



Hochtemperatur- Wärmepumpen für industrielle Anwendungen

Cordin Arpagaus

Dr. sc. techn., Dipl. Verfahrensing. ETH
Dipl. NDS ETHZ in Betriebswissenschaften

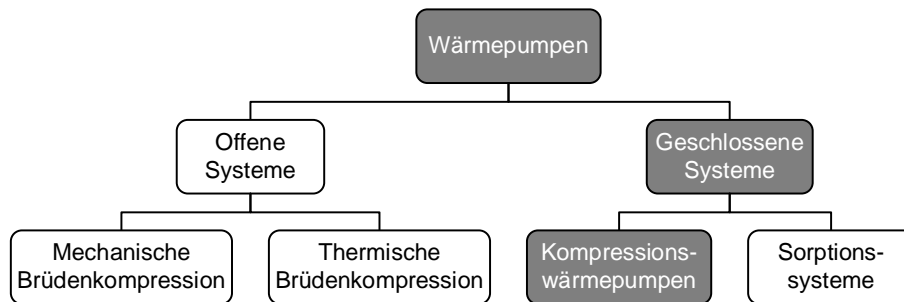
Senior Research Engineer
Institut für Energiesysteme IES

- **Marktübersicht zu Hochtemperatur Wärmepumpen**
- **Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie**
- **Stand der Forschung**
- **Auswahl geeigneter Kältemittel**



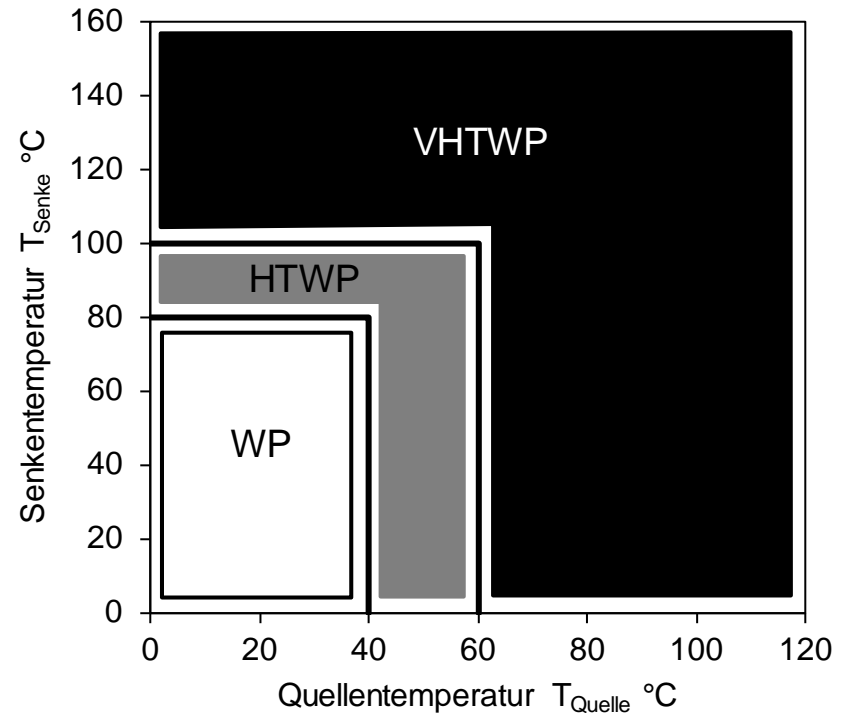
Klassifizierung

Fokus auf Kompressionswärmepumpen



Nellissen und Wolf (2015)

Entwicklung der Temperaturniveaus für Kompressionswärmepumpen

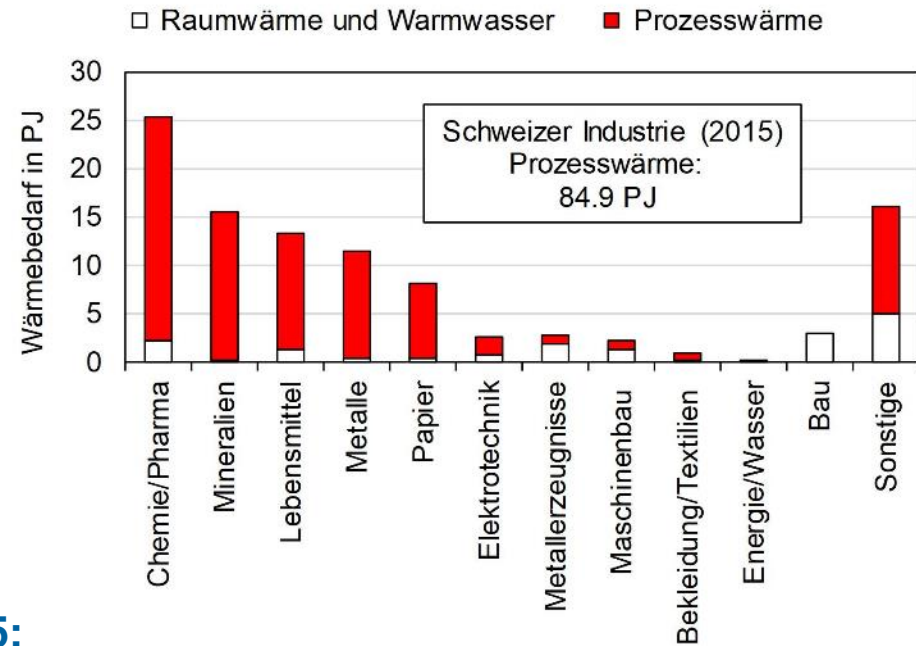
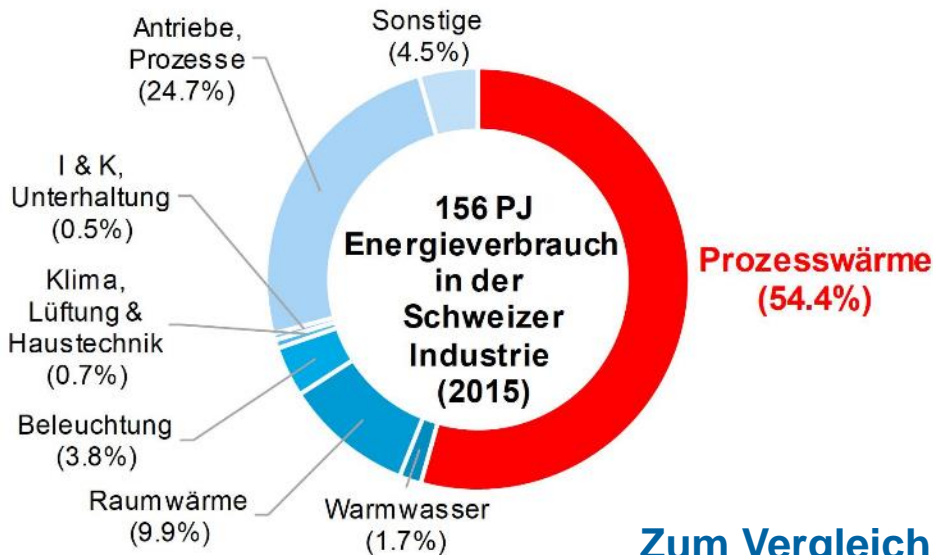


VHTHP: Höchsttemperatur Wärmepumpe ($> 100 \text{ } ^\circ\text{C}$)
HTWP: Hochtemperatur Wärmepumpe (80 bis $100 \text{ } ^\circ\text{C}$)
WP: konventionelle Wärmepumpe (bis etwa $80 \text{ } ^\circ\text{C}$)

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

Industrieller Energieverbrauch der Schweiz (2015) aufgeteilt nach Verwendungszweck – Wärmebedarf nach Industriezweigen und Temperaturbereichen

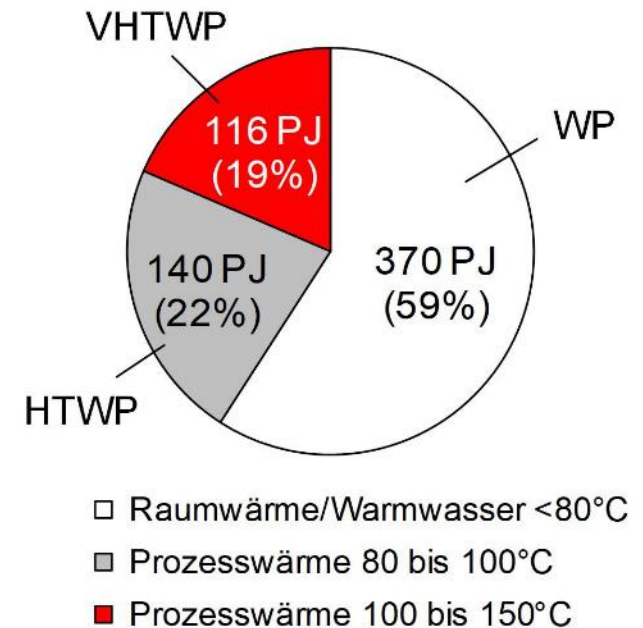
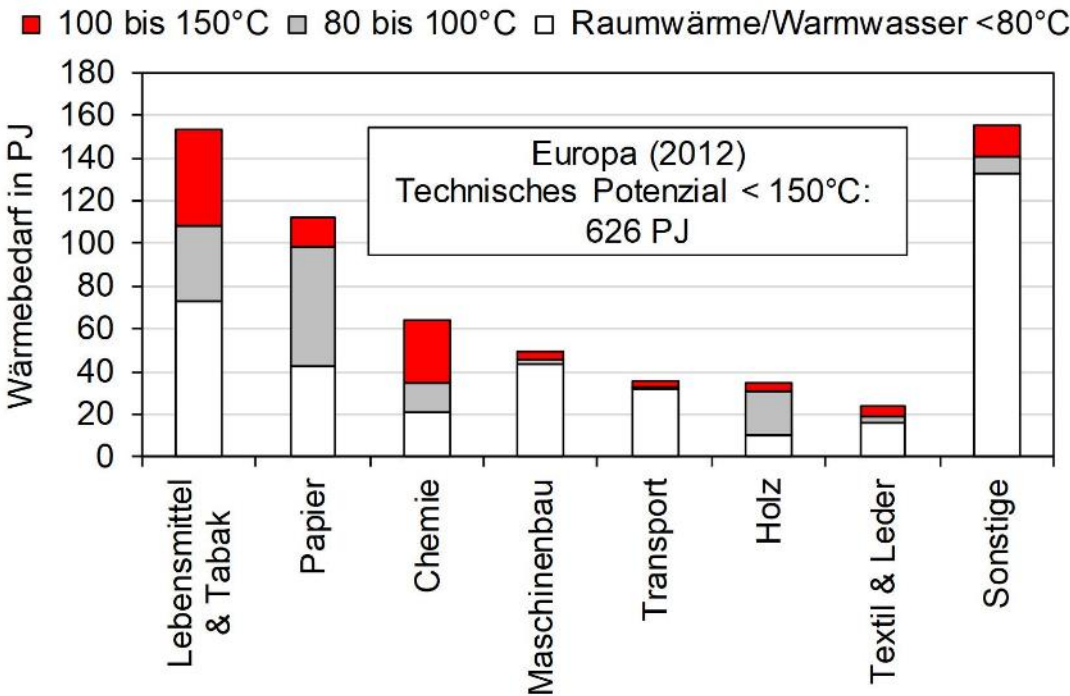
Theoretisches Potenzial für HTWP in der Schweiz



**Zum Vergleich
 Deutschland 2015:**
 40% der Energie für die
 Wärmeerzeugung war
 Prozesswärme
BMWi (2016)

BFE (2016)

Technisches Potenzial in Europa, das mit industriellen Wärmepumpen erschlossen werden kann (aufgeteilt nach Temperaturbereichen der Prozesswärme und Industriesektoren)



Basierend auf Eurostat-Daten von 33 EU-Mitgliedsländern aus dem Jahre 2012, Nellissen und Wolf (2015)

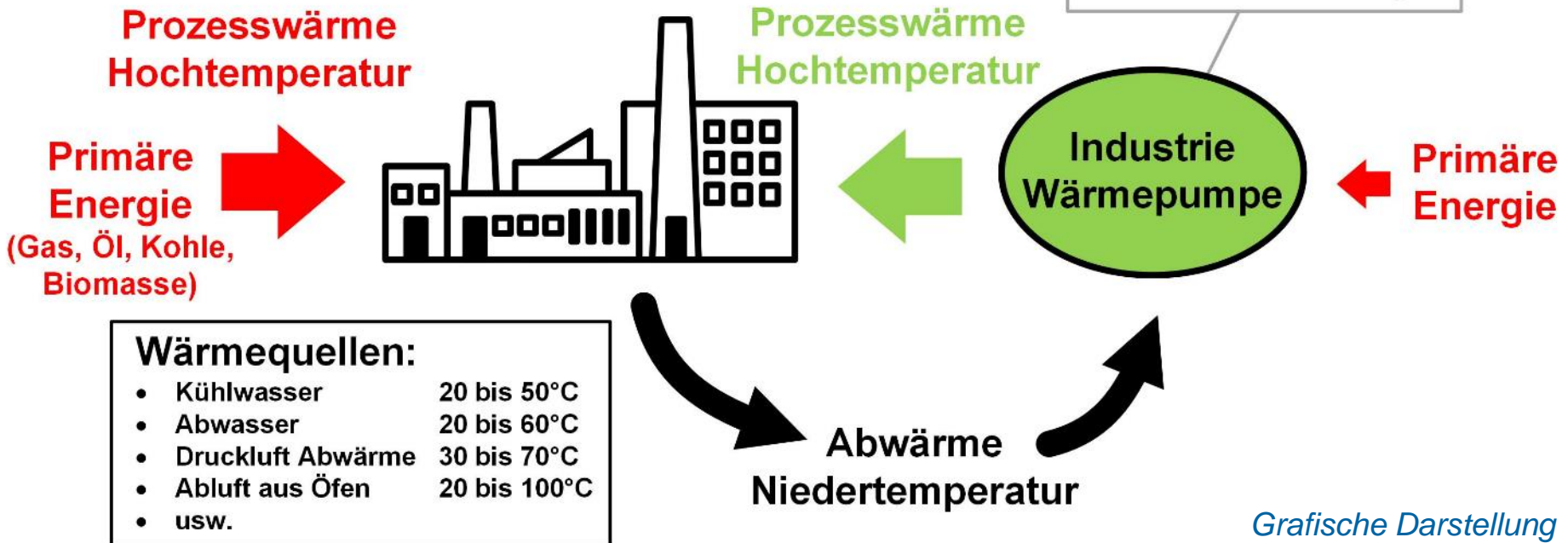
Prinzip der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen

Wärmesenken:

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

Effizienz:

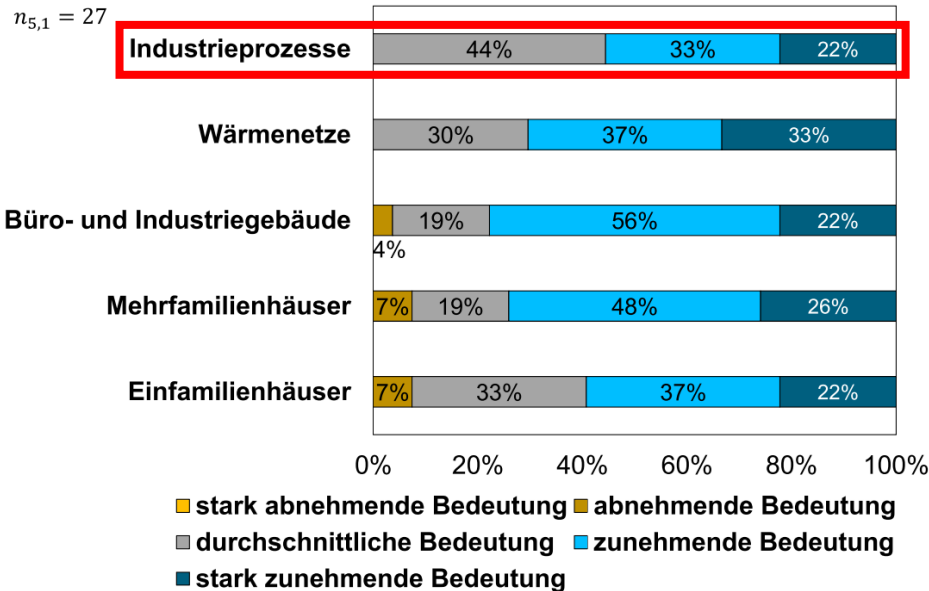
$$\text{COP} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Antriebsenergie}}$$



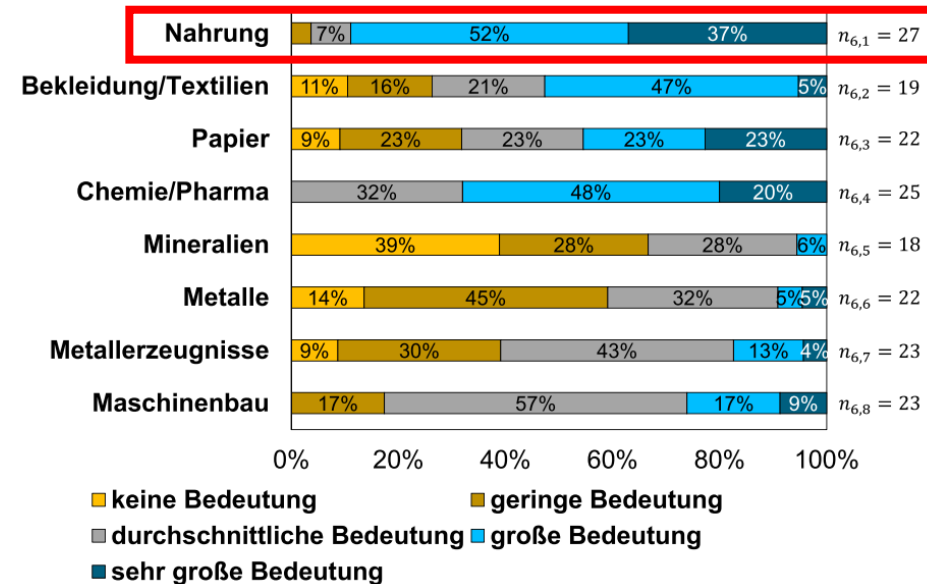
*Grafische Darstellung
in Anlehnung an
Rieberer et al. (2014)*

Anwendung von Grosswärmepumpen in der Schweizer Industrie – Bedeutung und Empfehlung

Bedeutung der Wärmepumpentechnik in den nächsten 5 Jahren



Bewertung des Anwendungspotenzials nach Industriezweigen



Fazit:

- 22% der Befragten (27 Experten) sehen in Industrieprozessen eine stark zunehmende Bedeutung für Wärmepumpen
- Prio 1: Nahrung
- Prio 2: Chemie/Pharma, Papier, Maschinenbau & Textil
- Prio 3: Metallerzeugnisse, Metalle, Mineralien

Quelle: Wolf et al. (2017):
 Endbericht im Auftrag von
 EnergieSchweiz

HTWP mit Vorlauftemperaturen von 100 bis 160 °C sind geeignet zur Wärmerückgewinnung in verschiedenen industriellen Prozessen

Trocknung

Sterilisation

Dampferzeugung

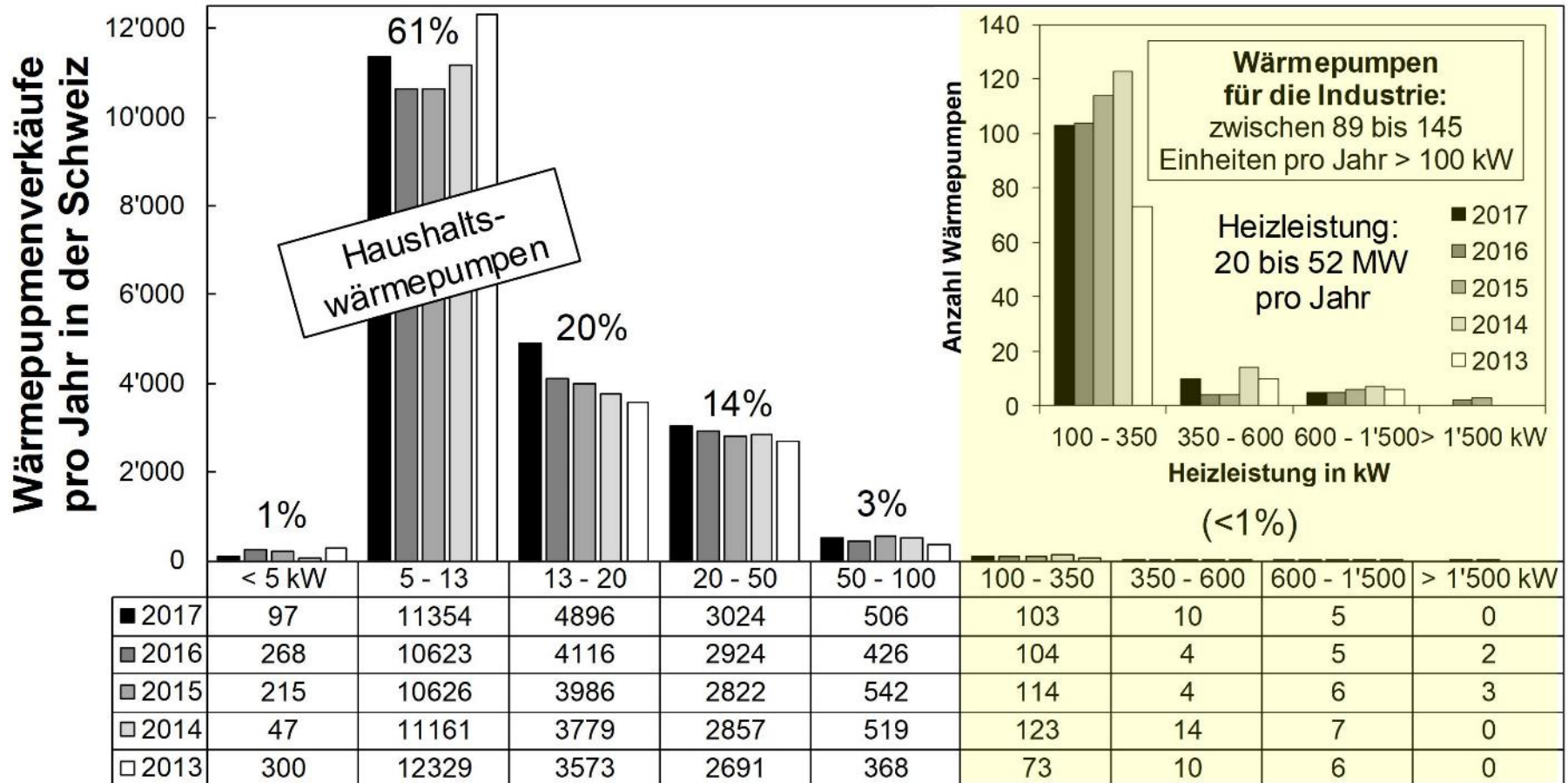
Papierherstellung

Lebensmittel

Abwärmennutzung



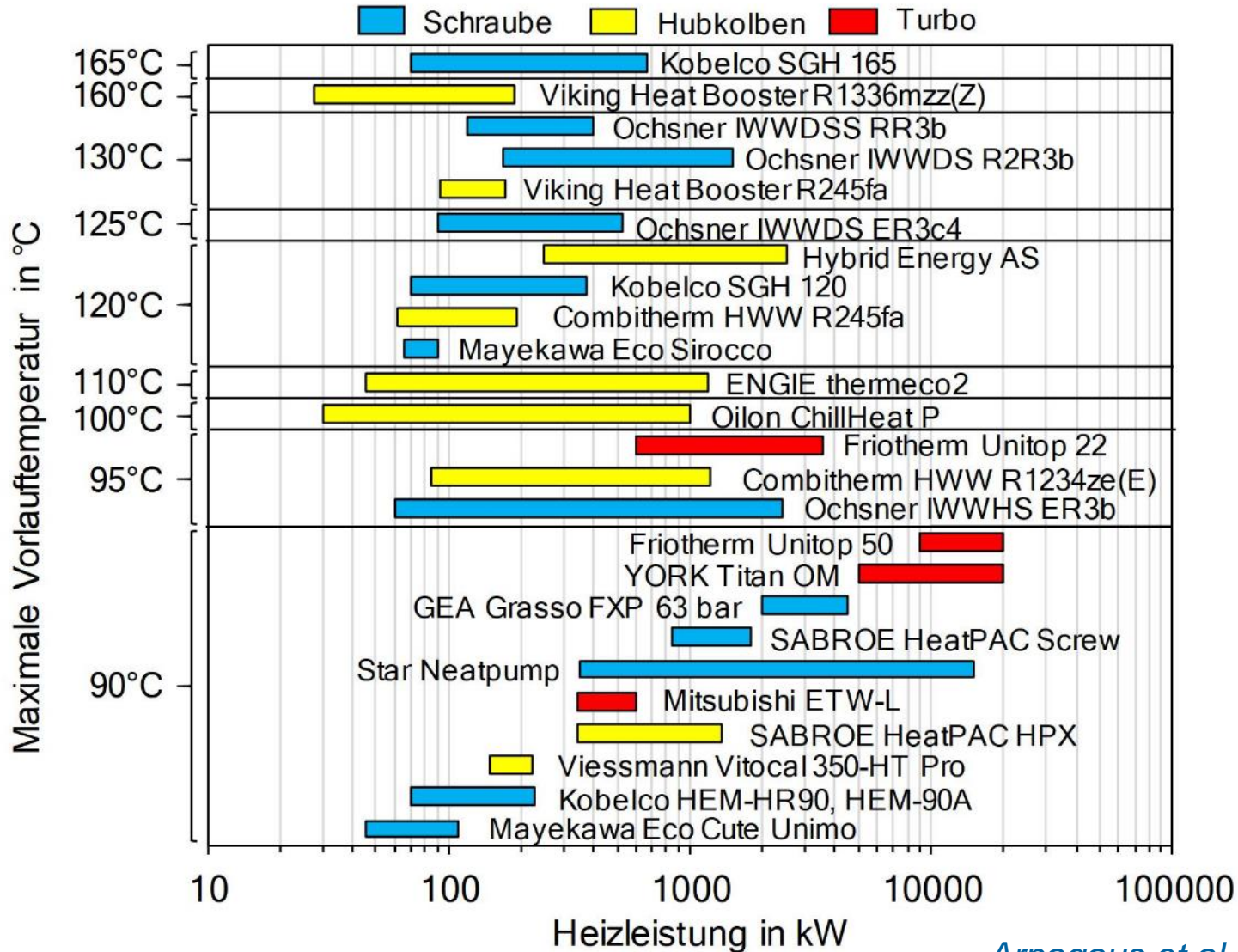
Wärmepumpenverkäufe in der Schweiz (2013 bis 2017) in verschiedenen Leistungsklassen



Heizleistung in kW und Stückzahlen pro Jahr

*Eigene Darstellung
 (Datenquelle: www.fws.ch)*

Auswahl an kommerziellen industriellen HTWP mit Vorlauftemperaturen über 90 °C


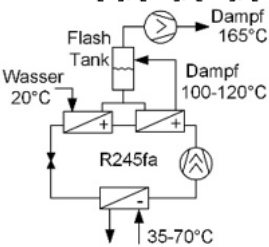


Auswahl an industriellen HTWP mit Vorlauftemp. ≥ 90 °C

Hersteller	Produkte	Kältemittel	Max. Vorlauf- temperatur	Heizleistung	Kompressor Typ
Kobe Steel (Kobelco steam grow heat pump)	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70 – 660 kW	Doppelschraube
	SGH 120	R245fa	120 °C	70 – 370 kW	
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70 – 230 kW	
Viking Heating Engines AS	HeatBooster	R1336mzz(Z)	160 °C	28 – 188 kW	Hubkolben (4 parallel)
	HeatBooster S4	R245fa	130 °C	92 – 172 kW	
Ochsner	IWWDS R2R3b	R134a/ÖKO1	130 °C	170 – 750 kW	Schraube (TWIN bis 1,5 MW)
	IWWDS ER3b	ÖKO1 (R245fa)	130 °C	120 – 400 kW	
	IWWHS ER3b	ÖKO1 (R245fa oder R1233zd)	95°C	60 – 640 kW	
Frigopol (& AIT)	HighButane 2.0	R600	130 °C	50 kW	Hubkolben
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717 (NH ₃)	120 °C	0.25 – 2.5 MW	Hubkolben
Mayekawa	Eco Sirocco	R744 (CO ₂)	120 °C	65 – 90 kW	Schraube
	Eco Cute Unimo	R744 (CO ₂)	90 °C	45 – 110 kW	
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62 – 252 kW	Hubkolben
	HWW R1234ze	R1234ze(E)	95 °C	85 – 1301 kW	
ENGIE (ex-Dürr thermea)	Thermeco ₂ HHR	R744 (CO ₂)	110 °C	45 – 1'200 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
Oilon	ChillHeat	R134a	100 °C	30 – 1'000 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
	P60 bis P450	R1234ze(E)			
Friotherm	Unitop 22	R1234ze(E)	95 °C	0.6 – 3.6 MW	Turbo (zweistufig)
	Unitop 50	R134a	90 °C	9 – 20 MW	
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH ₃)	90 °C	0.35 – 15 MW	Schaube (Vilter VSSH 76 bar)
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH ₃)	90 °C	2 – 4.5 MW	Doppelschraube (63 bar)
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717 (NH ₃)	90 °C	326 – 1'324 kW	Hubkolben (60 bar)
	HeatPAC Screw	R717 (NH ₃)	90 °C	230 – 1'315 kW	Schraube
	Titan OM	R134a	90 °C	5 – 20 MW	Turbo
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340 – 600 kW	Turbo (zweistufig)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90 °C	148 – 390 kW	Hubkolben (2 bis 3 Stück parallel)


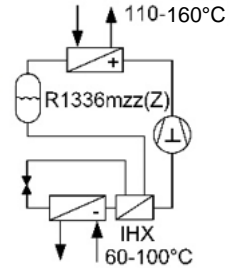
Beispiele von kommerziell verfügbaren HTWP mit typischen Wärmepumpenkreisläufen

Kobe Steel
Kobelco SGH 120/165 [8], [18], [73], [74]


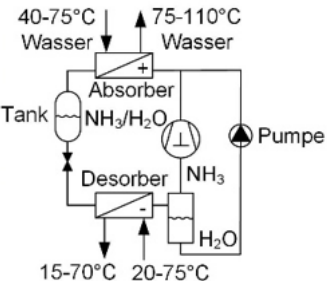
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
65/120 Dampf (55)	3.5
55/120 Dampf (65)	3.1
45/120 Dampf (75)	2.7
35/120 Dampf (85)	2.3
25/120 Dampf (95)	2.0
70/165 Dampf (95)	2.5
60/165 Dampf (105)	2.2
50/165 Dampf (115)	2.0
35/165 Dampf (130)	1.6

Viking Heat Engines
HeatBooster S4 [75], [76]


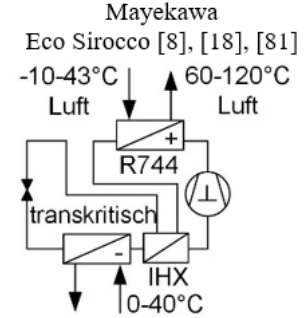
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
100/140 (40)	4.7
80/120 (40)	4.3
100/150 (50)	4.1
90/140 (50)	4.0
70/120 (50)	3.6
90/150 (60)	2.9
80/140 (60)	2.8
60/120 (60)	2.1

Hybrid Energy
Hybrid Heat Pump [16], [17], [82]


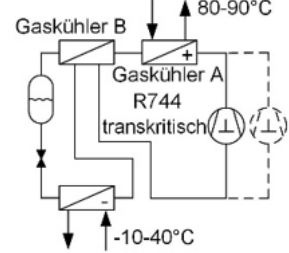
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
20/95 (75)	2.4
40/100 (60)	4.5

Mayekawa
Eco Sirocco [8], [18], [81]


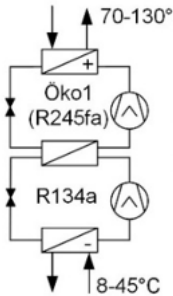
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
35/120 Luft (85)	3.1
25/120 Luft (95)	2.9
15/120 Luft (105)	2.7
5/120 Luft (115)	2.3
35/100 Luft (65)	3.6
25/100 Luft (75)	3.4
15/100 Luft (85)	3.1
5/100 Luft (95)	2.8

ENGIE (ex-Dürr Thermea), thermeco₂ HHR1000
mit 6 Hubkolbenverdichtern bis 1100 kW [8], [85], [86]


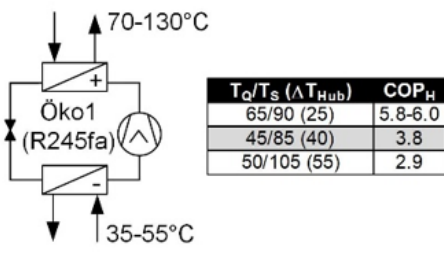

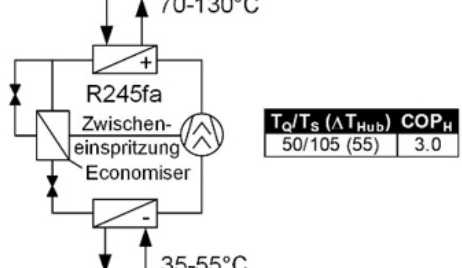

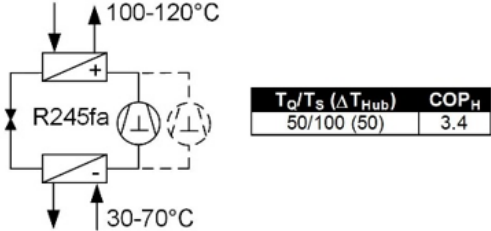

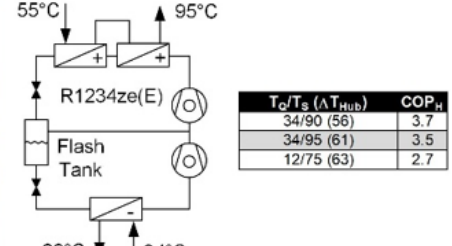

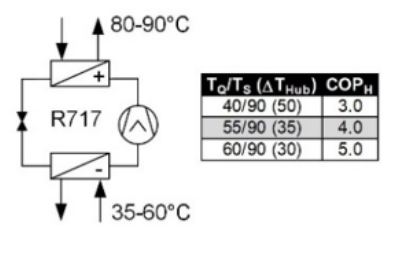

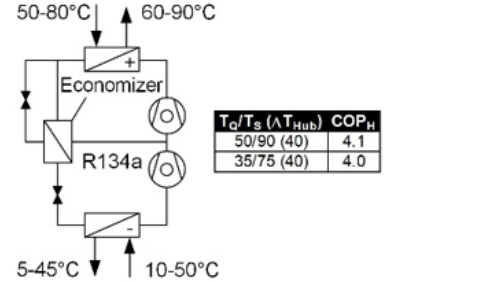
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
20/80 (60)	3.9-4.3

Ochsner
IWWDSS R2R3b [48], [77], [79], [109], [110]


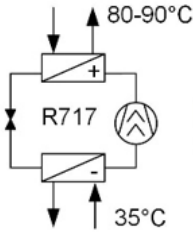

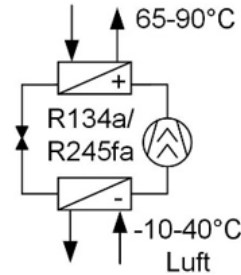

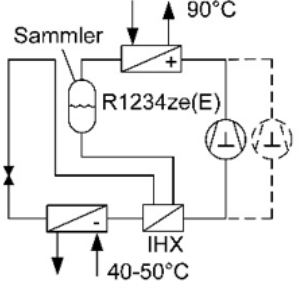

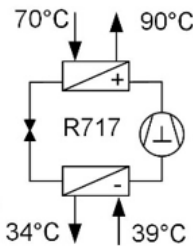

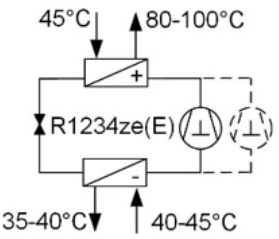

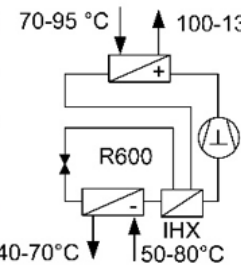
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H
45/90 (45)	4.0
25/90 (65)	3.1

Beispiele von kommerziell verfügbaren HTWP mit typischen Wärmepumpenkreisläufen

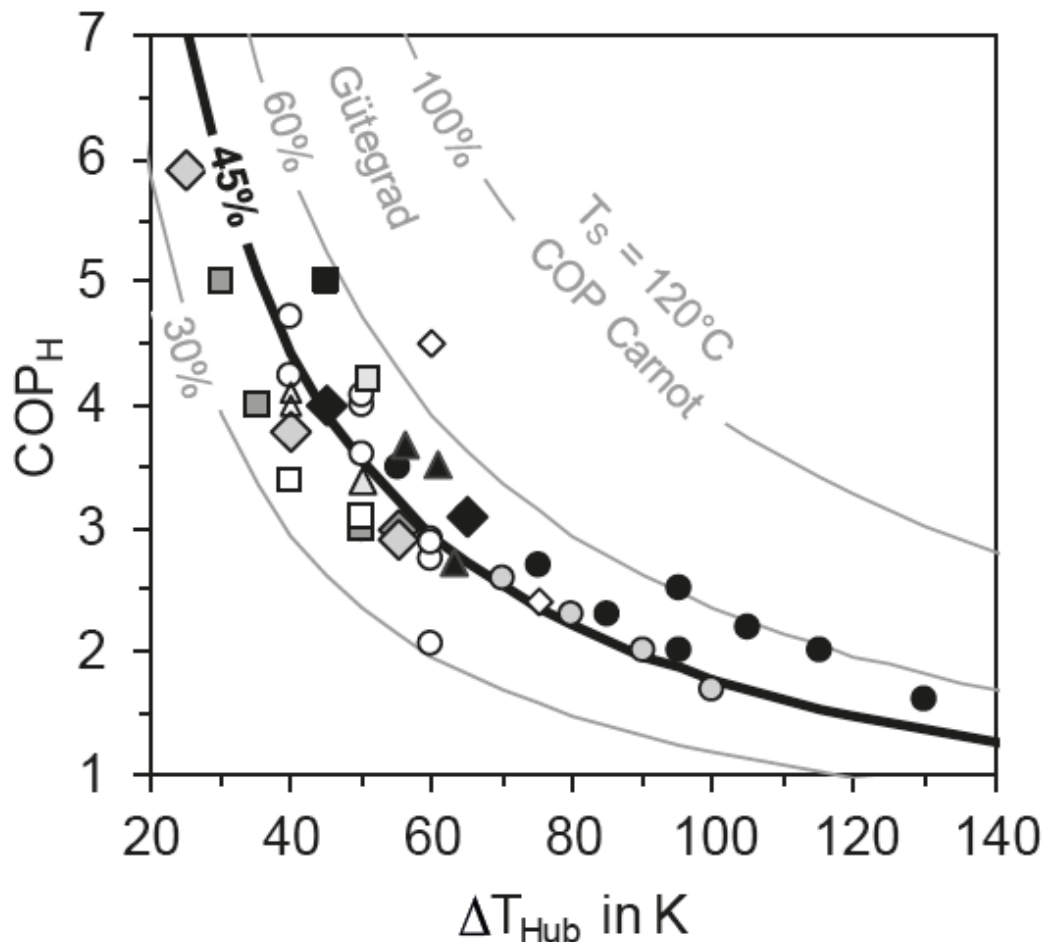
<p>Ochsner IWWDS ER3c4 [78], [79]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>65/90 (25)</td> <td>5.8-6.0</td> </tr> <tr> <td>45/85 (40)</td> <td>3.8</td> </tr> <tr> <td>50/105 (55)</td> <td>2.9</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	65/90 (25)	5.8-6.0	45/85 (40)	3.8	50/105 (55)	2.9	<p>Ochsner IWWDS ER3b [77], [79], [88]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/105 (55)</td> <td>3.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	50/105 (55)	3.0		
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
65/90 (25)	5.8-6.0														
45/85 (40)	3.8														
50/105 (55)	2.9														
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
50/105 (55)	3.0														
<p>Combitherm HWW R245fa [28], [29], [83]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/100 (50)</td> <td>3.4</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	50/100 (50)	3.4	<p>Friotherm Unitop 22/22, 3'300 kW, zweistufiger Turbokompressor [91], [92], [112]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34/90 (56)</td> <td>3.7</td> </tr> <tr> <td>34/95 (61)</td> <td>3.5</td> </tr> <tr> <td>12/75 (63)</td> <td>2.7</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	34/90 (56)	3.7	34/95 (61)	3.5	12/75 (63)	2.7		
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
50/100 (50)	3.4														
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
34/90 (56)	3.7														
34/95 (61)	3.5														
12/75 (63)	2.7														
<p>Star Refrigeration, Neatpump NP601, Vilter VSSH Schraubenkompressor 76 bar [93], [113]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40/90 (50)</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>55/90 (35)</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>60/90 (30)</td> <td>5.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	40/90 (50)	3.0	55/90 (35)	4.0	60/90 (30)	5.0	<p>Mitsubishi ETW-L [8], [18], [106], [108]</p>   <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/90 (40)</td> <td>4.1</td> </tr> <tr> <td>35/75 (40)</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H	50/90 (40)	4.1	35/75 (40)	4.0
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
40/90 (50)	3.0														
55/90 (35)	4.0														
60/90 (30)	5.0														
$T_C/T_S (\Delta T_{Hub})$	COP_H														
50/90 (40)	4.1														
35/75 (40)	4.0														

Arpagaus (2018)

Beispiele von kommerziell verfügbaren HTWP mit typischen Wärmepumpenkreisläufen

<p>GEA Grasso FX P Heat Pump Doppelschraubenkompressor bis 63 bar [94], [115]</p>   <table border="1" data-bbox="743 428 937 478"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35/80 (45)</td> <td>5.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	35/80 (45)	5.0	<p>Kobe Steel Kobelco HEM-HR90 [73], [114]</p>   <table border="1" data-bbox="1526 349 1806 535"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40 Luft/90 (50)</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>30 Luft/90 (60)</td> <td>2.9</td> </tr> <tr> <td>20 Luft/90 (70)</td> <td>2.6</td> </tr> <tr> <td>10 Luft/90 (80)</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>0 Luft/90 (90)</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>-10 Luft/90 (100)</td> <td>1.7</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	40 Luft/90 (50)	3.0	30 Luft/90 (60)	2.9	20 Luft/90 (70)	2.6	10 Luft/90 (80)	2.3	0 Luft/90 (90)	2.0	-10 Luft/90 (100)	1.7																
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
35/80 (45)	5.0																																		
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
40 Luft/90 (50)	3.0																																		
30 Luft/90 (60)	2.9																																		
20 Luft/90 (70)	2.6																																		
10 Luft/90 (80)	2.3																																		
0 Luft/90 (90)	2.0																																		
-10 Luft/90 (100)	1.7																																		
<p>Viessmann Vitocal 350-HT Pro [98]–[101]</p>   <table border="1" data-bbox="724 756 917 828"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/90 (40)</td> <td>3.4</td> </tr> <tr> <td>40/90 (50)</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	50/90 (40)	3.4	40/90 (50)	3.1	<p>Johnson Controls, SABROE HeatPAC HPX Hubkolbenkompressor bis 60 bar [95]</p>   <table border="1" data-bbox="1593 778 1806 835"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>39/90 (51)</td> <td>4.2</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	39/90 (51)	4.2																								
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
50/90 (40)	3.4																																		
40/90 (50)	3.1																																		
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
39/90 (51)	4.2																																		
<p>Oilon ChillHeat P300 SU HC+ R1234ze mit 4 parallel geschalteten Kolbenverdichtern [89], [90]</p>   <table border="1" data-bbox="724 1092 937 1249"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>45/80 (35)</td> <td>5.1</td> </tr> <tr> <td>40/80 (40)</td> <td>4.6</td> </tr> <tr> <td>45/90 (45)</td> <td>4.6</td> </tr> <tr> <td>40/90 (50)</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>45/100 (55)</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>40/100 (60)</td> <td>3.9</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	45/80 (35)	5.1	40/80 (40)	4.6	45/90 (45)	4.6	40/90 (50)	4.2	45/100 (55)	4.2	40/100 (60)	3.9	<p>Frigopol HighButane 2.0 Wärmepumpe mit internem Wärmeübertrager (IHX) und Kolbenverdichter [80]</p>   <table border="1" data-bbox="1613 1049 1806 1292"> <thead> <tr> <th>$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$</th> <th>COP_H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60/100 (40)</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td>50/100 (50)</td> <td>3.3</td> </tr> <tr> <td>60/110 (50)</td> <td>3.2</td> </tr> <tr> <td>50/110 (60)</td> <td>2.8</td> </tr> <tr> <td>60/120 (60)</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td>60/125 (65)</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>50/120 (70)</td> <td>2.4</td> </tr> <tr> <td>60/130 (70)</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>50/130 (80)</td> <td>2.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H	60/100 (40)	3.6	50/100 (50)	3.3	60/110 (50)	3.2	50/110 (60)	2.8	60/120 (60)	2.7	60/125 (65)	2.5	50/120 (70)	2.4	60/130 (70)	2.2	50/130 (80)	2.0
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
45/80 (35)	5.1																																		
40/80 (40)	4.6																																		
45/90 (45)	4.6																																		
40/90 (50)	4.2																																		
45/100 (55)	4.2																																		
40/100 (60)	3.9																																		
$T_c/T_s (\Delta T_{Hub})$	COP_H																																		
60/100 (40)	3.6																																		
50/100 (50)	3.3																																		
60/110 (50)	3.2																																		
50/110 (60)	2.8																																		
60/120 (60)	2.7																																		
60/125 (65)	2.5																																		
50/120 (70)	2.4																																		
60/130 (70)	2.2																																		
50/130 (80)	2.0																																		

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

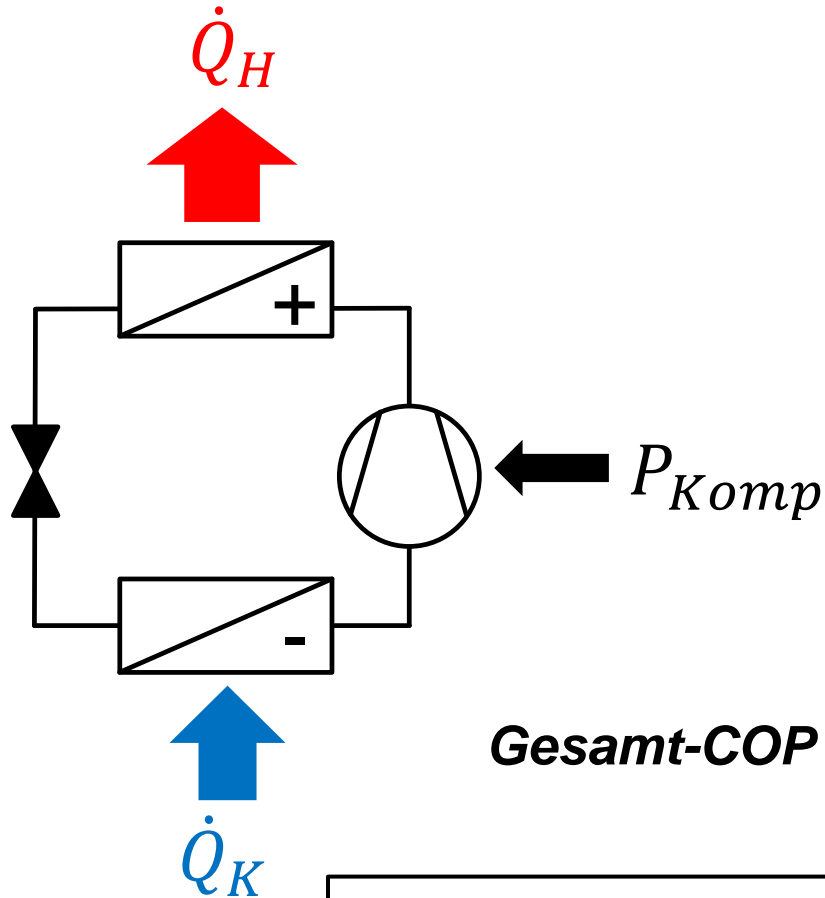
Fit-Kurve (45% Gütegrad):

$$\text{COP}_H = 68.455 \cdot \Delta T_{\text{Hub}}^{-0.76}, R^2=0.78$$

COP_H: Leistungszahl im Heizungsfall
 ΔT_{Hub}: Temperaturhub von Quelle zu Senke in K

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

Effizienz einer Wärmepumpe bei gleichzeitigem Heizen und Kühlen (H+K)



$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{P_{Komp}} \quad COP_H: \text{Heizen}$$

$$COP_K = \frac{\dot{Q}_K}{P_{Komp}} \quad COP_K: \text{Kühlen}$$

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_H - P_{Komp}$$

$$COP_{H+K} = COP_H + COP_K$$
$$\text{bzw. } COP_{H+K} = 2 \cdot COP_H - 1$$

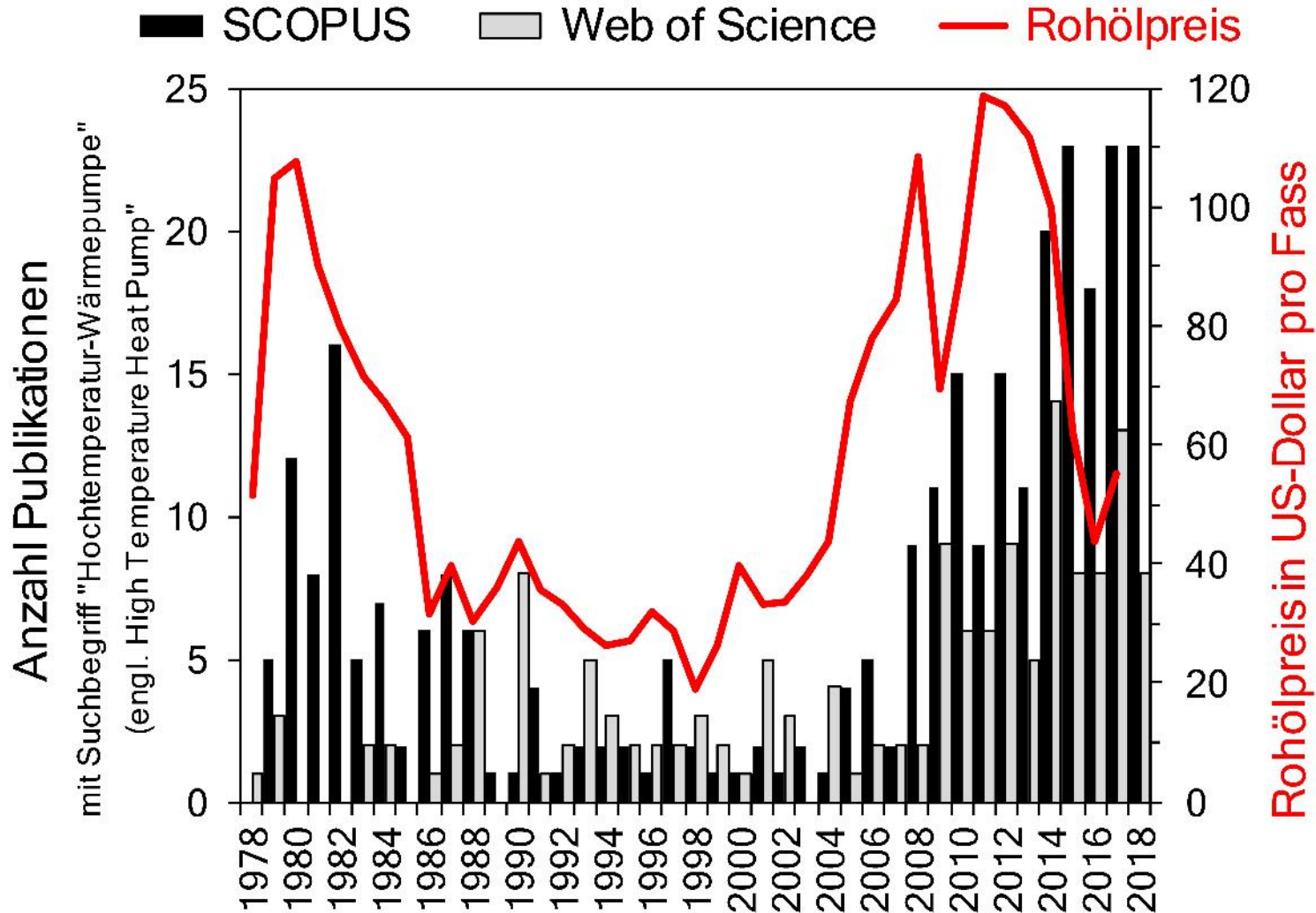
Wird gleichzeitig auf der Wärmequellenseite auch eine Kühlanwendung angeschlossen verdoppelt sich der Gesamt-COP der Wärmepumpe beinahe.

Fazit

- Grösste Anwendungspotentiale für HTWP in der Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie, insbesondere Prozesse wie Trocknung, Sterilisation, Verdampfung, und Wärmerückgewinnung
- Technisches Potential in Europa: 113 PJ Prozesswärme zwischen 100 und 150°C (entspricht etwa 12% des Wärmebedarfs)
- > 26 HTWP (Kompressionswärmepumpen) von 15 Herstellern identifiziert auf dem Markt mit Vorlauftemperaturen > 90°C (einige > 120°C, max. 165°C)
- Leistungszahl: COP_H : 2.4 bis 5.8 mit Temperaturhub von 40 bis 95 K
- $COP_H = 68,455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0,76}$ (H: Heizen, ΔT_{Hub} von Quelle zu Senke in K, bei 45% Gütegrad), (Heizen + Kühlen $\rightarrow COP_{H+K} = 2 \cdot COP_H - 1$)
- Heizleistungen: 20 kW bis 20 MW
- Kältemittel: R245fa, R717 (NH₃), R744 (CO₂), R134a, R1234ze(E), R1336mzz(Z)
- Kompressoren: Schrauben, 2-stufige Turbos, Hubkolben (parallel)
- Kreisläufe: typischerweise 1-stufig, Optimierungen mit IHX, Parallelschaltung von Kompressoren, Economizer, 2-stufige Kaskade (R134a/R245fa)

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)



Arpagaus et al. (2018)

Internationale Forschungsprojekte im Bereich HTWP sortiert nach Vorlauftemperatur (Senkentemperatur)

Organisation, Projektpartner	Bereiche der Wärmequellen- (grau) und -senken (schwarz) Temperaturen in °C	Max. Vorlauf- temperatur in °C	Heizleistung in kW	Zyklostyp	Kompressor	Kältemittel
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		160	12	einstufig mit IHX	Hubkolben	R1336mzz(Z)
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		150	12	einstufig	Hubkolben	R1336mzz(Z)
NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, SCCER EIP, Schweiz		150	3 bis 10	einstufig mit zuschaltbarem IHX	Hubkolben	R1233zd(E)
PACO, Universität Lyon, EDF Electricité de France		145	300	Flash Tank	Doppel-Schraube	R718
Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK), Dresden, Deutschland		140	12	einstufig	Hubkolben	HT 125
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen- Nürnberg, Siemens AG, Deutschland		140	10	einstufig mit IHX	Hubkolben	LG6 (CF6)
Alter ECO, EDF Electricité de France		140	50 bis 200	einstufig mit IHX und Unterkühler	Doppel-Scroll	ECO3 (R245fa)
Tokyo Electric Power Company, Japan		135	150 bis 400	einstufig	Schraube	R601
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Edtmayer, Ochsner, Österreich		130	250 bis 400	einstufig mit Economiser	Schraube	ÖKO1 (R245fa)
Tianjin Universität, China		130	16 bis 19	einstufig	Scroll	BY-5
Kyushu Universität, Fukuoka, Japan		125	1,8	einstufig	Doppel-Rotations- kompressor (zweistufig)	R1234ze(Z)
ECN, SmurfitKappa, IBK, Bronswerk, Niederlande		125	160	einstufig mit IHX und Unterkühler	Hubkolben	R600
Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Süd-Korea		125	20 bis 40	einstufig mit Dampferzeugung	Hubkolben	R245fa/R718
GREE Electric Appliances, Zhuhai, China		120	6 bis 12	einstufig	Hubkolben	R245fa
Norwegian University of Science and Technology, SINTEF, Norwegen		115	20 bis 30	zweistufige Kaskade	Hubkolben	R600/R290
TU Graz, Österreich		110	20 bis 40	einstufig mit IHX	Hubkolben	R600
Tianjin University, China		110	44 bis 141	einstufig	Doppel-Scroll	BY-4
EDF Electricité de France, Johnson Controls		105	300 bis 500 900 bis 1'200	einstufig mit IHX und Economiser	Doppel-Schraube, Turbo	R245fa

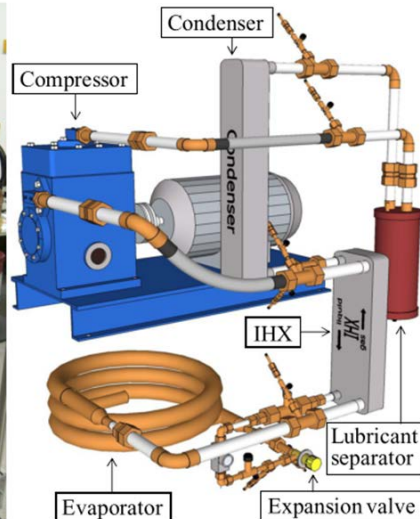
Beispiele von experimentellen HTWP Laboranlagen

160°C



*Helminger (2016),
Fleckl (2015)
AIT, Wien
1-stufig mit IHX,
Hubkolben
(Bitzer 2CES),
R1336mzz(Z)*

140°C



140°C

*Reißner (2015, 2013), Erlangen
1-stufig mit IHX, Hubkolben (GEA Bock E3), LG6*

*Noack (2016), ILK, Dresden
Einstufig, HT 125*

SCCER Projekt (Swiss Competence Center of Energy Research) = Förderprogramm für Energie in der Schweiz (25 Hochschulen, 1'073 Forschende)

SCCER EIP (Efficiency of Industrial Processes)

- Teilnehmer: ETHZ, EPFL, HSLU, FHO, UNIGE
- NTB Buchs: Leader des Work Package 2

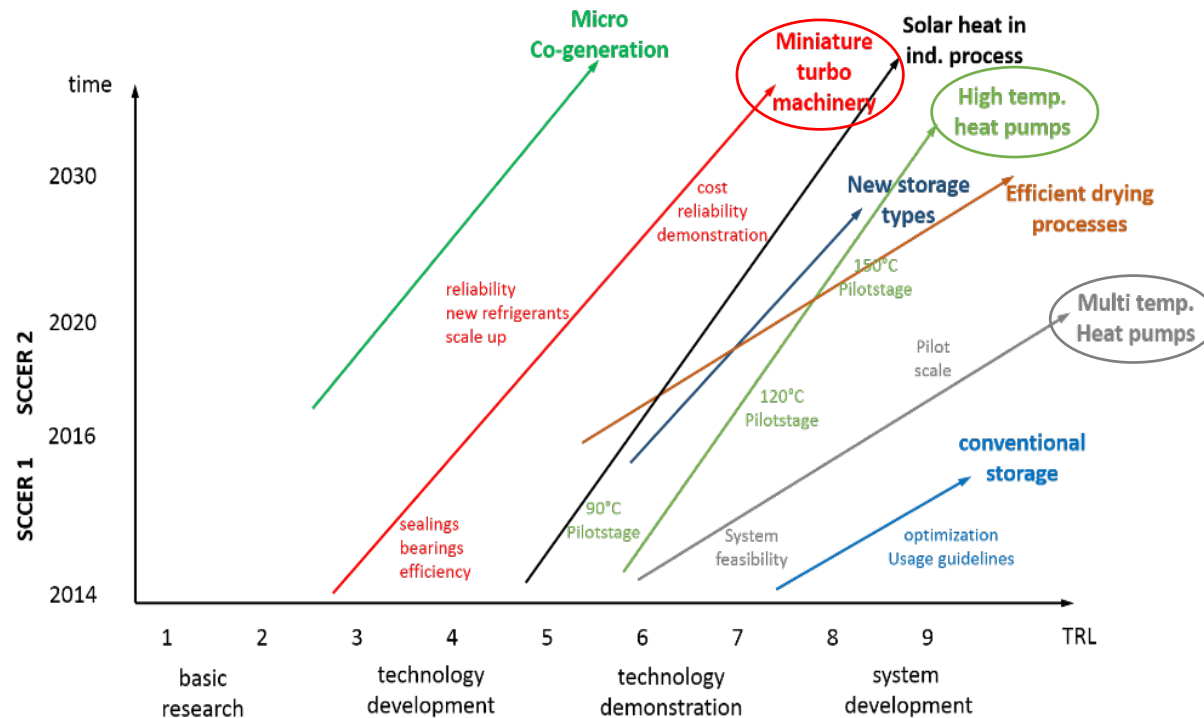
EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES



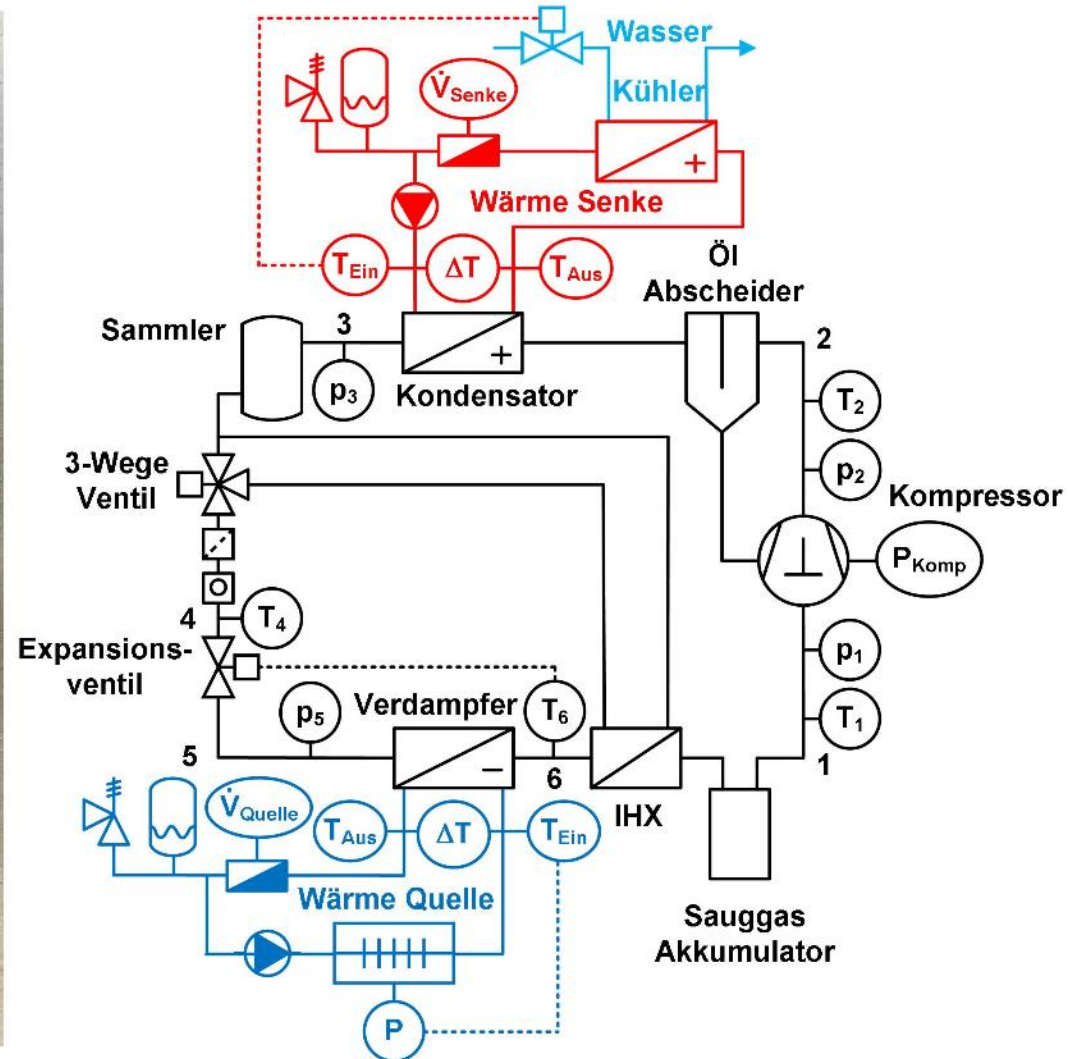
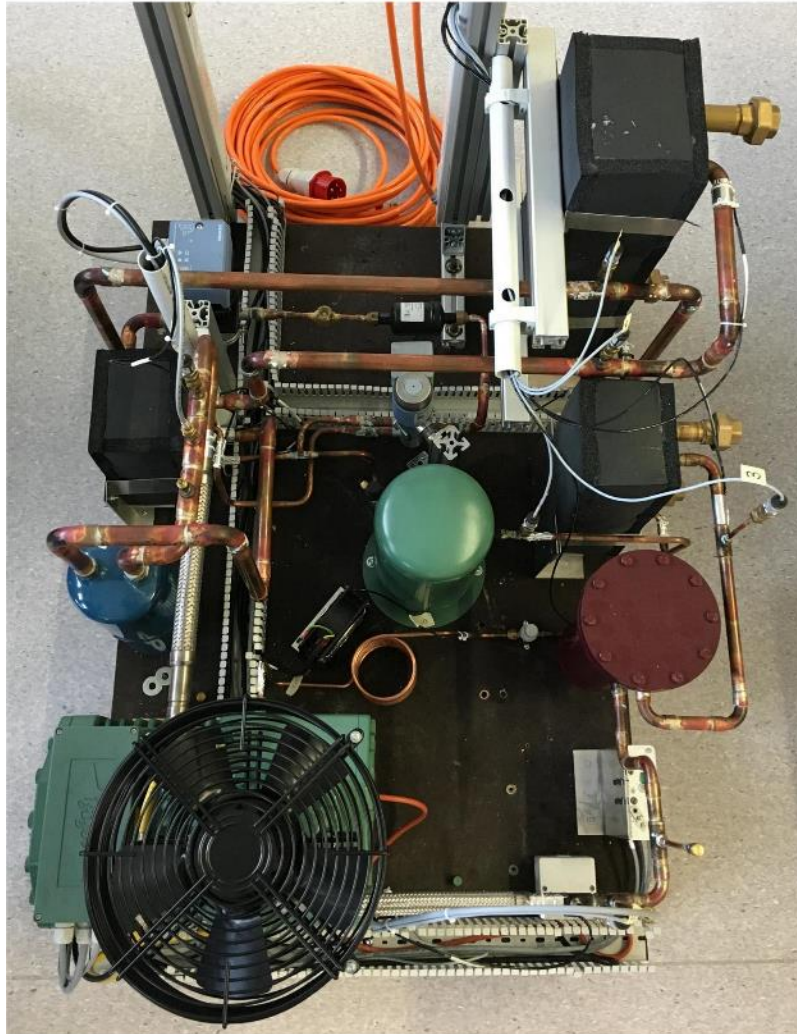
Work Package 2:

Energie Effizienz (direkt)

- Ziel: Entwicklung hocheffizienter Systemlösungen und Technologien (z.B. Kreisprozesse und Wärmepumpen)
- Performance Sprung

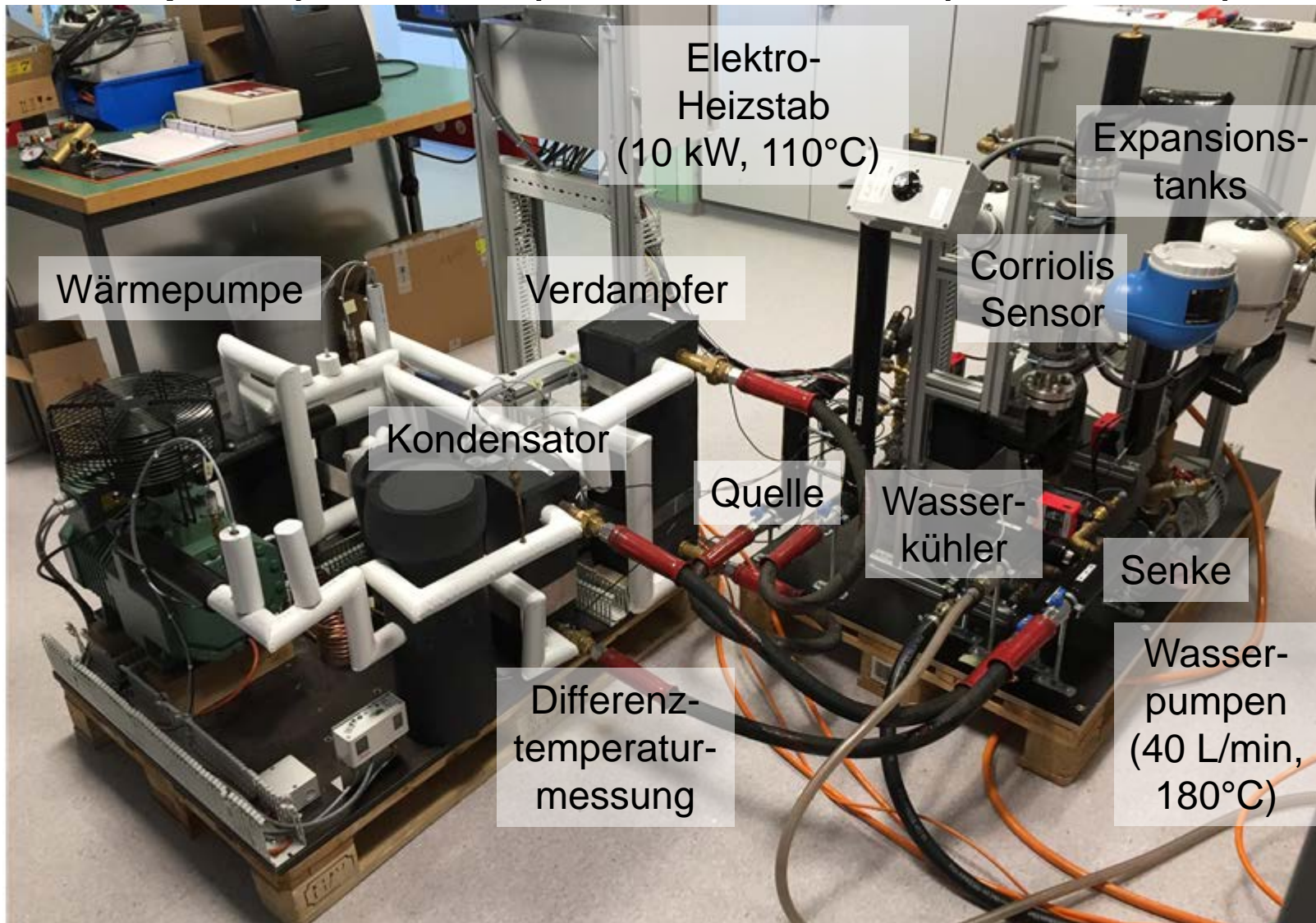


Experimenteller Aufbau und Prinzipschema für Senkentemperaturen bis 150 °C

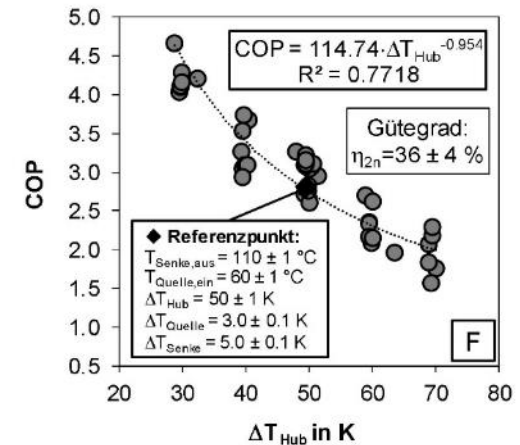
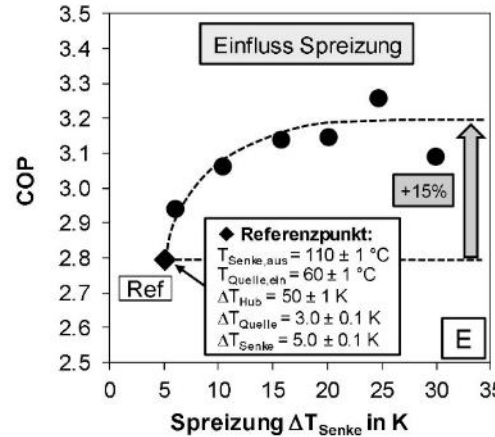
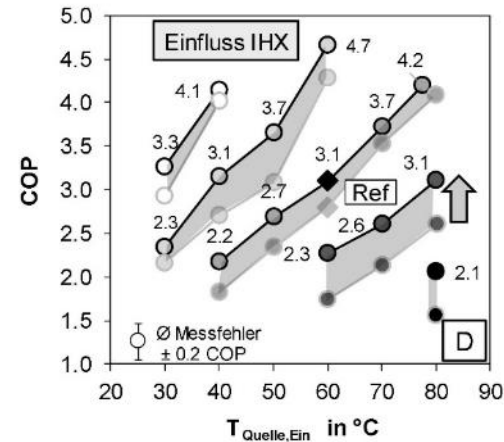
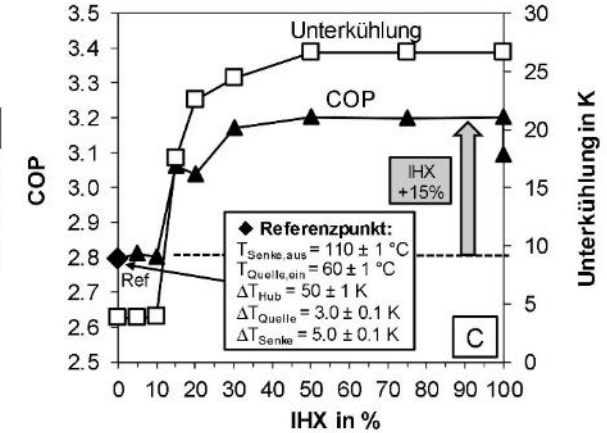
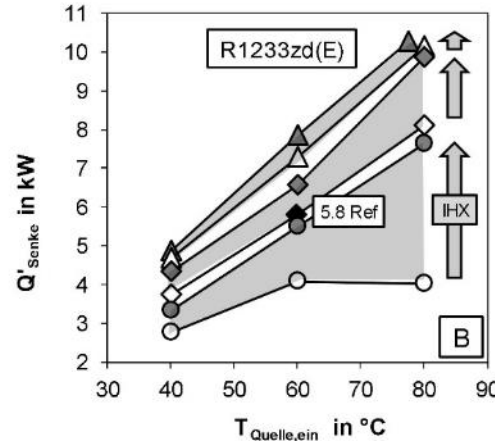
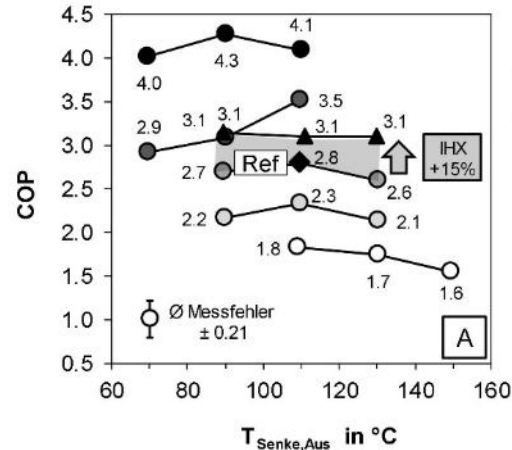


3. Stand der Forschung – Labor HTWP an NTB Buchs

Labor HTWP an der NTB Buchs mit Wärmequelle (40 bis 80°C) und Wärmesenke (80 bis 150 °C)



Parameterstudie mit Kältemittel R1233zd(E) – Effizienzsteigerung durch IHX und Spreizung auf der Senkenseite



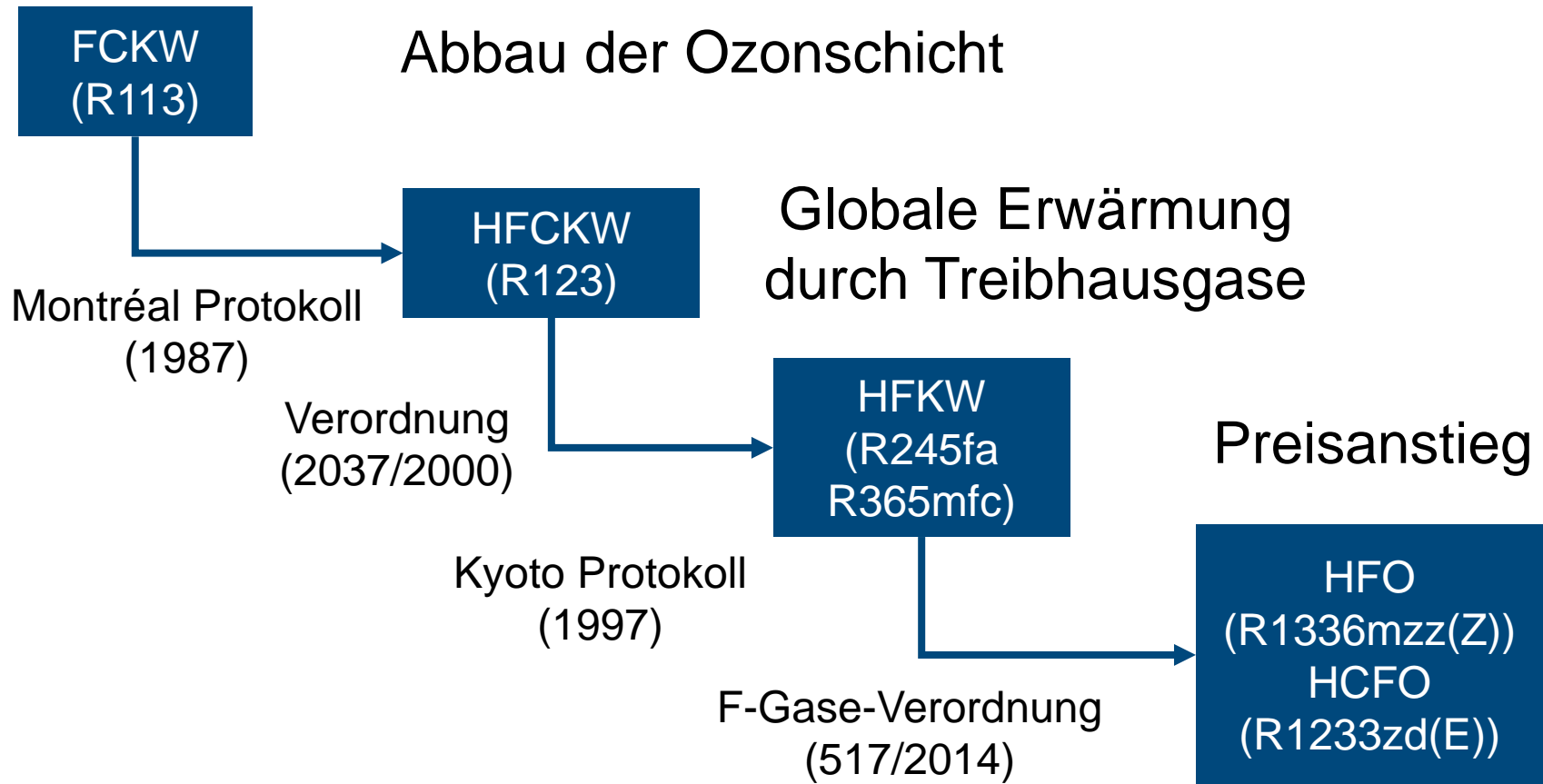
Spreizung:
 $\Delta T_{Senke} = 5.0$ K
 $\Delta T_{Quelle} = 3.0$ K
 $\Delta T_{Üb} = T_6 - T(p_{Evap}) = 5$ K

Arpagaus et al. (2018)

Fazit

- Weltweit hohe Forschungsaktivität, mindestens 18 experimentelle Forschungsprojekte mit Senktemperaturen $> 100\text{ °C}$ (bis max. 160 °C)
- Experimentelle Forschung hauptsächlich in Österreich, Frankreich, Deutschland, Japan, Norwegen, den Niederlanden, der Schweiz, Korea und China
- Trend zu natürlichen Kältemitteln R600 (Butan), R601 (Pentan), R744 (CO_2), R718 (H_2O) und synthetischen HFOs mit $\text{GWP} < 10$ wie z.B. R1336mzz(Z), R1233zd(E), R1224yd(Z), und R1234ze(Z)
- Kreisläufe: meist 1-stufig, Optimierungen mit IHX und / oder Economizer-Zyklus mit Zwischeneinspritzung in den Kompressor, meist Hubkolben
- Zukünftige Forschung:
 - Steigerung der Effizienz von Wärmepumpen (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe, mit ölfreien Kompressoren)
 - Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer Kältemittel mit $\text{GWP} < 10$
 - Einsatz natürlicher Kältemittel (CO_2 , H_2O , Kohlenwasserstoffe)
 - Optimierungen Regelungsstrategien für höhere Temperaturen und Scale-up

Entwicklung synthetischer Kältemittel (4. Generation)



FCKW: Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe

HFCKW: Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe

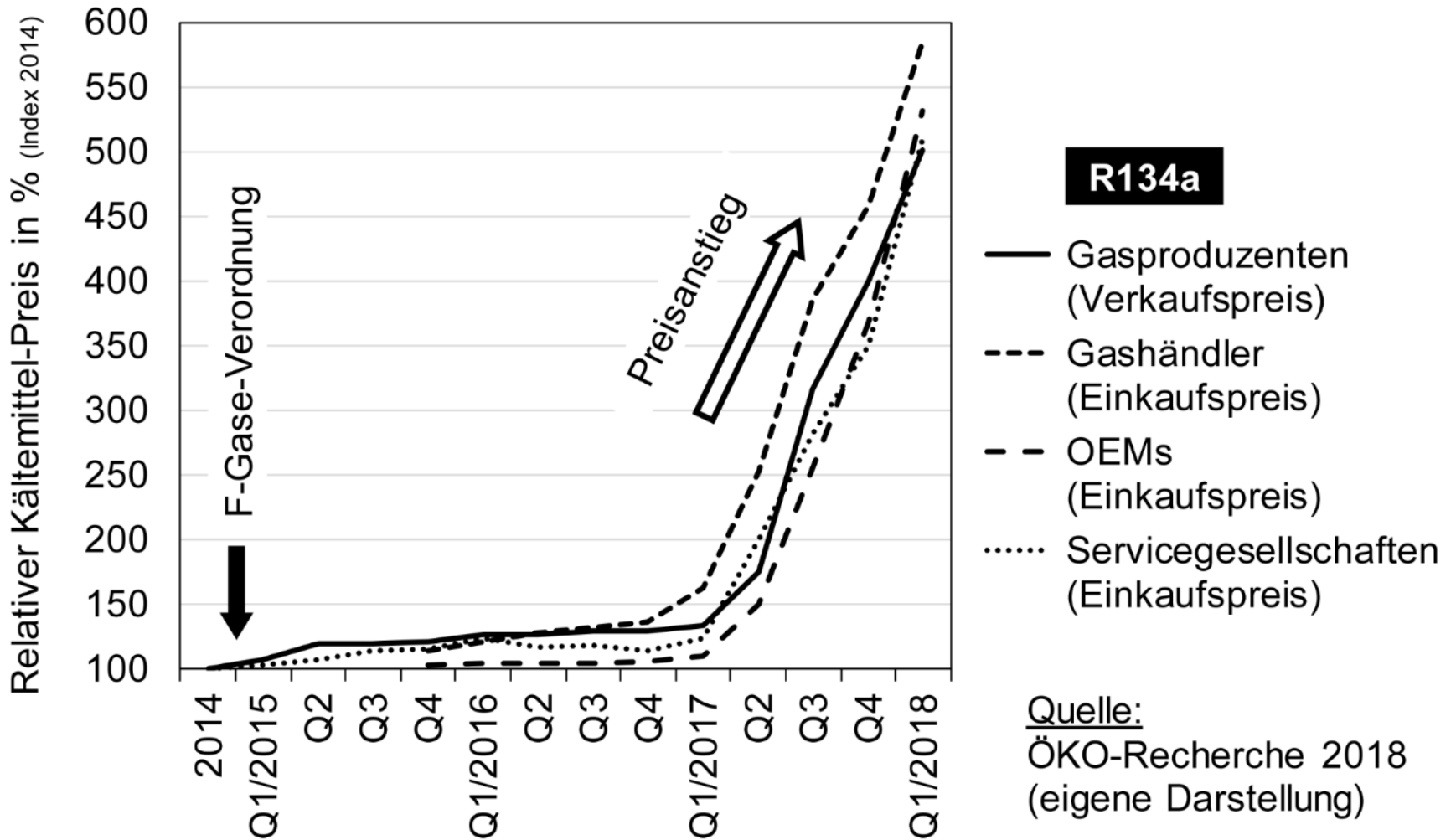
HFKW: Fluorkohlenwasserstoffe

HFO: Hydrofluorolefine

HCFO: Hydrochlorfluorolefine

Paris Vereinbarung
(2015)

Mittlere Preisentwicklung für das Kältemittel R134a

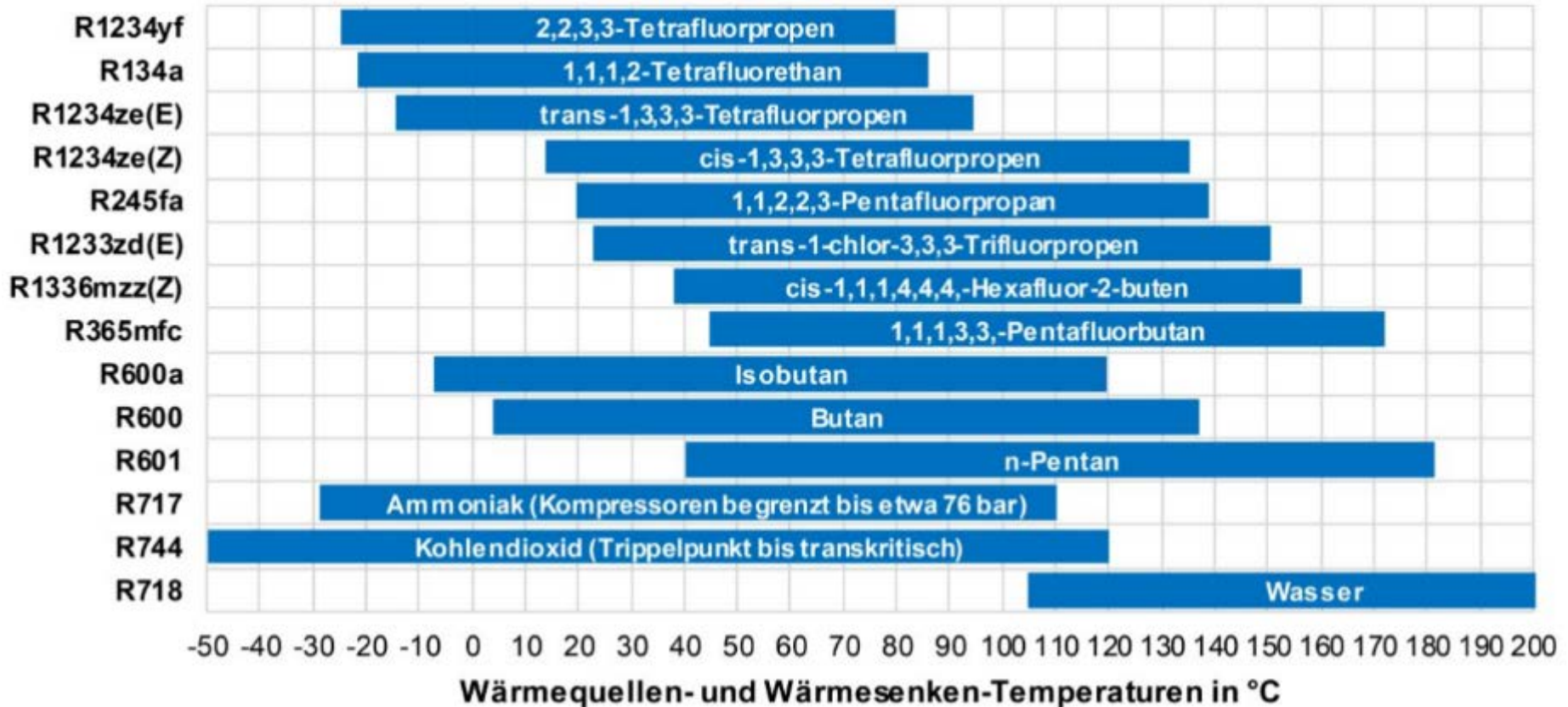


Auswahlkriterien für Anwendung in HTWP

Kriterien	Erforderliche Eigenschaften
Thermische Eignung	Hohe kritische Temperatur ($> 150^{\circ}\text{C}$), Niedriger kritischer Druck ($< 30\text{bar}$), Stillstandsdruck $> 1\text{ atm}$, Niedriges Kompressionsverhältnis
Umweltverträglichkeit	ODP = 0 (kein Ozonabbaupotential), Niedriges GWP < 10 (Treibhauspotential), Kurze atmosphärische Lebensdauer
Sicherheit	Nicht toxisch, nicht giftig, nicht oder nur schwach brennbar
Effizienz	Hoher COP bei hohen Temperaturhüben, Minimale Überhitzung zur Verhinderung eine Flüssigkeitskompression, Hohe volumetrische Heizleistung
Verfügbarkeit	Auf dem Markt verfügbar, niedriger Preis
Andere Faktoren	Gute Löslichkeit in Öl, thermische Stabilität vom Kältemittel-Öl- Gemisch, Schmiereigenschaften bei hohen Temperaturen, Materialverträglichkeit mit Stahl, Aluminium und Kupfer

Datenquellen: Bertinat (1986), Burtscher et al. (2009), Calm (2008), Eisa et al. (1986), Göktun (1995), Helminger et al. (2016), Klein (2009), Kujak (2016), Reißner et al. (2013), Rieberer et al. (2015)

Einsatzbereiche von verschiedenen Kältemitteln für HTWP-Anwendungen



Annahmen:

- Untere Grenze: Temperatur bei 1 bar + 5 K Grädigkeit im Wärmeübertrager
- Obere Grenze: 15 K unterhalb der kritischen Temperatur
- Ausnahmen: transkritische CO₂-Prozesse bis 120 °C, Ammoniak: Limit der Konstruktionsfestigkeit von Verdichtern bei etwa 76 bar bzw. 110 °C

Kältemittelhersteller und Produkte für HTWP

R1233zd(E)
Solstice®zd

Honeywell

R245fa
Genetron® 245fa



R1336mzz(Z)
Opteon™ MZ
Chemours



R1233zd(E)

FORANE™ HTS 1233ZD
ARKEMA
INNOVATIVE CHEMISTRY



R1224yd(Z)
AMOLEA®1224yd
AGC Chemicals



3M™ Novec™ 649



R365mfc
Solkane®365mfc



Eigenschaften von Kältemitteln für HTWP

Typ	Kältemittel	Beschreibung (engl.)	Chemische Formel	T _c [°C]	p _c [bar]	ODP [-]	GWP [-]	SG	Sdp [°C]	M [g/mol]	Relativer Preis [-]	
CFC	R113	1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroethane	CCl ₂ FCClF ₂	214.0	33.9	0.85	5'820	A1	47.6	187.4	verboten gemäss Montreal Protocol	
	R114	1,2-Trichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane	CClF ₂ CClF ₂	145.7	32.6	0.58	8'590	A1	3.8	170.9		
HCFC	R123	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane	C ₂ HCl ₂ F ₃	183.7	36.6	0.03	79	B1	27.8	152.9		
	R21	Dichlorofluoromethane	CHCl ₂ F	178.5	51.7	0.04	148	B1	8.9	102.9		
	R142b	1,1-Dichloro-1-fluoroethane	CH ₃ CCl ₂ F	137.1	40.6	0.065	782	A2	-10.0	100.5		
	R124	1-Chloro-1,2,2,2-tetrafluoroethane	C ₂ HClF ₄	126.7	37.2	0.03	527	A1	-12.0	136.5		
HFC	R365mfc ^a	1,1,1,3,3-Pentafluorobutane	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	186.9	32.7	0	804	A2	40.2	148.1		8.9
	SES36 ^b	R365mfc/perfluoro-polyether	R365mfc/PFPE (65/35)	177.6	28.5	0	3'126 ^c	A2	35.6	184.5		10.5
	R245ca	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	CHF ₂ CF ₂ CH ₂ F	174.4	39.3	0	716	n.a	25.1	134.0		n.a.
	R245fa ^d	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	154.0	36.5	0	858	B1	14.9	134.0		6.6
	R236fa	1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropane	CF ₃ CH ₂ CF ₃	124.9	32.0	0	8'060	A1	-1.4	152.0	10.2	
	R152a	1,1-Difluoroethane	CH ₃ CHF ₂	113.3	45.2	0	138	A2	-24.0	66.1	n.a.	
	R227ea	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	101.8	29.3	0	3'350	A1	-15.6	170.0	6.9	
	R134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	CH ₂ FCF ₃	101.1	40.6	0	1'300	A1	-26.1	102.0	1.2	
R410A	R32/R125 (50/50 mixture)	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	72.6	49.0	0	2'088	A1	-51.5	72.6	2.9		
HFO	R1336mzz(Z) ^e	1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene	CF ₃ CH=CHCF ₃ (Z)	171.3	29.0	0	2	A1	33.4	164.1	n.a.	
	R1234ze(Z)	cis-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CH=CHF(Z)	150.1	35.3	0	<1	A2L ^f	9.8	114.0	n.a.	
	R1336mzz(E) ^g	trans-1,1,1,4,4,4,-Hexafluoro-2-butene	CF ₃ CH=CHCF ₃ (E)	137.7	31.5	0	18	A1	7.5	164.1	n.a.	
	R1234ze(E)	trans-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CH=CHF(E)	109.4	36.4	0	<1	A2L	-19.0	114.0	5.6	
	R1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	CF ₃ CF=CH ₂	94.7	33.8	0	<1	A2L	-29.5	114.0	13.8	
HCFO	R1233zd(E) ^h	1-chloro-3,3,3-Trifluoro-propene	CF ₃ CH=CHCl(E)	166.5	36.2	0.00034	1	A1	18.0	130.5	6.3	
	R1224yd(Z) ⁱ	1-chloro-2,3,3,3-Tetrafluoro-propene	CF ₃ CF=CHCl(Z)	155.5	33.3	0.00012	<1	A1	14.0	148.5	n.a.	
HC	R601	Pentane	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	196.6	33.7	0	5	A3	36.1	72.2	4.9	
	R600	Butane	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	152.0	38.0	0	4	A3	-0.5	58.1	1.8	
	R600a	Isobutane	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	134.7	36.3	0	3	A3	-11.8	58.1	1.0	
	R290	Propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	96.7	42.5	0	3	A3	-42.1	44.1	1.1	
	R1270	Propene	CH ₃ CH=CH ₂	91.1	45.6	0	2	A3	-47.6	42.1	1.0	
CF6	Novec 649 ^j	Dodecafluoro-2-methyl-3-pentanone	CF ₃ CF ₂ C(O)CF(CF ₃) ₂	168.7	18.8	0	<1	n.a.	49.0	316.0	6.8	
Ether	E170	Dimethyl ether	CH ₃ OCH ₃	127.2	53.4	0	1	A3	-24.8	46.1	39.0	
	R718	Water	H ₂ O	373.9	220.6	0	0	A1	100.0	18.0	5.6 ^k	
Natural	R717	Ammonia	NH ₃	132.3	113.3	0	0	B2L	-33.3	17.0	27	
	R744	Carbon dioxide	CO ₂	31.0	73.8	0	1	A1	-78.5	44.0	1.0	

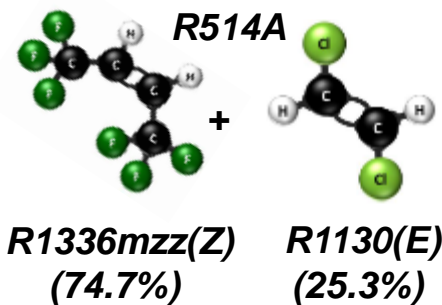
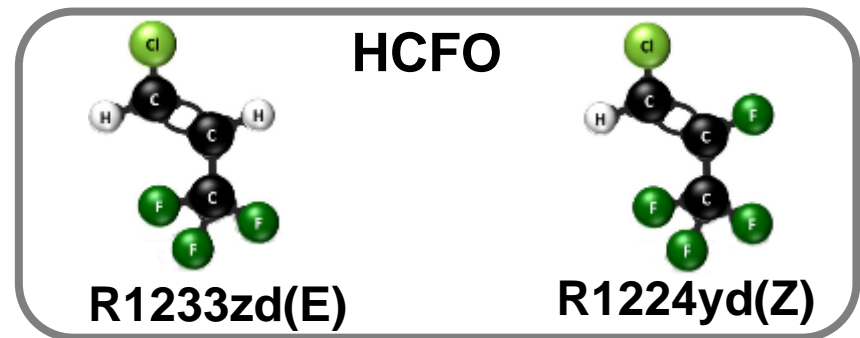
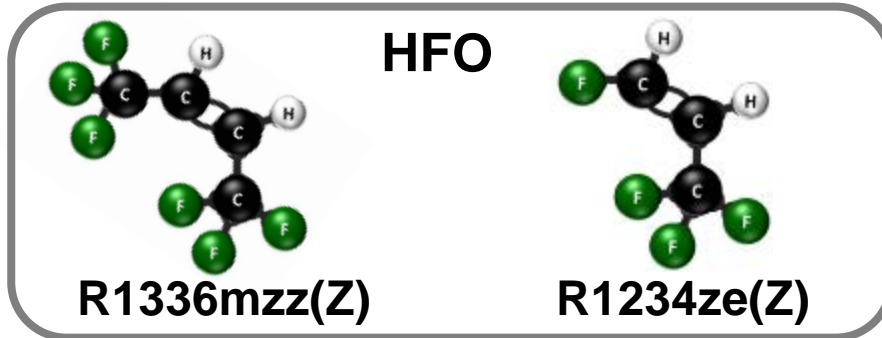
CFC = Chlorofluorocarbons, HCFC = Hydrochlorofluorocarbons, HFC = Hydrofluorocarbons, HFO = Hydrofluoroolefins, HCFO = Hydrochlorofluoroolefins
 HC = Hydrocarbons, T_c = kritische Temperatur, p_c = kritischer Druck, ODP = Ozone Depletion Potential (R11=1.0), GWP = Global Warming Potential (CO₂=1.0, 100 Jahre, EU F-Gas Regulation 517/2014), SG = Sicherheitsgruppe (gemäss DIN EN 378-1, 2008, ASHRAE 34), Sdp = Siedepunkt bei Normdruck 1.013 bar, M = Molekulargewicht, Relativer Preis pro kg Kältemittel vgl. mit CO₂ von 9 Euro/kg (basierend auf 10 kg Behälter, Oktober 2017), ^aSolkane@365mfc von Solvay, ^bSolkatherm@SES36 von Solvay, ^cLewandowski et al. (2010), ^dR245fa von Linde oder Honeywell (Genetron® 245fa), ^eOpteon™ MZ von Chemours, ^fFukuda et al. (2014), ^gJuhasz (2017), ^hSolstice@zd von Honeywell, ⁱAMOLEA® 1224yd von AGC Chemicals, ^jNovec™ 649 von 3M, ^kMolekular biologische Reagenzienqualität

Klassifikation nach Sicherheitsgruppen (gemäss DIN EN 378-1)

Brennbarkeit	Höhere Brennbarkeit	A3	R290, R1270, R601, R600, R600a, E170	B3	
	Geringe Brennbarkeit	A2	R142b, R152a, R365mfc, SES36, R1234ze(Z)	B2	
		A2L	R1234ze(E), R1234yf	B2L	R717
	Keine Flamm- ausbreitung	A1	R113, R114, R124, R134a, R236fa, R227ea, R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E), R1224yd(Z), R718, R744	B1	R123, R21, R245ca, R245fa
			Geringer	Höher	
Giftigkeit / Toxizität					

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

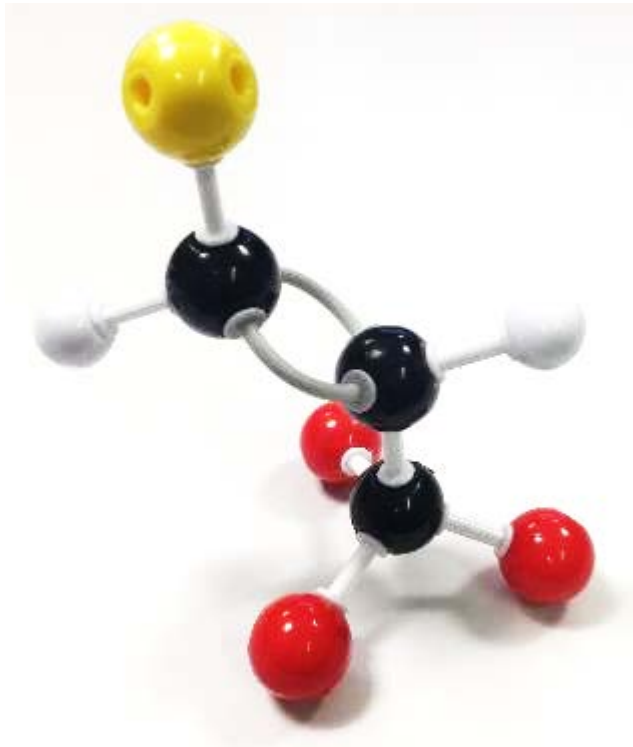
Bemerkungen:

- 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

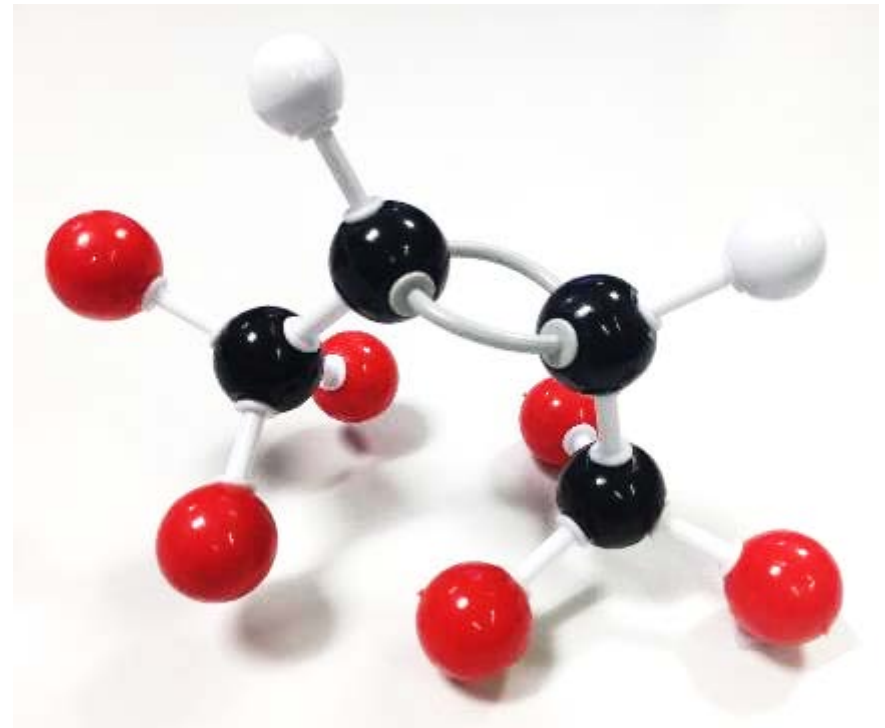
Opteon™ XP30 von Chemours

Juhasz & Kontomaris (2018), Kujak (2018)

Welches synthetische Kältemittel wird sich durchsetzen in der Industrie?



R1233zd(E)



R1336mzz(Z)

- Verschiedene Kältemittel arbeiten mit Hochdruck an der Entwicklung neuer Kältemittel mit verringertem Treibhauspotenzial (GWP) für HTWP
- Speziell geeignet sind HFO-Kältemittel (R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E), R514A, R1234ze(Z), R1234ze(E), R1224yd(Z), sowie natürliche Kältemittel (R600, R601, R718, R717, R744)
- Spezielle Sicherheitsvorkehrungen bei R600 und R601 wegen Brennbarkeit (A3)
- Kompromiss zwischen COP (Effizienz) und VHC (volumetrische Wärmeleistung)
 - R1336mzz(Z) ist der nächste «Drop-in» Ersatz für R365mfc
 - R1224yd(Z), R1234ze(Z) und R1233zd(E) liegen näher an R245fa
- Charakteristisch für diese Kältemittel ist insbesondere die positive Steigung der Satttdampfkurven («überhängendes Nassdampfgebiet im log(p)-h-Diagramm) erfordert spezielle Überhitzungsregelung mit IHX

Integration von HTWP in industrielle Prozesse

- Gibt es Prozesse mit Wärmebedarf?
- Gibt es Prozesse mit Kühlbedarf?
- Wie hoch ist die erforderliche Wärmenutzungstemperatur (bzw. Senktemperatur)?
- Sind ausreichend Wärmequellen für hohe Wärmenutzungstemperaturen vorhanden?
- Hat die Wärmequelle etwa dieselbe Grössenordnung wie der Wärmebedarf?
- Ist die Wärmequelle etwa gleichzeitig verfügbar wie die Wärmesenke?
- Wie gross ist das Wärmerückgewinnungspotenzial (WRG)?
- Wie hoch ist die Laufzeit der Wärmepumpe (Auslastung)?
- Lohnt sich der Einsatz einer Wärmepumpe aus betriebswirtschaftlicher Sicht?
- Wo liegt das wirtschaftliche Optimum zwischen Investitions- und Betriebskosten?

NEU

- Arpagaus C.: [Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale](#), VDE Verlag, Berlin, 2018, 138 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.

Dank



**Interstate University of Applied
Sciences of Technology Buchs**

University of Applied Sciences
of Eastern Switzerland

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

IES

INSTITUT FÜR
ENERGIESYSTEME



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Prof. Jürg Schiffmann

Finanzieller Support

Bundesamt für Energie (BFE),
Vertragsnummer: SI/501782-01
Projekt: HTWP-Annex 48 – Beitrag über
HTWP zum IEA TCP HPT Annex 48



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung**

SCCER

EFFICIENCY OF
INDUSTRIAL PROCESSES



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