 100 - 140°C
- Forschung im Labormaßstab, Funktionsmodelle, Proof of Concept, HTWP > 140°C

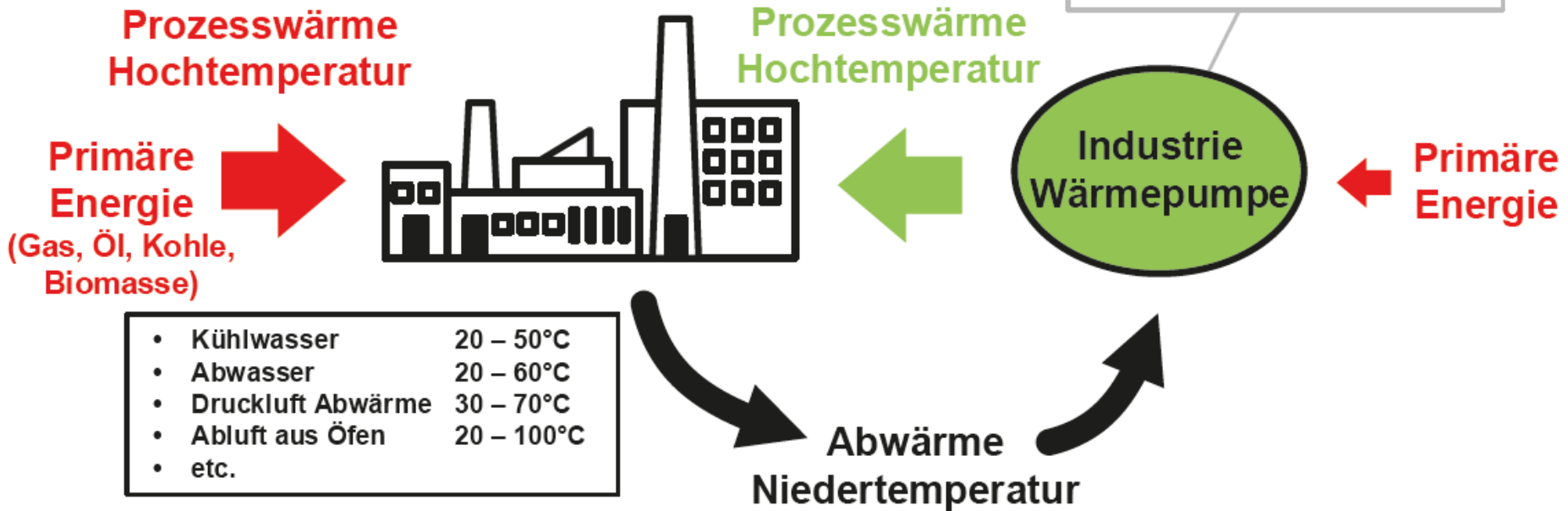
Datenquellen: Brunner et al. (2007), Hartl et al. (2015), IEA (2014), Kalogirou (2003), Lambauer et al. (2012), Lauterbach et al. (2012), Noack (2016), Ochsner (2015), Rieberer et al. (2015), Watanabe (2013), Weiss (2007, 2005), Wolf et al. (2014)

Prinzip der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen

- Pasteurisieren / Sterilisieren 70 – 120°C
- Trocknungsprozesse 40 – 250°C
- Verdampfung 40 – 170°C
- Destillation 100 – 300°C
- etc.

Wärmepumpen-Effizienz:

$$\text{COP} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Antriebsenergie}}$$



Grafische Darstellung
in Anlehnung an
Rieberer et al. (2014)

HTWP mit Vorlauftemperaturen von 100 bis 150°C sind geeignet zur Wärmerückgewinnung in verschiedenen industriellen Prozessen

Trocknung

Sterilisation

Dampferzeugung

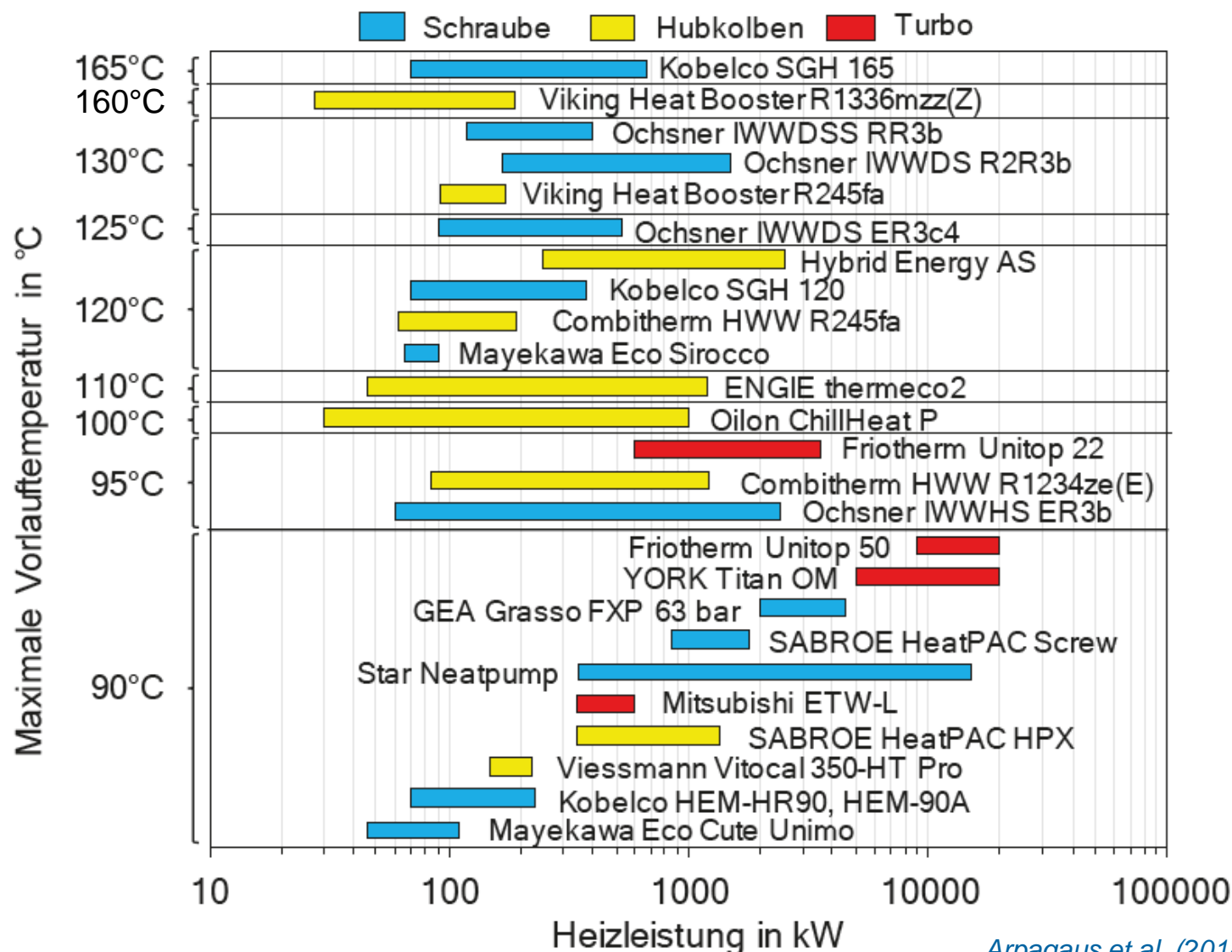
Papierherstellung

Lebensmittel

Abwärmennutzung

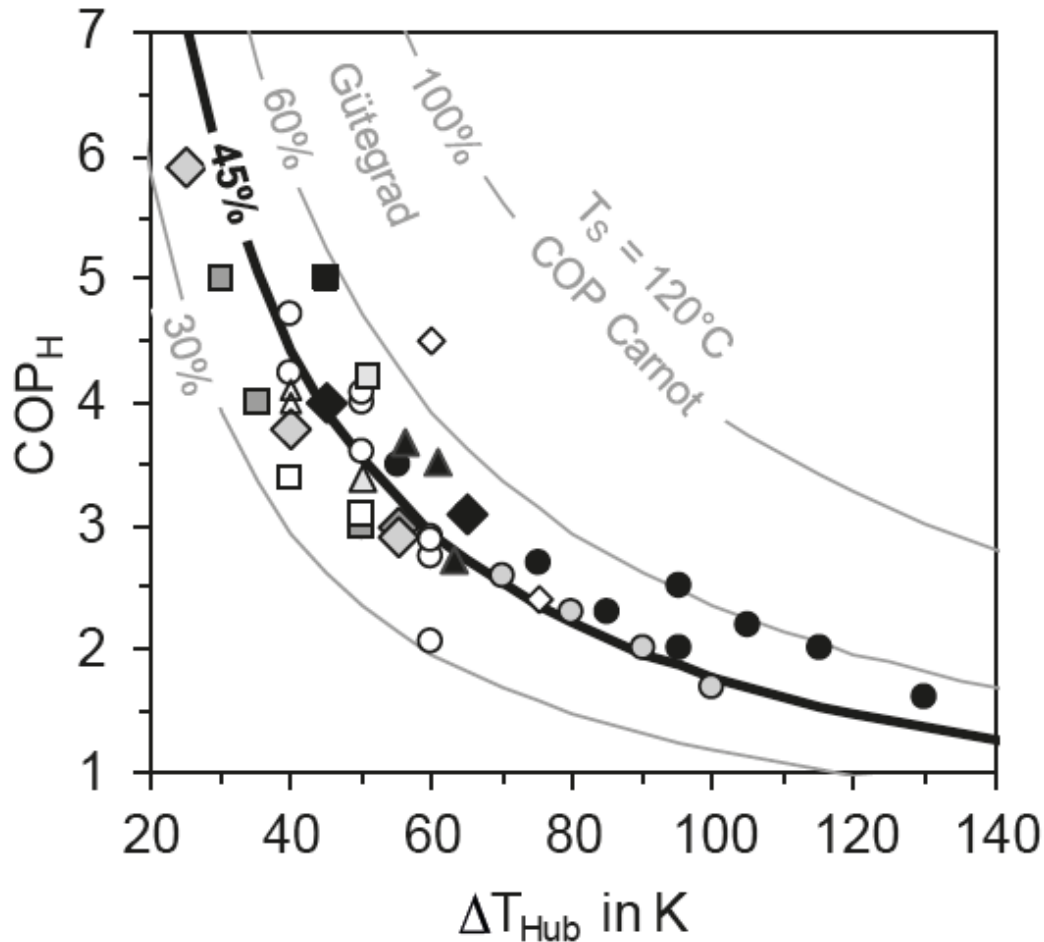


Auswahl an kommerziellen industriellen HTWP mit Vorlauftemperaturen über 90 °C



Arpagaus et al. (2018)

COPs verschiedener industrieller HTWP Produkte in Funktion vom Temperaturhub



- Kobelco SGH 120/165
- Kobelco HEM-HR90
- Viking HeatBooster S4 R1336mzz(Z)
- ◆ Ochsner IWWDS R2R3b
- ◇ Ochsner IWWDS ER3b
- ◇ Ochsner IWWDS ER3c4
- ◇ Hybrid Heat Pump
- ▲ Friotherm Unitop 22/22
- △ Combitherm
- GEA Grasso FX P
- Star Refrigeration Neatpump
- SABROE HeatPAC HPX
- Viessmann Vitocal 350-HT Pro
- △ Mitsubishi ETW-L

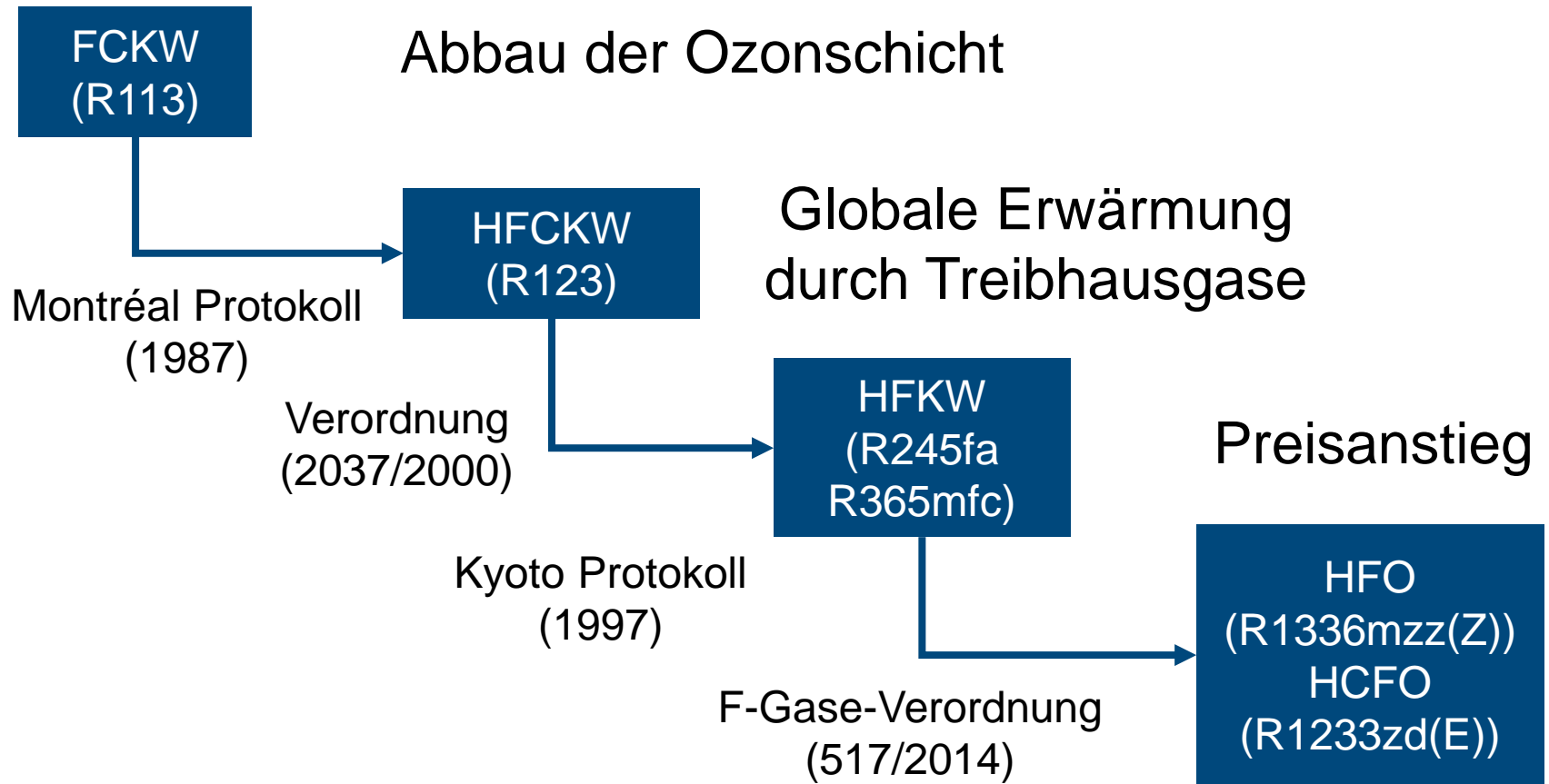
Fit-Kurve (45% Gütegrad):
 $COP_H = 68.455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0.76}$, $R^2=0.78$

Quelle: Literaturdaten
 zusammengefasst in Arpagaus et al. (2018)

Wo gibt es Forschungsbedarf?

- 1) Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer Kältemittel mit niedrigem GWP. Einsatz natürlicher Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe (R600, R601), CO₂ oder Wasser
- 2) Steigerung der Effizienz (COP ↑) von Wärmepumpen (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe, mit ölfreien Kompressoren)
- 3) Erweiterung der Grenzen der Quellen- und Vorlauftemperaturen ($T_{\text{Senke}} \uparrow$) auf höhere Werte
- 4) Optimierung und Entwicklung von Wärmepumpen-Systemen mit neuen Regelungsstrategien für höhere Temperaturen
- 5) Entwicklung temperaturbeständiger Komponenten (z.B. Ventile, Kompressoren)
- 6) Scale-up von Funktionsmodellen in den industriellen Maßstab (Demonstrationsprojekte)

Entwicklung synthetischer Kältemittel (4. Generation)



FCKW: Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe

HFCKW: Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe

HFKW: Fluorkohlenwasserstoffe

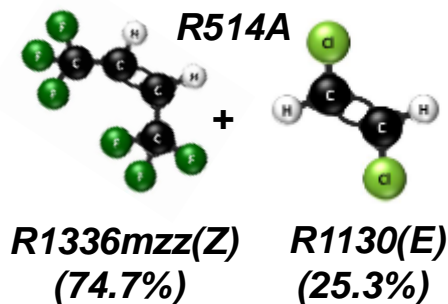
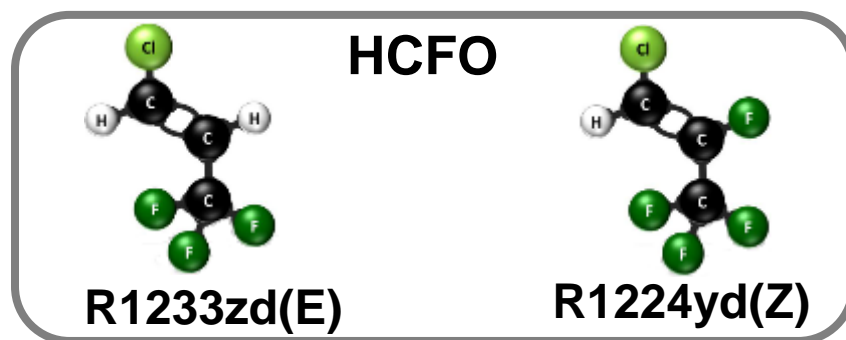
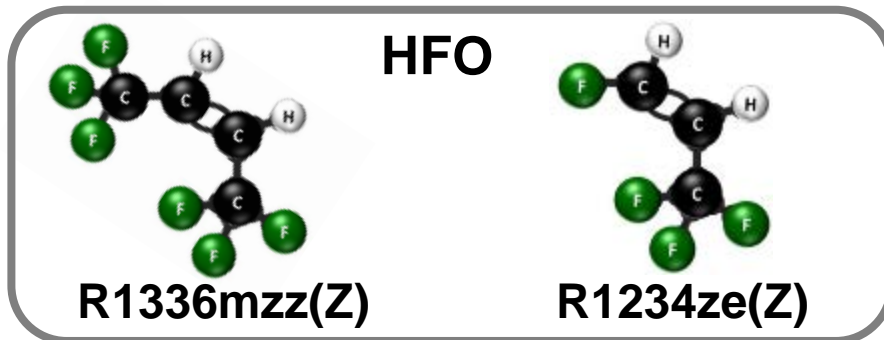
HFO: Hydrofluorolefine

HCFO: Hydrochlorfluorolefine

Paris Vereinbarung
(2015)

Geeignete HFO und HCFO Kältemittel für HTWP

| Typ | Kältemittel | Formel | T _{krit} in °C | p _{crit} in bar | Sdp. in °C | ODP | GWP ₁₀₀ | SG |
|-----------------------------|--------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|---------------|---------|--------------------|-----|
| HFO | R1336mzz(Z) ^a | CF ₃ CH=CHCF ₃ (Z) | 171.3 | 29.0 | 33.4 | 0 | 2 | A1 |
| | R1234ze(Z) ^b | CF ₃ CH=CHF(Z) | 150.1 | 35.3 | 9.8 | 0 | <1 | A2L |
| HCFO | R1233zd(E) ^c | CF ₃ CH=CHCl(E) | 166.5 | 36.2 | 18.4 | 0.00034 | 1 | A1 |
| | R1224yd(Z) ^d | CF ₃ CF=CHCl(Z) | 155.5 | 33.3 | 14.0 | 0.00012 | <1 | A1 |
| HFKW (Vergleich) | R365mfc ^e | CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃ | 186.9 | 32.7 | 40.2 | 0 | 804 | A2 |
| | R245fa ^f | CHF ₂ CH ₂ CF ₃ | 154.0 | 36.5 | 15.1 | 0 | 858 | B1 |



R514A:
azeotropes Gemisch
T_{krit} = 178.4°C
p_{krit} = 29.3 bar
Sdp. = 34.0°C
ODP = 0.00006
GWP < 2
B1

Opteon™ XP30 von Chemours

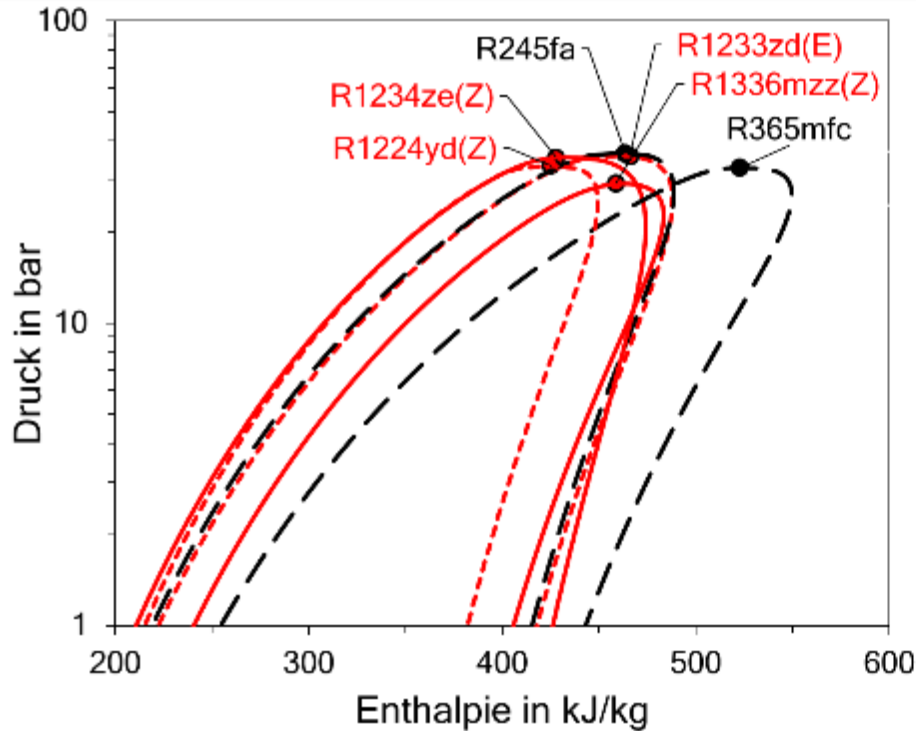
Juhasz & Kontomaris (2018), Kujak (2018)

Bemerkungen:

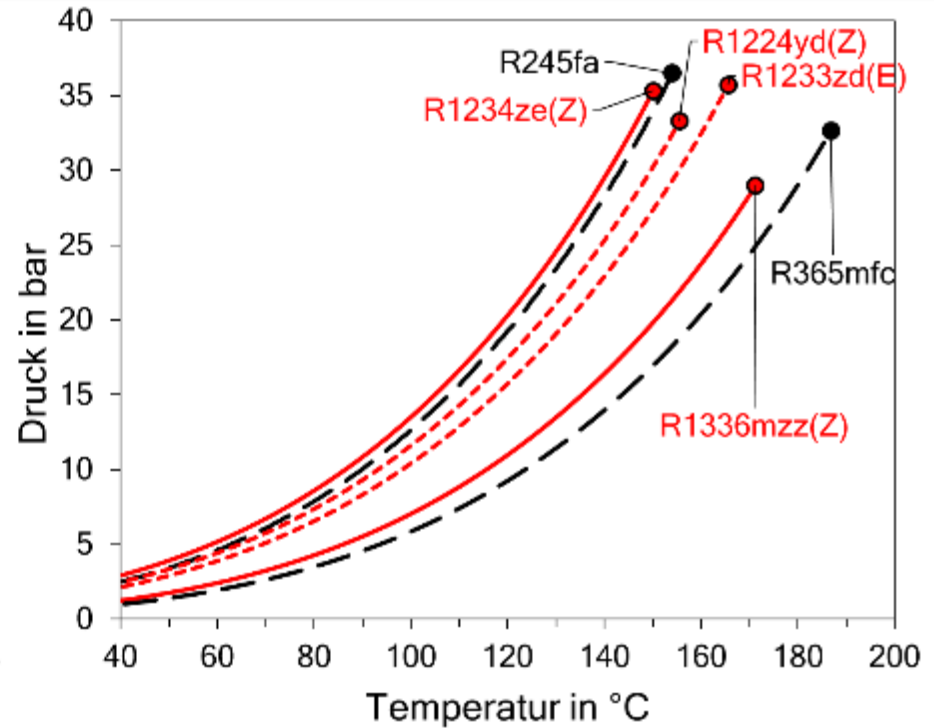
- ODP Basis R11=1.0 (UNEP, 2017)
- GWP₁₀₀ mit 100-Jahre Zeithorizont: Basis CO₂=1.0, IPCC 5th (Myhre et al., 2013) und F-Gase-Verordnung No 517/2014 (EU, 2014)
- Sicherheitsgruppe (SG) gemäss (ASHRAE, 2016)
- ^aOpteon™ MZ von Chemours, ^bFukuda et al. (2014), ^cSolstice®zd von Honeywell, ^dAMOLEA®1224yd von AGC Chemicals, ^eSolkane®365mfc von Solvay, ^fGenetron® 245fa von Honeywell

Thermodynamische Eigenschaften ausgewählter Kältemittel

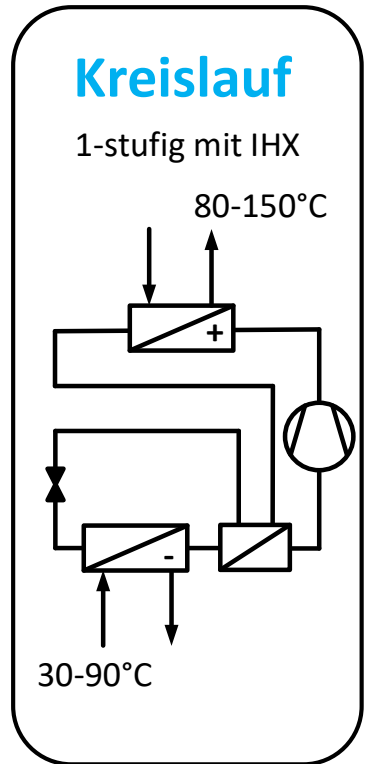
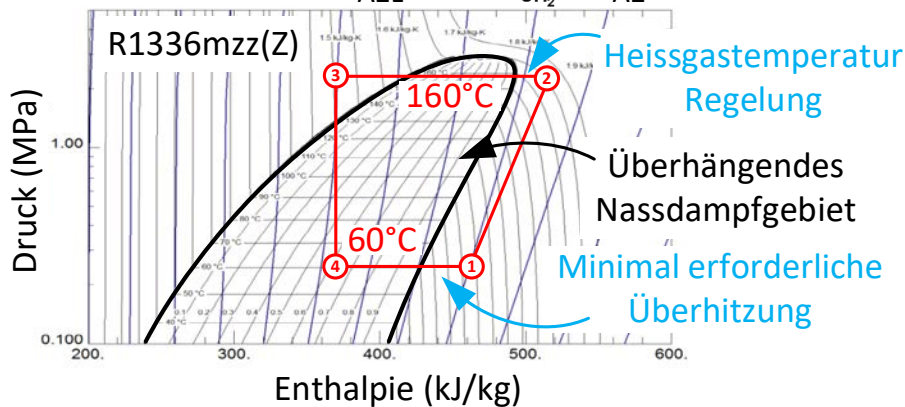
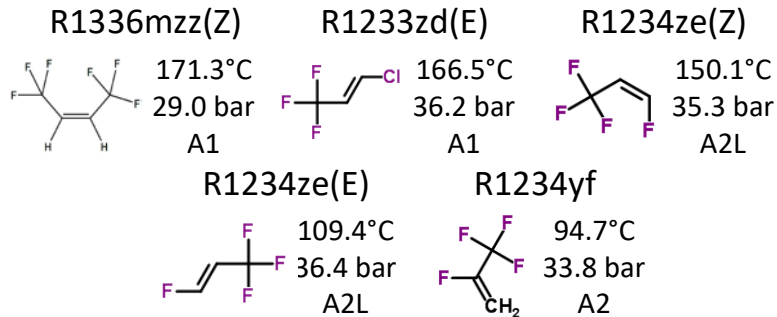
Log(p)-h Diagramm



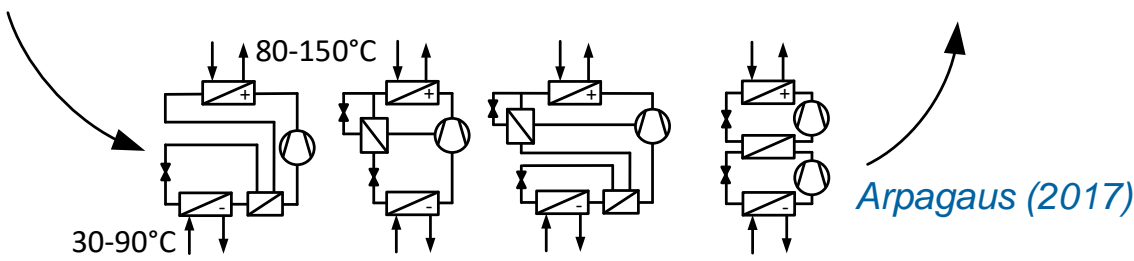
p-T Diagramm



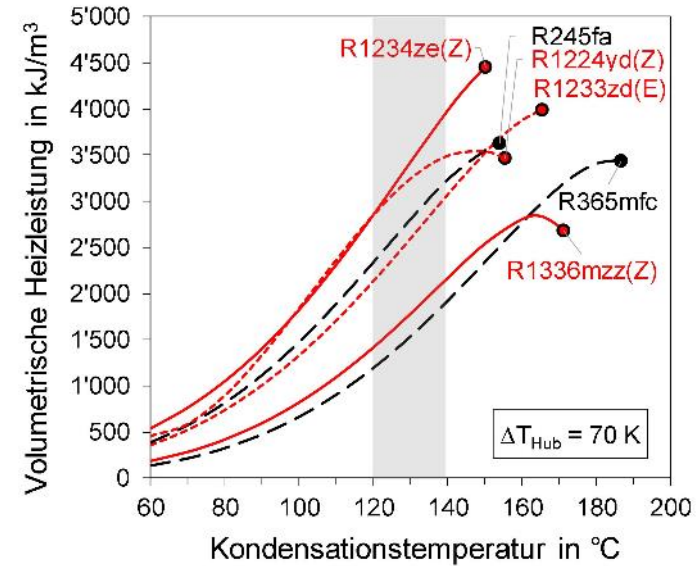
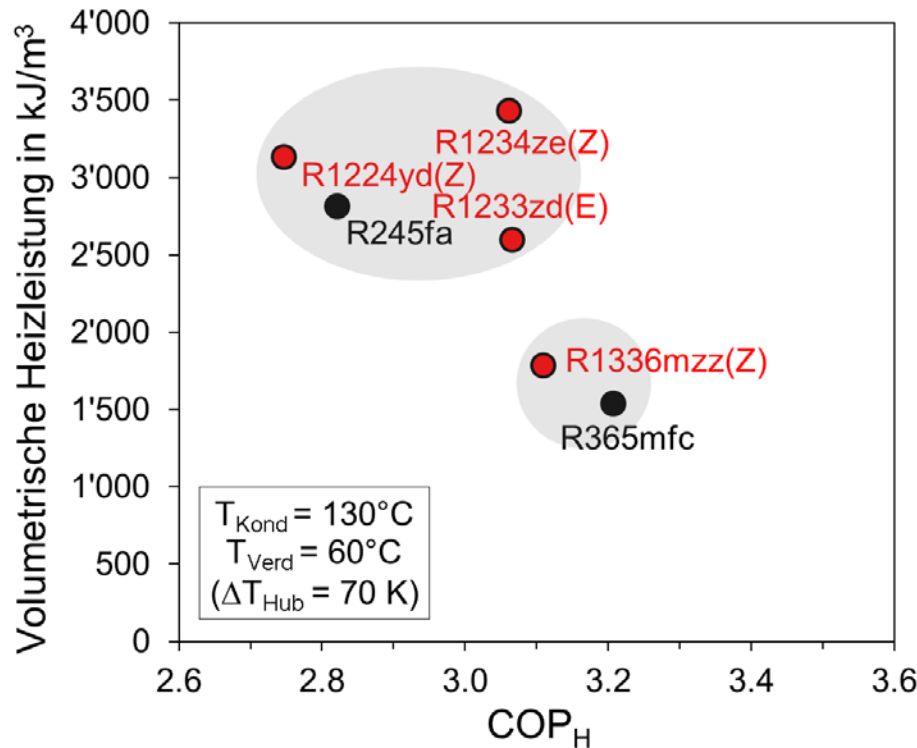
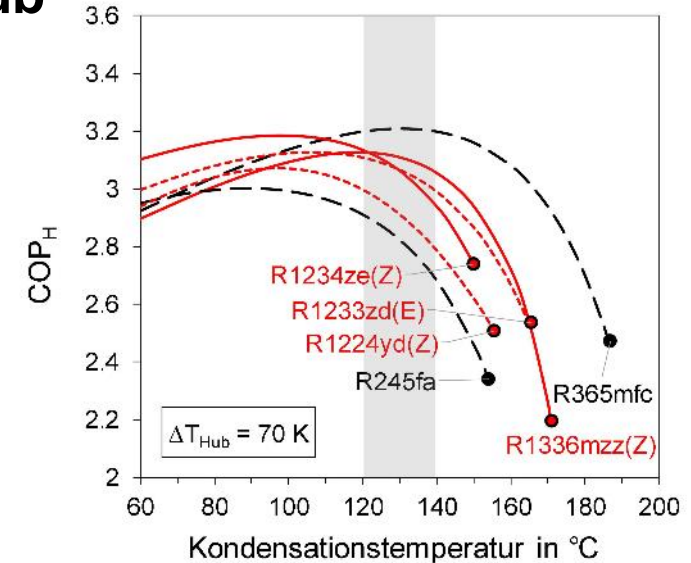
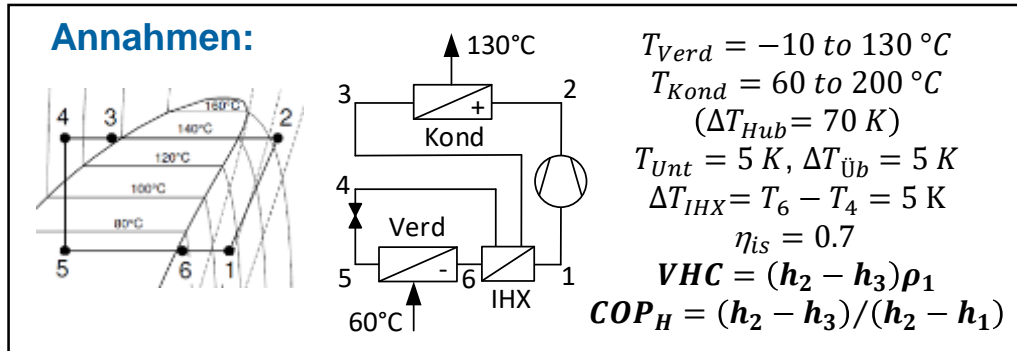
HFO und HCFO Kältemittel



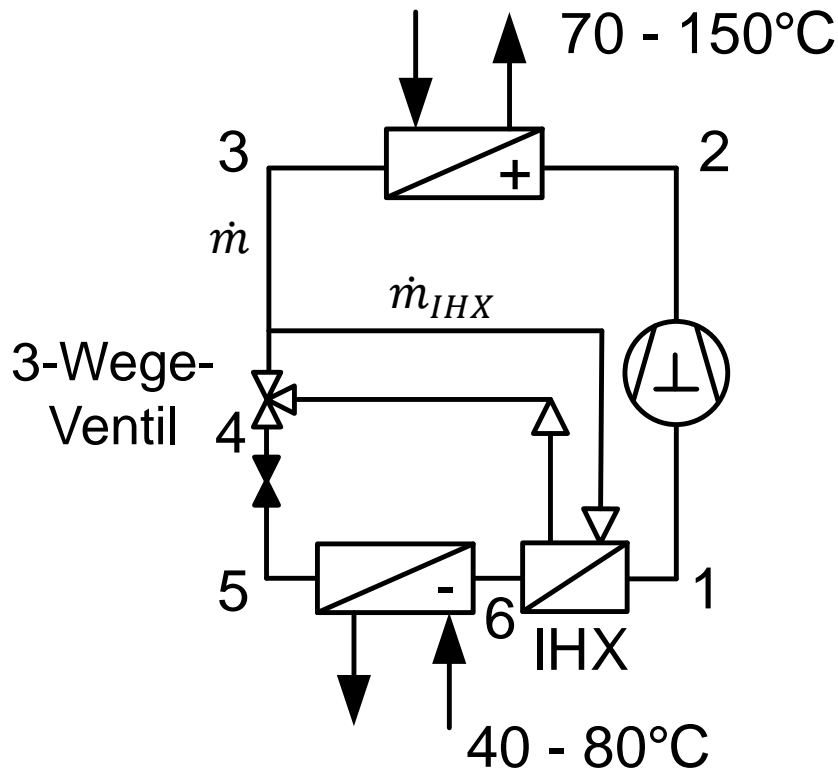
- ### Entscheidungskriterien:
- 1) Thermodynamische Eignung** ($T_{\text{Krit}} > 150^\circ\text{C}$, ermöglicht unterkritischen Betrieb, guter Wirkungsgrad bei hohen Temperaturen)
 - 2) Umweltverträglichkeit** (GWP < 10, ODP = 0, zukunftssicher nach F-Gase-Verordnung)
 - 3) Sicherheit** (keine oder nur geringe Entflammbarkeit)
 - 4) Natürliche Kältemittel** wie R600, R600a und R601 aufgrund der Entflammbarkeit (A3) ausgeschlossen, H₂O benötigt anderen Kreislauftyp (z.B. Brüdenverdichtung)



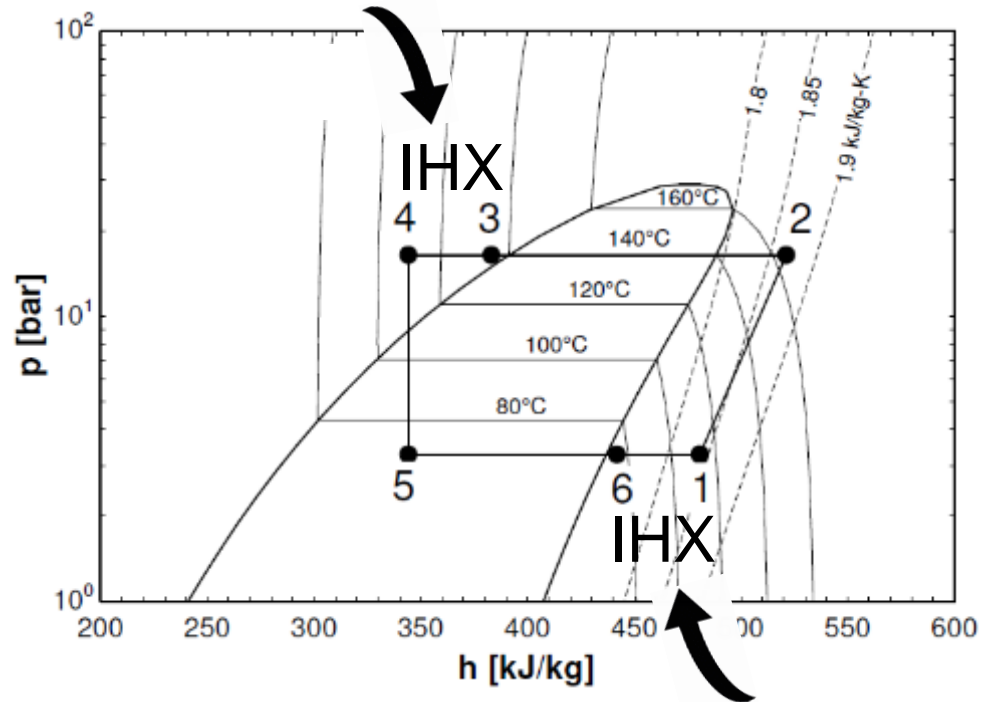
Theoretischer Vergleich ausgewählter Kältemittel im einstufigen Kreislauf mit IHX bei 70 K Hub



1-stufiger Kreislauf mit internem Wärmeübertrager (IHX) und regulierbarem 3-Wege-Ventil



$$IHX: \dot{m}_{IHX} / \dot{m} = 0\% \rightarrow 100\% \text{ (Öffnungsgrad 3-Wege-Ventil)}$$



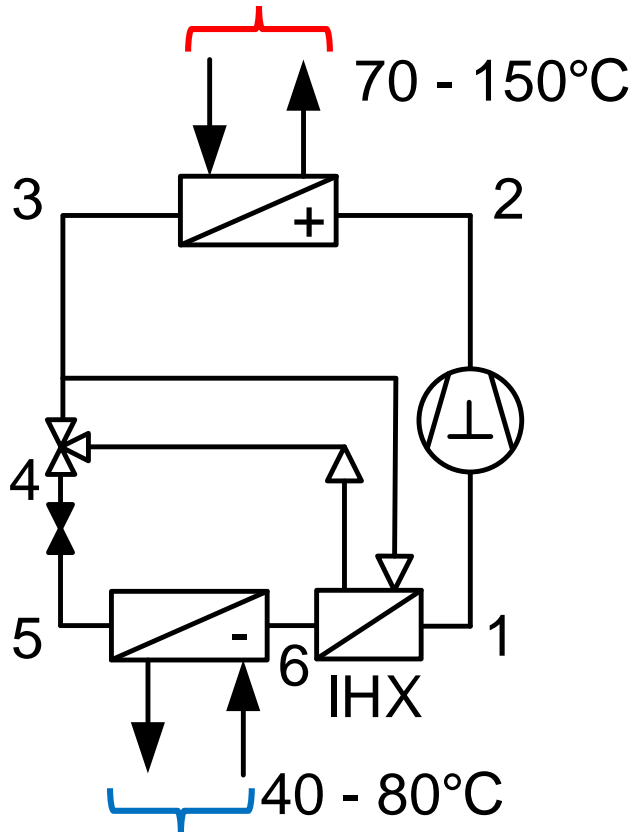
Experimentelle Untersuchungen:

- Aufbau einer HTWP im Labormaßstab mit 10 kW Heizleistung
- Vorlauftemperaturen von 80 bis 150 °C
- Bestimmung der Betriebskennfelder mit R1233zd(E) und R1336mzz(Z)



Referenzbedingungen und Variationsbereich

Spreizung $\Delta T_{\text{Senke}} = 5 \text{ bis } 30 \text{ K}$



Spreizung $\Delta T_{\text{Quelle}} = 3 \text{ K (fix)}$

| | Referenz- punkt (Ref) | Variations- bereich |
|--|---------------------------|----------------------------|
| $T_{\text{Senke,Aus}}$ | $110 \pm 1^\circ\text{C}$ | 70 bis 150°C |
| $T_{\text{Quelle,Ein}}$ | $60 \pm 1^\circ\text{C}$ | 40 bis 80°C |
| ΔT_{Hub} | 50 K | 30 bis 70 K |
| ΔT_{Senke} | $5.0 \pm 0.1 \text{ K}$ | 5 bis 30 K |
| ΔT_{Quelle} | $3.0 \pm 0.1 \text{ K}$ | — |
| f_{Komp} | 50 Hz | — |
| IHX (Öffnungsgrad 3-Wege-Ventil) | 0% | 0 bis 100% |

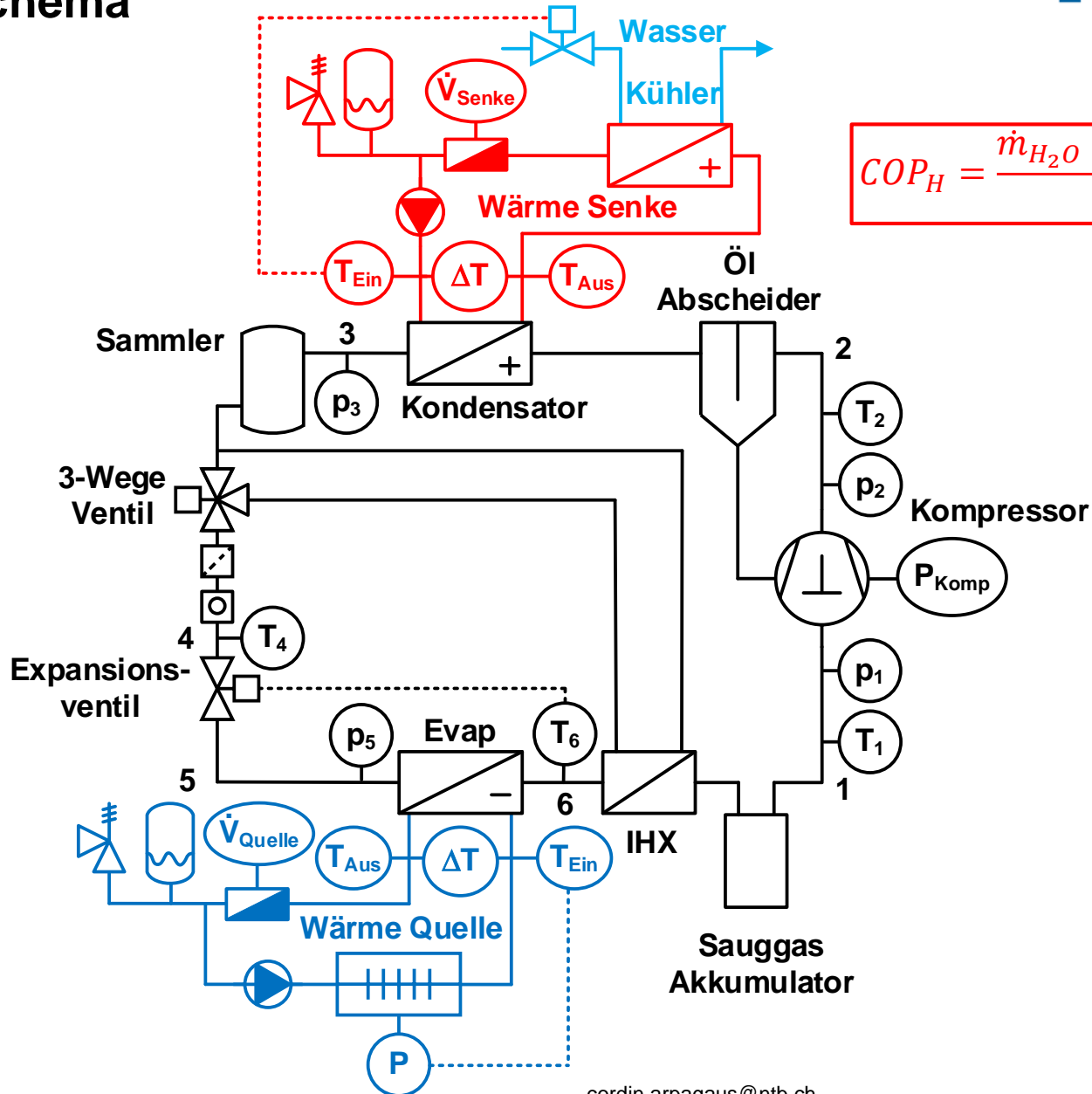
Überhitzung nach Verdampfer:

$$\Delta T_{\text{Üb}} = T_6 - T(p_{\text{Evap}}) = 5 \text{ K}$$

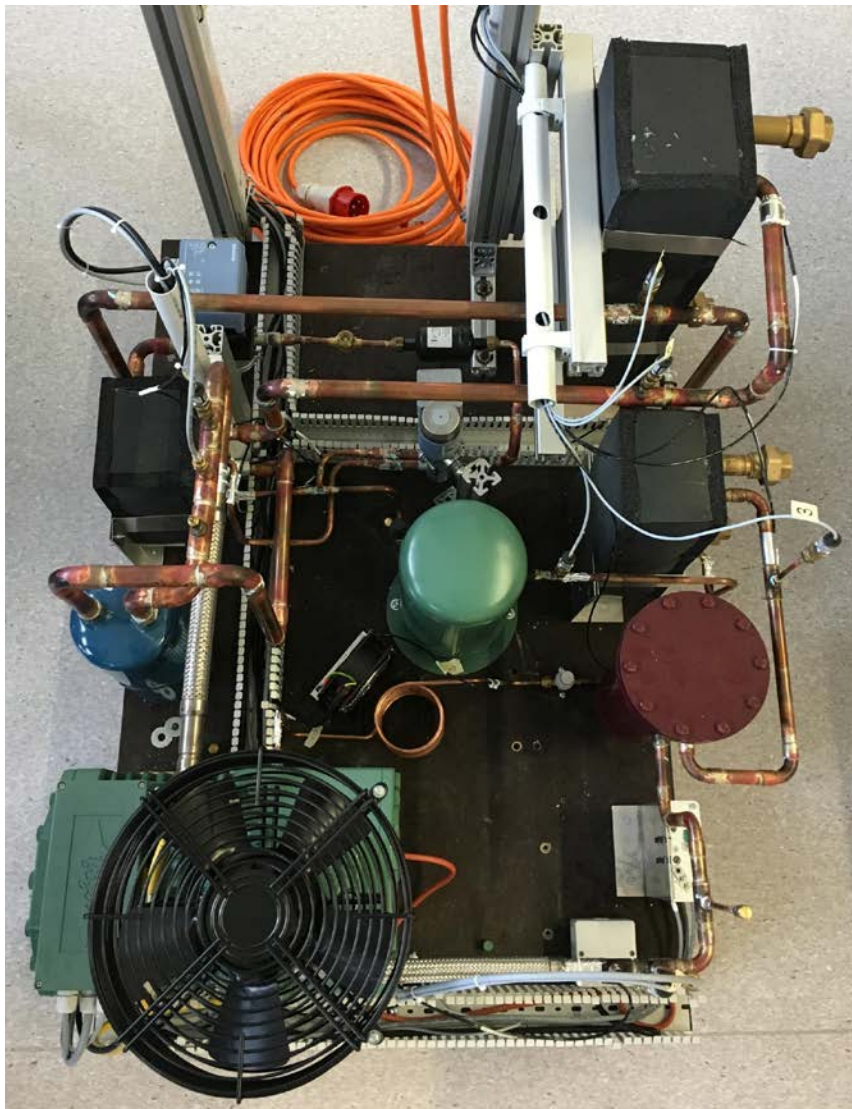
IHX erzeugt zusätzliche Überhitzung

Systemdesign

Prinzipschema

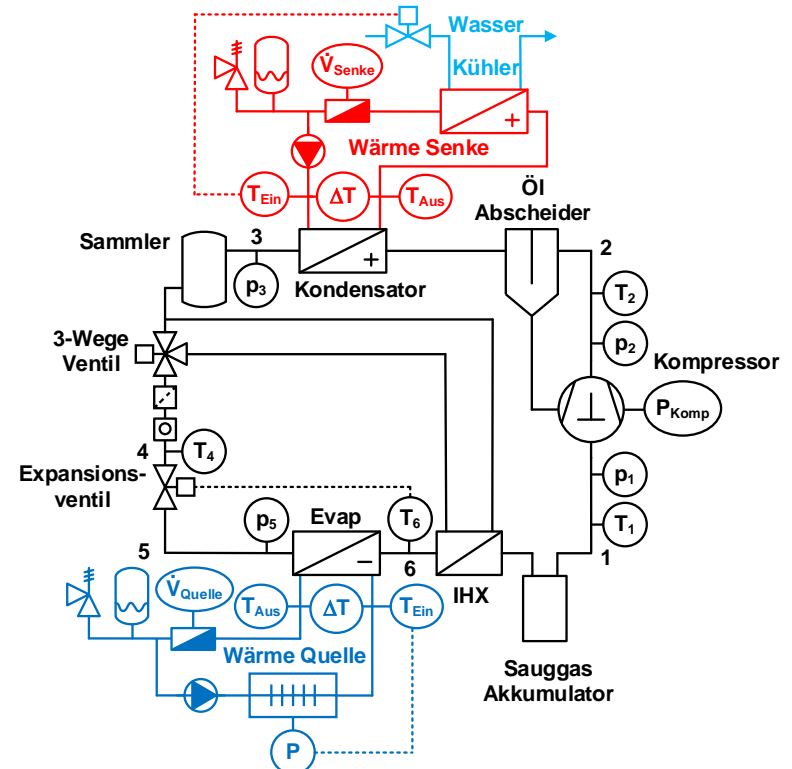


$$COP_H = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} \cdot \Delta T_{Senke}}{P_{Komp}}$$

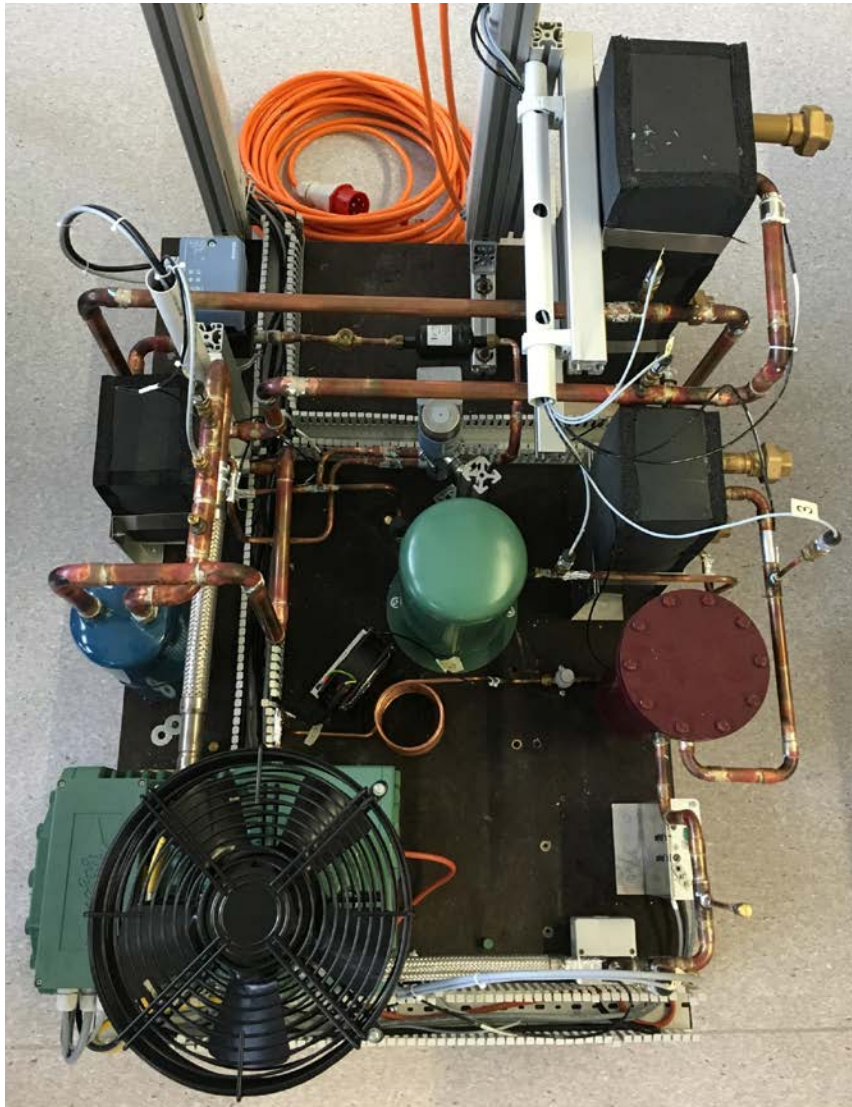


Sensoren (Messgenauigkeit)

| | |
|--------------|--|
| $p_{1...6}$ | bis 50 bar, max. 120°C, max. 1,5% Endwert |
| $T_{1...6}$ | Thermoelemente Typ K (Kl. 1) $\pm 1,5$ K (abs) |
| ΔT | Thermoelemente $\pm 0,1$ K (diff) |
| P_{Komp} | Leistungsmessung 0 bis 15 kW 0,2% Messbereich + 0,1% Messwert |
| V_{Senke} | 0,3 bis 25 L/min (max. 180°C), $\pm 0,05$ % |
| V_{Quelle} | 5% Genauigkeit, 1% Wiederholgenauigkeit |

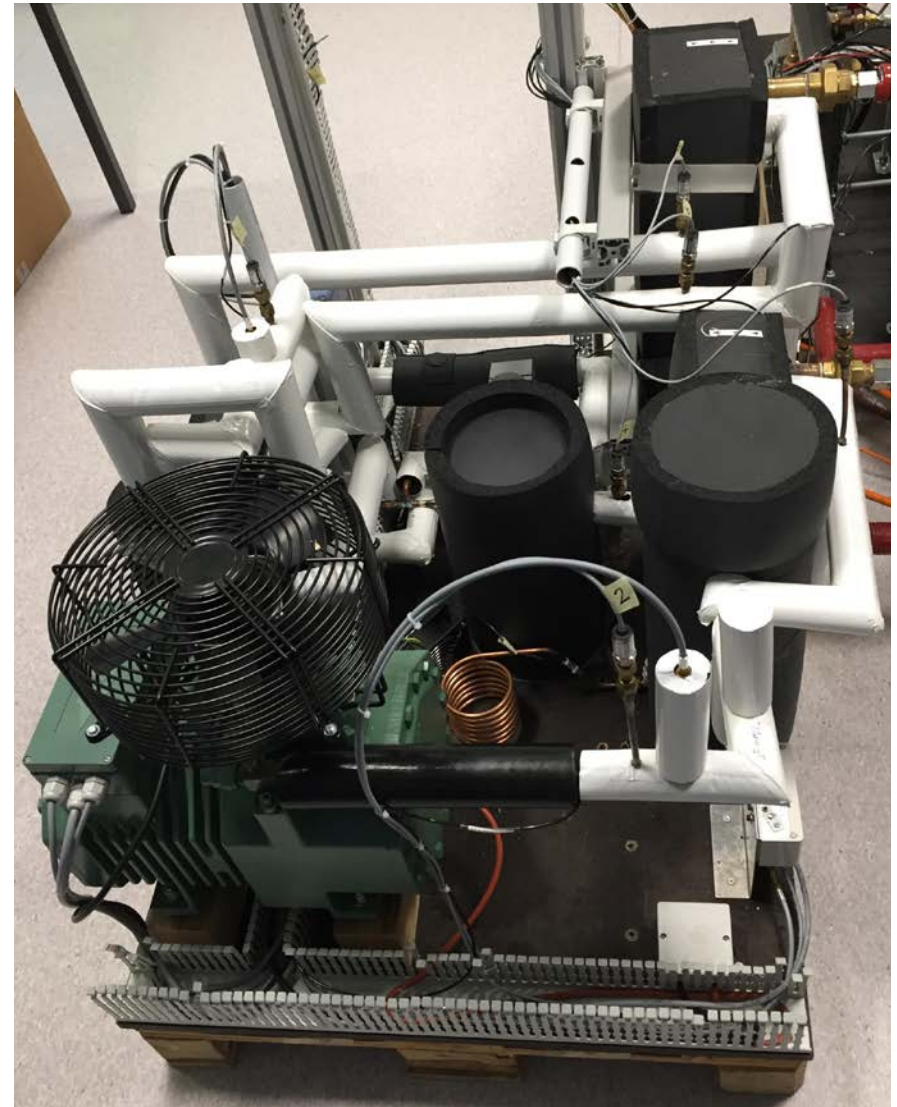
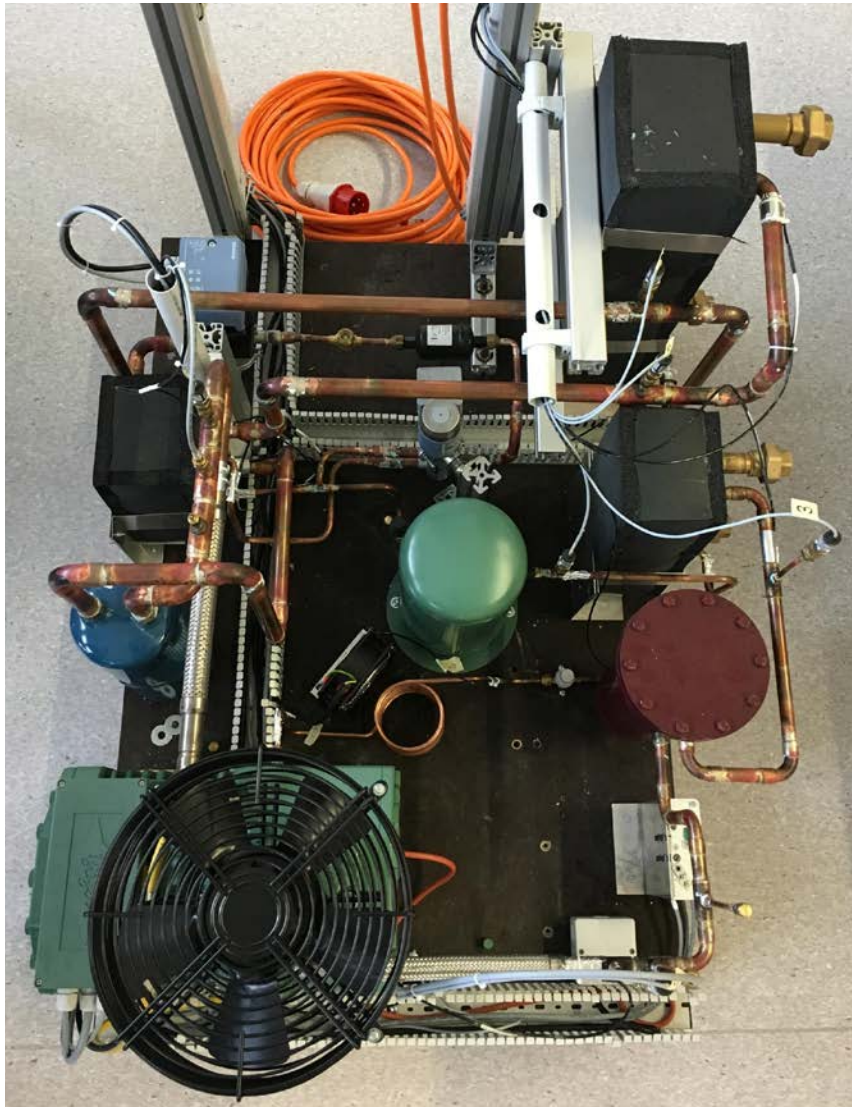


Experimenteller Aufbau und Komponenten

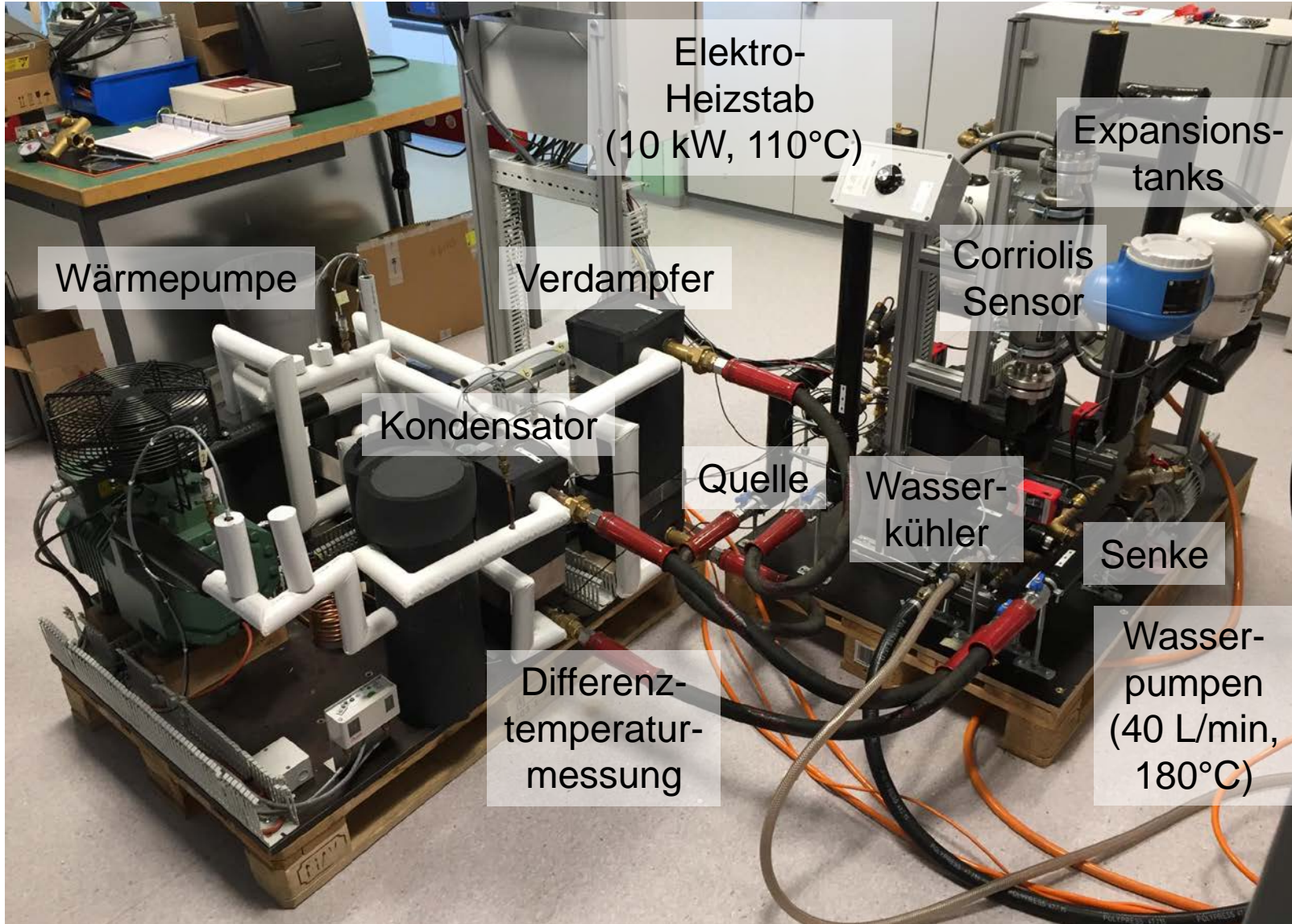


| Komponente | Hersteller |
|-------------------------------|---|
| Kompressor |  |
| Kondensator |  |
| Verdampfer | |
| IHX | |
| Sammler |  |
| Ölabscheider |  |
| Filter Trockner |  |
| Schauglas |  |
| Expansionsventil |  |
| 3-Wege Ventil | |
| Kupferleitungen 3/8" und 7/8" | |

Experimenteller Aufbau isoliert

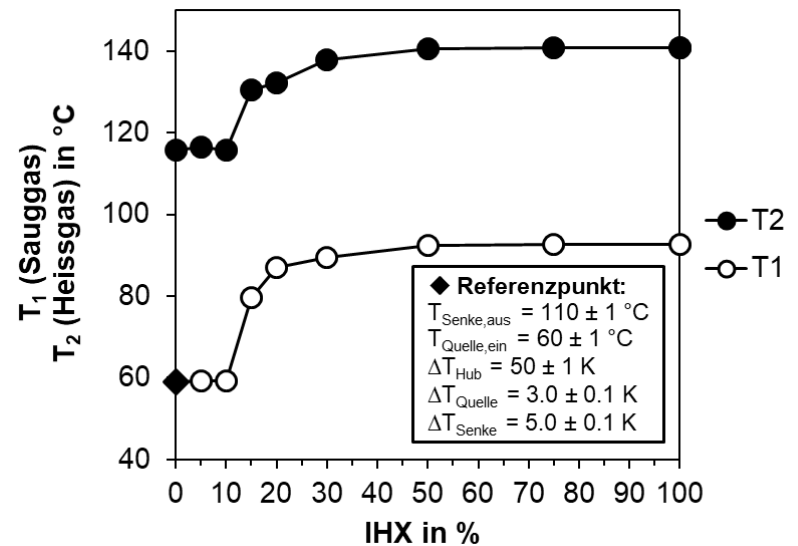
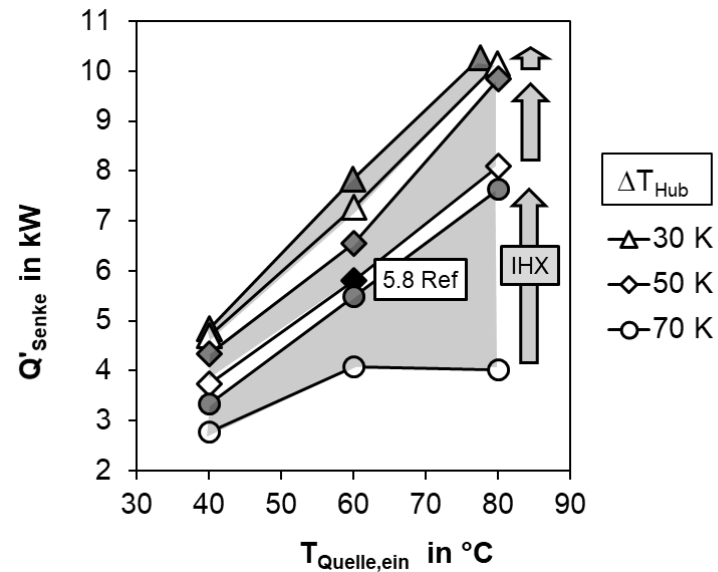
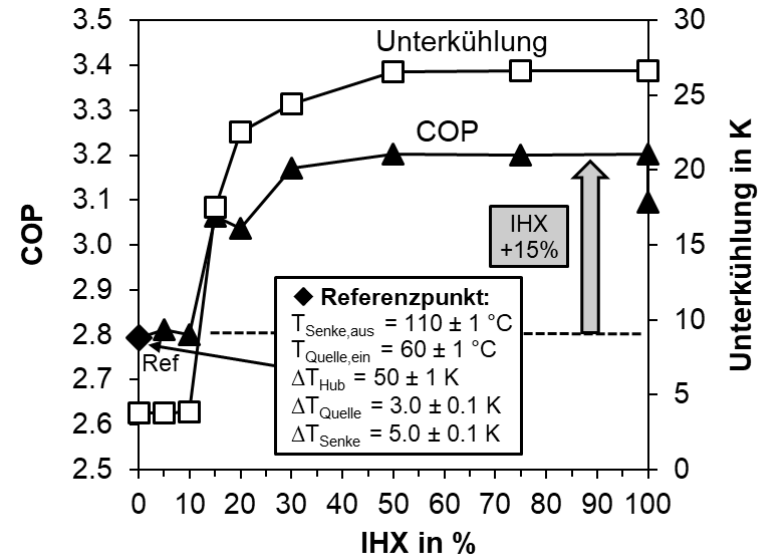
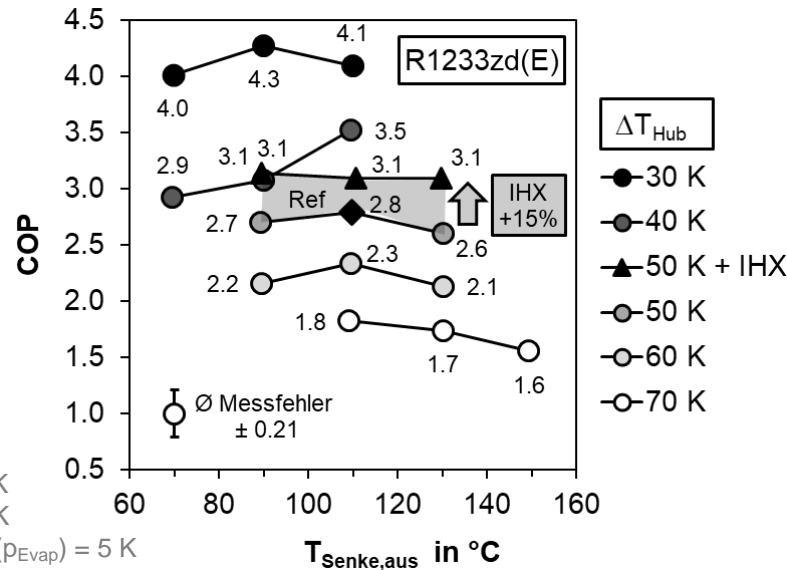


Wärmepumpe mit Wärmequelle und -senke



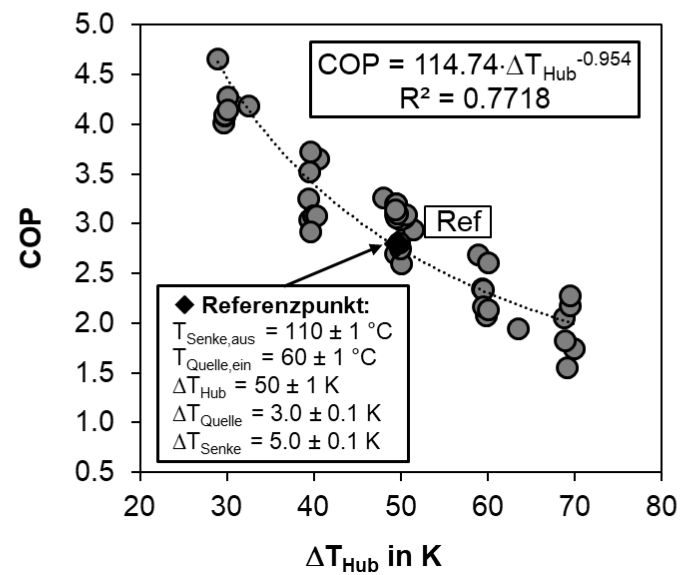
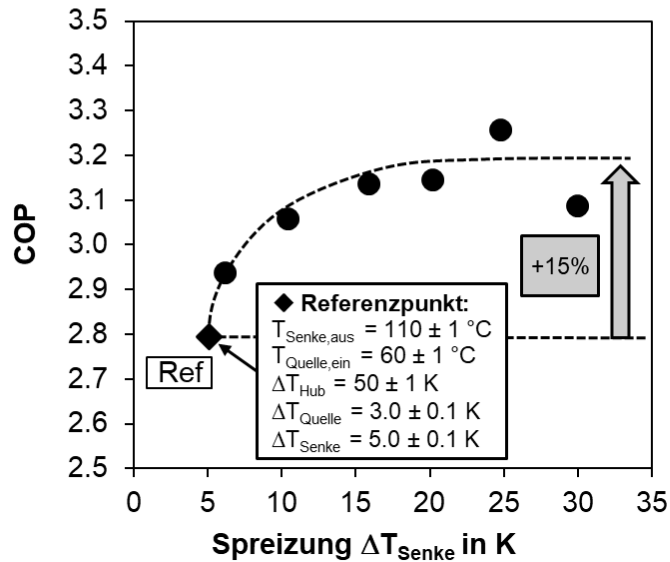
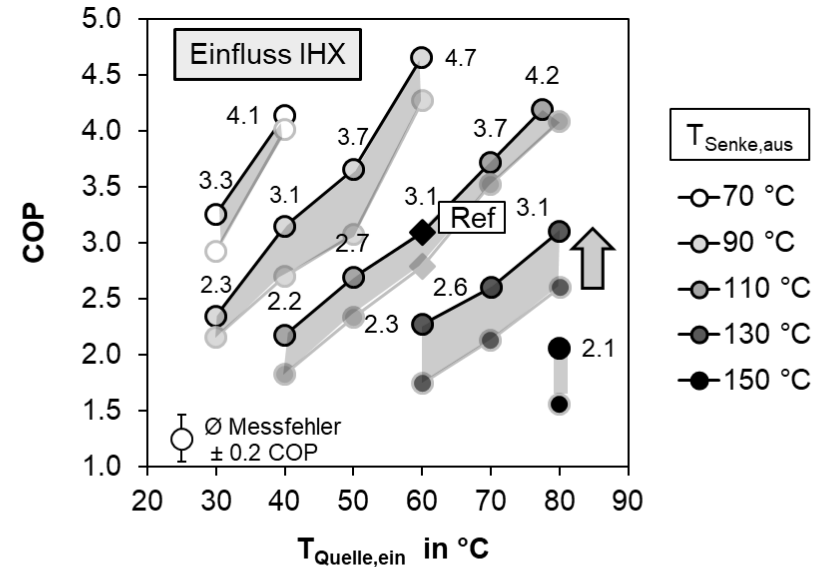
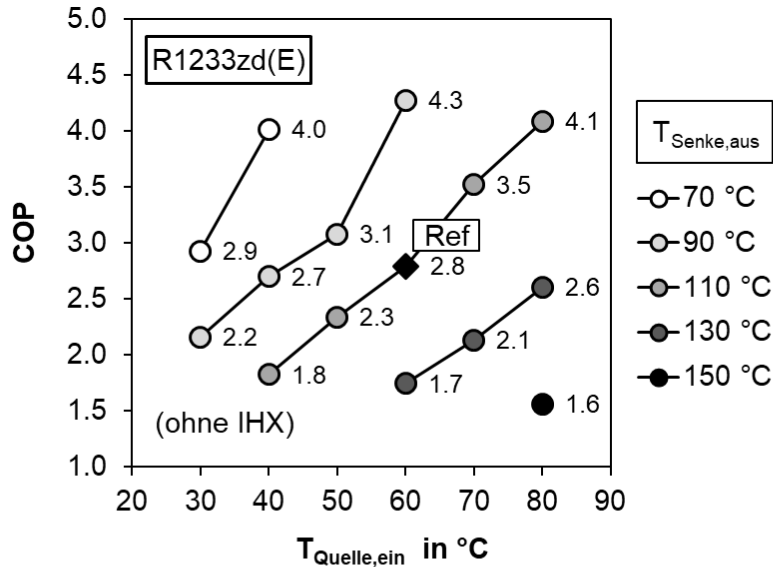
Betriebskennfeld und Effizienzerhöhung durch IHX

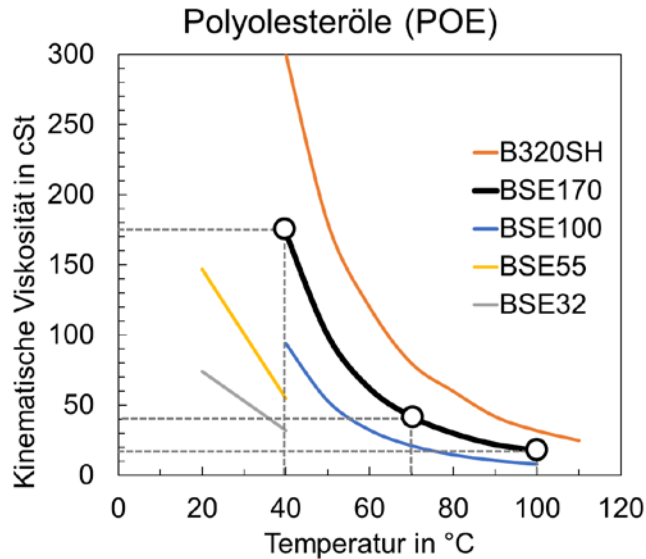
FHO Fachhochschule Ostschweiz



Spreizung:
 $\Delta T_{\text{Senke}} = 5.0$ K
 $\Delta T_{\text{Quelle}} = 3.0$ K
 $\Delta T_{\text{Üb}} = T_6 - T(\rho_{\text{Evap}}) = 5$ K

Einfluss IHX und Effizienzsteigerung durch Spreizung



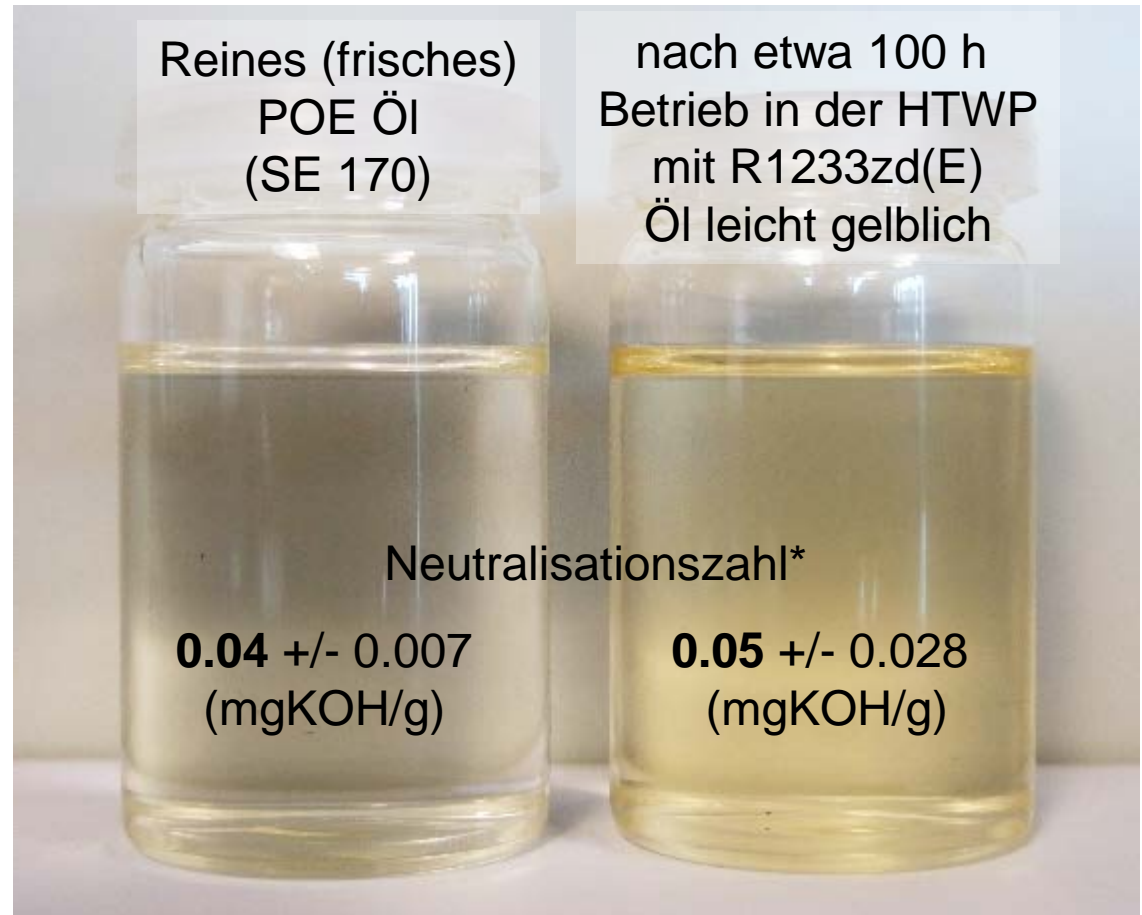


SE 170

Kinematische Viskosität
(gemäss DIN EN ISO 3104):

bei 40 °C 173 mm²/s

bei 100 °C 17,6 mm²/s



(*gemessen nach DIN 51558-1)



RENISO TRITON SE 170 Synthetisches Kältemaschinenöl auf Polyolester-Basis (POE) für HFKW/FKW- und HFO- bzw. HFO/HFKW Kältemittel

Schlussfolgerungen

- **Grosse Anwendungspotentiale für HTWP in der Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie**
 - z.B. Prozesse wie Trocknung, Sterilisation, Verdampfung, und Wärmerückgewinnung)
 - > 26 HTWP (Kompressionswärmepumpen) von 15 Herstellern identifiziert mit Vorlauftemperaturen > 90°C (einige > 120°C, max. 165°C)
 - $COP_H = 68,455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0,76}$ (H: Heizen, ΔT_{Hub} von Quelle zu Senke in K, bei 45% Gütegrad)
- **Forschungsbedarf:**
 - Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer HFO Kältemittel mit GWP < 10
 - Trend zu natürlichen Kältemitteln (R600, R601, CO₂, H₂O)
 - Steigerung der Effizienz (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe, mit ölfreien Kompressoren),
 - Neuen Regelungsstrategien und Scale-up
- **Theoretischer Vergleich verschiedener HFO und HCFO Kältemittel**
 - Kompromiss zwischen COP (Effizienz) und VHC (volumetrische Wärmeleistung)
 - 1336mzz(Z) ist der nächste «Drop-in» Ersatz für R365mfc
 - R1224yd(Z), R1234ze(Z) und R1233zd(E) liegen näher an R245fa

Schlussfolgerungen

■ Experimental HTHP Laboranlage

- Aufbau der Laboranlage mit Standard Komponenten
- 1-stufiger Kreislauf mit einstellbarem IHX (interner Wärmeübertrager) für die Regelung (mittels 3-Wege Ventil) der Überhitzung und Effizienzsteigerung von +15%
- Handelsübliches HCFO R1233zd(E) getestet (Betriebskennfeld)
- Betrieb mit 40 bis 80°C Wärmequelle und 70 bis 150°C Wärmesenke nachgewiesen
- COP_H im Referenzpunkt W60 / W110 (50 K Temperaturhub) liegt bei 3,1 (mit IHX)
- COP Steigerung von +15% durch Erhöhung der Spreizung (Senke) von 5 auf 30 K (z.B. Dampferzeugung oder Trocknungsprozesse)

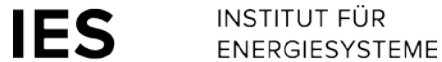
Betriebspunkte
mit R1233zd(E)

■ Zukünftige Arbeiten

- Experimente mit HFO R1336mzz(Z) und HCFO R1224yd(Z)

| $T_Q/T_S (\Delta T)$ | COP_H |
|----------------------|---------|
| 80/150 (70) | 2.1 |
| 80/130 (50) | 3.1 |
| 80/110 (30) | 4.2 |
| 60/90 (30) | 4.7 |
| 40/70 (30) | 4.1 |

- NEU** Arpagaus C.: [Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale](#), VDE Verlag, Berlin, 2018, 140 Seiten, ISBN 978-3-8007-4550-0
- Arpagaus C., Bless F., Uhlmann M., Schiffmann J., Bertsch S.S.: [Review - High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research Status, refrigerants, and application potentials](#), Energy, 2018, 152, 985-1010.
 - Bertsch S.S, Arpagaus C., Bless F., Weickgenannt A., Schiffmann J.: [Theoretical investigation of a high temperature heat pump using a micro turbo compressor and water as a refrigerant](#), 13th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, June 18-20, 2018, Valencia, Spain.
 - Arpagaus C., Bless F., Schiffmann J., Bertsch S.S.: [Hochtemperatur Wärmepumpen: Marktübersicht und Stand der Forschung](#), DKV-Tagung, 23. Nov. 2017, Bremen ([Kurzfassung](#)).
 - Arpagaus C., Bless F., Schiffmann J., Bertsch S.S.: [Review on high temperature heat pumps - market overview and research status](#), [International Workshop on High Temperature Heat Pumps](#), Sept 11, 2017, Copenhagen, Denmark.
 - Bless F., Arpagaus C., Bertsch S.S., Schiffman J.: [Theoretical analysis of steam generation methods - Energy, CO2 emission, and cost analysis](#), Energy, 2017, 129, 114-121.
 - Arpagaus C.: [Hochtemperatur Wärmepumpen: Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, der Anwendungspotentiale und der Kältemittel](#), NTB Buchs, im Auftrag des Fördervereins Institut für Energiesysteme IES, 10.3.2017, [Link zur Prezi Präsentation](#).
 - Arpagaus C.; Bless, F.; Schiffmann J.; Bertsch S.S.: [Multi-temperature heat pumps: A literature review](#), International Journal of Refrigeration, 2016, 69, 437–465.



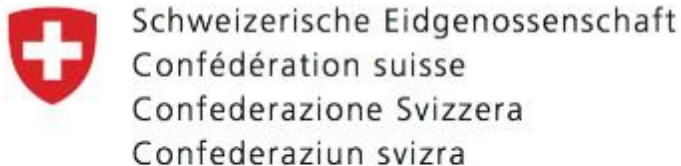
Manuel Prinzing
Dr. Frédéric Bless
Michael Uhlmann
Elias Büchel
Stefan Frei
Ralph Kuster
Prof. Stefan S. Bertsch



Prof. Jürg Schiffmann



Finanzieller Support



**Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung**



www.sccer-eip.ch

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Dr. Cordin Arpagaus

NTB Interstaatliche Hochschule für
Technik Buchs, Institut für
Energiesysteme IES, Schweiz

cordin.arpagaus@ntb.ch

Tel. +41 81 377 94 34

www.ntb.ch/en/team/cordin-arpagaus