

**Netzwerk  
Kälteeffizienz**

Hamburg

**Energieeffizienz in der  
Prozess- und Großkälte  
6.11.2008**

Dipl.-Ing. Thomas Tech, Dr. Ing. Franz Josef Josfeld  
GERTEC GmbH Ingenieurgesellschaft

Präsentation als pdf-Download unter  
[www.hamburg.de/kaeltenetz/298640/termine.html](http://www.hamburg.de/kaeltenetz/298640/termine.html)

# Programm

- 09.00 h Einführung in das Thema Kälte
- 09.30 h Kältebedarf und Kältebedarfssteuerung
- 10.30 h Kaffeepause
- 10.45 h Kälteerzeugungstechnologien
- 11.45 h Rückkühlung
- 12.30 h Mittagspause
- 13.30 h Die Kälteversorgung des Elbcampus
- 14.30 h Optimierung der Kälteversorgung
- 15.30 h Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit
- 16.00 h Abschlussdiskussion
- 16.30 h Ende der Veranstaltung

# Einführung

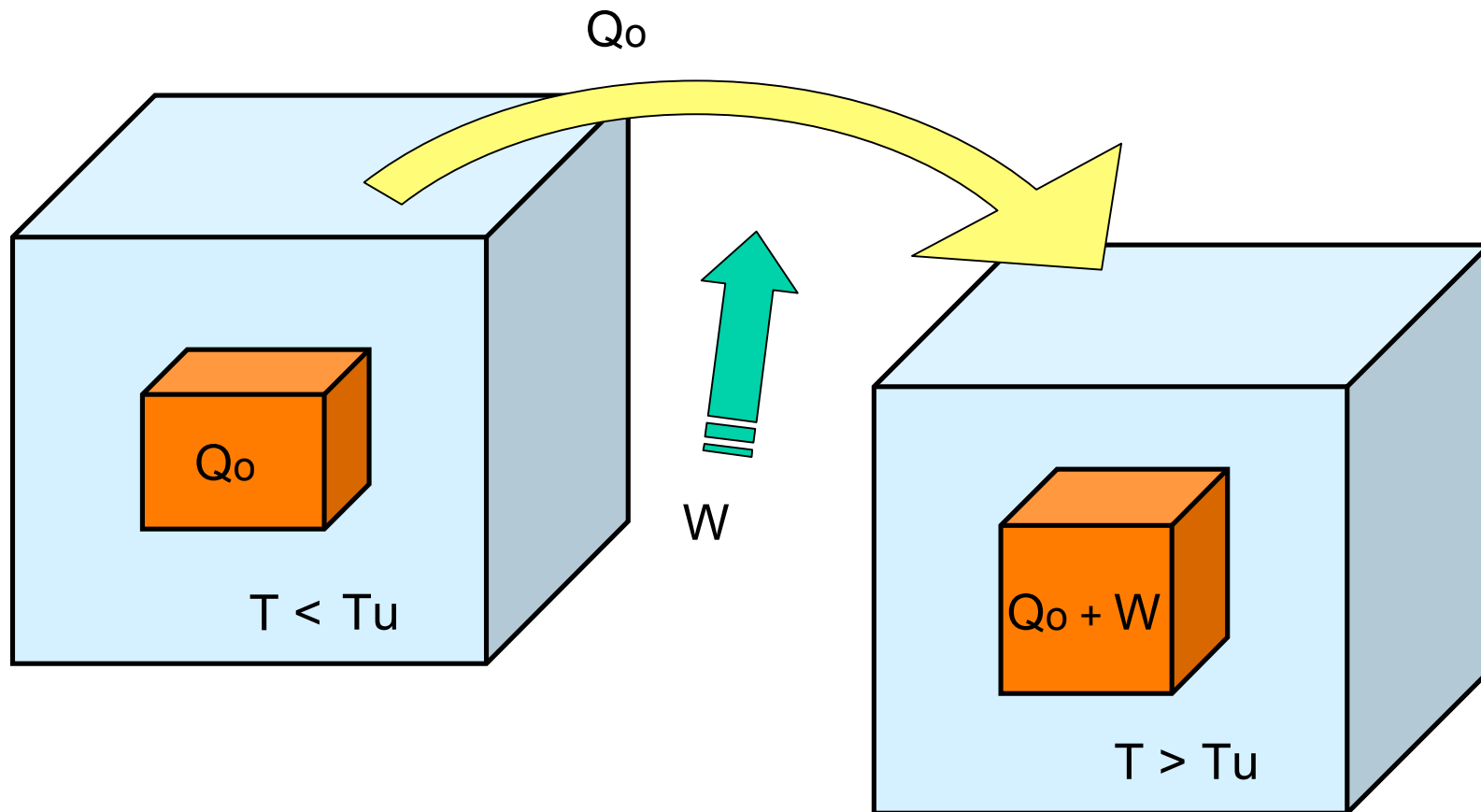
## „Kälte, das Zukunftsthema der Energieeffizienz“

# Was ist Kälte?

Physikalisch gibt es keine Kälte, nur mehr oder weniger Wärme  
Kälte ist relativ und bedeutet „weniger warm als die Umgebung“

**Kälteerzeugung = Abführung von Wärme**

# Kälteerzeugung = Wärmeabfuhr



# Abführen von Wärme

- Raumluftkonditionierung
- Haltbarmachung von Nahrungsmitteln u. anderen verderblichen Produkten
- Abführung von Reaktionswärme z.B. bei chemischen Prozessen
- Wechsel von Aggregatzuständen z.B. Gasverflüssigung
- Kühlung von Sensoren z.B. von diagnostischen Geräten

# Ausgangssituation in Deutschland

66.000 GWh elektr. Kälteerzeugung  $\approx$  14% des bundesweiten Strombedarfs

11.000 GWh nicht elektr. Kälteerzeugung

77.000 GWh techn. erzeugte Kälte

230.000 GWh Primärenergie  $\approx$  5% des bundesweiten Primärenergiebedarfs

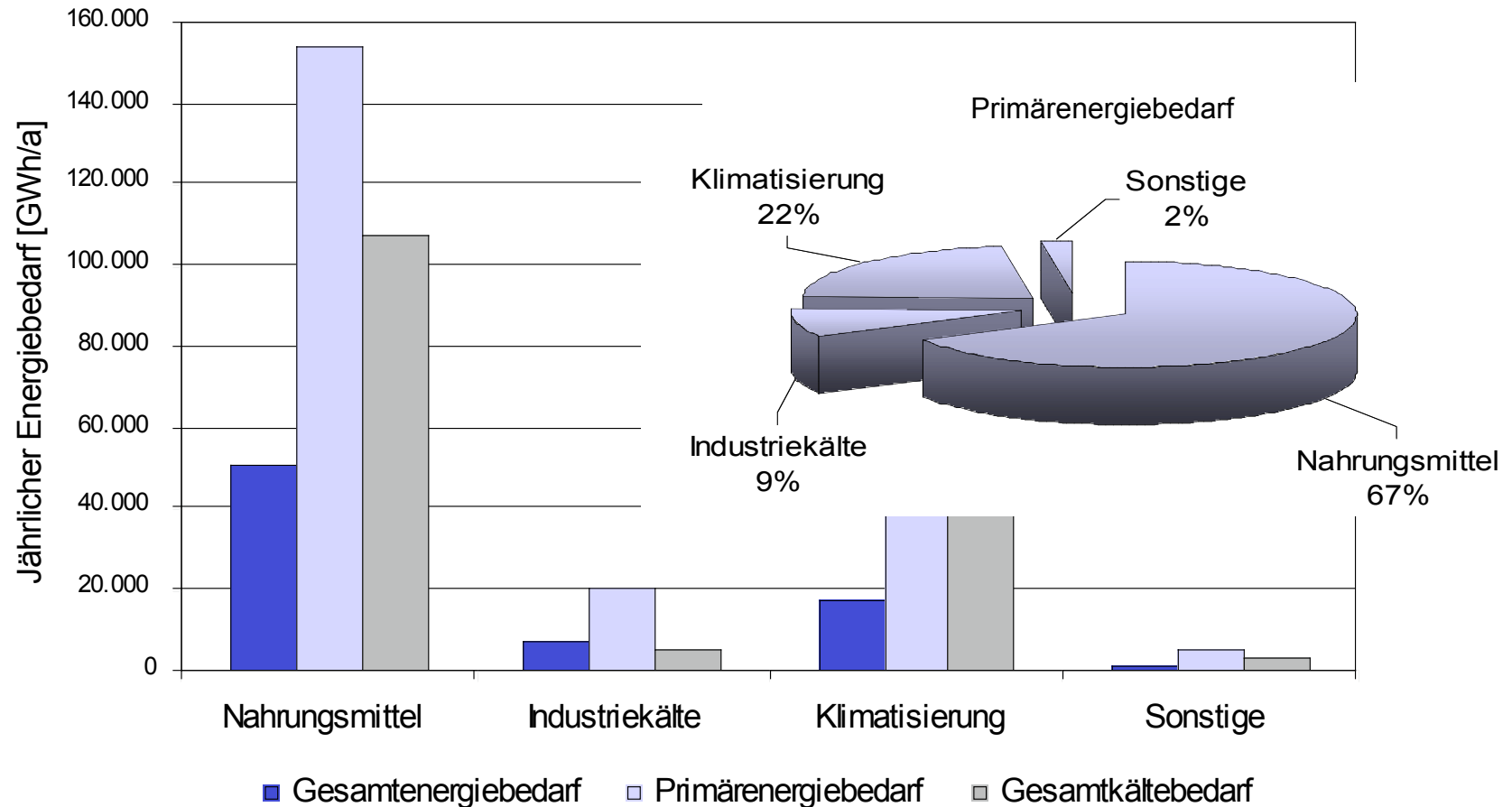
46 Mio. t Kohlendioxid  $\approx$  5,4% der bundesweiten CO<sub>2</sub>-Produktion

Referenzjahr 1999

Tendenz steigend !!

/DKV:Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte, Juni 2002/

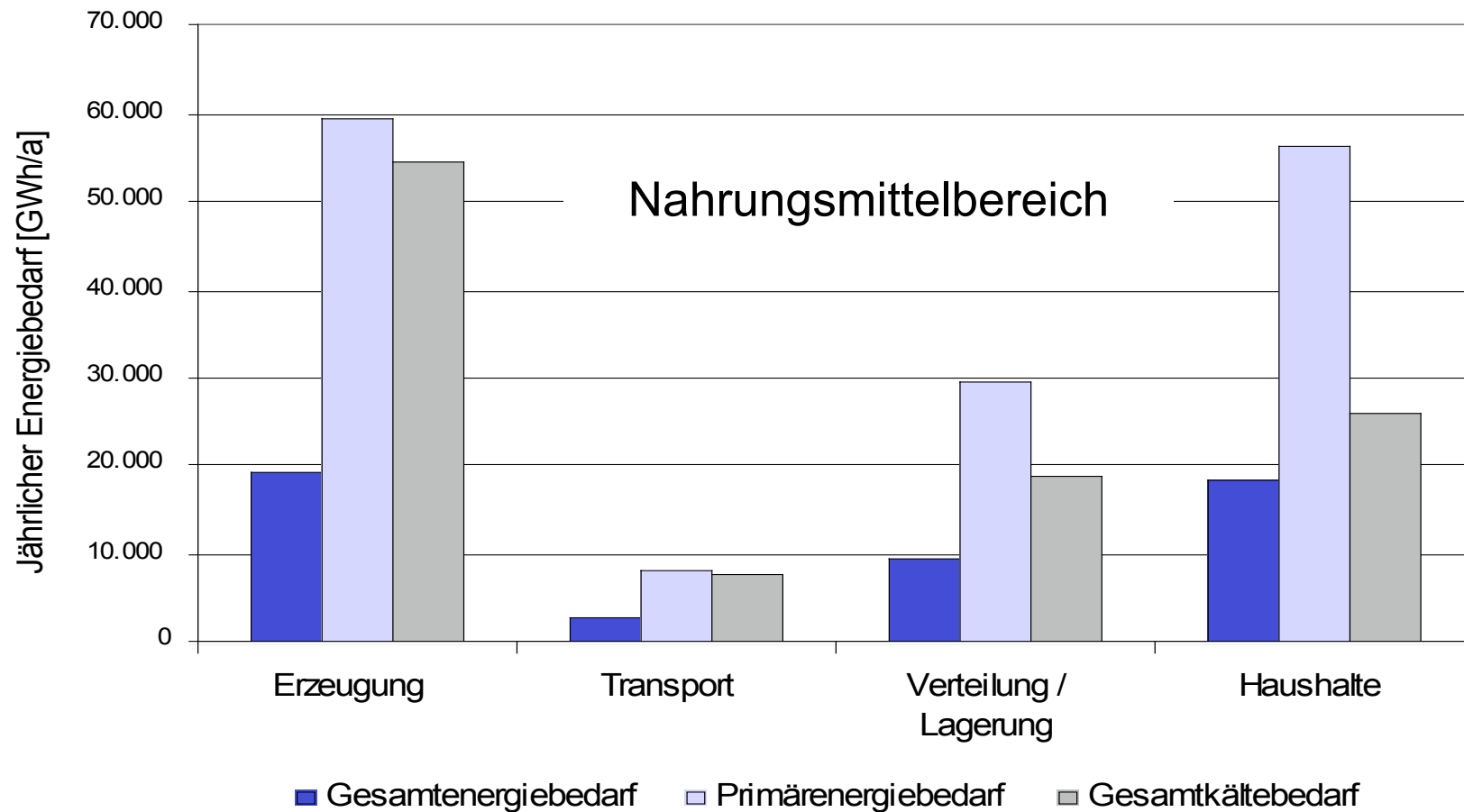
# Ausgangssituation in Deutschland nach Anwendungsbereichen



/DKV: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte, Juni 2002/

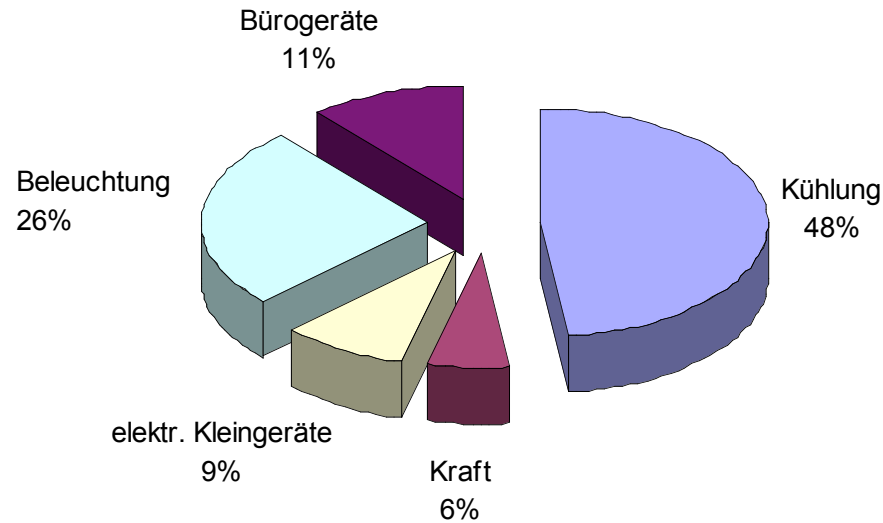


# Ausgangssituation in Deutschland - Nahrungsmittel



/DKV: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte, Juni 2002/

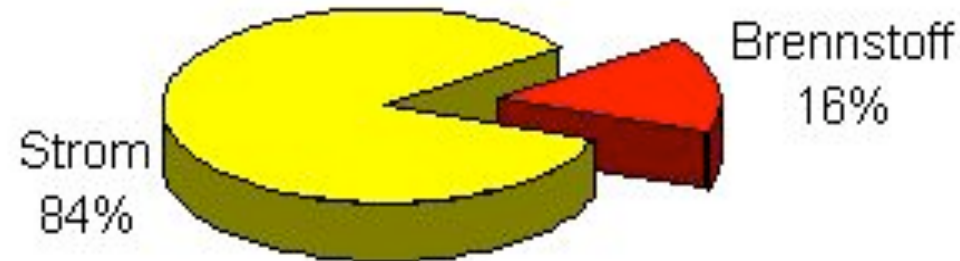
# Energieverbrauch im Lebensmittelhandel



Brandbreite des Stromverbrauchs:	170.....720	$\frac{kWh}{m^2_{VF} a}$
davon zur Kälteversorgung:	82.....345	$\frac{kWh}{m^2_{VF} a}$

/O.Ö. Energiesparverband; 1996/

# Energiekosten im Lebensmittelhandel



Bandbreite des Stromkosten:

20.....86

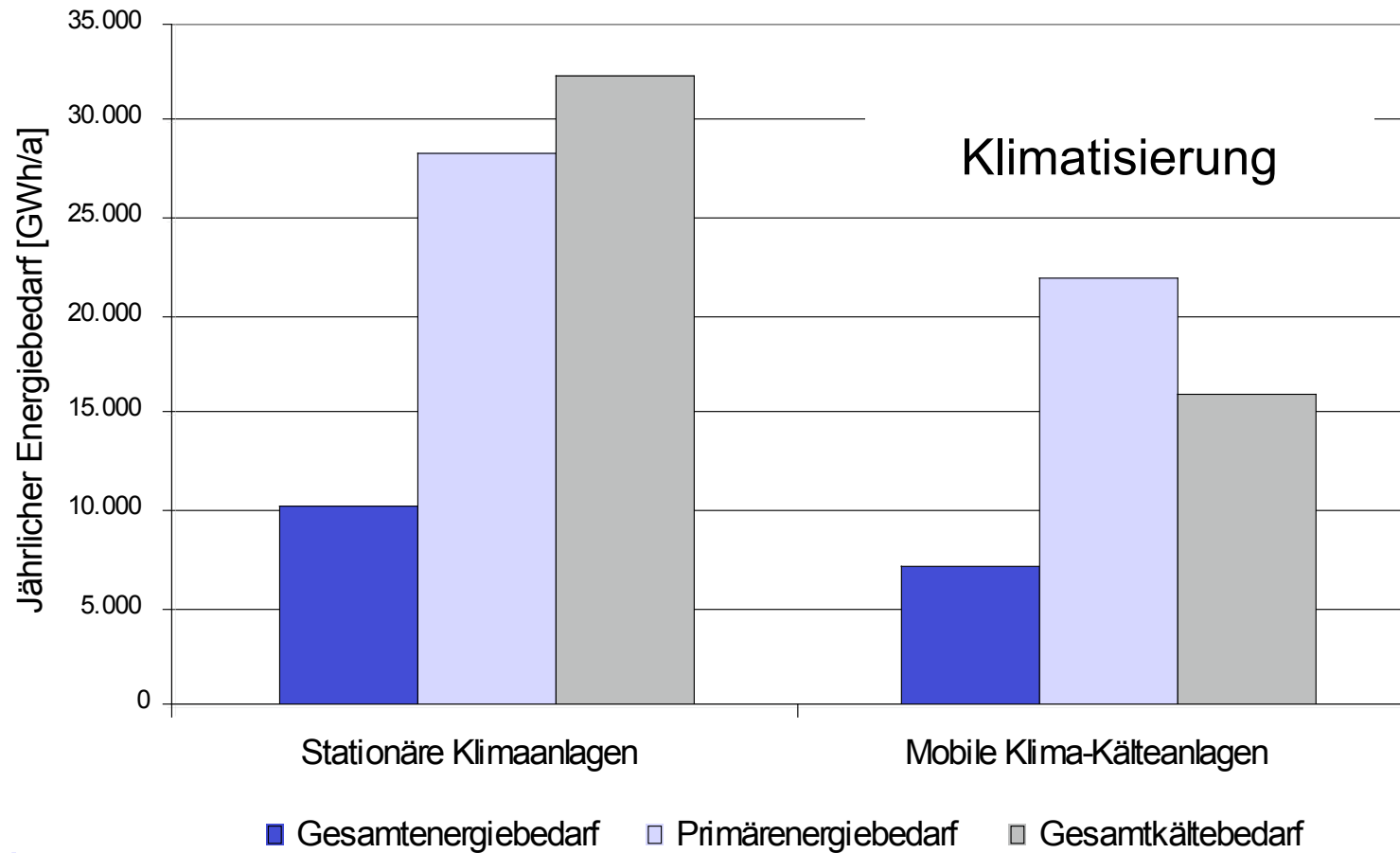
$\frac{\text{Euro}}{m^2_{VF} a}$

davon zur Kälteversorgung:

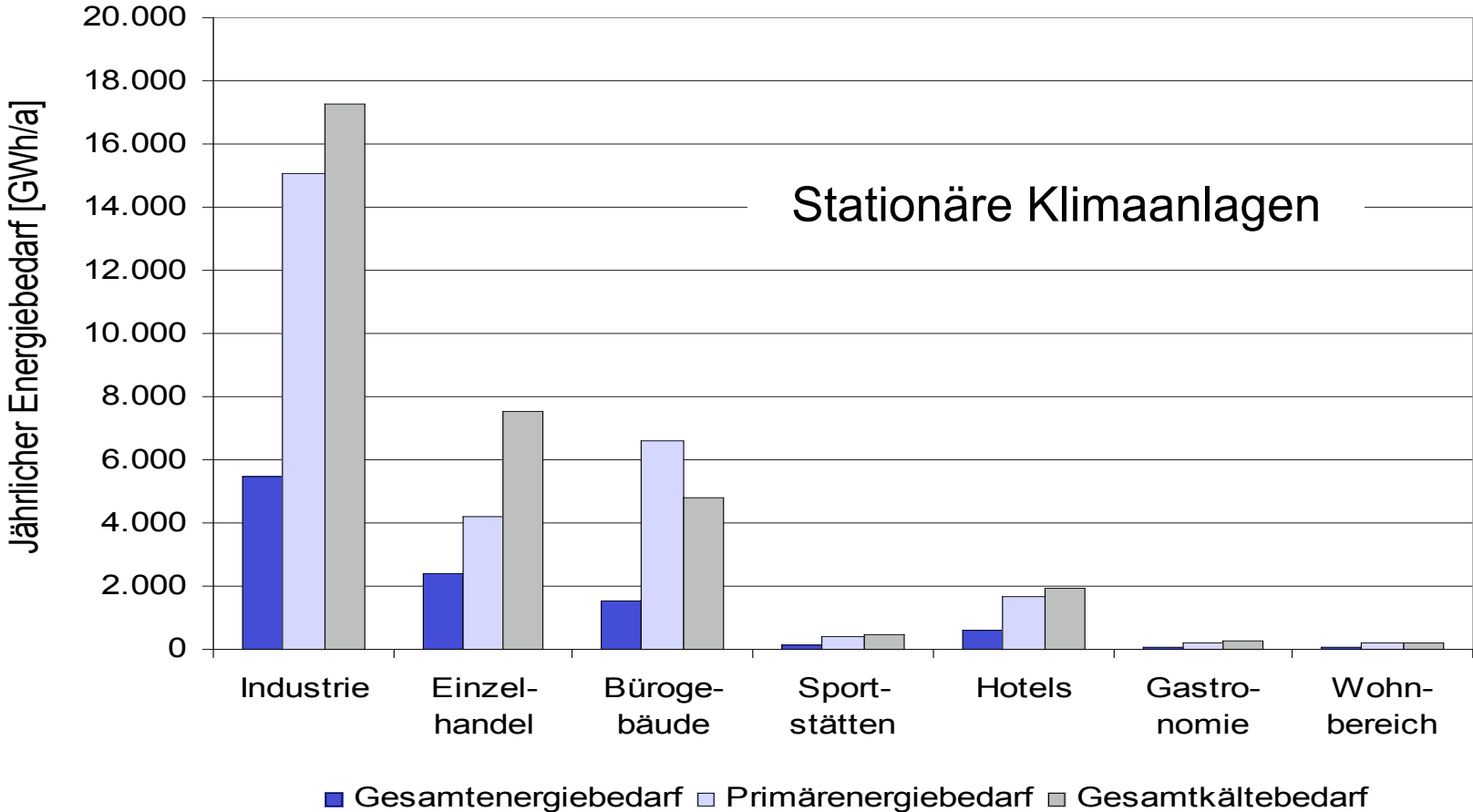
10.....41

$\frac{\text{Euro}}{m^2_{VF} a}$

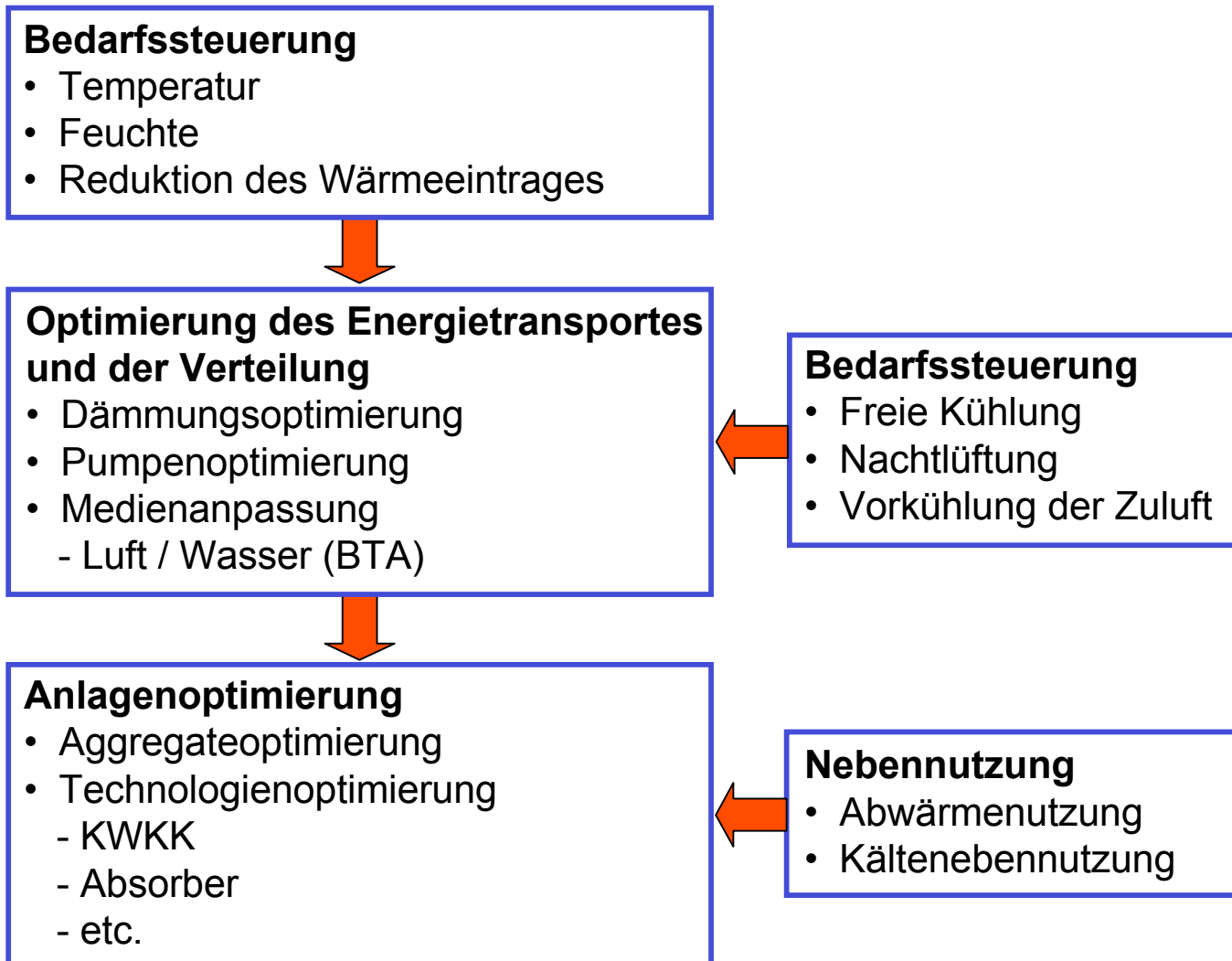
# Ausgangssituation in Deutschland - Klimatisierung



# Ausgangssituation in Deutschland – Stat. Klimaanlage



# Wirkungsketten in der Kälteeffizienzsteuerung



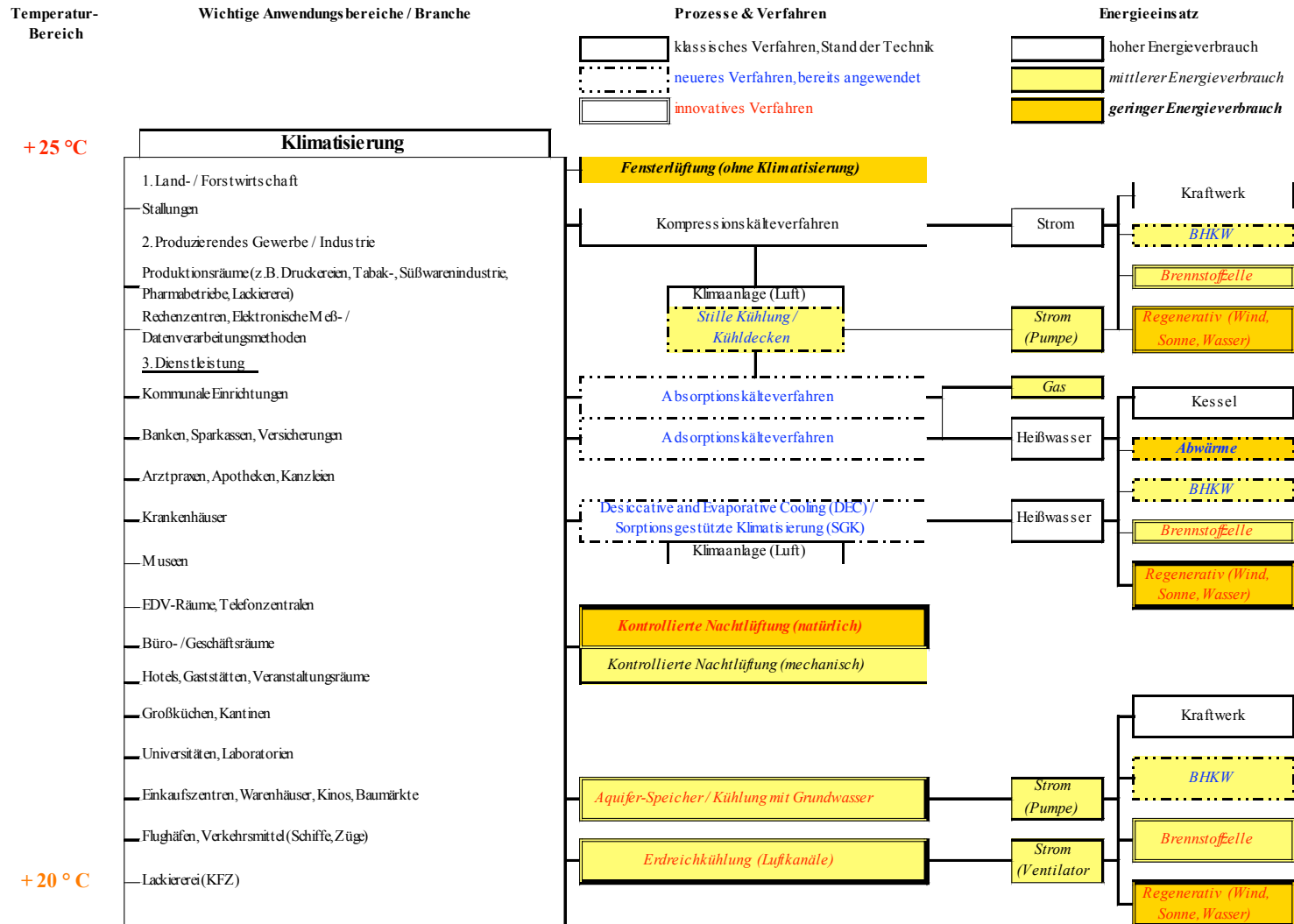
# Der Kältecheck



# Kältebedarf und Kältebedarfssteuerung



# Klimatisierung



# Prozesskühlung

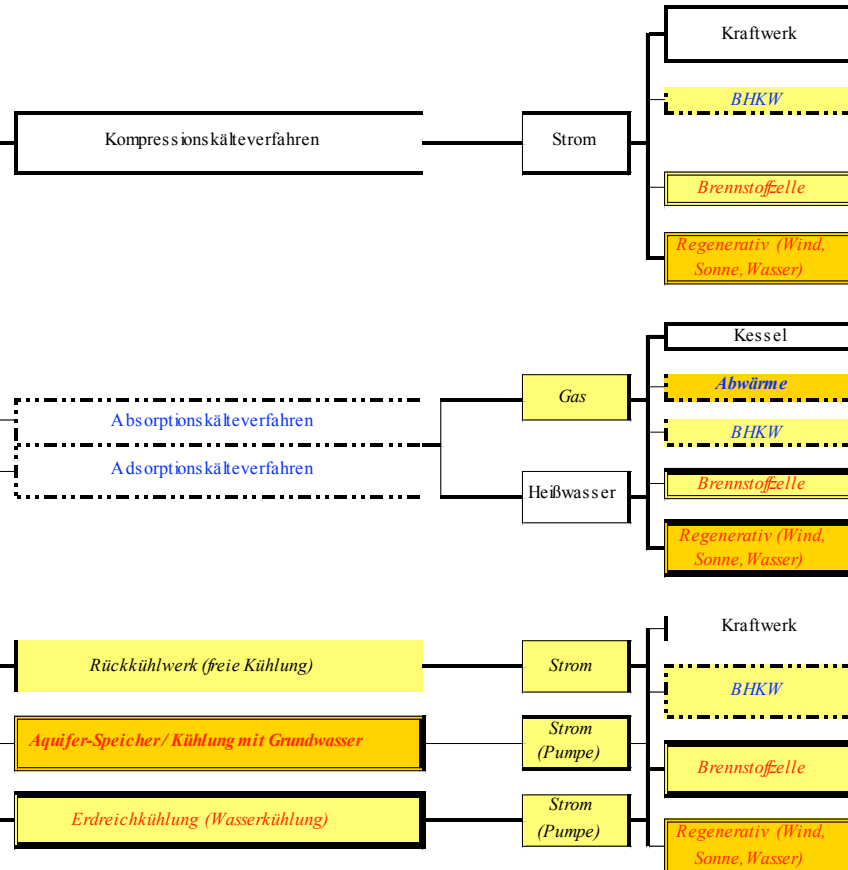
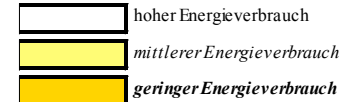
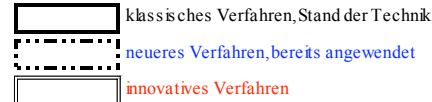
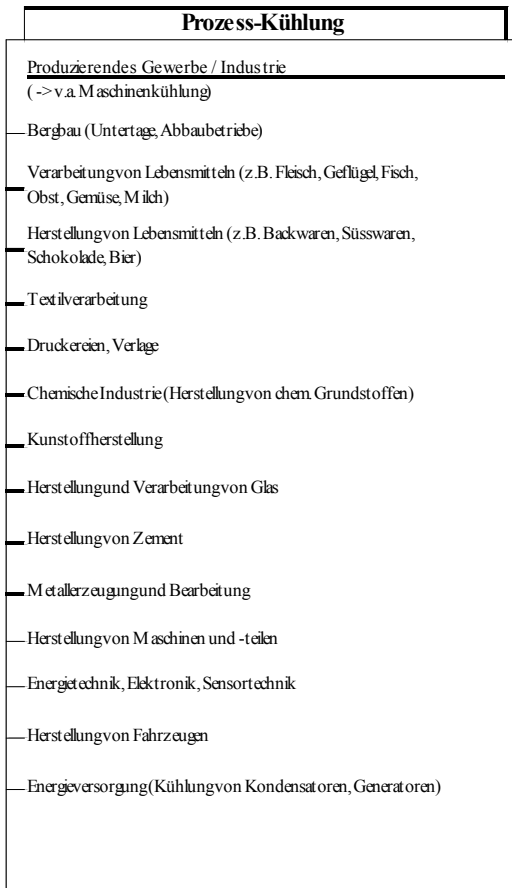
Temperatur-Bereich

Wichtige Anwendungsbereiche / Branche

Prozesse & Verfahren

Energieeinsatz

+20 °C



+10 °C

# Kühl Lagerung

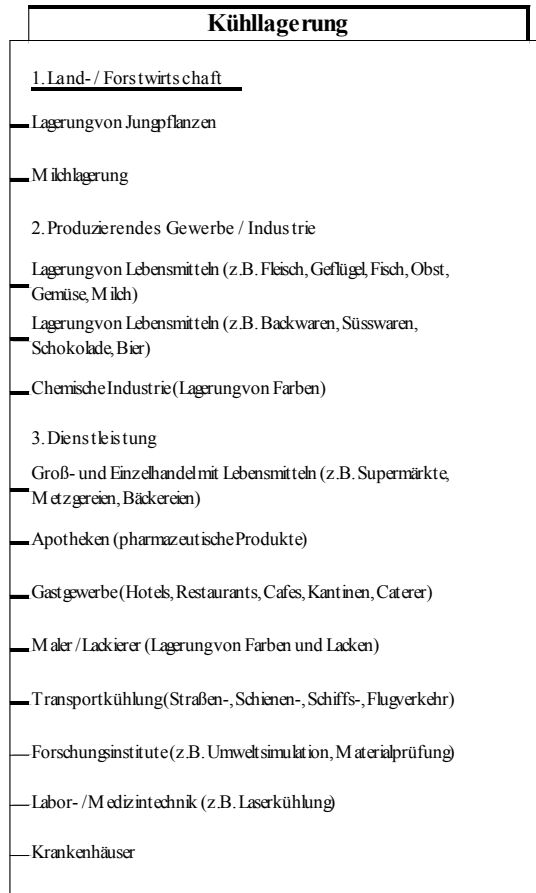
Temperatur-  
Bereich

Wichtige Anwendungsbereiche / Branche

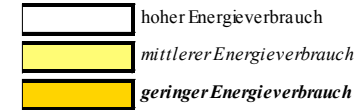
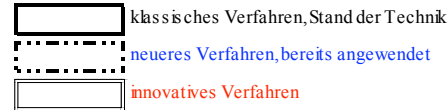
Prozesse & Verfahren

Energieeinsatz

+10 °C



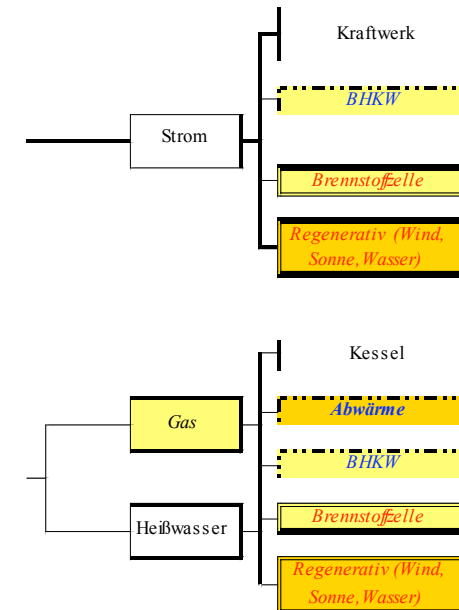
0 °C



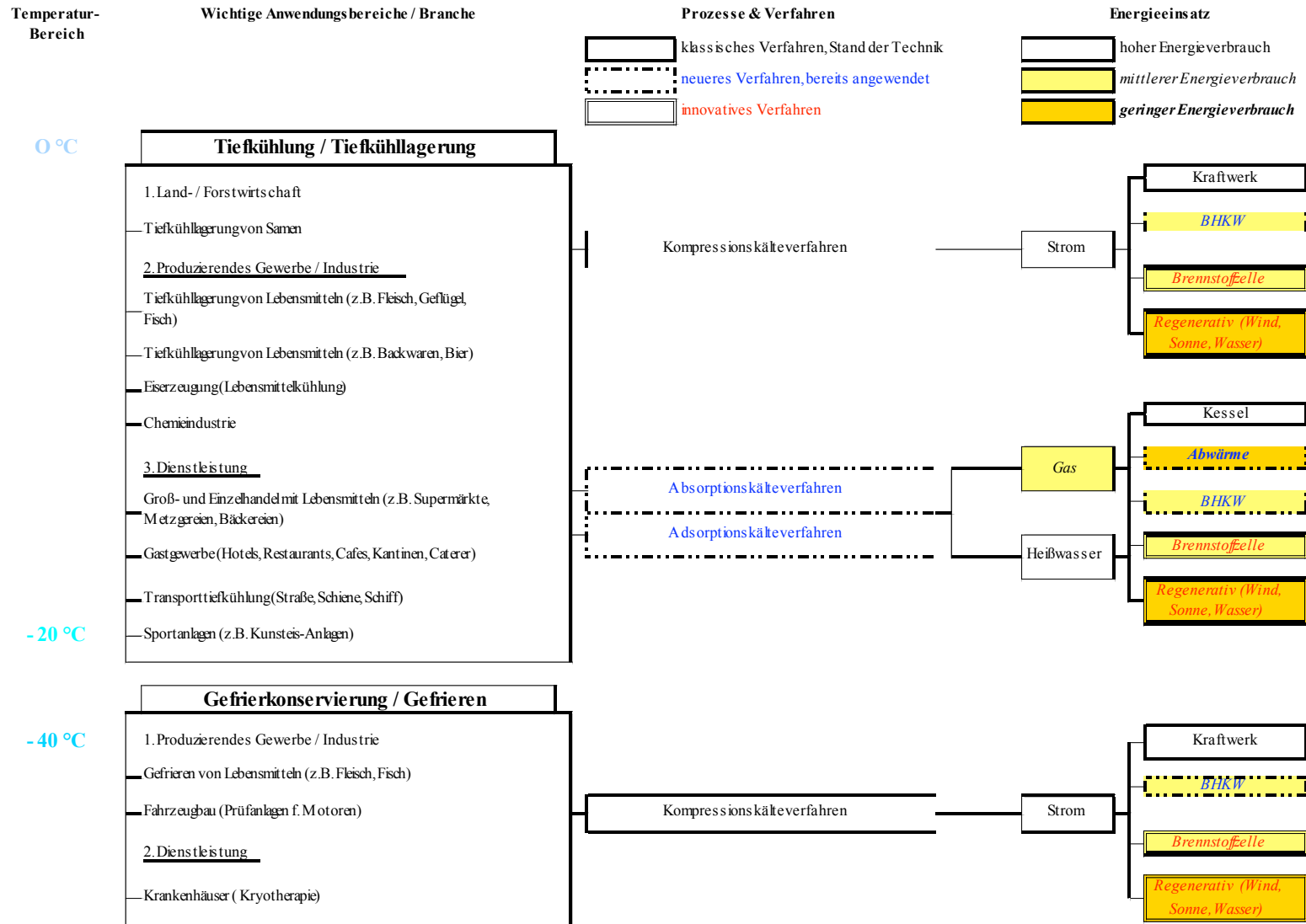
Kompressionskälteverfahren

Absorptionskälteverfahren

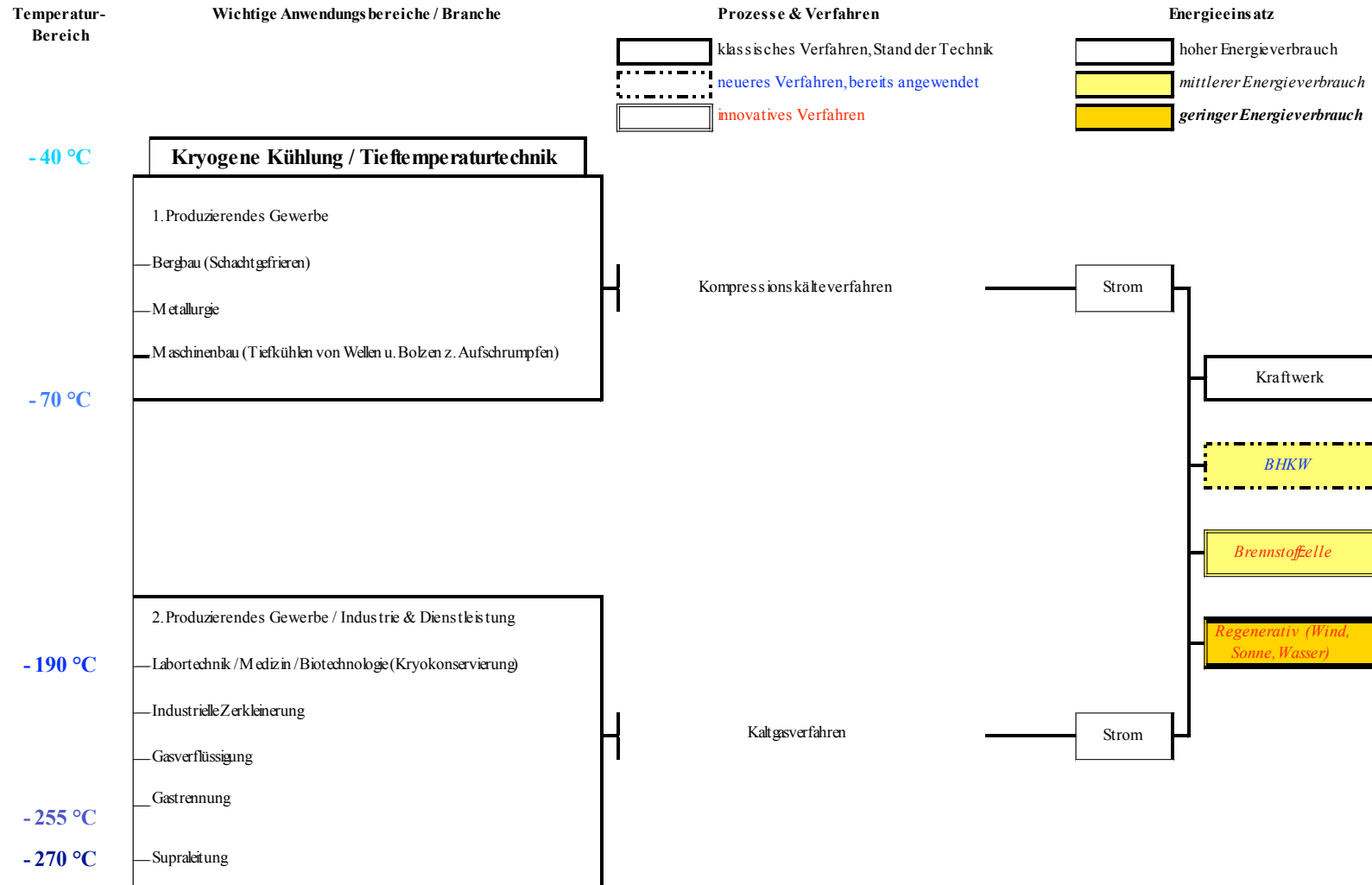
Absorptionskälteverfahren



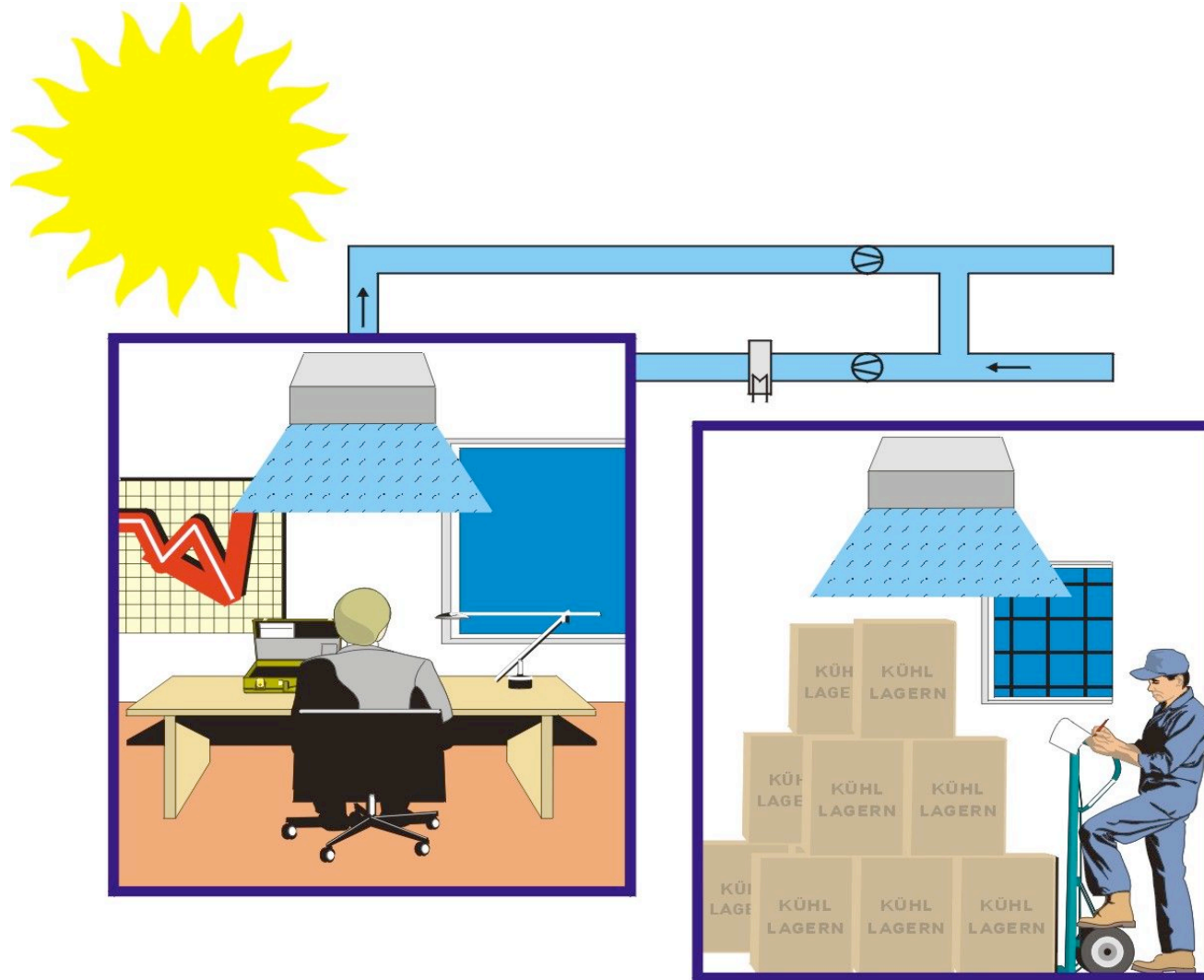
# Tiefkühlung/Gefrieren



# Kryogene-/Tieftemperaturkühlung



# Klimatisierung und Kühlung



# Kühllasten

## innere Kühllasten

- $\dot{Q}_P$  Wärmeabgabe von Personen
  - +  $\dot{Q}_B$  Wärmeabgabe der Beleuchtung
  - +  $\dot{Q}_M$  Wärmeabgabe von Maschinen & Geräten
  - +  $\dot{Q}_G$  Wärmeabgabe d. Stoffdurchsatz
  - +  $\dot{Q}_C$  Sonstige Wärmeabgabe
- 

$\dot{Q}_I$  innere Kühllasten

Kühllast  $\dot{Q}_{KR} = \dot{Q}_I(t) + \dot{Q}_A(t)$

## äußere Kühllasten

- $\dot{Q}_W$  Wärmestrom durch Wand
  - +  $\dot{Q}_T$  Wärmetransmission durch Fenster
  - +  $\dot{Q}_S$  Wärmeeinstrahlung durch Fenster
  - +  $\dot{Q}_{Fl}$  Wärmeeintrag durch Fugenlüftung
- 

$\dot{Q}_A$  äußere Kühllasten

Nennkühllast  $\dot{Q}_{KR, Nenn} = \max. \dot{Q}_{KR}(t)$

# Wärmeabgabe durch Personen

$$\dot{Q}_{P, tr} = Z_p \times q_{p, tr} \times S_i \quad [\text{W}]$$

$$\dot{Q}_{P, f} = Z_p \times q_{p, f} \quad [\text{W}]$$

mit  $S_i$  Kühllastfaktor

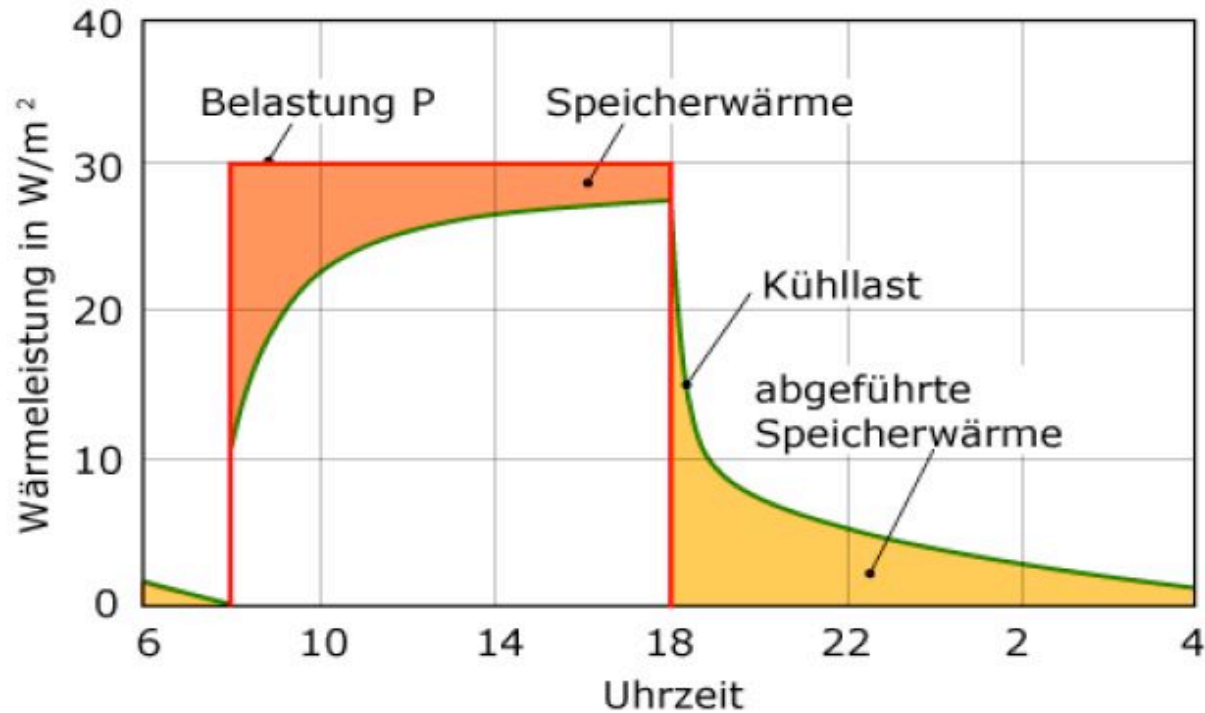
(= f (Konvektionsanteil der Personenwärmeabgabe (30..50%), wahre Ortszeit, Gebäudebauweise)  
zum Zeitpunkt der Sommerextreme zwischen 0,76...0,96)

Tätigkeit	Lufttemperatur	°C	18	20	22	23	24	25	26
körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen	$q_{p, tr(trocken)}$	W	100	95	90	85	75	75	70
	$q_{p, f(feucht)}$	W	25	25	30	35	40	40	45
	$q_{p, ges}$	W	125	120	120	120	115	115	115
	Wasserdampfabgabe	g/h	35	35	40	50	60	60	65
schwere körperliche Tätigkeit	$q_{p, ges}$	W	270	270	270	270	270	270	270
	$q_{p, tr}$	W	155	140	120	115	110	105	95





# Kühllastverlauf



$$\text{Kühllast} = P \cdot S = \text{Belastung} \cdot \text{Kühllastfaktor}$$

/H.Rietschel-Institut, TU Berlin/

# Wärmeabgabe durch Beleuchtung

$$\dot{Q}_B = P \times e \times \mu_B \times S_i \quad [\text{W}]$$

mit  $P$  Beleuchtungsanschlußleistung [W]

$$= E_n \times p \times A \quad \text{mit } E_n \text{ Nennbeleuchtungsstärke [klx]}$$

(0,1-2,0 klx)

$p$  flächenbezogener Anschlusswert

(von 19 W/m<sup>2</sup>klx Leuchtstofflampe bis  
200 W/m<sup>2</sup>klx für Glühbirnen)

$e$  Gleichzeitigkeitsfaktor

$A$  zu beleuchtende Fläche

$\mu_B$  Raumbelastungsgrad

(Anteil der Lampenleistung, der in der Kühllastberechnung anzusetzen ist; bei Abluftleuchten 0,25 – 0,8;  
sonst 1,0)

$S_i$  Kühllastfaktor

(= f (Konvektionsanteil der Leuchten (0..50%), wahre Ortszeit, Gebäudebauweise)  
zum Zeitpunkt der Sommerextreme zwischen 0,53...0,90)

# Wärmeabgabe von Maschinen und Geräten

$$\dot{Q}_M = \sum_{i=1}^n P_i \times \mu_{M_i} \times e \times S_i \quad [\text{W}]$$

# Wärmeabgabe bei Stoffdurchsatz

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_G \times c_G \times (t_{GE} - t_{GA}) \times S_i$$

mit  $\dot{m}_G$  Massendurchsatz [kg/s]

=  $m_G/t$  mit  $m_G$  abzukühlende Masse [kg]

t geforderter Abkühlzeitraum [s]

$c_G$  spez. Wärmekapazität [kJ/kgK]

$t_{GE}$  Eintrittstemperatur der Masse [°C]

$t_{GA}$  Austrittstemperatur der Masse [°C]

$S_i$  Kühllastfaktor für innere Lasten

(bei 100% Konvektionsanteil =1,0)

# Wärmestrom durch die Wand

Außenwand: 
$$\dot{Q}_{tA} = \sum_{i=1}^n k_{An} \times A_{An} \times \Delta t_{\ddot{a}q} \quad [\text{W}]$$

Innenwand: 
$$\dot{Q}_{ti} = \sum_{i=1}^n k_{in} \times A_{in} \times \Delta t_n \quad [\text{W}]$$

mit  $k_{An}$ ,  $k_{in}$  äußerer bzw. innerer Wärmedurchgangswiderstand [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$A_{An}$ ,  $A_{in}$  Fläche der äußeren bzw. inneren Wand [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta t_{\ddot{a}q}$  äquivalente Temperaturdifferenz  
(Funktion der Raumlufttemp., Bauartklasse, Ausrichtung,  
wahren Ortszeit, ggf. Korrekturwerte bei besonderen  
Absorptions- und Emissionsgraden)

$\Delta t_n$  Temperaturdifferenz [ $^{\circ}\text{C}$ ]

# Wärmetransmission durch das Fenster

$$\dot{Q}_T = k_F \times A_M \times (t_{LA} - t_{LR}) \quad [\text{W}]$$

mit	$k_F$	Wärmedurchgangskoeffizient des Fenster [W/m <sup>2</sup> K]
	$A_M$	gesamte Fensterfläche (Maueröffnungsmaß) [m <sup>2</sup> ]
	$t_{LR}$	Raumlufttemperatur [°C]
	$t_{LA}$	momentane Außenlufttemperatur [°C]

# Wärmeeinstrahlung durch das Fenster

$$\dot{Q}_s = [A_1 \times I_{\max} + (A - A_1) \times I_{\text{diff, max}}] \times b \times S_a \quad [\text{W}]$$

mit	$A_1$	besonnte Glasfläche [m <sup>2</sup> ]
	$A$	gesamte Glasfläche [m <sup>2</sup> ]
		= $g_v \times A_M$ mit $g_v$ Glasflächenanteil des Fensters
		$A_M$ gesamte Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]
	$I_{\max}$	Maximalwert der Gesamtstrahlung im Auslegungsmonat [W/m <sup>2</sup> ]
	$I_{\text{diff, max}}$	Maximalwert der Diffusstrahlung im Auslegungsmonat [W/m <sup>2</sup> ]
	$b$	Durchlaßfaktor des Fensters und Sonnenschutzeinrichtung (Werte zw. 0,03 (Reflexionsglas mit Außenjalousie und Baumwollvorhang) bis 1,0 (einfache Doppelverglasung))
	$S_a$	Kühllastfaktor für äußere Strahlungsverluste (Funktion von Monat, wahrer Ortszeit, Himmelsrichtung, Sonnenschutz)



# Durchlassfaktoren Fenster

Durchlassfaktor <i>b</i> der Sonnenstrahlung (DIN 67507)			
Gläser	<i>b</i>	Zusätzliche Sonnenschutzvorrichtung**	<i>b</i>
<i>Tafelglas nach DIN 1249</i>			
Doppelverglasung	1,0	<i>Außen</i> Jalousie, Öffnungswinkel 45°	0,15
Dreifachverglasung	0,9	Stoffmarkise, oben und seitlich anliegend	0,4
<i>Absorptionsglas (Doppelverglasung, innen Tafelglas)</i>			
Vorgehängte Absorptionsscheibe ( 5 cm Abstand)	0,5	<i>Zwischen den Scheiben</i> Jalousie, Öffnungswinkel 45°, unbelüftet	0,5
<i>Reflexionsglas (Doppelverglasung, innen Tafelglas)</i>			
Belag aus Metalloxid	0,55	<i>Innen</i> Jalousie, Öffnungswinkel 45°	0,7
Belag Edelmetall (z.B. Gold)	0,45		
Glashohlsteine (100 mm), farblos, glatte Oberfläche	0,65	Vorhänge, hell* (Nessel, Baumwolle, Chemiefaser)	0,5

\* ) Bei dunklen Vorhängen sind die Werte um 0,2 zu erhöhen.      \*\* ) Kombinationen von Sonnenschutzanordnungen werden durch Produktbildung erfasst ( $b = b_1 \cdot b_2$ ).

/Schulz; Univ. Weimar/





# Wärmeeintrag durch Fugenlüftung

$$\dot{Q}_{FL} = \dot{m}_L \times c_{pL} \times (t_{LA} - t_{LR})$$

mit  $\dot{m}_L$  Luftmassenstrom durch die Fugen [kg/s]  
(nach DIN 4701)

$c_{pL}$  spez. Wärmekapazität der Luft [kJ/kgK]

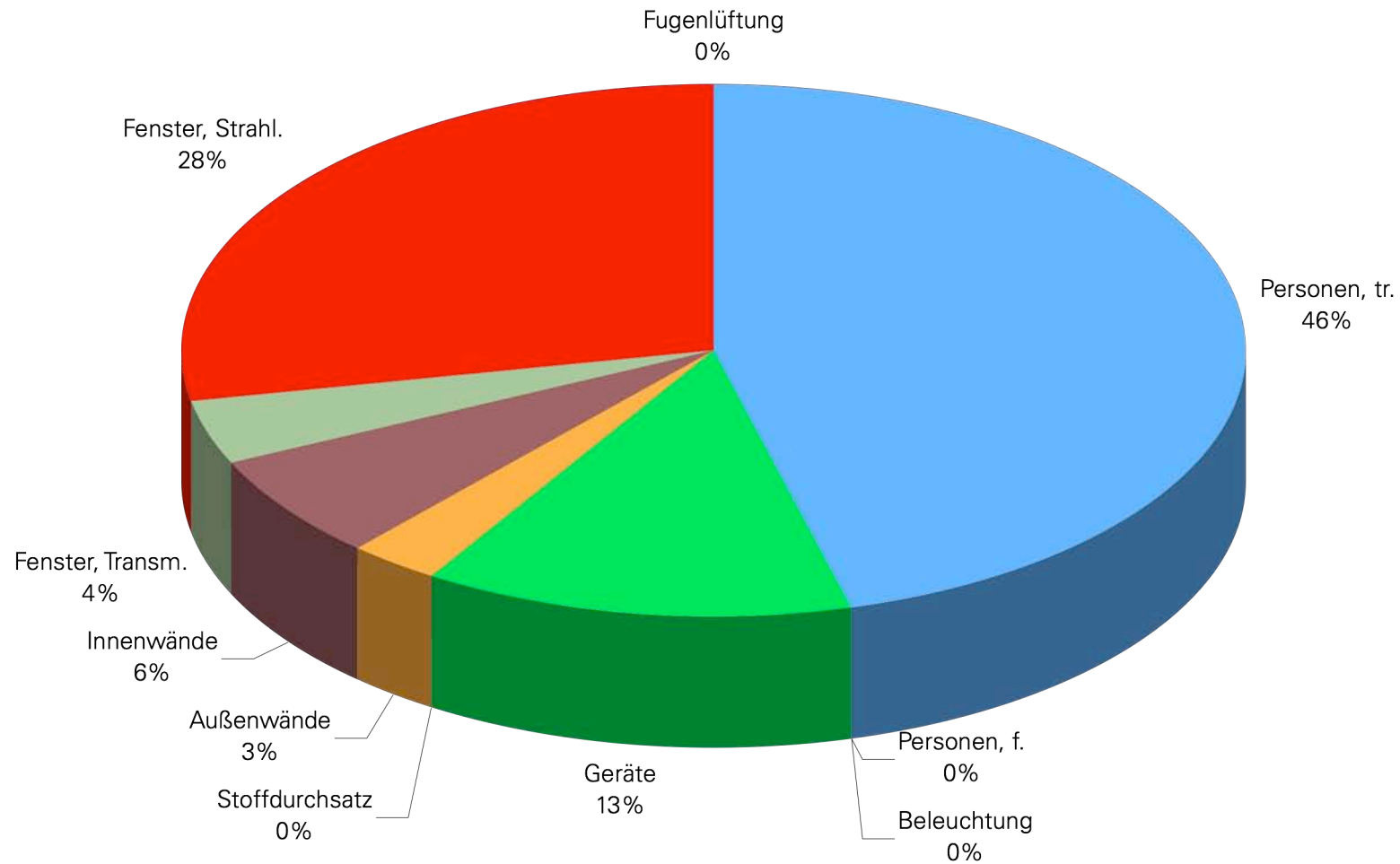
$t_{LA}$  Außenlufttemperatur [°C]

$t_{LR}$  Raumlufthtemperatur [°C]

i.d.R. zu vernachlässigen

# Beispiel: Kühllasten in einem Seminarraum 80 m<sup>2</sup>

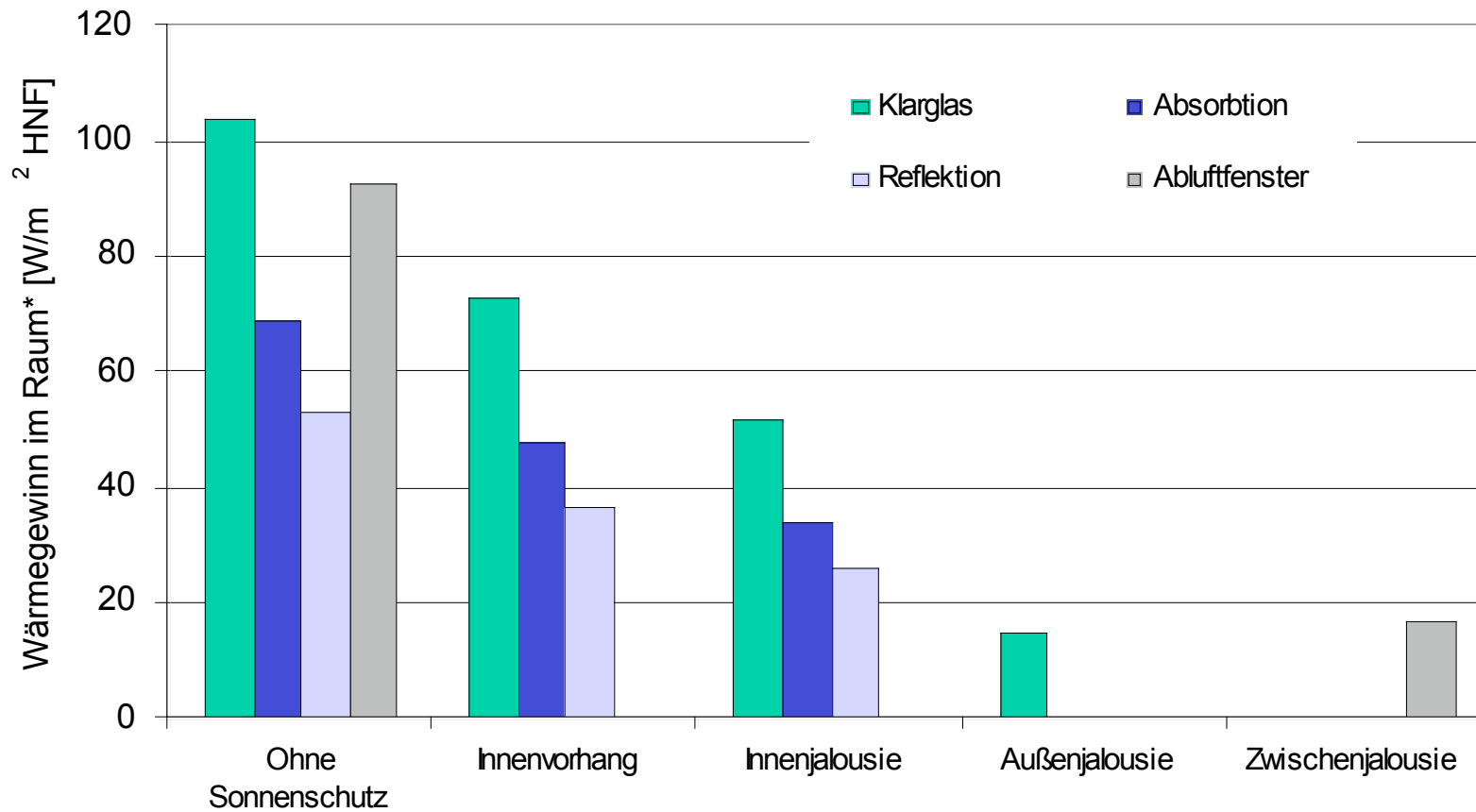
Mitte Juli, Hannover, MESZ 11:00, WOZ 9:40h, ca. 4.100 W



# Maßnahmen zur Minimierung des Kältebedarfs

- gute Wärmedämmung
- Fenster mit niedrigem g-Wert
- Sonnenschutzeinrichtungen
- Leuchten mit hoher Beleuchtungseffizienz
- elektrische Geräte mit niedrigen Anschlusswerten
- Vermeidung von zusätzlichem Feuchteintrag

# Wirkung verschiedener Sonnenschutzmaßnahmen



\*bei 5 m Raumtiefe und 1,2 m Achsbreite

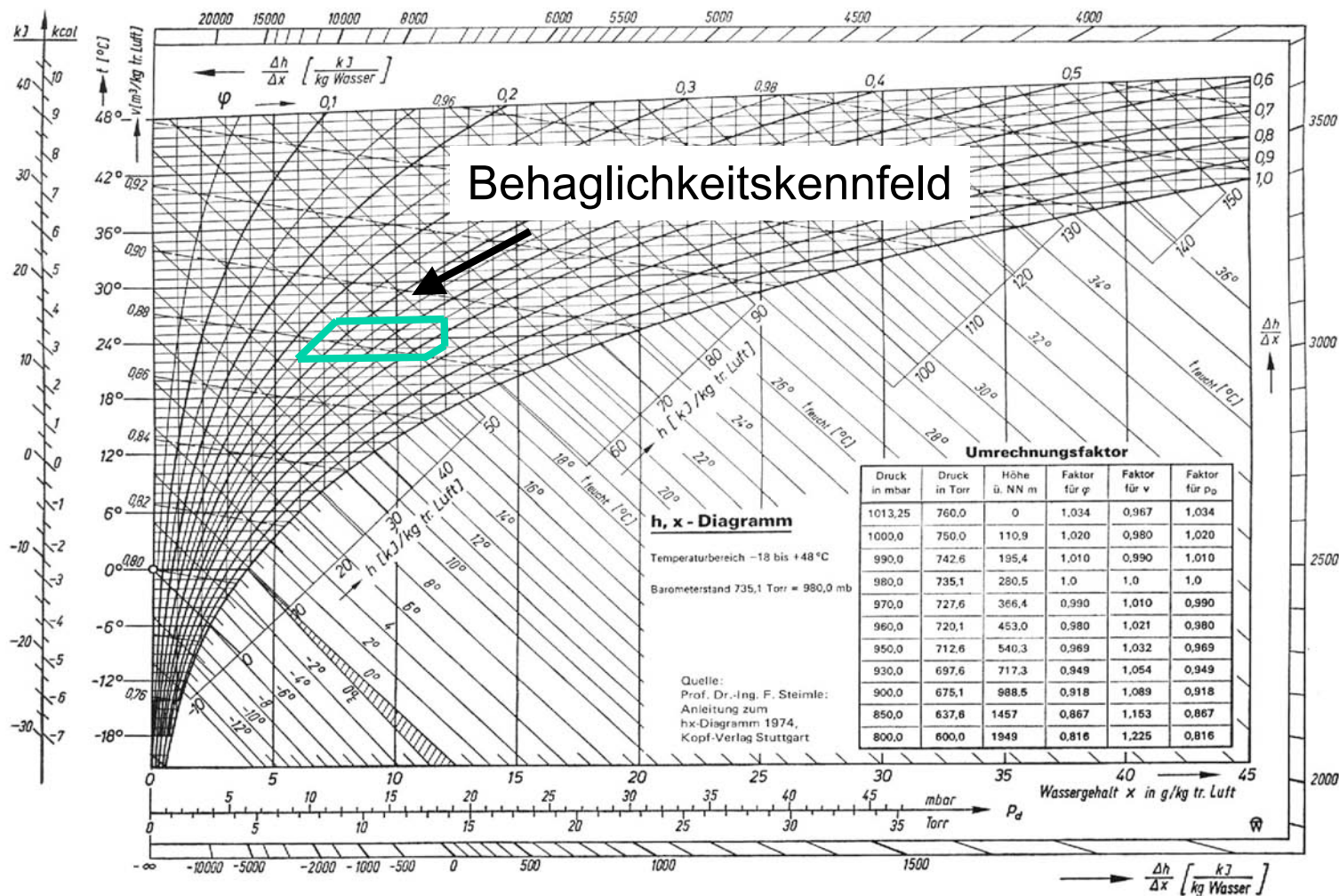
# Kältebedarf

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{AU} && \text{Außenluftkühlung und -entfeuchtung} \\ + & \dot{Q}_V && \text{Ventilator Kühlung} \\ + & \dot{Q}_{KR, Nenn} && \text{Nennkühlleistung} \end{aligned}$$

---

$$\dot{Q}_{Kü} \quad \text{Kühlerleistung}$$

$$\dot{Q}_0 \text{ (Kälteleistung)} = \dot{Q}_{Kü} \times \eta_{K, Vert.} \quad \text{(Nutzungsgrad der Kälteverteilung)}$$

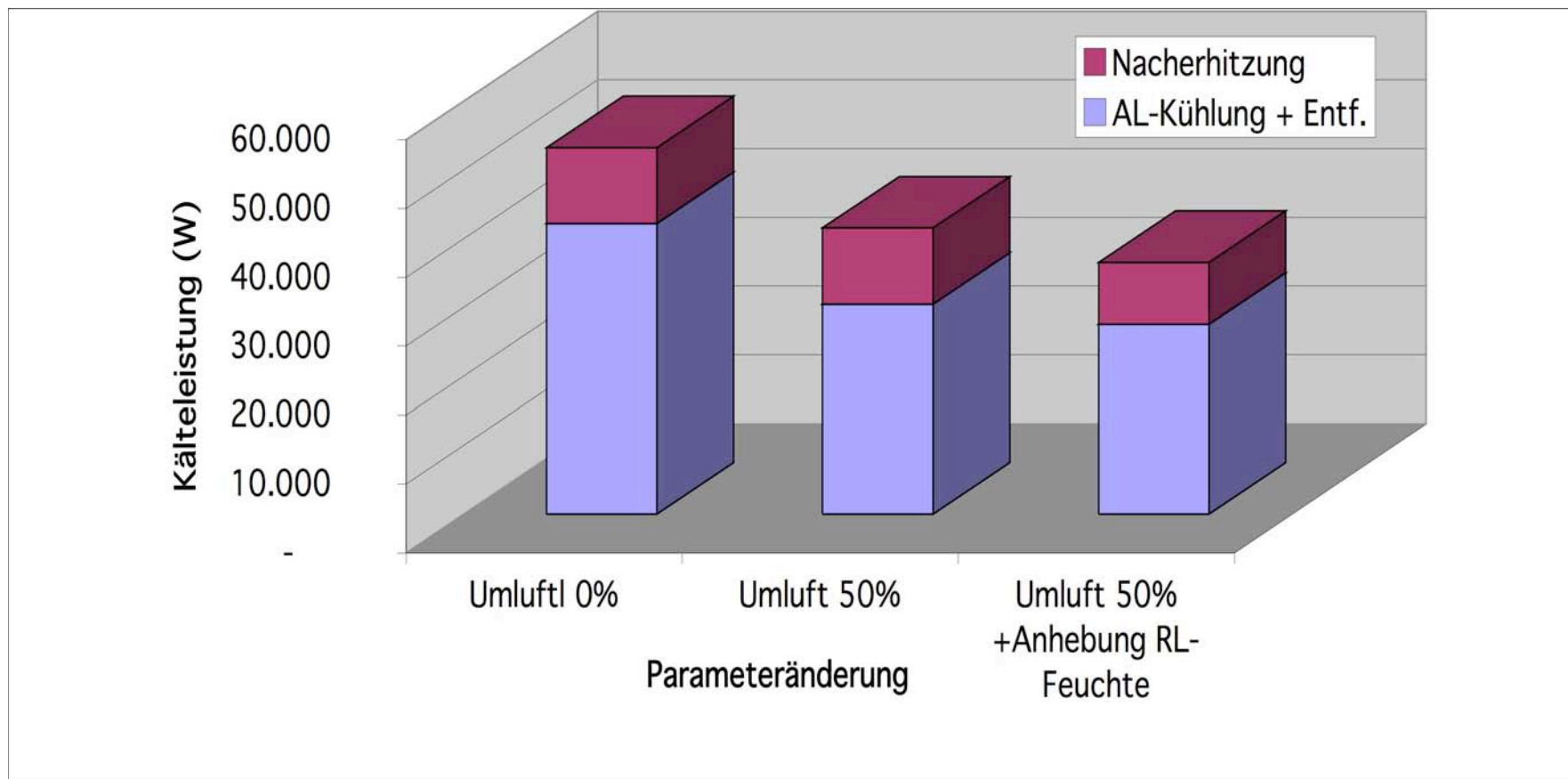


h, x-(Mollier) Diagramm  
 feuchter Luft für 1 bar

# Kühlleistung bei Änderung des Umluftanteils und der Raumluchtfeuchte

Kühllast 7.200 W		Fall 1	Fall 2	Fall 3
$t_{AL}$	°C	28	28	28
$\phi_{AL}$	%	50	50	50
$t_{RL}$	°C	22	22	22
$\phi_{RL}$	%	50	50	55
$t_{zZL}$	°C	17	17	17
$\phi_{zZL}$	%	65	65	72
Umluftanteil	%	-	50	50
RL-Entf.	g/kg <sub>trL</sub>	0,4	0,4	0,4

# Kühlleistung bei Änderung des Umluftanteils und der Raumluftfeuchte





# Kühlager/Kühlräume/Kühlzellen

# Kältebilanz (Tief-)Kühlager



## Kühllast (Tief-)Kühlager

$$\begin{aligned} & Q_{\text{Kühlgut}} \\ + & Q_{\text{Außenluft}} \\ + & Q_{\text{Fremd}} \\ + & Q_{\text{Beleuchtung}} \\ + & Q_{\text{Transmission}} \\ + & Q_{\text{Abtauung}} \\ + & Q_{\text{Ventilator}} \end{aligned}$$

---

---

$$Q_o$$

---

---

## Abhängigkeiten der Kühllasten 1

$$Q_{\text{Kühlgut}} \sim m_{\text{KG}} \times (T_{\text{KGein}} - T_{\text{KGsoll}})$$

d.h. hohe Kühlguteintrittstemperaturen und zu niedrige Kühlgutsolltemperaturen erhöhen die Kühllast

$$Q_{\text{Außenluft}} \sim m_{\text{AL}} \times (T_{\text{Laußen}} - T_{\text{Linnen}})$$

d.h. hohe Außenlufteinbrüche erhöhen die Kühllast insbesondere bei hohen Außentemperaturen

$$Q_{\text{Fremd}} \sim Z_{\text{P}} \times q_{\text{P}} \times t_{\text{P}} + Z_{\text{G}} \times P_{\text{G}} \times t_{\text{G}}$$

d.h. lange Aufenthaltszeiten von Personen und Geräten erhöhen die Kühllast

## Abhängigkeiten der Kühllasten 2

$$Q_{\text{Beleuchtung}} \sim Z_P \times P_B \times t_B$$

d.h. hohe Beleuchtungsleistungen und Beleuchtungsdauern erhöhen die Kühllast

$$Q_{\text{Transmission}} \sim U_{AF} \times A_{AF} \times (T_{\text{Laußen}} - T_{\text{Linnen}})$$

d.h. unzureichend gedämmte Außenflächen erhöhen die Kühllast insbesondere bei hohen Außentemperaturen

$$Q_{\text{Abtauung}} \sim m_{AL} \times (X_{\text{Laußen}} - X_{\text{Linnen}})$$

d.h. hohe Außenluftereinbrüche erhöhen die Kühllast insbesondere bei hohen Außenluftwassergehalten

$$Q_{\text{ventilator}} \sim P_V \times t_V$$

d.h. hohe Ventilatorleistungen und - betriebszeiten erhöhen die Kühllast

## Energetische Schwachstellen im Kühlager

- zu hohe Einlagerungstemperaturen (Defizite bei der Kühlkette)
- zu niedrige Kühlagertemperaturen
- zu lange und zu häufige Tor- bzw. Türöffnungsintervalle
- zu lange Beleuchtungsdauern
- Ventilator im Dauerbetrieb
- schlecht gedämmte und undichte Tore bzw. Türen
- keine oder unzureichende Schleusen
- unzureichende Wärmedämmung der Umschließungsflächen
- zu hohe Lichtleistungen

# Maßnahmen

# Kühlkette

## **Kühlkette nicht abreißen lassen!**

- vom Kühlfahrzeug/-container direkt ins Kühllager oder -möbel
- in warmen Räumen zwischengelagertes Kühlgut nimmt Wärme aus der Umgebung auf > neben der Nachkühlung des Kühlguts ist auch die Nacherwärmung der Räume erforderlich
- Anlieferungstemperatur muss Kühllager- bzw. -möbeltemperatur entsprechen (Ausnahme: Zweck Ab-/Tiefkühlung)
- jedes Grad Übertemperatur kostet Geld



# Kühltemperaturen

## Kühltemperaturen nicht unnötig Absenken!

### Temperaturempfehlungen des BfR (ehem. BgVV)

Lebensmittel	Temperatur in °C	Meßort
Milch	+ 8	Produkt
Milchprodukte	+ 10	Produkt
Fleisch	+ 2....+ 7 je nach Art	Produkt/Lager
Muscheln, lebend	+ 10	Lager
Fisch u. Schalentiere	+ 2	Lager
Hühnereier	+ 7	Lager
Eiprodukte	+ 4....+ 7 je nach Art	Produkt/Lager
Backwaren mit Füllungen u. frische Salate	+ 7	Lager
Tiefgefrorene Lebensmittel	- 18	Produkt
Gefrorenes Fleisch	- 12	Produkt

Tore und Türen

## **Tore und Türen von Kühllagern schließen!**

## **Übergänge LKW-Kühllager abdichten!**

durch Tore und Türen bricht warme und feuchte Umgebungsluft in das Kühllager ein > zusätzlicher Kältebedarf

Abhilfe durch

- Schleusen, ggf. mit separater Luftentfeuchtung
- Schnellauftore (Auf: 1,5...2,5 m/s / Zu: 0,5 m/s)
- aufblasbare PVC- oder PU- Abdichtungen

# Schnellauftore



# Aufblasbare Torabdichtungen



## Beleuchtung

**Energiesparende Lampen einsetzen!**

**Vorschaltgeräte außerhalb des Kühlraums installieren!**

**Beleuchtungsleistung an den tatsächlichen Bedarf anpassen!**

**Durch Einsatz von Reflektoren Lampenanzahl reduzieren!**

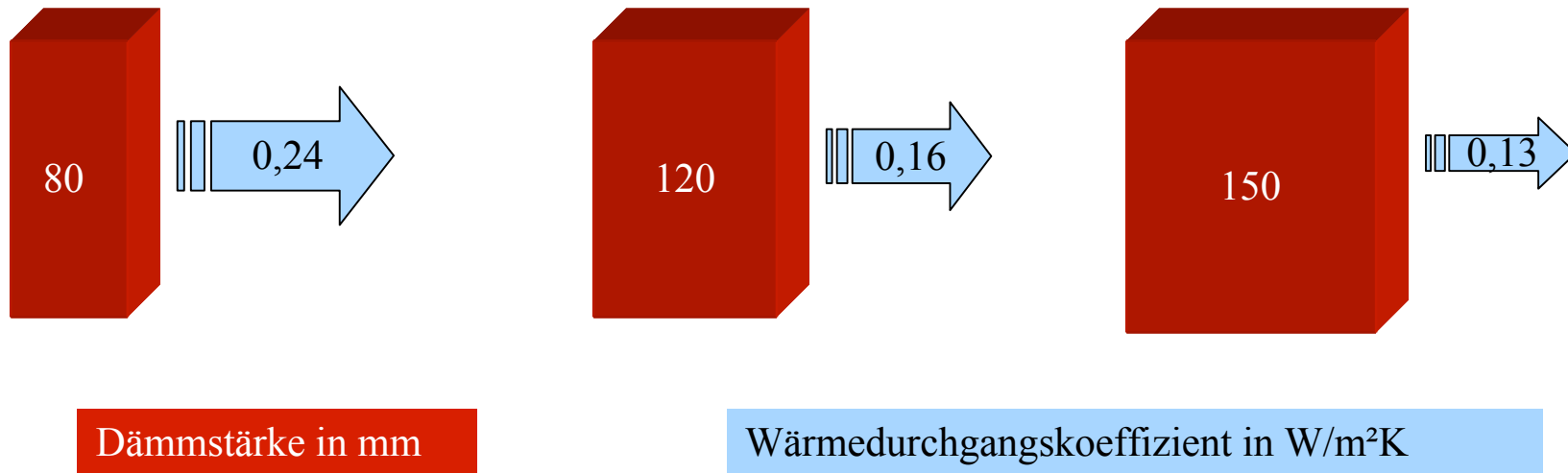
**Beleuchtung außerhalb der Be - und Entladezeiten abschalten!**

- Einsatz von Türkontakten und/oder Präsenzmeldern
- Die Beleuchtungsenergie wird in vollem Umfang in Wärme umgewandelt und muß daher aus dem Kühlraum „weggekühlt“ werden. Deshalb sollten alle Maßnahmen ergriffen werden, die zur Reduzierung der Beleuchtungswärme beitragen.

# Wärmedämmung

## Dämmstärken von Außenwänden und Toren/Türen erhöhen!

- Durch die Außenhaut von Kühllagern dringt Umgebungswärme in das Kühllager. Durch die Verstärkung der Wärmedämmung kann dieser Wärmeeintrag deutlich gesenkt werden.



# Ventilator

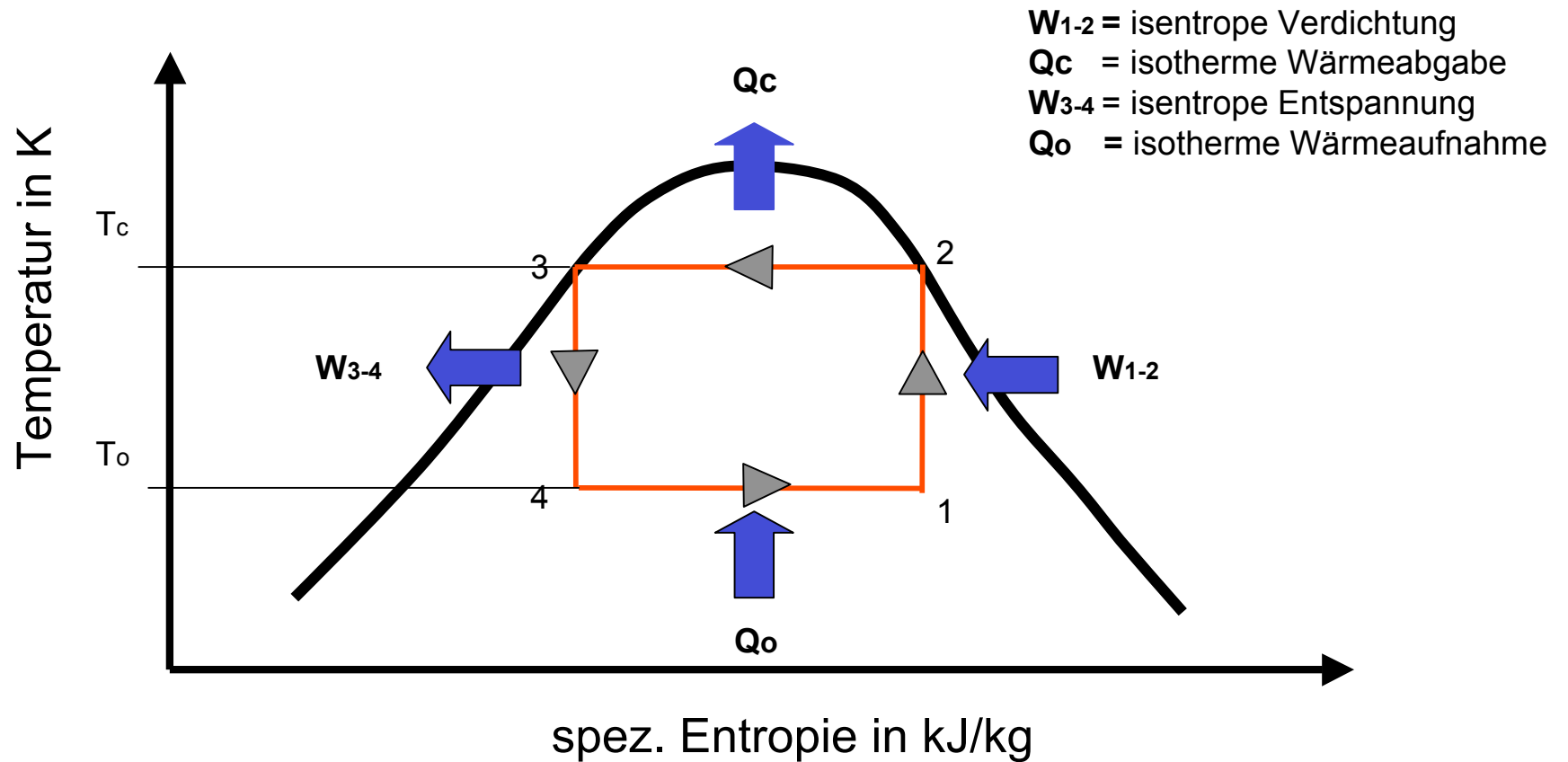
## Ventilator temperaturabhängig regeln!

- Der Antriebsmotor des Ventilators gibt im Betrieb Wärme ab, die als zusätzliche Kühllast das Kälteversorgungssystem belastet. Bedarfsunabhängiger Dauerbetrieb bei Höchstleistung führt zu unnötigen Energieverbräuchen.
- Durch den Einsatz einer kühlraumtemperaturabhängigen Ventilatorregelung (stufig, oder stufenlos mit Frequenzumformer) können diese Energiemengen und Antriebsenergien gespart werden.



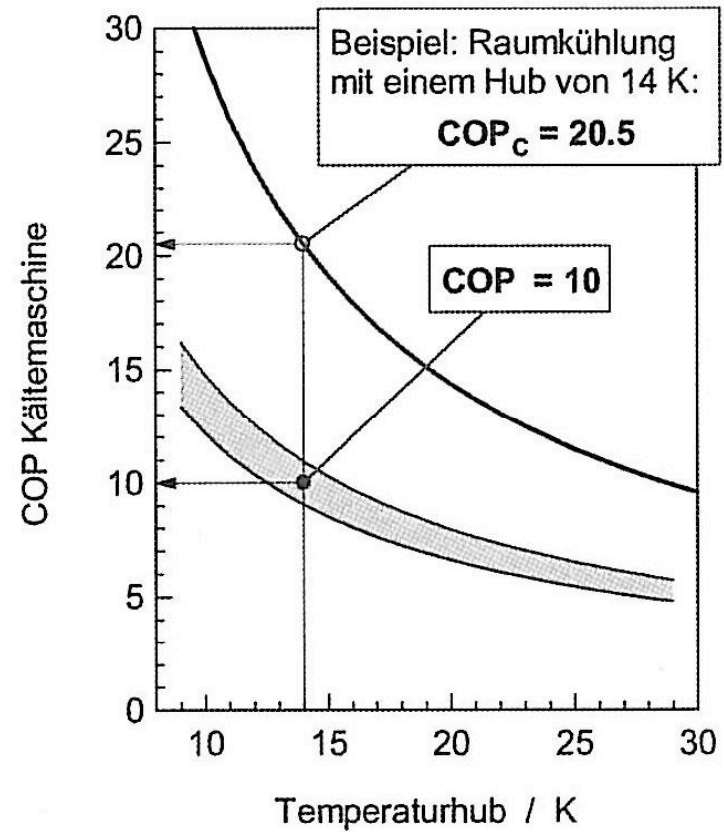
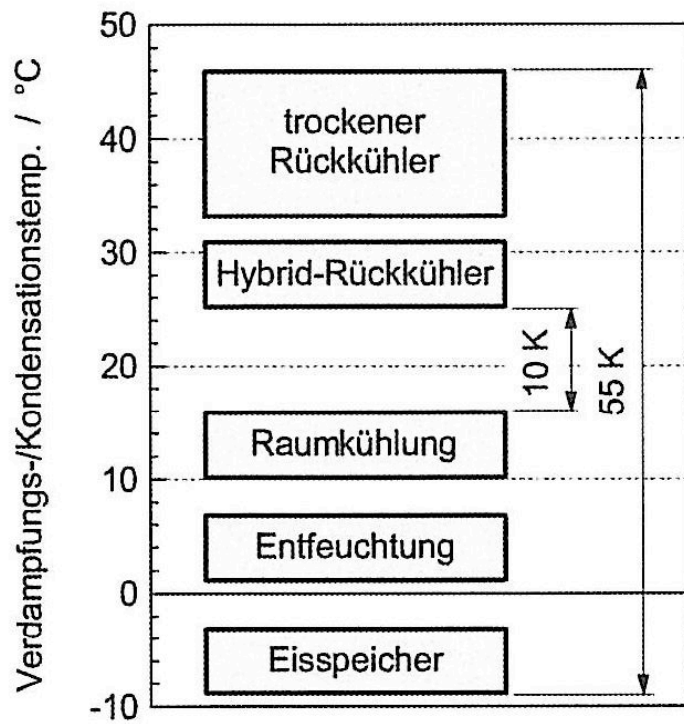


# Vergleichsprozess = Carnot-Prozess



$$\text{Ideale Carnot'sche Leistungszahl } \varepsilon_{\text{KM,C}}^* = \frac{T_o^*}{T_c^* - T_o^*}$$





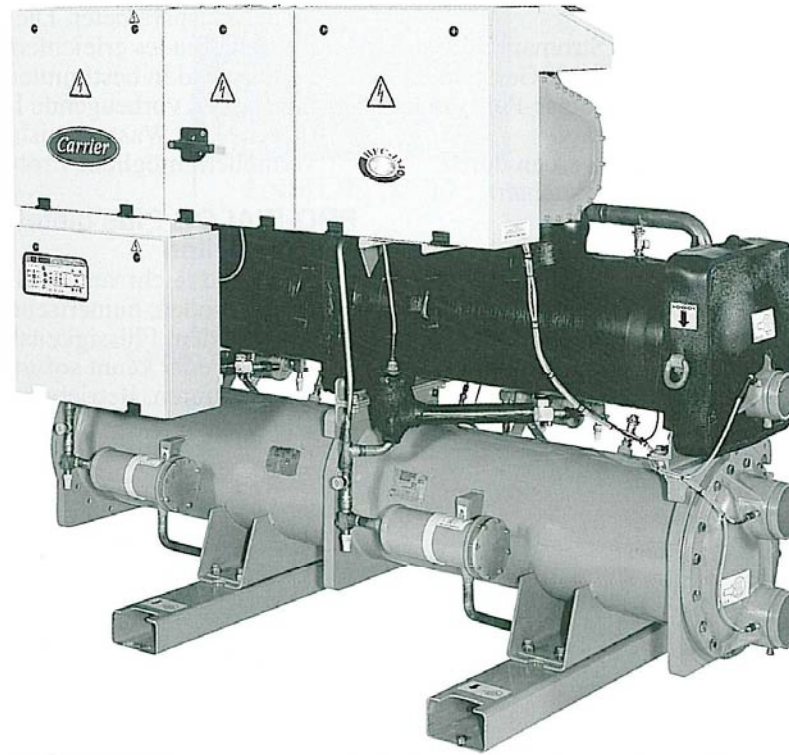
# Kälteerzeugungstechnologien

# Verfahren zur Kälteerzeugung / Kühlung

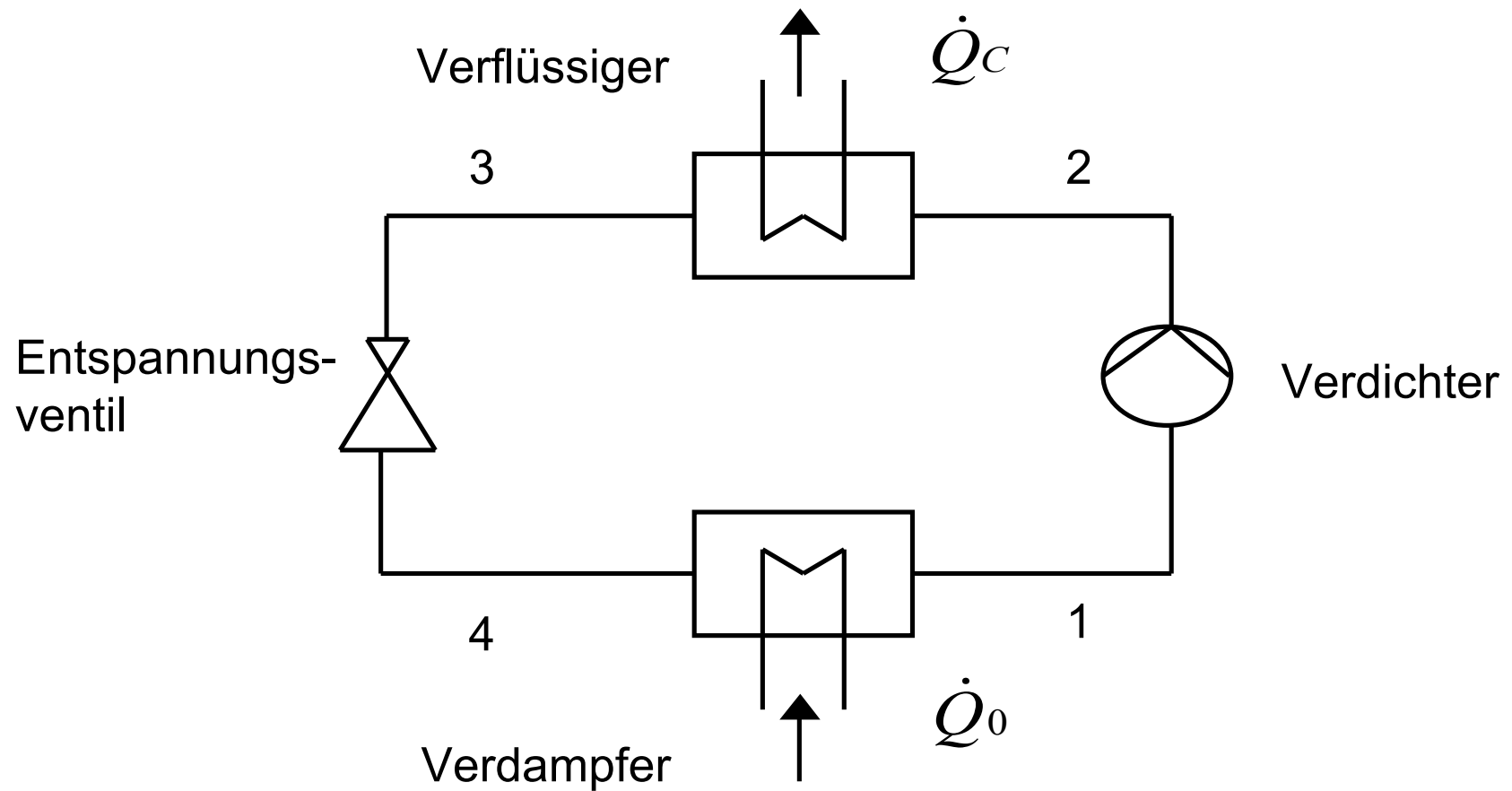
- Kompressionskälteverfahren
- Absorptionskälteverfahren
- Adsorptionskälteverfahren
- Kaltgasverfahren
- Desiccative and Evaporative Cooling (DEC) / Sorptionsgestützte Kühlung
- Erdreichkühlung - Luft
- Erdreichkühlung - Wasser
- Freie Kühlung (Rückkühlwerke)
- Kontrollierte Nachtlüftung, natürlich oder mechanisch
- Aquifer-Speicher / Kühlung mit Grundwasser
- Fensterlüftung (ohne Klimatisierung)

# Die Standardkälteversorgung

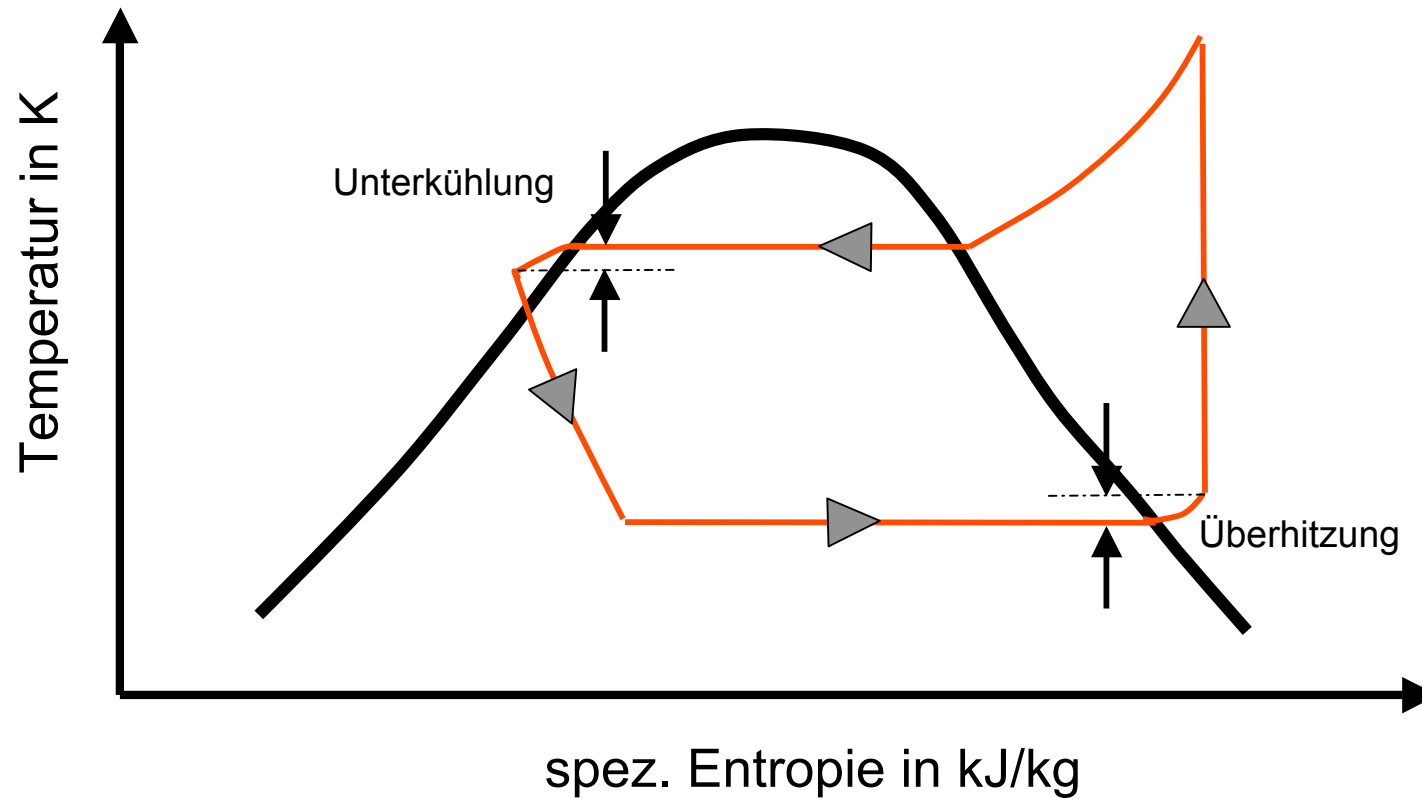
# Kompressionskältemaschine



# Kompressionskälteprozess

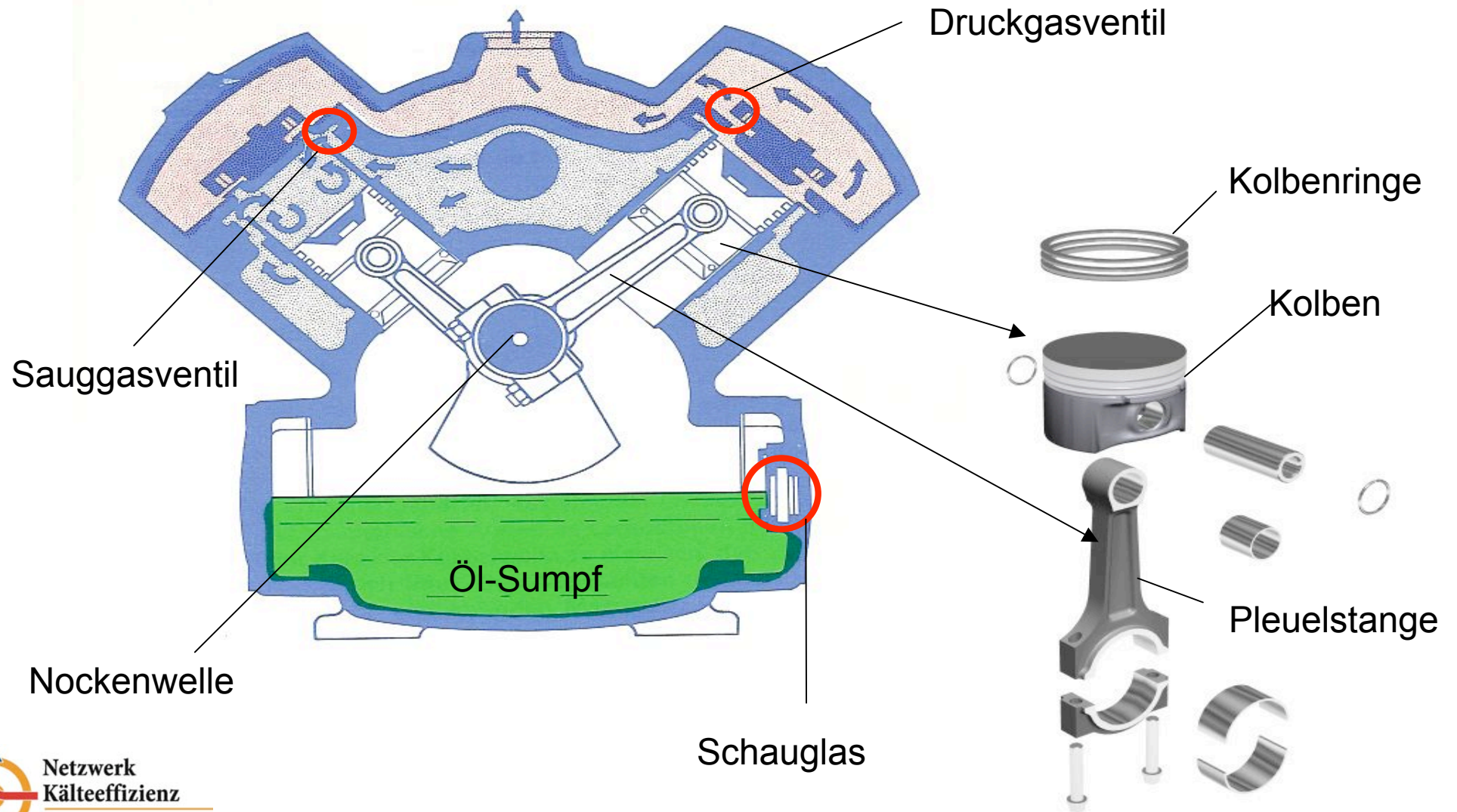


# Reale Anlage im T,s-Diagramm



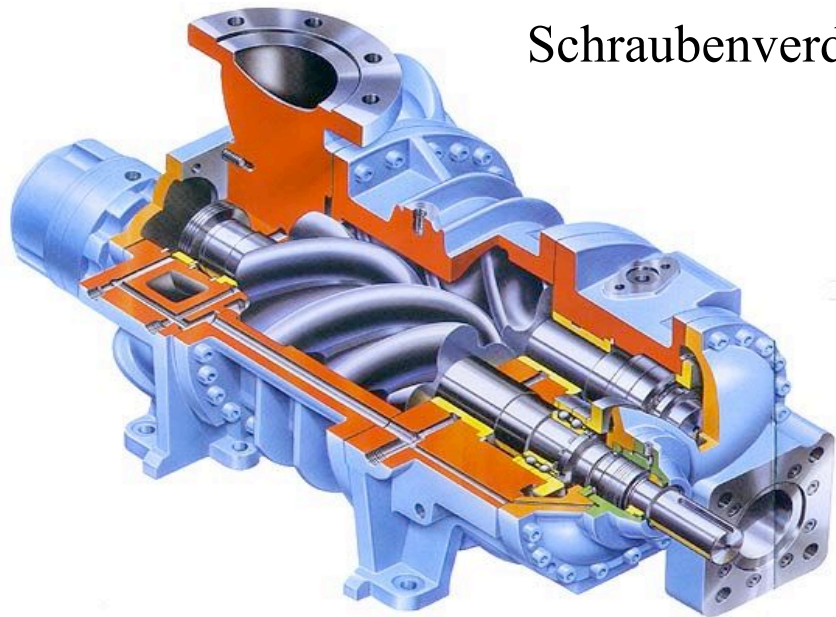
$$\text{Gütegrad } \eta_{CK} = \frac{\epsilon_{KM}}{\epsilon_{KM,C}} \quad (0,5 \dots 0,6)$$

# Hubkolbenverdichter





# Schrauben- und Turboverdichter



Schraubenverdichter



Turboverdichter



Saugseite

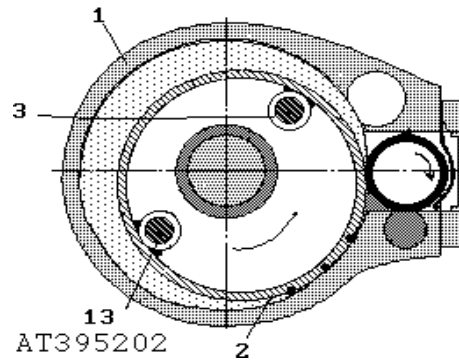


Druckseite

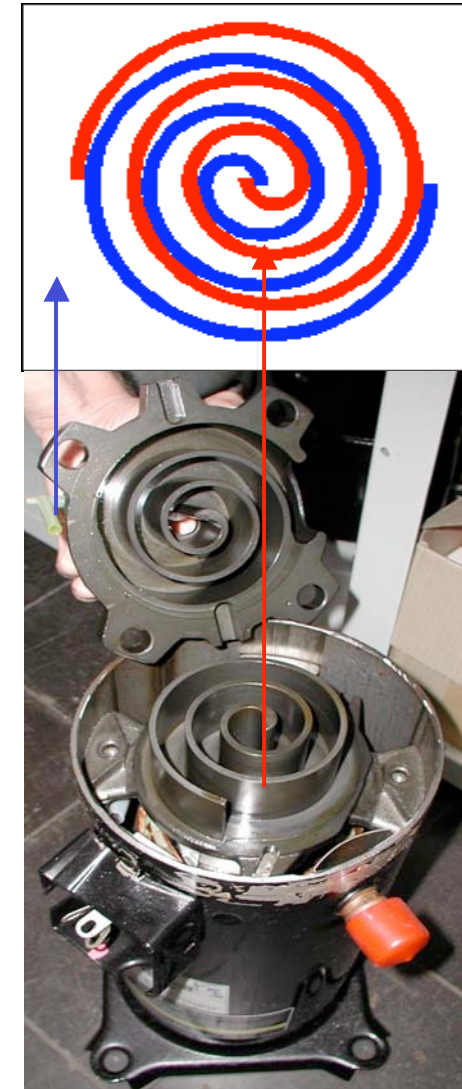
# Rollkolben- und Scrollverdichter



Rollkolben-  
prinzip



Spiral- oder  
Scrollverdichter

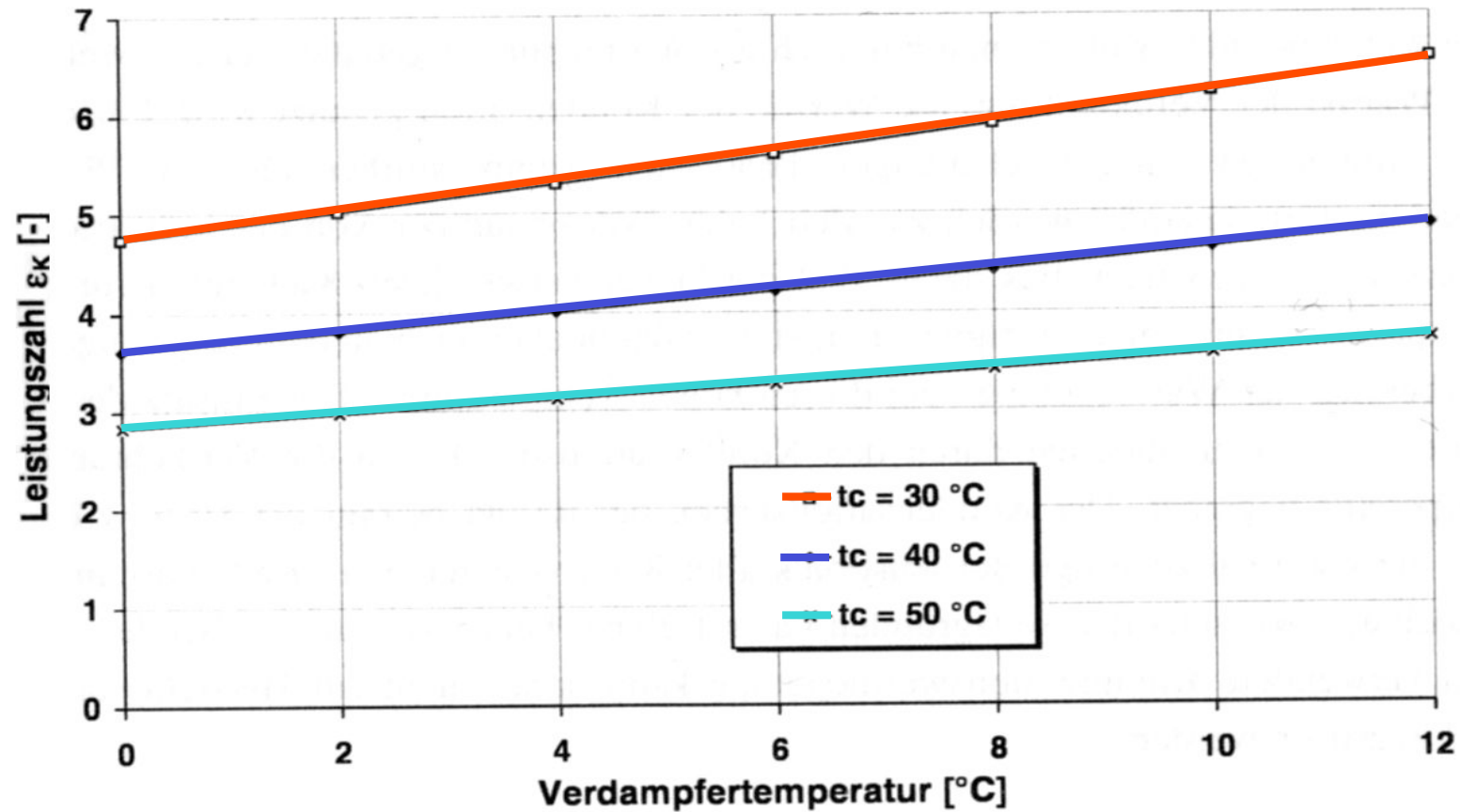


# Leistungsbereiche und – zahlen verschiedener Kompressionskältemaschinen

Verdichterbauart	$Q_0^*$ [kW]	Leistungszahl $\varepsilon$
Hubkolbenverdichter	0,3...1200	2,4...6,5
Schraubenverdichter	60...6000	3,9...6,6
Turboverdichter	1800...30000	5,8...6,6
Rollkolbenverdichter	6,0...24	3,4...5,4
Scrollverdichter	3,0...100	3,2...4,9

\* bei R 134a,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $t_C = 40^\circ\text{C}$ ,  $t_U = 35^\circ\text{C}$ ,  $q_{0,\text{vol}} = 0,6 \text{ kW/m}^3$

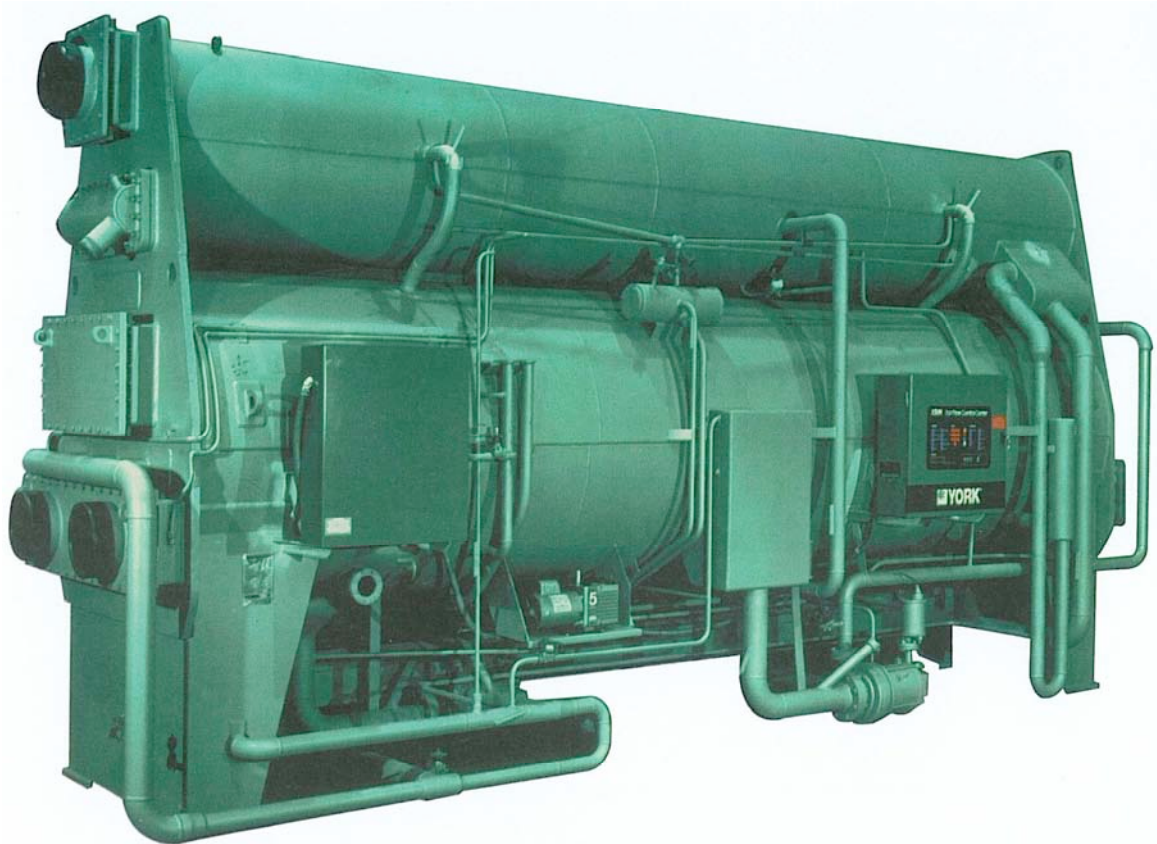
# Leistungszahl $\epsilon = f(t_0, t_c)$



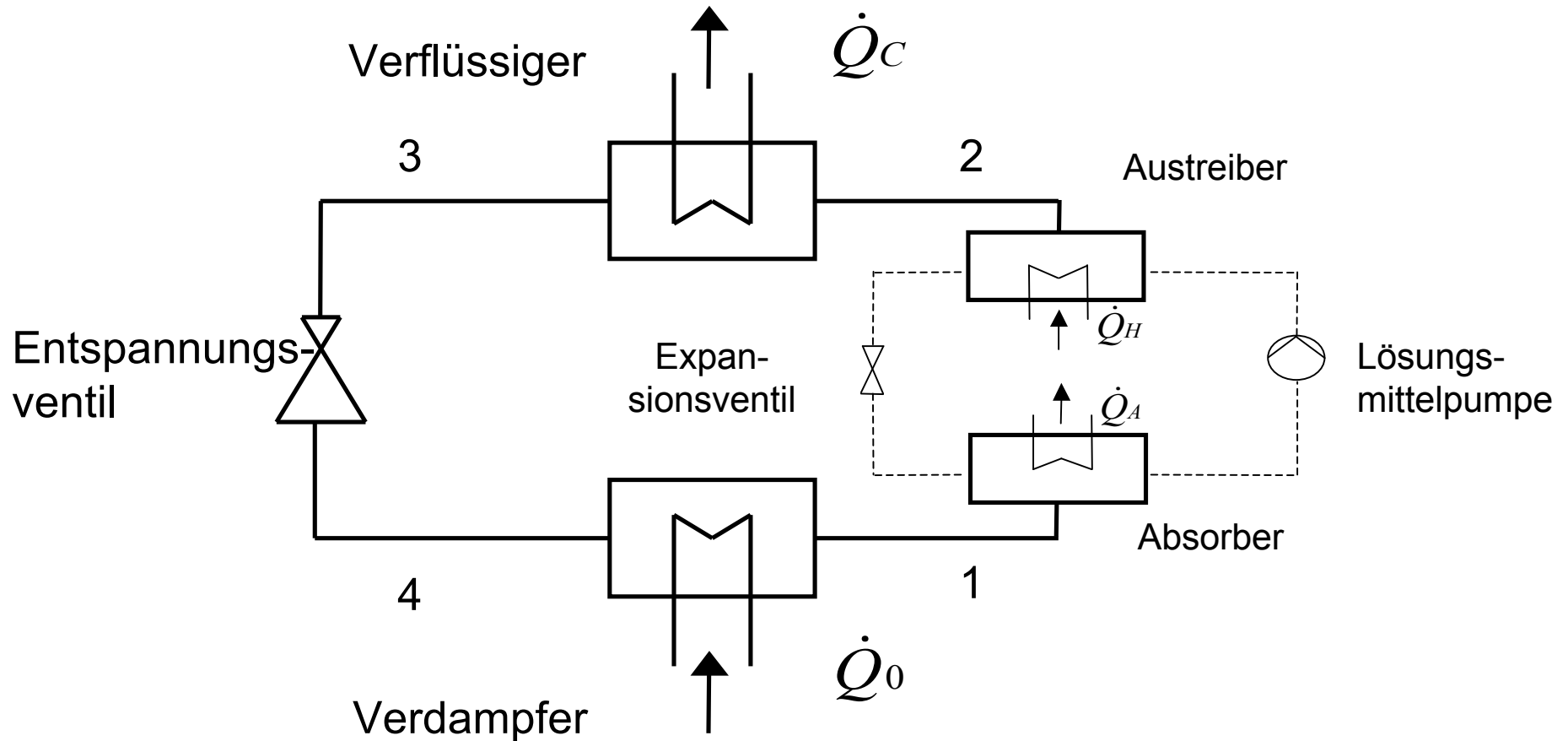
# Absorptionskältemaschinen



# Absorptionskältemaschine



# Schema Absorptionskälteprozess



# Antriebsenergie und Kältemittel der Absorptionskältemaschine

Antriebswärme	Medium			
	Heißwasser	Dampf	Erdgas/Propan	Heizöl
Abwärme	X	X		
Fernwärme	X	X		
Solarwärme	X			
Frischwärme	X	X		
Direktbefeuerung			X	X

Einsatzbereich	Kältemittel	Absorptionsmittel
Klimatisierung / Kühlung > 0°C	H <sub>2</sub> O	LiBr
Prozesskälte < 0°C	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O



# Abwärme von KKM und AbKM

## Kompressionskältemaschine

Abwärme:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Ab_{KKM}} &= \dot{Q}_C = \dot{Q}_0 + P \\ &= \dot{Q}_0(1 + 1/\varepsilon) \\ &\text{bei } \varepsilon_K = 4 \\ \dot{Q}_{Ab_{KKM}} &= \dot{Q}_0 * 1,25\end{aligned}$$

## Absorptionskältemaschine

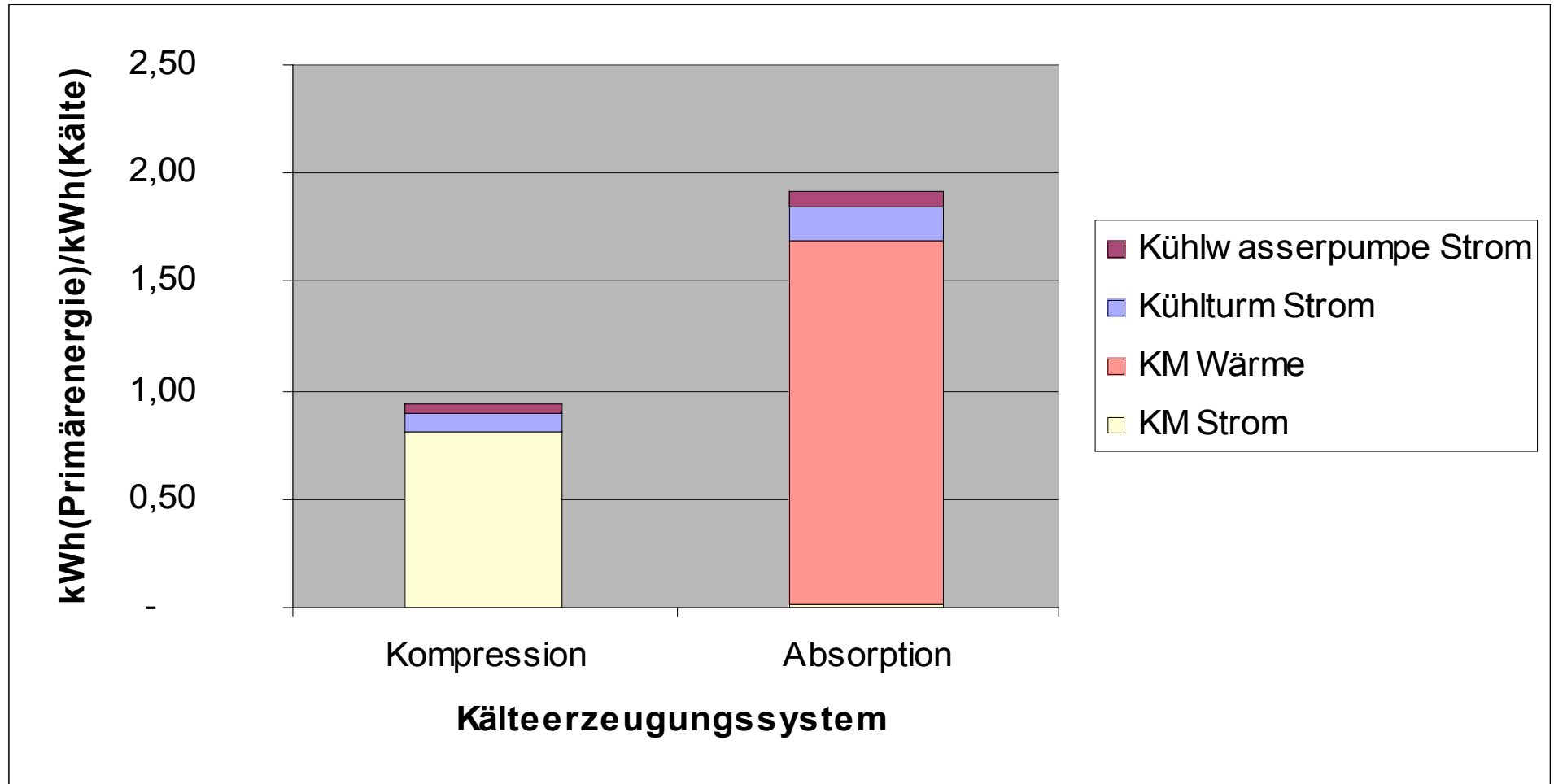
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Ab_{AbKM}} &= \dot{Q}_C + \dot{Q}_A = \dot{Q}_0 + \dot{Q}_H \\ &= \dot{Q}_0(1 + 1/\zeta_K) \\ &\text{bei } \zeta_K = 0,7 \\ \dot{Q}_{Ab_{AbKM}} &= \dot{Q}_0 * 2,43\end{aligned}$$

→

$$\frac{\dot{Q}_{Ab_{AbKM}}}{\dot{Q}_{Ab_{KKM}}} = \frac{2,43}{1,25} = 1,94$$

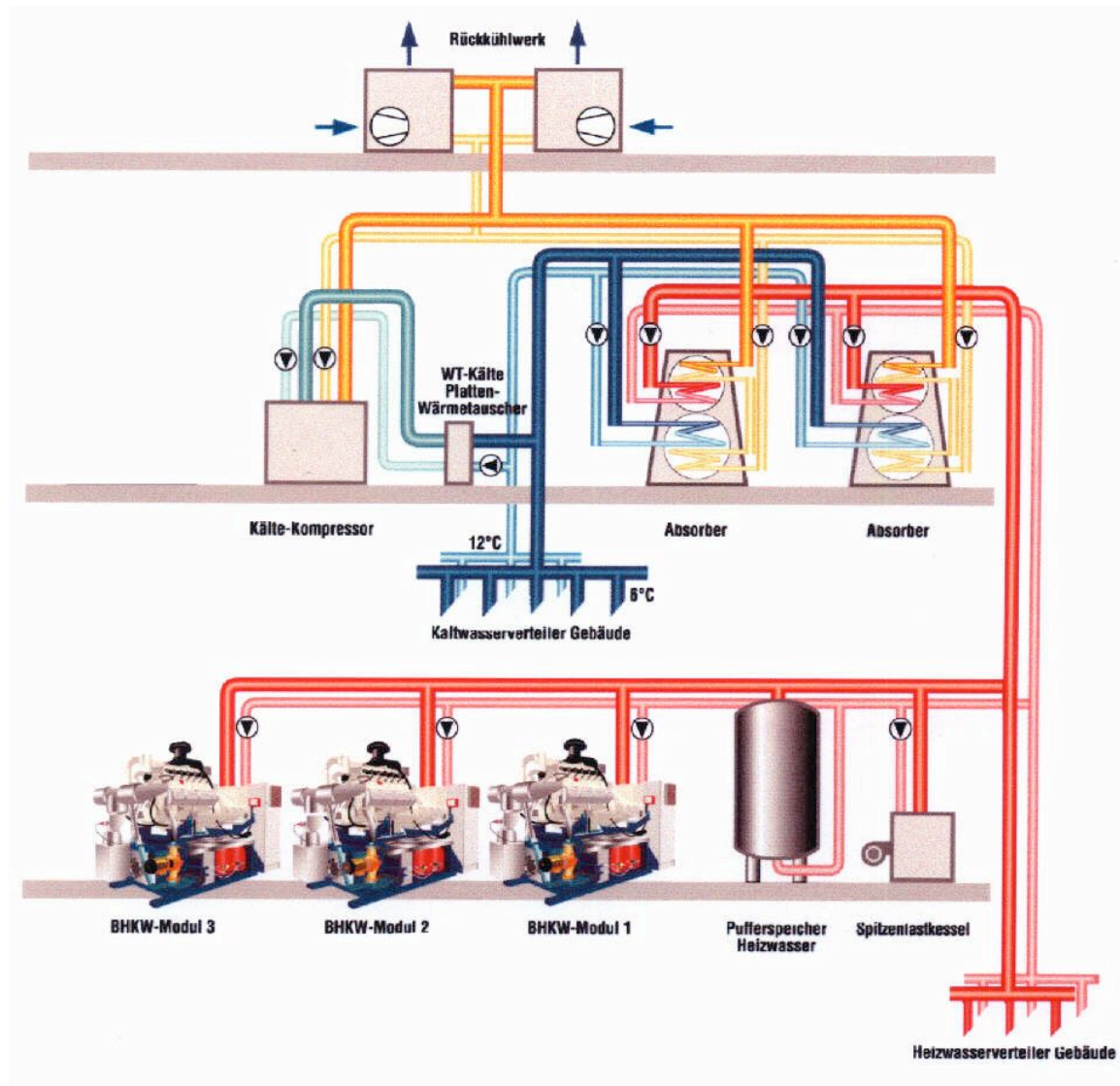
d.h. Rückkühlwerk, Kühlwasserpumpen und deren Antriebsenergie bei AbKM nahezu **doppelt so groß** wie bei KKM!

# Effizienzvergleich KKM - AbKM



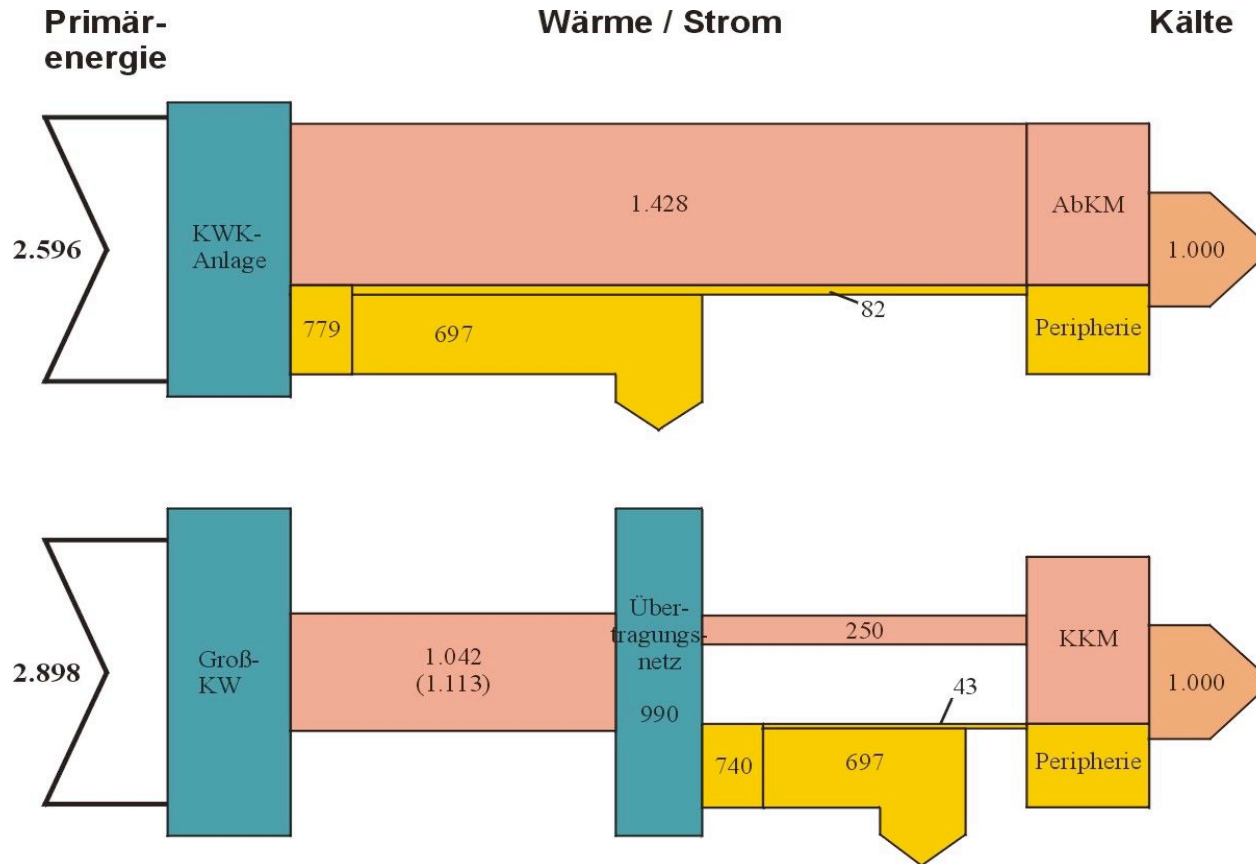
Vergleich

# Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung



# Effizienzvergleich

## konventionelle Kälteversorgung : Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung



### Primärenergieeinsparung bei unterschiedlichen Betrachtungsweisen

	5% Netzverluste	12% Netzverluste
mit Peripherie	10%	14%
ohne Peripherie	16%	20%

Vergleich

# Bewertung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

KWKK ist ökologisch vorteilhaft

- + senkt den Primärenergiebedarf
- + reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen

KWKK verstetigt die Nutzung der Wärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung

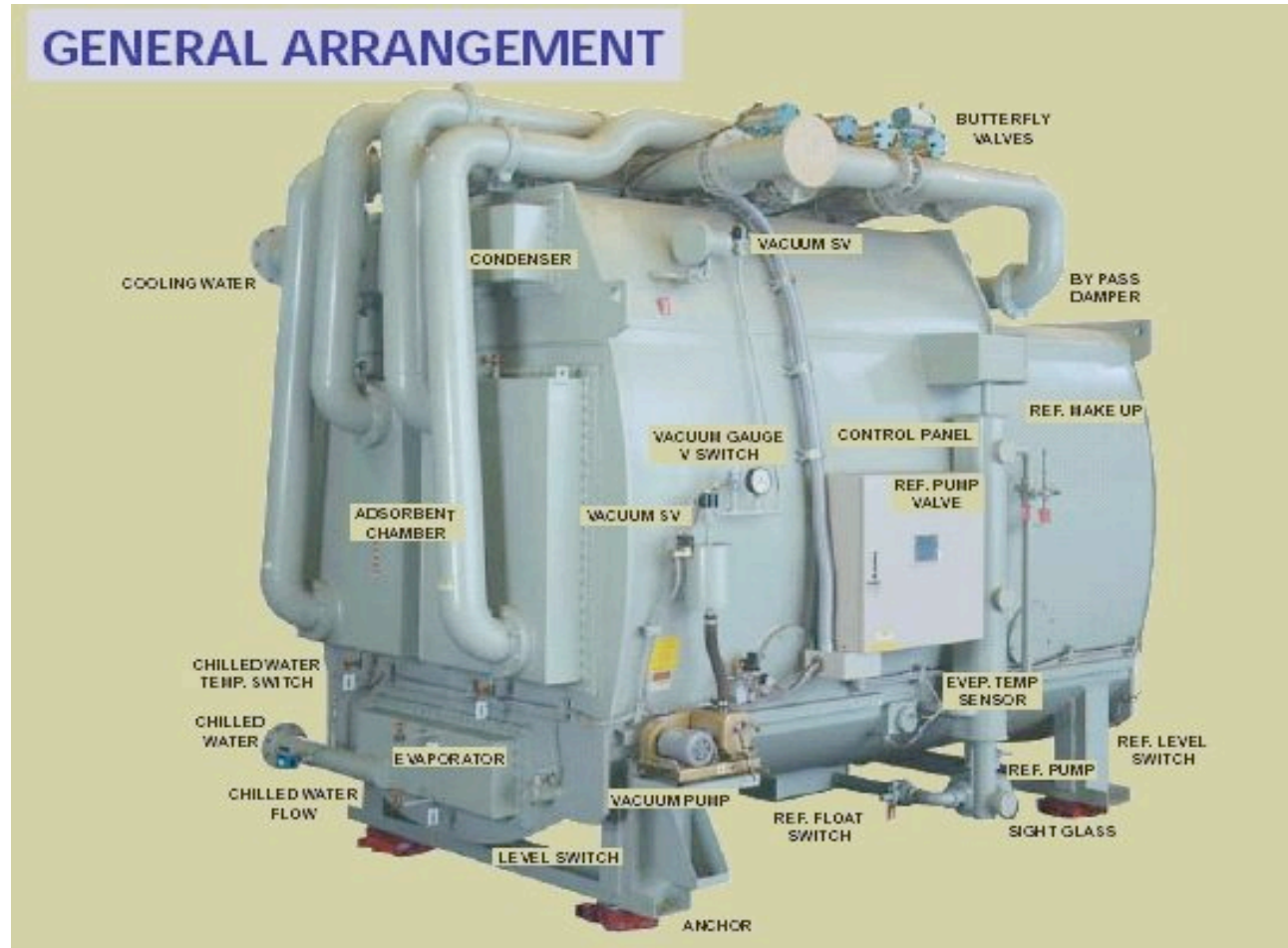
➔ Laufzeiterhöhung der KWK-Anlage, d.h. bessere Auslastung

KWKK ist wirtschaftlich bei

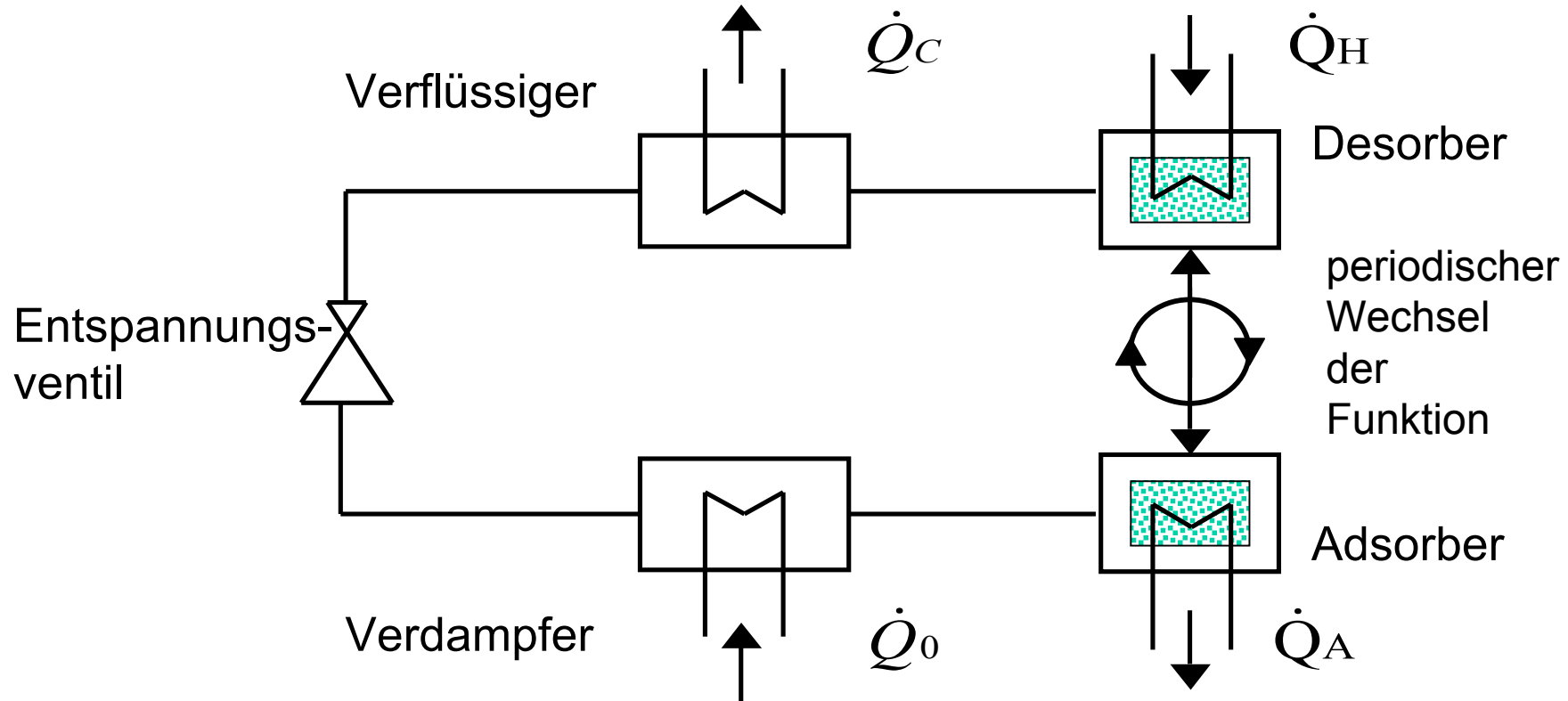
- + niedrigen Brennstoffpreisen
- + höheren Strompreisen  
(insbesondere bei zweigliedriger Verbrauchsabrechnung, d.h. Leistungspreis und Arbeitspreis)
- + Nutzung der KWK-Anlage für die Not- bzw. Ersatzstromversorgung  
(Verminderung von Zusatzinvestitionen)

# Adsorptionskältemaschinen

# Adsorptionskältemaschine



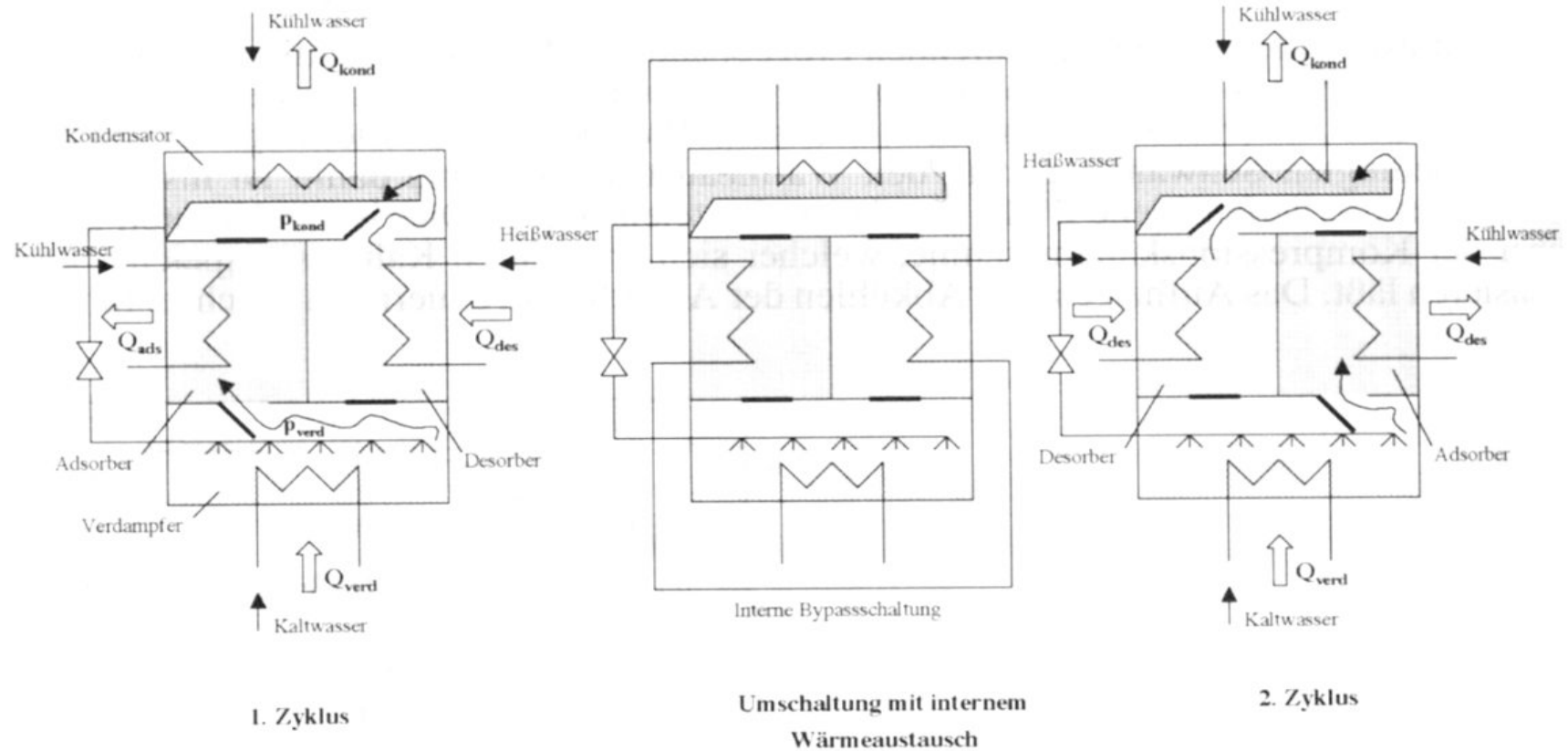
# Schema Adsorptionskälteprozess



$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_H = \dot{Q}_c + \dot{Q}_A + \dot{Q}_V \quad \zeta^K = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = 0,45 \dots 0,65 \quad \text{Gütegrad } \eta_c \approx 0,6$$

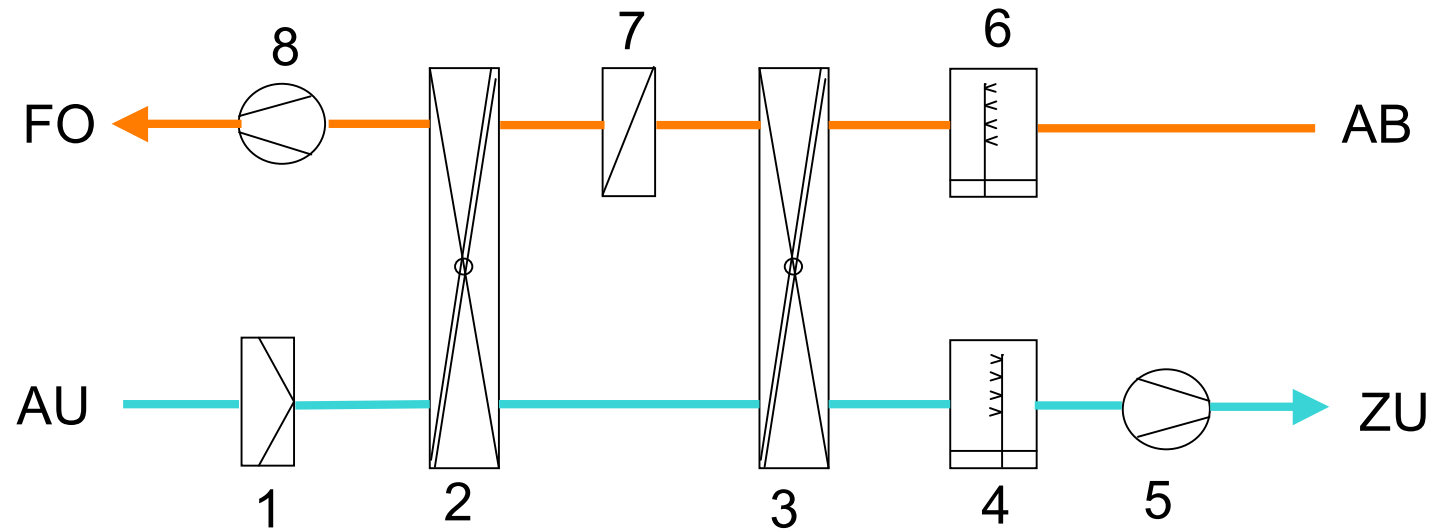


# Funktionsweise der Adsorptionskältemaschine



# Desiccative & Evaporating Cooling (DEC)

# Desiccative & Evaporative Cooling (DEC)



1 Filter

2 Luftentfeuchtungsrotor

3 WRG

4 Zuluftbefeuchter

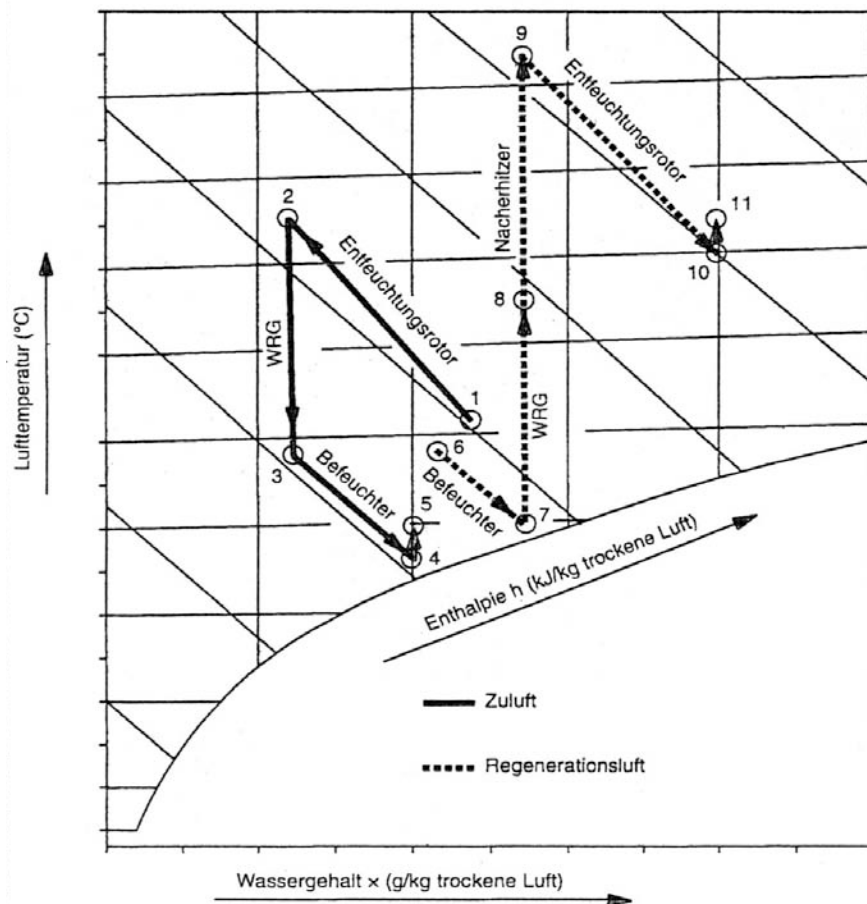
5 Zuluftventilator

6 Regenerationsluftbefeuchter

7 Regenerationsluftheritzer

8 Regenerationsluftventilator

# DEC-Kälteverfahren im h,x-Diagramm



## Zuluft

- 1-2 Trocknung der Außenluft mittels Sorptionsregenerator
- 2-3 Vorkühlung der Außenluft mittels Wärmerückgewinnungssystem
- 3-4 Kühlung der Luft auf die gewünschte Zulufttemp. mittels regelbarem Verdunstungskühler
- 4-5 Erwärmung durch Leistungsaufnahme des Zuluftventilators

## Regenerationsluft

- 6-7 Kühlung der Regenerationsluft (Abluft bzw. in Sonderfällen auch Außenluft)
- 7-8 Erwärmung der Regenerationsluft mittels Wärmerückgewinnungssystem aufgrund Kühlung der Zuluft (2-3)
- 8-9 Nacherwärmung der Regenerationsluft mittels Abwärme aus BHKW, Fernwärme etc.
- 9-10 Desorption der im Sorptionsregenerator enthaltenen Feuchtigkeit (1-2) durch den Regenerationsluftstrom
- 10-11 Erwärmung durch Leistungsaufnahme des Regenerationsluftventilators

# DEC-Kälteverfahren



# DEC-Merkmale

Nutzung von Abwärme und Solarwärme möglich

Keine Gefahrstoffe (Kältemittel), d.h. keine besonderen Anforderungen an Sicherheitstechnik u. Installationsweise

Keine hohen Drücke

Nur praxiserprobte Bauteile

Kein Rückkühlwerk erforderlich

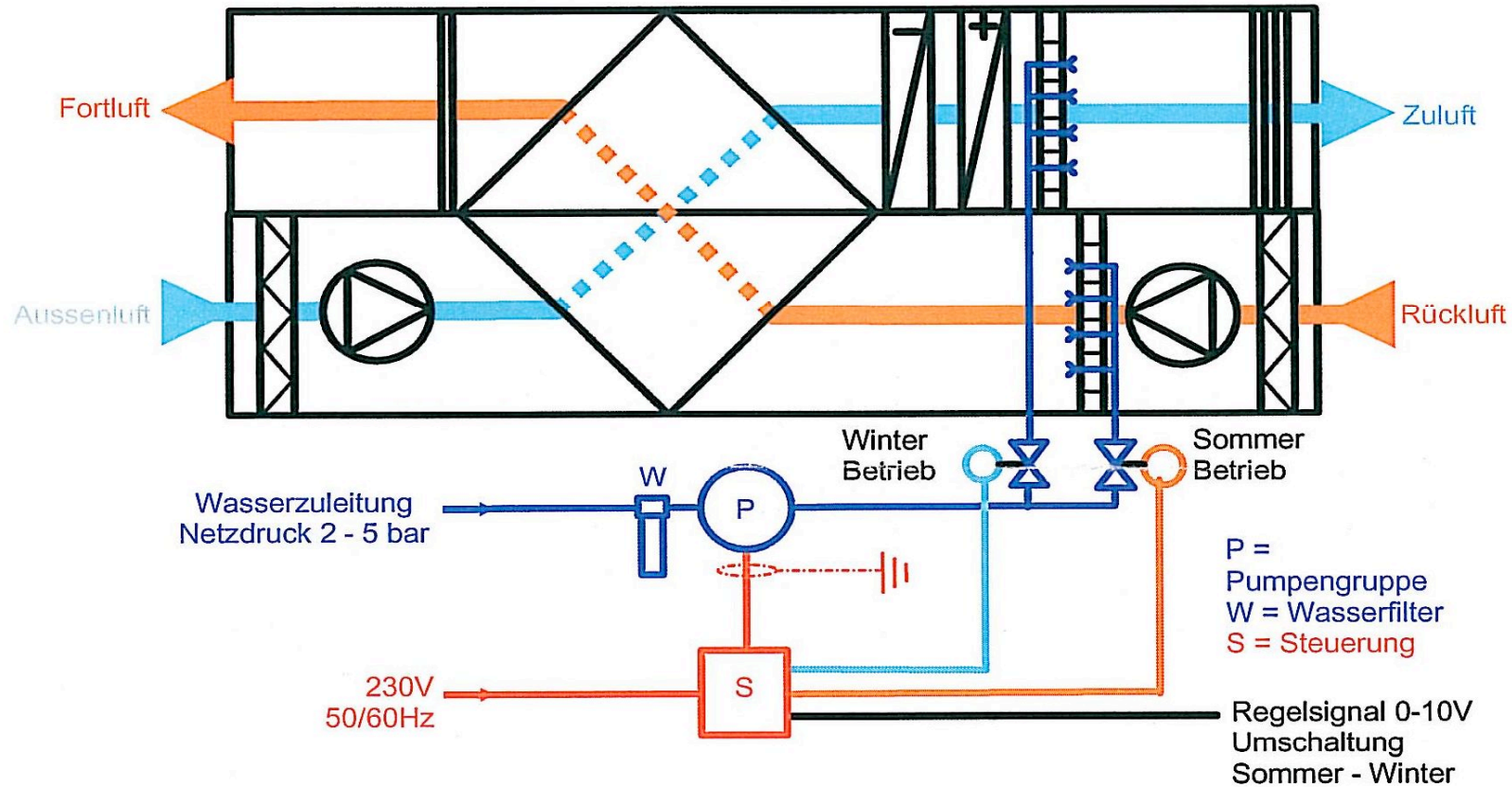
Wg. Rotationsrädern 20% höhere Baugröße als konventionelle Klimageräte

Höhere Ventilatorleistung

Wasseraufbereitung u. Kontrolle der Wasserqualität erforderlich

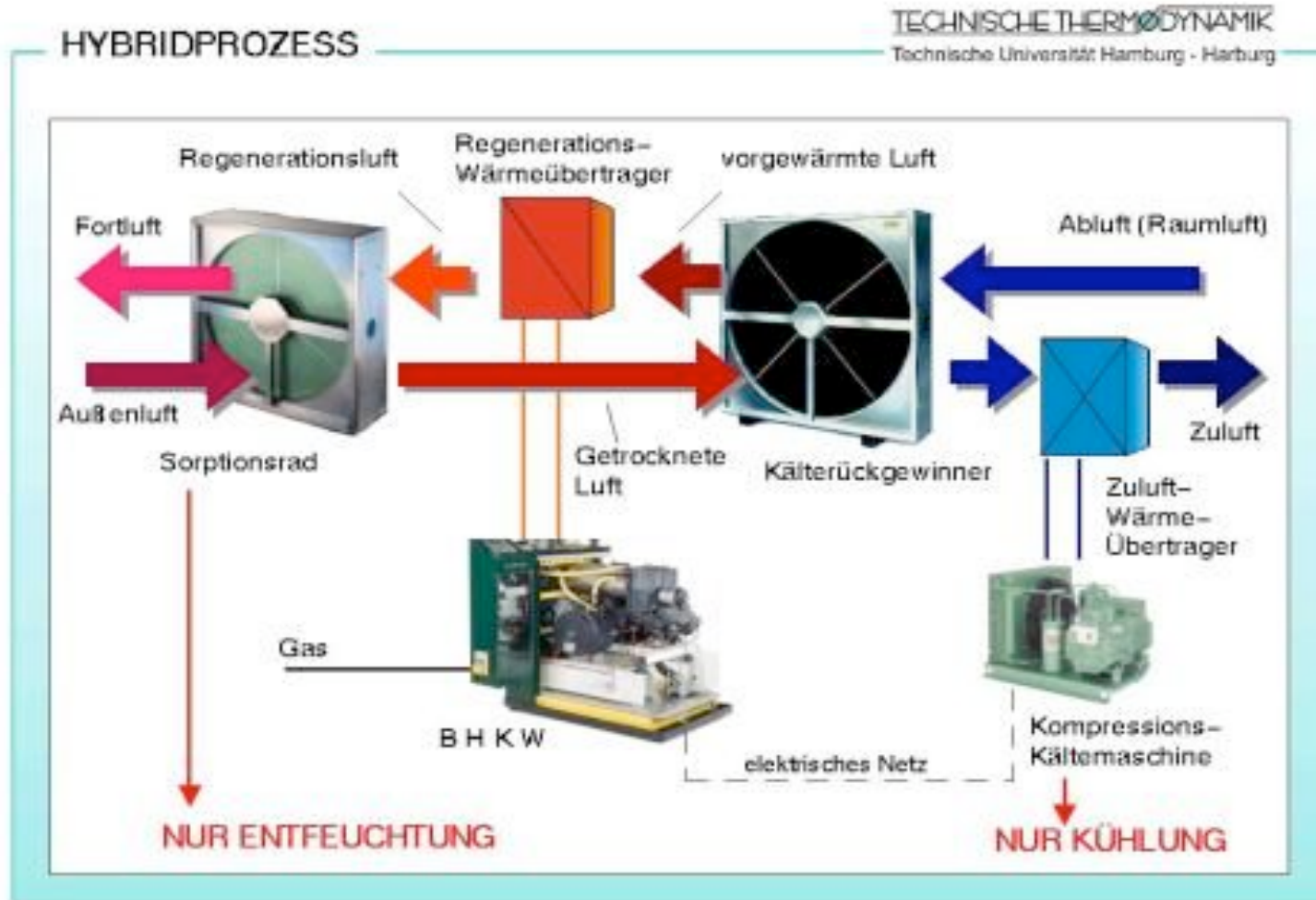
$\zeta_K = 0,6 \dots 0,9$

# Hybrid-System /Wincool/





# Trennung von Entfeuchtung und Kühlung





# Effizienzvergleich

# Effizienzkennzahlen I

## Kompressionskältemaschine

Leistungszahl  $\epsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_{Zu}}$       Arbeitszahl  $\beta_K = \frac{Q_0}{L_{Zu}}$

## Ab- bzw. Adsorptionskältemaschine

Wärmeverhältnis  $\zeta_K = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H}$       aber auch  $= \frac{Q_0}{Q_H}$

**COP (Coefficient of performance)**  $\longrightarrow \epsilon_K$       bzw.       $\zeta_K$

$\dot{Q}_0$       Kälteleistung       $L_{Zu}$       jährl. elektr. Antriebsenergie

$P_{Zu}$       elektr. Antriebsleistung       $\dot{Q}_H$       therm. Antriebsleistung

$Q_0$       jährl. Kälteerzeugung       $Q_H$       jährl. therm. Antriebsenergie

# Effizienzkennzahlen II

Primärenergienutzungszahl oder  
Kältezahl

$$\zeta^{PE} = \frac{Q_0}{PE} = \beta_K \times \eta_{el.} \quad \text{bzw.} \quad = \zeta_K \times \eta_{th.}$$

$PE$  Primärenergie

$\eta_{el.}$  Nutzungsgrad Stromerzeugung

$\eta_{th.}$  Nutzungsgrad Wärmeerzeugung

# Effizienzvergleich der Kältesysteme

Effizienzkennwert	Verfahren			
	Kompression	Absorption	Adsorption	DEC
Arbeitszahl	2,5...5,0	-	-	-
Wärmeverhältnis	-	0,7...1,3	0,45...0,65	0,6...0,9
Nutzungsgrad der Antriebsenergieerzeugung	0,35	0,85	0,85	0,85
Kältezah	0,88...1,75	0,6...1,10	0,38...0,55	0,51...0,76

# Rückkühlung

# Trockenrückkühler

Kühltemperatur  $t_L = 32^\circ\text{C}$

Wirtsch. Rücklauftemp. = 40 - 42°C

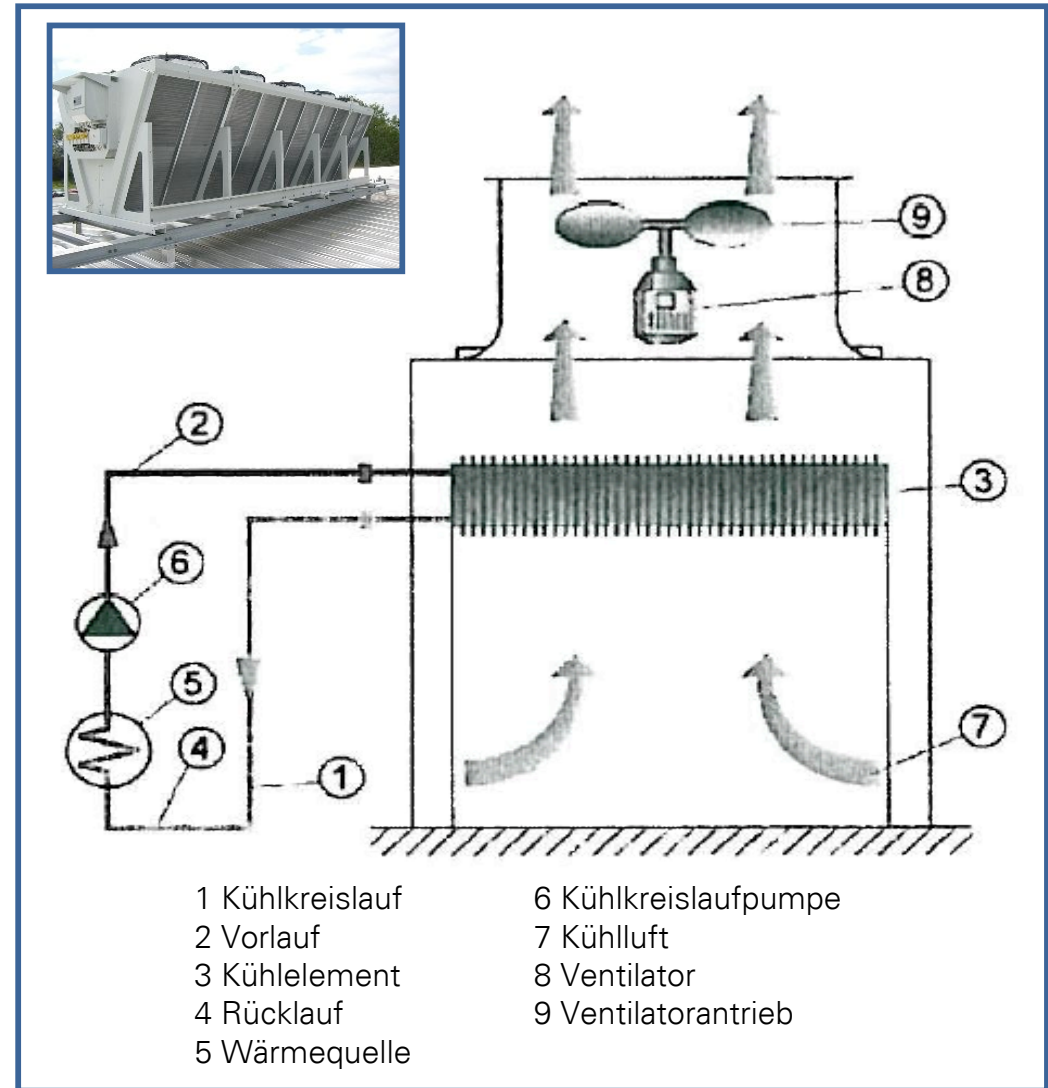
Leistungsdichte ca. 30 kW/m<sup>2</sup>

Vorteile:

- Geringe Wartung
- Grosse Apparateauswahl
- Geringe Investitionskosten
- Freecooling
- Geringes Gewicht

Nachteile:

- Grosser Platzbedarf
- Hohe Verflüssigungstemperatur
- Relativ hoher Stromverbrauch



# Offener Verdunstungskühlturm

Kühltemperatur  $t_f = 21^\circ\text{C}$

Wirtsch. Rücklauftemp. = 28 - 32°C

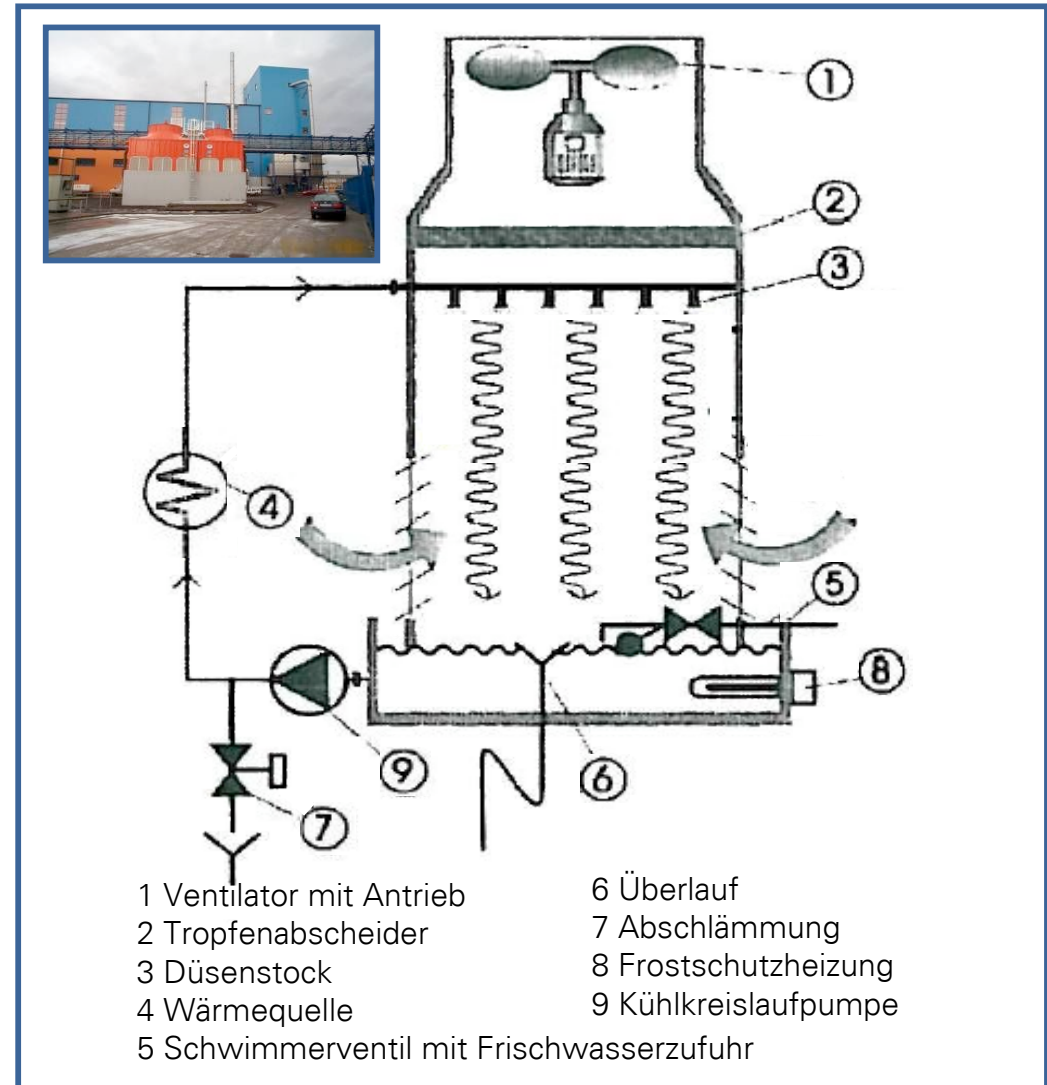
Leistungsdichte ca. 60 - 90 kW/m<sup>2</sup>

Vorteile:

- Grosse Apparateauswahl
- Geringer Platzbedarf
- Tiefe Verflüssigungstemperatur

Nachteile:

- Dampfschwaden
- Hohe Wasserverbrauch
- Hohes Gewicht
- Wasseraufbereitung erforderlich



# Geschlossener Verdunstungskühlturm

Kühltemperatur  $t_f = 21^\circ\text{C}$

Wirtsch. Rücklauftemp. = 28 - 32°C

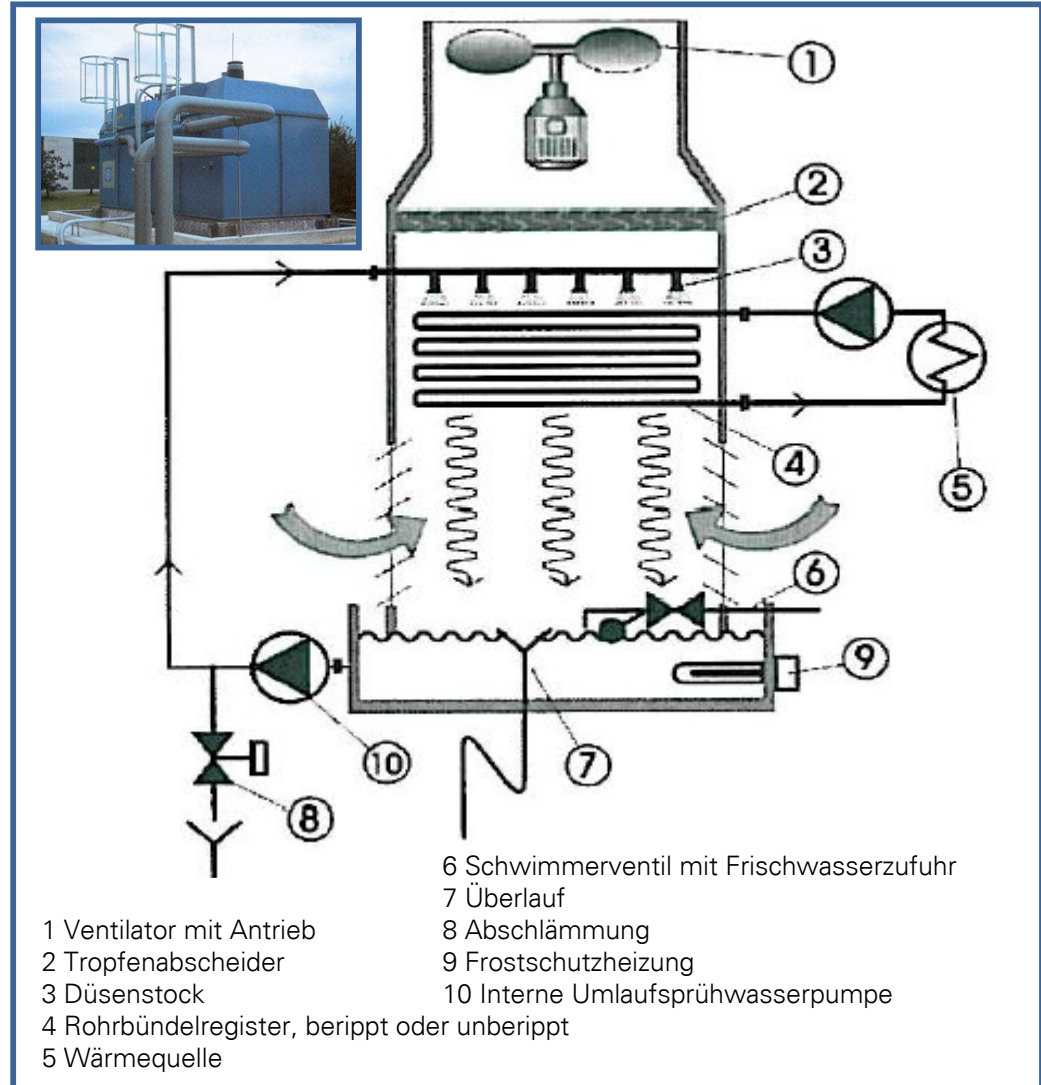
Leistungsdichte ca. 50 - 70 kW/m<sup>2</sup>

Vorteile:

- Grosse Apparateauswahl
- Geringer Platzbedarf
- Tiefe Verflüssigungstemperatur

Nachteile:

- Dampfschwaden
- Hohe Wasserverbrauch
- Hoher Stromverbrauch
- Hohes Gewicht
- Wasseraufbereitung erforderlich





# Hybrider Trockenkühler

Kühltemperatur  $t_L = 32^\circ\text{C}$  und  $t_f = 21^\circ\text{C}$

Wirtsch. Rücklauftemp. =  $25 - 29^\circ\text{C}$

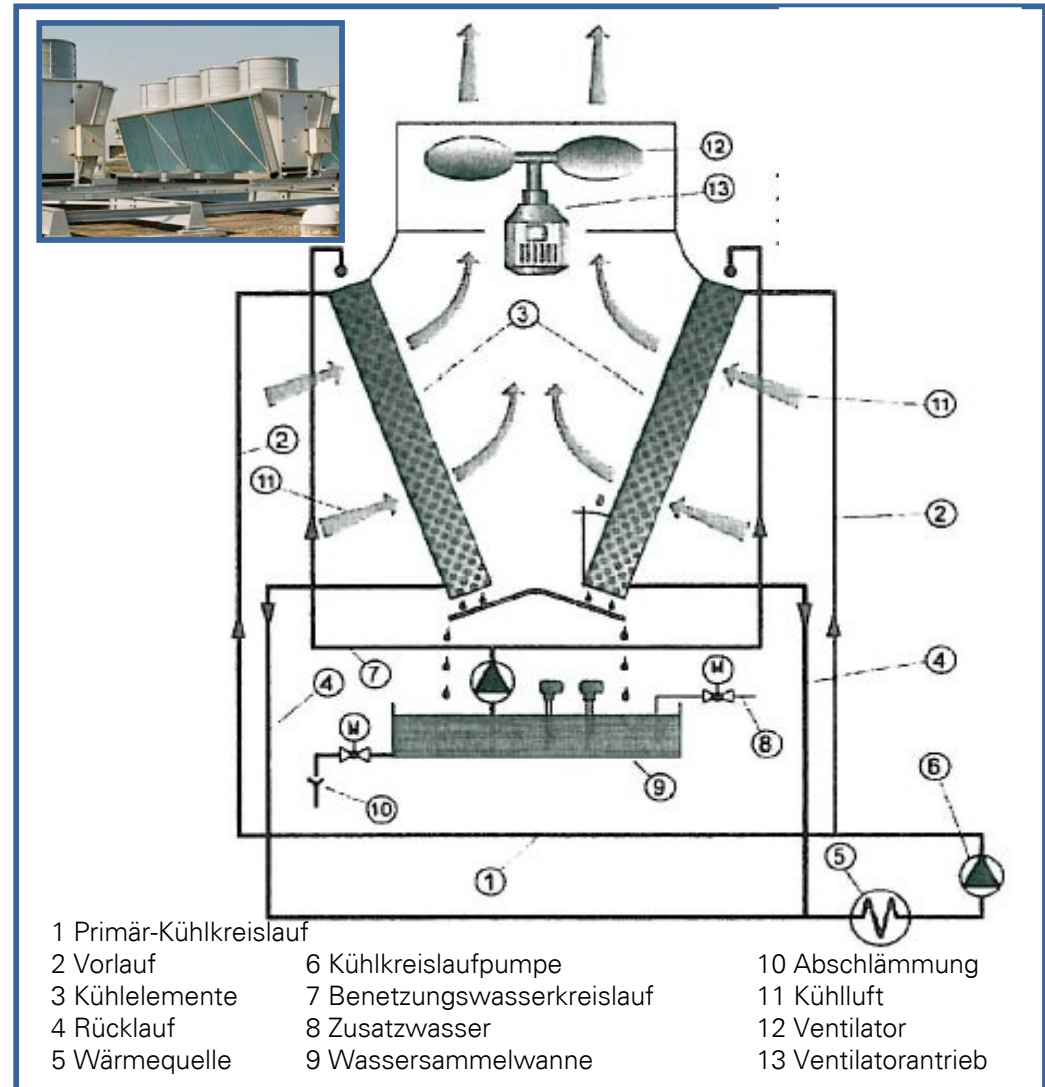
Leistungsdichte ca.  $60 - 80 \text{ kW/m}^2$

Vorteile:

- Keine Dampfschwaden
- Freecooling möglich
- Geringer Wasser- / Stromverbrauch
- Kompakt, wenig Platzbedarf
- Gut zugänglich, servicefreundlich
- Extrem leise ( $< 45 \text{ dB(A)}$  bei  $1.500 \text{ kW}$ )

Nachteile:

- Ungünstig für Schalldämpfer-Anbau (meist aber nicht erforderlich)
- Hohe Investitionskosten
- Wasseraufbereitung erforderlich
- VE-Wasser



# Luftgekühlte Verflüssiger

Horizontale Bauweise  
(Standardbauweise)

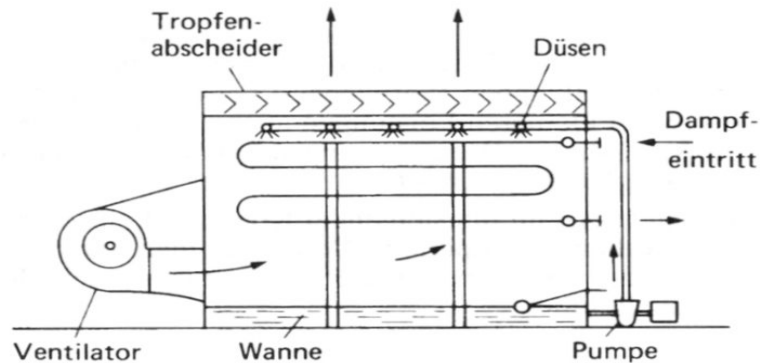


Vertikale Bauweise

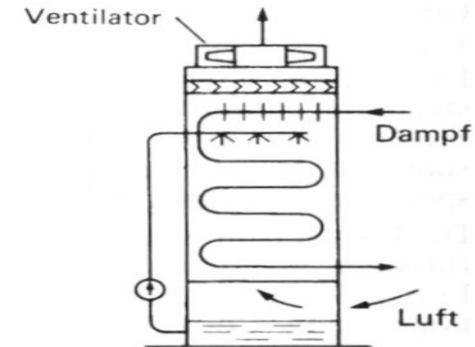


# Verdunstungsverflüssiger

drückender Ventilator



saugender Ventilator



Rohrsystem wird an sehr warmen Tagen mit Wasser besprüht

→ Vergrößerung der Verflüssigungsleistung

Luftdurchsatz: ca.  $100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{kW}$

Wasserumwälzung: ca.  $1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{kW}$

Wasserverbrauch: ca.  $5 \text{ kg}/\text{h} \cdot \text{kW}$

erreichbare Verflüssigungstemp.:  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  bei Feuchtkugeltemperatur von  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

# Optimierung der Kälteversorgung

# Freie Kühlung

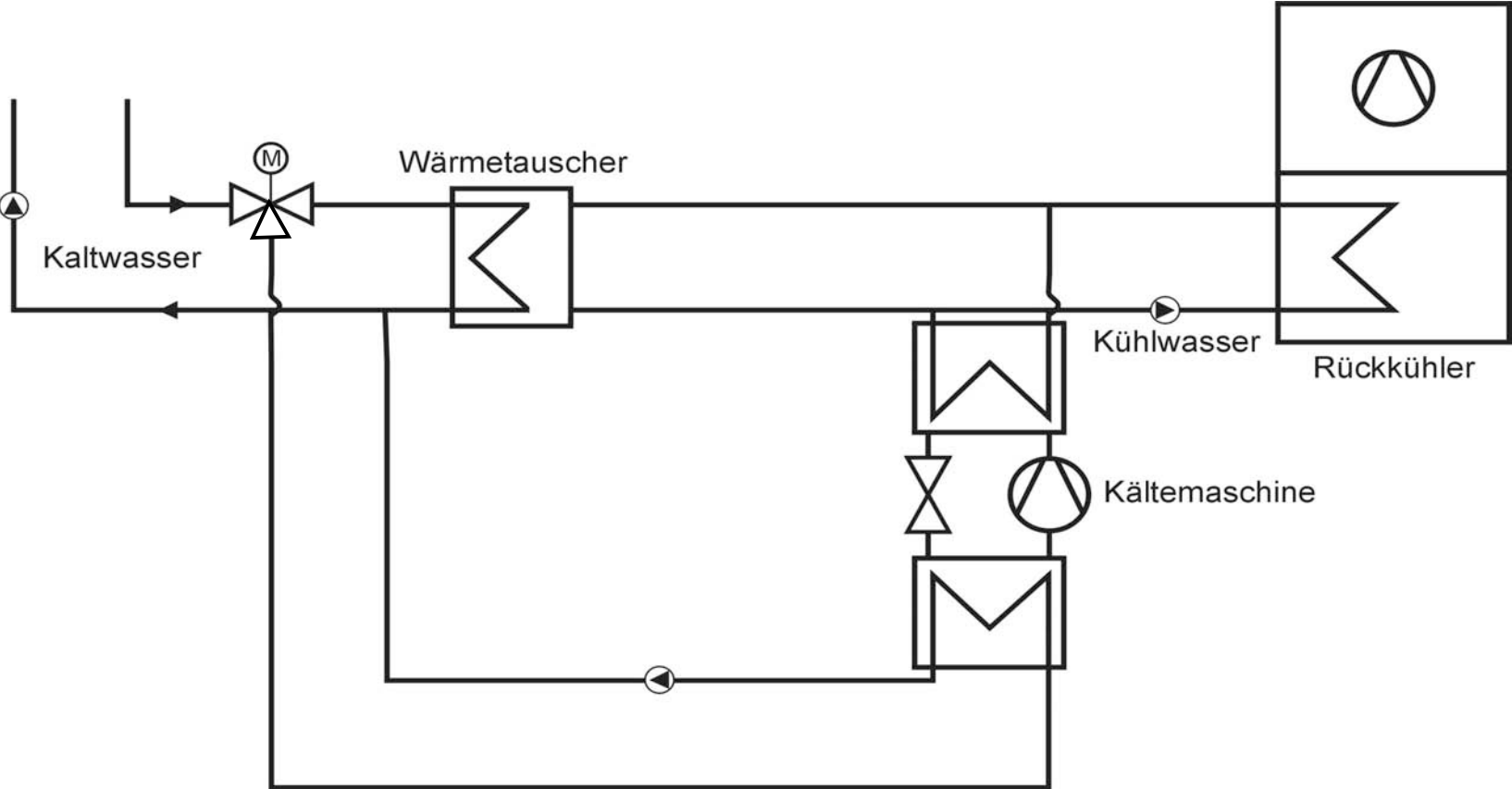
Bei Kühllasten im Winterhalbjahr z.B.

- EDV-Räume
- Fernmeldeanlagen
- Sender
- medizinische Geräte
- Kunststoff-Verarbeitungsmaschinen
- Walzen und Pressen
- Papiermaschinen

bietet sich die Kühlung mit Außenluft an, wenn die Außenluft niedriger ist als die Temperatur des Kühlmediums.

*Anwendungsbereich: Kälteanlagen mit Trockenkühlung*

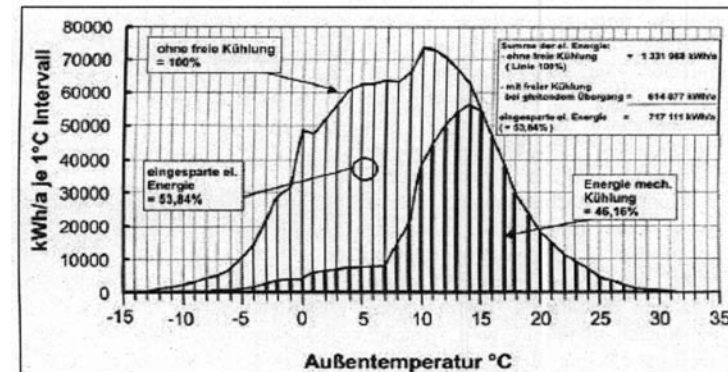
# Freie Kühlung über Wärmetauscher



# Freie Kühlung Einspareffekte

## Beispiel: Anlage mit

- 2 Hubkolbenkältemaschinen à 480 kW<sub>Kälte</sub>
  - 2 Rückkühlwerken à 630 kW<sub>Rückkühlleistung</sub>
  - Kälteanforderung im Winterhalbjahr
  - 18,0 / 14°C bei 100 % Last
  - 16,4 / 14°C bei 60 % Last
  - Systemmehrkosten ca. 80.000 €
  - jährliche Stromeinsparung ca. 720 MWh
  - jährliche Energiekosteneinsparung ca. 50.000 €
- ➔ **Kapitalrückflußzeit ca. 1,5 ... 2 Jahre**

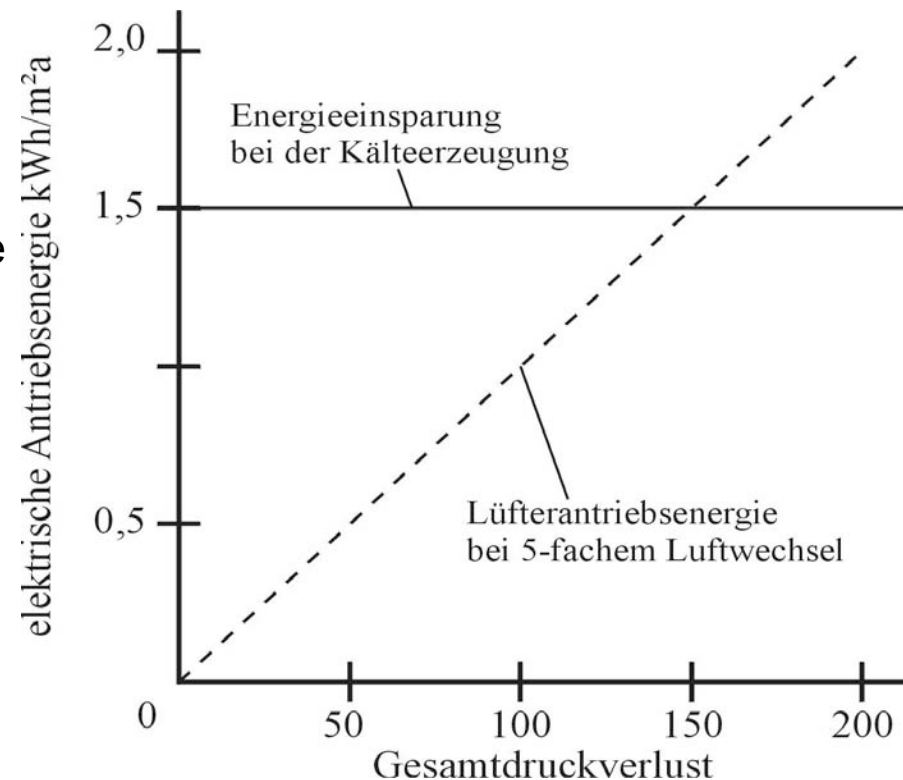


# Nachlüftung

- Betrieb der Lüftungsanlagen zur Nachtzeit  
z.B. 22 – 8 h mit einem 5-fachen  
Luftwechsel
- erzielbare Energieeinsparung abhängig von
  - der thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudes (eine hohe Speicherfähigkeit ermöglicht die Absenkung der Kühllastspitze und ggf. der Antriebsenergien für die Klimatisierung)
  - dem Gesamtdruckverlust der Lüftungsanlage

## **Beispiel:**

Bürogebäude mittleren  
Baustandardsklasse





# Optimierung der Rückkühlwerke

- nach Möglichkeit geschlossene oder offene Wasserrückkühlwerke einsetzen (Luftrückkühlwerke erfordern bei gleicher Kälteleistung größere Verdichter und damit mehr Antriebsenergie)
- bei Wasserrückkühlwerken: Einsatz von Axial- anstelle von Radialventilatoren  
spezifische Antriebsleistungen  
Radialventilatoren: 10 – 20W pro kW<sub>Verflüssiger</sub>  
Axialventilatoren: 6 – 10 W pro kW<sub>Verflüssiger</sub>
- Regelung der Ventilator Drehzahl bzw. der Ventilatorengruppen (bei Trockenkühlern) in Abhängigkeit der Wasseraustritts- bzw. Feuchtkugeltemperatur

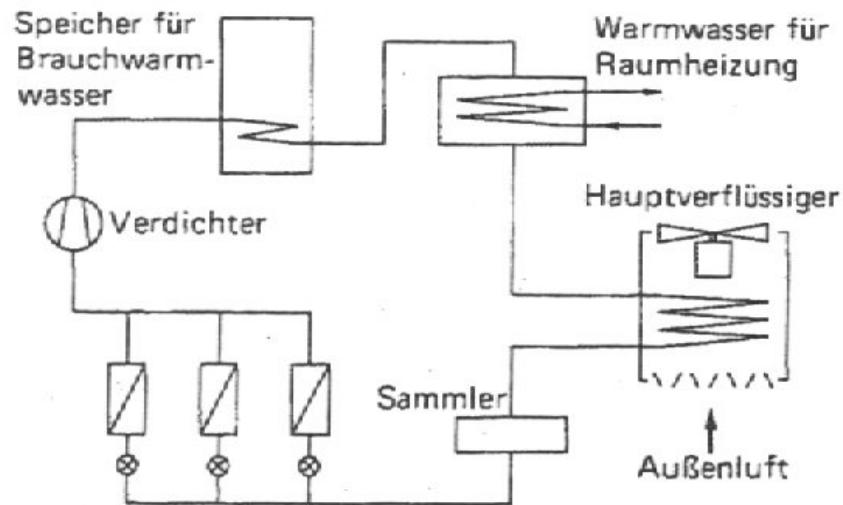
# Die Kältemaschine als Wärmequelle

# Abwärmennutzung

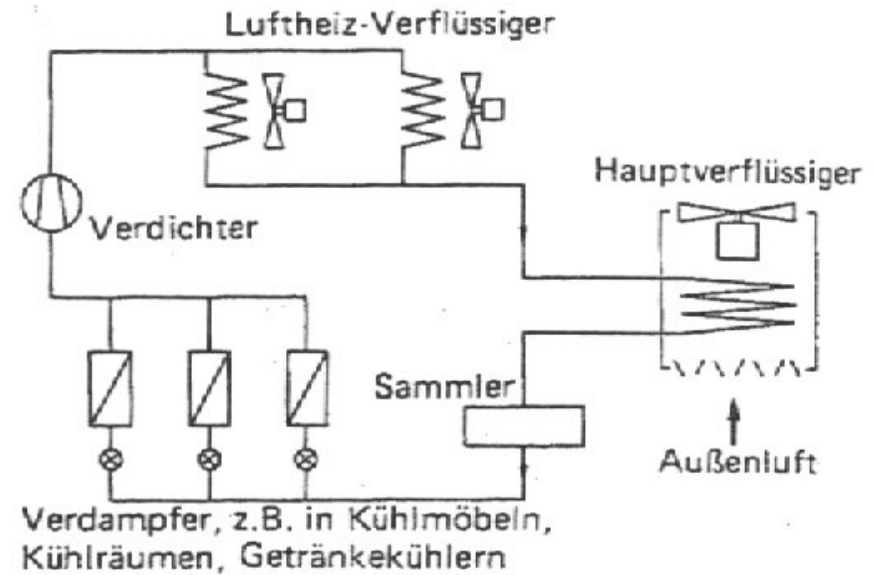
- Die Abwärme der Kältemaschine kann direkt zu Heizaufgaben genutzt werden.
- Bei den üblichen Verflüssigertemperaturen (z.B. 45°C) ist die Einbindung in Niedertemperaturheizläufe oder in die Warmwasserbereitung möglich.
- Für die Einbindung in Kreisläufe mit höherer Temperatur ist die Anhebung der Verflüssigertemperatur erforderlich. Die Anhebung ist durch die max. Verflüssigertemperatur des Kältemittels (R134a: 79°C, R22: 63°C) begrenzt. Die Leistungszahl der Kältemaschine wird reduziert. Die Wirtschaftlichkeit hängt in diesem Fall von erforderlichen Zusatzinvestitionen, vom Energieaufwand zur Abwärmennutzung und den Energiepreisen am Standort ab.

# Abwärmennutzung bei luftgekühlten Verflüssigern

direkt mit zusätzlichen,  
wassergekühlten Verflüssigern



Verdampfer, z. B. in Kühlmöbeln,  
Kühlräumen, Getränkekühlern



mit zusätzlichen luftgekühlten  
Verflüssigern

# Energieaufwand und Abwärmekosten

$$P_H = (P_R - P) / Q_C = (P_R - P) / (Q_O + a \cdot P_R)$$

mit  $P = Q_O / \beta_K$       Energieaufwand reiner Kühlbetrieb

und  $P_R = Q_O / \beta_{KR}$       Energieaufwand Abwärmenutzung

**Beispiel:**  $t_O = 0^\circ\text{C}$

$$t_C \text{ Kühlbetrieb} = 45^\circ\text{C} \Rightarrow \beta_K = 3,1$$

$$t_C \text{ Abwärmenutzung} = 65^\circ\text{C} \Rightarrow \beta_{KR} = 2,0$$

$$\Rightarrow P = 0,323 \text{ kWh/kWh}_{(\text{Kälte})}$$

$$\Rightarrow P_R = 0,500 \text{ kWh/kWh}_{(\text{Kälte})}$$

$$\Rightarrow \text{bei Verlustfaktor } a = 0,9 \quad P_H = 0,122 \text{ kWh/kWh}_{(\text{Abwärme})}$$

$\Rightarrow$  bei Strompreis von 8 ct/kWh

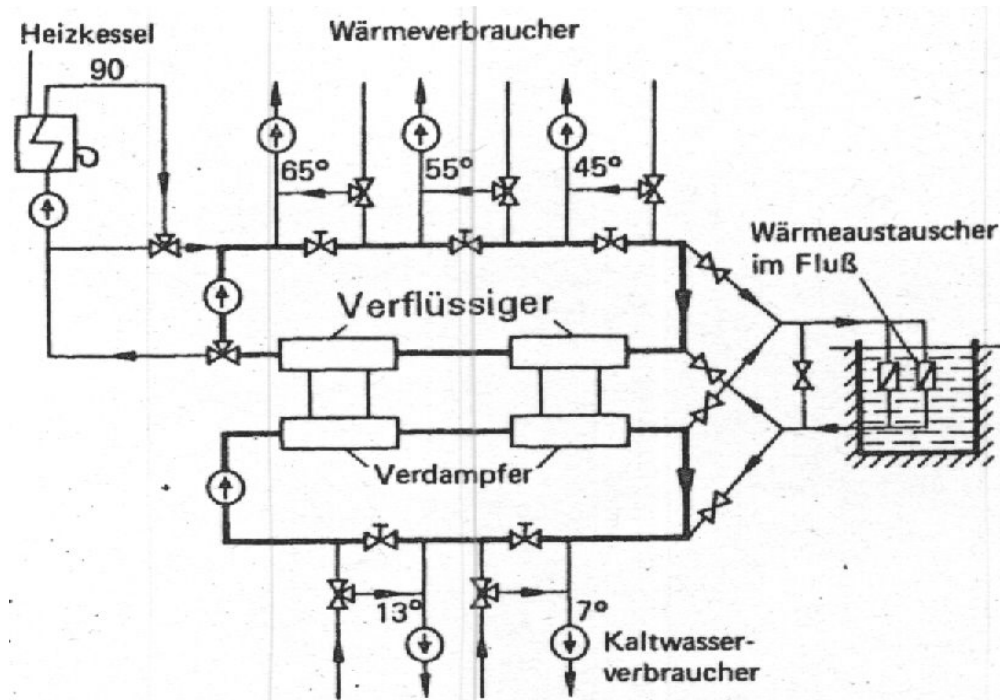
$\Rightarrow$  Abwärmekosten  $\approx 1$  ct/kWh

# Kältemaschine als Wärmepumpe

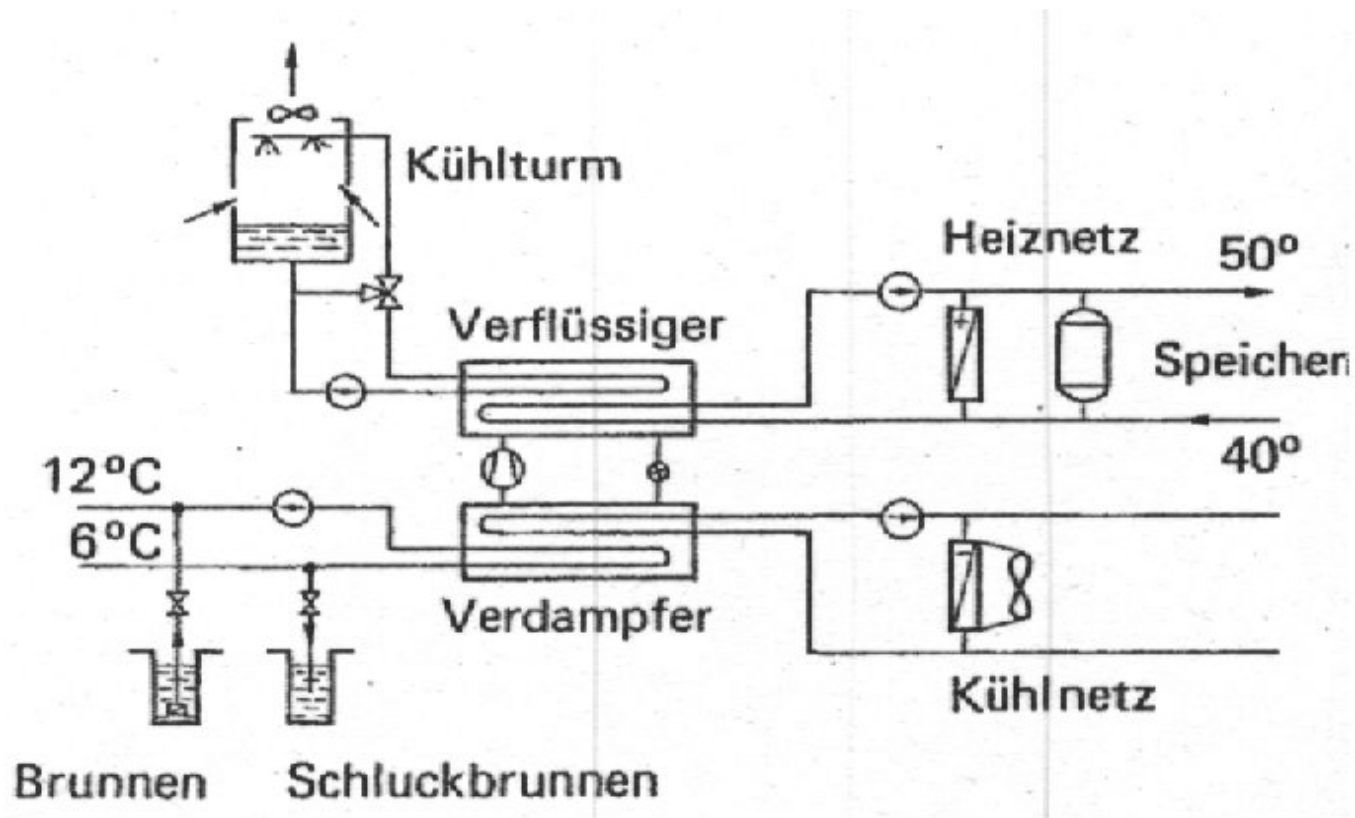
Die Kältemaschine kann auch als Wärmepumpe betrieben werden und somit auch außerhalb der Kühlperiode zu Heizzwecken genutzt werden

Voraussetzung: Die Nutzung einer zusätzlichen Wärmequelle in der Heizperiode

**Beispiel:**  
Flußwasser als  
Wärmesenke und -quelle



# Kältemaschine als Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle



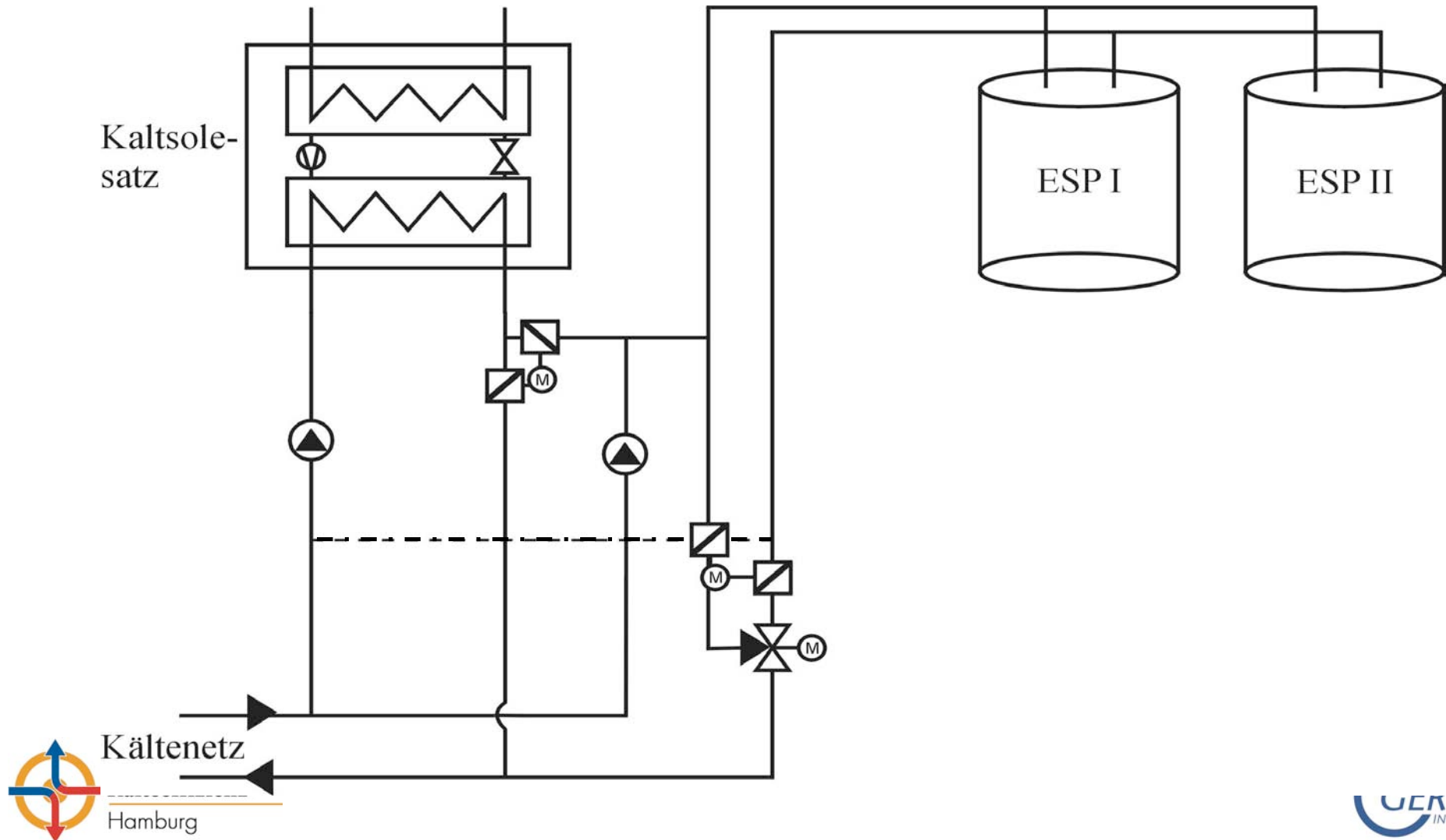
# Eisspeicher

Eisspeicher sparen keine Energie, können aber die Kälteerzeugung zeitlich von der Kältenutzung trennen und ermöglichen somit

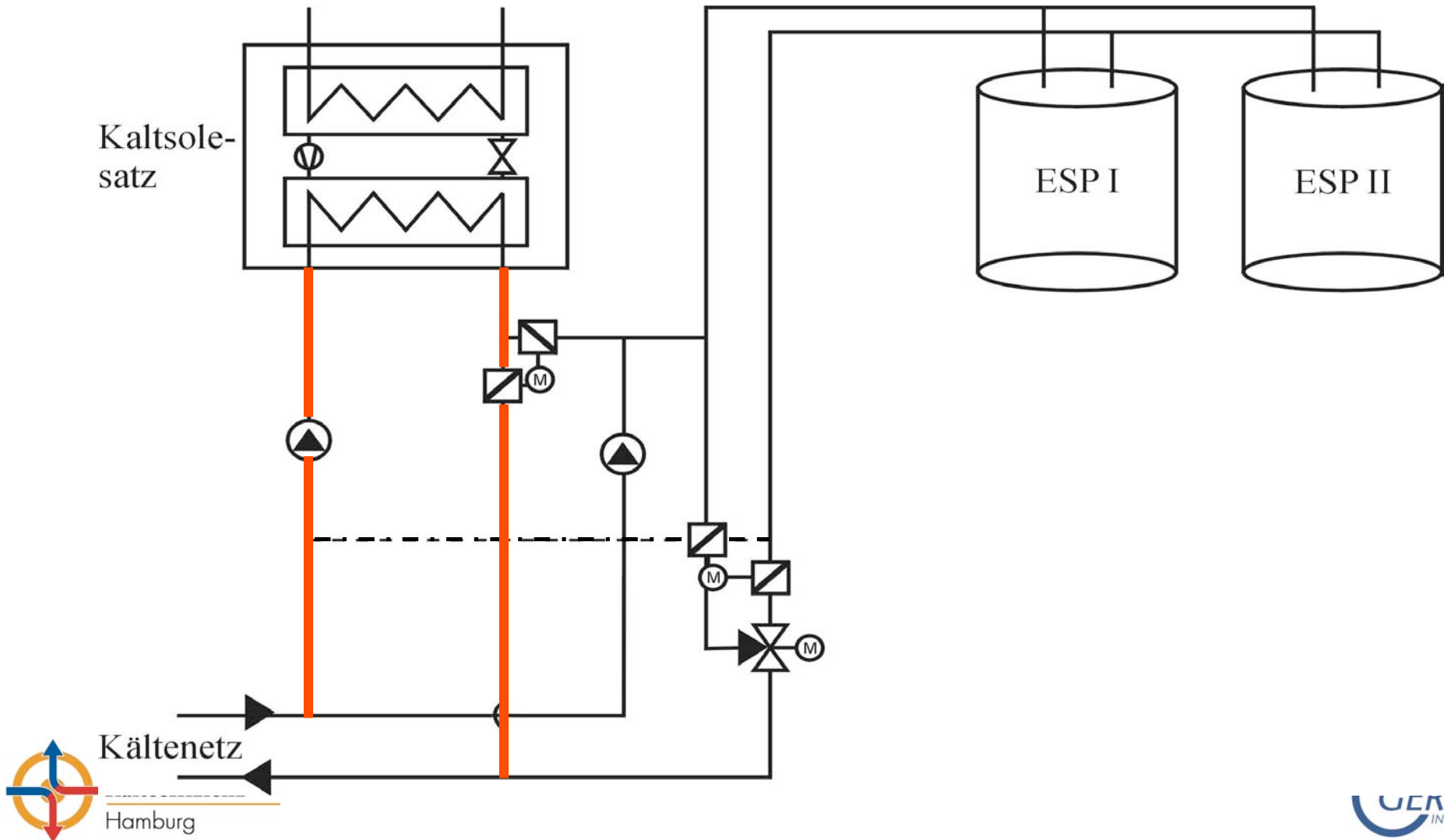
- die Reduzierung der Spitzenstromkosten
- die Erhöhung der Kälteerzeugungskapazität
- Notkälteversorgung



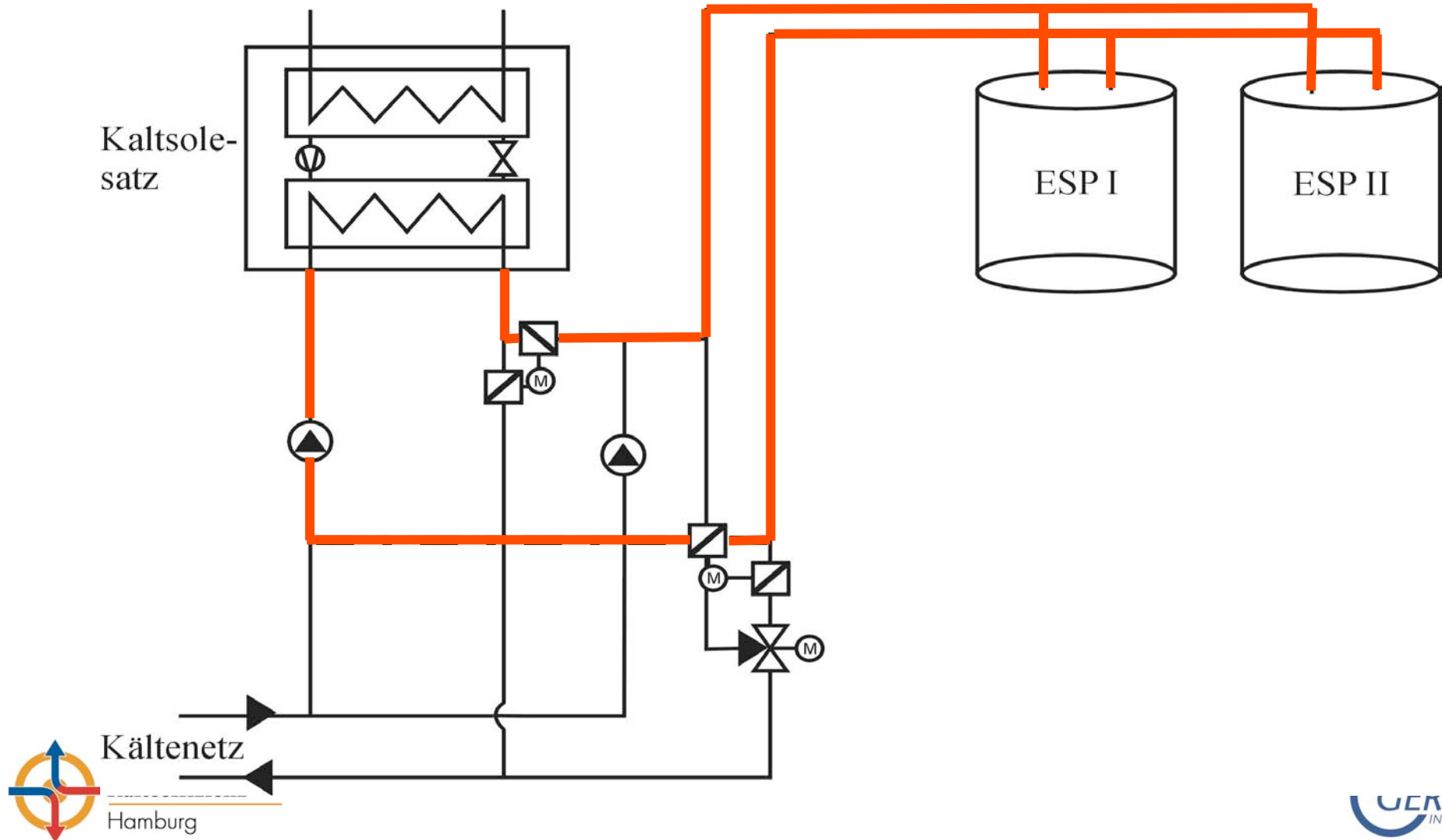
# Eisspeicher Schaltschema



# Versorgung nur aus Kältemaschine

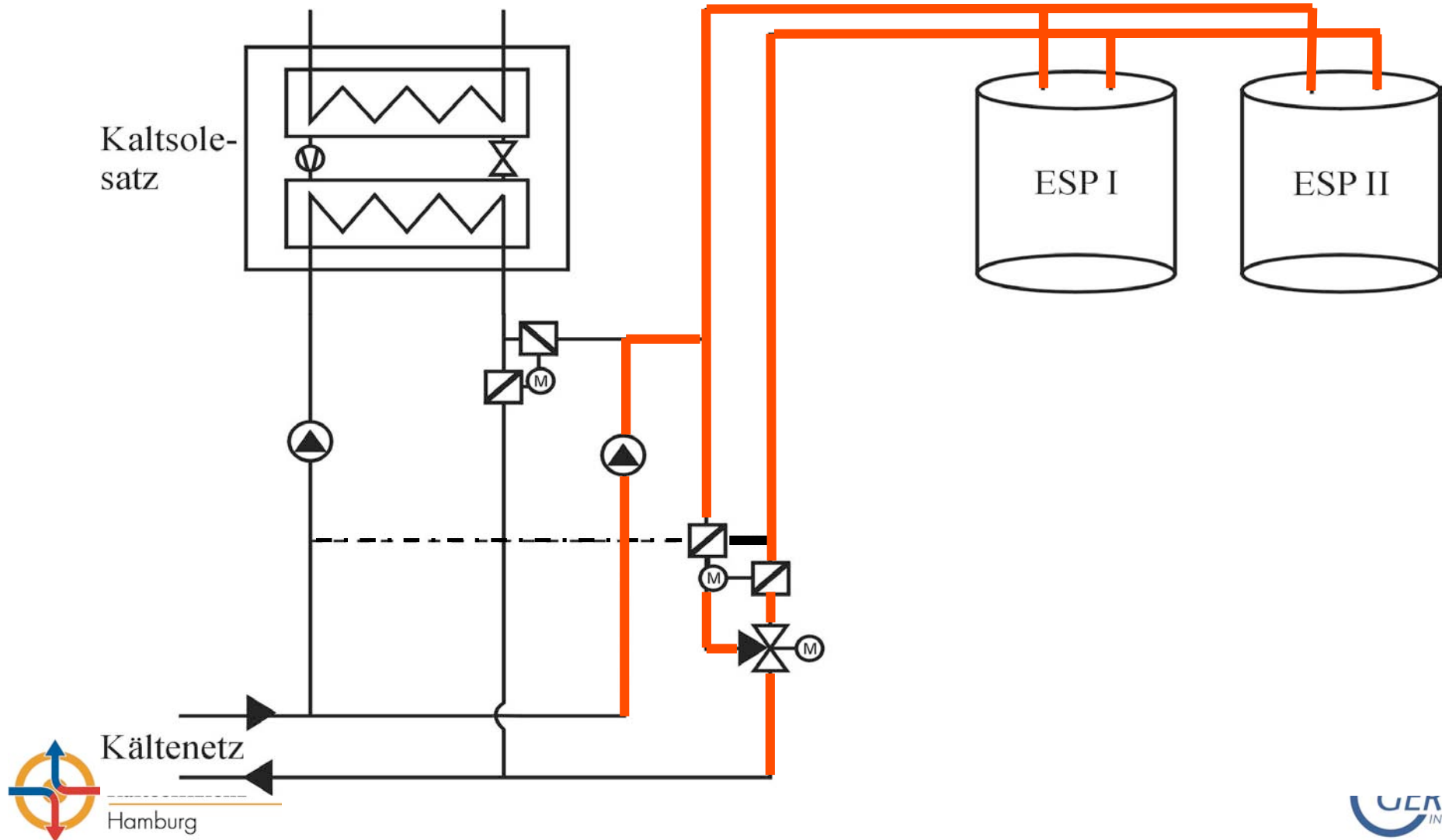


# Ladung Eisspeicher

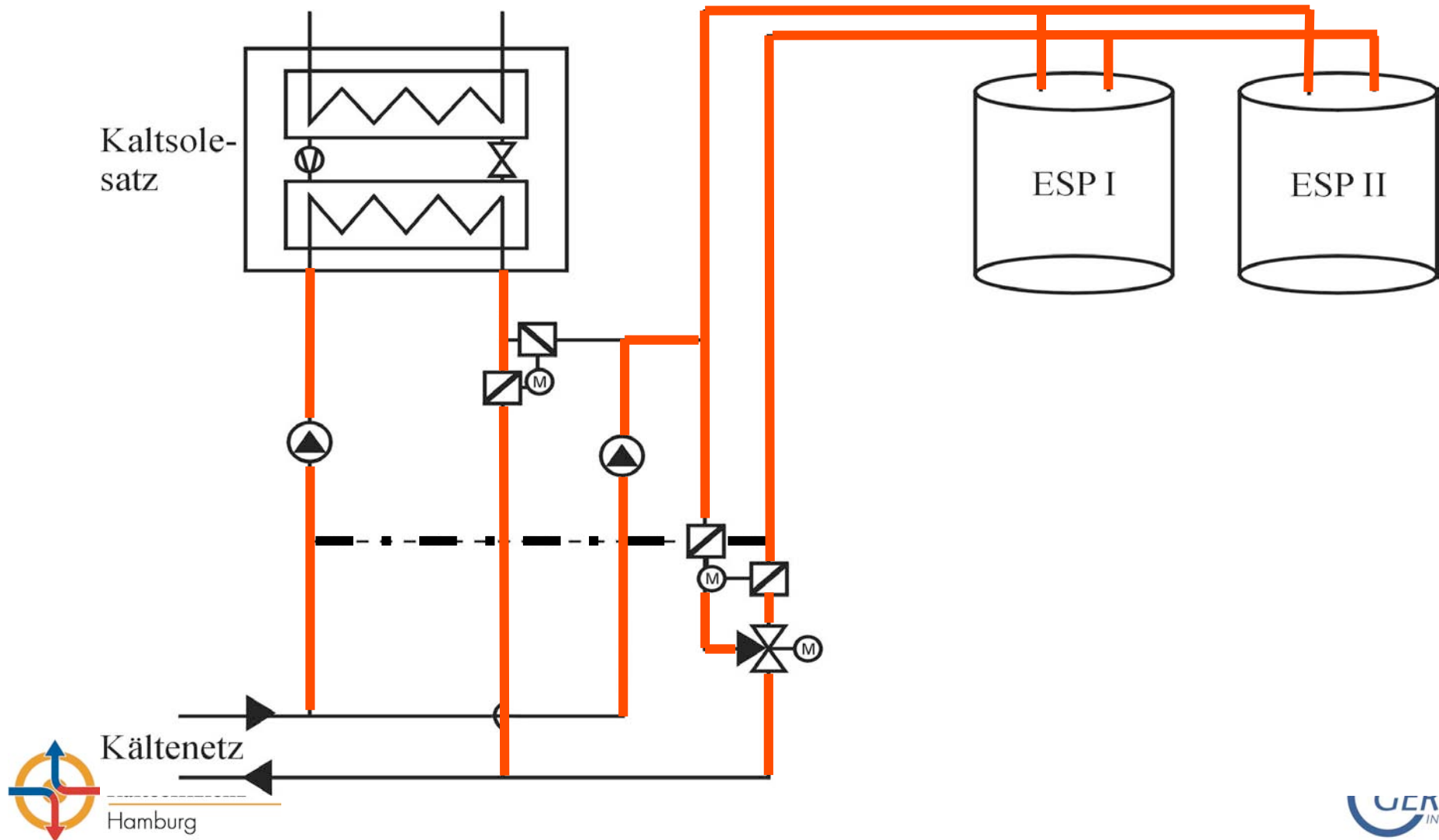


Kältenetz  
Hamburg

# Nur Eisspeicherbetrieb



# KM- und Eisspeicherbetrieb Spitzenlast

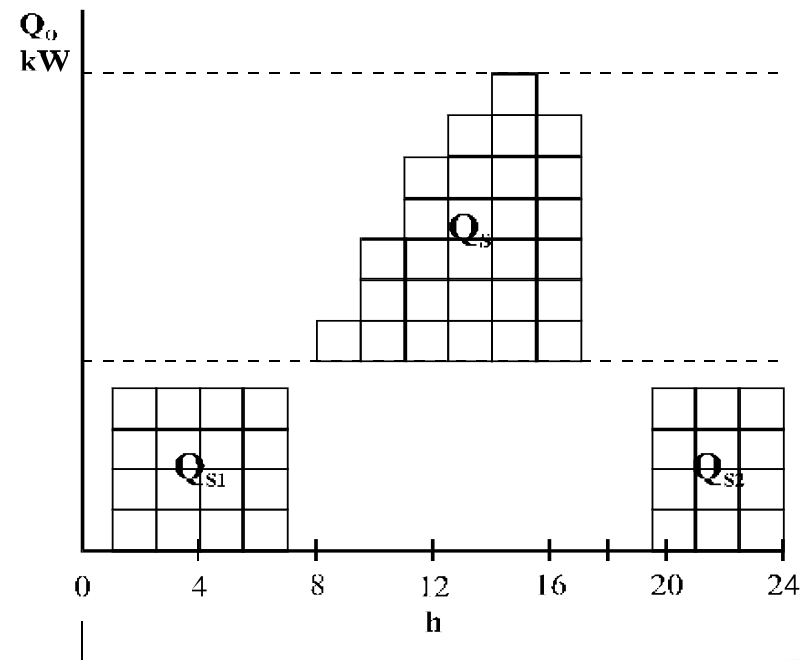


# Eisspeicher Bauformen



# Eisspeicher Dimensionierung

- Speichergröße =  $Q_S = Q_{S1} + Q_{S2}$  (kWh)
- Speicherdichte von Eis  $q = 84,4 \text{ kWh/m}^3$
- wg. Platzbedarf Kühlerrohre  $q_{\text{tats}} = 40 \dots 60 \text{ kWh/m}^3$
- Speichervolumen =  $V_S = Q_S / q_{\text{tats}}$



# Eisspeicher Kosten

## Investitionen:

ca. 45 ... 50 €/kWh

(incl. Peripherie: Platten WT, Regelung, etc.)

## Einsparungen:

ggf. Ersatz einer Kältemaschine oder Reduzierung der Strombezugskosten

## Beispiel:

Eisspeicherleistung  $Q_s = 400 \text{ kW}$

maximale Ladedauer 9 h/a

=> Speicherkapazität  $Q_s = 3.600 \text{ kWh}$  =>  $V \approx 70 \text{ m}^3$

Mehrinvest. Eisspeicher = Invest. Eisspeicher – Invest. Kältemaschine  
bei 400 kW =  $3.600 \text{ kWh} * 50 \text{ €/kWh} - 400 \text{ kW} * 200 \text{ €/kW}$   
= 100.000 €



# Eisspeicher Einsparung

## Stromkosteneinsparung

Einsparung durch Betriebsverlagerung von der Hochtarif zur Niedertarifzeit

$$= (k_{HT} - k_{NT}) * \dot{Q}_O / \beta * t_{BHT} / \eta_{ESP} / 100$$

- mit  $k_{HT}$  = Hochtarifstrompreis (8 ct/kWh)  
 $k_{NT}$  = Niedertarifstrompreis (6 ct/kWh)  
 $\dot{Q}_O$  = Kälteleistung (400 kW)  
 $\beta$  = Arbeitszahl der Kältemaschine (3,6)  
 $t_{BHT}$  = Hochtarifleistungsdauer (500 h/a)  
 $\eta_{ESP}$  = Nutzungsgrad Eisspeicher (0,8)

≈ 1.400 €/a

Einsparung durch Spitzenlastreduzierung

$$= k_{LP} * \dot{Q}_O / \beta$$

mit  $k_{LP}$  = Leistungspreis (60 €/kW)  
= 6.700 €/a

## Gesamteinsparung

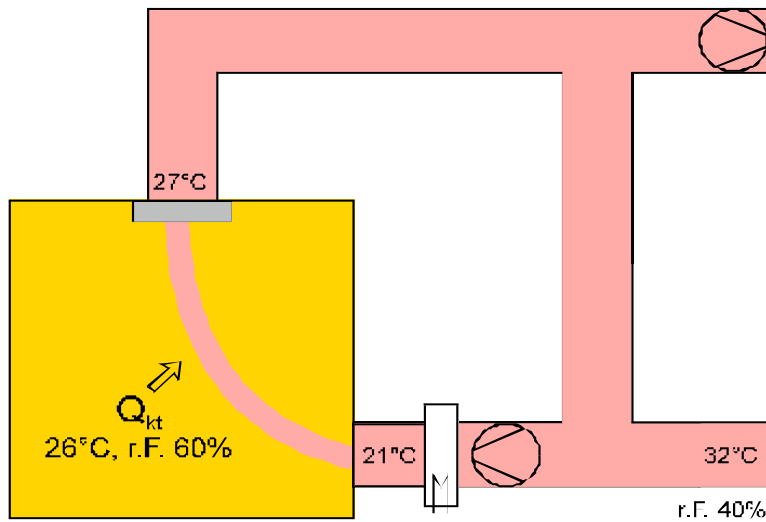
= 8.100 €/a

aber

=> Kapitalrückflußzeit ≈ 12 a

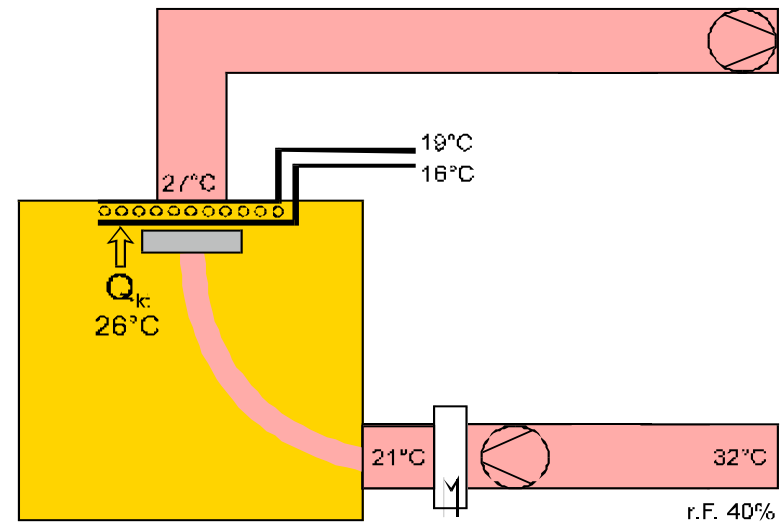
# Optimierungsoptionen beim Neubau

# Kühldecken und Betonkernaktivierung



## Normalfall:

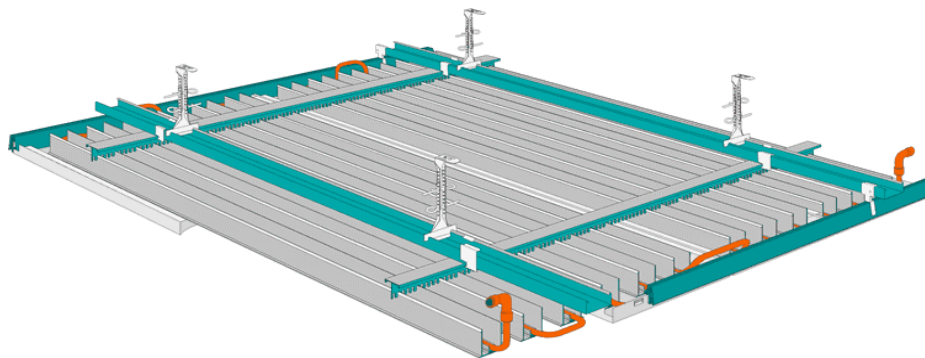
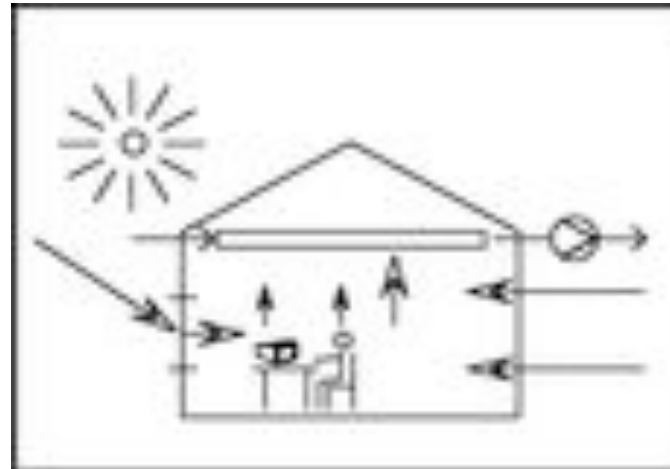
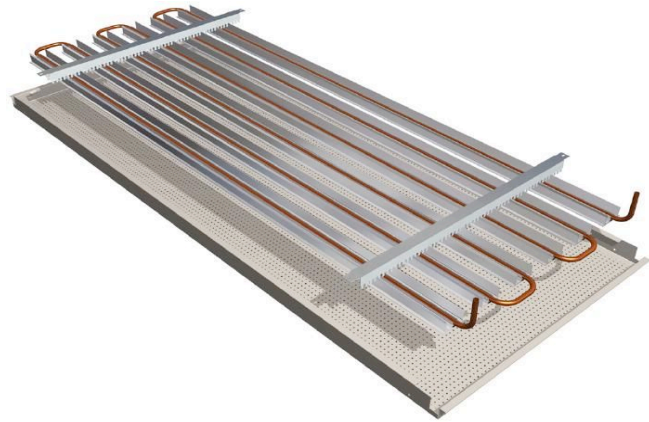
- Kühlung über erhöhten Raumluftwechsel



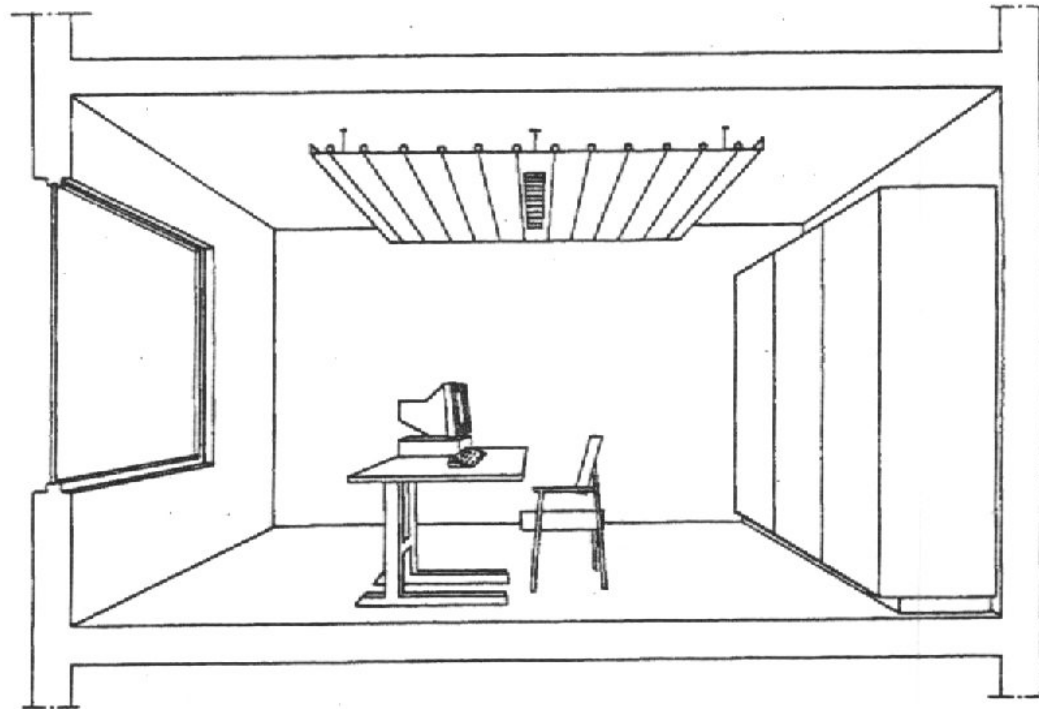
## Kühldecken / Betonkernaktivierung:

- Kühlung über Wasserrohrsystem in Kühldecke, Kühlsegel, Betondecke
- Luftkühlung nur für den erforderlichen Frischluftbedarf

# Kühldecken

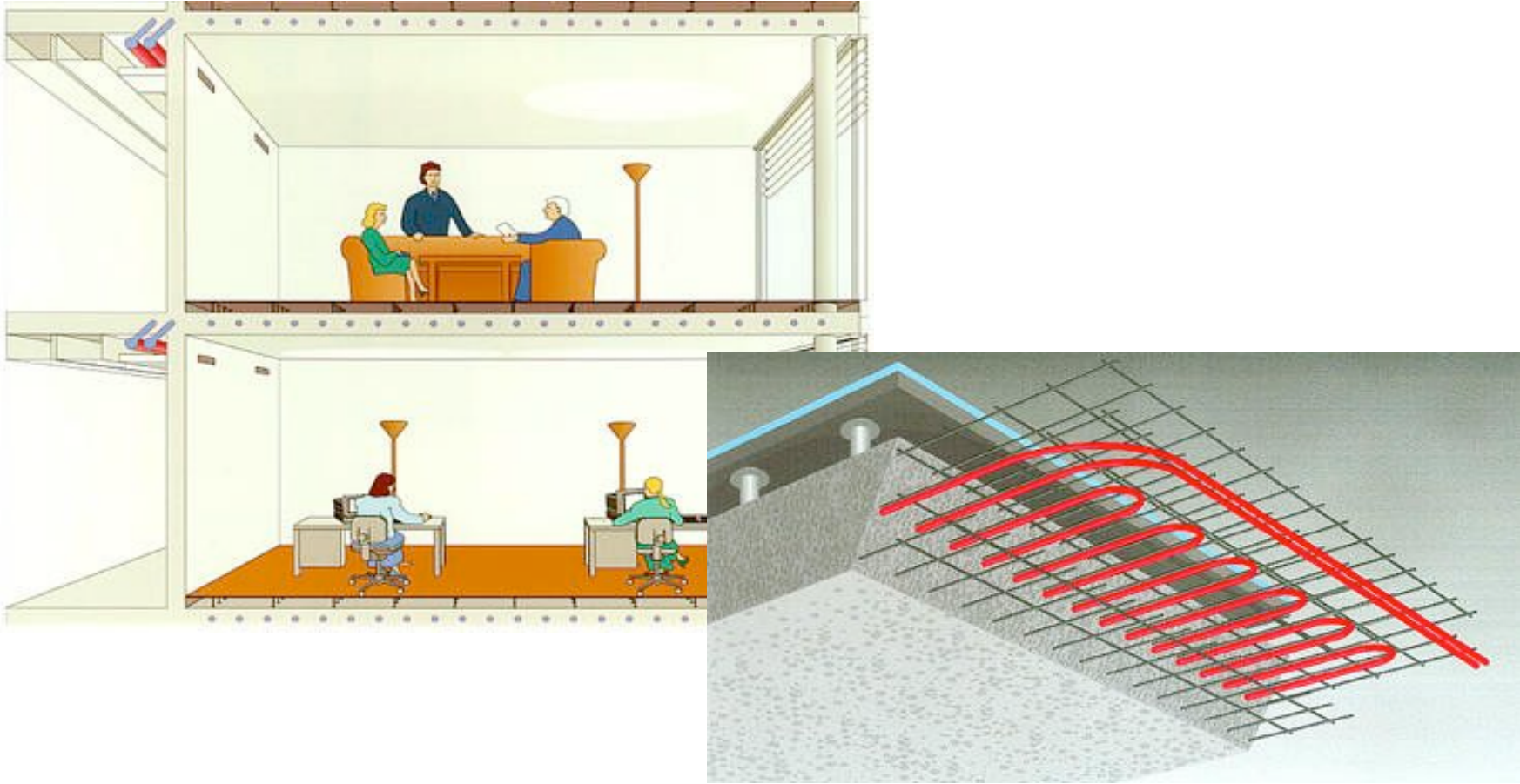


# Kühlsegel



- nur zur Versorgung bestimmter Bereiche
- offene oder geschlossene Bauweise möglich
- in der Regel von der Decke abgedelt und allseitig luftumspült

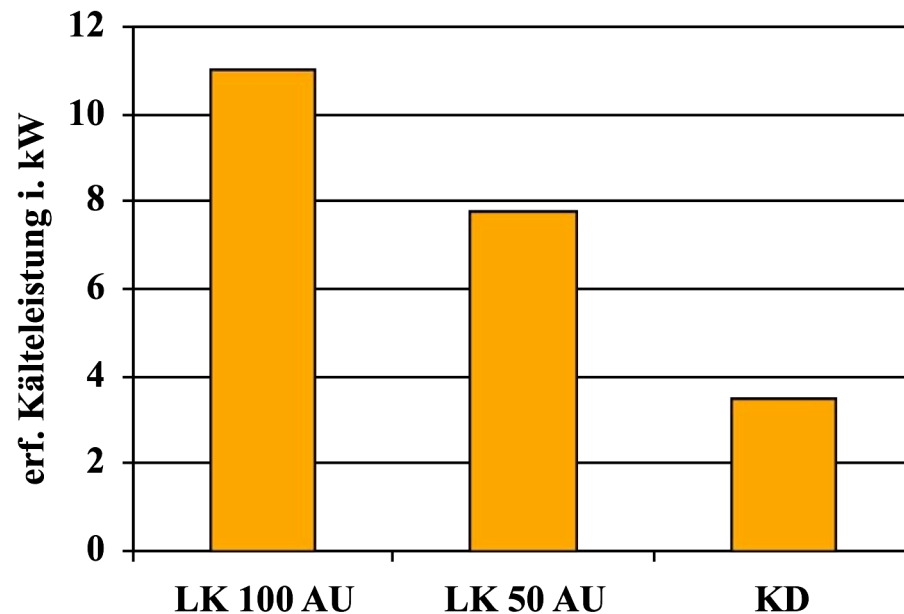
# Betonkernaktivierung



# Systemvergleich Kühldecke : Luftkühlung

## Beispiel:

Bürraum: 32 m<sup>2</sup>  
Belegung: 3 Pers.  
Frischluftbedarf: 180 m<sup>3</sup>/h  
Kühllast: 2.500 W  
T<sub>Außenluft</sub>: 32° C  
r.F.Außenluft: 40 %  
T<sub>Zuluft</sub>: 21° C  
r.F.Zuluft: 67 %  
T<sub>Raumluft</sub>: 26° C  
r.F.Raumluft: 50 %

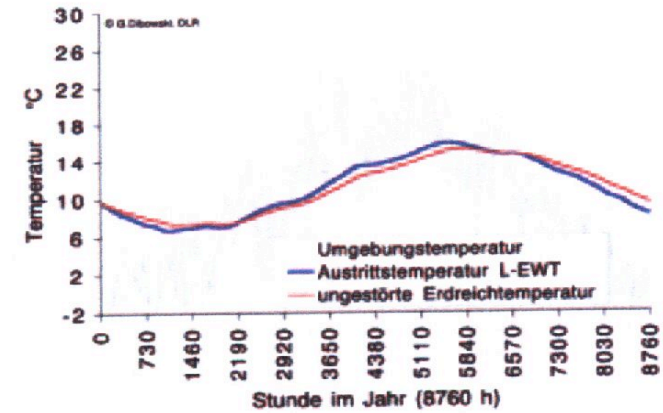
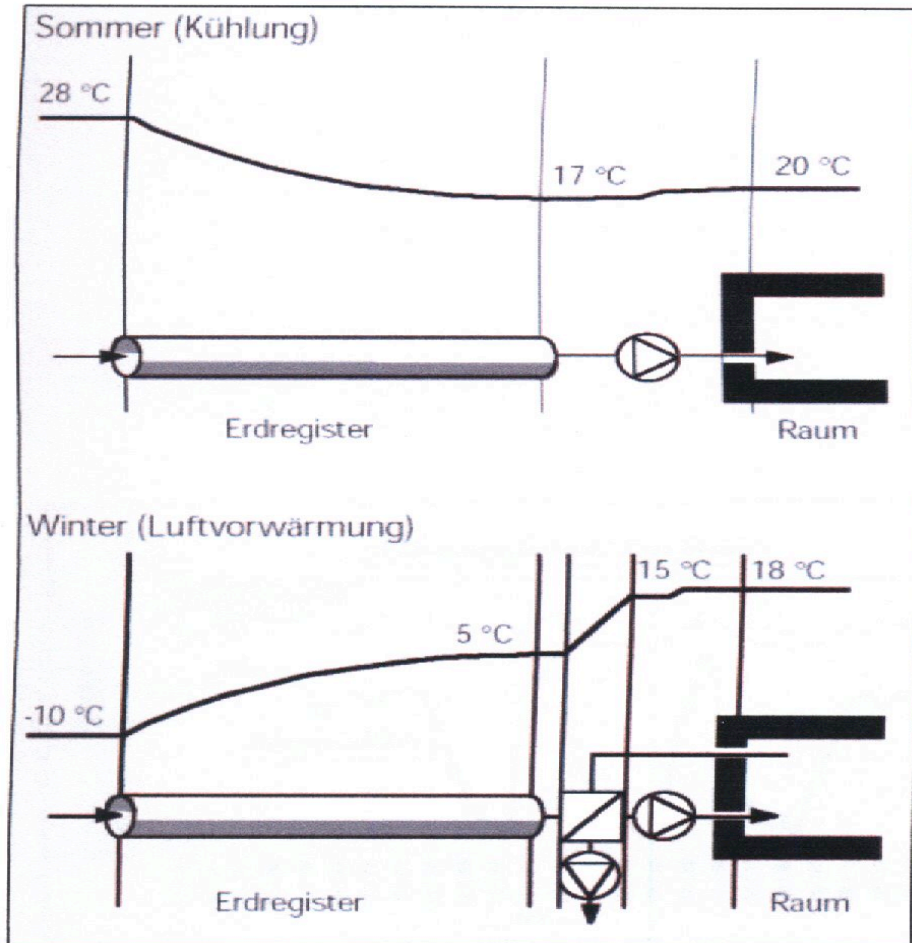


## ohne Berücksichtigung

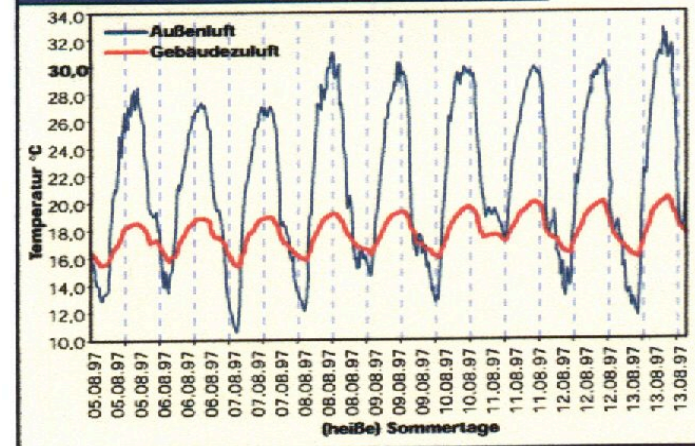
- der KM-Leistungszahlen (höhere Verdampfertemperaturen bei der Kühldecke)
- der Ventilator Kühllasten
- der Ventilator- und Pumpenleistungen
- der Nacherhitzerleistungen



# Erdwärmetauscher (EWT)



**Abb 7 Luft-/Erdwärmetauscher im Sommerbetrieb (Quelle: DLR, Köln)**





# Planungsgrundlagen EWT

Kälteleistung abhängig von

- ➔ Verlegeart (Einzelrohr, Parallelrohr, Register)
- ➔ Verlegetiefe (1,50 ... 6,0 m)
- ➔ Bodenbeschaffenheit (leichte Erde, körnig, schwere Erde, bindig)
- ➔ Erdfeuchte (trocken, feucht, durchnässt)
- ➔ Rohrdurchmesser (D100 ... DN1700 (begehrbar))
- ➔ Rohrmaterial (PVC, PE, Beton ...)
- ➔ Rohrabstand (bei Registern möglichst groß)
- ➔ Luftgeschwindigkeit (möglichst gering)

**Ziel: Anpassung der Luftaustrittstemperatur an die Bodentemperatur**

# EWT : besondere Aspekte

EWT-Effizienz abhängig vom Rohrdurchmesser

- kleinere Rohre (DN150 ... 450) besseres A/V-Verhältnis
  - ➔ besserer Nutzungsgrad, aber längere Strecken erforderlich
- größere Rohre 0,8 – 4,0 m<sup>2</sup> Durchmesser, begehbar
  - ➔ geringere Druckverluste, niedrigere Ventilatorleistungen, gut zu reinigen

Luftansaugung über Luftbrunnen

- 0,8 – 2,0 m über dem Erdboden
- von der Hauptwindrichtung abgewandt

Übergangszeiten oder bestimmte Tageszeiten machen die Abschaltung des EWT erforderlich, um eine unnötige Auskühlung und Nachheizung zu vermeiden

- d.h. für diese Zeiten Bypass vorsehen oder
- Frischluftzuführung über Fensterlüftung

Abfluß von Kondenswasser durch Rohrgefälle  $\geq 2 \%$  sicherstellen

Eintritt von Sickerwasser durch absolut dichte Rohrverbindungen verhindern

Zulufthygiene durch Feinstfilter und ihre regelmäßige Reinigung gewährleisten

# EWT - Auslegung und -kosten

## Auslegung:

- i.d.R.nach der gewünschten Vorwärmung im Winter (z.B. Frostschutz)
- Ziel: Zulufttemperatur  $t_{Zu} \geq 2^\circ\text{C}$  bei Außenlufttemperatur von z.B.  $t_{Au} = -12^\circ\text{C}$
- Dimensionierung:  $A = \dot{Q}_L / k * (t_{Erd} - t_{mL})$

## Investitionen

- Erdaushub (10 ... 50 €/m)  
= f (Rohrinnenweite, Verlegetiefe)
- + Rohrleitung (10 ... 130 €/m)  
= f (Rohrdurchmesser, Material)
- + Filter  
= f (Volumenstrom, Hygieneanford.)
- + Ventilator  
= f (Luftvolumenstrom, Pressung)

## Betriebskosten

- Wartung  
(insbesondere für EWT- und Filterreinigung)
- + Stromverbrauchskosten für den Ventilatorbetrieb

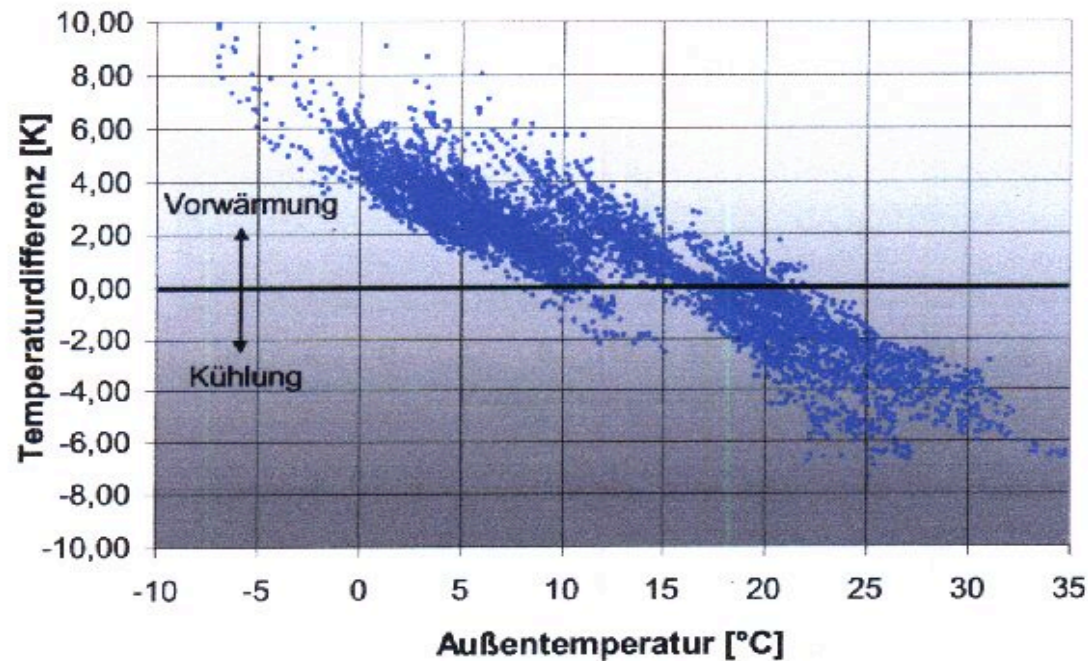
(Leistungszahl  $Q_{VW}/P_{el}$  bzw.  $Q_O/P_{el}$  zwischen 15 ... 30!)

# EWT - Projekt: FH Rhein-Sieg

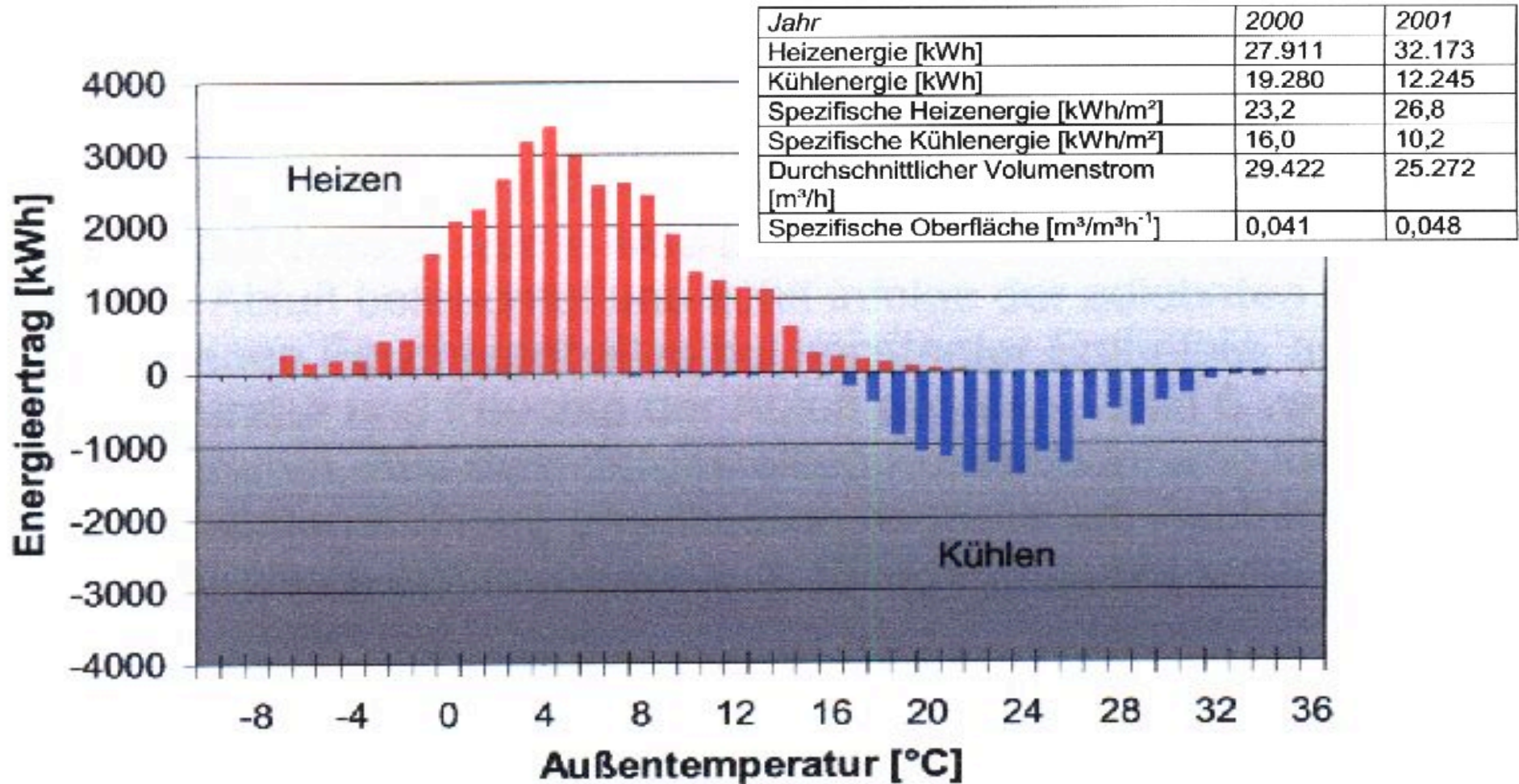
## Auslegungsdaten

Anzahl der Röhren:	3	Verlegetiefe:	4 m unter Gebäude
Material:	Stahlbeton	Nennvolumenstrom:	86750 m <sup>3</sup> /h
Nennweite:	DN 1700	Wärmetauscherfläche:	1202 m <sup>2</sup>
Länge:	je 75 m	Spezifische Oberfläche:	0,014 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>

## Erzielte Temperaturdifferenzen 2001



# Energieertrag des Projekts

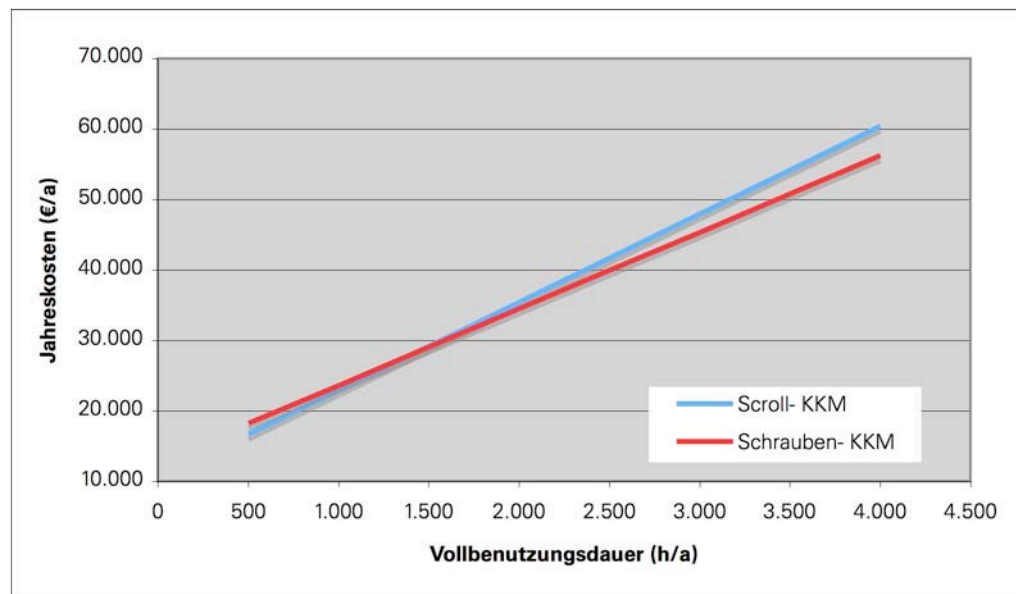


# Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit



## Systemvergleich Kälte

System		Scroll-KKM	Schrauben-KKM
Kälteleistung	kW	500	500
Leistungszahl		4,0	4,6
el. Antriebsleistung	kW	125	109
Vollbenutzungsdauer	h/a	2.000	2.000
Kälteerzeugung	kWh/a	1.000.000	1.000.000
el. Antriebsenergie	kWh/a	250.000	217.391
Abwärme	kWh/a	1.250.000	1.217.391
Investitionen	€	90.000	110.000
Nutzungsdauer	a	15	15
Kalkulationszins	%/a	5	5
Kapitalkosten	€/a	8.671	10.598
Strompreis	€/kWh	0,10	0,10
Stromkosten	€/a	25.000	21.739
Wartungskosten	% d. Inv./a	2	2
Wartungskosten	€/a	1.800	2.200
Gesamtkosten	€/a	35.471	34.537
Kältekosten	ct/kWh	3,55	3,45
CO2-Produktion	kg/a	125.000	108.696
Abwärmenutzung	%	50	50
Wärmegutschrift	€/kWh	0,05	0,05
Wärmeerlös	€/a	31.250	30.435
CO2-Gutschrift d. AWN	kg/a	156.250	152.174
		31.250	43.478



Danke für die Aufmerksamkeit!!

