



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

Dr.-Ing. Peter Röllig

Tel.: +49 351 / 4081-645

Fax: +49 351 / 4081-605

E-Mail: peter.roellig@ilkdresden.de



**Freie Kühlung mit
Pumpenzirkulation
des Kältemittels CO₂**



- 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

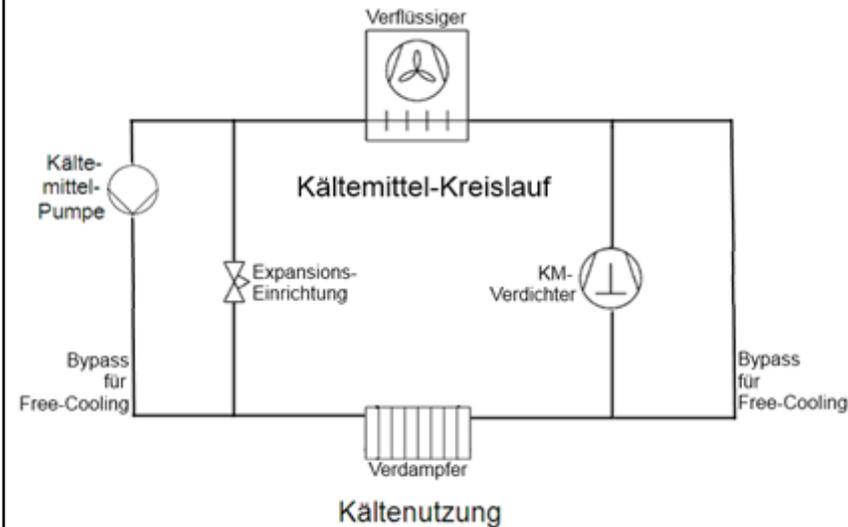
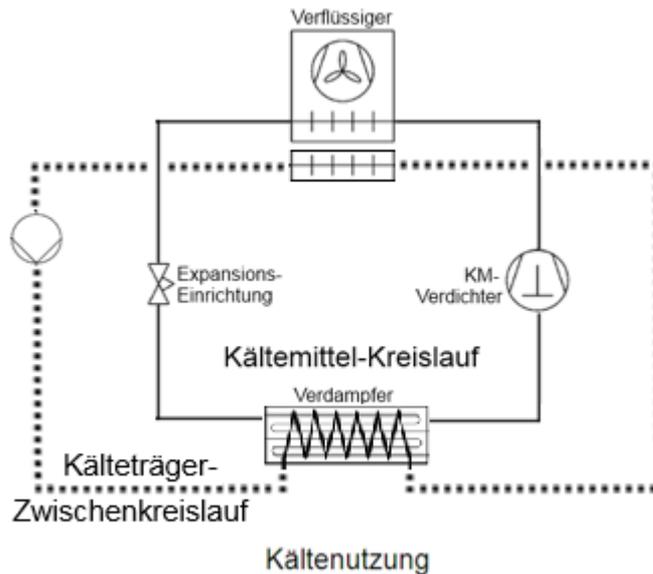
Direkte Freie Kühlung

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)

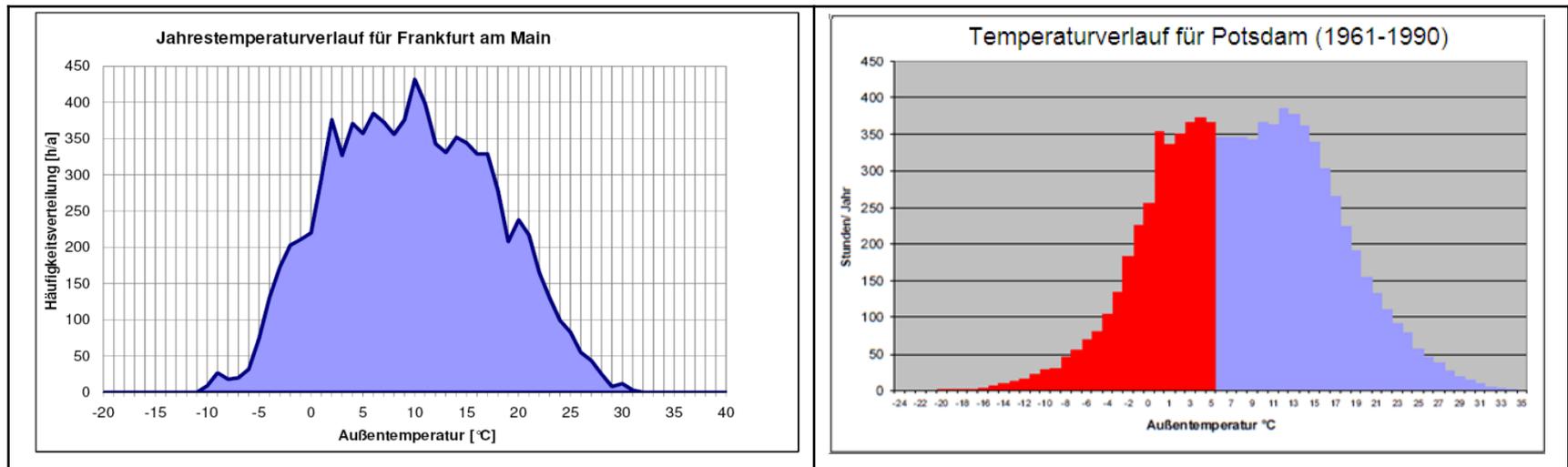


Arten der Freien Kühlung

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

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.

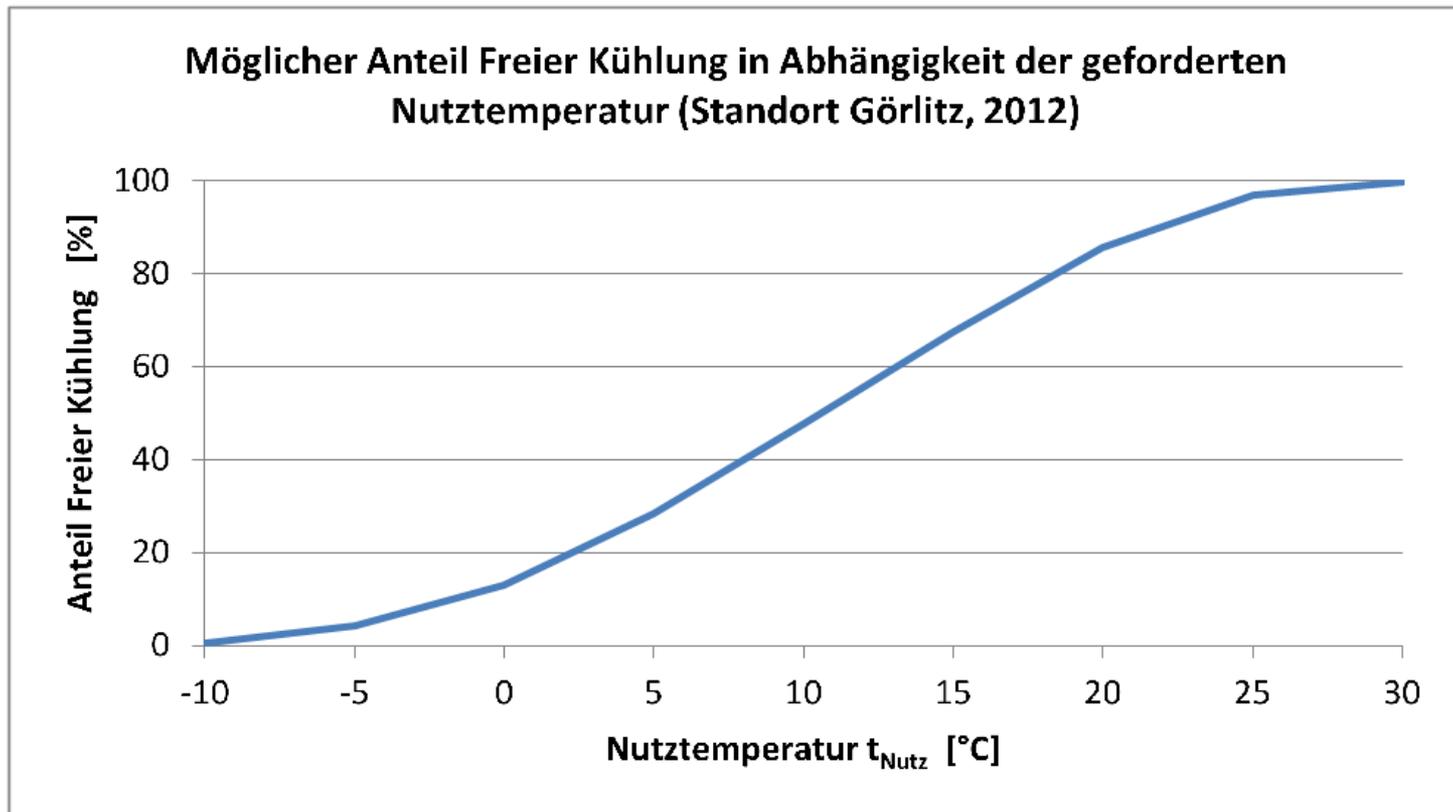


- Jahresdurchschnittstemperatur für Deutschland: statistisch ca. 9 °C
- 40% des Jahres: statistisch unter 5 °C
- Grenztemperatur für Freie Kühlung: oft 5°C

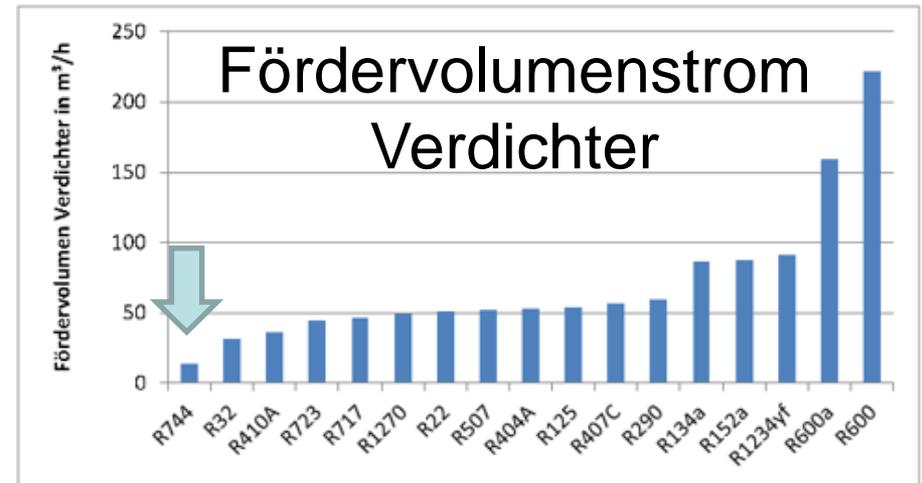
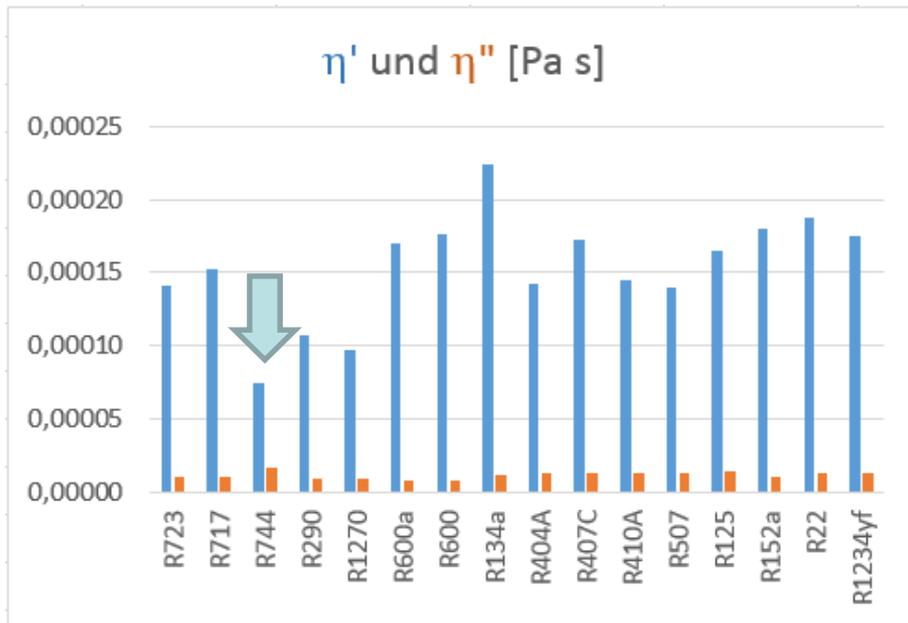
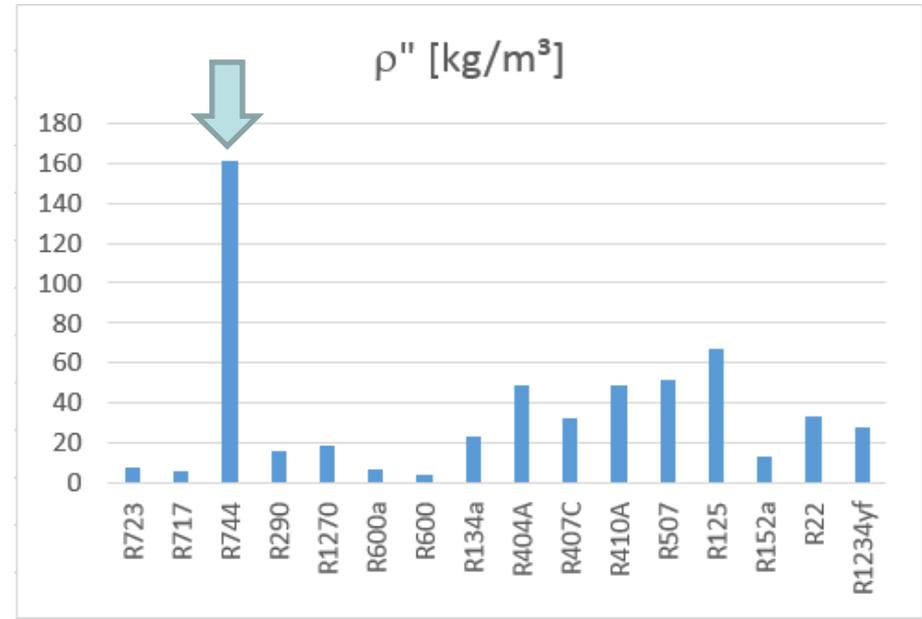
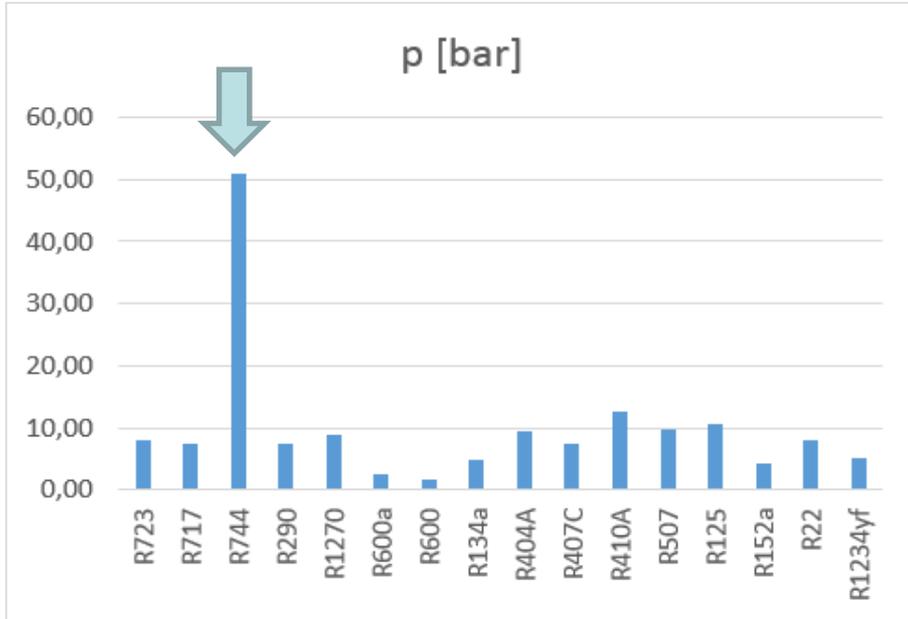
Steigerung des Frei-Kühl-Anteils durch Freie Kühlung mit Kältemittelzirkulation

Im Nutztemperaturbereich von etwa 5 bis 20 °C:

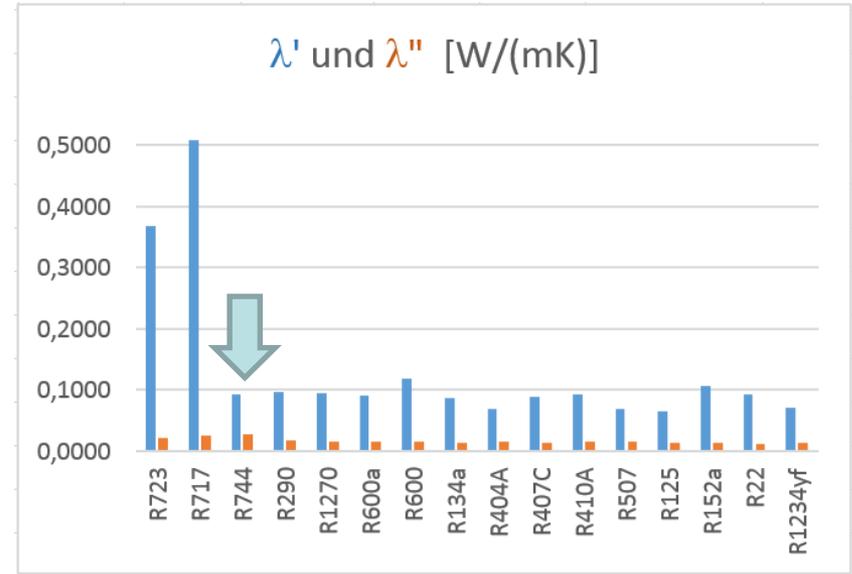
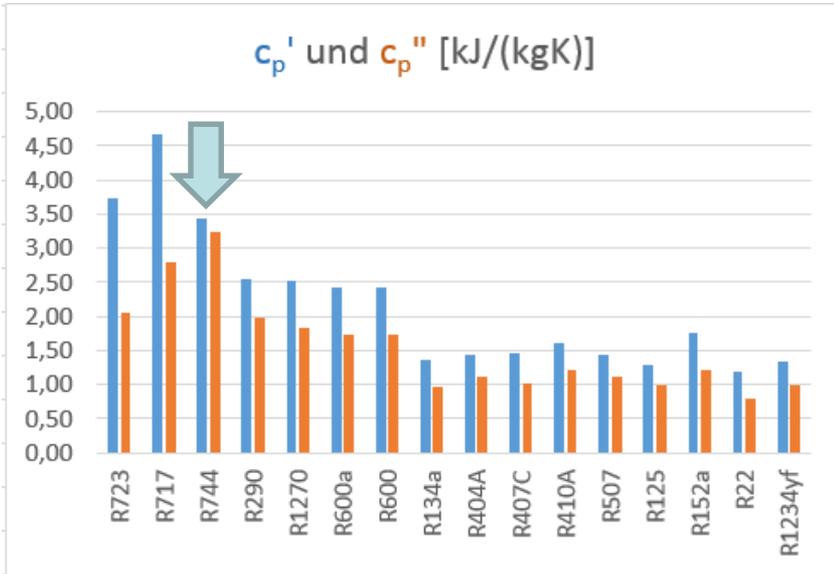
$\Delta T = 5 \text{ K} \rightarrow$ Steigerung des Frei-Kühl-Anteils um ca. 20%



Eigenschaften von Kältemitteln im Vergleich (15°C)



Eigenschaften von Kältemitteln im Vergleich (15°C)

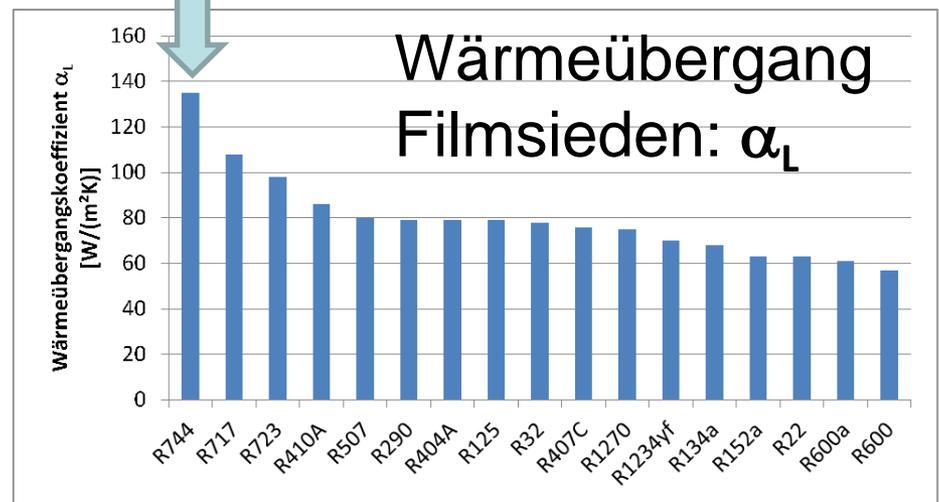


$$\alpha_L = K_f (L \Delta T)^{-1/4} \left[\frac{\lambda_g^3 \rho_g \Delta h \Delta \rho g}{\eta_g} \right]^{1/4} \quad (31)$$

Darin bedeuten:

- L charakteristische Abmessung des Heizelementes ($L=d$ für das horizontale Rohr, $L=H$ für das senkrechte Heizelement),
- λ_g Wärmeleitfähigkeit, ρ_g Dichte, η_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].



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

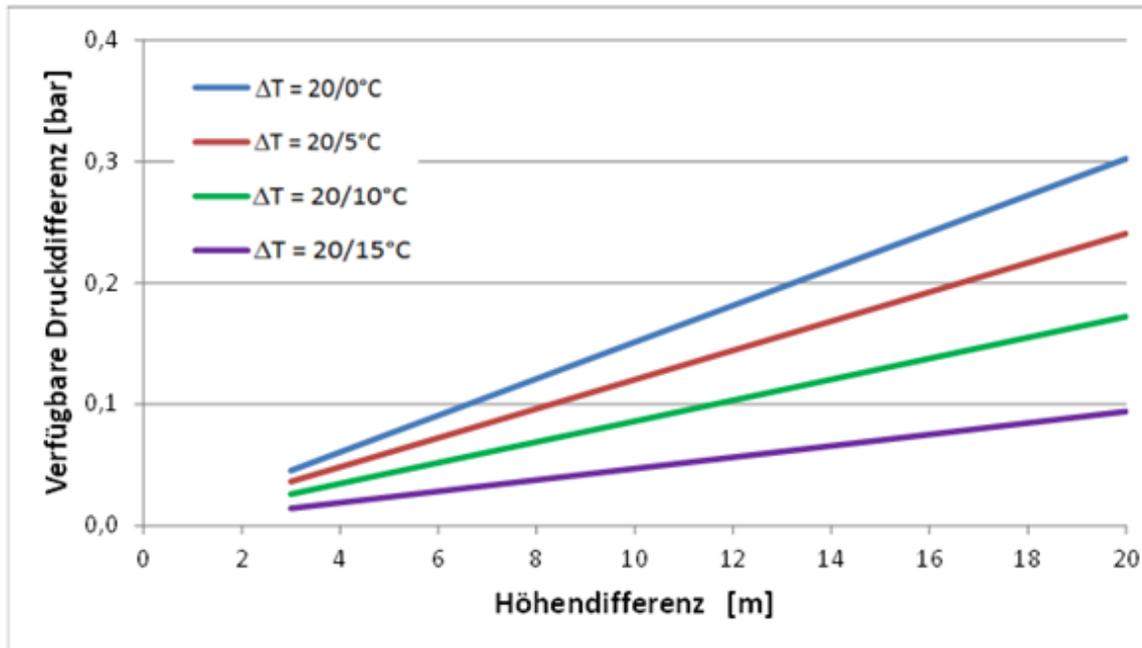
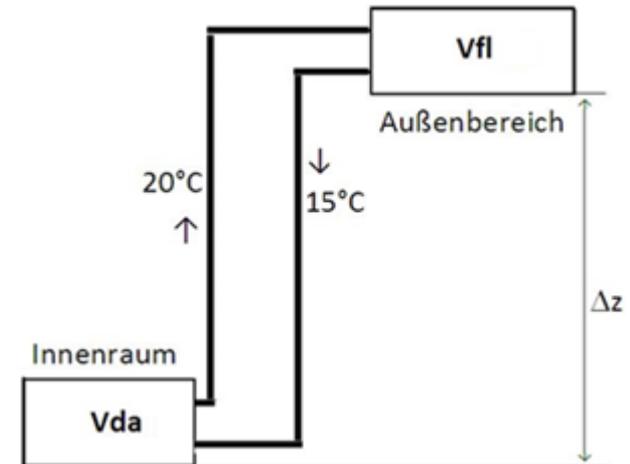
α_S vernachlässigbar \rightarrow $\alpha = \alpha_L$

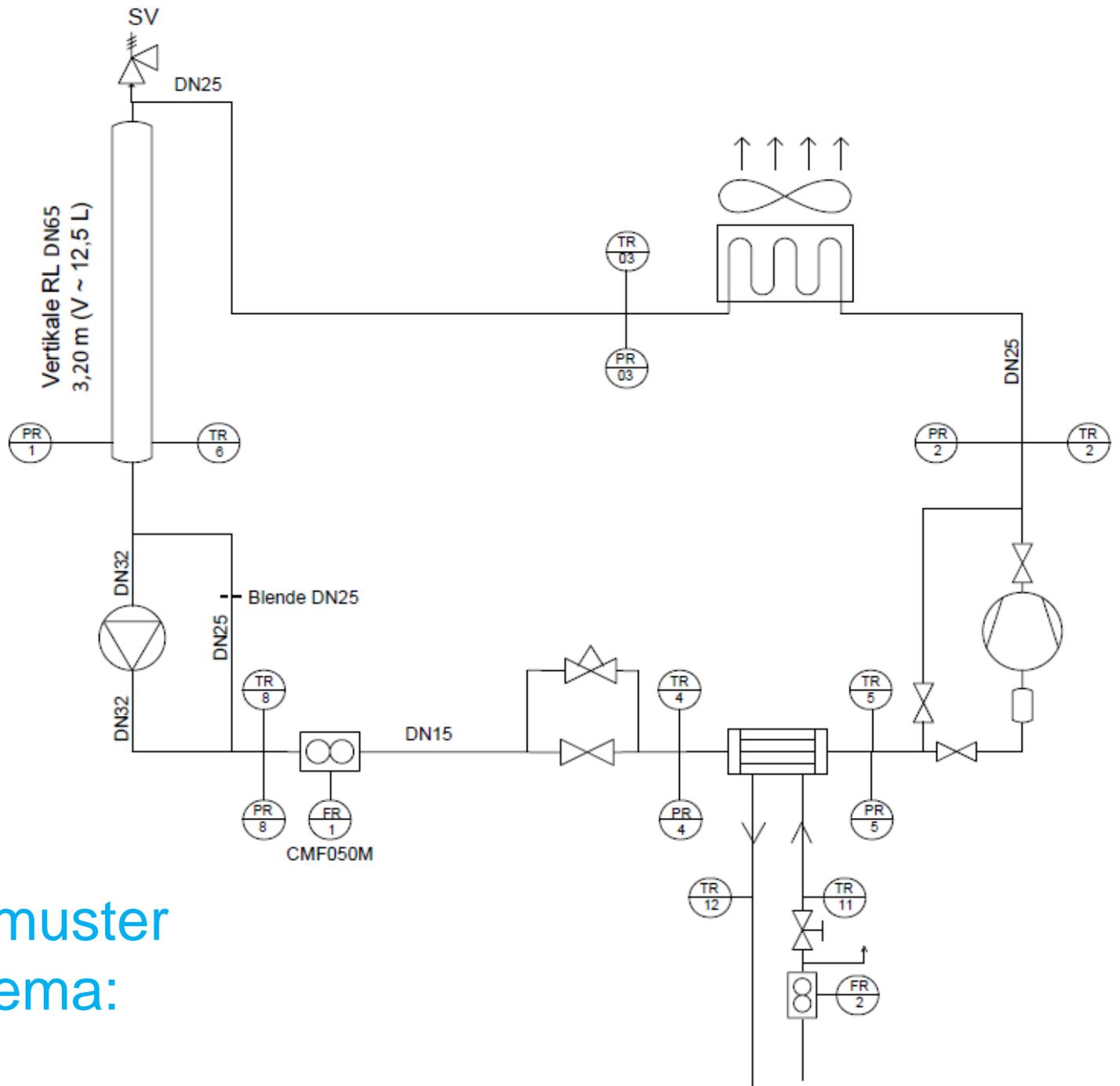
Thermosyphon-Prinzip (Schwerkraft-Zirkulation)

Schwerkraft-Zirkulation

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

	Δp in bar				
Δz [m]	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





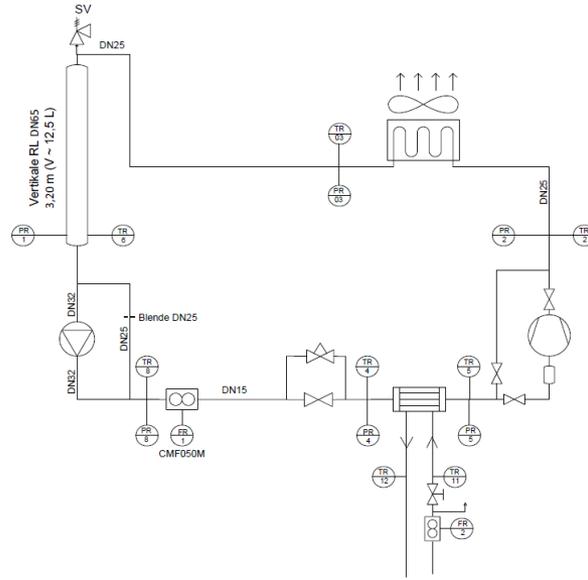
Funktionsmuster
Schaltschema:

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

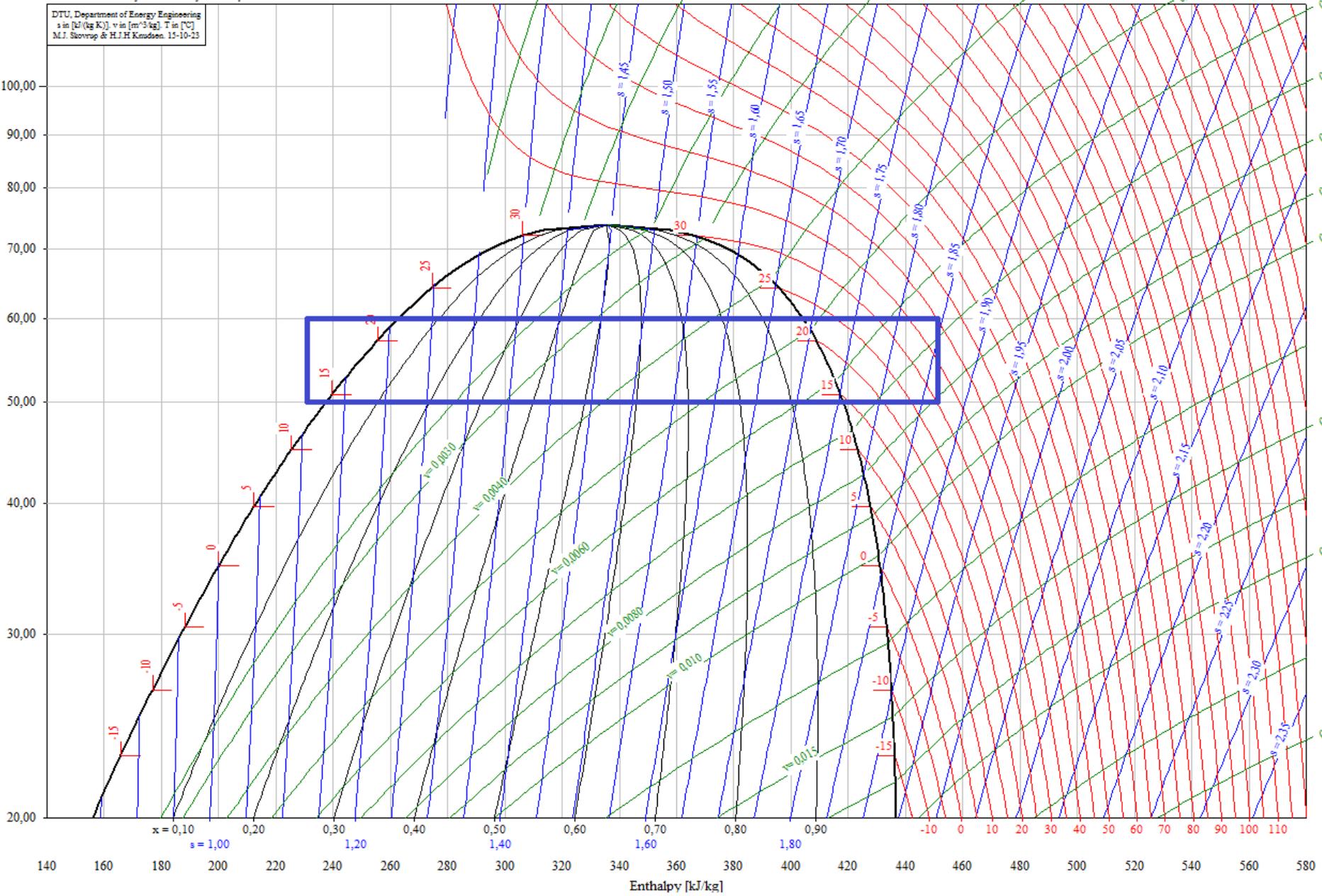


SANYO-Verdichter
(2-stufig) C-CV223H

Wasser-Temperier-Gerät

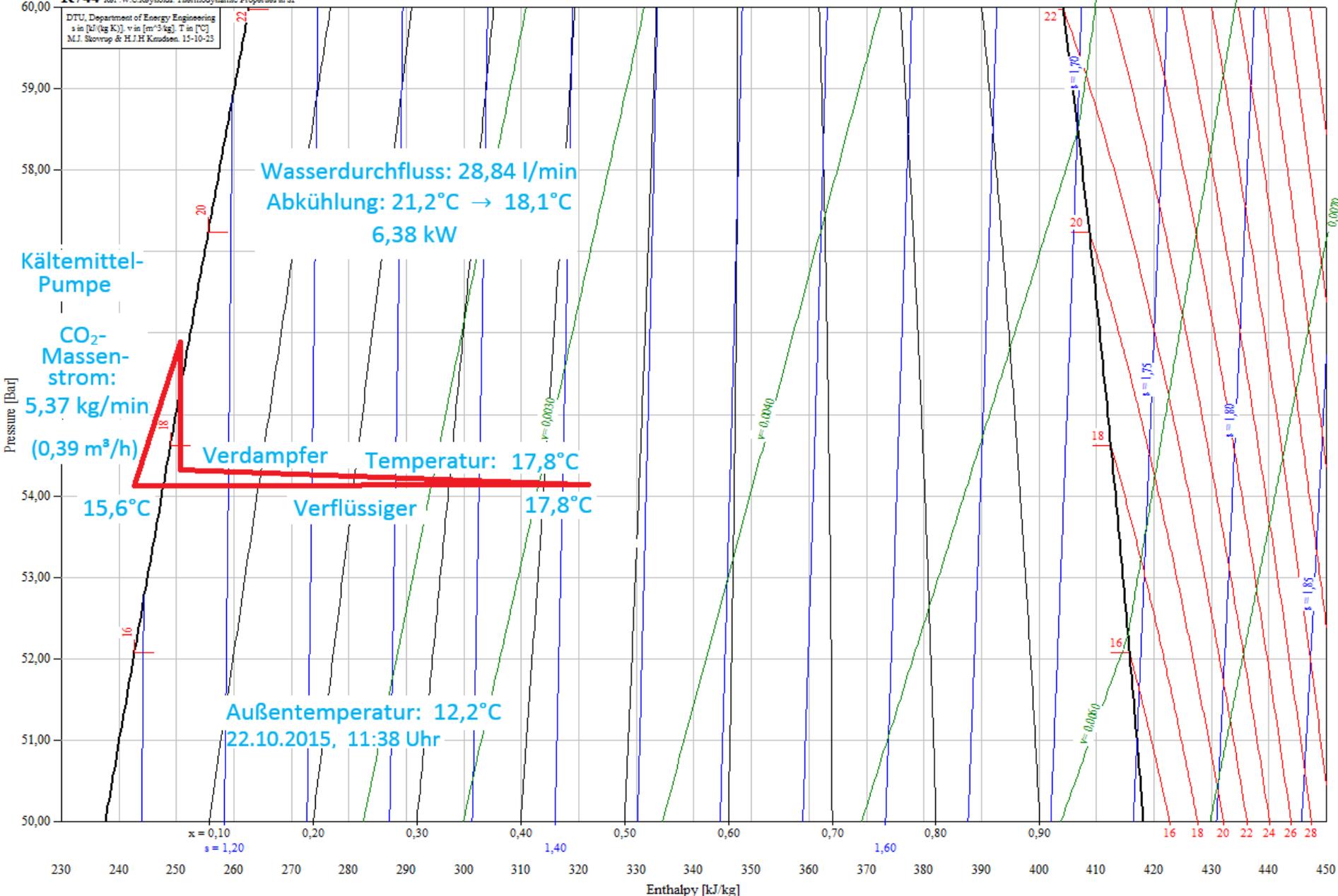
DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
 M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen: 15-10-23

Pressure [Bar]



Enthalpy [kJ/kg]

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



Wasserdurchfluss: 28,84 l/min
Abkühlung: 21,2°C → 18,1°C
6,38 kW

Kältemittel-Pumpe

CO₂-
Massen-
strom:
5,37 kg/min
(0,39 m³/h)

Verdampfer Temperatur: 17,8°C

15,6°C

Verflüssiger

17,8°C

Außentemperatur: 12,2°C

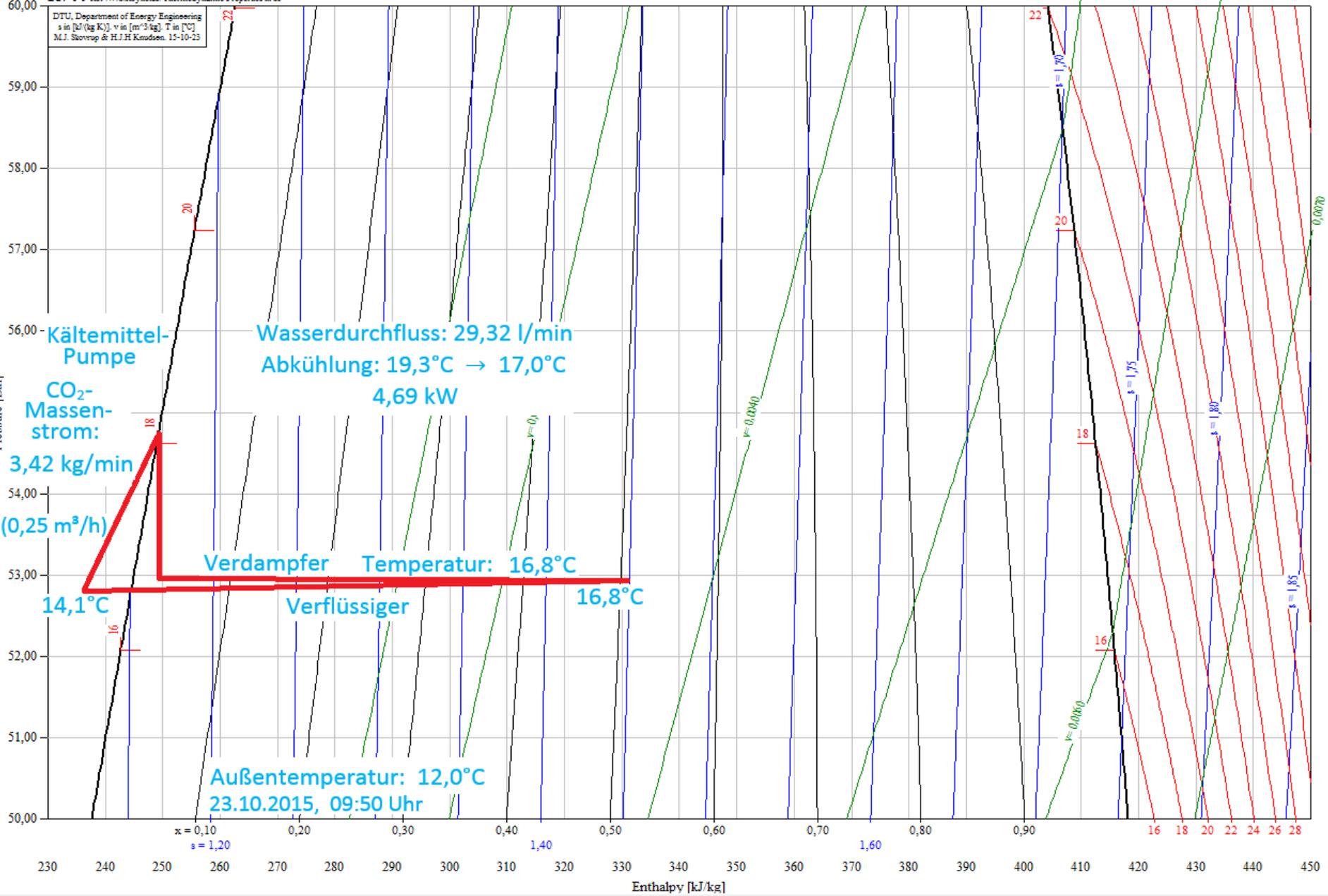
22.10.2015, 11:38 Uhr

x = 0,10
s = 1,20

1,40

1,60

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 15-10-13



Kältemittel-Pumpe
CO₂-Massenstrom:
3,42 kg/min
(0,25 m³/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

x = 0,10
s = 1,20

x = 0,1
s = 1,40

x = 0,160
s = 1,60

x = 0,0080

x = 0,0060

x = 0,0070

22

18

16

20

s = 1,75

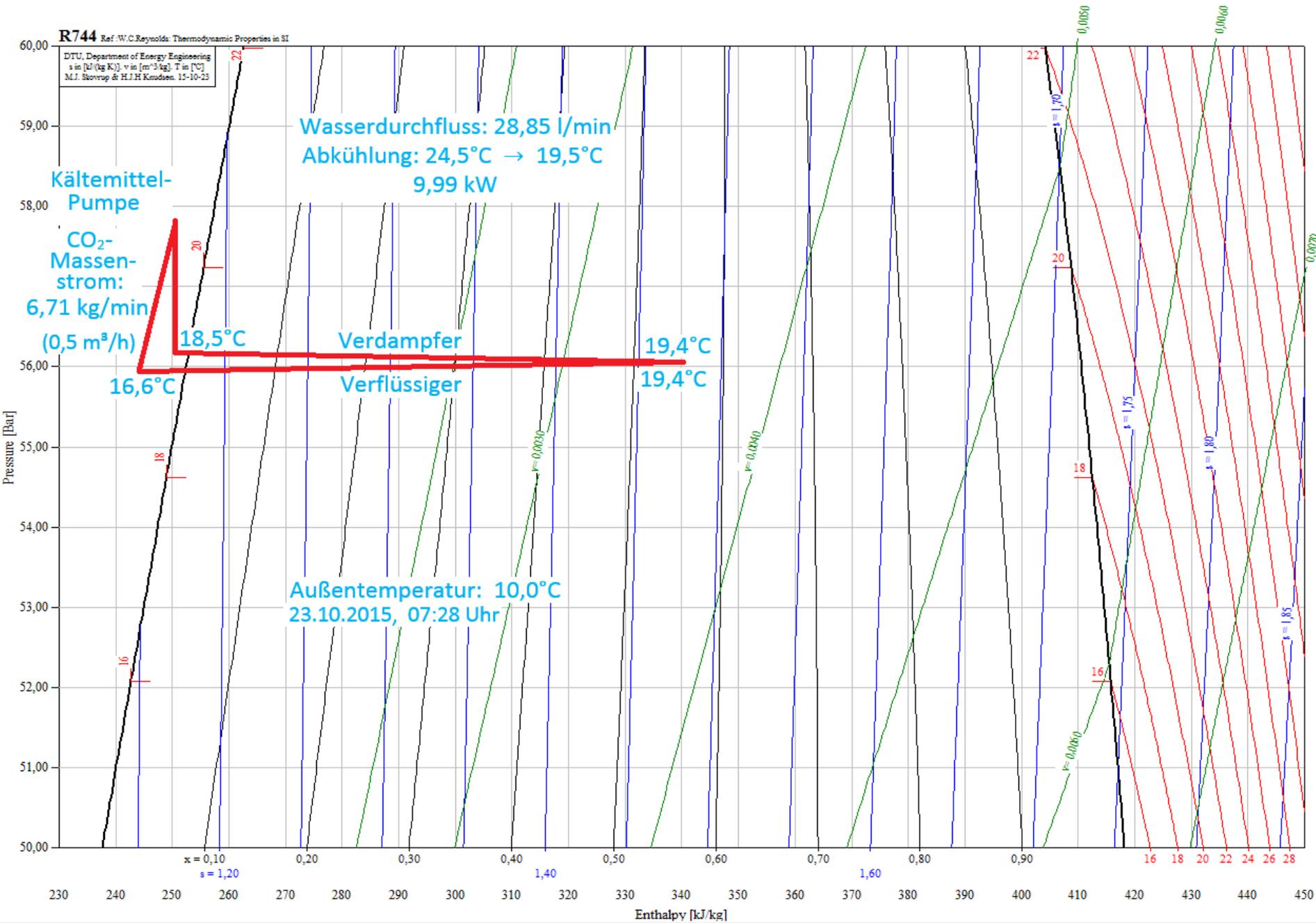
s = 1,80

s = 1,85

s = 1,90

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

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/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
CO₂-
Massenstrom:
6,71 kg/min
(0,5 m³/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

22

20

18

16

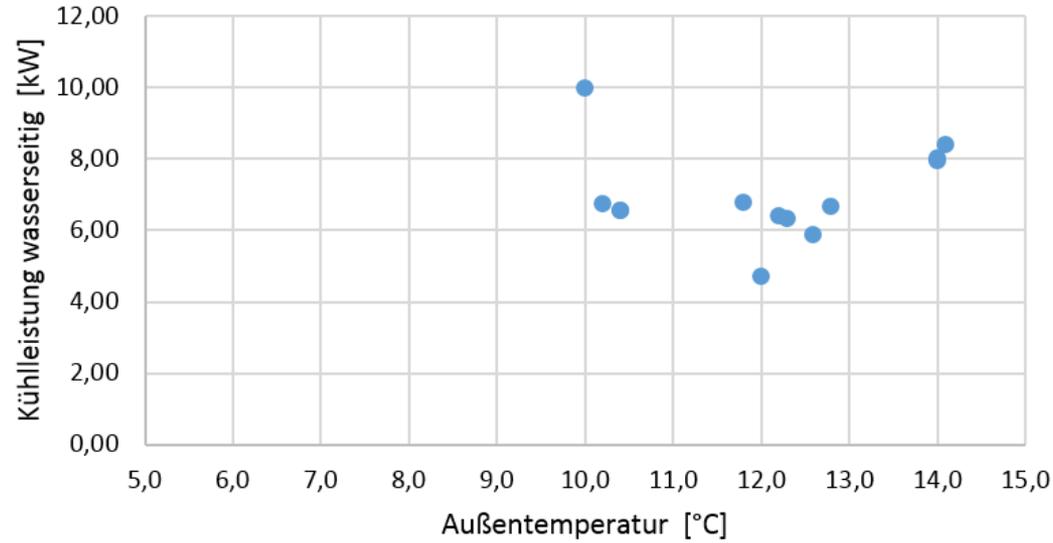
s = 1,70

s = 1,75

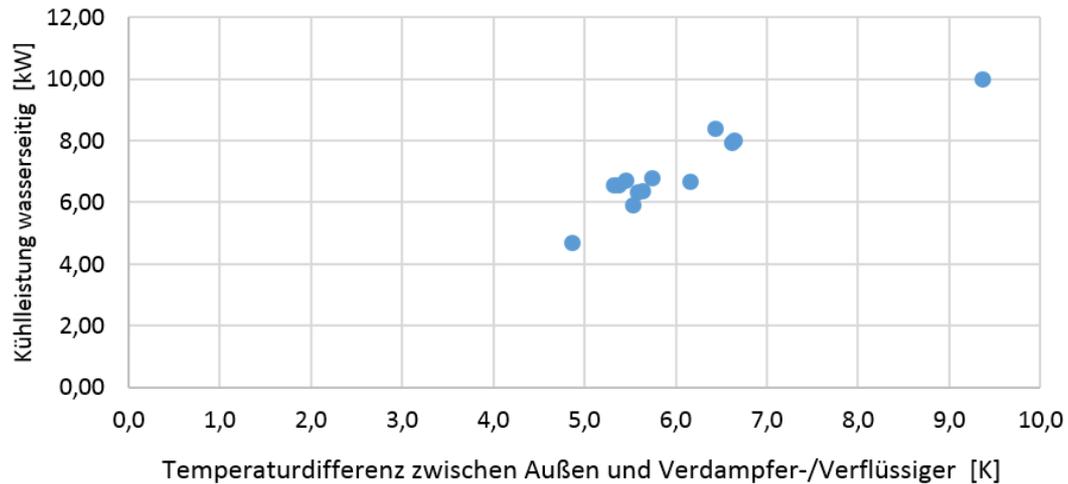
s = 1,80

s = 1,85

Kühlleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur



Kühlleistung in Abhängigkeit von der Differenz Nutzttemperatur - Außentemperatur



Hermetische Kältemittelpumpe

HRP 3232

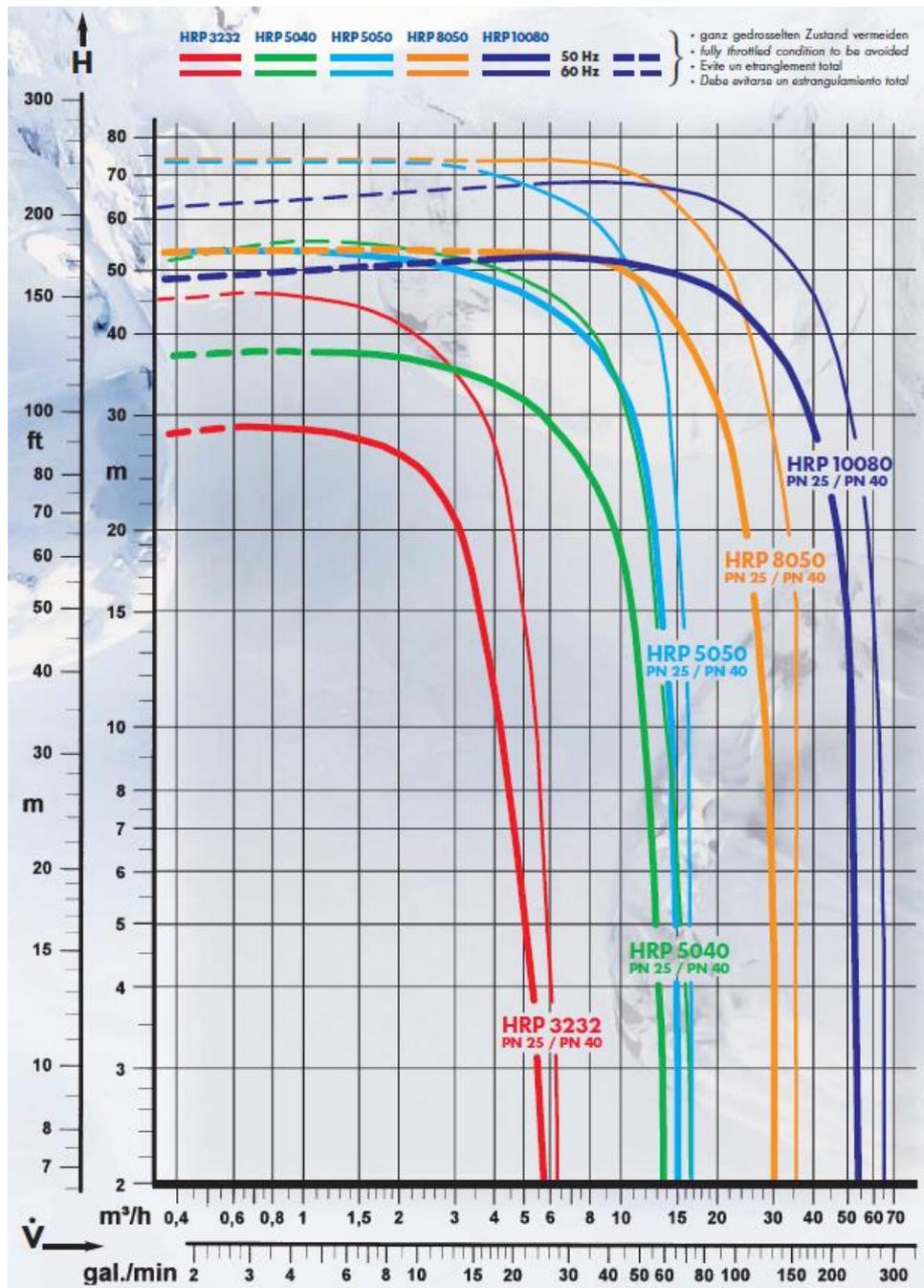
Mod.GF für CO₂ - 65 bar

(Fabrikat: TH. WITT

Kältemaschinenfabrik GmbH)



Nennleistung ca. 1 kW_{el}

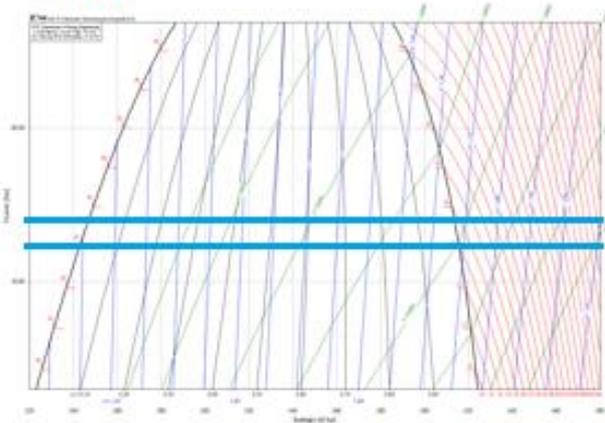


Förderhöhe Kältemittel-Pumpe

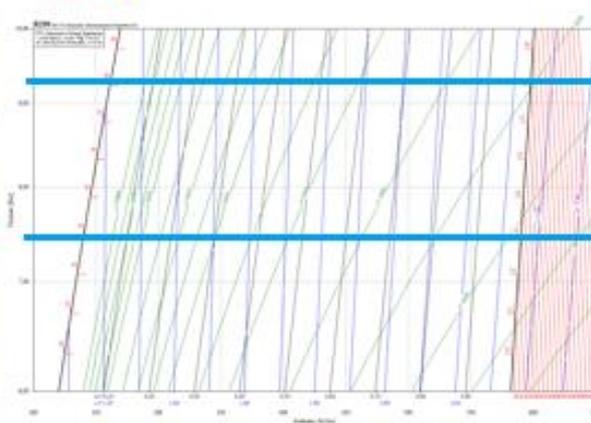
Ausschnitt aus den Igp,h-Diagrammen

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

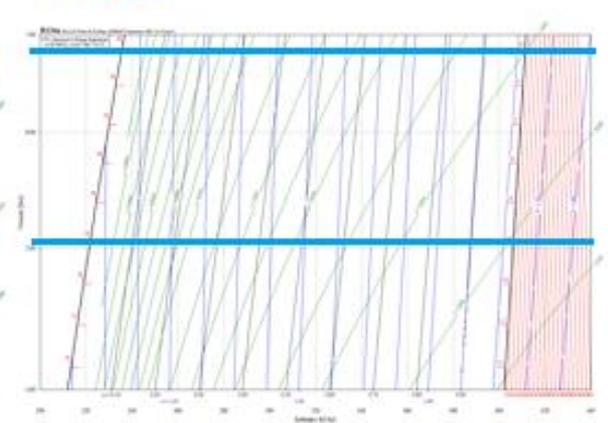
R744



R290



R134a

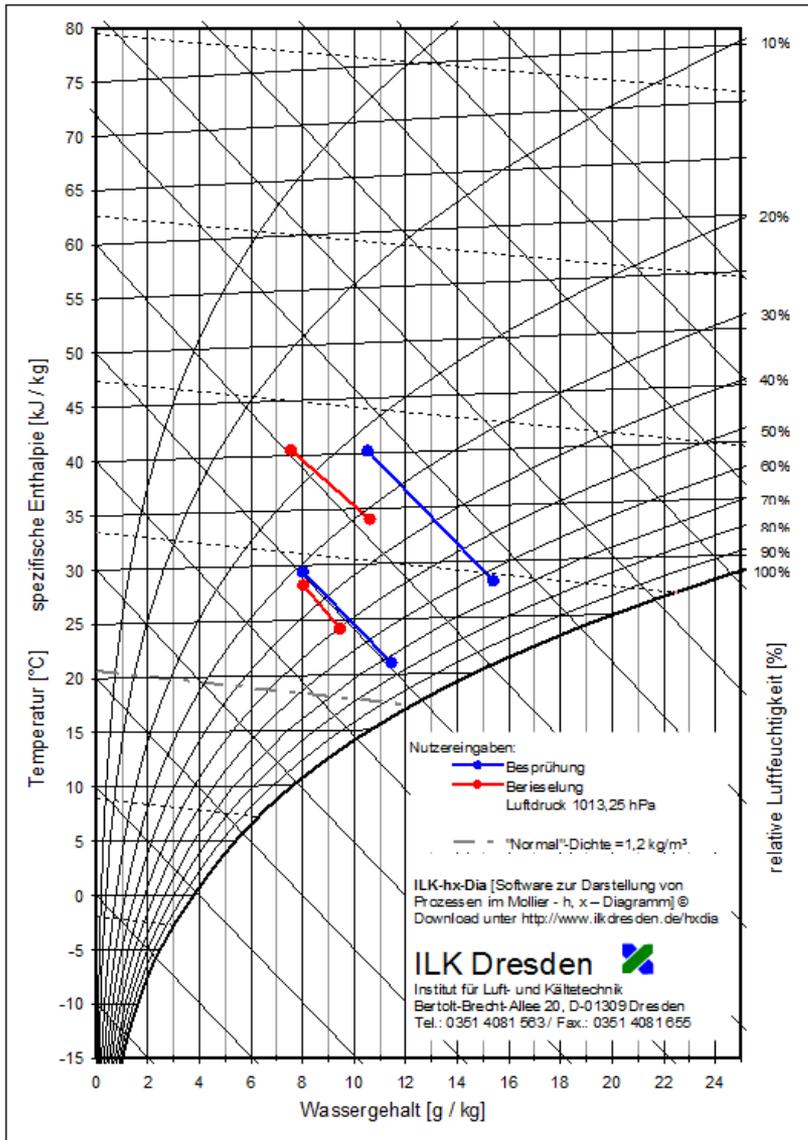


$\Delta p = 1,8 \text{ bar} \rightarrow \Delta T_s \approx 1,4 \text{ K}$

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

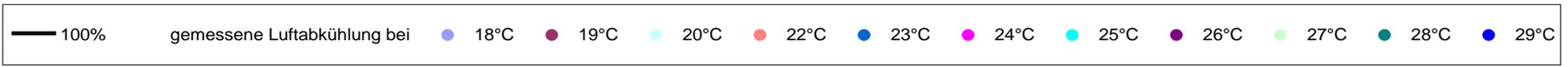
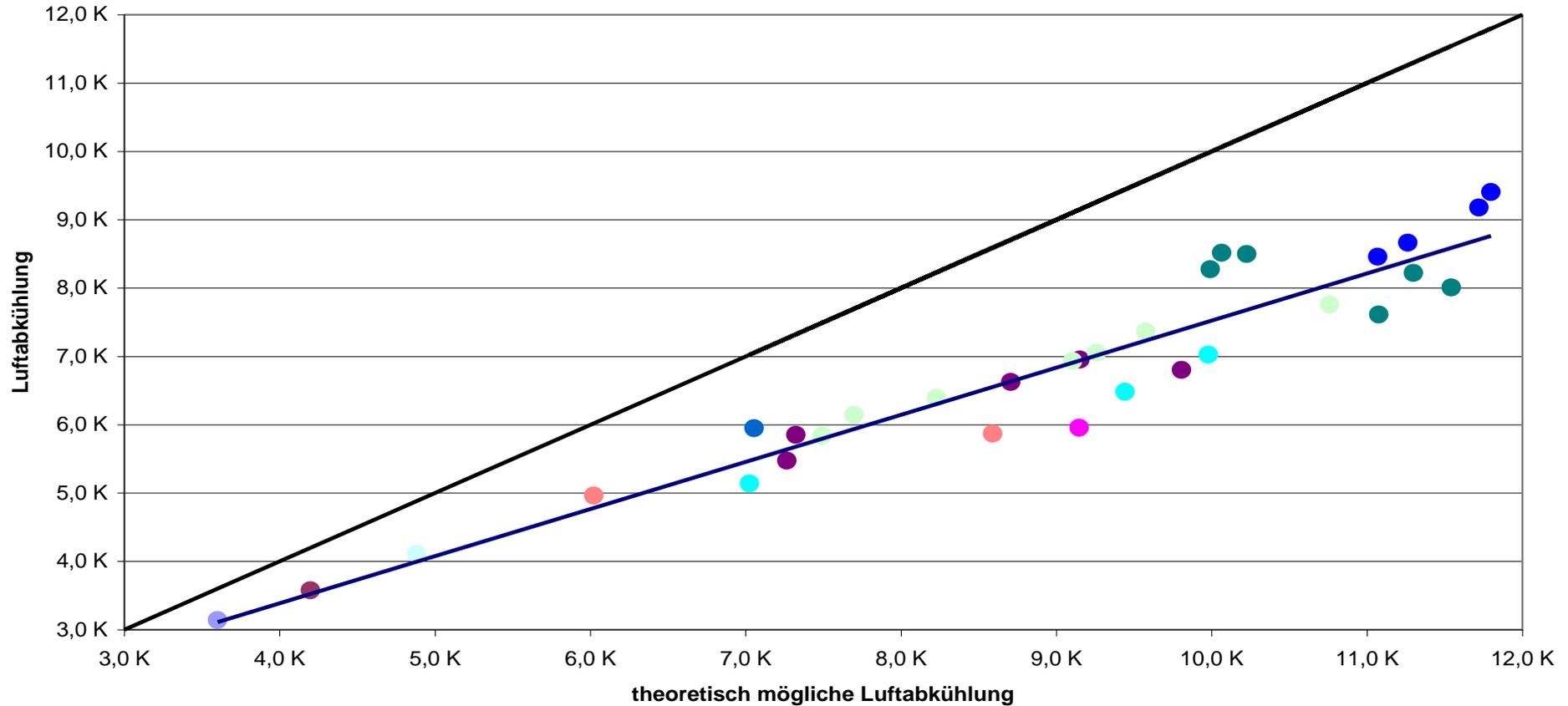
$\Delta p = 1,8 \text{ bar} \rightarrow \Delta T_s \approx 9,9 \text{ K}$

Vorkühlsatz (adiabate Befeuchtung)



Vorkühlsatz (adiabate Befeuchtung)

Luftabkühlung in Abhängigkeit des Luft Eintrittszustandes

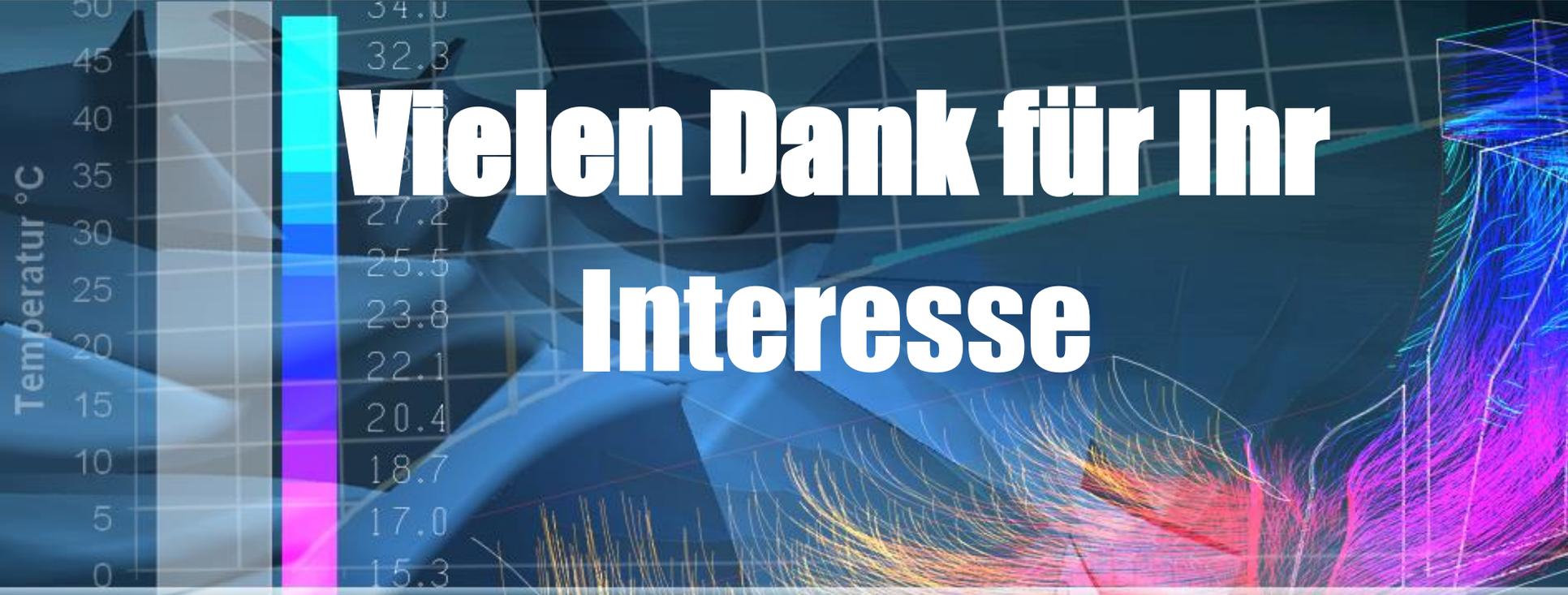


Temperatur [°C]	rel. Feuchte [%]	theor. erreichb. Feuchtkugel [°C]		prakt. erreichb. Abkühlung [°C]
25	40	16	→	18 ... 19
20	40	12,5	→	14 ... 15



Zusammenfassung

- Kältemittelzirkulation mittels Pumpe,
(Thermosyphon-Prinzip: weniger praktikabel)
- Auswahl Kältemittel: CO₂
- 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