



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

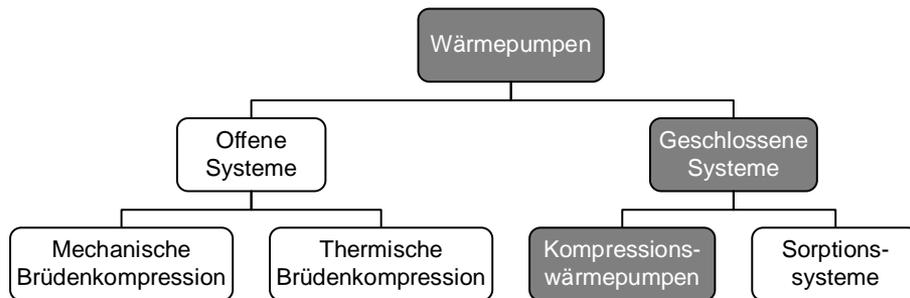
C. Arpagaus, M. Prinzing, F. Bless,  
M. Uhlmann, E. Büchel, S. Frei, R.  
Kuster, S.S. Bertsch, *NTB Buchs*

J. Schiffmann, *EPFL Neuchâtel*

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

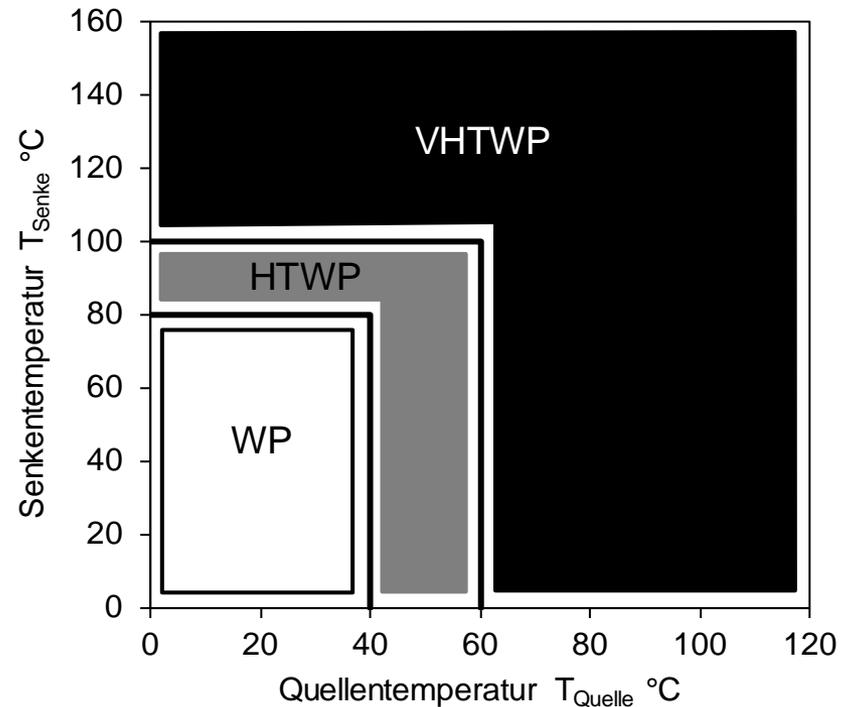


### Fokus auf Kompressionswärmepumpen



*Nellissen und Wolf (2015)*

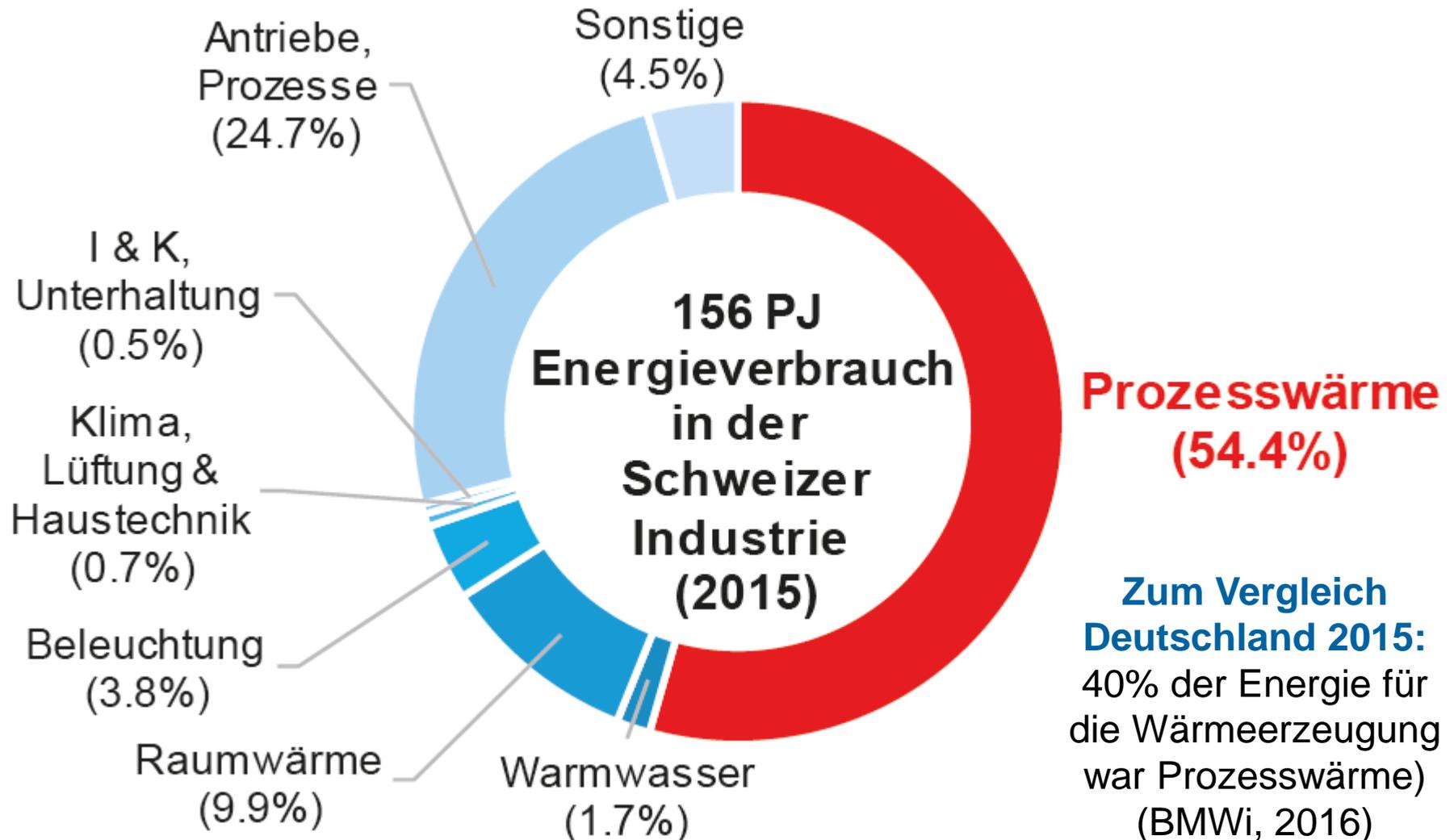
### Entwicklung der Temperaturniveaus für Kompressionswärmepumpen



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

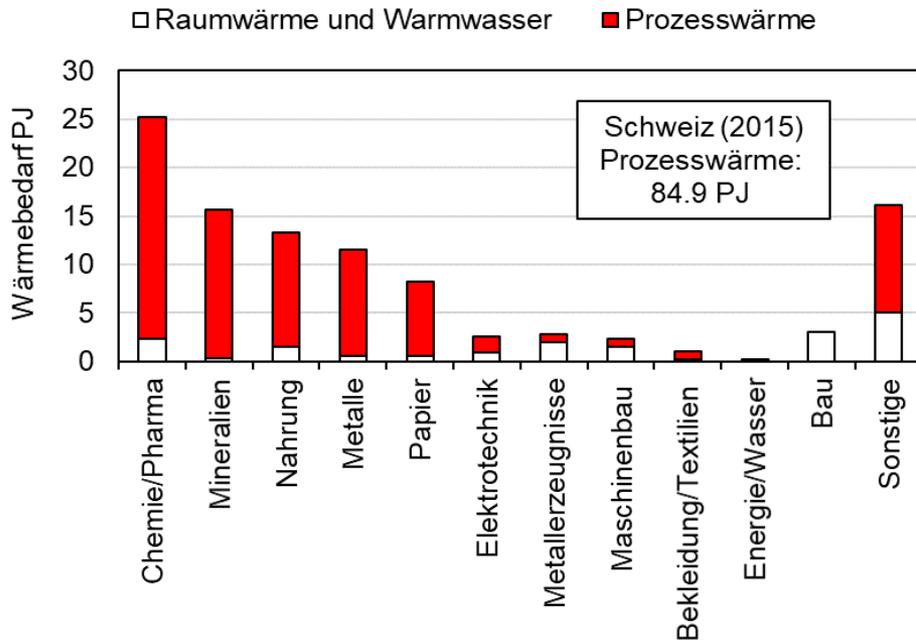
*Bobelin et al. (2012), IEA (2014), Jakobs und Laue (2015), Peureux et al. (2012, 2014)*

# Industrieller Energieverbrauch der Schweiz (2015) nach Verwendungszweck

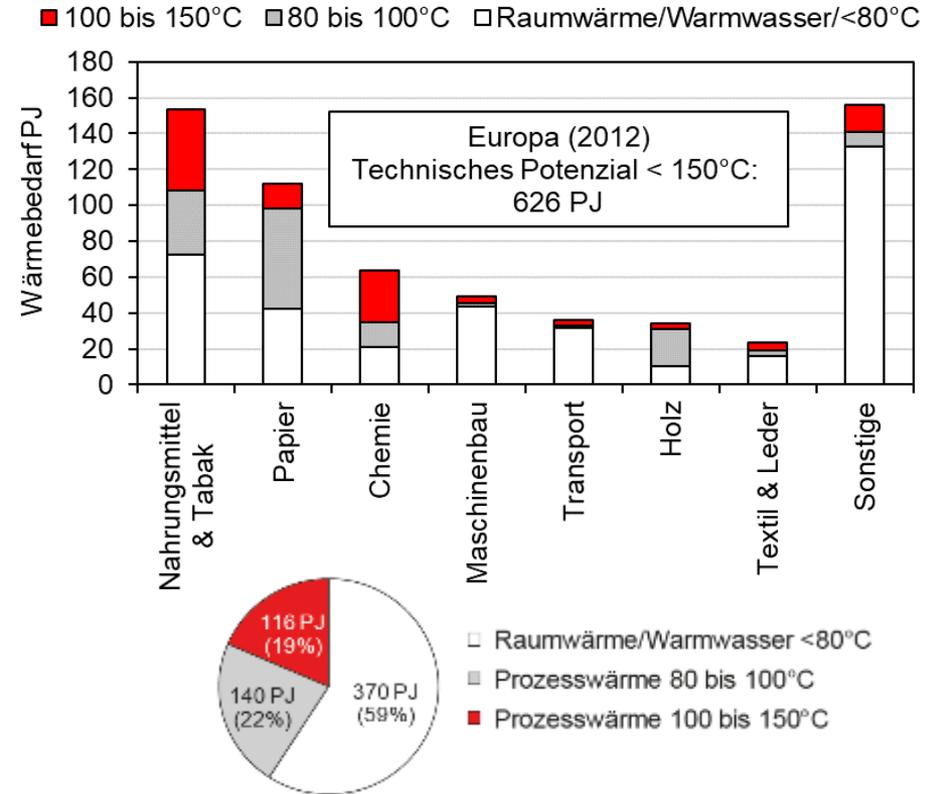


## Potenzial für HTWP in verschiedenen Industriesektoren aufgeteilt nach Temperaturbereichen der Prozesswärme

### Theoretisches Potenzial für HTWP in der Schweiz



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



BFE (2016), Pulfer und Spirig (2015)

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

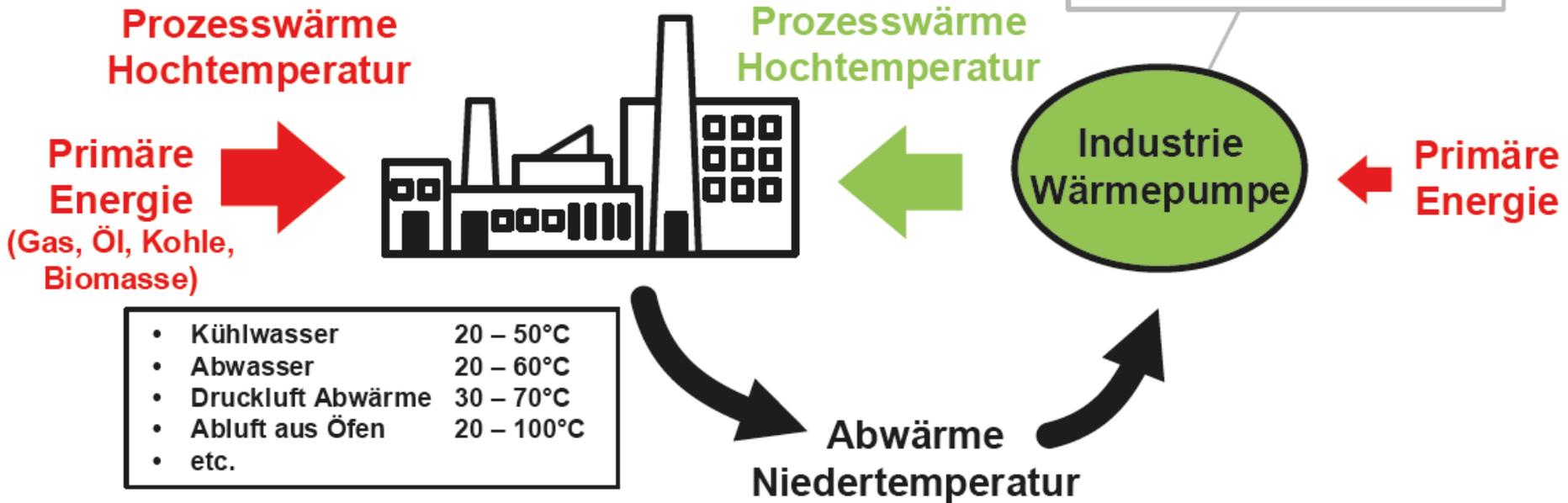


## Prinzip der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen

- 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**

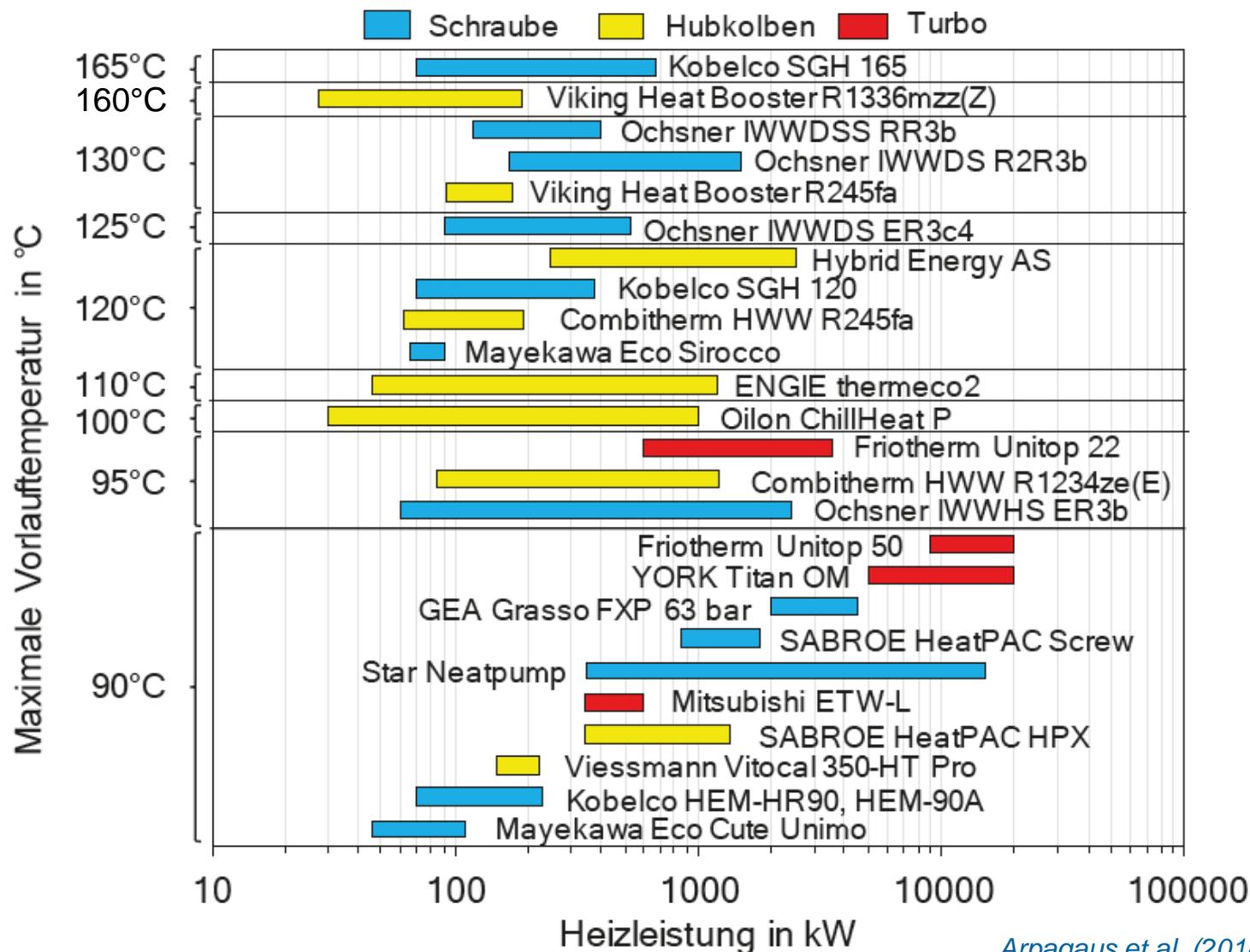
**Papierherstellung**

**Lebensmittel**

**Abwärmennutzung**

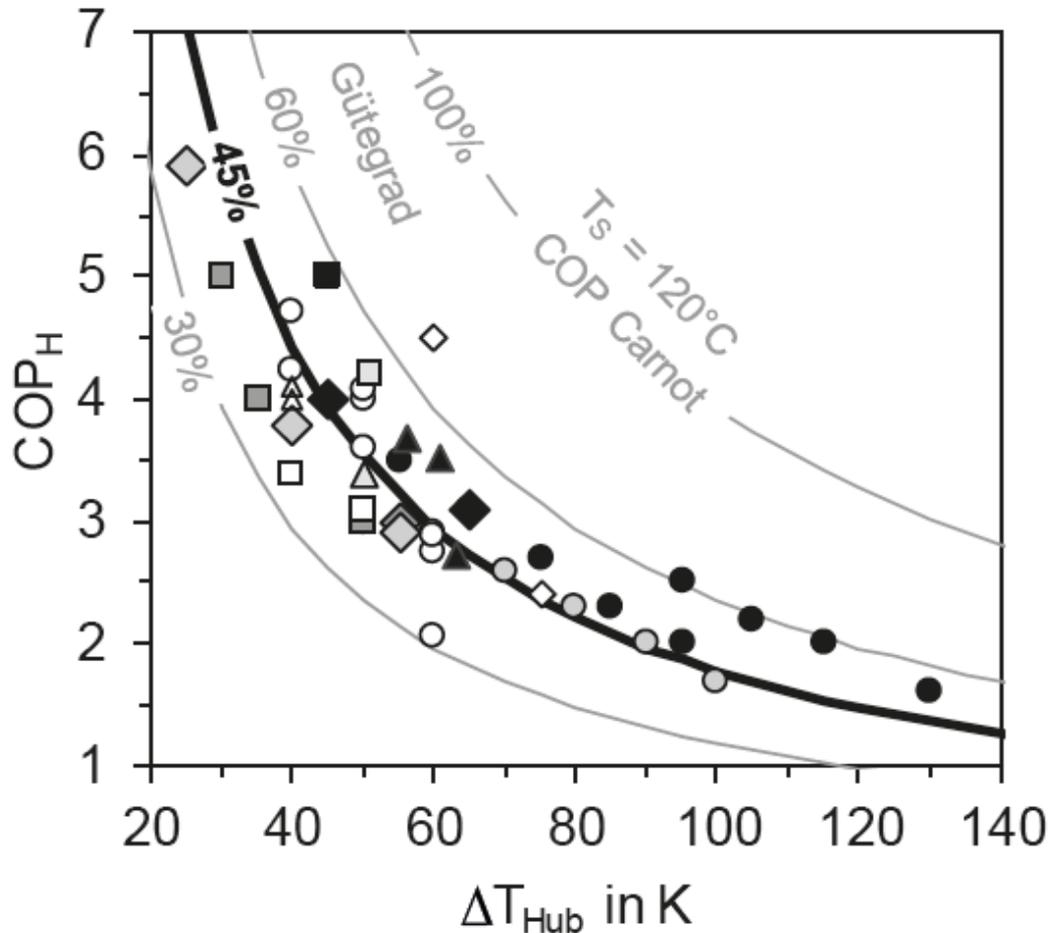


## Auswahl an kommerziellen industriellen HTWP mit Vorlauftemperaturen über 90 °C



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

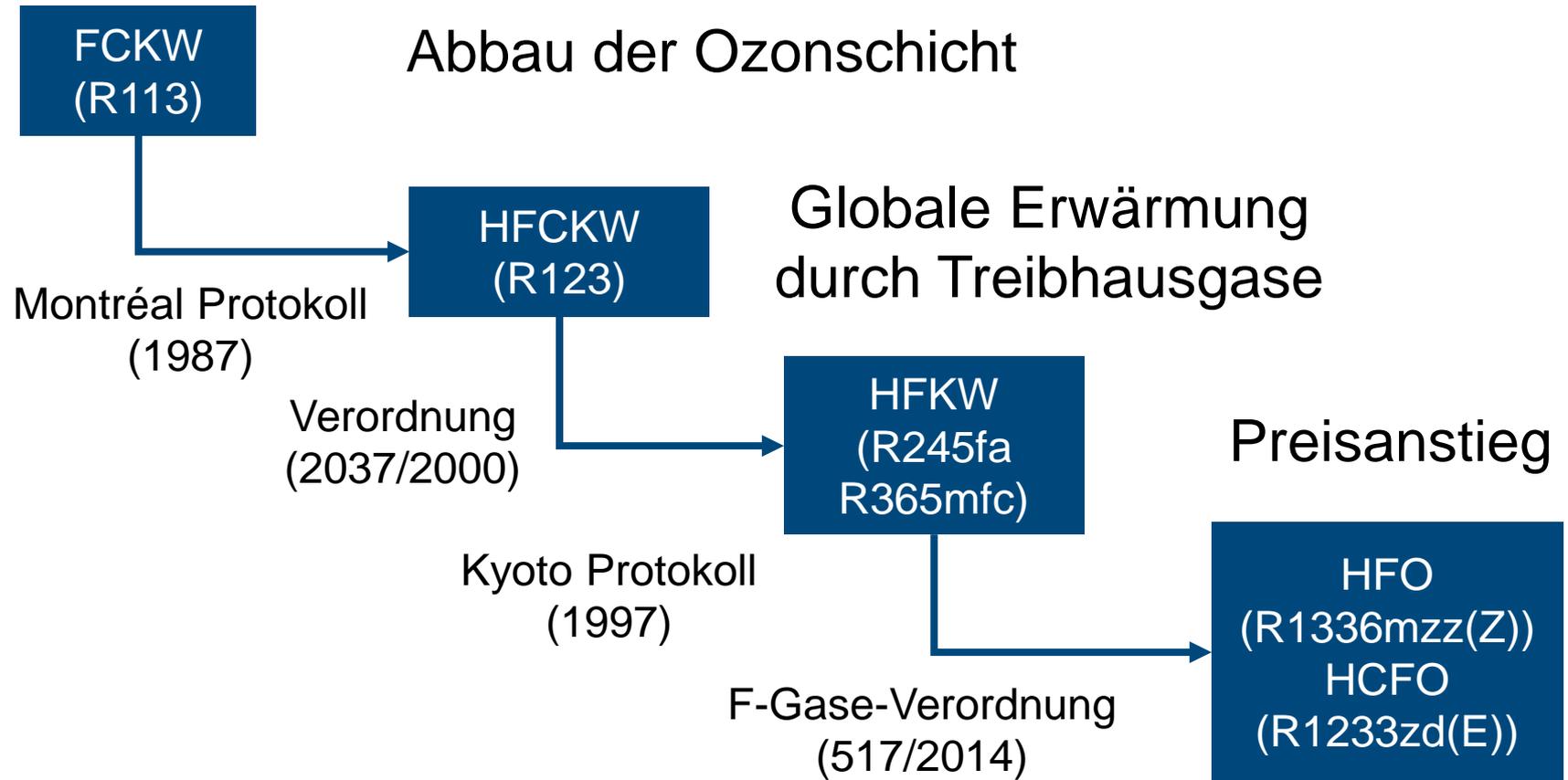
Fit-Kurve (45% Gütegrad):  
 $COP_H = 68.455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0.76}$ ,  $R^2=0.78$

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), CO<sub>2</sub> 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*

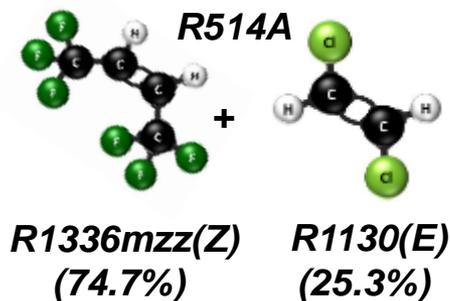
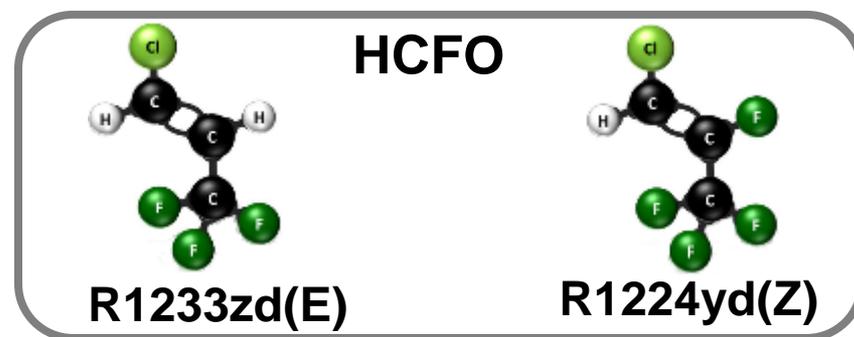
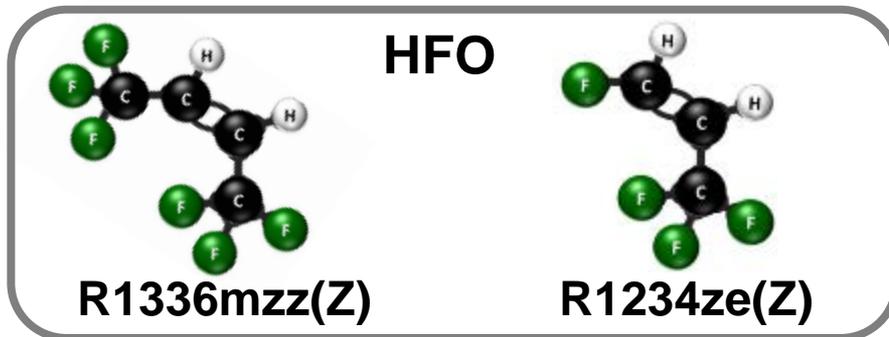
*HFO: Hydrofluorolefine*

*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 <sub>100</sub>	SG
<b>HFO</b>	R1336mzz(Z) <sup>a</sup>	CF <sub>3</sub> CH=CHCF <sub>3</sub> (Z)	171.3	29.0	33.4	0	2	A1
	R1234ze(Z) <sup>b</sup>	CF <sub>3</sub> CH=CHF(Z)	150.1	35.3	9.8	0	<1	A2L
<b>HCFO</b>	R1233zd(E) <sup>c</sup>	CF <sub>3</sub> CH=CHCl(E)	166.5	36.2	18.4	0.00034	1	A1
	R1224yd(Z) <sup>d</sup>	CF <sub>3</sub> CF=CHCl(Z)	155.5	33.3	14.0	0.00012	<1	A1
<b>HFKW (Vergleich)</b>	R365mfc <sup>e</sup>	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	186.9	32.7	40.2	0	804	A2
	R245fa <sup>f</sup>	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	154.0	36.5	15.1	0	858	B1



**R514A:**  
**azeotropes Gemisch**  
 $T_{krit} = 178.4^\circ\text{C}$   
 $p_{krit} = 29.3 \text{ bar}$   
 $Sdp. = 34.0^\circ\text{C}$   
 $ODP = 0.00006$   
**GWP < 2**  
**B1**

Opteon™ XP30 von Chemours

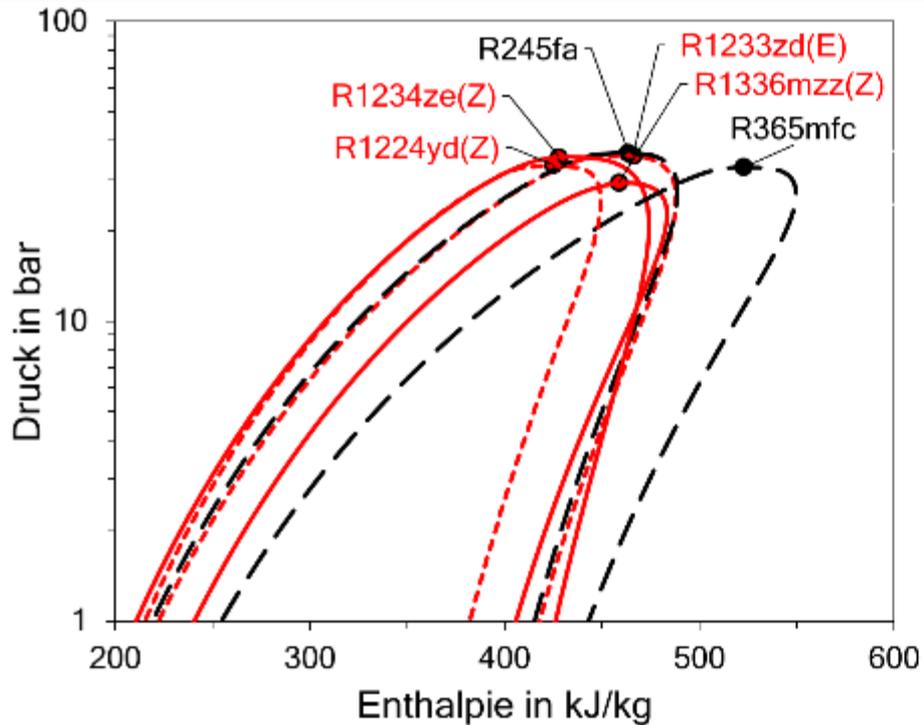
Juhasz & Kontomaris (2018), Kujak (2018)

### Bemerkungen:

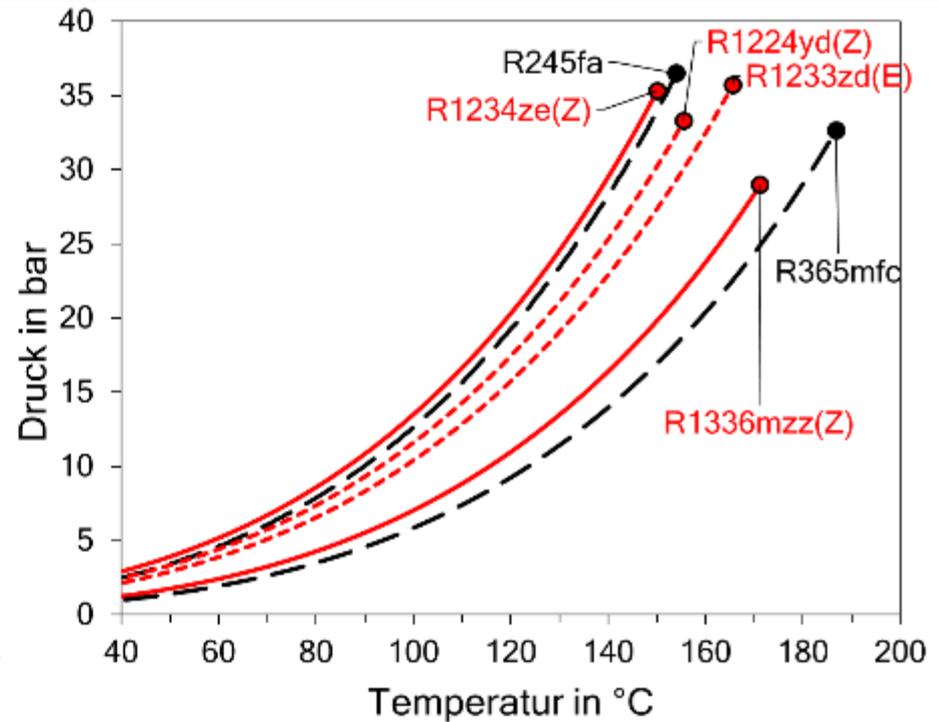
- ODP Basis R11=1.0 (UNEP, 2017)
- GWP<sub>100</sub> mit 100-Jahre Zeithorizont: Basis CO<sub>2</sub>=1.0, IPCC 5<sup>th</sup> (Myhre et al., 2013) und F-Gase-Verordnung No 517/2014 (EU, 2014)
- Sicherheitsgruppe (SG) gemäss (ASHRAE, 2016)
- <sup>a</sup>Opteon™ MZ von Chemours, <sup>b</sup>Fukuda et al. (2014), <sup>c</sup>Solstice®zd von Honeywell, <sup>d</sup>AMOLEA®1224yd von AGC Chemicals, <sup>e</sup>Solkane®365mfc von Solvay, <sup>f</sup>Genetron® 245fa von Honeywell

# Thermodynamische Eigenschaften ausgewählter Kältemittel

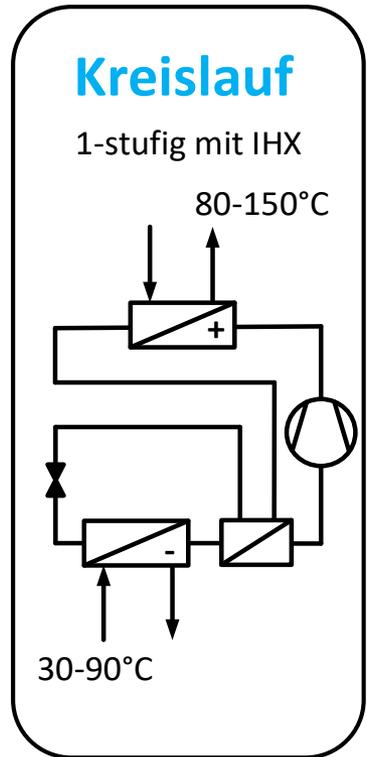
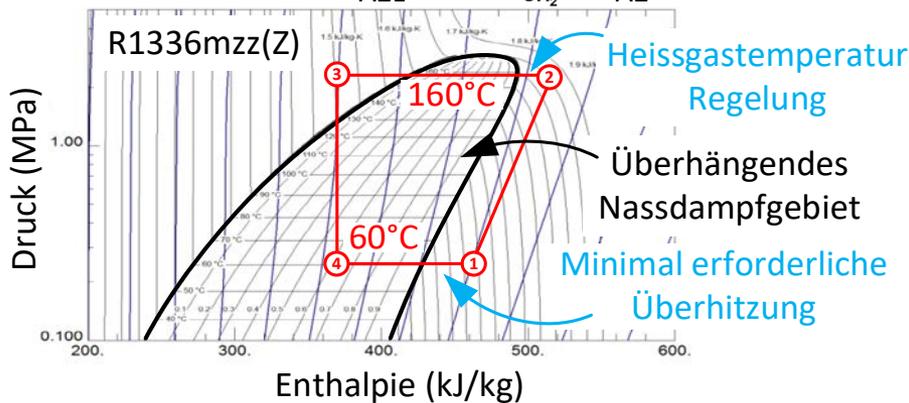
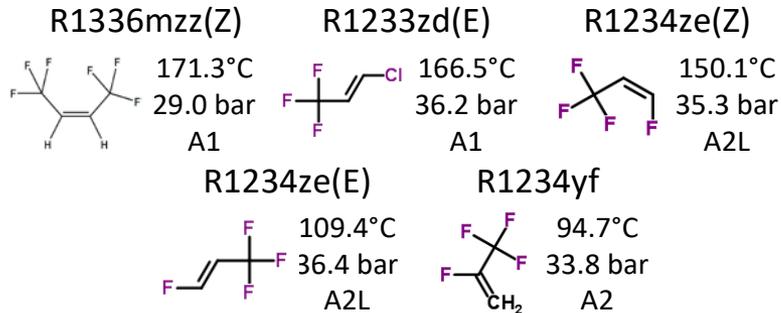
Log(p)-h Diagramm



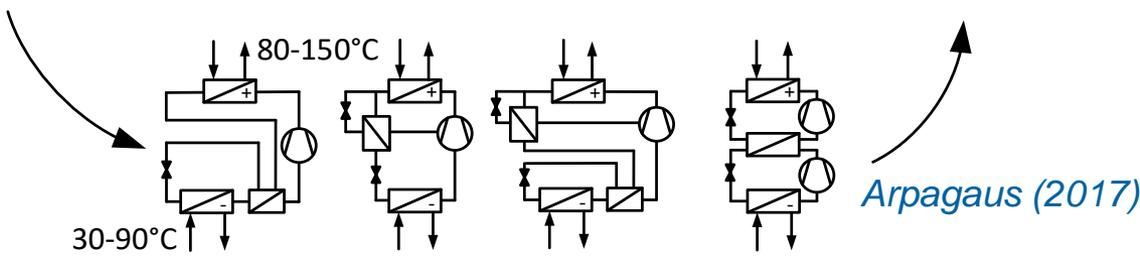
p-T Diagramm



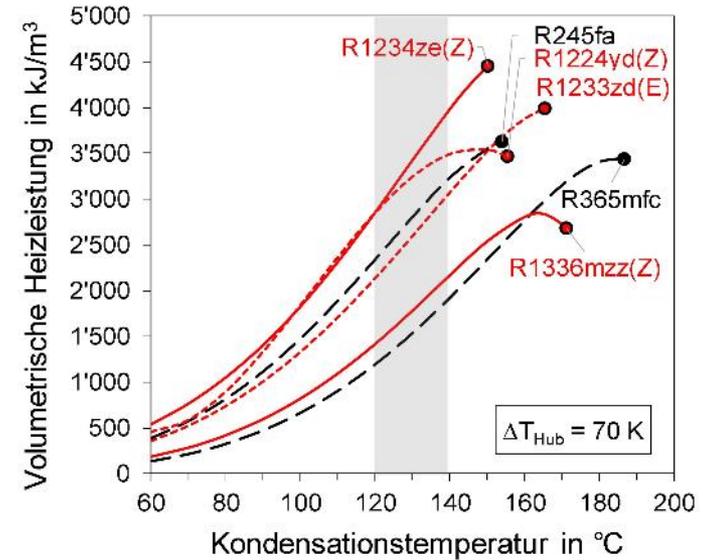
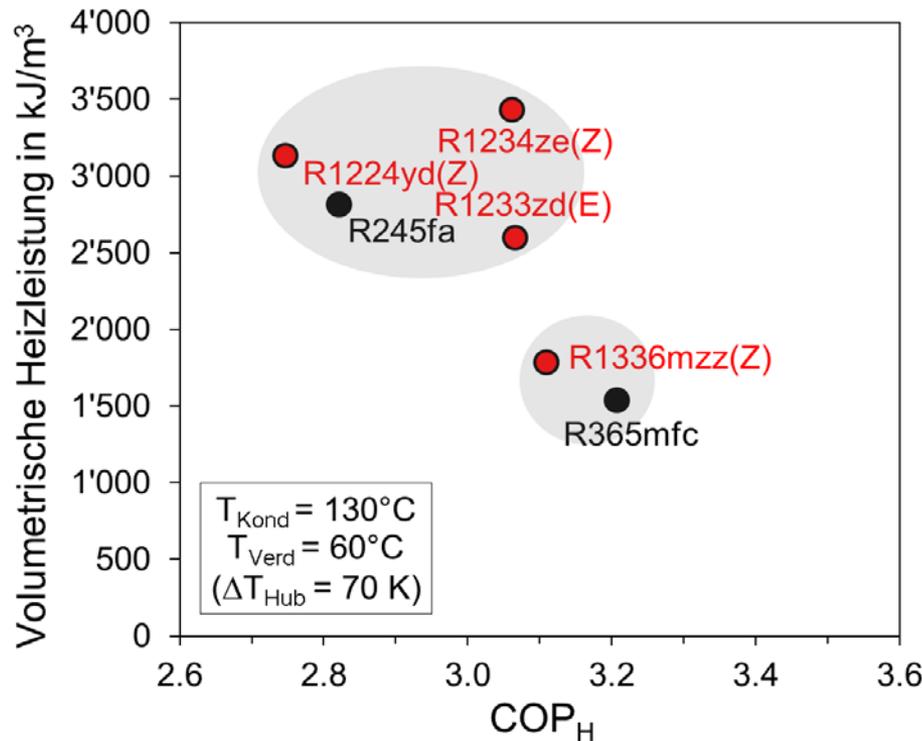
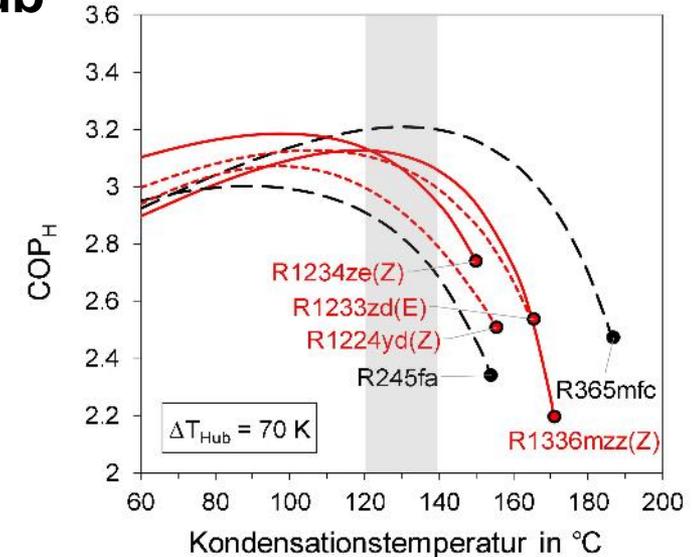
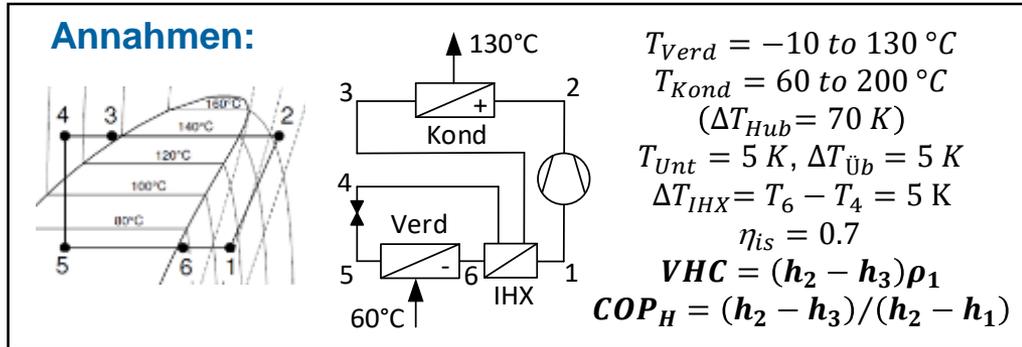
## HFO und HCFO Kältemittel



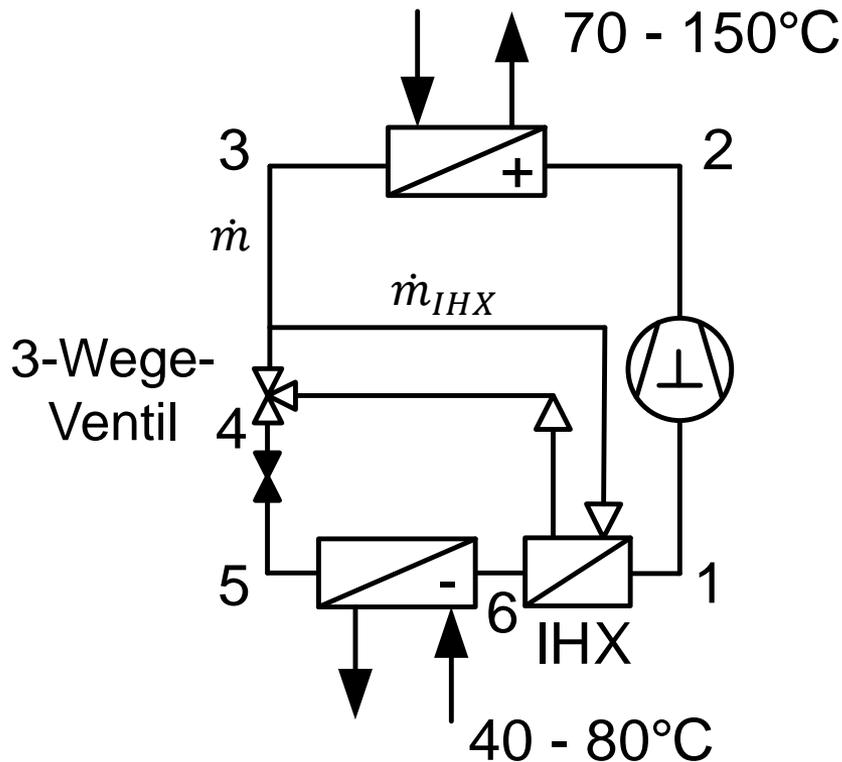
- ### Entscheidungskriterien:
- 1) Thermodynamische Eignung** ( $T_{\text{Krit}} > 150^\circ\text{C}$ , ermöglicht unterkritischen Betrieb, guter Wirkungsgrad bei hohen Temperaturen)
  - 2) Umweltverträglichkeit** (GWP < 10, ODP = 0, zukunftssicher nach F-Gase-Verordnung)
  - 3) Sicherheit** (keine oder nur geringe Entflammbarkeit)
  - 4) Natürliche Kältemittel** wie R600, R600a und R601 aufgrund der Entflammbarkeit (A3) ausgeschlossen,  $\text{H}_2\text{O}$  benötigt anderen Kreislauftyp (z.B. Brüdenverdichtung)



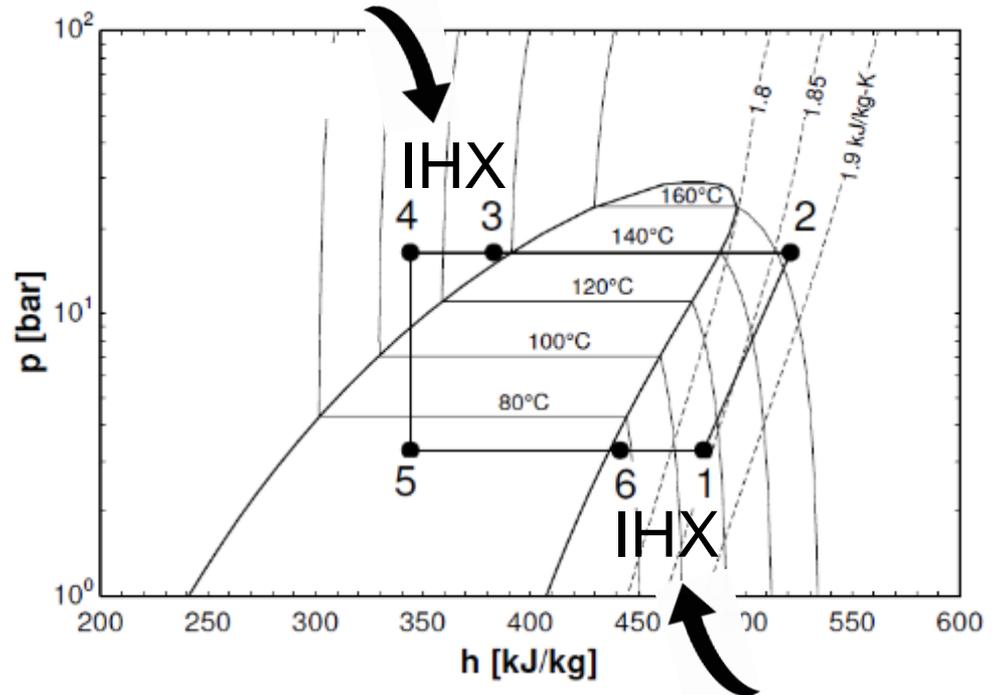
# Theoretischer Vergleich ausgewählter Kältemittel im einstufigen Kreislauf mit IHX bei 70 K Hub



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



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

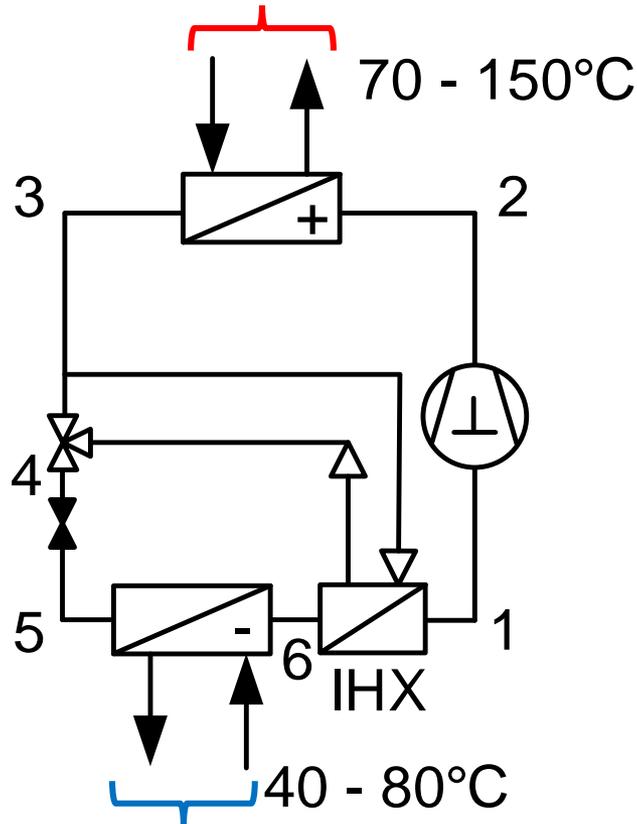


### Experimentelle Untersuchungen:

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



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



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

Überhitzung nach Verdampfer:

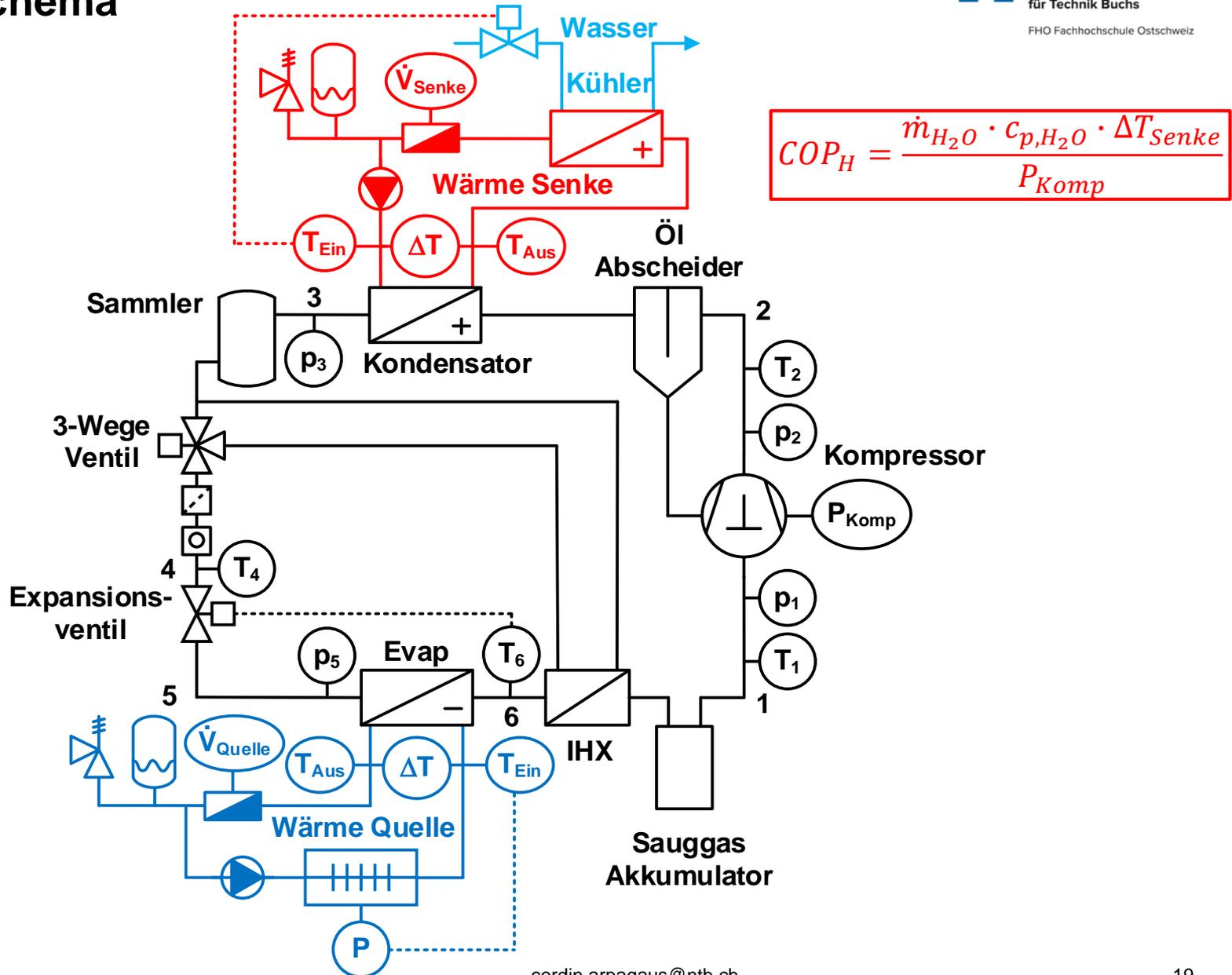
$$\Delta T_{\text{Üb}} = T_6 - T(p_{\text{Evap}}) = 5 \text{ K}$$

IHX erzeugt zusätzliche Überhitzung

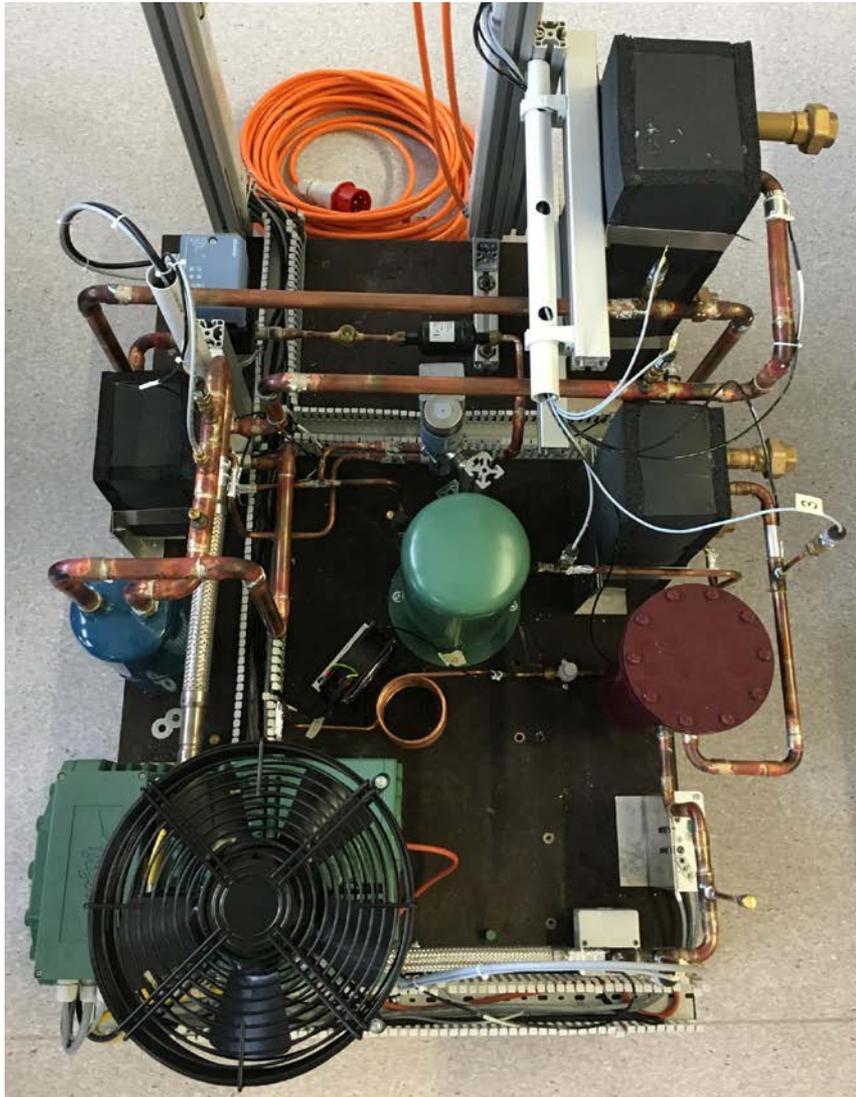
Spreizung  $\Delta T_{\text{Quelle}} = 3 \text{ K (fix)}$

# Systemdesign

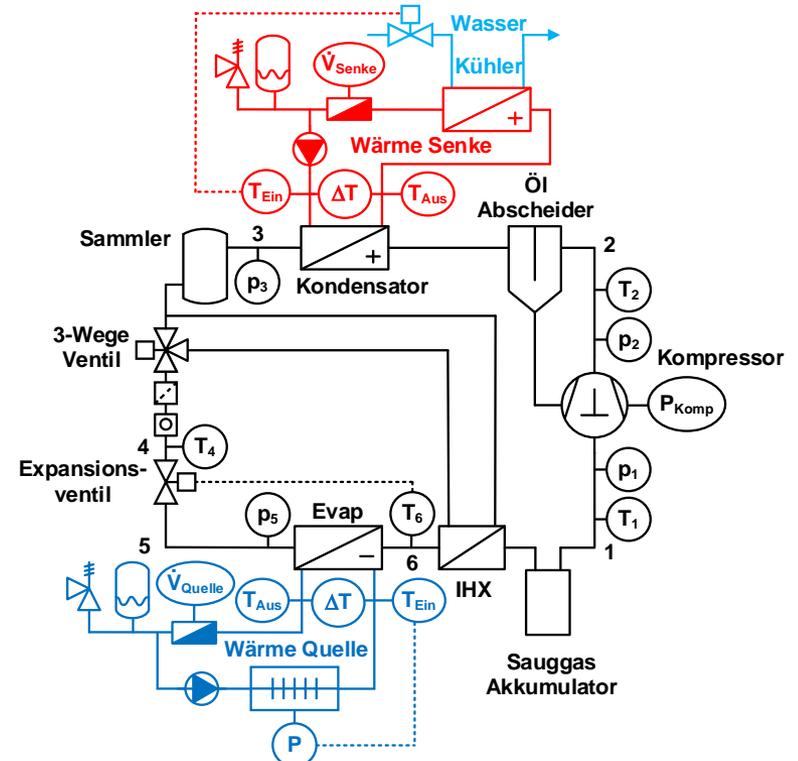
## Prinzipschema



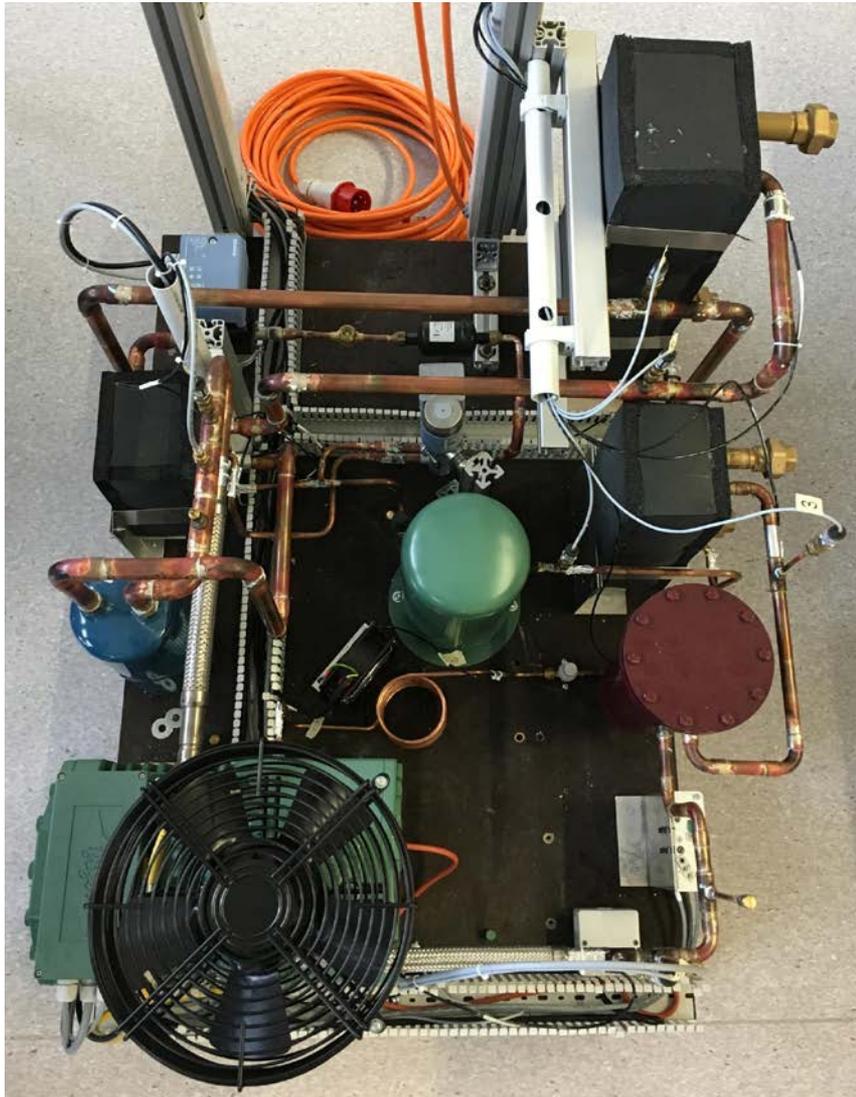
$$COP_H = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} \cdot \Delta T_{Senke}}{P_{Komp}}$$



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)
$\Delta T$	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

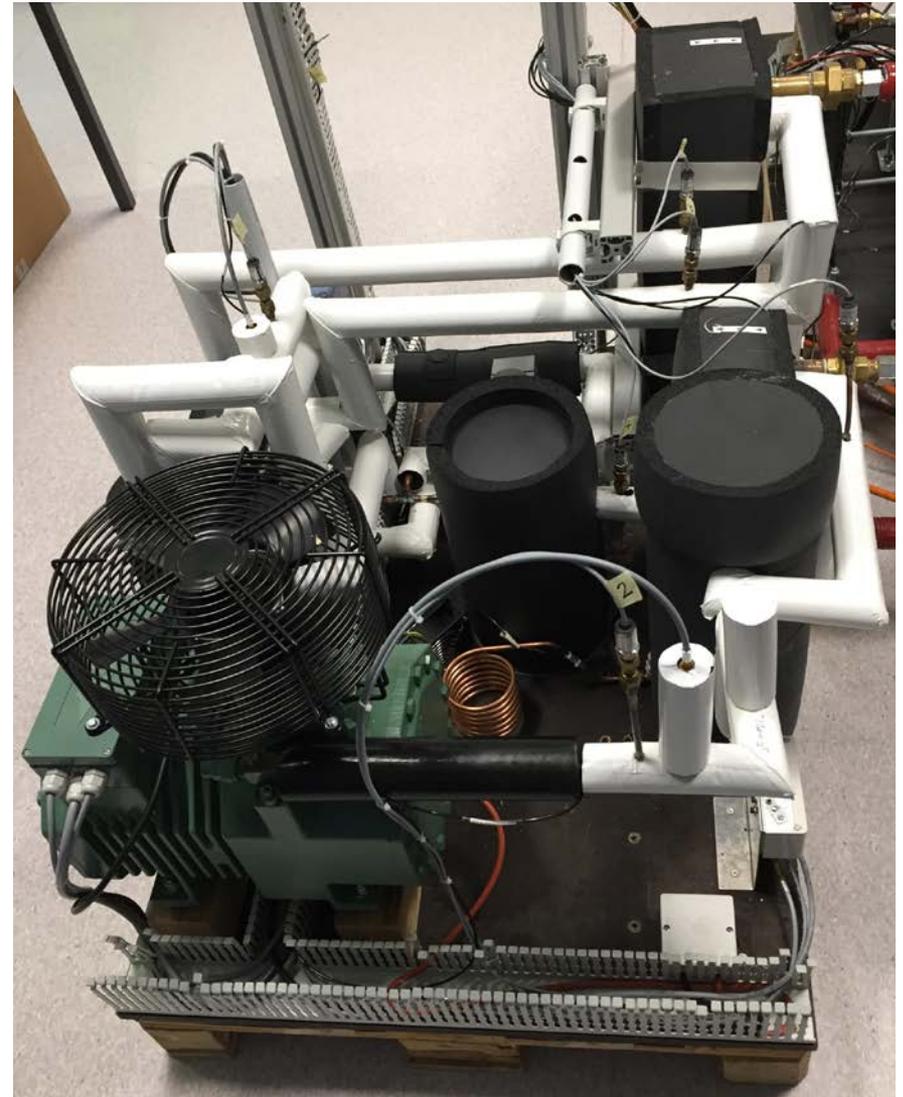
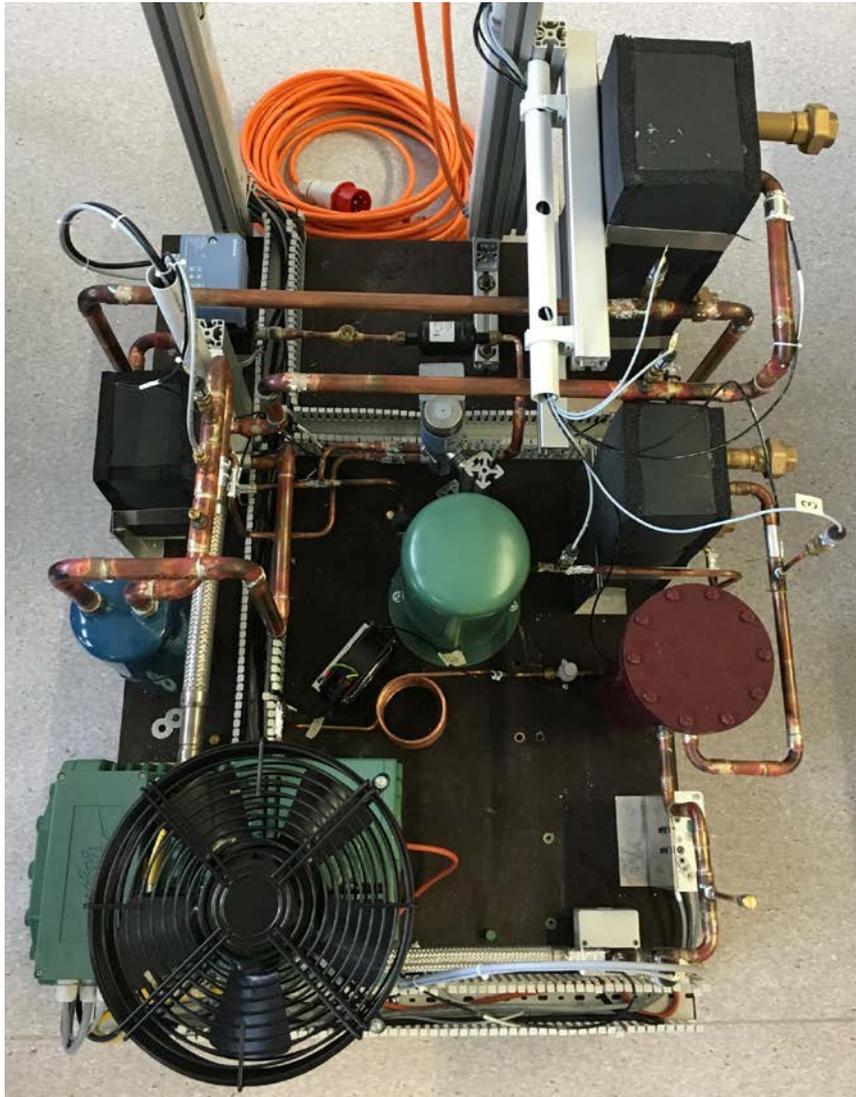


# Experimenteller Aufbau und Komponenten

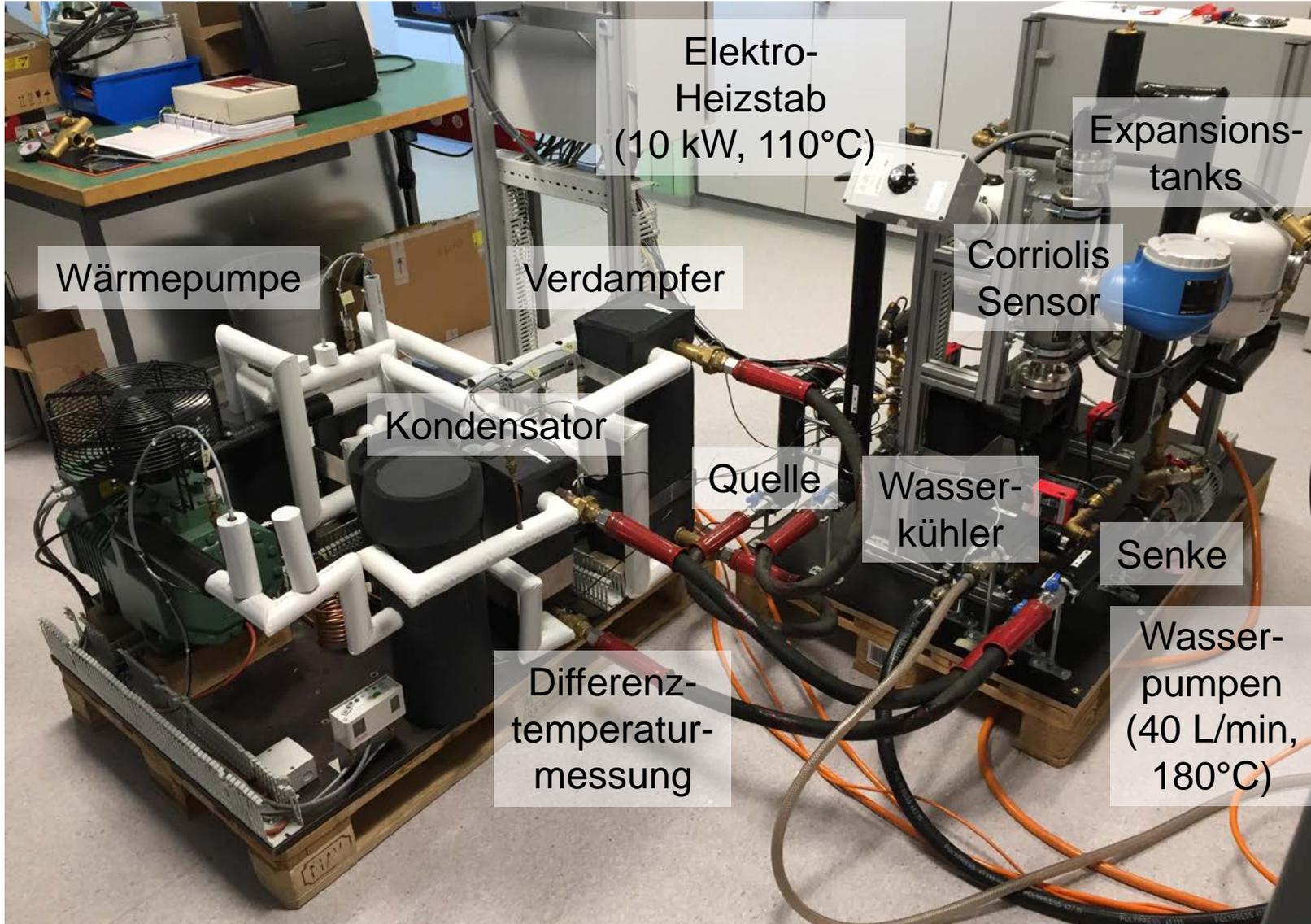


Komponente	Hersteller
Kompressor	
Kondensator	
Verdampfer	
IHX	
Sammler	
Ölabscheider	
Filter Trockner	
Schauglas	
Expansionsventil	
3-Wege Ventil	
Kupferleitungen 3/8" und 7/8"	

## Experimenteller Aufbau isoliert

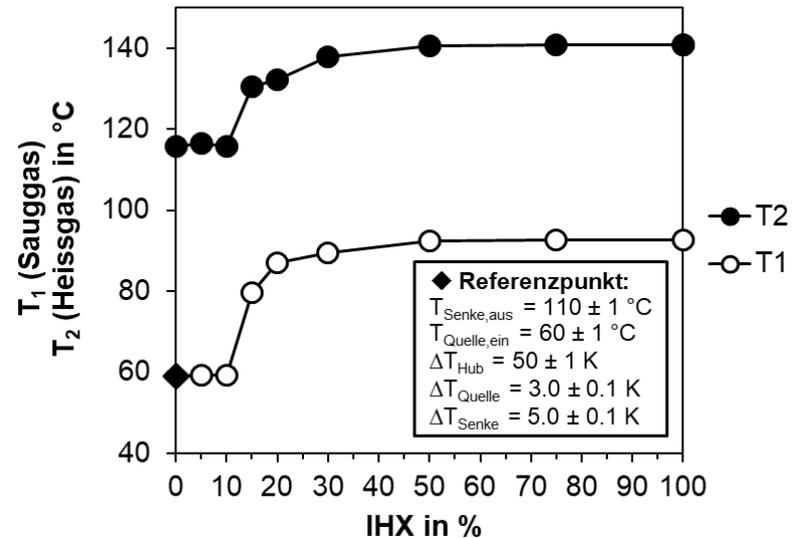
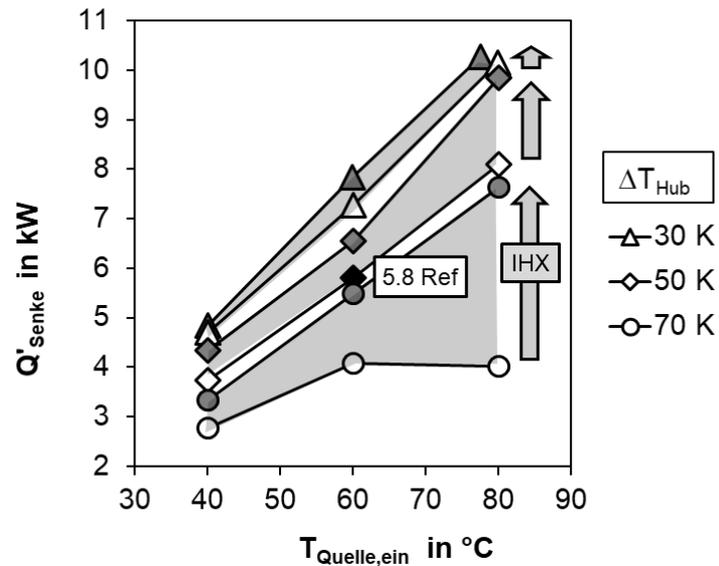
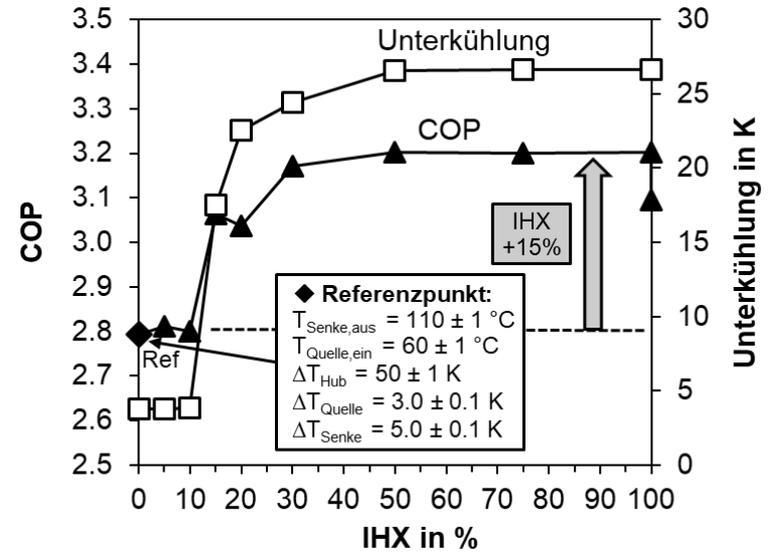
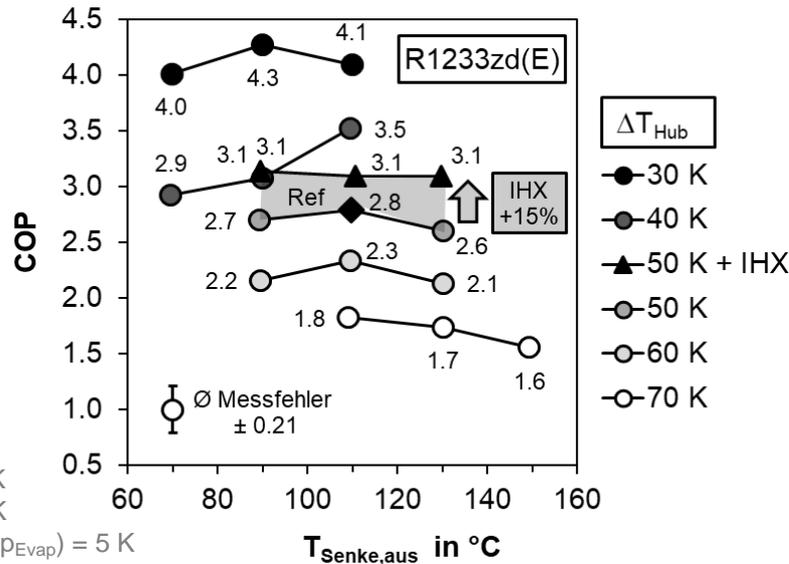


# Wärmepumpe mit Wärmequelle und -senke



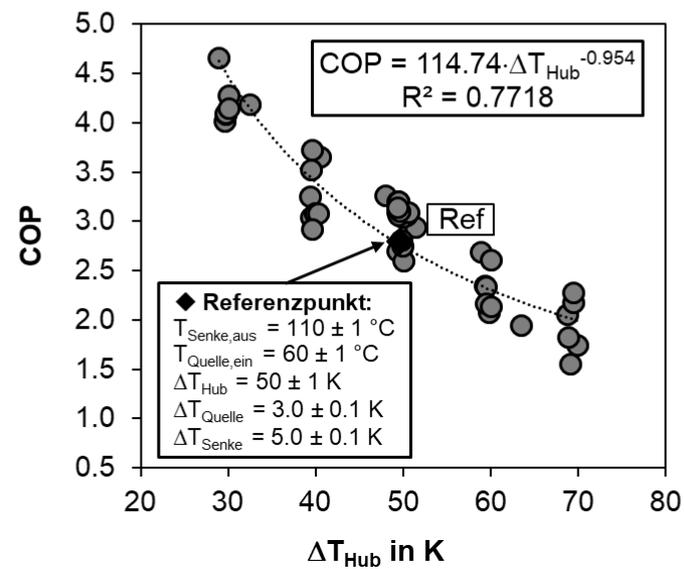
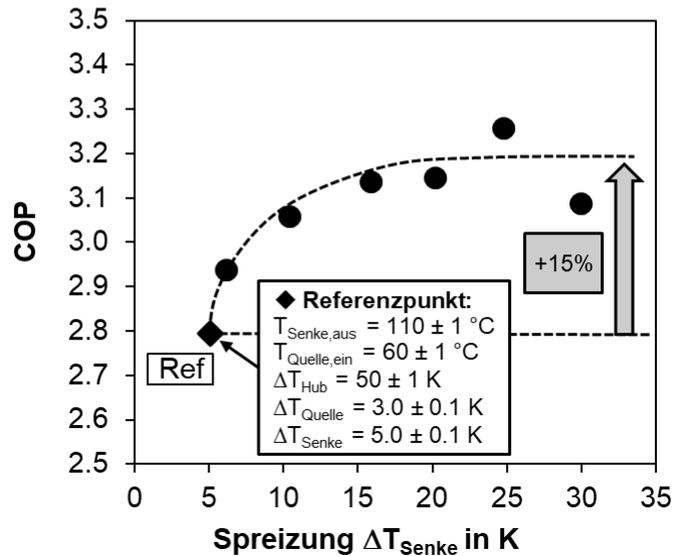
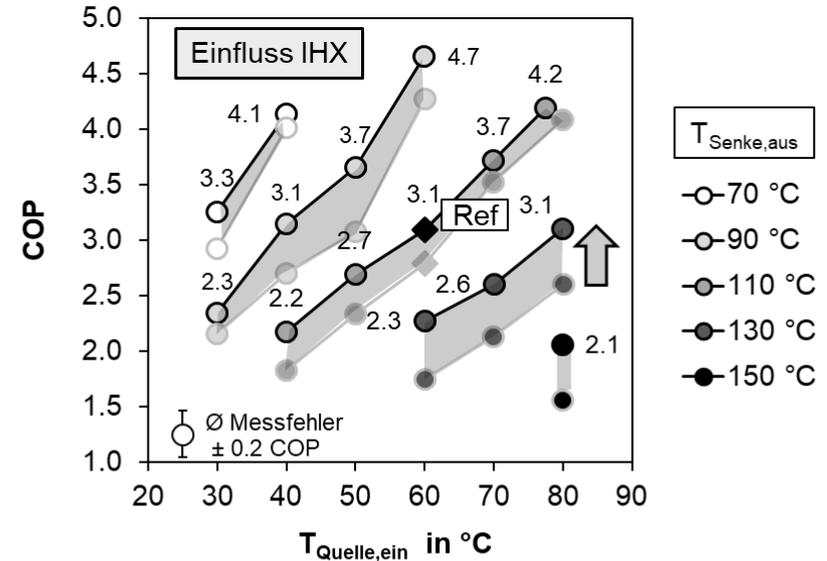
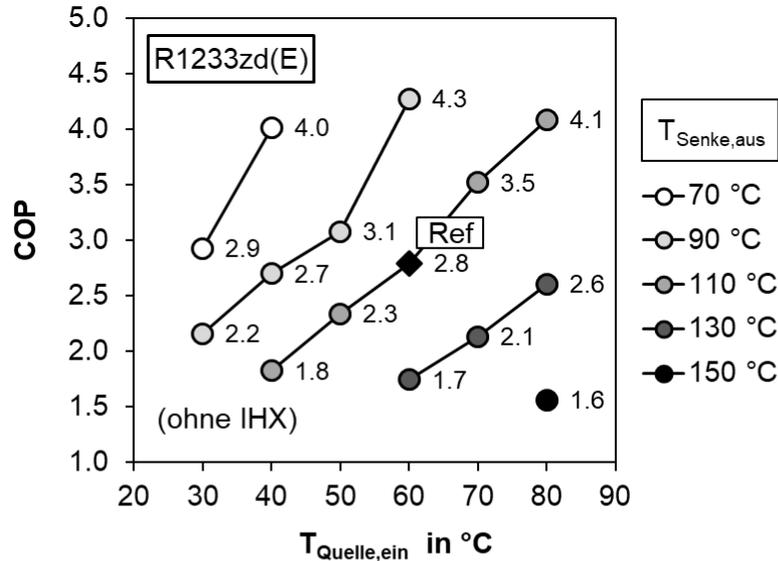
## Betriebskennfeld und Effizienzerhöhung durch IHX

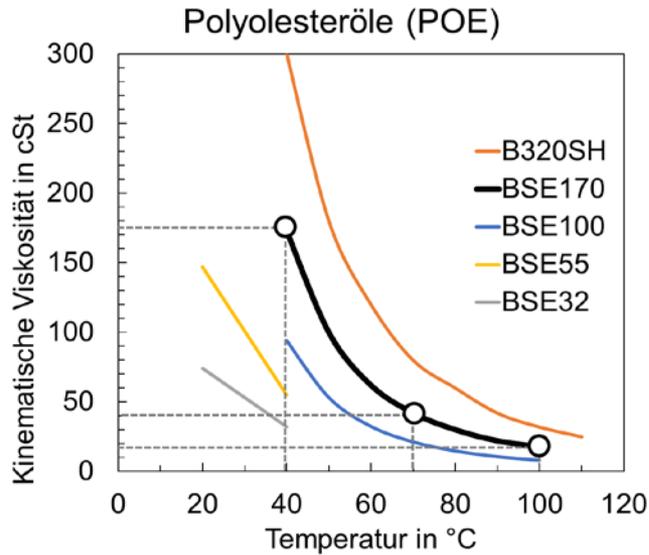
FHO Fachhochschule Ostschweiz



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

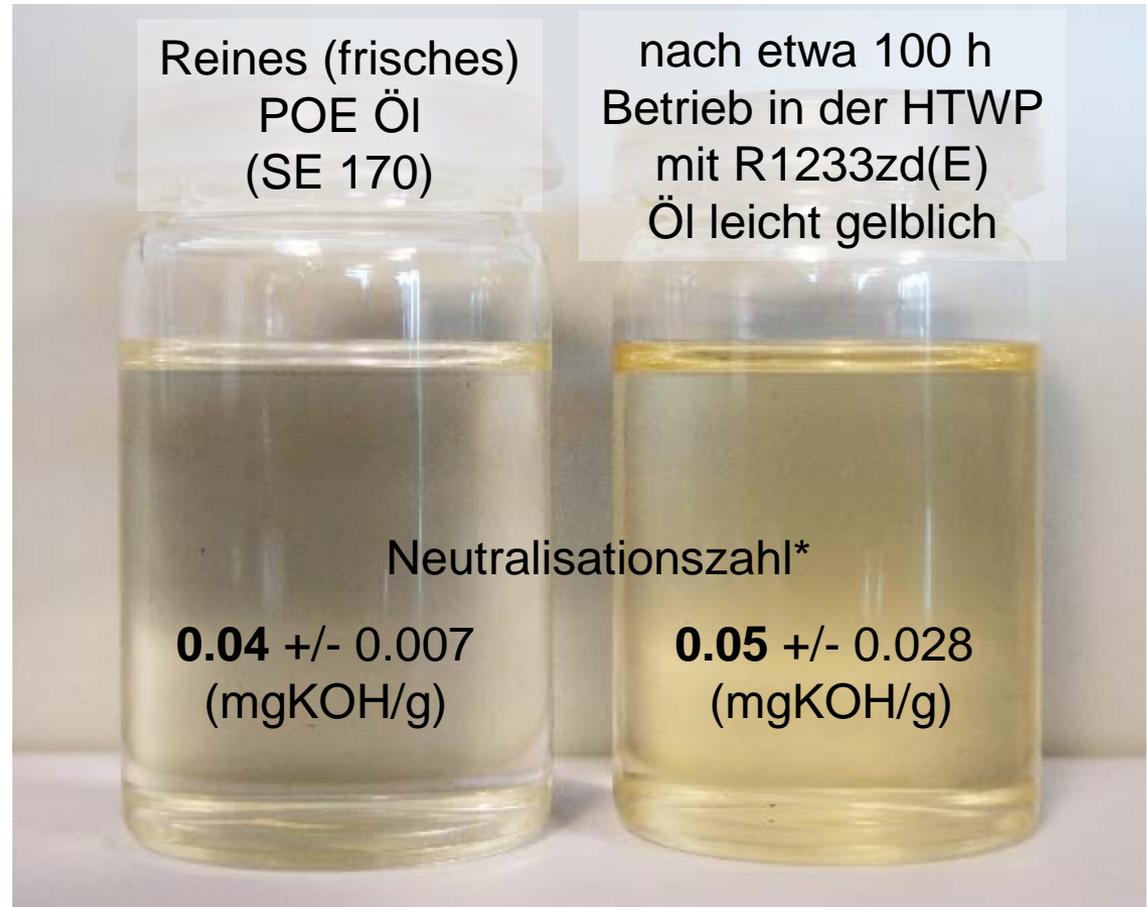
## Einfluss IHX und Effizienzsteigerung durch Spreizung





### SE 170

Kinematische Viskosität  
(gemäss DIN EN ISO 3104):  
bei 40 °C 173 mm<sup>2</sup>/s  
bei 100 °C 17,6 mm<sup>2</sup>/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,  $\Delta T_{Hub}$  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, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)
  - 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)

$T_Q/T_S (\Delta T)$	$COP_H$
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

## ■ Zukünftige Arbeiten

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

- 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.



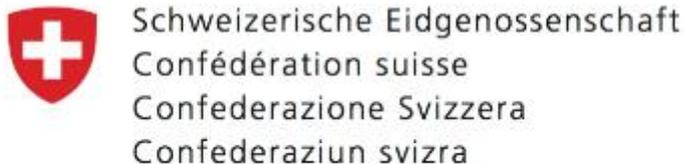
**Manuel Prinzing**  
**Dr. Frédéric Bless**  
**Michael Uhlmann**  
**Elias Büchel**  
**Stefan Frei**  
**Ralph Kuster**  
**Prof. Stefan S. Bertsch**



**Prof. Jürg Schiffmann**



## Finanzieller Support



**Innosuisse – Schweizerische Agentur  
für Innovationsförderung**



[www.sccer-eip.ch](http://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](mailto:cordin.arpagaus@ntb.ch)

Tel. +41 81 377 94 34

[www.ntb.ch/en/team/cordin-arpagaus](http://www.ntb.ch/en/team/cordin-arpagaus)