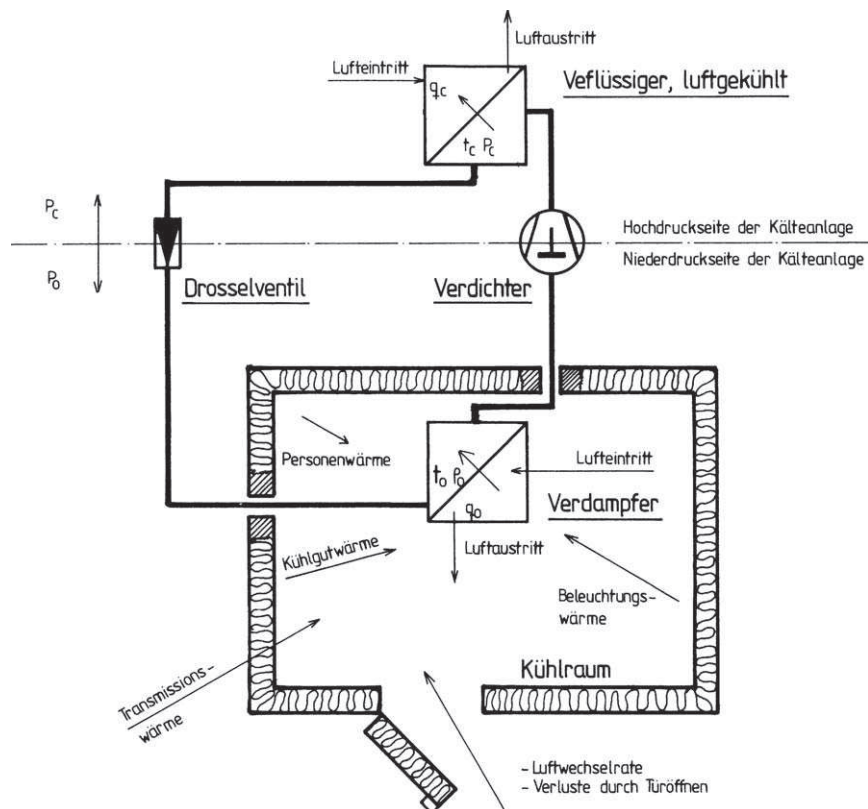


5 Der Arbeitsprozess zur Kälteerzeugung im T,s -Diagramm und im $\log p,h$ -Diagramm

Kälteanlagen sind Anlagen, die unter Verwendung von Kältemitteln einem Stoff oder einem Raum Wärme entziehen und kühlen.

Kälteanlagen arbeiten mit Kältemitteln, die in einem geschlossenen Kreislauf bewegt werden. Das Kältemittel ändert bei der Zirkulation durch die Kälteanlage seinen Aggregatzustand, wobei es einerseits seiner Umgebung Wärme entzieht und verdampft und andererseits durch Abgabe der Wärme wieder verflüssigt wird.



5.1 Der Carnot'sche Kreisprozess als idealer Vergleichsprozess im T,s -Diagramm

Bezogen auf ein kg umlaufendes Kältemittel ergibt sich:

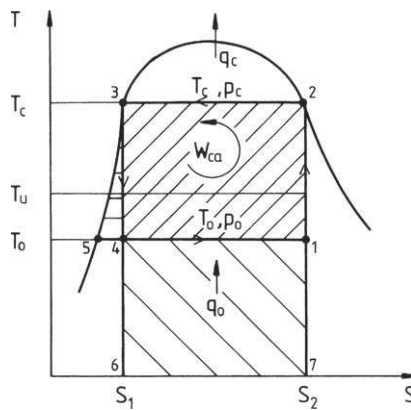
die aufgenommene Wärmemenge: $q_0 = T_0 \cdot (s_2 - s_1)$; Fläche 1 - 4 - 6 - 7 - 1

die abgeführte Wärmemenge: $q_c = T_c \cdot (s_2 - s_1)$; Fläche 2 - 3 - 6 - 7 - 2

die erforderliche Arbeit: $w_{ca} = q_c - q_0 = (T_c - T_0) \cdot (s_2 - s_1)$; Fläche 1 - 2 - 3 - 4 - 1

Expansionsarbeit: Fläche 3 - 5 - 4 - 3

Die **Leistungsziffer** ε_{ca} resultiert nun aus dem Verhältnis von Nutzen und Aufwand mit:



$$\varepsilon_{ca} = \frac{q_0}{w_{ca}} = \frac{T_0 \cdot (s_2 - s_1)}{(T_c - T_0) \cdot (s_2 - s_1)} = \frac{T_0}{T_c - T_0}$$

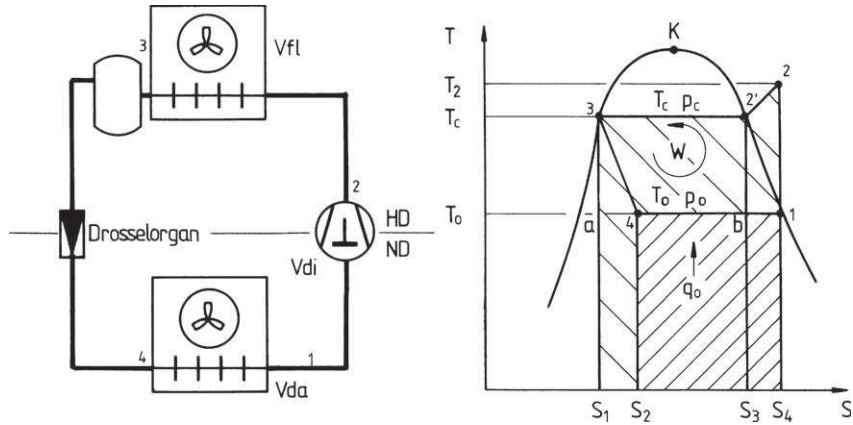
5.2 Der theoretische Vergleichsprozess im T,s -Diagramm

Der Carnot-Prozess als idealer Kreisprozess zwischen zwei Isothermen und zwei Adiabaten liefert mit ε_{ca} zwar die größte theoretische Leistungsziffer, sie ist aber nicht realisierbar, weil weder die Kompression noch die Expansion isentrop verlaufen.

Zur Veranschaulichung der realen, tatsächlichen Gegebenheiten wird die Darstellung des Kreisprozesses erweitert.

Die Drosselung vom Verflüssigungsdruck p_c auf den Verdampfungsdruck p_0 erfolgt durch das Expansionsventil, wobei die Isentrope durch eine Isenthalpe ersetzt wird, weil der Drosselvorgang bei $h = \text{const.}$ verläuft (Punkt 3 \rightarrow 4).

Die Verdichtung von Nassdampf ist unerwünscht, sodass der Verdichtungsbeginn auf die rechte Grenzkurve gelegt wird (von b nach 1).

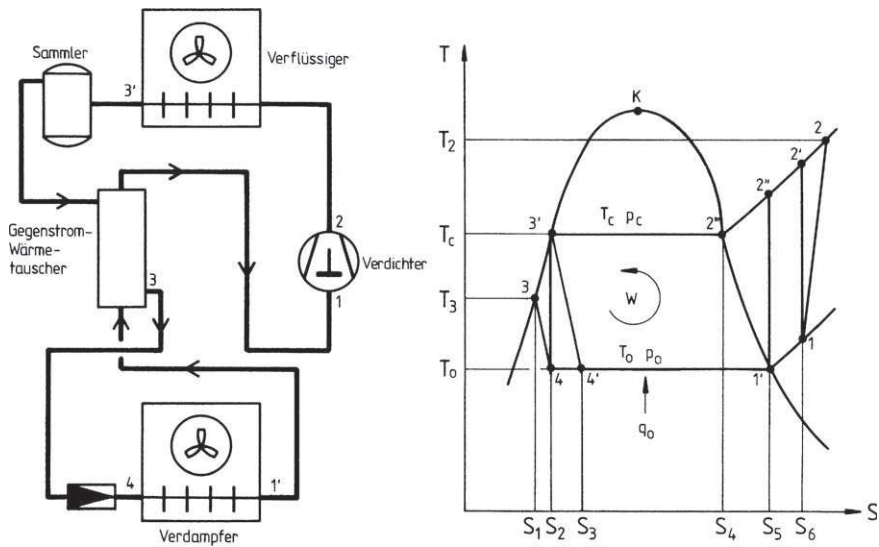


Bezogen auf 1 kg umlaufendes Kältemittel ergibt sich Folgendes:

- die aufgenommene Wärmemenge: Fläche 1 - 4 - s_2 - s_4 - 1
- die abgeführte Wärmemenge: Fläche 2 - 3 - s_1 - s_4 - 2
- die erforderliche Arbeit: Fläche 2 - 3 - s_1 - s_2 - 4 - 1 - 2

5.3 Der praktische Vergleichsprozess im T,s -Diagramm

Das nachfolgend gezeigte RI-Fließbild zeigt den Kältekreislauf mit eingebautem Sauggaswärmetauscher. Im Gegenstrom geführt, wird das verflüssigte Kältemittel unterkühlt und das Sauggas um den gleichen Enthalpiebetrag überhitzt.



Bezogen auf 1 kg umlaufendes Kältemittel ergibt sich:

die aufgenommene Wärmemenge: Fläche 1 - 4 - s_2 - s_6 - 1

die abgeführte Wärmemenge: Fläche 2 - 3 - s_1 - s_6 - 2

die erforderliche Arbeit: Fläche 2 - 3 - s_1 - s_2 - 4 - 1 - 2

Leistungsziffern: **Kreisprozesse:**

$$\varepsilon_{ca} = \frac{T_0}{T_c - T_0} = \varepsilon_{max}$$

ideal, verlustfrei; nicht kältemittelabhängig; nur von T_0 und T_c bestimmt

$$\varepsilon_{is} = \frac{q_0}{w_{is}}$$

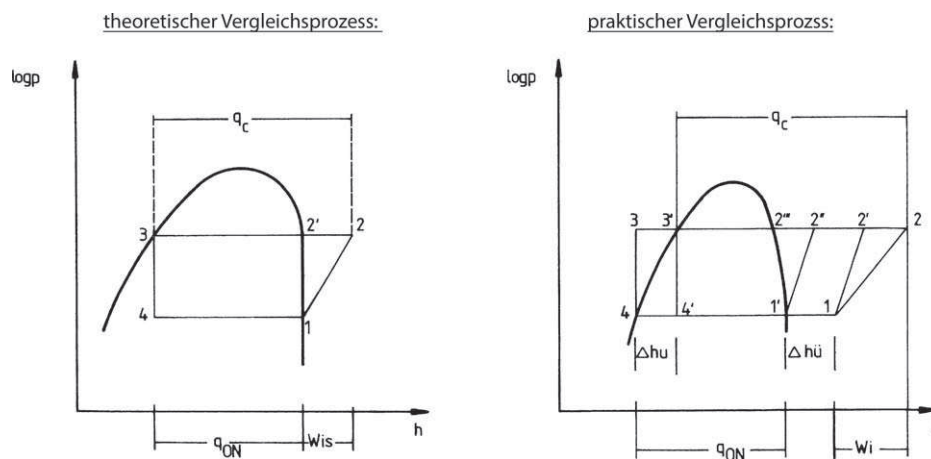
verlustbehaftet durch Drosselung; isentrope Verdichtung von trocken-gesättigtem Dampf

$$\varepsilon_i = \frac{q_0}{w_i}$$

verlustbehaftet durch Drosselung; polytrope Verdichtung von überhitztem Dampf; Kältemittelunterkühlung

5.4 Darstellung des theoretischen und des praktischen Vergleichsprozesses im $\log p,h$ -Diagramm

Das Temperatur-Entropiediagramm veranschaulicht den Kälte-Kreisprozess insofern deutlich, als die zu- bzw. abgeführten Wärmemengen als Flächen im Diagramm erscheinen.



In der kältetechnischen Praxis wird aber häufig dem $\log p,h$ -Diagramm der Vorzug gegeben, weil die Werte der spezifischen Enthalpie z. B. zur Berechnung des spezifischen Nutzkältegewinns $q_{0N} = h_1' - h_4$ unmittelbar abgelesen werden können. Zu- bzw. abgeführte Wärmemengen erscheinen im $\log p,h$ -Diagramm als Strecken.

7 Tabellen zur Berechnung des Kältebedarfs

7.1 Dichte ρ und Wärmeleitkoeffizient λ verschiedener Baustoffe

Baustoff	ρ kg/m ³	λ W/m K	
Asbestschiefer	1 900	0,35	
Asphalt	2 000	0,70	
Beton (Kiesbeton, Stahlbeton)	1 600 ... 1 800 1 800 ... 2 200	0,75 ... 0,95 0,95 ... 1,50	
Leichtbetonmauerwerk (Schlackensteine, Zellenbeton, Aerocret, Porenbeton u. Ä.)	800	0,47	
	1 000	0,56	
	1 200	0,65	
	1 400	0,74	
	1 600	0,81	
Leichtbeton in Platten oder gegossen	800	0,31	
	1 000	0,42	
	1 200	0,53	
	1 600	0,81	
Bimsbeton, gestampft	800	0,37	
	1 000	0,50	
	1 200	0,63	
Bimsbetonsteinmauerwerk	800	0,51	
	1 000	0,62	
	1 200	0,63	
Bimsbetondielen	800	0,37	
	1 000	0,51	
	1 200	0,63	
Bimskies als Füllstoff	600	0,33	
Bitumen	1 100	0,17	
Dachpappe	1 000 ... 1 200	0,14 ... 0,35	
Erdreich	trocken	1 000 ... 2 000	0,17 ... 0,58
	10 % Feuchte	1 000 ... 2 000	0,50 ... 2,10
	20 % Feuchte	1 000 ... 2 000	0,80 ... 2,60
Fliesen und Kacheln	2 000	1,05	
Gipsplatten	800	0,31	
Glas (Fensterglas)	2 400	0,58	
Granit	2 600 ... 2 900	2,90 ... 4,10	
Gummibelag	1 000	0,2	
Hartpappe	790	0,15	

Baustoff	ρ kg/m ³	λ W/m K
Holz, senkrecht zur Faser		
Leichtholz (Balsa)	200 ... 300	0,08 ... 0,10
Fichte, Kiefer, Tanne	400 ... 600	0,12 ... 0,16
Buche, Eiche	700 ... 900	0,16 ... 0,21
Holzfaserplatten (Celotex, Kapag u. Ä.)	200 300	0,05 0,06
Holzfaserhartplatten	900	0,17
Holzspanplatten	900	0,17
Holzzement		0,17
Kalkmörtel		0,17
Kalksandstein	1 600	0,81
Kalkstein (amorph)	2 550	1,22
Kesselschlacke	700 ... 750	0,33
Kies als Füllstoff	1 500 ... 1 800	0,93
Korkmentlinoleum	535	0,08
Kunststoffbelag	1 500	0,23
Leder	1 000	0,17
Lehmstampfwände	1 700	0,99
Linoleum	1 200	0,19
Marmor	2 500 ... 2 800	2,10 ... 3,50
Mörtel		
bei Ziegeln	1 600 ... 1 800	0,70 ... 0,93
bei Leichtbetonstein	1 600 ... 1 800	0,93 ... 1,16
Muschelkalk	2 680	2,44
Leichtbauplatten aus mineralischer Holzwolle, wie Heraklith, Tekton u. Ä.	200 400 600	0,06 0,08 0,13
Rabitz (Drahtputz)		1,40
Rigips	500	0,21
Sand im Mittel	1 500 ... 1 800	0,93
Seesand		
– 0 % Feuchte	1 600	0,31
– 10 % Feuchte		1,24
– 20 % Feuchte		1,76
– gesättigt		2,44
normal verunreinigter Sand		
– 0 % Feuchte		0,33
– 10 % Feuchte		0,97
– 20 % Feuchte		1,33
– gesättigt		1,88

Baustoff	ρ kg/m ³	λ W/m K
Sägemehl		
lufttrocken	190 ... 215	0,06 ... 0,07
als Füllstoff	190 ... 215	0,12
Sandstein	2 200 ... 2 500	1,60 ... 2,10
Schamotte		
bei 500 °C	1 800 ... 2 200	1,05 ... 1,28
bei 1 000 °C	1 800 ... 2 200	1,16 ... 1,40
Schiefer		
⊥	2 700	1,50 ... 2,00
	2 700	2,30 ... 3,40
Schlacke als Füllung		
Hochofenschlacke	300 ... 400	0,22
Kesselschlacke	700 ... 750	0,33
Schlackenbetonsteine im Mauerwerk	1 100 ... 1 300	0,60 ... 0,80
Schwemmsteine im Mauerwerk, auch Zellenbeton, Porenbeton u. a.	800 1 000 1 200 1 400	0,47 0,56 0,65 0,74
Silika		
bei 500 °C	1 800 ... 2 200	1,05 ... 1,28
bei 1 000 °C	1 800 ... 2 200	1,10 ... 1,40
Sperrholz	600	0,13
Steinholz	1 800	0,17
Steinzeug	2 200 ... 2 500	1,05 ... 1,57
Terrazzo	2 200	1,40
Vermiacelit	–	0,09
Verputz		
außen	1 600 ... 1 800	0,93 ... 1,16
innen	1 600 ... 1 800	0,70 ... 0,93
Zement		
gepulvert		0,07
abgebunden		1,05
Zementestrich	2 000	1,40
Zementmörtel	–	1,40
Ziegelstein, trocken	1 600 ... 1 800	0,38 ... 0,52
Ziegelmauerwerk		
massiv, innen	1 600 ... 1 800	0,70
massiv, außen	1 600 ... 1 800	0,87
porös, außen	800 1 200	0,40 0,56
Hohlziegel	800 1 600	0,35 ... 0,52 0,52 ... 0,76