



# Deutsche Kälte- und Klimatagung 19. - 20. November 2015 Dresden

Institut für Luft- und Kältetechnik

Gemeinnützige Gesellschaft mbH

Bertolt-Brecht-Allee 20

01309 Dresden

[www.ilkdresden.de](http://www.ilkdresden.de)

Dr.-Ing. Peter Röllig


Tel.: +49 351 / 4081-645

Fax: +49 351 / 4081-605

E-Mail: [peter.roellig@ilkdresden.de](mailto:peter.roellig@ilkdresden.de)



**Freie Kühlung mit  
Pumpenzirkulation  
des Kältemittels CO<sub>2</sub>**



- Hintergrund und theoretische Vorüberlegungen

- Entwicklung eines Funktionsmusters

(Auswahl Kältemittel / Zirkulationsprinzip)

- Ergebnisse und Ausblick



## Forschungsthema: „Freie Kühlung durch Kältemittelzirkulation“

\* Förderprojekt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

**Projekträger:** EuroNorm GmbH / INNO-KOM-Ost

**Modul:** Marktorientierte F & E

**Förderkennzeichen:** MF130061

**Laufzeit:** November 2013 – März 2016

### Zielstellungen

- Entwicklung eines Frei-Kühl-Verfahrens ohne Kälte-träger-Zwischenkreislauf
- Dabei Verwendung eines kältetechnisch optimalen, aber auch umweltfreundlichen Kältemittels
- Herstellung eines Versuchsmusters für Funktionsnachweis und Messungen

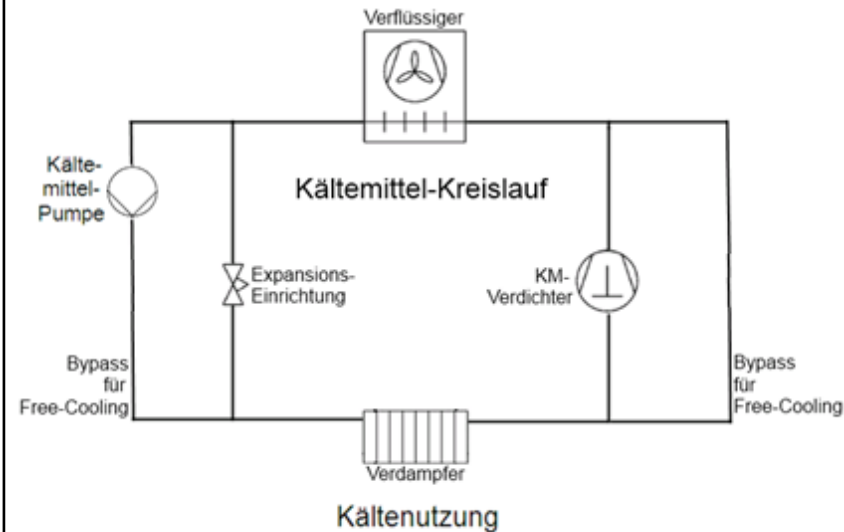
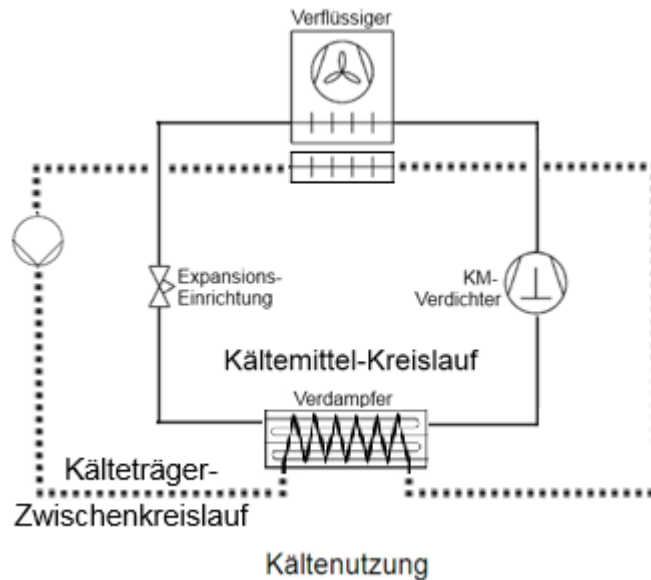
# Arten der Freien Kühlung

Direkte Freie Kühlung

Indirekte Freie Kühlung mit Kälte-träger-Zwischenkreislauf

Indirekte Freie Kühlung durch Kältemittelzirkulation ohne Kälte-träger-Zwischenkreislauf

Mischluftprinzip durch Zufuhr kalter Außenluft  
  
(im einfachsten Fall: Fenster öffnen)

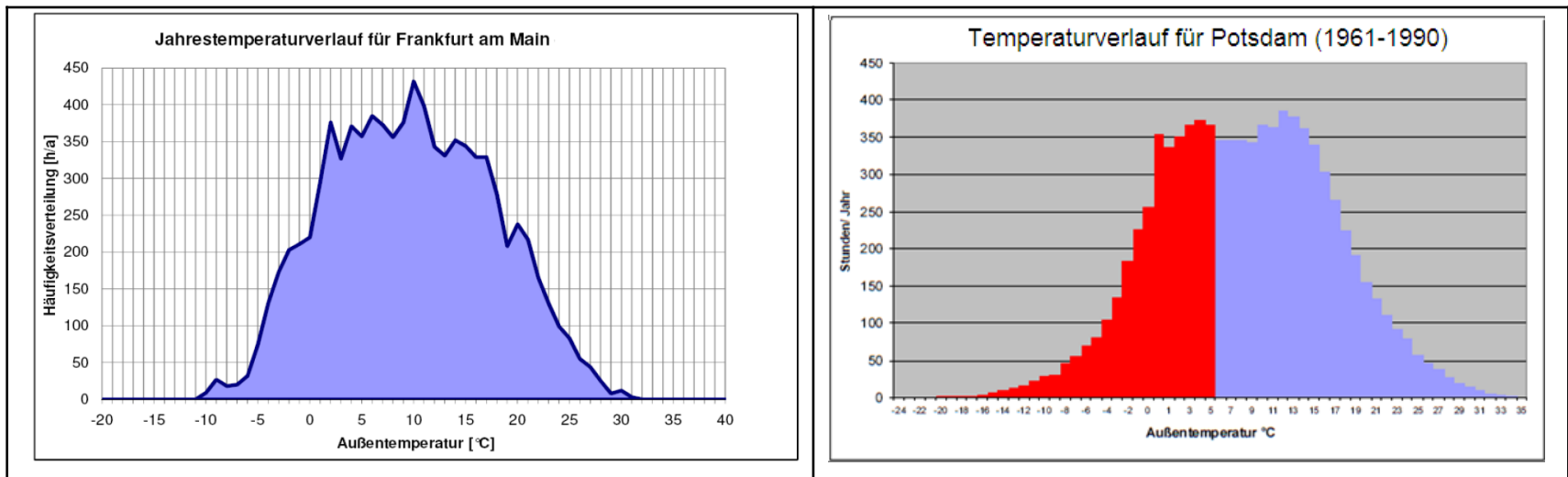


# Arten der Freien Kühlung

Direkte Freie Kühlung	Indirekte Freie Kühlung mit Kälte-träger-Zwischenkreislauf	Indirekte Freie Kühlung durch Kältemittelzirkulation ohne Kälte-träger-Zwischenkreislauf
<ul style="list-style-type: none"> <li>- für Technik-räume mit hohen Wärmelasten meist nicht ausreichend</li> <li>- bei innenlieg. Räumen nicht praktikabel</li> <li>- ungewollte Feuchte- oder Staublasten</li> <li>- ungewollt trockene Raumluft für IT-Kühlung im Winter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhter Anlagenaufwand: Zusatz-WÜ, Glykol-Zwischenkreis mit Pumpe, Armaturen usw.</li> <li>- bei serienmäßigen Kältesätzen oft optional oder standardmäßig als Zubehör (in kompakter Form)</li> <li>- maschinelle Kälteerzeugung und Freie Kühlung können ggf. simultan arbeiten</li> <li>- erhöhte Lüfter-Pressung wegen Zusatz-WÜ → höhere Lüfter-Antriebsleistung</li> <li>- <b>aufgrund des Zwischenkreises → größeres <math>\Delta T</math> zwischen <math>t_{Luft}</math> und <math>t_{Nutz}</math></b></li> <li>- <b>pro Kelvin größeres <math>\Delta T</math>: Verkürzung der Frei-Kühl- Zeit um ca. 300 bis 400 h/a</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- KM-Zirkulation über vorhandene WÜ des Kältekreis (Verdampfer u. Verflüssiger)</li> <li>- 2 Zirkulationsprinzipien:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Thermosyphon-Prinzip thermodynamischer Umtrieb durch Temperatur- u. Höhen-Differenz zwischen Verdampfer u. Verflüssiger; wegen langsamer KM-Zirkulation relativ geringe Kühlleistungen</li> <li>b) Pumpenumlauf KM-Massenstrom durch entsprechende Pumpenauslegung konkret einstellbar; relativ große Kühlleistung; Verfügbarkeit der KM-Pumpen???</li> </ul> </li> <li>- nur vereinzelte praktische Beispiele, meist mit Thermosyphon-Prinzip</li> <li>- <b>kein Kälte-träger-Zwischenkreis → kein zusätzliches <math>\Delta T</math> → längere Frei-Kühl-Zeit (ca.20%) → höheres Energieeinsparpotential</b></li> </ul>

# Voraussetzungen für Freie Kühlung

- Kühlung ohne Kältemaschinenbetrieb
- bei entsprechend niedriger Außenlufttemperatur ( $t_{\text{Luft}} < t_{\text{Nutz}}$ )
- für ganzjährigen Kühlbedarf, wie z.B. Kühlung von IT-Ausrüstung, technologischen bzw. industriellen Prozessen o.ä.

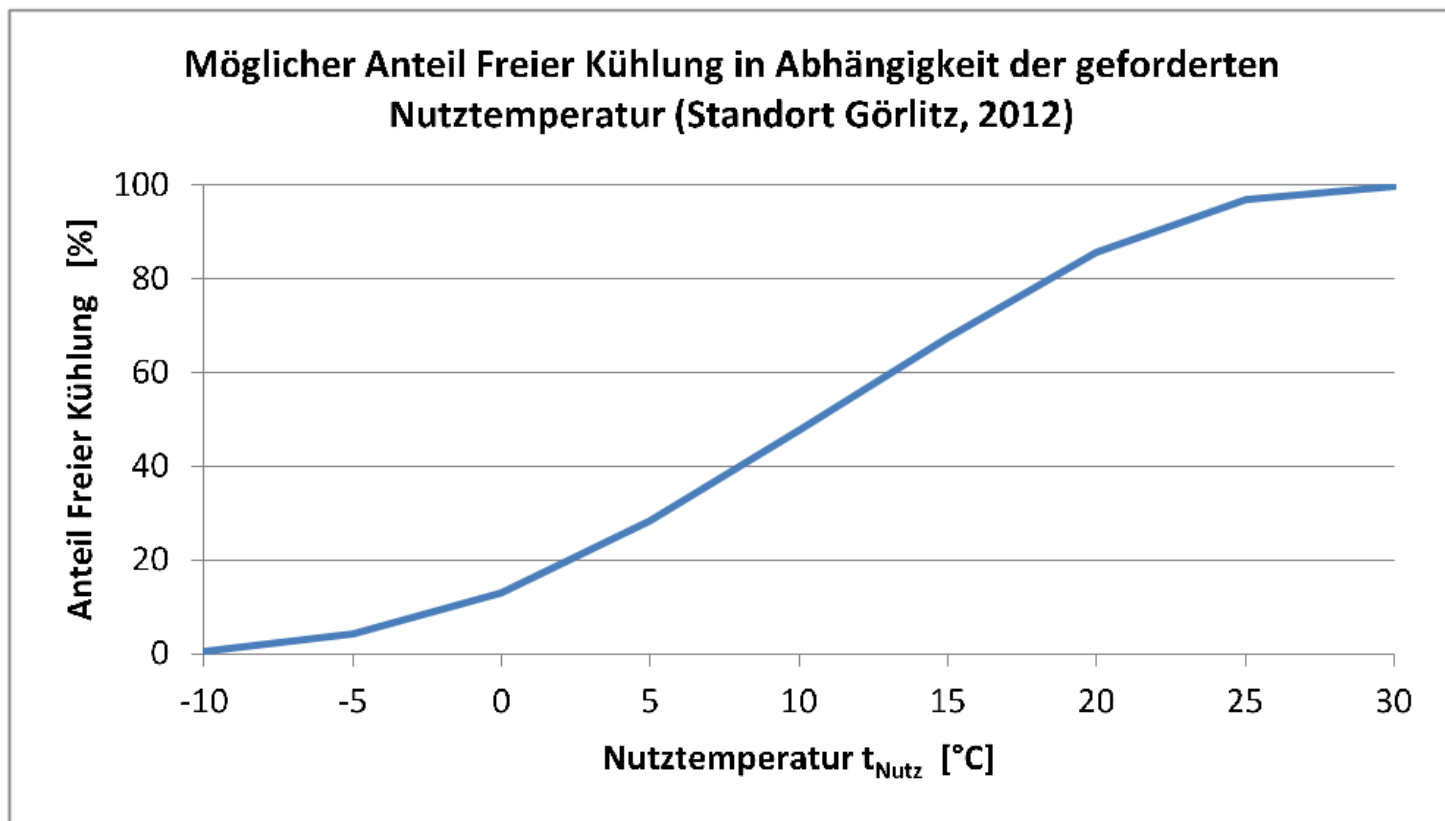


- Jahresdurchschnittstemperatur für Deutschland: statistisch ca. 9 °C
- 40% des Jahres: statistisch unter 5 °C
- Grenztemperatur für Freie Kühlung: oft 5°C

# Steigerung des Frei-Kühl-Anteils durch Freie Kühlung mit Kältemittelzirkulation

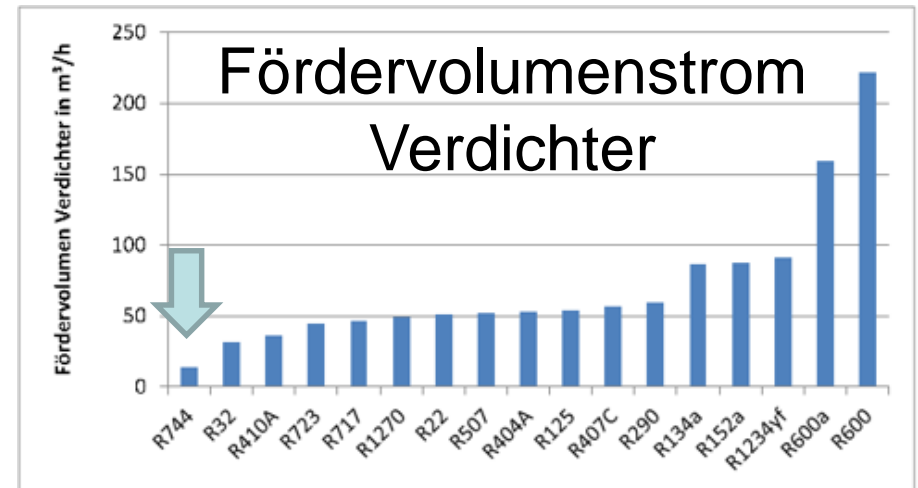
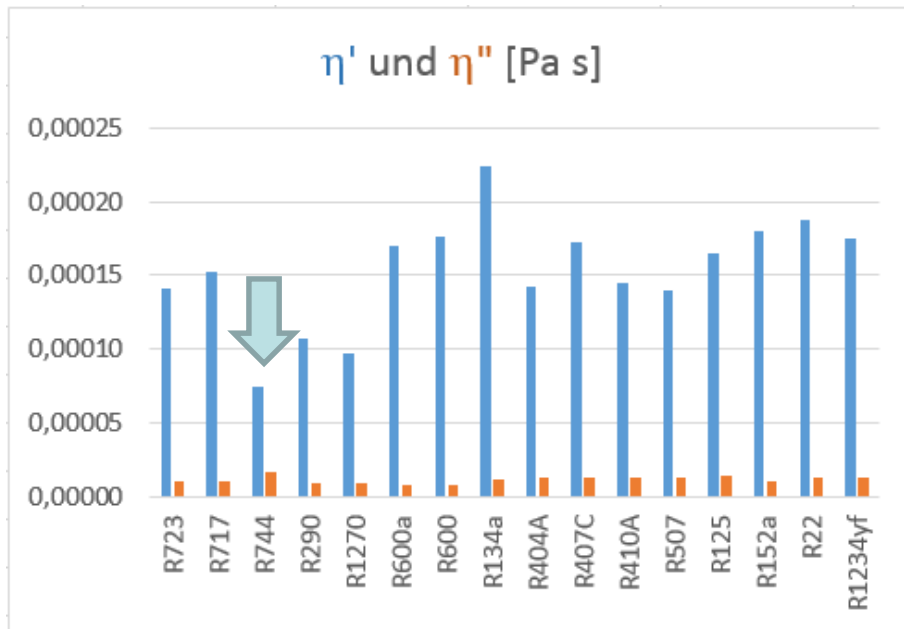
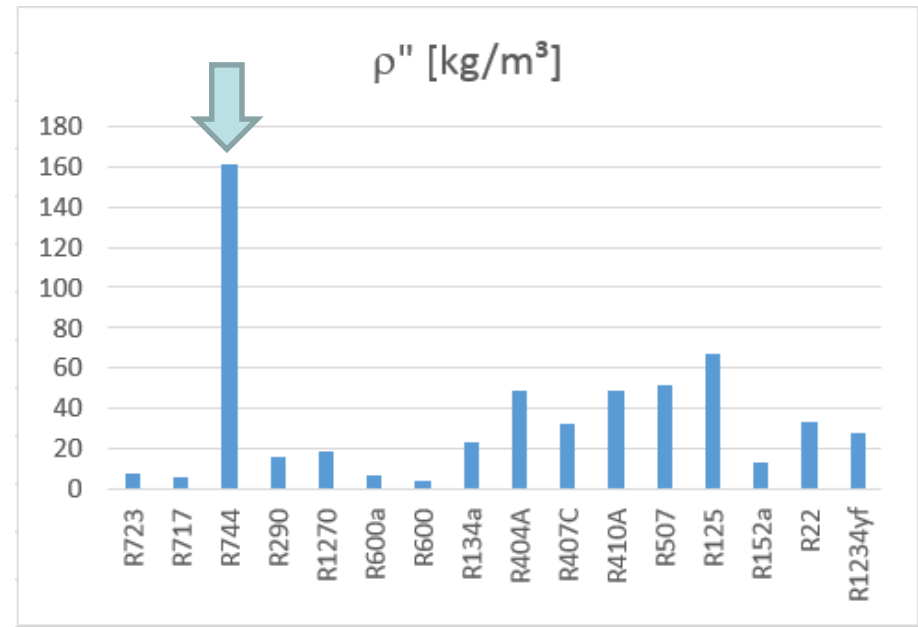
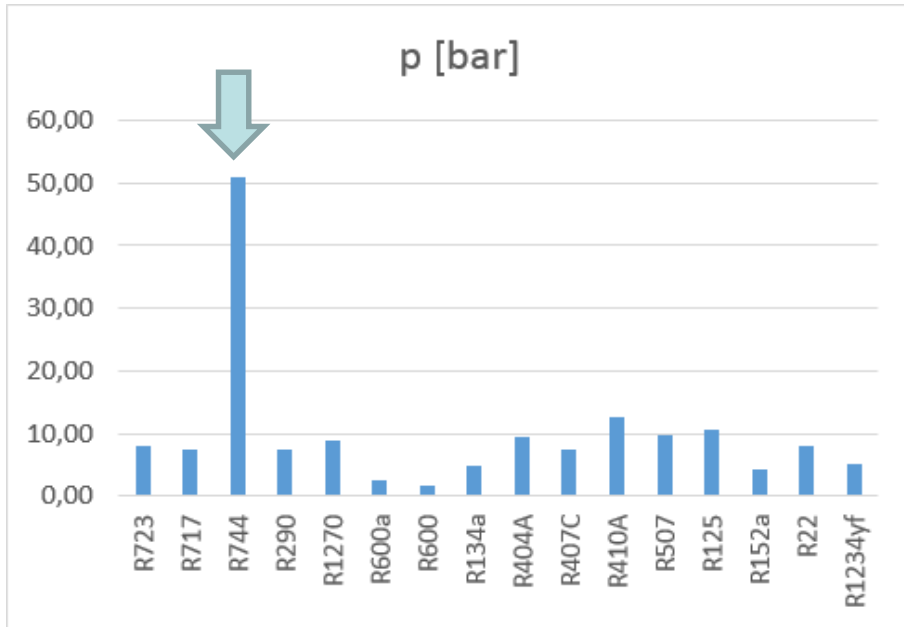
Im Nutztemperaturbereich von etwa 5 bis 20 °C:

$\Delta T = 5 \text{ K} \rightarrow$  Steigerung des Frei-Kühl-Anteils um ca. 20%

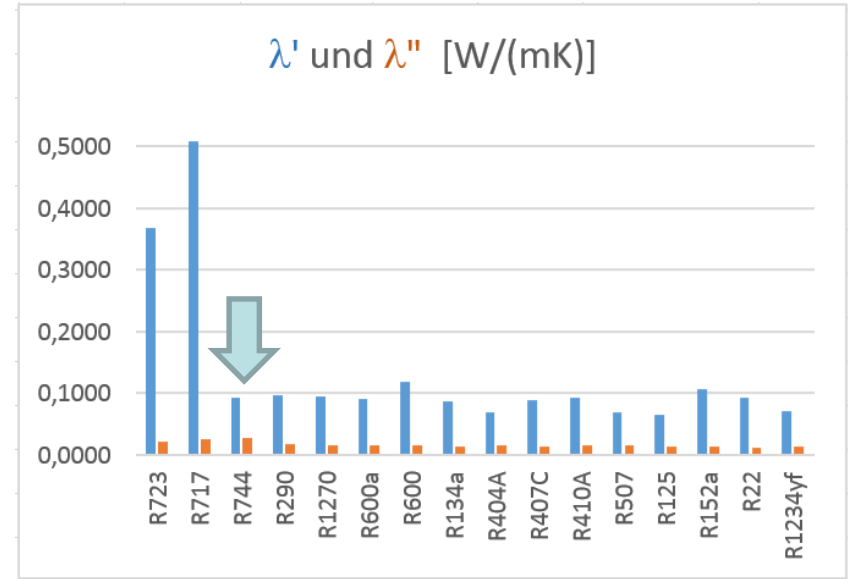
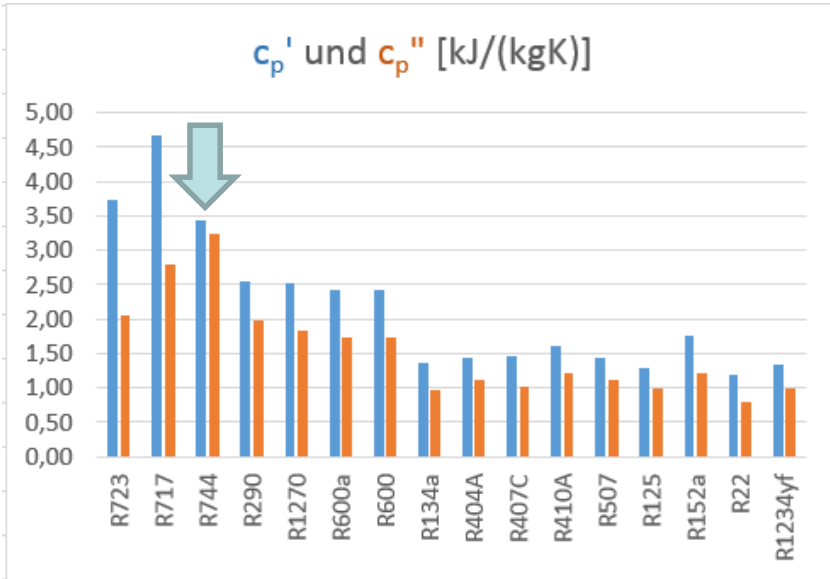




# Eigenschaften von Kältemitteln im Vergleich (15°C)



# Eigenschaften von Kältemitteln im Vergleich (15°C)

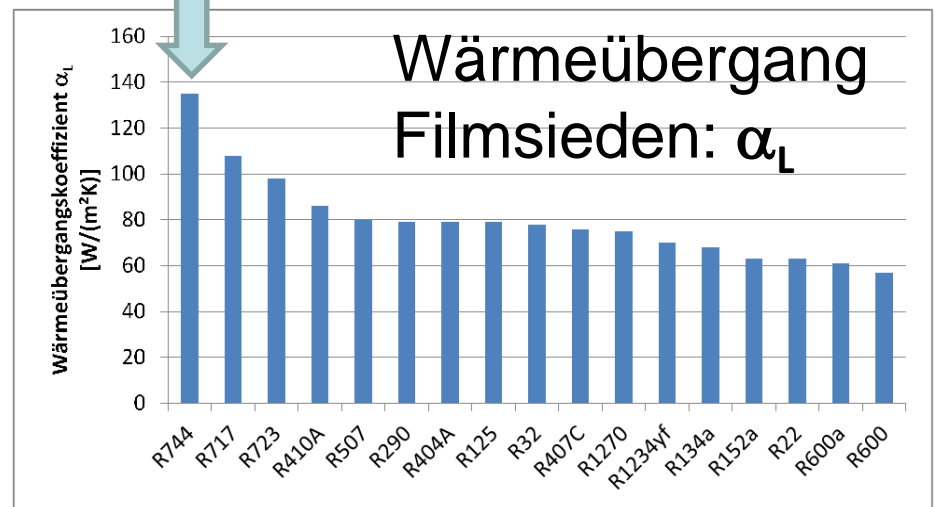


$$\alpha_L = K_f (L \Delta T)^{-1/4} \left[ \frac{\lambda_g^3 \rho_g \Delta h \Delta \rho g}{\eta_g} \right]^{1/4} \quad (31)$$

Darin bedeuten:

- $L$  charakteristische Abmessung des Heizelementes ( $L = d$  für das horizontale Rohr,  $L = H$  für das senkrechte Heizelement),
- $\lambda_g$  Wärmeleitfähigkeit,  $\rho_g$  Dichte,  $\eta_g$  dynamische Zähigkeit des Dampfes, jeweils bei der mittleren Temperatur  $T_m = 0,5 (T_w + T_i)$  des Dampffilms,
- $\Delta \rho = \rho_l - \rho_g$  Dichteunterschied,
- $\Delta h = h_g - h_l$  Enthalpieunterschied zwischen Dampf und Flüssigkeit.

Die empirische Konstante  $K_f$  hat für das horizontale Heizelement den Wert  $0,62 \pm 0,04$  [116] und für die senkrechte Wand den Wert  $0,8$  [118].



$$\alpha = \alpha_L (\alpha_L / \alpha)^{1/3} + \alpha_S$$

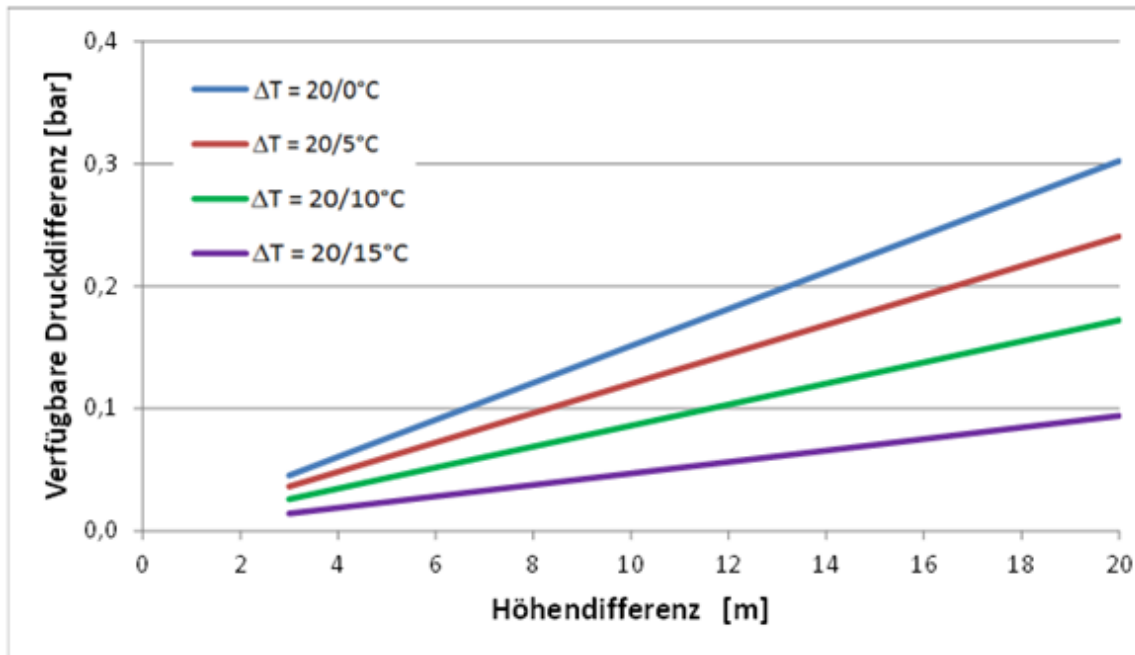
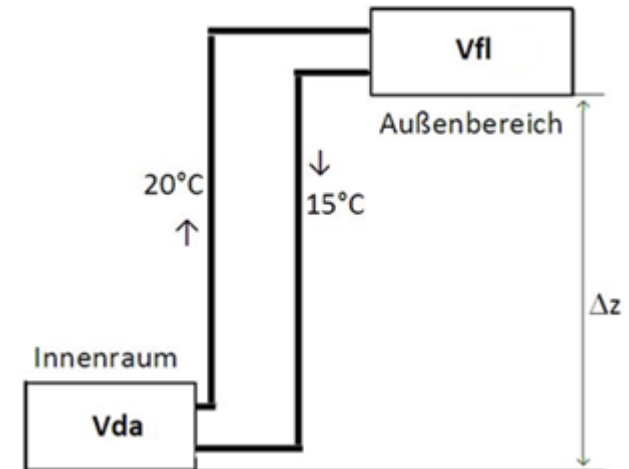
$\alpha_S$  vernachlässigbar  $\rightarrow$   $\alpha = \alpha_L$

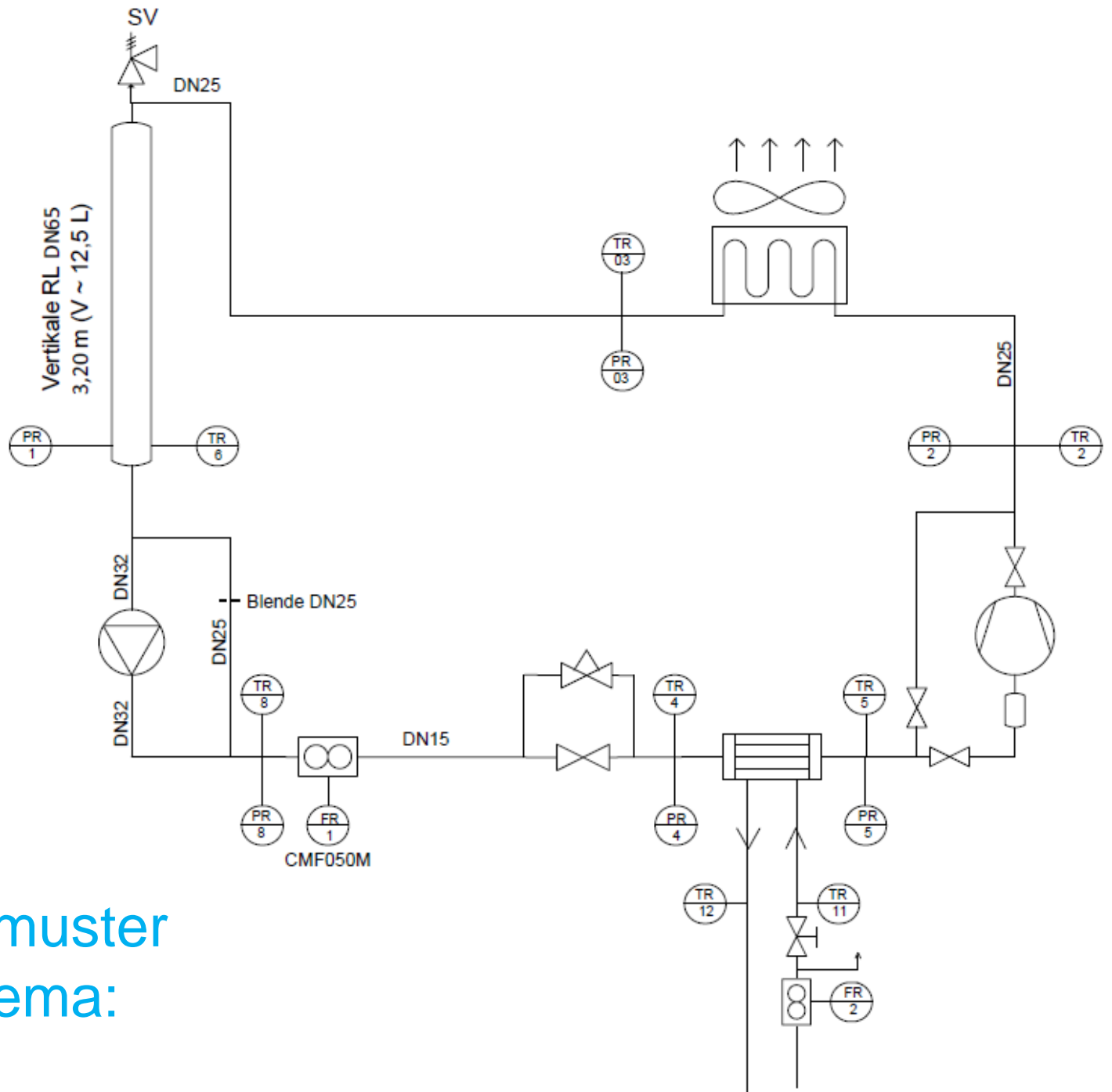
# Thermosyphon-Prinzip (Schwerkraft-Zirkulation)

## Schwerkraft-Zirkulation

$$\Delta p = \Delta \rho g \Delta z$$

$\Delta z$ [m]	$\Delta p$ in bar				
	3	5	10	15	20
$\Delta T = 20/0^\circ\text{C}$	0,0453	0,0756	0,1511	0,2267	0,3022
$\Delta T = 20/5^\circ\text{C}$	0,0361	0,0602	0,1203	0,1805	0,2406
$\Delta T = 20/10^\circ\text{C}$	0,0258	0,0430	0,0861	0,1291	0,1721
$\Delta T = 20/15^\circ\text{C}$	0,0141	0,0235	0,0469	0,0704	0,0938





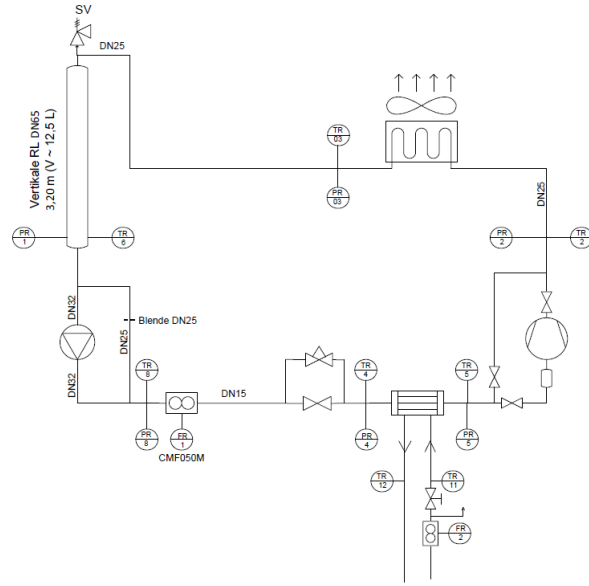
Funktionsmuster  
Schaltschema:

Vertikal-RL DN65 3,20 m (V=12,5 Liter)

Si-V. 65 bar



# Bauteile



Nur Nutzung der Enteisungs-Rohrschlange

Witt-hermetische  
Kältemittelpumpe  
HRP 3232  
PS 65 bar

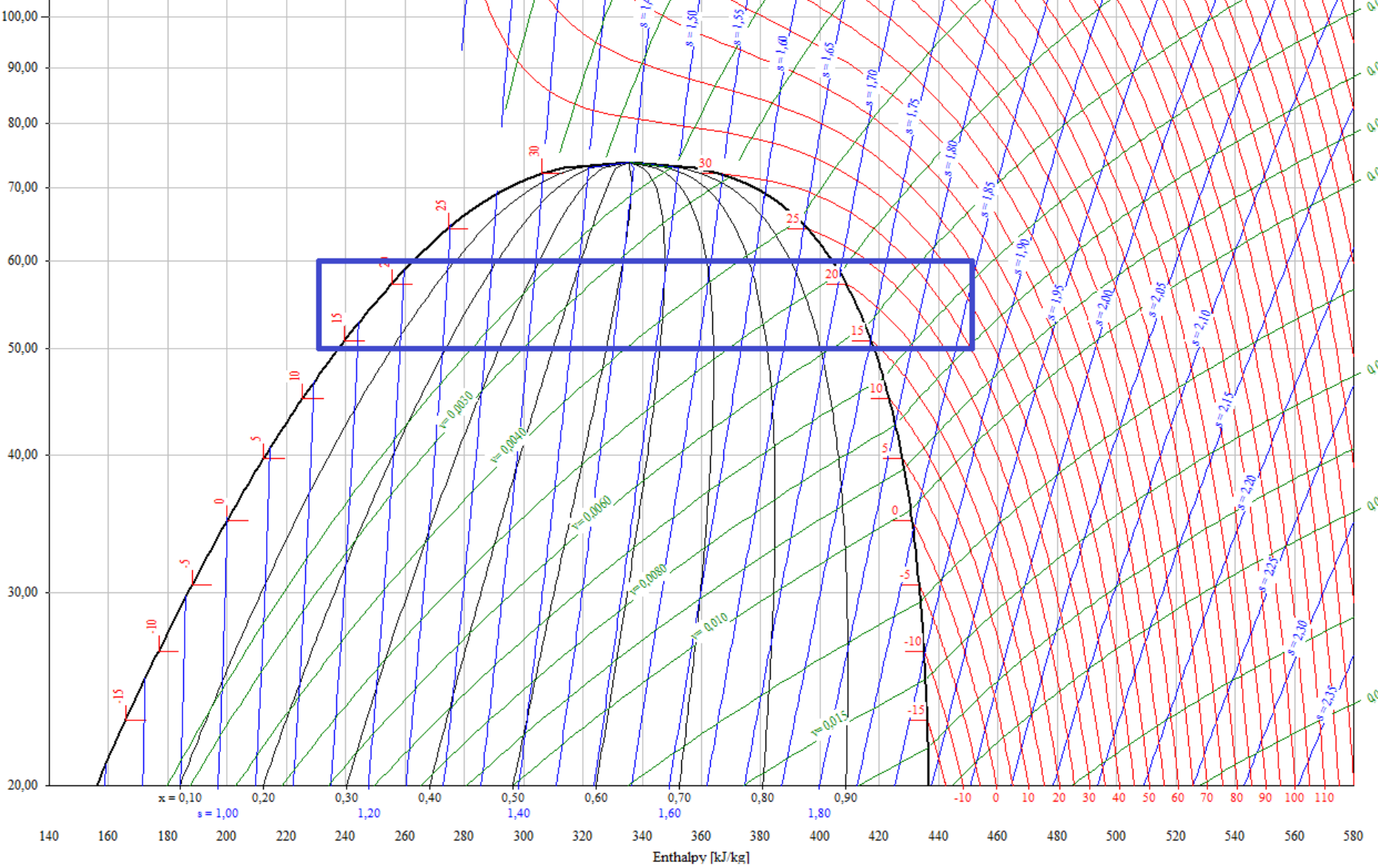


SANYO-Verdichter  
(2-stufig) C-CV223H

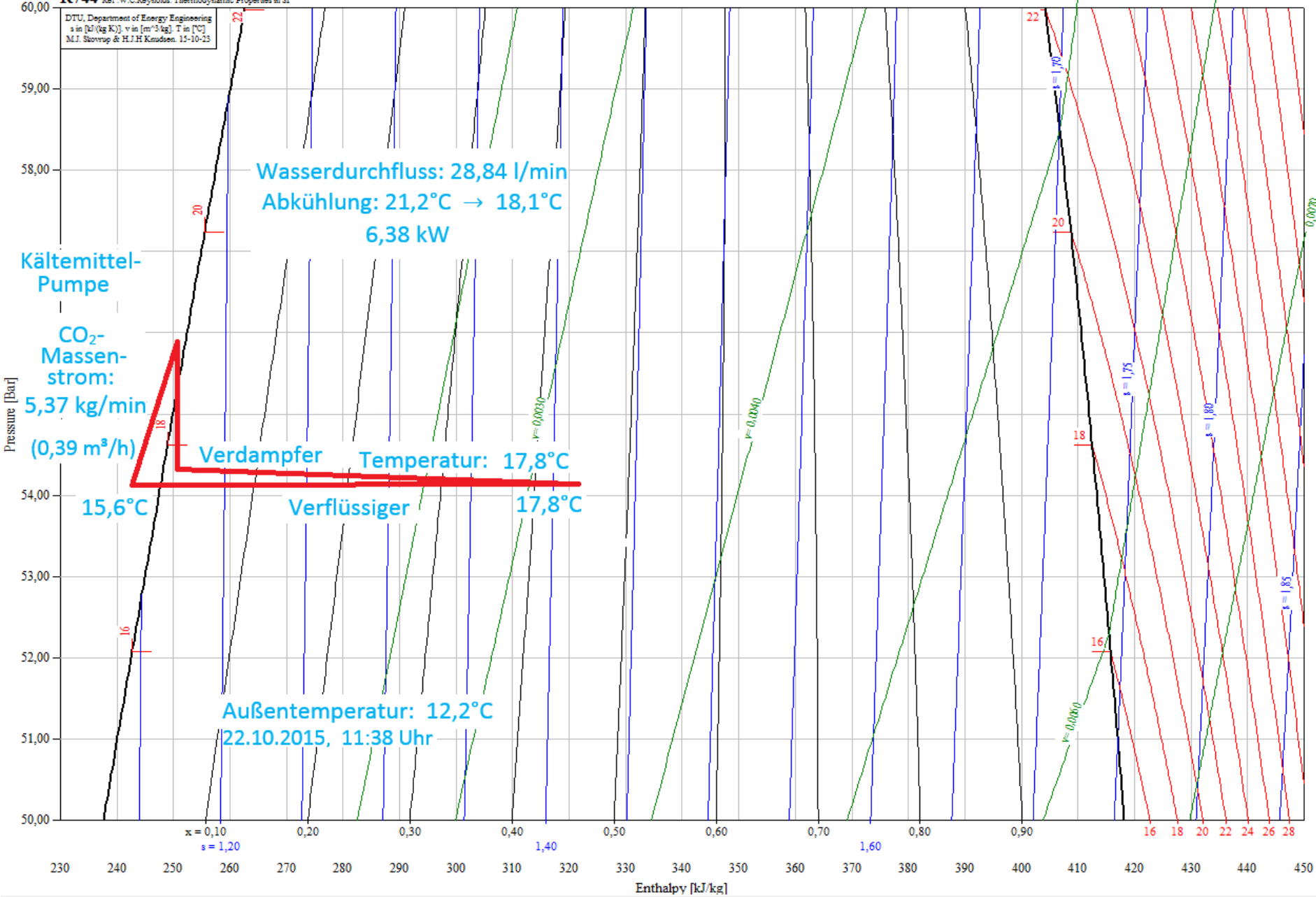
Wasser-Temperier-Gerät

DTU, Department of Energy Engineering  
 s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
 M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen: 15-10-23

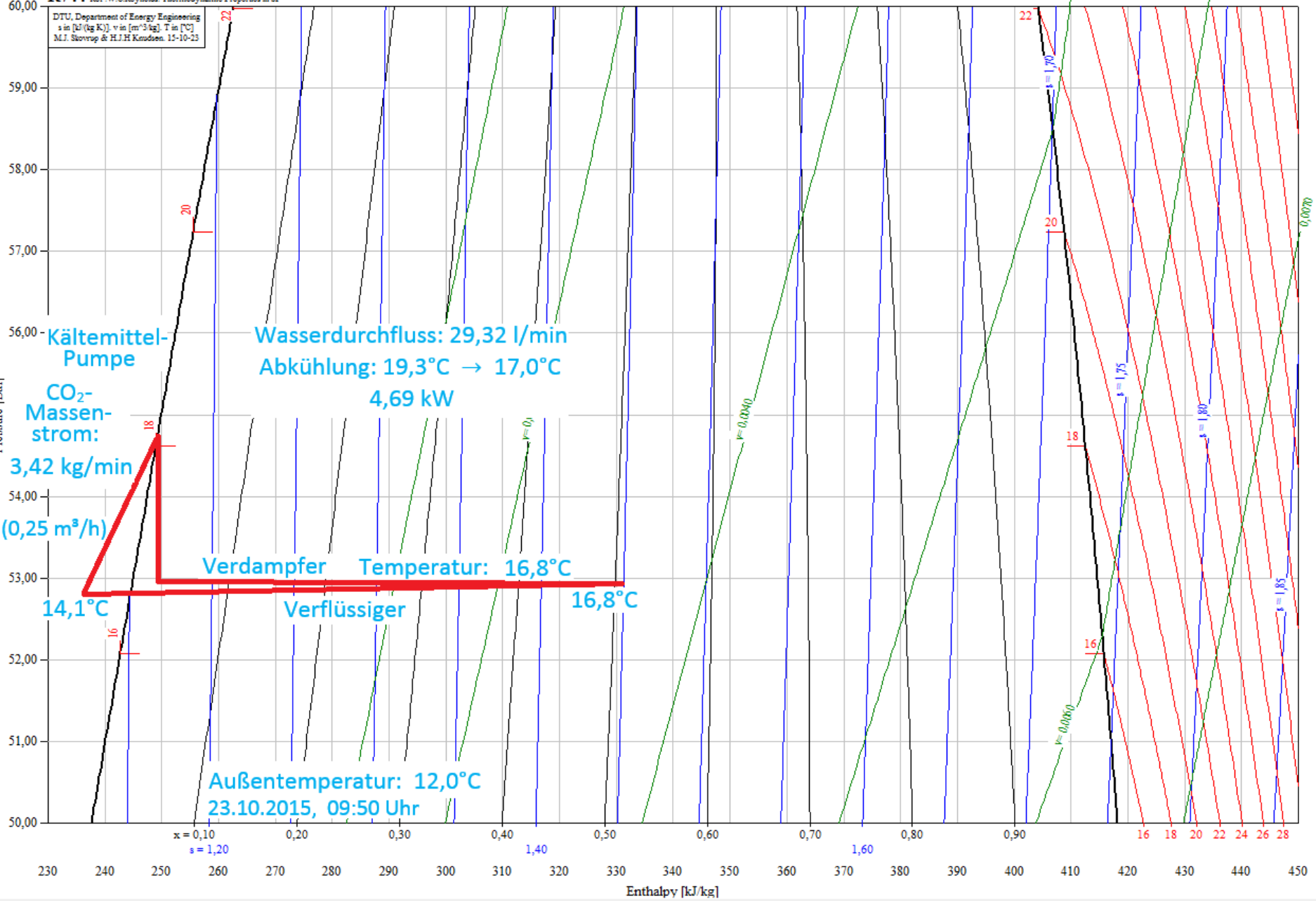
Pressure [Bar]



DTU, Department of Energy Engineering  
 s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]  
 M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 15-10-23



DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 15-10-13



Kältemittel-Pumpe

CO<sub>2</sub>-Massenstrom:  
3,42 kg/min  
(0,25 m<sup>3</sup>/h)

Wasserdurchfluss: 29,32 l/min  
Abkühlung: 19,3°C → 17,0°C  
4,69 kW

Verdampfer Temperatur: 16,8°C

Verflüssiger

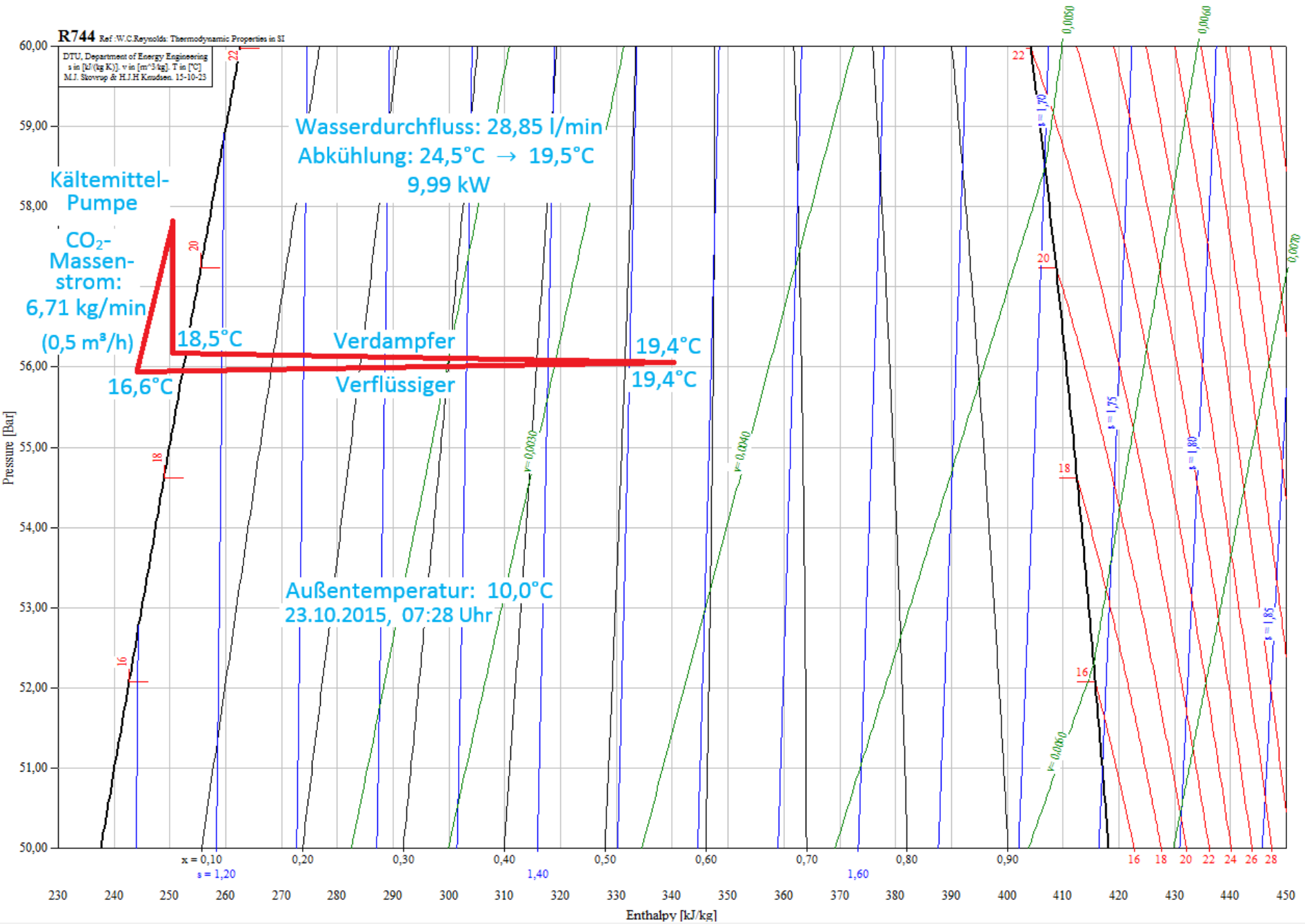
Außentemperatur: 12,0°C  
23.10.2015, 09:50 Uhr

Enthalpy [kJ/kg]



R744 Ref. W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m<sup>3</sup>/kg], T in [°C]  
M.J. Stovrup & H.J.H. Knudsen, 15-10-23



Wasserdurchfluss: 28,85 l/min  
Abkühlung: 24,5°C → 19,5°C  
9,99 kW

Kältemittel-Pumpe  
CO<sub>2</sub>-  
Massenstrom:  
6,71 kg/min  
(0,5 m<sup>3</sup>/h)

Verdampfer  
Verflüssiger

Außentemperatur: 10,0°C  
23.10.2015, 07:28 Uhr

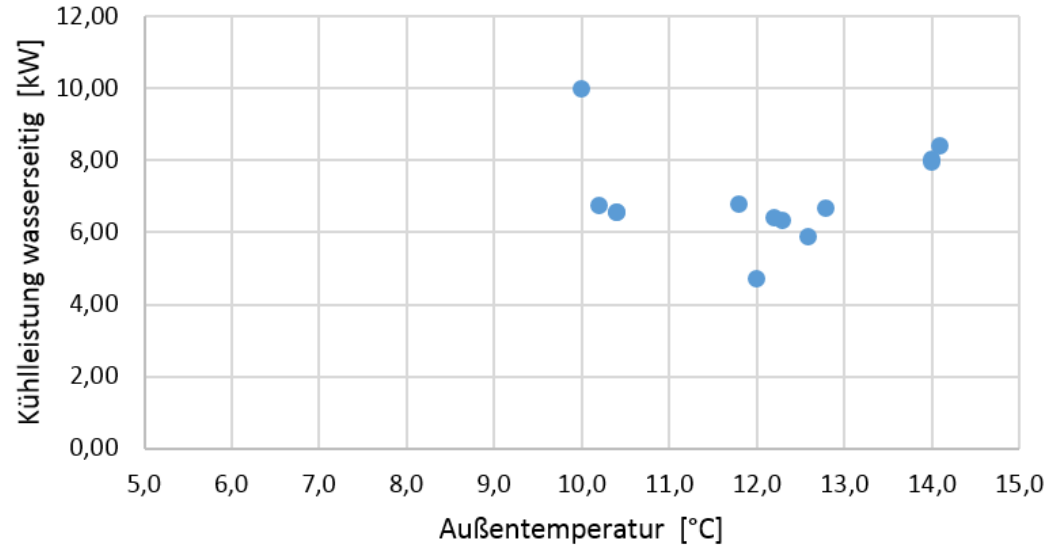
x = 0,10  
s = 1,20

1,40

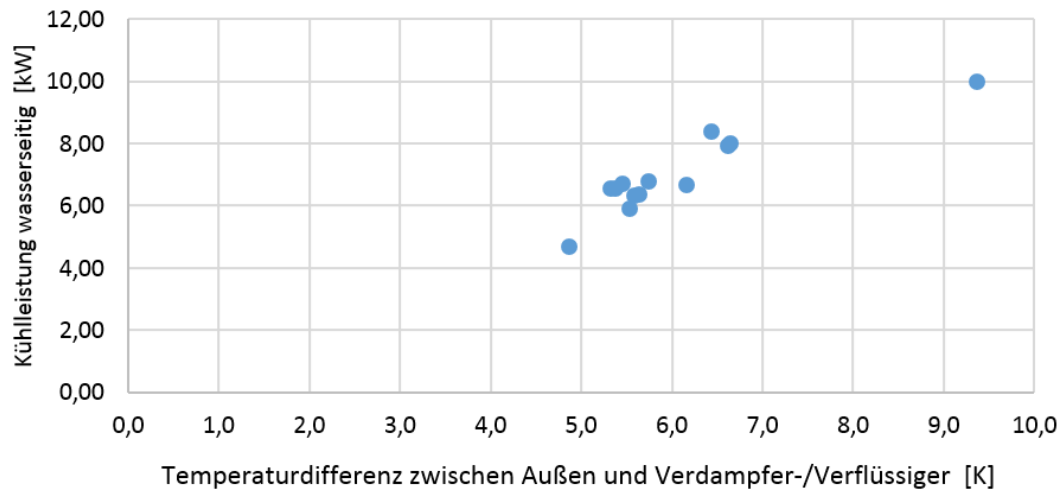
1,60

0,0050  
0,0060  
0,0070  
0,0080  
0,0090  
0,0100  
0,0110  
0,0120  
0,0130  
0,0140  
0,0150  
0,0160  
0,0170  
0,0180  
0,0190  
0,0200  
0,0210  
0,0220  
0,0230  
0,0240  
0,0250  
0,0260  
0,0270  
0,0280  
0,0290  
0,0300  
0,0310  
0,0320  
0,0330  
0,0340  
0,0350  
0,0360  
0,0370  
0,0380  
0,0390  
0,0400  
0,0410  
0,0420  
0,0430  
0,0440  
0,0450  
0,0460  
0,0470  
0,0480  
0,0490  
0,0500  
0,0510  
0,0520  
0,0530  
0,0540  
0,0550  
0,0560  
0,0570  
0,0580  
0,0590  
0,0600  
0,0610  
0,0620  
0,0630  
0,0640  
0,0650  
0,0660  
0,0670  
0,0680  
0,0690  
0,0700  
0,0710  
0,0720  
0,0730  
0,0740  
0,0750  
0,0760  
0,0770  
0,0780  
0,0790  
0,0800  
0,0810  
0,0820  
0,0830  
0,0840  
0,0850  
0,0860  
0,0870  
0,0880  
0,0890  
0,0900  
0,0910  
0,0920  
0,0930  
0,0940  
0,0950  
0,0960  
0,0970  
0,0980  
0,0990  
0,1000  
0,1010  
0,1020  
0,1030  
0,1040  
0,1050  
0,1060  
0,1070  
0,1080  
0,1090  
0,1100  
0,1110  
0,1120  
0,1130  
0,1140  
0,1150  
0,1160  
0,1170  
0,1180  
0,1190  
0,1200  
0,1210  
0,1220  
0,1230  
0,1240  
0,1250  
0,1260  
0,1270  
0,1280  
0,1290  
0,1300  
0,1310  
0,1320  
0,1330  
0,1340  
0,1350  
0,1360  
0,1370  
0,1380  
0,1390  
0,1400  
0,1410  
0,1420  
0,1430  
0,1440  
0,1450  
0,1460  
0,1470  
0,1480  
0,1490  
0,1500  
0,1510  
0,1520  
0,1530  
0,1540  
0,1550  
0,1560  
0,1570  
0,1580  
0,1590  
0,1600  
0,1610  
0,1620  
0,1630  
0,1640  
0,1650  
0,1660  
0,1670  
0,1680  
0,1690  
0,1700  
0,1710  
0,1720  
0,1730  
0,1740  
0,1750  
0,1760  
0,1770  
0,1780  
0,1790  
0,1800  
0,1810  
0,1820  
0,1830  
0,1840  
0,1850  
0,1860  
0,1870  
0,1880  
0,1890  
0,1900  
0,1910  
0,1920  
0,1930  
0,1940  
0,1950  
0,1960  
0,1970  
0,1980  
0,1990  
0,2000  
0,2010  
0,2020  
0,2030  
0,2040  
0,2050  
0,2060  
0,2070  
0,2080  
0,2090  
0,2100  
0,2110  
0,2120  
0,2130  
0,2140  
0,2150  
0,2160  
0,2170  
0,2180  
0,2190  
0,2200  
0,2210  
0,2220  
0,2230  
0,2240  
0,2250  
0,2260  
0,2270  
0,2280  
0,2290  
0,2300  
0,2310  
0,2320  
0,2330  
0,2340  
0,2350  
0,2360  
0,2370  
0,2380  
0,2390  
0,2400  
0,2410  
0,2420  
0,2430  
0,2440  
0,2450  
0,2460  
0,2470  
0,2480  
0,2490  
0,2500  
0,2510  
0,2520  
0,2530  
0,2540  
0,2550  
0,2560  
0,2570  
0,2580  
0,2590  
0,2600  
0,2610  
0,2620  
0,2630  
0,2640  
0,2650  
0,2660  
0,2670  
0,2680  
0,2690  
0,2700  
0,2710  
0,2720  
0,2730  
0,2740  
0,2750  
0,2760  
0,2770  
0,2780  
0,2790  
0,2800  
0,2810  
0,2820  
0,2830  
0,2840  
0,2850  
0,2860  
0,2870  
0,2880  
0,2890  
0,2900  
0,2910  
0,2920  
0,2930  
0,2940  
0,2950  
0,2960  
0,2970  
0,2980  
0,2990  
0,3000  
0,3010  
0,3020  
0,3030  
0,3040  
0,3050  
0,3060  
0,3070  
0,3080  
0,3090  
0,3100  
0,3110  
0,3120  
0,3130  
0,3140  
0,3150  
0,3160  
0,3170  
0,3180  
0,3190  
0,3200  
0,3210  
0,3220  
0,3230  
0,3240  
0,3250  
0,3260  
0,3270  
0,3280  
0,3290  
0,3300  
0,3310  
0,3320  
0,3330  
0,3340  
0,3350  
0,3360  
0,3370  
0,3380  
0,3390  
0,3400  
0,3410  
0,3420  
0,3430  
0,3440  
0,3450  
0,3460  
0,3470  
0,3480  
0,3490  
0,3500  
0,3510  
0,3520  
0,3530  
0,3540  
0,3550  
0,3560  
0,3570  
0,3580  
0,3590  
0,3600  
0,3610  
0,3620  
0,3630  
0,3640  
0,3650  
0,3660  
0,3670  
0,3680  
0,3690  
0,3700  
0,3710  
0,3720  
0,3730  
0,3740  
0,3750  
0,3760  
0,3770  
0,3780  
0,3790  
0,3800  
0,3810  
0,3820  
0,3830  
0,3840  
0,3850  
0,3860  
0,3870  
0,3880  
0,3890  
0,3900  
0,3910  
0,3920  
0,3930  
0,3940  
0,3950  
0,3960  
0,3970  
0,3980  
0,3990  
0,4000  
0,4010  
0,4020  
0,4030  
0,4040  
0,4050  
0,4060  
0,4070  
0,4080  
0,4090  
0,4100  
0,4110  
0,4120  
0,4130  
0,4140  
0,4150  
0,4160  
0,4170  
0,4180  
0,4190  
0,4200  
0,4210  
0,4220  
0,4230  
0,4240  
0,4250  
0,4260  
0,4270  
0,4280  
0,4290  
0,4300  
0,4310  
0,4320  
0,4330  
0,4340  
0,4350  
0,4360  
0,4370  
0,4380  
0,4390  
0,4400  
0,4410  
0,4420  
0,4430  
0,4440  
0,4450  
0,4460  
0,4470  
0,4480  
0,4490  
0,4500

### Kühlleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur



### Kühlleistung in Abhängigkeit von der Differenz Nutztemperatur - Außentemperatur



# Hermetische Kältemittelpumpe

## HRP 3232

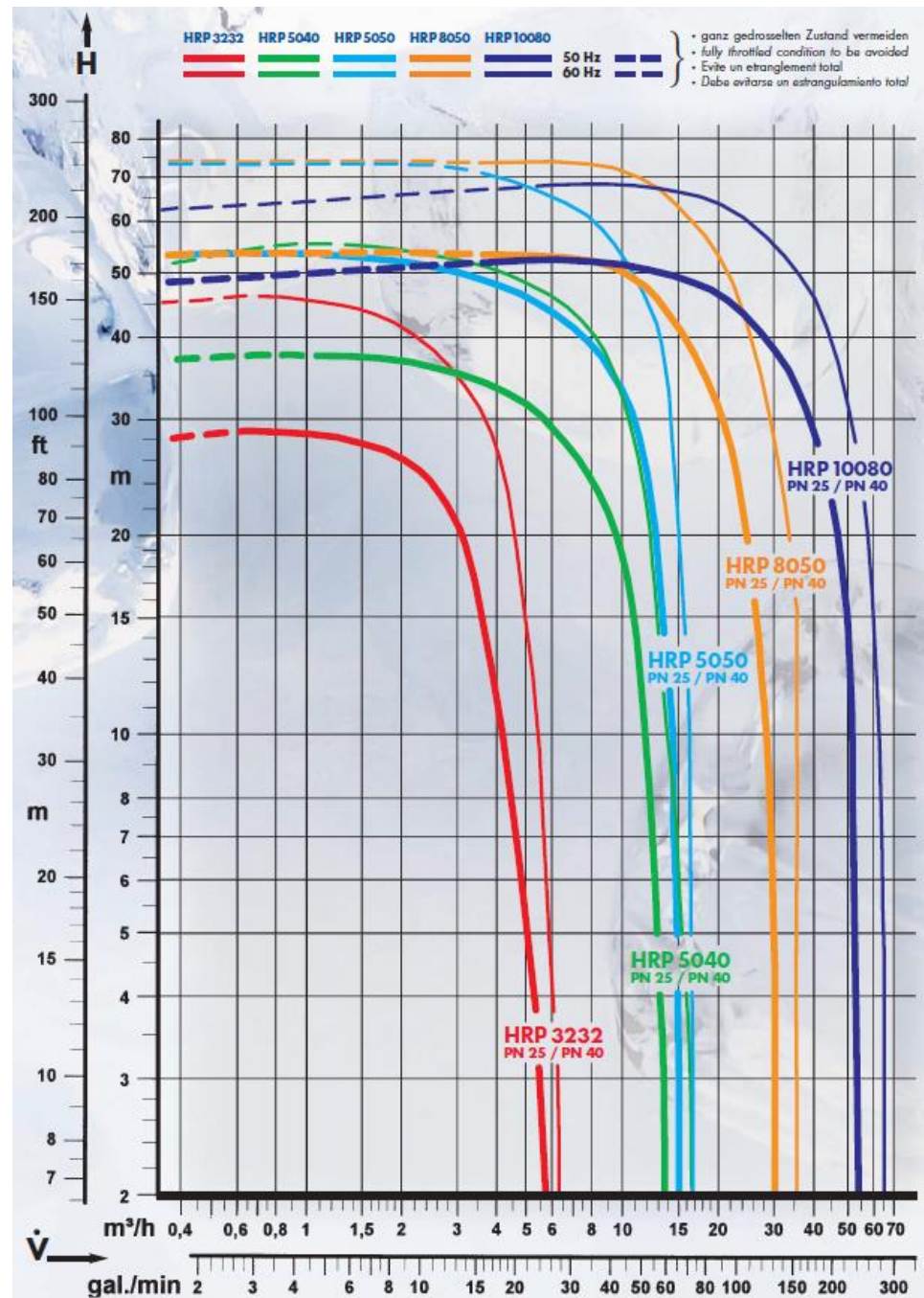
Mod.GF für CO2 - 65 bar

(Fabrikat: TH. WITT

Kältemaschinenfabrik GmbH)



Nennleistung ca. 1 kW<sub>el</sub>

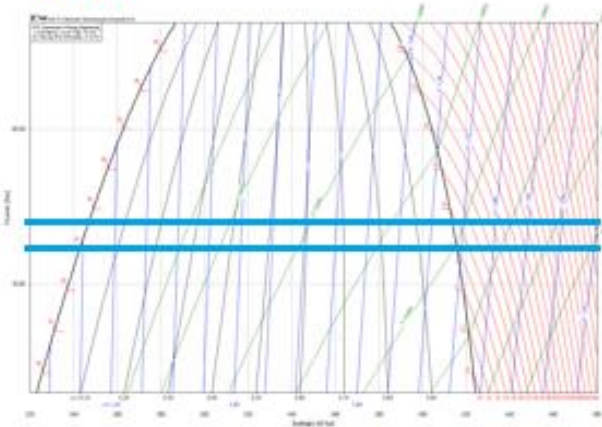


# Förderhöhe Kältemittel-Pumpe

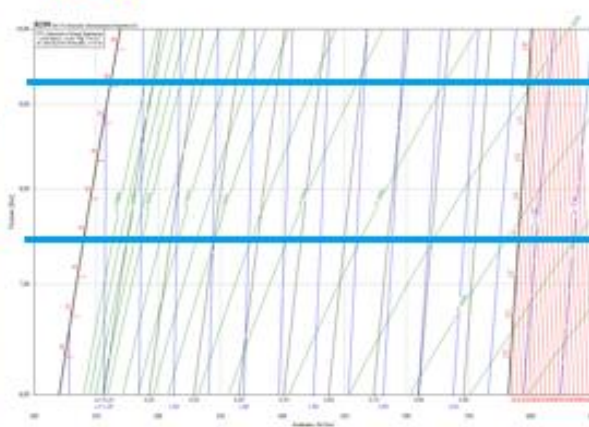
Ausschnitt aus den Igp,h-Diagrammen

jeweils im Bereich der Sättigungstemperatur  $t_s$  von ca. 10°C bis 26°C

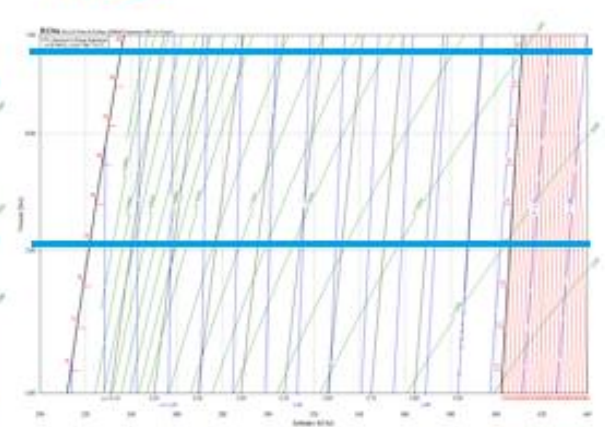
R744



R290



R134a

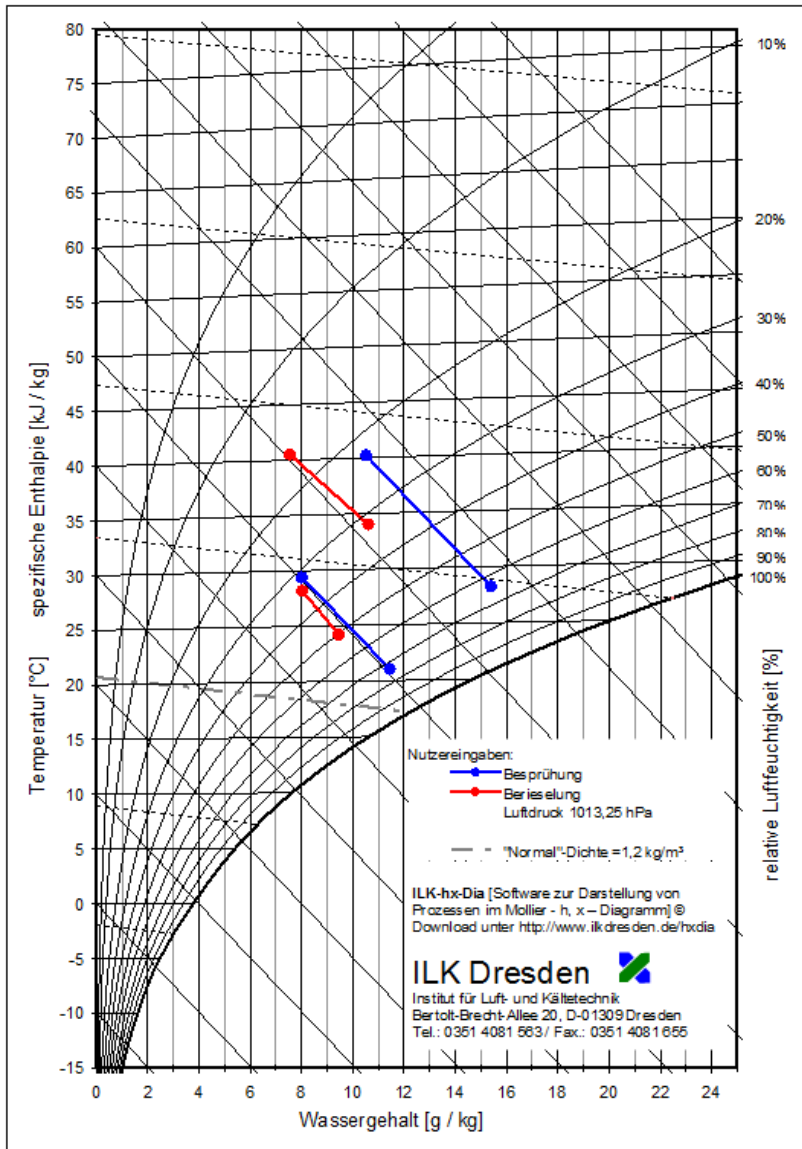


$$\Delta p = 1,8 \text{ bar} \rightarrow \Delta T_s \approx 1,4 \text{ K}$$

$$\Delta p = 1,8 \text{ bar} \rightarrow \Delta T_s \approx 8,1 \text{ K}$$

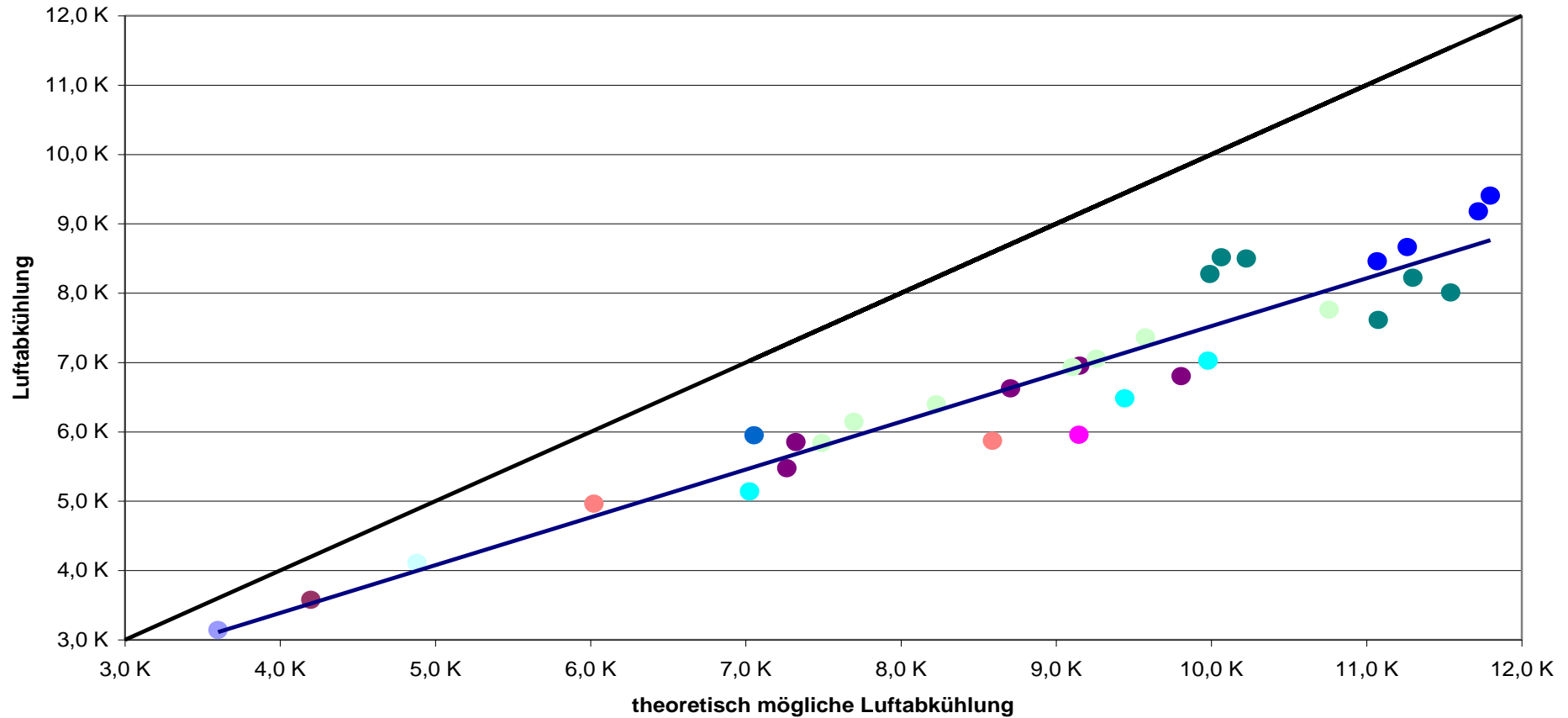
$$\Delta p = 1,8 \text{ bar} \rightarrow \Delta T_s \approx 9,9 \text{ K}$$

# Vorkühlsatz (adiabate Befeuchtung)



# Vorkühlsatz (adiabate Befeuchtung)

Luftabkühlung in Abhängigkeit des Luft Eintrittszustandes



— 100% gemessene Luftabkühlung bei 18°C 19°C 20°C 22°C 23°C 24°C 25°C 26°C 27°C 28°C 29°C

Temperatur [°C]	rel. Feuchte [%]	theor. erreichb. Feuchtkugel [°C]		prakt. erreichb. Abkühlung [°C]
25	40	16	→	18 ... 19
20	40	12,5	→	14 ... 15



## Zusammenfassung

- Kältemittelzirkulation mittels Pumpe,  
(Thermosyphon-Prinzip: weniger praktikabel)
- Auswahl Kältemittel: CO<sub>2</sub>
- Herstellung eines Funktionsmusters
- Erfolgreicher Test: Funktionsnachweis; Messergebnisse
- Möglichkeit zur Erweiterung des Einsatzbereiches:  
Vorkühlsatz mit adiabater Befeuchtung



# Vielen Dank für Ihr Interesse

Institut für Luft- und Kältetechnik

Gemeinnützige Gesellschaft mbH

Bertolt-Brecht-Allee 20

01309 Dresden

[www.ilkdresden.de](http://www.ilkdresden.de)