Thermodynamik & Kältetechnik

Formelsammlung

Andreas Zimmer

SS 99

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen der Thermodynamik

1.1 Thermische Zustandsgrößen ... 4

1.1.1 Volumen ... 4
1.1.2 Druck ... 4
1.1.3 Temperatur ... 4

1.2 Thermische Ausdehnung ... 5

1.2.1 Längenausdehnung ... 5
1.2.2 Volumenausdehnung ... 5

1.3 Thermodynamisches System und Prozesse ... 5

1.4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik ... 6

1.4.1 Energieerhaltungssatz der Mechanik ... 6
1.4.2 Energiebilanzgleichung für geschlossenes ruhendes Systeme ... 6
1.4.3 Energiebilanzgleichung für offene Systeme (stationärer Fließprozeß) ... 7

1.5 Spezifische Wärmekapazität c und Mischtemperatur t_{Mi} ... 9

2. Zustandsänderung des idealen Gases

2.1 Zustandsgesetze ... 10

2.1.1 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases ... 10
2.1.2 Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac ... 10
2.1.3 Allg. Gaskonstante, molare Masse und Normvolumen ... 10
2.1.4 Kalorische Zustandgleichungen des idealen Gases ... 10
2.1.5 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases ... 11

2.2 Zustandsänderungen des idealen Gases im geschlossenen System ... 11

2.2.1 Isochore Zustandsänderung (V, υ = konst.) ... 11
2.2.2 Isobare Zustandsänderung (p = konst.) ... 12
2.2.3 Isotherme Zustandsänderung (T,t = konst.) ... 12
2.2.4 Isentrope (Adiabate) Zustandsänderung ($Q_{12} = 0$) ... 13
2.2.5 Polytrope Zustandsänderung ($1 < n < \chi$) ... 14

2.3 Zustandsänderungen des idealen Gases im offenen System ... 15

2.3.1 Technische Arbeit bei einfachen Zustandsänderungen ... 16

2.4 Kreisprozesse ... 17

2.4.1 Beschreibung und Arbeit (W_K) des reversiblen Kreisprozesses ... 17
2.4.2 Thermischer Wirkungsgrad (Kraftmaschinen) ... 18
2.4.3 Carnotprozeß ... 18
2.4.4 Wärmepumpe und Kältemaschine ... 19

3. Irreversible Zustandsänderungen

3.1 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik ... 20

3.2 Die Entropie S ... 20

3.2.1 Definition der Entropie ... 20
3.2.2 T, S-Diagramm ... 21
3.2.3 Zustandsänderungen im T, S-Diagramm ... 21
3.2.4 Carnotprozeß im T, S-Diagramm ... 22

4. Das ideale Gas in Maschinen-Kreisprozesse

4.1 Vergleichsprozesse ... 23
4.1.1 Bewertungsgröße für idealisierte Kreisprozesse ... 23
4.1.2 Bewertungsgröße für reale Kreisprozesse ... 23
4.2 Kraftmaschinen-Kreisprozesse ... 24
4.2.1 Otto-Prozeß (Gleichraum-Prozeß) ... 24
4.2.2 Diesel-Prozeß (Gleichdruck-Prozeß) ... 24
4.2.3 Seiliger-Prozeß (Gemischter Vergleichsprozeß) ... 25
4.2.4 Joule-Prozeß (Gasturbine-Heißlufttubine) ... 25
4.3 Arbeitsmaschinen-Kreisprozesse ... 26
4.3.1 Kolbenverdichter ... 26
4.3.2 Mehrstufige Verdichtung ... 27

5. Wasserdampf

5.1 Verdampfungsvorgang ... 28
5.2 Kalorische Zustandsgrößen des Wasserdampfes ... 29
5.2.1 Wasser zum Sieden bringen (siedene Flüssigkeit) ... 29
5.2.2 Siededes Wasser x = 0 verdampfen bis x = 1 (Naßdampf) ... 29
5.2.3 Naßdampf x = 1 überhitzen von t_s nach $t_ü$ (Heißdampf) ... 29
5.3 Zustandsänderungen des Wasserdampfes ... 30
5.3.1 T, s-Diagramm und h, s-Diagramm ... 30
5.3.2 p, υ-Diagramm ... 30
5.3.2 Wasserdampftafeln ... 31
5.3.3 Isochore ($\upsilon_1 = \upsilon_2$) ... 31
5.3.4 Isobare ($p_1 = p_2$) ... 31
5.3.5 Isotherme ($T_1 = T_2$) ... 31
5.3.6 Isentrope ($S_1 = S_2$) ... 31
5.3.7 Isenthalpe ($H_1 = H_2$) ... 32
5.3.8 Polytrope ... 32
5.4 Claudius-Rankine-Prozeß als Vergleichsprozeß der Dampfkraftanlage ... 33

6. Kältetechnik

6.1 Verfahren der Kälteerzeugung ... 34
6.1.1 Drosselung von Gasen ohne Arbeitsnutzung ... 34
6.1.2 Isentrope Entspannung von Gasen mit äußerer Arbeitsnutzung ... 35
6.1.3 Kaltdampf-Kälteprozesse (KKP) ... 35
6.1.4 Elektrothermische Kälteerzeugung ... 37
6.1.5 Wärmerohr (heat pipe) ... 38
6.1.6 “Kälteerzeugung“ mit Wassereis und Kältemischungen, sogenannte “Verschlußkälte“ ... 38
6.1.7 Spezielle Verfahren der Tieftemperatur oder Kryo-Technik ... 38
6.2 Kompression-Kaltdampf-Kälteprozeß (KKKP) ... 39
6.2.1 lg p, h-Zustandsdiagramm ... 39
6.2.2 Prozeß und Flußbild bei einstufiger Verdichtung ... 39
6.2.3 Überhitzung und Unterkühlung ... 40
6.2.4 Berechnungsgrundlagen ... 41
6.2.5 Bewertungsgrößen für Verdichter-Kälteanlagen (siehe 4.1 Vergleichsprozesse) ... 42
6.2.6 Mehrstufige Kompressions-Kaltdampf-Kälteanlagen (siehe 4.3.2 Mehrstufige Verdichtung) ... 43
6.3 Kältemittel ... 45
6.3.1 Anforderungen ... 45
6.3.2 Begriffe und Kurzzeichen nach DIN 8962 ... 45
6.3.3 Tabelle der bisher gebräuchlichsten Kältemittel nach DIN 8962 ... 46
6.3.4 Vergleich von Kältemittel ... 47
6.3.5 Einteilung und Anwendungsgebiet von Kältemittel ... 50
6.3.6 Das Ozonloch und Anforderungen an neue Kältemittel ... 51

1. Grundlagen der Thermodynamik

1.1 Thermische Zustandsgrößen

1.1.1 Volumen

$$\upsilon = \frac{V}{m}$$

$$\rho = \frac{1}{\upsilon} = \frac{m}{V}$$

m :	Masse		[kg]
V :	Volumen		[m^3]
υ :	spezifisches Volumen		[m^3 / kg]
ρ :	Dichte, spezifische Masse		[kg / m^3]

1.1.2 Druck

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A}$$

$$p = \rho \cdot h \cdot g$$

$$p_{abs} = p_{amb} + p_e$$

$$p = p_b + p_d$$

$$p_{u\%} = \frac{p_u}{p_b} \cdot 100$$

p :	Druck		[Pa = N / m^2]
F :	Kraft		[N = (kg·m) / s^2]
A :	Fläche		[m^2]
g :	Erdbeschleunigung	g = 9,81	[m / s^2]
h :	Fluidhöhe		[m]
p_{abs} :	Absolutdruck		[Pa]
p_{amb} :	Atmosphärendruck		[Pa]
p_e :	Über- bzw. Unterdruck		[Pa]
p_b :	Bezugsdruck		[Pa]
p_d :	Differenzdruck		[Pa]
$p_{u\%}$:	Vakuumangabe		[%]

Einheiten-Umrechnungsfaktoren für den Druck:

1 bar → 10^5 Pa → 10,2 mWS → 750,062 Torr → 1,02 at (kp/cm^2)

1.1.3 Temperatur

$$T_K = t_{°C} + 273{,}15$$

$$t_{°C} = \frac{5}{9} \cdot (t_{°F} - 32)$$

$$T_K = \frac{5}{9} \cdot T_{°R}$$

T_K :	Thermodynamische Temperatur	[K]
$t_{°C}$:	Celsius-Temperatur	[°C]
$t_{°F}$:	Fahrenheit-Temperatur	[°F]
$T_{°R}$:	Rankine-Temperatur	[°R]

1.2 Thermische Ausdehnung

1.2.1 Längenausdehnung

nur für Festkörper und Flüssigkeiten

$$\Delta l = l_2 - l_1 \cong \alpha_m\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

Δl :	Längenänderung	[m]
α_m :	Längenausdehungskoeffizient Mittelwert	[1 / K]

$$\alpha_m\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\alpha_m\Big|_{0\,°C}^{t_2} \cdot t_2 - \alpha_m\Big|_{0\,°C}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

1.2.2 Volumenausdehnung

für Festkörper und Flüssigkeiten

$$\Delta V = V_2 - V_1 \cong \gamma_m\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot V_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

ΔV :	Volumenänderung	[m³]
γ_m :	Volumenausdehungskoeffizient Mittelwert	[1 / K]

$$\gamma_m\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\gamma_m\Big|_{0\,°C}^{t_2} \cdot t_2 - \gamma_m\Big|_{0\,°C}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

für ideale Gase

$$\gamma = \frac{1\,m^3}{273{,}15\,m^3 \cdot K}$$

damit gilt das Ausdehnungsgesetz nach Gay-Lussac bei p=konst.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{konst.}$$

1.3 Thermodynamisches System und Prozesse

Als thermodynamisches System bezeichnet man einen abgegrenzten Bereich, der untersucht werden soll. Er ist von seiner Umgebung durch Systemgrenzen getrennt.

Systemgrenzen können wirkliche oder gedachte Wände sein. Sie sind entweder **verschiebbar** oder auch **starr**. Systemgrenzen heißen auch **Bilanzhüllen**.

Geschlossenes System über dessen Grenzen keine Materie tritt. Es enthält eine abgemessene, unverändert große Stoffmenge.

Offenes System über dessen Grenzen Materie tritt. Es wird Stoff durchströmt.

Adiabates System (wärmedicht) treten Veränderungen im System aufgrund eines Temperaturunterschiedes zwischen System und Umgebung nicht auf. Wärmedurchlässige Systemgrenzen nennt man **diatherm** oder nichtadiabat.

Homogenes System mit einem einheitlichen Stoff oder Stoffgemisch.

Heterogenes System besteht aus mehreren Phasen, wobei die Stoffeigenschaften der einzelnen Phasen sich in der Regel erheblich unterscheiden.

Reversible Prozesse Ein Prozeß ist reversibel oder umkehrbar, wenn der ursprüngliche Zustand des Systems wieder erreicht werden kann, ohne daß Änderungen in der Umgebung zurück bleiben.

Irreversible Prozesse Ein Prozeß ist irreversibel oder nicht umkehrbar, wenn nicht vollständig rückgängig gemacht werden kann. Das System kann zwar seinen Anfangszustand wieder erreichen, es bleiben aber Veränderungen in der Umgebung zurück.
Ursache z.B. Reibung, Formänderungsarbeit, dissipative (=zerstreuen) Effekte

1.4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

„Wärme ist eine Energieform".

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik bringt das Prinzip von der Erhaltung der Energie zum Ausdruck.

Vorzeichenregel gemäß DIN 1345:

positiv	**+**	allem einem System *zugeführten* Energien (z.B. Arbeit, Wärme)
negativ	**–**	allem einem System *abgeführten* Energien

1.4.1 Energieerhaltungssatz der Mechanik

$$\mathbf{W = E_{kin} + E_{pot}}$$

$$\mathbf{E_{kin} = \tfrac{1}{2} \cdot m \cdot c^2}$$

$$\mathbf{E_{pot} = m \cdot g \cdot z}$$

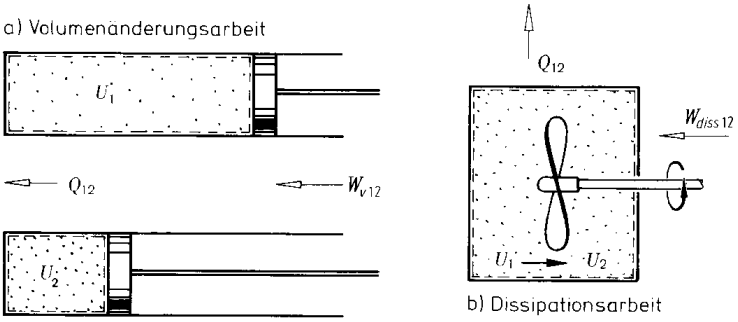
W :	Arbeit	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
E_{kin} :	kinetische Energie	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
E_{pot} :	potentielle Energie	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
m :	Masse	[kg]
c :	Geschwindigkeit	[m / s]
g :	Erdbeschleunigung	[9,81 m / s²]
z :	Höhenlage	[m]

1.4.2 Energiebilanzgleichung für geschlossenes ruhendes Systeme

Beim geschlossenen ruhenden System wandelt sich die als Wärme und als Arbeit zugeführte Energie in innere Energie um.

„**Wärme** ist die Energie, die bei einem System mit nicht adiabater Grenze allein aufgrund eines Temperaturunterschiedes zu seiner Umgebung über die Systemgrenze tritt." Weiter ist „Wärme die Differenz aus der Änderung der inneren Energie und der verrichteten Arbeit, wenn das betrachtete System geschlossen ist."

„Die **innere Energie** ist die im System (Gas) zugeführte gespeicherte Arbeit *und stellt den Energievorat eines Systems dar*."



$$\mathbf{Q_{12} + W_{g12} = U_2 - U_1}$$

$$\mathbf{q_{12} = \frac{Q_{12}}{m} = (u_2 - u_1) - w_{g12}}$$

Q :	Wärme	[J]
q :	spezifische Wärme	[J / kg]
U :	Innere Energie	[J]
u :	spez. innere Energie	[J / kg]
W_g :	gesamte verrichtete Arbeit am geschlossenen System	[J]

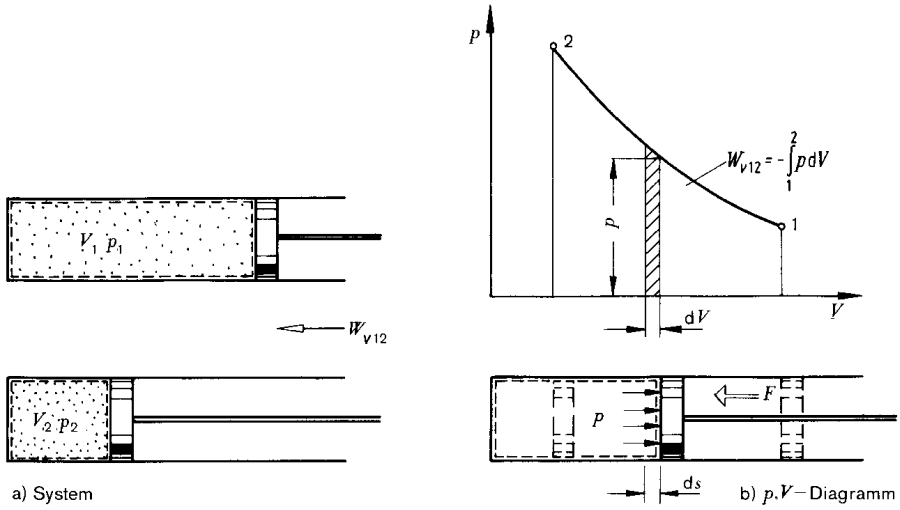
Gesamte verrichtete Arbeit W_g am geschlossenen System:

$$\mathbf{W_{g12} = W_{e12} + W_{r12}}$$

W_g :	gesamte verrichtete Arbeit am geschlossenen System	[J = N·m]
W_e :	Volumenänderungsarbeit (e - Expansion)	[J = (kg·m²) / s²]
W_r :	Reibungsarbeit ($W_r \approx W_{diss}$ – Dissipation)	[J]

Volumenänderungsarbeit W_e :

„Volumenänderungsarbeit ist die einem bzw. von einem geschlossenen System bei reibungsfreier Zustandsänderung über die Systemgrenze zu- oder abgeführte Arbeit.“ Dabei kann die Systemgrenze adiabat oder nichtadiabat sein.



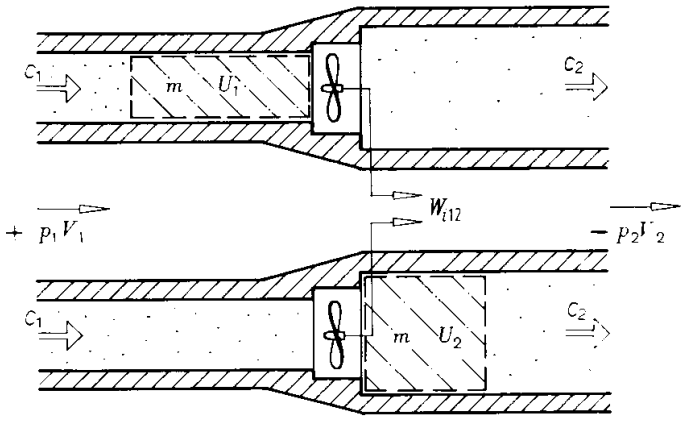
$$W_{e12} = -\int_1^2 p \cdot dV$$

$$w_{e12} = \frac{W_{e12}}{m} = -\int_1^2 p \cdot d\upsilon$$

W_e :	Volumenänderungsarbeit (e - Expansion)	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
w_e :	spezifische Volumenänderungsarbeit	[J / kg]
m :	Masse	[kg]
V :	Volumen	[m^3]
υ :	spezifisches Volumen	[m^3 / kg]

1.4.3 **Energiebilanzgleichung für offene Systeme** (stationärer Fließprozeß)

Beim offenen System wandelt sich als Wärme und als Arbeit zugeführte Energie in Enthalpie, kinetische und potentielle Energie um.



$$Q_{12} + W_{i12} = (H_2 - H_1) + \tfrac{1}{2} \cdot m \cdot (c_2^2 - c_1^2) + m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

$$q_{12} + w_{i12} = (h_2 - h_1) + \tfrac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1)$$

$$\dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m} \cdot [(h_2 - h_1) + \tfrac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1)]$$

Innere Arbeit W_i (am offenen System verrichtete Arbeit)**:**

$$W_{i12} = W_{t12} + W_{r12}$$

W_i :	innere Arbeit	[J]
W_t :	technische Arbeit	[J]
W_r :	Reibungsarbeit ($W_r \approx W_{diss}$ – Dissipation)	[J]

Energiebilanz ohne Änderung der kinetischen und potentiellen Energie:

$$Q_{12} + W_{i12} + p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2 = U_2 - U_1$$

$$Q_{12} + W_{i12} = (U_2 + p_2 \cdot V_{21}) - (U_1 + p_1 \cdot V)$$

$$Q_{12} + W_{i12} = H_2 - H_1$$

W_i :	innere Arbeit	[J]
Q :	Wärme	[J]
U :	Innere Energie	[J]
H :	Enthalpie	[J]

Energiebilanz in einem adiabaten und reibungsfreien System:

$$W_{t12} = H_2 - H_1$$

W_t :	technische Arbeit	[J]
H :	Enthalpie	[J]

Enthalpie (griech. = sich erwärmen, ist die innere Energie plus Verschiebearbeit)**:**

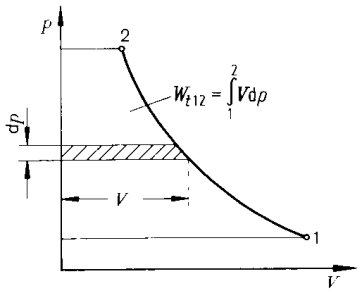
$$H = U + p \cdot V$$

$$h = \frac{H}{m} = u + p \cdot \upsilon$$

H :	Enthalpie	[J]
U :	Innere Energie	[J]
u :	spez. innere Energie	[J / kg]
h :	spez. Enthalpie	[J / kg]

Technische Arbeit W_t :

Die technische Arbeit ist die an offenen System reversibel verrichtete Arbeit. Ändern sich kinetische und potentielle Energie nicht, so ist die technische Arbeit wie folgt:



$$W_{t12} = \int_1^2 V \cdot dp$$

$$w_{t12} = \frac{W_{t12}}{m} = \int_1^2 \upsilon \cdot dp$$

W_t :	technische Arbeit	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
w_t :	spezifische technische Arbeit	[J / kg]
m :	Masse	[kg]
V :	Volumen	[m^3]
υ :	spezifisches Volumen	[m^3 / kg]

1.5 Spezifische Wärmekapazität c und Mischtemperatur t_{Mi}

„Die Energie, mit der man die Temperatur von 1 kg eines Stoffes um 1 K ändern kann, nennt man spezifische Wärmekapazität."

$$Q_{12} = m \cdot c_m\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$c_m\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_m\Big|_{0\,°C}^{t_2} \cdot t_2 - c_m\Big|_{0\,°C}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

Q :	Wärme	[J = N·m = (kg·m²) / s²]
m :	Masse	[kg]
c_m :	mittlere spez. Wärmekapazität	[kJ / (kg·K)]
t :	Temperatur	[°C]

Bei **Gasen und Dämpfen** (kompressible Medien) ist zu unterscheiden:

c_p = isobare spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [kJ / (kg·K)]

c_υ = isochore spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [kJ / (kg·K)]

Für **Flüssigkeiten und Festkörper** (normaler Weise inkompressible Medien) gilt:

$c = c_p \neq f(p,V)$

T 1.7a Mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{pm}\Big|_{0\,°C}^{t}$ einiger Metalle

Temperaturbereich	0 °C—100 °C $\frac{kJ}{kg\,K}$	0 °C—300 °C $\frac{kJ}{kg\,K}$	0 °C—500 °C $\frac{kJ}{kg\,K}$
Aluminium	0,908	0,954	0,992
Blei	0,131	0,136	—
Eisen, rein	0,464	0,469	0,473
Stahl, 0,2 % C	0,473	0,502	0,540
Stahl, 1,0 % C	0,490	0,515	0,552
Gußeisen	0,544	0,573	0,590
Kupfer	0,387	0,401	0,408

Zu technischen Rechnungen werden in der Regel Festwerte benutzt, so z.B.

Wasser:	c = 4,186	bzw. in der Technik	c ≈ 4,20	[kJ / (kg·K)]
Luft:	$c_{p\,0\,°C}$ = 1,0043	bzw. in der Technik	$c_{p\,0\,°C}$ ≈ 1,0	[kJ / (kg·K)]
	$c_{\upsilon\,0\,°C}$ = 0,7171	bzw. in der Technik	$c_{\upsilon\,0\,°C}$ ≈ 0,72	[kJ / (kg·K)]

Mischtemperatur:

Werden zwei Systeme mit unterschiedlicher Temperatur über eine nichtadiabate Systemgrenze verbunden oder zwei Stoffe mit unterschiedlicher Temperatur gemischt, so geht Wärme von dem System höherer Temperatur (a) an das System niederer Temperatur (b) über.

$$t_{Mi} = \frac{m_a \cdot c_{ma}\Big|_{t_{Mi}}^{t_a} \cdot t_a + m_b \cdot c_{mb}\Big|_{t_b}^{t_{Mi}} \cdot t_b + \dots}{m_a \cdot c_{ma}\Big|_{t_{Mi}}^{t_a} + m_b \cdot c_{mb}\Big|_{t_b}^{t_{Mi}} + \dots}$$

t_{Mi} :	Mischtemperatur	[°C]
m :	Masse	[kg]
c_m :	mittlere spez. Wärmekapazität	[kJ / (kg·K)]
t :	Temperatur	[°C]

bei Mischung gleicher Stoffe ($c_{ma} = c_{mb}$):

$$t_{Mi} = \frac{m_a \cdot t_a + m_b \cdot t_b + \dots}{m_a + m_b + \dots}$$

2. Zustandsänderung des idealen Gases

2.1 Zustandsgesetze

2.1.1 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases

$$p \cdot \upsilon = R_i \cdot T$$

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

R_i :	spezielle (spezifische) Gaskonstante	[J / (kg·K)]
V :	Volumen	[m^3]
υ :	spezifisches Volumen	[m^3 / kg]
p :	Druck	[Pa = N / m^2]
m :	Masse	[kg]
T :	absolute Temperatur	[K]

2.1.2 Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac

BOYLE-MARIOTTE: bei T = konst.

$$p \cdot V = konst.$$

GAY-LUSSAC: bei p = konst.

$$\frac{V}{T} = konst.$$

V :	Volumen	[m^3]
p :	Druck	[Pa = N / m^2]
T :	absolute Temperatur	[K]

2.1.3 Allg. Gaskonstante, molare Masse und Normvolumen

$$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{26}$$

$$m = n \cdot M$$

$$V_{mn} = 22{,}414$$

$$V_n = n \cdot V_{mn}$$

$$\upsilon = \frac{V}{m} = \frac{V_m}{M}$$

$$p \cdot V_m = R_m \cdot T$$

$$R_i = \frac{R_m}{M}$$

$$R_{mn} = \frac{p_n \cdot V_{mn}}{T_n} = \frac{101{,}32 \cdot 22{,}414}{273{,}15} = 8315$$

N_A :	Avogadro-Konstante	[Teilchen / kmol]
n :	Anzahl Teilchen	
R_i :	spezielle (spezifische) Gaskonstante	[J / (kg·K)]
R_m :	allgemeine (molare) Gaskonstante	[J / (kmol·K)]
V_{mn} :	molare Normvolumen	[m^3 / kmol]
V :	Volumen	[m^3]
υ :	spezifisches Volumen	[m^3 / kg]
p :	Druck	[Pa = N / m^2]
M :	molare Masse	[kg / kmol]
m :	Masse	[kg]
T :	absolute Temperatur	[K]

2.1.4 Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases

$$u_2 - u_1 = c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$h_2 - h_1 = c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

u :	spez. innere Energie	[J / kg]
h :	spez. Enthalpie	[J / kg]
t :	Temperatur	[°C]
c_m :	mittlere spez. Wärmekapazität	[kJ / (kg·K)]

2.1.5 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases

$$R_i = c_p - c_\upsilon$$

$$\chi = \frac{c_p}{c_\upsilon}$$

$$H_2 - H_1 = \chi \cdot (U_2 - U_1)$$

$$\chi = \chi_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2}}{c_{\upsilon m} \Big|_{t_1}^{t_2}}$$

R_i :	spezielle (spezifische) Gaskonstante	[J / (kg·K)]
χ :	Isentropenexponent (Kapa)	
U :	innere Energie	[J]
H :	Enthalpie	[J]
t :	Temperatur	[°C]
c_m :	mittlere spez. Wärmekapazität	[kJ / (kg·K)]

Molare Wärmekapazität des idealen Gases

$$C_{m\upsilon} = M \cdot c_\upsilon$$

$$C_{mp} = M \cdot c_p$$

$$R_m = C_{mp} - C_{m\upsilon}$$

$$\chi = \frac{C_{mp}}{C_{m\upsilon}}$$

C_m :	molare Wärmekapazität	[J / (kmol·K)]
R_m :	allgemeine (molare) Gaskonstante	[J / (kmol·K)]
M :	molare Masse	[kg / kmol]

Der χ - Wert hat für das ideale Gas abhängig von der Anzahl der Atome, feste Zahlenwerte, so z.B.:

1-atomige Gase: χ **= 1,667**

2-atomige Gase: χ **= 1,4**

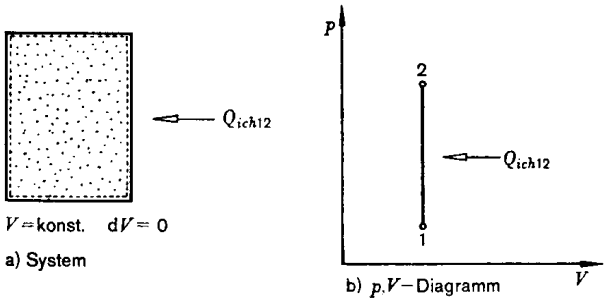
3-atomige Gase: χ **= 1,3**

2.2 Zustandsänderungen des idealen Gases im geschlossenen System

Hier werden zunächst idealisierte, umkehrbare oder reversible, d.h. verlustfreie Zustandsänderungen betrachtet. Die allg. abgeleitenden Beziehungen werden entweder näherungsweise oder mit entsprechenden Korrekturen den realen Vorgängen angepaßt!

2.2.1 Isochore Zustandsänderung (V, υ = konst.)

„Wärmewirkung auf ein ideales Gas bei konstantem Volumen führt allein zur Änderung der inneren Energie."



$$\frac{p}{T} = \text{konst.}$$

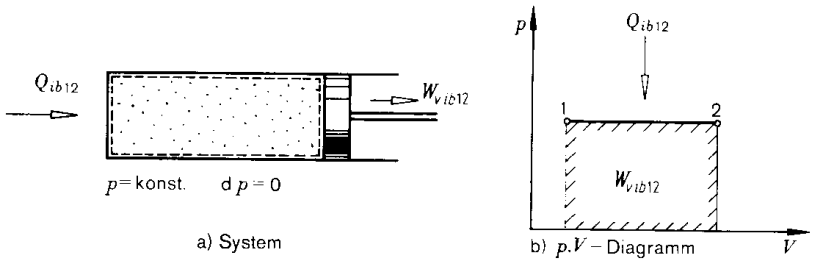
$$W_{e\,ich12} = 0$$

$$Q_{ich12} = U_2 - U_1 = m \cdot c_{\upsilon m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

$W_{e\,ich\,12}$:	isochore Volumenänderungsarbeit	[J]
$Q_{ich\,12}$:	isochore Wärmemenge	[J]

2.2.2 Isobare Zustandsänderung (p = konst.)

„Bei der isobaren Zustandsänderung tritt Änderung der inneren Energie und Volumenänderungsarbeit auf."



$$\frac{V}{T} = \text{konst.}$$

$$W_{e\,ib12} = p \cdot (V_1 - V_2)$$

$$W_{e\,ib12} = m \cdot R_i \cdot (T_1 - T_2)$$

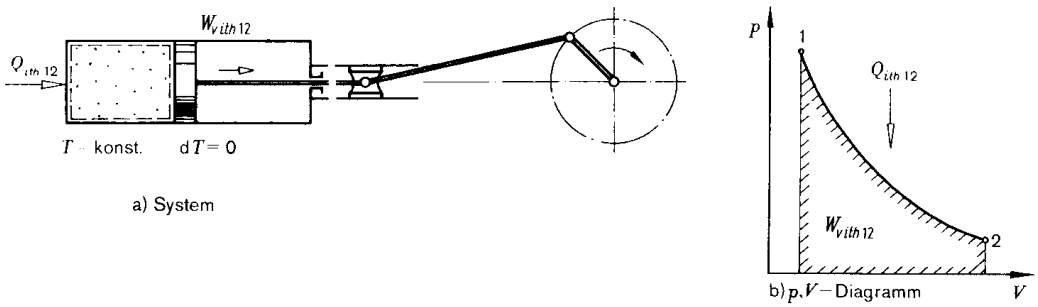
$$Q_{ib12} = H_2 - H_1 = m \cdot c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$U_2 - U_1 = Q_{ib12} + W_{e\,ib12}$$

$W_{e\,ib\,12}$: isobare Volumenänderungsarbeit [J]
$Q_{ib\,12}$: isobare Wärmemenge [J]

2.2.3 Isotherme Zustandsänderung (T,t = konst.)

„Die gesamte abgegebene isotherme Arbeit (Volumenänderungsarbeit) besteht aus zugeführter Wärme. Dementsprechend wird die gesamte zugeführte Volumenänderungsarbeit bei isothermer Verdichtung in Form von Wärme abgeführt!"



$$p \cdot V = \text{konst.}$$

$$W_{e\,iso12} = m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln\frac{V_1}{V_2}$$

$$W_{e\,iso12} = m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln\frac{p_2}{p_1}$$

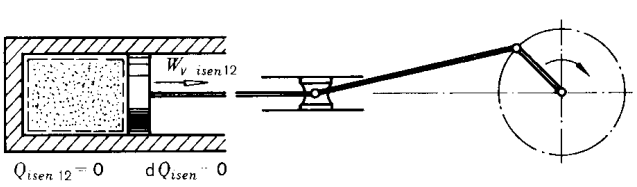
$$Q_{iso12} = -W_{e\,iso12}$$

$W_{e\,iso\,12}$: isotherme Volumenänderungsarbeit [J]
$Q_{iso\,12}$: isotherme Wärmemenge [J]

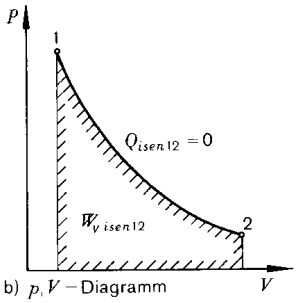
2.2.4 Isentrope (Adiabate) Zustandsänderung ($Q_{12} = 0$)

Isentrope = „Zustandsänderung in einem wärmedichtem System indem keine Reibung auftritt."

„Einem System zugeführte isentrope Volumenänderungsarbeit dient ausschließlich der Erhöhung der inneren Energie (Verdichtung). Abgegebene Volumenänderungsarbeit wird vollständig aus innerer Energie des Systems gedeckt. Es ändern sich jeweils alle Zustandsgrößen p, V und T."



a) System



b) p, V – Diagramm

$$\mathbf{p \cdot V^{\chi} = konst.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\chi-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$$

$$W_{e\ isen12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\chi - 1} \cdot \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\chi-1} - 1\right]$$

$$W_{e\ isen12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\chi - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} - 1\right]$$

$$W_{e\ isen12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\chi - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$W_{e\ isen12} = \frac{m \cdot R_i}{\chi - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{e\ isen12} = \frac{1}{\chi - 1} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1)$$

$$W_{e\ isen12} = U_2 - U_1 = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

$W_{e\ isen\ 12}$: isentrope Volumenänderungsarbeit [J]

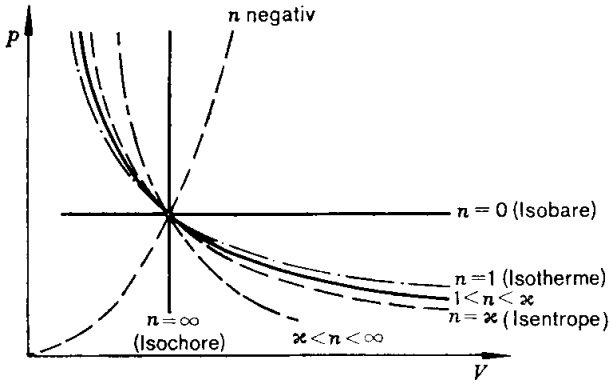
χ : Isentropenexponent (Kapa)

Die isentrope Zustandsänderung verläuft stets steiler als die *isotherme* Zustandsänderung, d.h. die Isotherme ist die effektivere Zustandsänderung (bei Expansion gibt *iso* mehr Arbeit ab und bei Kompression braucht *iso* weniger Arbeit).

2.2.5 Polytrope Zustandsänderung (1 < n < χ)

Die bisher behandelten Zustandsänderungen können durch die Polytrope (vielgestaltige) Zustandsänderung beschrieben werden, sofern χ durch n ersetzt wird.

Isochore	V = konst	$p^0 \cdot V^\infty$ = konst.	$\Rightarrow$	n = ∞
Isobare	p = konst.	$p \cdot V^0$ = konst.	$\Rightarrow$	n = 0
Isotherme	T = konst.	$p \cdot V^1$ = konst.	$\Rightarrow$	n = 1
Isentrope	Q = 0	$p \cdot V^\chi$ = konst.	$\Rightarrow$	n = χ



$$n = \frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{\ln\frac{p_2}{p_1} - \ln\frac{T_2}{T_1}} = \frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{\ln\frac{V_1}{V_2}}$$

$$p \cdot V^n = \text{konst.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$W_{e\ pol\ 12}$:	polytrope Volumenänderungsarbeit	[J]
$Q_{pol\ 12}$:	polytrope Wärme	[J]
n :	Polytropenexponent	

$$W_{e\,pol12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} - 1\right]$$

$$W_{e\,pol12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$W_{e\,pol12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$W_{e\,pol12} = \frac{m \cdot R_i}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$$

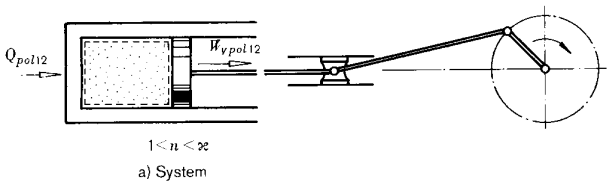
$$W_{e\,pol12} = \frac{1}{n-1} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1)$$

$$W_{e\,pol12} = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{\chi - 1}{n-1} \cdot (t_2 - t_1)$$

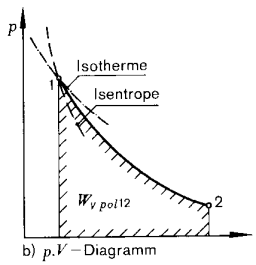
$$Q_{pol12} = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n - \chi}{n-1} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_{pol12} = \frac{n - \chi}{n-1} \cdot W_{e\,pol12}$$

$$Q_{pol12} + W_{e\,pol12} = U_2 - U_1$$



a) System



b) p,V – Diagramm

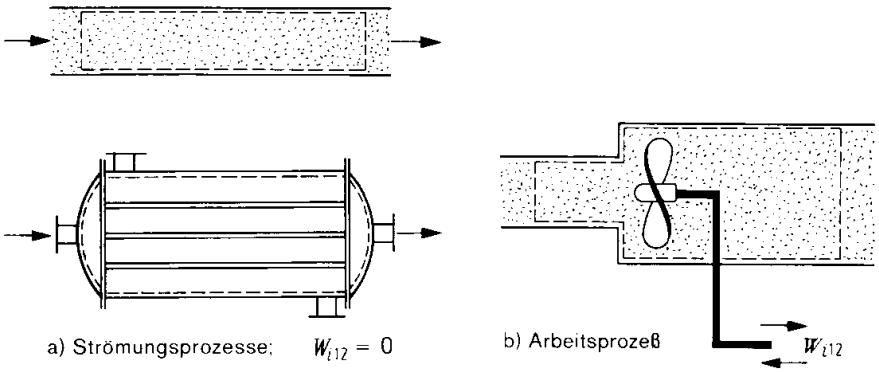
Bei Vernachlässigung von Reibung verlaufen Verdichtungs- und Entspannungsvorgänge zwischen der Isothermen (n=1) und der Isentropen (n=χ) mit dem Polytropenexponent 1 < n < χ. In der technischen Praxis nähern sich die Zustandsänderungen dieser Polytropen um so mehr der Isentropen desto schneller die Maschine läuft.

2.3 Zustandsänderungen des idealen Gases im offenen System

Bei den Prozessen in geschlossenen Systemen haben wir die eingeschlossene **Stoffmasse m** betrachtet, nach deren einmaliger Zustandsänderung der Prozeß beendet war. Die meisten thermodynamischen Prozesse verlaufen aber in offenen Systemen, denen der **Stoffmasse** $\dot{m}$ zuströmt, der eine Zustandsänderung in dem offenen System erfährt und es anschließend wieder verläßt.

Wir behandeln in diesem Abschnitt nur **stationäre reversible Prozesse** unter vernachlässigter **Änderung der kinetischen und potentiellen Energie**.

Die Berechnung der **Zustandsgrößen** und der **zu- oder abgeführten Wärme** erfolgt auch bei offenen Systemen nach den Gleichungen für geschlossene Systeme.



Bei offenen Systemen kann man Strömungsprozesse und Arbeitsprozesse unterscheiden:

Strömungsprozesse verlaufen in Systemen, in denen keine Vorrichtung zur Zu- oder Abfuhr von Arbeit vorhanden ist ($W_i = 0$). Bei reversiblen Strömungsprozesse ($W_{diss} = 0$) und konstanter kinetischer und potentieller Energie ist der Druck konstant (dp = 0), so daß auch die technische Arbeit $\mathbf{W_{t\,12} = \int_1^2 V \cdot dp = 0}$ ist.
Beispiele für Strömungsprozesse sind die Vorgänge in Wärmeübertragern und Rohrleitungen. Für diese Prozesse sind in erster Linie Wärmezu- bzw. –abfuhr zuermitteln, so daß sich ihre Behandlung in diesem Zusammenhang erübrigt.

Bei den **Arbeitsprozesse** sind zu unterscheiden:

- → Kraftmaschinen: **Abgabe** von innerer bzw. (reversible) **technischer Arbeit** mit Zufuhr von Wärme,
  z.B. Gas- und Dampfturbine, Otto- und Dieselmotor
- → Arbeitsmaschinen: **Zufuhr** von innerer bzw. (reversible) **technischer Arbeit**,
  z.B. Ventilator, Pumpe, Verdichter, Wärmepumpen, Kälteanlagen

Als **Besonderheit bei den offenen Systemen** ist demnach bei reversiblen Arbeitsprozessen **nur die technische Arbeit** für die einfachen Zustandsänderungen **zu ermitteln**.
Wenn statt der Masse m der Massenstrom $\dot{m}$ eingesetzt wird, ergibt sich statt der Arbeit $W_{t\,12}$ die **Leistung** $\mathbf{P_{t\,12}}$.

2.3.1 Technische Arbeit bei einfachen Zustandsänderungen

Isochore (V,υ = konst.)

$$W_{t\,ich12} = m \cdot R_i \cdot (T_2 - T_1)$$

Isobar (p = konst.)

$$W_{t\,ib12} = 0$$

R_i :	spezielle (spezifische) Gaskonstante	[J / (kg·K)]
m :	Masse	[kg]
n :	Polytropenexponent	
χ :	Isentropenexponent (Kapa)	
H :	Enthalpie	[J]
T :	absolute Temperatur	[K]
c_m :	mittlere spez. Wärmekapazität	[kJ / (kg·K)]

Isotherm (T,t = konst.)

$$W_{t\,iso12} = m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$W_{t\,iso12} = W_{e\,iso12}$$

Isentrope ($Q_{12} = 0$)

$$W_{t\,isen12} = H_2 - H_1$$

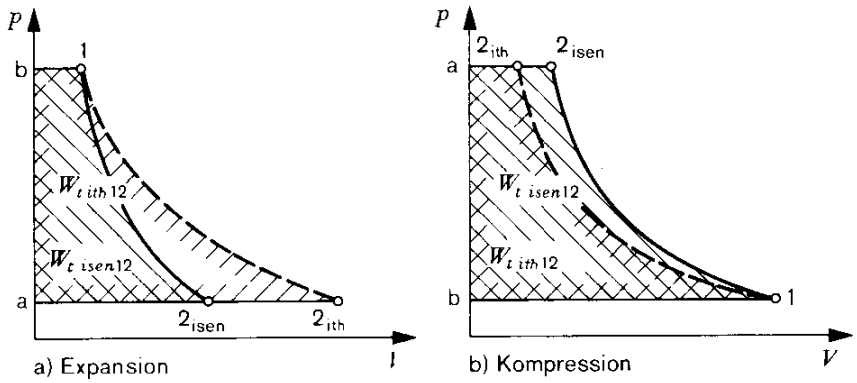
$$W_{t\,isen12} = m \cdot c_{pm}\Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t\,isen12} = \chi \cdot m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t\,isen12} = \chi \cdot W_{e\,isen12}$$

Polytrope ($1 < \chi < n$)

$$W_{t\,pol12} = n \cdot W_{e\,pol12}$$



Die Erkenntnis, daß die isotherme Zustandsänderung die wünschenswertere ist, wird bestätigt.

Bei der Expansion von dem Anfangsdruck p_1 auf den Endruck p_2 ist die von dem offenen System verrichtete technische Arbeit bei der Isothermen größer als bei der Isentropen. Während bei der Kompression der Arbeitsaufwand bei der Isothermen kleiner als bei der Isentropen ist.

Der wirkliche Verlauf der Zustandsänderung bei reversiblem Vorgang liegt auch beim offenen System zwischen der Isothermen und der Isentropen ($1 < n < \chi$), und zwar nahe der Isentropen.

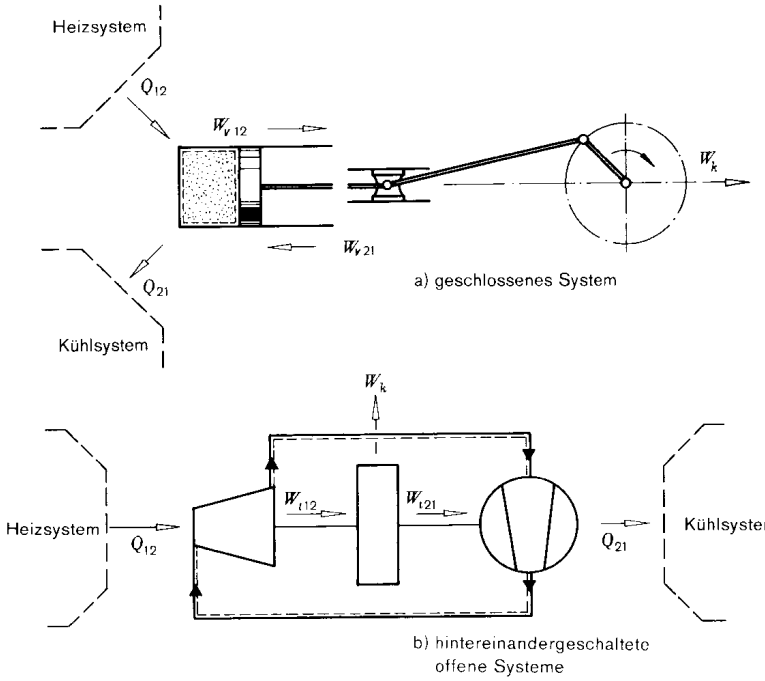
2.4 Kreisprozesse

2.4.1 Beschreibung und Arbeit (W_K) des reversiblen Kreisprozesses

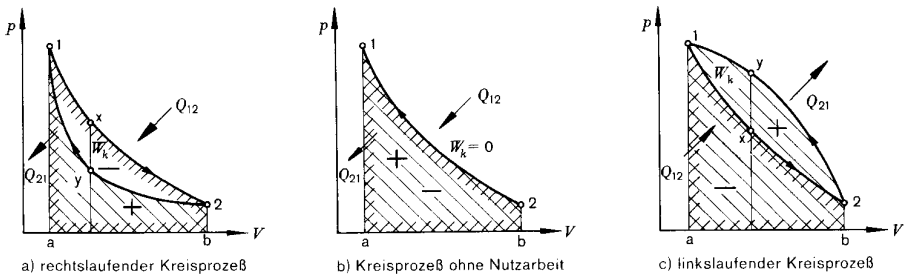
bisher: Einmalige Zustandsänderung von 1 nach 2.

jetzt: Aneinanderreihung mehrer Zustandsänderungen (1...n) ,so daß am Ende wieder der Anfangszustand steht.

„Ein Prozeß, bei dem ein System seinen Anfangszustand wieder erreicht, ist ein Kreisprozeß.“



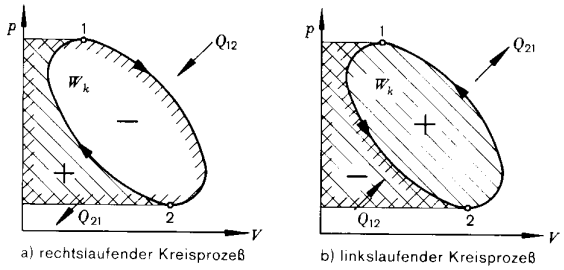
Arbeit des geschlossenen Kreisprozesses



$$W_K = \sum W_e = -\sum Q$$

W_K :	Arbeit des reversiblen Kreisprozesses	[J]
W_e :	Volumenänderungsarbeit	[J]
Q :	Wärme	[J]

Arbeit des offenen Kreisprozesses



$$W_K = \sum W_t = -\sum Q$$

W_K :	Arbeit des reversiblen Kreisprozesses	[J]
W_t :	technische Arbeit	[J]
Q :	Wärme	[J]

Rechtslaufender Kreisprozeß

- Kraftmaschinen: **Wärme** → **Arbeit** (Nutzarbeit)
  Zufuhr von **Wärme Q (+)** mit Abgabe von innerer bzw. reversible **Arbeit W_K (–)**,
  z.B. Gas- und Dampfturbine, Otto- und Dieselmotor

Linkslaufender Kreisprozeß

- Arbeitsmaschinen: **Arbeit** → **Wärme**
  Zufuhr von innerer bzw. reversible **Arbeit W_K (+)** mit Abgabe von **Wärme Q (–)**,
  z.B. Ventilator, Pumpe, Verdichter, Wärmepumpen, Kälteanlagen

2.4.2 Thermischer Wirkungsgrad (Kraftmaschinen)

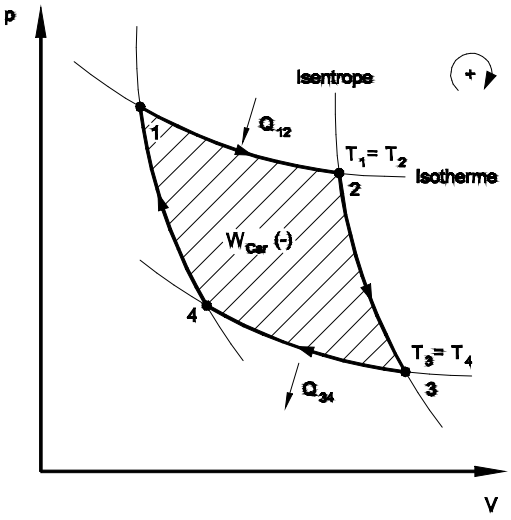
Die Umwandlung der zugeführten Wärme in Arbeit ist nicht vollständig.
„Der **thermische Wirkungsgrad** gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärme in Arbeit umgewandelt wird, d.h. er gibt Auskunft über die thermische Vollkommenheit eines Kreisprozesses."

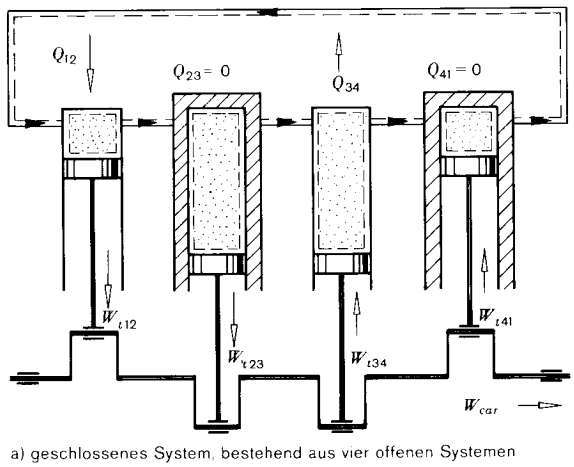
$$\eta_{th} = \frac{|W_K|}{Q_{zu}} \qquad \eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

η_{th} :	Thermischer Wirkungsgrad	
W_K :	Nutzarbeit	[J]
Q_{zu} :	Wärmezufuhr	[J]

2.4.3 Carnotprozeß

Arbeit aus Wärme. Unter allen denkbaren reversiblen Prozessen wird durch einen von CARNOT 1824 eingeführten und nach ihm benannten Prozeß der größte überhaupt mögliche Anteil der zugeführten Wärme in Nutzarbeit umgewandelt. Der Carnotprozeß dient als Vergleichsprozeß zur Beurteilung anderer Kreisprozesse, er besteht aus **zwei isothermen** und **zwei isentropen** Zustandsänderungen.





a) geschlossenes System, bestehend aus vier offenen Systemen

$$W_{Car} = \sum W_e = \sum W_t = -\sum Q$$

$$W_{Car} = -Q_{iso\ 12} \cdot \left(\frac{T_1 - T_3}{T_1} \right)$$

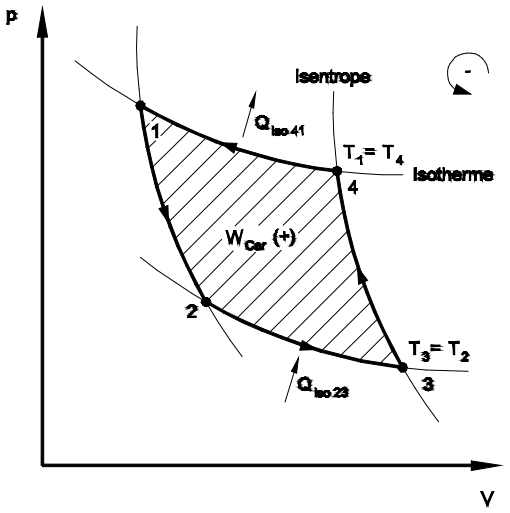
$$\eta_{Car} = \eta_{th\ max} = \frac{T_1 - T_3}{T_1}$$

η_{Car} :	Carnotfaktor	
W_{Car} :	Nutzarbeit des Carnotprozesses	[J]
Q_{iso} :	isotherme Wärmezufuhr	[J]

Grenzwerte:

$\eta_{Car} \leq 100\ \%$	$T_1 >> T_3$	(Werkstoffproblem oder $T_3 = 0$ K !?)
$\eta_{Car} \geq 0\ \%$	$T_1 \approx T_3$	(z.B. Nutzung von Umweltwärme)

2.4.4 Wärmepumpe und Kältemaschine



Der Carnotprozeß kann auch als linkslaufender Kreisprozeß (Arbeitsmaschine) arbeiten. Das ist möglich, da jede der betreffenden Zustandsänderungen in beide Richtungen verlaufen kann. Hierbei wird Wärme Q_{iso23} bei niedriger Temperatur T_3 aufgenommen und durch den Arbeitsaufwand W_{Car} auf die höhere Temperatur T_1 angehoben bzw. "transformiert", man spricht daher auch von "Wärmetransformator".

Dieses *Heben* von Wärme auf eine höhere Temperatur ist der Zweck der linkslaufenden Kreisprozesse. Sie können auf zwei Arten technisch genutzt werden;
als *Wärmepumpe* und als *Kältemaschine*.

Die Bewertung erfolgt über die *Leistungszahl* ε .

Wärmepumpe

Bei der Wärmepumpe dient die dem Prozeß abgeführte Wärme zur Beheizung eines Gebäudes oder Stoffes. Als Nutzen ist die bei höherer Temperatur T_1 abgegebene Wärme Q_{ab} (Q_{iso41}) zu betrachten. Die aufgenommene Wärme Q_{zu} (Q_{iso23}) steht aus der Umgebung bei T_b oder aus der Abwärme bei T_3 (etwas höher als T_b) kostenlos zur Verfügung. Aufzuwenden ist demnach nur die Arbeit des Kreisprozesses W_k (Q_{iso41}+ Q_{iso23}).

$$\varepsilon_{WP} = \frac{|Q_{ab}|}{W_K} = \frac{Q_{ab}}{\sum Q} = 1 + \varepsilon_{KM}$$

$$\varepsilon_{WPCar} = \frac{1}{\eta_{Car}} = \frac{T_1}{T_1 - T_3} \quad > \quad 1$$

ε_{WP} :	Leistungszahl Wärmepumpe	
ε_{WPCar}:	Leistungszahl Wärmepumpe für Carnot-KP	
Q_{ab} :	Heizwärme (Nutzen)	[J]
W_K :	Antriebsarbeit (Aufwand)	[J]

Kältemaschine

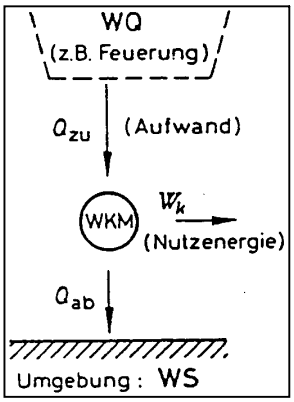
Zweck der Kältemaschine ist die Kühlung eines Raumes oder Systems, dem Wärme bei niedriger Temperatur T_3 entzogen wird. Diese Kältemaschine bei niedriger Temperatur zugeführte Wärme Q_{zu} (Q_{iso23}) ist der Nutzen des Prozesses. Aufzuwenden ist die Arbeit des Kreisprozesses W_k (Q_{iso41}+ Q_{iso23}).

$$\varepsilon_{KM} = \frac{Q_{zu}}{W_K} = \frac{Q_{zu}}{|\sum Q|} = \varepsilon_{WP} - 1$$

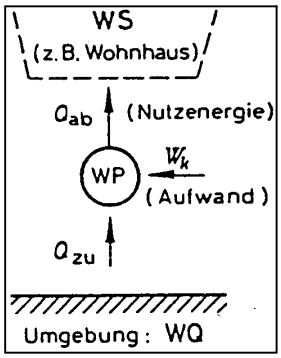
$$\varepsilon_{KMCar} = \frac{T_3}{T_1 - T_3} \quad \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \quad 1$$

ε_{KM} :	Leistungszahl Kältemaschine	
ε_{KMCar}:	Leistungszahl Kältemaschine für Carnot-KP	
Q_{zu} :	Kühlung (Nutzen)	[J]
W_K :	Antriebsarbeit (Aufwand)	[J]

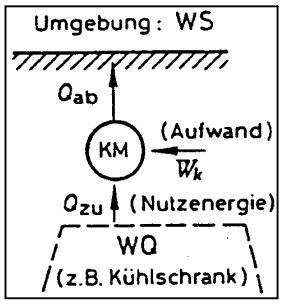
Wärmekraftmaschine



Wärmepumpe



Kältemaschine



WS = Wärmesenke
WQ = Wärmequelle

3. Irreversible Zustandsänderungen

„Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel“.

Bei realen verlustbehafteten Zustandsänderungen kann man unterscheiden zwischen

- **Dissipationsprozessen**,
  wie z.B. reibungsbehafte Strömung, plastische Verformung, elektrische Vorgänge, Verbrennung und
- **Ausgleichprozessen**,
  wie z.B. Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsausgleich.

Drei Merkmale irreversibler Prozesse:

1. Sie verlaufen von selbst nur in einer Richtung.
2. Bei ihnen wird Energie entwertet.
3. Sie lassen sich nur dann wieder rückgängig machen, wenn von außen in das System eingegriffen wird, wodurch Veränderungen in der Umgebung zurückbleiben.

3.1 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Die Erkenntnisse über irreversible Vorgänge sind im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zusammengefaßt.
Die erste Formulierung stammt von CLAUSIUS 1850 und betraf die Wärmeübertragung bei Temperaturgefälle:

„**Wärme** strömt immer nur von einen System mit **höherer Temperatur** auf ein System mit **niederer Temperatur**.“

Scheinbare Ausnahmen, wie z.B. Wärmepumpen- und Kältemaschinenprozesse benötigen jedoch einen zusätzlichen Energieaufwand. Damit ergibt sich eine bestimmte Wertigkeit der Energie (Wärme) abhängig von der zugeordneten Temperatur. Diese wird ausgedrückt durch die **Entropie**.

3.2 Die Entropie S

3.2.1 Definition der Entropie

Die Entropie bezeichnet den Energieverlust (Dissipation) der durch irreversible Wärmeentwicklung bei realen Zustandsänderungen entsteht. Das Entropiedifferential ΔS ist also bei idealen verlustieren Zuständen gleich null. Solche Zustandsänderungen heißen isentrop (gleichbleibende Entropie).

Definition der Entropie (griech. „umkehren“) als eine andere Formulierung des zweiten Hauptsatzes:

„Bei einem umkehrbaren Prozeß bleibt die Summe der Entropien **aller** am Prozeß beteiligten Systeme konstant, bei einem nicht umkehrbaren Prozeß wächst die Summe der Entropien dieser Systeme.“

Rudolf CLAUSIUS definierte die Entropie zu:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}$$

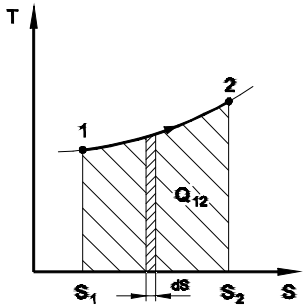
S :	Entropie	[J / K]
s:	spezifische Entropie	[J / (kg·K)]
Q :	Wärme	[J]
T :	absolute Temperatur	[K]

Aussagen: $\int ds = 0$ → umkehrbar

$\int ds > 0$ → nicht umkehrbar

3.2.2 T, S-Diagramm

Volumenänderungsarbeit und technische Arbeit können als Fläche im p, V-Diagramm dargestellt werden. Um auch andere bei einem Vorgang auftretende Energien in einem Diagramm zuveranschaulichen, ist das T, S-Diagramm eingeführt worden.



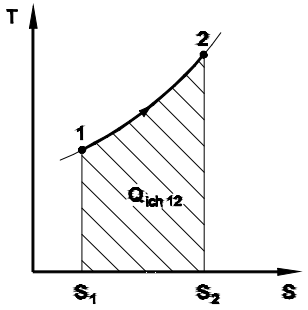
Im T, S-Diagramm stellt die Fläche unter der Zustandsänderung Wärme Q_{12} dar.

$$Q_{12} = \int_1^2 T \cdot dS$$

S :	Entropie	[J / K]
Q :	Wärme	[J]
T :	absolute Temperatur	[K]

3.2.3 Zustandsänderungen im T, S-Diagramm

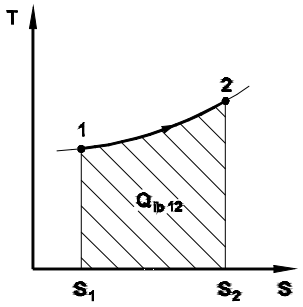
- **Isochore (V, υ = konst.)**



$$Q_{ich\ 12} = U_2 - U_1 = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1) = W_{e\ isen\ 12}$$

$$(S_2 - S_1)_{ich} = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln\frac{T_2}{T_1}$$

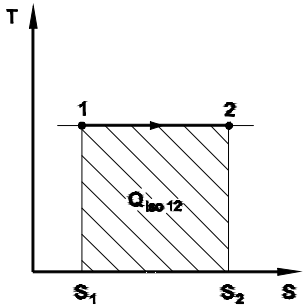
- **Isobare (p = konst.)**



$$Q_{ib\ 12} = H_2 - H_1 = m \cdot c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1) = W_{t\ isen\ 12}$$

$$(S_2 - S_1)_{ib} = m \cdot c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln\frac{T_2}{T_1}$$

- **Isotherme (T = konst.)**

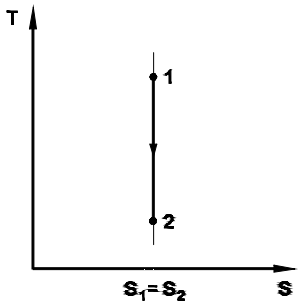


$$Q_{iso\ 12} = m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln\frac{p_1}{p_2} = -W_{e\ iso\ 12} = -W_{t\ iso\ 12}$$

$$(S_2 - S_1)_{iso} = m \cdot R_i \cdot \ln\frac{p_1}{p_2}$$

$$(S_2 - S_1)_{iso} = m \cdot R_i \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}$$

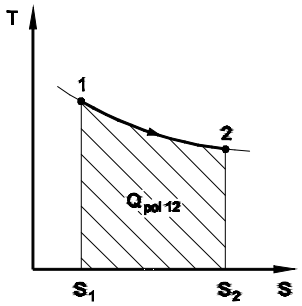
- **Isentrope (S = konst., $Q_{12} = 0$)**



Namensgebung für diese Zustandsänderung !

$$S_1 = S_2 = \text{konst.}$$

- **Polytrope ($1 < \chi < n$)**

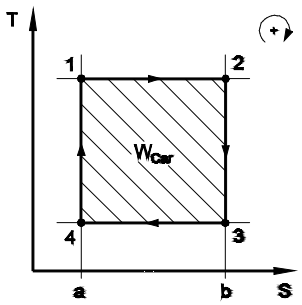


$$Q_{pol12} = m \cdot c_{\upsilon m}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n-\chi}{n-1} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$(S_2 - S_1)_{pol} = m \cdot c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n-\chi}{n-1} \cdot \ln\frac{T_2}{T_1}$$

3.2.4 Carnotprozeß im T, S-Diagramm

- **2 Isotherme & 2 Isentropen**



Fläche 12ba → Q_{iso12} = zugeführte Wärme

Fläche 43ba → Q_{iso34} = abgeführte Wärme

Fläche 1234 → $W_{Car} = -\Sigma Q$ = Nutzarbeit

$$\eta_{Car} = \frac{|W_{car}|}{Q_{zu}} = \frac{|\Sigma Q|}{Q_{iso\ 12}} = \frac{\text{Fläche 1234}}{\text{Fläche 12ba}}$$

Es ist kein Kreisprozeß mit einem besseren thermischen Wirkungsgrad als beim Carnotprozeß denkbar.

4. Das ideale Gas in Maschinen-Kreisprozesse

4.1 Vergleichsprozesse

In Kreisprozessen erfährt ein Gas eine in sich geschlossene Folge von Zustandsänderungen, wobei es wieder in den Anfangszustand zurückkehrt. Jeder Kreisprozeß umfaßt deshalb außer arbeitsliefernden Expansionsvorgängen auch arbeitsverbrauchende Kompressionsvorgänge.
Für die theoretischen Untersuchungen führt man die polytropischen Zustandsänderung der wirklichen Prozesse auf die nächstliegenden theoretischen Grenzfälle – Isobare, Isochore, Isotherme oder Isentrope – zurück.
Damit erhält man theoretische Vergleichsprozesse, die nach Art und Reihenfolge der Zustandsänderungen jeweils bestimmten Bedarfsfällen angepaßt sind. Die Vergleichsprozesse stellen somit einen der Arbeitsweise der Anlagen nahekommenden Idealfall dar.

Der **Gesamtwirkungsgrad** einer Maschine setzt sich aus dem **Produkt der einzelnen Wirkungsgrade** zusammen.

4.1.1 Bewertungsgröße für idealisierte Kreisprozesse

Kraftmaschinen:

$$\eta_{th} = \frac{|W_k|}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} \qquad \eta = \frac{\textbf{Nutzen}}{\textbf{Aufwand}}$$

η_{th} :	Thermischer Wirkungsgrad	
W_K :	Nutzarbeit	[J]
Q_{zu} :	Wärmezufuhr	[J]

Arbeitsmaschinen:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{|Q_{ab}|}{W_k} = \frac{Q_{ab}}{Q_{ab} - Q_{zu}} \qquad \varepsilon = \frac{\textbf{Nutzen}}{\textbf{Aufwand}}$$

$$\varepsilon_{KM} = \frac{Q_{zu}}{W_k} = \frac{Q_{zu}}{Q_{ab} - Q_{zu}}$$

ε_{WP} :	Leistungszahl Wärmepumpe	
Q_{ab} :	Heizwärme (Nutzen)	[J]
ε_{KM} :	Leistungszahl Kältemaschine	
Q_{zu} :	Kühlung (Nutzen)	[J]
W_K :	Antriebsarbeit (Aufwand)	[J]

4.1.2 Bewertungsgröße für reale Kreisprozesse

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{el}$$

Kraftmaschinen:

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{ideal}} \qquad \eta = \frac{\textbf{Realprozeß}}{\textbf{Vergleichsprozeß}}$$

$$\eta_i = \frac{P_{i\,pol}}{P_{i\,isen}} \qquad \eta_m = \frac{P_m}{P_{i\,pol}} \qquad \eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_m}$$

Arbeitsmaschinen:

$$\eta = \frac{P_{ideal}}{P_{real}} \qquad \eta = \frac{\textbf{Vergleichsprozeß}}{\textbf{Realprozeß}}$$

$$\eta_i = \frac{P_{i\,isen}}{P_{i\,pol}} \qquad \eta_m = \frac{P_{i\,pol}}{P_m} \qquad \eta_{el} = \frac{P_m}{P_{el}}$$

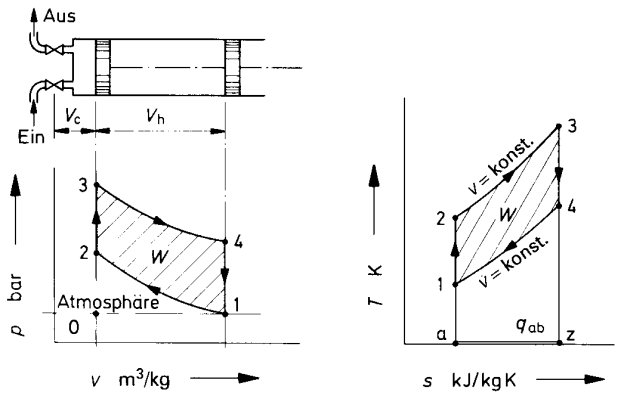
η :	Gesamtwirkungsgrad (Gütegrad)	
P_{real} :	Leistung des Realprozeß	[W]
P_{ideal} :	Leistung des idealen Vergleichsprozeß	[W]
η_i :	Innerer (indizierter) Wirkungsgrad	
$P_{i\,pol}$:	Innere polytrope Leistung	[W]
$P_{i\,isen}$:	Innere isentrope Leistung	[W]
η_m :	Mechanischer Wirkungsgrad	
η_{el} :	Elektrischer Wirkungsgrad	
P_m :	Mechanische Kupplungsleistung	[W]
P_{el} :	Elektrische Klemmleistung	[W]

Einheiten-Umrechnungsfaktoren für die Arbeit:

1 kJ	→	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$ **kWh**	1 kJ	→	0,2388 **kcal**
1 **kWh**	→	3600 kJ	1 **kcal**	→	4,1868 kJ

4.2 Kraftmaschinen-Kreisprozesse

4.2.1 **Otto-Prozeß** (Gleichraum-Prozeß)



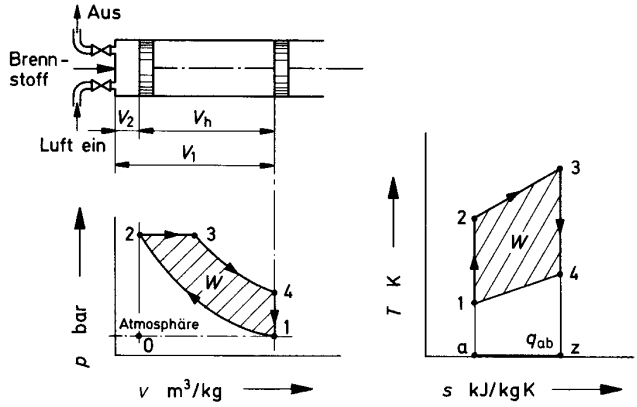
① → ② Isentrope Kompression
② → ③ Isochore Wärmezufuhr
③ → ④ Isentrope Expansion
④ → ① Isochore Wärmeabgabe

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}}$$

ε :	Verdichtungsverhältnis	
V_h :	Hubraum	[m³]
V_c :	Verdichtungsraum	[m³]
η_{th} :	Thermischer Wirkungsgrad	
χ :	Isentropenexponent	

4.2.2 **Diesel-Prozeß** (Gleichdruck-Prozeß)



① → ② Isentrope Kompression
② → ③ Isobare Wärmezufuhr
③ → ④ Isentrope Expansion
④ → ① Isochore Wärmeabgabe

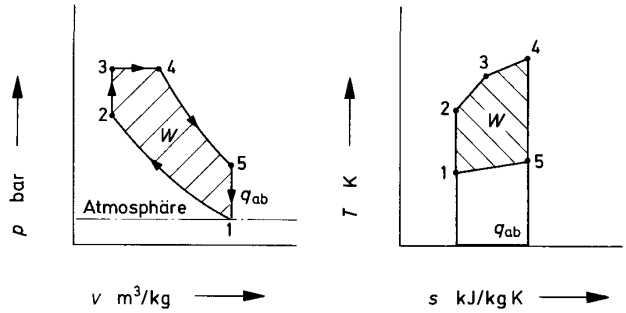
$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \qquad \varphi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(\varphi^{\chi} - 1)}{\chi \cdot (\varphi - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(\varphi^{\chi} - 1)}{\chi \cdot (\varphi - 1)} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

ε :	Verdichtungsverhältnis
φ :	Einspritzverhältnis
η_{th} :	Thermischer Wirkungsgrad
χ :	Isentropenexponent

4.2.3 **Seiliger-Prozeß** (Gemischter Vergleichsprozeß)



① → ② Isentrope Kompression
② → ③ Isochore Wärmezufuhr
③ → ④ Isobare Wärmezufuhr
④ → ⑤ Isentrope Expansion
⑤ → ① Isochore Wärmeabgabe

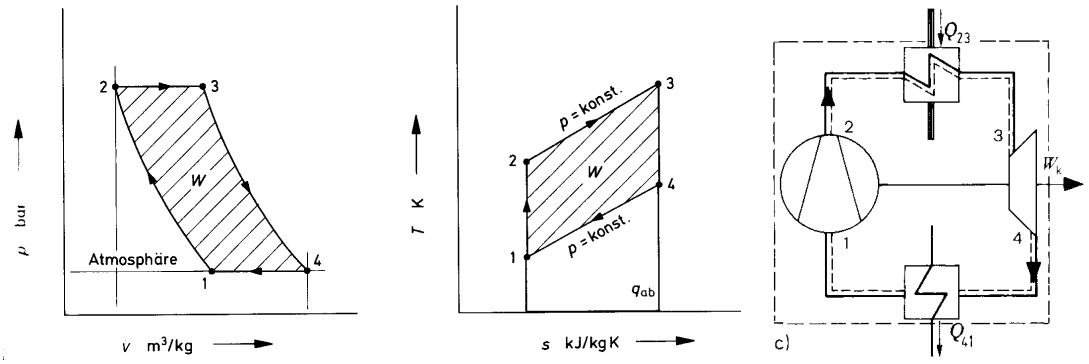
$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \qquad \varphi = \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$\tau = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \varphi^{\chi} - 1}{\psi - 1 + \chi \cdot \psi \cdot (\varphi - 1)}$$

ε : Verdichtungsverhältnis
φ : Einspritzverhältnis
τ : Druckverhältnis
η_{th} : Thermischer Wirkungsgrad
χ : Isentropenexponent

4.2.4 **Joule-Prozeß** (Gasturbine-Heißlufttubine)



① → ② Isentrope Kompression der Luft (oder eines anderen Arbeitsmittel) im Verdichter
② → ③ Isobare Wärmezufuhr, entweder Wärmezufuhr über Heizflächen oder durch Verbrennung
③ → ④ Isentrope Expansion der Luft in der Turbine
④ → ① Isobare Wärmeabfuhr, entweder Wärmeabfuhr über Kühlflächen oder durch das Ausstoßen der heißen Abgase in die Umgebung und das Ansaugen der Außenluft

$$W_K = m \cdot c_{pm}\Big|_{T_2}^{T_3} \cdot (T_3 - T_2) \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$$

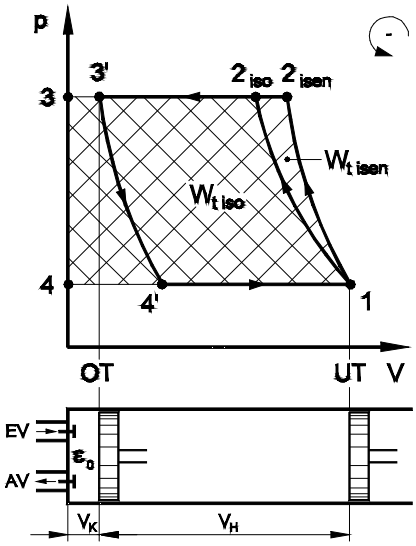
W_K : Nutzarbeit [J]
η_{th} : Thermischer Wirkungsgrad
χ : Isentropenexponent

4.3 Arbeitsmaschinen-Kreisprozesse

4.3.1 Kolbenverdichter

Thermodynamisch ideal ist die **isotherme** Verdichtung, hier aber wegen maximaler Temperatursteigerung wird die **isentrope** (s=konst.) Verdichtung angestrebt. Infolge Reibung, Druckverlust und Wärmeaustausch wird real nur eine **polytrope** Verdichtung erreicht.

Hier sind die Zustandsänderungen (des idealen Gases) im **offenen System** anzuwenden.



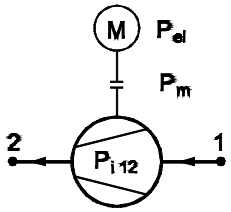
① → ②	iso, isen, pol Verdichtung
② → ③'	Isobares Ausschieben über Auslaßventile (Wärmeabfuhr)
③' → ④'	iso, isen, pol Rückexpansion (arbeitslose Druckwechsel!)
④' → ①	Isobares Ansaugen über die Einlaßventile (Wärmezufuhr)
OT	Oberer Totpunkt
UT	Unterer Totpunkt
EV	Einlaß- / Saugventil
AV	Auslaß- / Druckventil

Energiebilanz am Verdichter:

$$P_i = \dot{m}_R \cdot w_{t12} = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_1)$$

$$P_i = \eta_m \cdot \eta_{el} \cdot P_{el} = \eta_m \cdot P_m$$

$$\eta_i = \frac{P_{i\,isen}}{P_{i\,pol}}$$



Geometrischer Hubvolumenstrom:

$$\dot{V}_H = z \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h \cdot n$$

$$V_H = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$$

$\dot{V}_H$:	geometrischer Hubvolumenstrom	[m³ / s]
z :	Zylinderanzahl	
d :	Kolbendurchmesser	[m]
h :	Kolbenhub	[m]
n :	Drehzahl der Kurbelwelle	[1 / s = s^{-1}]

relativer Schadraum:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_K}{V_H}$$

$$V_H = V_1 - V_{3'}$$

$$V_K = V_{3'}$$

ε_0 :	relativer Schadraum	
V_H :	Hubvolumen	[m³]
V_K :	schädlicher Raum	[m³]
d :	Kolbendurchmesser	[m]
h :	Hub	[m]

Volumetrischer Wirkungsgrad:

$$\eta_v = \frac{V_1 - V_{4'}}{V_H}$$

$$\eta_V = 1 - \varepsilon_0 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n_R}} - 1 \right]$$

η_V :	Volumetrischer Wirkungsgrad (Füllungsgrad)
ε_0 :	relativer Schadraum
n_R :	Polytropenexponent für die Rückexpansion

Liefergrad:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{R1}}{\dot{V}_H} = \frac{\dot{m}_R \cdot \upsilon_1}{\dot{V}_H} = \frac{\dot{Q}_{og}}{q_o \cdot \dot{V}_H}$$

$$\lambda = \eta_V - (1 - \eta_W)$$

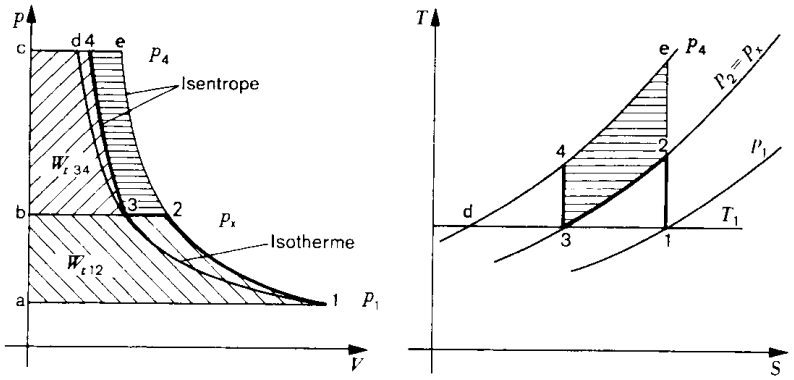
(DKV-Arbeitsblatt 3-01)

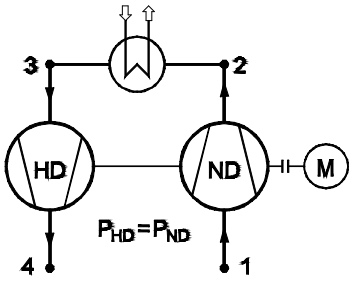
λ :	Liefergrad	
$\dot{V}_{R1}$:	tatsächlicher Verdichteransaugstrom	[m^3 / s]
$\dot{m}_R$:	Masse	[kg / s]
υ :	spezifisches Volumen	[m^3 / kg]
$\dot{Q}_{og}$:	Gesamtkälteleistung	[W]
q_0 :	Volumetrischer Kältegewinn	[J / m^3]
η_V :	Volumetrischer Wirkungsgrad (Füllungsgrad)	
η_W :	Wandungswirkungsgrad	

4.3.2 Mehrstufige Verdichtung

Die Verdichter arbeiten heute im allgemeinen mit sehr hohen Drehzahlen, daher verläuft die Kompression selbst bei gekühlten Maschinen bei vernachlässigter Dissipation in Nähe der Isentropen. Hierdurch ergeben sich bei großen Druckverhältnissen sehr hohe Austrittstemperaturen. Diese Tatsache erfordert unter Umständen **eine mehrstufige Verdichtung** und eine **Kühlung zwischen den Stufen** (Zwischenkühlung).

Die mehrstufige Verdichtung besteht aus stufenweise isentrope Verdichtung und isobare Abkühlung zwischen den Stufen.





Gegenüber der einstufigen isentropen Verdichtung wird bei dieser *zweistufigen* die der Fläche 234e entsprechende Arbeit gespart. Der Arbeitsaufwand für eine bestimmte Drucksteigerung ist am kleinsten, wenn die **Druckverhältnisse** der beiden Stufen **gleich** groß sind.

$$\tau = \frac{p_2}{p_1} = \sqrt[n]{\frac{p_e}{p_1}} = \frac{p_4}{p_3}$$

$$p_m = \sqrt{p_1 \cdot p_4} = \sqrt{p_0 \cdot p}$$

n :	Anzahl der Stufen	
p_e :	Enddruck	[Pa]
p_m :	Mittlere Druck	[Pa]
τ :	Druckverhältnis	

Ungefähre Grenzen für Hubkolbenverdichter:

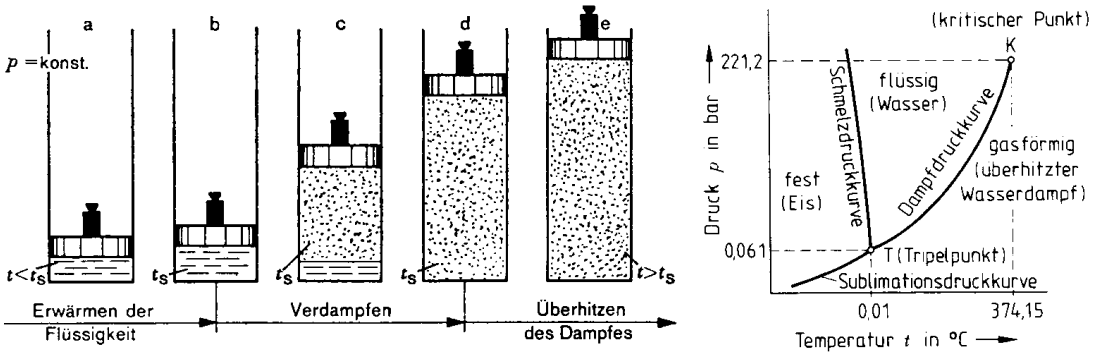
2-stufig	ab	$p / p_0 \geq 8$
3- und mehrstufig	ab	$p / p_0 \geq 25$

5. Wasserdampf

Wasserdampf ist neben Luft und Wasser das wichtigste Arbeitsmedium in der VT und Energietechnik (z.B. in der Heiztechnik und bei der Stromerzeugung).

Dämpfe:	„Dampf ist ein Gas nahe der Verflüssigung, Gase sind überhitzte Dämpfe“.
Verdampfen:	Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand.
Kondensieren (Verflüssigen):	Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand.

5.1 Verdampfungsvorgang



Abkürzungen:

f	flüssig	υ	spezifisches Volumen
‘ und **s**	Siedezustand	$\mathbf{t_s}$	Siedetemperatur
x	Naßdampfzustand	**ND**	Naßdampf
“	Sattdampfzustand	**SD**	Sattdampf
ü	überhitzter Dampf bzw. Heizdampfzustand	**HD**	Heißdampf

Verdampfungsvorgang:

zu **a** → Erwärmen des Wassers von t_f auf t_s, dabei existierendes Volumen υ_f .

zu **b** → Erreichen von t_s und Anstieg des Volumens auf υ‘.

zu **c** → Beginn der Verdampfung bei t_s = konst. entstehen zwei Phasen:

Naßdampf	=	siedene Flüssigkeit	+	Sattdampf
1 kg ND	**=**	**(1-x) kg sied.Flüssigk.**	**+**	**x kg SD**
υ_x	**=**	**(1-x)** $\cdot \upsilon$‘	**+**	**x**$\cdot \upsilon$“
υ_x	**=**	υ‘	**+**	**x**$\cdot$ **(** υ“ **-** υ‘ **)**

Dampfgehalt $\mathbf{x} = \dfrac{\mathbf{1\,kg\ SD}}{\mathbf{1\,kg\ ND}} = \dfrac{\upsilon_x - \upsilon'}{\upsilon'' - \upsilon'}$

zu **d** v Bei weiterer Erwärmung verdampft der Flüssigkeitsrest bei t_s = konst., es entsteht trocken gesättigter oder „Sattdampf“, daß Volumen nimmt zu auf υ“.

zu **e** → Die weitere Erwärmung führt zur Temperaturanhebung auf $t_ü > t_s$, es entsteht überhitzter Dampf oder „Heißdampf“, das Volumen steigt auf $\upsilon_ü > \upsilon$“ .

Die Grenzen der Betrachtung stellen:

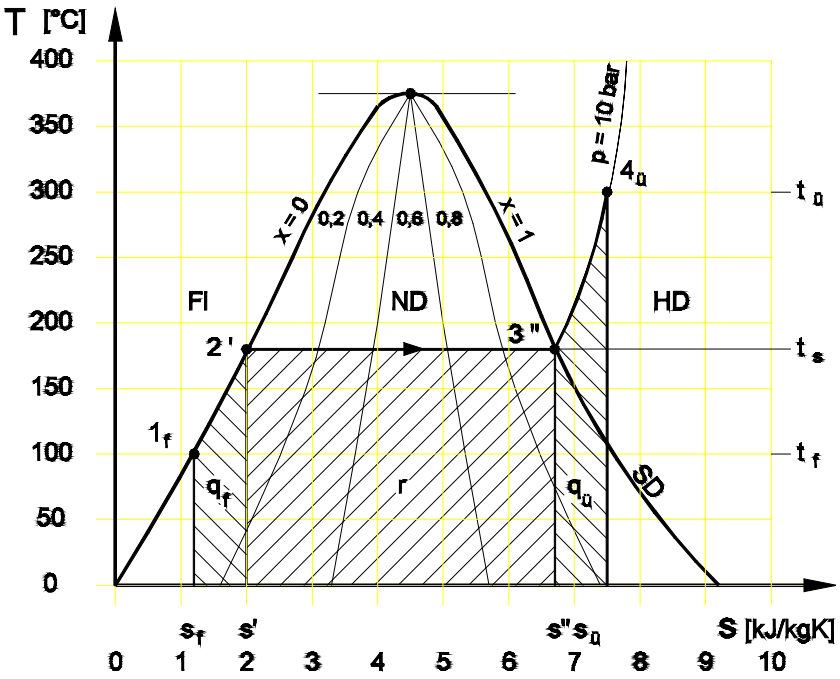
- Tripelpunkt **TP** (Grenze nach unten) → 0,0611 bar / 0,01 °C
- Kritischer Punkt **KP** (Grenze nach oben) → 221,3bar / 374,15 °C

5.2 Kalorische Zustandsgrößen des Wasserdampfes

Der Aufwand an zu- oder abzuführende Wärmeenergie läßt sich aus den spez. Wärmekapazitäten und Temperaturdifferenzen berechnen. Praktische Bedeutung hat die im Dampferzeuger oder in Wärmetauschern einschließlich dem Kondensator verlaufende Wärmeeinwirkung bei p = konst (Isobare).

spez. Enthalpie h → Wärmeenergie für 1 kg

spez. Entropie s → Energieverlust für 1 kg



Erzeugungswärme q_E

für 1 kg überhitzter Dampf aus der Flüssigkeit

$$q_E = q_f + r + q_ü$$
$$q_E = h_ü - h_f$$
$$q_E = c_{pm}\Big|_{t_f}^{t_ü} \cdot (t_ü - t_f)$$

spez. Naßdampf Volumen

$$\upsilon_x = \upsilon' + x \cdot (\upsilon'' - \upsilon')$$

Dampfgehalt

$$x = \frac{\upsilon_x - \upsilon'}{\upsilon'' - \upsilon'}$$

5.2.1 Wasser zum Sieden bringen (siedene Flüssigkeit)

Flüssigkeitsenthalpie

$$q_f = h' - h_f = c_{pm}\Big|_{t_f}^{t_s} \cdot (t_s - t_f)$$

Flüssigkeitsentropie

$$s' - s_f = c_{pm}\Big|_{t_f}^{t_s} \cdot \ln\frac{T_s}{T_f}$$

5.2.2 Siedendes Wasser x = 0 verdampfen bis x = 1 (Naßdampf)

Verdampfungsenthalpie

$$r = h'' - h' = \rho + \psi$$

Innere $\rho = u'' - u'$ Äußere $\psi = p \cdot (\upsilon'' - \upsilon')$

Verdampfungsentropie

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s}$$

Naßdampfenthalpie

$$x \cdot r = h_x - h'$$
$$h_x = h' + x \cdot r \qquad u_x = u' + x \cdot \rho$$

Naßdampfentropie

$$s_x - s' = \frac{x \cdot r}{T_s} \qquad s_x = s' + \frac{x \cdot r}{T_s} = s' + (s'' - s')$$

5.2.3 Naßdampf x = 1 überhitzen von t_s nach $t_ü$ (Heißdampf)

Überhitzungsenthalpie

$$q_ü = h_ü - h'' = c_{pm}\Big|_{t_s}^{t_ü} \cdot (t_ü - t_s)$$

Überhitzungsentropie

$$s_ü - s'' = c_{pm}\Big|_{t_s}^{t_ü} \cdot \ln\frac{T_ü}{T_s}$$

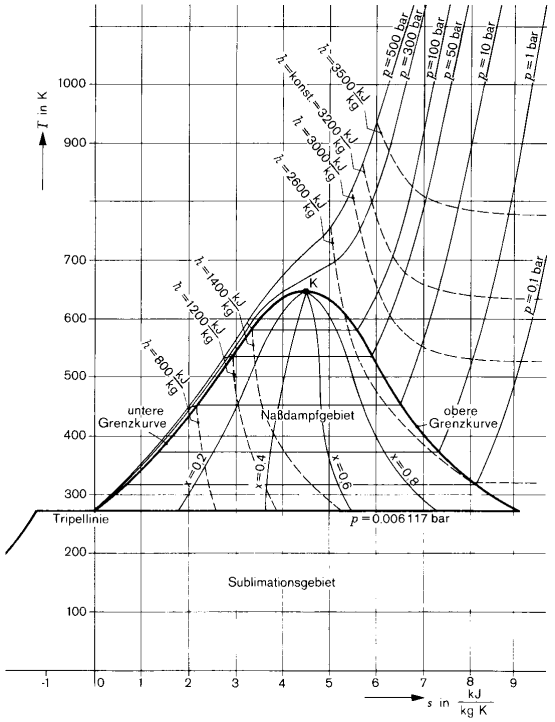
5.3 Zustandsänderungen des Wasserdampfes

Die Zustandsänderungen des Wasserdampfes verfolgt man anschaulich mit Hilfe der folgenden Diagramme. Für das Naßdampfgebiet reichen die Diagramme häufig nicht aus, so daß man dann die Werte mit Hilfe der Wasserdampftafeln, die Zustandsgrößen für die Grenzkurve enthalten, berechnet.

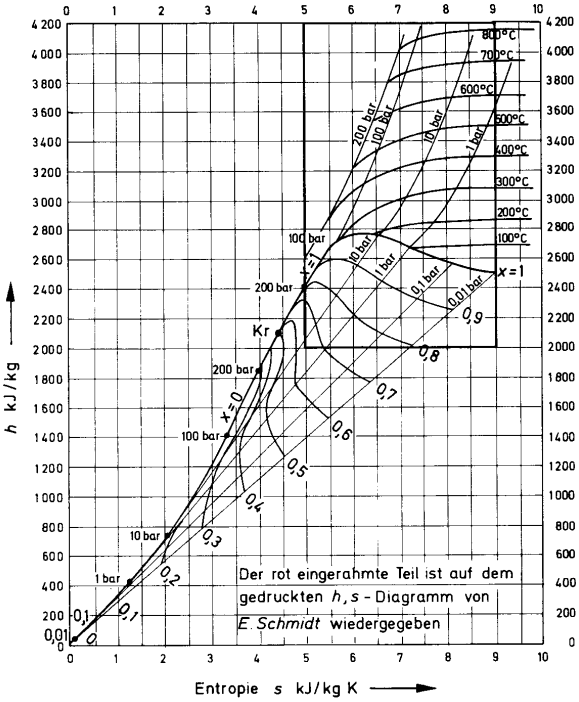
5.3.1 T, s-Diagramm und h, s-Diagramm

Beide Entropie-Diagramme zeigen neben den Grenzkurven einige Isobaren und im Naßdampfgebiet einige Linien gleichen Dampfgehaltes. In das T, s-Diagramm wurden außerdem einige Linien gleicher Enthalpie und in das h, s-Diagramm einige Isotherme eingetragen. Im T, s-Diagramm werden Wärmemengen als Flächen dargestellt. Das h, s-Diagramm eignet sich bei adiabaten offenen Systemen besonders gut zur Ermittlung der über die Systemgrenze gegebene Arbeit, da die Enthalpiedifferenz direkt abgegriffen werden kann.

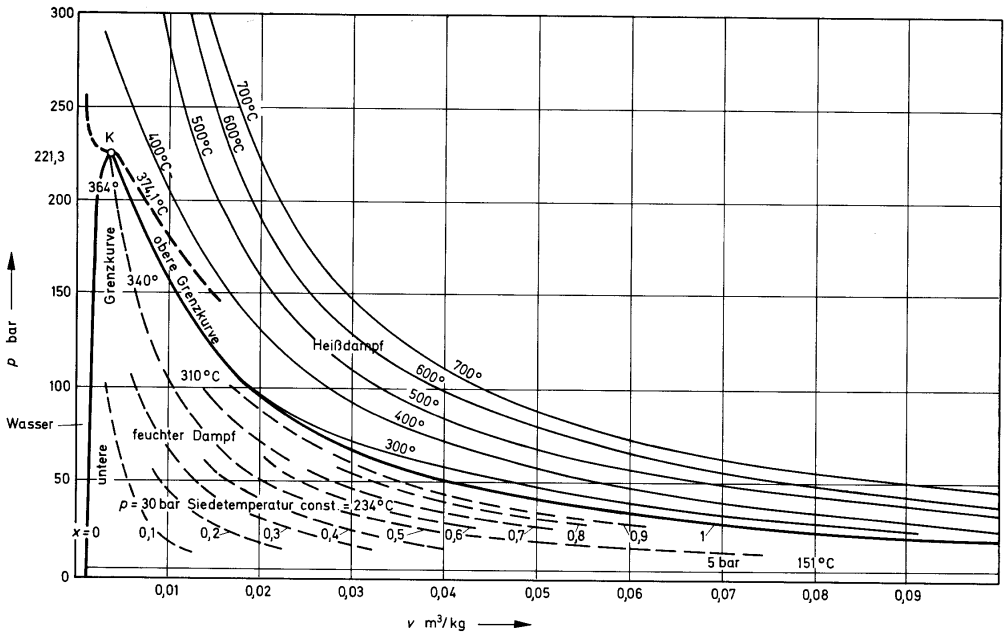
T, s-Diagramm:



h, s-Diagramm:



5.3.2 p, υ-Diagramm



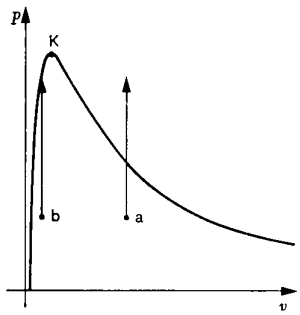
5.3.2 Wasserdampftafeln

Die Wasserdampftafel für den **Sättigungszustand** (Drucktafel) enthält neben dem Druck p und der dazugehörigen Temperatur t, die spezifischen Volumen υ‘ und υ“, die spezifischen Enthalpien und Entropien für die siedene Flüssigkeit h‘ und s‘ und den Sattdampf h“ und s“ sowie die Verdampfungsenthalpie r. Die Tabelle beginnt bei niedrigen Drücken und endet beim kritischen Druck, bei welchem die Verdampfungsenthalpie r zu Null geworden ist.
Die Wasserdampftafel für den **überhitzten Dampf** enthält eine Reihe von Drücken p für verschiedene Temperaturen t, die spezifischen Volumen υ, Enthalpien h und Entropien s.

Lineare Interpolation zwischen zwei Wertepaare:

$$a_{ges} = a_1 + \frac{b_{geg} - b_1}{b_2 - b_1} \cdot (a_2 - a_1)$$

5.3.3 Isochore ($\upsilon_1 = \upsilon_2$)



Diese Zustandsänderung hat Bedeutung, wenn das Kesselsystem einen abgeschlossenen Raum bildet, also beim Anheizen oder nach dem Abstellen eines Dampfkessels
Die Isochoren sind im p, υ-Diagramm senkrechte Graden. Führt man nassem Dampf Wärme zu, so steigt sein Druck und er wird allgemein trockener (a). Ist aber sein spezifisches Volumen kleiner als das zum kritischen Punkt gehörende Volumen, dann wird der Dampf immer nasser und er erreicht schließlich die untere Grenzkurve, wird also wider flüssig (b).

Für Rechnungen im Gebiet Dampfkessel, Dampfturbinen, Rohrleitungsquerschnitte, empfiehlt es sich sehr, das h, s-Diagramm mit grünen Volumenlinien (υ = konst.) zu benutzen.

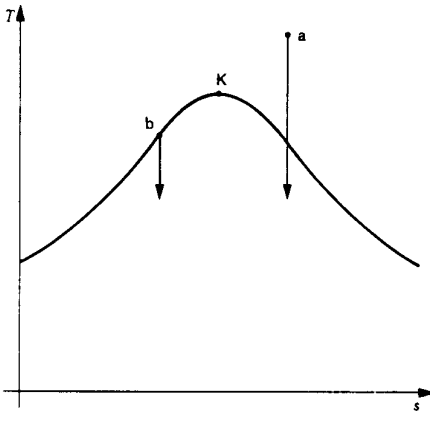
5.3.4 Isobare ($p_1 = p_2$)

Die isobare Zustandsänderung hat Bedeutung bei Dampferzeugung aus Wasser und bei der Zwischenüberhitzung von Dampf. Zu berechnen sind die aufzuwendenden Wärmemengen.
Im Naßdampfgebiet ist die Isobare zugleich Isotherme. Durch Druck und Temperatur ist daher der Zustand nicht eindeutig festgelegt. Es muß noch eine weitere Größe bekannt sein. Am Anschaulichsten ist es, den Dampfgehalt x mit an zugeben.

5.3.5 Isotherme ($T_1 = T_2$)

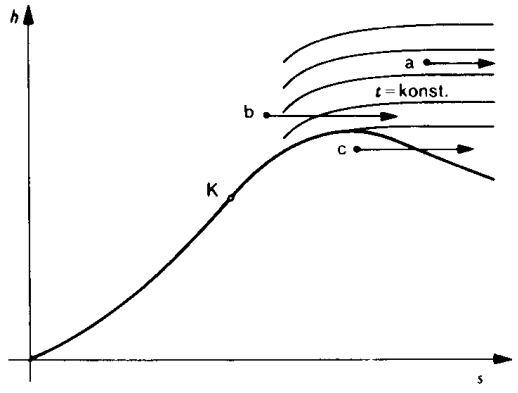
Die isotherme Zustandsänderung hat weiter keine Bedeutung.
Im Naßdampfgebiet ist die Siedetemperatur t_s = konst. zwischen x = 0 und x = 1.

5.3.6 Isentrope ($S_1 = S_2$)



Die isentrope Zustandsänderung hat Bedeutung bei **verlustfreien Maschinen** (Arbeitsprozeß) **mit Arbeitsleistung P = $\dot{m}$($h_2 – h_1$).**
Die Isentropen sind in den Entropie-Diagrammen senkrechte Graden. Entspannt man überhitzten Dampf mit s > s_k isentrop, so wird er kälter, erreicht schließlich die obere Grenzkurve und wird bei weiterem Sinken der Temperatur immer nasser (a). Das Flüssigkeitsgebiet kann durch diese isentrope Entspannung nicht erreicht werden.
Wird siedendes Wasser entspannt, so verdampft es teilweise (b).

5.3.7 Isenthalpe ($H_1 = H_2$)

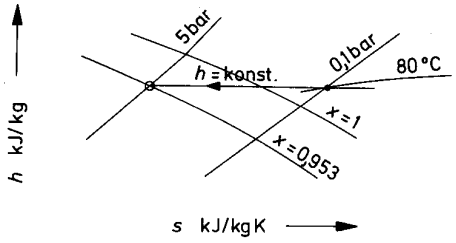


Die isenthalpe Zustandsänderung hat Bedeutung bei der **adiabaten Drosselung** (Strömungsprozeß bei $c_1 = c_2$) **ohne Arbeitsleistung**.

Die Isenthalpen sind in dem h, s-Diagrammen waagerechte Graden. In dem Zustandsbereich, in dem sich der Wasserdampf wie ein ideales Gas verhält, verlaufen die Linien h = konst., also die Drossellinien, längs der Isothermen (a). In der Nähe der Grenzkurven kann, je nach Lage des Anfangpunktes, die Drosselung (z.B. durch eine Drossel, ein Ventil, usw.) eine starke oder geringe **Abkühlung** ergeben (Joule-Thomson-Effekt).

Im dargestellten Bereich ist bei hohen Drücken die Abkühlung beträchtlich (b). Eine Drosselung ist wie eine Expansion (Entspannung), wobei der Druck und die Temperatur niedriger werden.

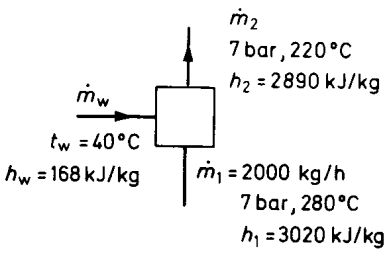
Bestimmung des Feuchtegehalts von Naßdampf:



Der Zustand im Naßdampfgebiet ist durch Druck und Temperatur nicht eindeutig festgelegt. Darum ermittelt man den Dampfgehalt des nassen Dampfes durch eine Drosselung. Zu diesem Zweck läßt man den nassen Dampf durch eine gut isolierte Drosselstelle strömen, in der der Druck soweit gesenkt werden muß, daß der Dampf beim Austritt aus der Drosselstelle überhitzt ist (c).

Im überhitzten Gebiet liegt der Zustand durch Druck und Temperatur eindeutig fest. Verfolgt man nun im h, s-Diagramm die Drosselung von diesem Punkt an rückwärts, so kann durch den Schnittpunkt der Linie h = konst. mit der Anfangsisobaren der Zustand im Naßdampfgebiet und damit auch der Danpfgehalt bestimmt werden

Dampfkühlung durch Wassereinspritzung:



Hier wird eine Abkühlung des Heißdampfes durch Einspritzung von kalten Wasser erreicht. Aus der Gleichheit der Enthalpien ist

$$\boxed{\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_W \cdot h_W = \dot{m}_2 \cdot h_2} \quad \text{und} \quad \dot{m}_1 + \dot{m}_W = \dot{m}_2 \ .$$

5.3.8 Polytrope

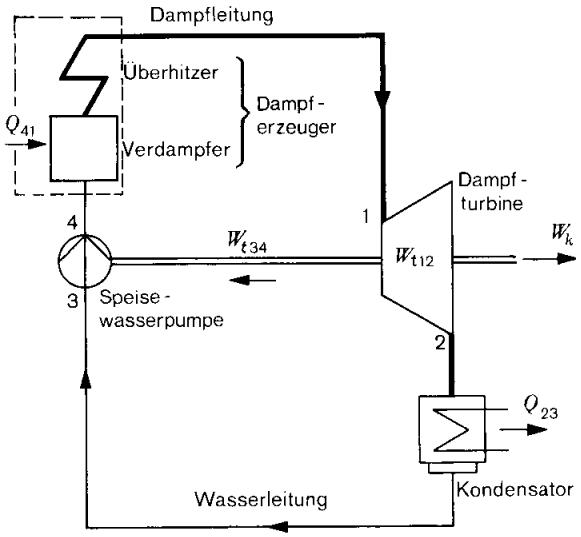
Bei der Polytropen Expansion wird nicht die gesamte Wärmeenergie in Arbeit umgesetzt. Ein Teil geht als innere Reibung, als nicht in mechanische Arbeit umgesetzt, verloren. Dadurch ändert sich der Zustand des Dampfes, was bei der Auslegung der Maschine berücksichtigt werden muß. Während h_{isen} das isentrope Gefälle bedeutet, ist $h_i = \eta_i \cdot h_{isen}$ das polytrope, wirklich verarbeitete Gefälle.

5.4 Claudius-Rankine-Prozeß als Vergleichsprozeß der Dampfkraftanlage

Soll in einer Dampfkraftanlage im Kreislauf Arbeit durch Entspannung des Wasserdampfes gewonnen werden, so muß, wie bei der Gasturbinenanlage (Joule-Prozeß) die Anlage neben der Expansionsmaschine (Dampfturbine oder Kolbenmaschine) und der Pumpe auch Wärmeübertrager zur Zu- und Abfuhr der Wärme enthalten.

Die Wärmeübertrager haben entsprechend ihrer Aufgabe besondere Namen erhalten:

- Wärmezufuhr: Dampferzeuger (Dampfkessel) besteht aus Verdampfer und Überhitzer
- Wärmeabfuhr: Kondensator



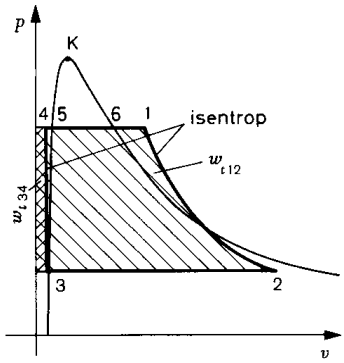
① → ② Isentrope Expansion in der Turbine

② → ③ Isobare Wärmeabfuhr im Kondensator

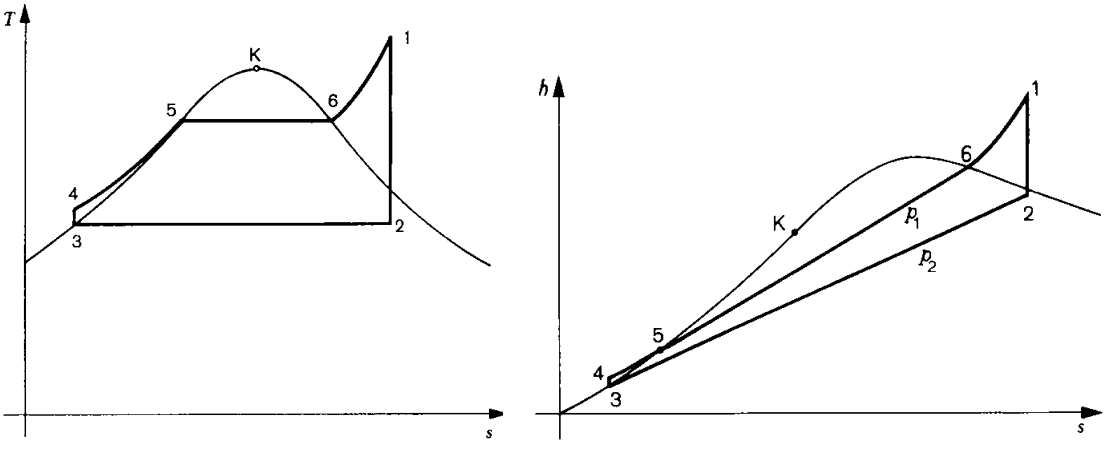
③ → ④ Isentrope Kompression in der Pumpe

④ → ① Isobare Wärmezufuhr im Verdampfer

bzw. 4...5...6...1



Im Verdampfer wird das eingesetzte Wasser isobar bis zur Siedetemperatur erwärmt und dann isobar verdampft. Durch weitere Wärmezufuhr steigt die Temperatur des Dampfes im Überhitzer über die Sättigungstemperatur. In der Turbine expandiert der Dampf unter Arbeitsabgabe, wobei der Druck meist so weit gesenkt wird, daß der Dampf am Austritt Wasser enthält, also naß geworden ist. Im Kondensator wird dieser Dampf dann durch Entzug seiner restlichen Kondensationsenthalpie isobar verflüssigt. Die Pumpe erhöht den Druck auf Kesseldruck und fördert das Wasser wieder in den Kessel.



Da die Dampfkraftanlagen zu den Wärmekraftanlagen gehören, werden die Bewertungsziffern in der gleichen Weise wie bei den Wärmekraftanlagen des idealen Gases aufgestellt.

$$\eta_{th} = \frac{|W_{CR}|}{Q_{zu}} = \frac{|W_{t12} + W_{t34}|}{Q_{41}} = \frac{H_1 - H_2 + H_3 - H_4}{H_1 - H_4}$$

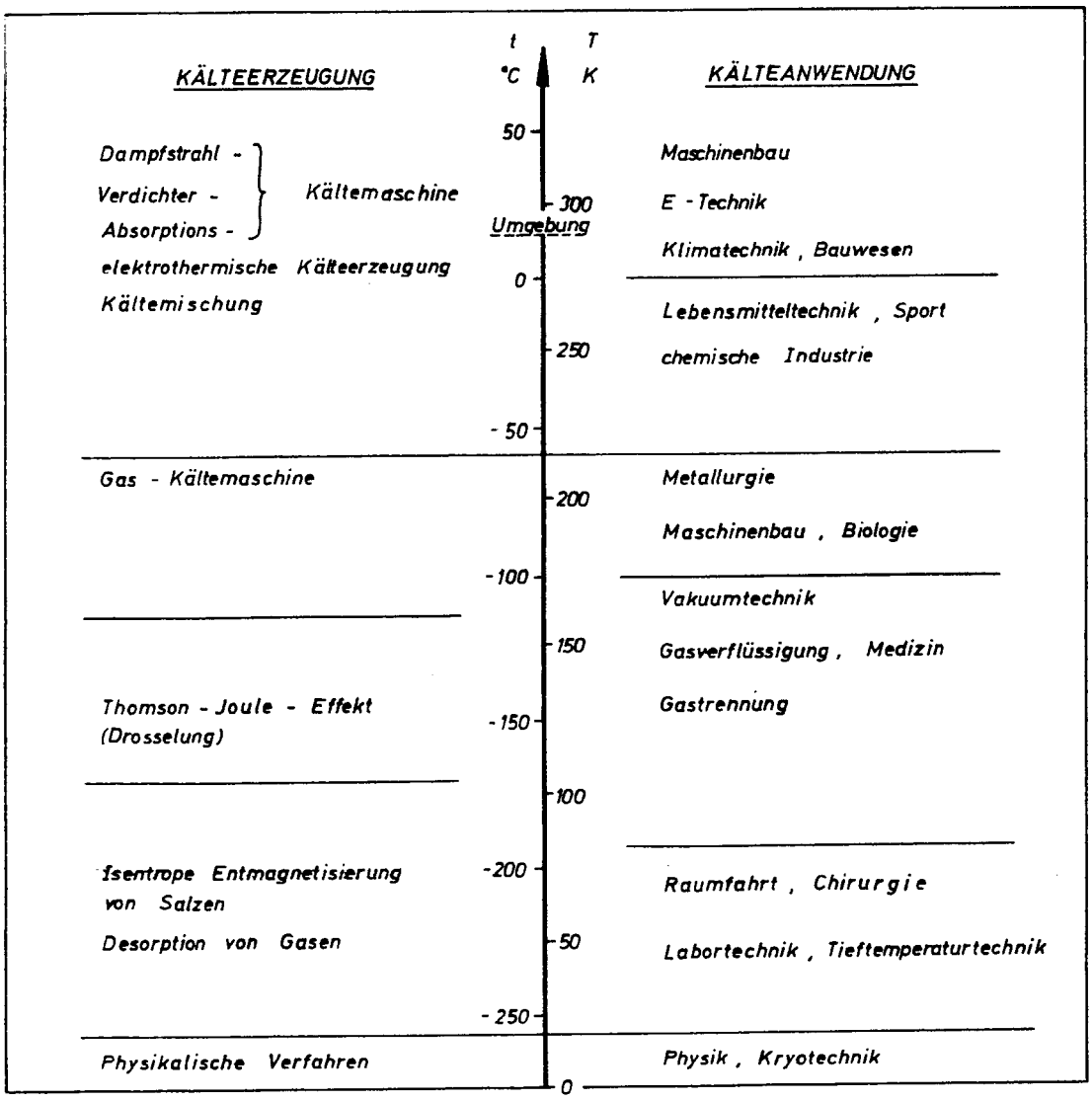
$$\eta_{th} = \frac{|W_{CR}|}{Q_{zu}} \cong \frac{|W_{t12}|}{Q_{41}} = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_4} \cong \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_3}$$

Wie aus dem p, υ-Diagramm zuersehen ist

$W_{t34} = V_3 \cdot (p_1 - p_2)$ << W_{t12} .

6. Kältetechnik

6.1 Verfahren der Kälteerzeugung



6.1.1 Drosselung von Gasen ohne Arbeitsnutzung

ThD: Drosselung: h = konst., T,t ≠ konst., im Normalfall **Abkühlung !**
„Joule-Thomson (Lord Kelvin) –Effekt“

z.B. für Luft-Drosselung:

$t_1 = 15$ °C
$p_1 = 50$ bar
} 1 bar → $\Delta T = 11{,}6$ K

$t_2 = -20$ °C
$p_2 = 200$ bar
} 1 bar → $\Delta T = 55$ K

u. a. von CARL VON LINDE 1895 zur Verflüssigung von Luft angewandt.

6.1.2 Isentrope Entspannung von Gasen mit äußerer Arbeitsnutzung

$$W_{t\,isen\,12} = H_1 - H_2 = \dot{m} \cdot c_{p_{\upsilon 1}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$$

CLAUDE 1908: Helium-Verflüssigung bei 4,2 K / 1bar

Gegenwärtig: z.B. Fa. Philips (NL) zur Verflüssigung von Helium

6.1.3 Kaltdampf-Kälteprozesse (KKP)

Dabei wird ein Arbeitsstoff (Kältemittel) abwechselnd verdampft und verflüssigt, um Wärme von der niedrigen Temperatur (T_0, t_0) auf die höhere Temperatur (T, t) anzuheben, zu „transportieren“.

I. Kompression-Kaltdampf-Kälteprozeß (KKKP)

Dabei wird die Temperaturanhebung durch eine Druckerhöhung (Kompression) erreicht.

Arbeitsweise: In einem (mechanischen) Verdichter (Hubkolben-, Drehkolben-, Schrauben-, Turboverdichter) wird das dampfförmige Kältemittel (KM) durch den Leistungsaufwand (P) von p_0 (T_0, t_0) auf p (T, t). Anschließend im Kondensator (Verfüssiger) durch Wärmeentzug (Kühlung) $\dot{Q}$ verflüssigt und danach in der Drossel von p auf p_0 abgesenkt (gedrosselt), wodurch es zur (unerwünschten, aber notwendigen) Teilverdampfung des KM wegen der Kühlung ($T \rightarrow T_0$) kommt. Im nachgeschalteten Verdampfer wird das Kältemittel durch die Aufnahme der Wärme $\dot{Q}_0$, der Kälteleistung verdampft und damit der Kreislauf geschlossen.

Kondensator (Verflüssiger) und Verdampfer sind Wärmeaustauscher bzw. –übertrager und als Platten-, Rohrschlangen- oder Rohrbündel-Apparate ausgeführt.

Kälteträger dienen dem Transport der Wärme („Kälteleistung“) vom Nutzer in den Kältekreis. Im Einsatz sind u.a. Luft, (Kalt-) Wasser, Kühlsohlen (Wasser mit Salz versetzt).

Kältemittel: Im Einsatz sind NH_3, FKW, FCKW, H-FCKW und andere Kohlenwasserstoff-Abkömmlinge des Methans (CH_4) bzw. Äthans (C_2H_6) und z.T. auch Butan, Propan und andere Kohlenwasserstoffe.

II. Dampfstrahl-Kaltdampf-Kälteprozeß (DKKP)

Soll Wasser als Kühlmittel eingesetzt werden, so sind entsprechend große Dampfvolumina zu transportieren, so z.B.:

Temperatur	spez. Volumen			Verhältnis
t_0 = + 5 °C	$\upsilon''_{0\,R12}$	= 0,05	m³/kg	1
	$\upsilon''_{0\,NH3}$	= 0,25	m³/kg	5
	$\upsilon''_{0\,Wasser}$	= 150	m³/kg	3000

d.h. geeignet ist nur ein Strömungsverdichter nicht aber ein mechanischer Verdichter (Baugröße).

Vorteile:
- **+** Abwärme / Abdampfnutzung
- **+** keine bewegten Teile (Verschleiß, Geräusche, Schwingungen gering!)
- **+** Wasser als Kältemittel und Antrieb

Nachteile:
- **–** geringer Wirkungsgrad (≤ 30 %) der Verdichtung (Abdampf?)
- **–** begrenztes Druckverhältnis (p / p_0)
- **–** $t_0 > 0$ °C wegen H_2O als Kältemittel!

Anwendung: Gewerbe und Industrie durch Abdampfnutzung zur „Kaltwassererzeugung“, z.B. für Klimaaufgaben. Weitere Anwendungen: Chemische und Lebensmittelindustrie (Kristallisation, Eindickung, ...) oder Süßwassergewinnung aus Salzwasser!

III. Absorption-Kaltdampf-Kälteprozeß (AKKP)

Hierbei ist der mechanische Verdichter durch eine thermische Apparatur mit Lösungskreislauf ersetzt und das Kältemittel als Arbeitsstoff um ein Lösungs- Absorptionsmittel ergänzt (Arbeitsstoffpaar). In der Gebäude-Kälte-Technik im gewerblichen und industriellen Kälteeinsatz haben sich bisher als **Arbeitsstoffpaar** durchgesetzt:

Kältemittel	Lösungsmittel	Einsatz
NH_3 (Ammoniak)	H_2O (Wasser)	„Groß-Kälte“
$NH_3 + H_2$	H_2O	Kühlschrank
H_2O	LiBr (Lithium-Bromid)	Klimatechnik (Kaltwasser)

❍ **NH_3 / H_2O – Absorption-Kaltdampf-Kälteprozeß**

Arbeitsweise: Das Zweistoffgemisch (NH_3 / H_2O) wird im Kocher / Austreiber durch die Heizwärme Q_H bei p verdampft bzw. getrennt in NH_3 und arme Lösung. Die sich anschließende Rektifikation (Mehrfachverdampfung / -kondensation) soll das NH_3 weitestgehend von H_2O befreien! Die (an KM) arme Lösung (Konzentration ξ a) wird im Drosselorgan (DVII) auf den Dampfdruck p_0 entspannt und nimmt hier die Unterkühlung (Q_A) das aus dem Verdampfer kommende Kältemittel (NH_3) auf, d.h. es entsteht wieder (an KM) reiche Lösung (ξ r). Eine Lösungspumpe (LP) treibt den Lösungskreislauf an und erhöht den Druck von p auf p_O!

Wärmebilanz: $\dot{Q}_0 + \dot{Q}_H + P_{LP} + \dot{Q}_C = \dot{Q} + \dot{Q}_A$ Q_C : Korrekturwärmestrom für „Kälteverluste“

Wärmeverhältnis: $\zeta = \dfrac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H + \underbrace{P_{LP} + \dot{Q}_C}_{<< Q_H}} \cong \dfrac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \leq \mathbf{60...70\ \%}$ Großanlagen!

Die energetische Bewertung erfolgt über das Wärmeverhälnis (Nutzen/Aufwand).

Vorteile:
- **+** billiger Abwärmebetrieb möglich
- **+** keine bewegten Teile (Verschleiß, Geräusche, Schwingungen gering!)
- **+** in der Regel geringerer Investitionskosten als bei Kompressionkälteanlagen großer Leistung
- **+** FCKW-frei

Nachteile:
- **–** NH_3 ist hochgiftig !
- **–** große Wärmemengen und Kühlmittelströme erforderlich (Abwärme- & Kühlturmbetrieb)
- **–** NH_3 ist korrosiv !
- **–** hohe Betriebskosten

Anwendung: $t_0 \geq$ - 60 °C → mehrstufig

- Kleinkühlschränke mit Gas- und Elektroheizung,
  z.B. für Campingbereich (Nutzraumvolumen 40...70 ltr.) und für den Möbeleinbau (geringe Geräusche und Schwingungen)
- Großgeräte in Gewerbe- und Industrie ≥ 300 kW Kühlleistung,
  aber auch Fernkälteversorgung z.B. über Abwärmenutzung.

❍ **H_2O / LiBr – Absorption-Kaltdampf-Kälteprozeß**

Für die **Erzeugung** von Kaltwasser (Standard: t_{VL} = + 6 °C / t_{RL} = +12 °C) insbesondere für die Raumlufttechnik (RLT). Hersteller: Carrier, Trane, York aus USA und japanische Firmen

Arbeitsweise: Funktionsablauf wie NH_3 / H_2O – AKKP, nur das H_2O = Kältemittel und LiBr = Lösungsmittel ist ! Wobei LiBr gegenüber H_2O einen sehr geringen Dampfdruck hat, d.h. Rektifikation ist nicht erforderlich !

Vorteile:
- **+** wie bei NH_3 / H_2O – AKKP !
- **+** keine Rektifikation !
- **+** H_2O / LiBr ungiftig, in der TGA zugelassen !
- **+** H_2O und LiBr preiswerte Arbeitsmittel
- **+** Abwärmebetrieb
- **+** kompakte Bauweise, z.B. für die Gebäudeaufstellung

Nachteile:
- **–** vgl. NH_3 / H_2O – AKKP !
- **–** $t_0 \geq 0$ °C wegen H_2O als Kältemittel (üblich $t_0 \geq 3$ °C!)
- **–** Vakuumdichte Bauweise (Leckluft!)
- **–** LiBr:
  - Korrosiv gegen Eisen- und Kupferwerkstoffe
  - Auskristallisation bei höheren Konzentrationen
- **–** kein Deutscher Hersteller !

Anwendung: Gebäudeklimatisierung über indirekte Kühlung mittels „Kaltwasser“ (z.B. +6 / +12) gegebenenfalls unter Nutzung von (Industrie-) Abwärme, Solarwärme (südliche Länder!) bzw. Überschußwärme aus den Fernwärmenetzen im Sommer oder BHKW-Wärmenutzung im Sommer!

6.1.4 Elektrothermische Kälteerzeugung

(Peltier-Effekt ~ 1834)

„Legt man an einem aus zwei unterschiedlichen Leitern (A+B bzw. p+n) bestehenden Kreis einen Gleichstrom an, so tritt an den Verbindungsstellen je nach Richtung des Stromes Abkühlung bzw. Erwärmung auf.“

Werkstoffkombinationen:

p (positiv) - Leiter	n (negativ) - Leiter
Eisen	Konstantan
Antimon	Wismut
Molybdän	Nickel

heute: Halbleiter, Einkristalle

Für größere Leistungen werden Reihenschaltungen mehrere Elemente genutzt !

Vorteile:
- **+** keine bewegten Teile
- **+** kein Kältemittel, kein Lösungsmittel
- **+** punktförmige Kühlung
- **+** exakt regelbare Kühlleistung und Temperatur

Nachteile:
- **–** geringer Wirkungsgrad
- **–** teure Materialien
- **–** begrenzte Leistung
- **–** hohes Gewicht

Anwendung:
- punktförmige Kühlung, z.B. in elektrischen Geräten (PC’s, Großrechner, Kreiselkompaß in Flugzeugen / Raumfahrt, Hifi.Endstufen)
- exakt geregelte Kälteleistung und Temperatur z.B. Vergleichsthermostaten, exakt geregelte Kühlräume im Forschungsbereich, ...
- zur Zeit max. erreichbare Temperatur etwa -80 bis –100 °C bzw. ΔT_{max} = 120 bis 150 K !

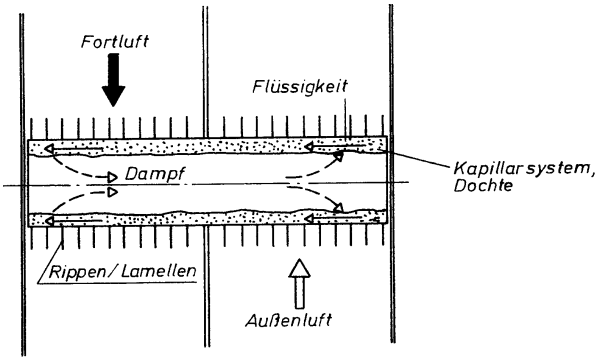
6.1.5 Wärmerohr (heat pipe)

Patent von R. Gangler (USA 1944), 1. Anwendung in der Raumfahrt von G. Grover (1963) !

Anwendung in der TGA z.B. zur Abwärmenutzung oder Wärmerückgewinnung aus der Abluft !

Arbeitsweise:

Arbeitsweise entspricht dem Kompressions-Kaltdampfprozeß, wobei der Verdichter durch Nutzung der Adhäsion in feinen Kapillarstrukturen ersetzt wird. Als Arbeitsstoffe werden üblicher Weise die verschiedenen Kältemittel, aber auch H_2O eingesetzt.



Anwendung:

- Wärmerückgewinnung (WRG) in der RLT !
- Hifi-Endstufenkühlung
- Raumfahrttechnik, u.a. Temperaturausgleich in der Kapselaußenwand
- Alaska-pipeline im perma frost !

6.1.6 "Kälteerzeugung" mit Wassereis und Kältemischungen, sogenannte "Verschlußkälte"

Wassereis: Älteste Kälteanwendung, insbesondere im Lebensmittelbereich !
Heute noch im Bereich Lebensmittel (Fisch, Molkerei, ...), Chemie (Reaktionskühlung, ...) und Sport als Scherben-, Schuppen- und Würfeleis !

Neu: flow ice in der TGA !?

Kältemischungen: Wasser bzw. Wassereis und Salze mit endothermer Wärmetönung !

Beispiele:

Salz		+	Eis bzw. Wasser		erreichbare Temperatur
30 g	NaCl	+	100 g	Eis	- 21 °C
144 g	$CaCl_2$	+	100 g	Eis	- 55 °C
250 g	Kcl	+	100 g	Wasser	$\Delta T \cong 34$ K
$CO_{2\ fest}$ (Trockeneis)		+	Äthyläther (Lösungsmittel)		bis max. – 100 °C

Anwendungen: Konstant-Temperatur-Bäder im Laborbetrieb, in der Medizin (z.B. Hypothermine), Gewerbe und Industrie.

6.1.7 Spezielle Verfahren der Tieftemperatur oder Kryo-Technik

Ziel der Kryo-Technik ist 0 K.

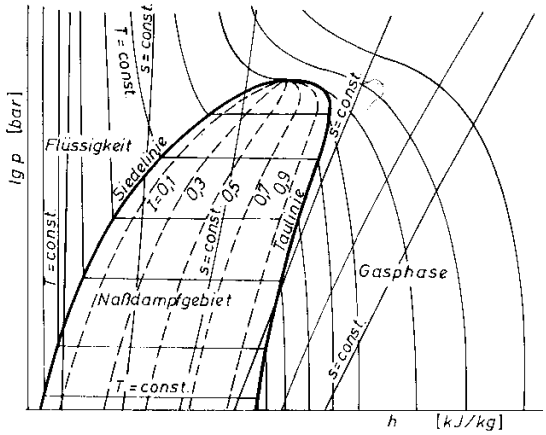
- **Isentrope Entmagnetisierung paramagnetischer Salze** (z.B. Alaune)**.**
- **Desorption von Gasen an feinstruktuierter Oberflächen im Hochvakuum**
  In einem Behälter mit einer Flüssigkeit (flüssiges Helium, 4,2 K bei 1 bar) befindet sich ein Gefäß mit feinstruktuierter Oberfläche. In diesem Gefäß herrscht ein Hochvakuum. Wird das Vakuum nun abgeschaltet, wollen sich die Gas-Teilchen in dem Gefäß bewegen. Dazu wird Energie benötigt, die aus der Flüssigkeit als Wärme abgeführt wird. Durch diesen Wärmeentzug kühlt die Flüssigkeit ab.

6.2 Kompression-Kaltdampf-Kälteprozeß (KKKP)

6.2.1 lg p, h-Zustandsdiagramm

Im p, υ-Diagramm erscheinen die Energien als Flächen. Es hat sich aber für die Ingenieurarbeit als zweckmäßig erwiesen, Zustandsdiagramme (lg p, h-Diagramm, h, s-Diagramm usw.) zu benutzen, in denen **die Energien als Strecken abzugreifen sind**. Diese Diagramme werden nach RICHARD MOLLIER (1863 bis 1935) benannt, der sie einführte.

Alle Angaben im lg p, h-Diagramm beziehen sich auf **1 kg Kältemittel**, deshalb sprechen wir auch von spezifischen Werten. Wichtig, daß wir wissen, daß wir für jedes Kältemittel ein anderes lg p, h-Diagramm (bzw. eine andere Dampftafel für Naßdampf und überhitzten Bereich) benötigen, da ja jedes Kältemittel anders zusammengesetzt ist und damit andere physikalische Eigenschaften aufweist.

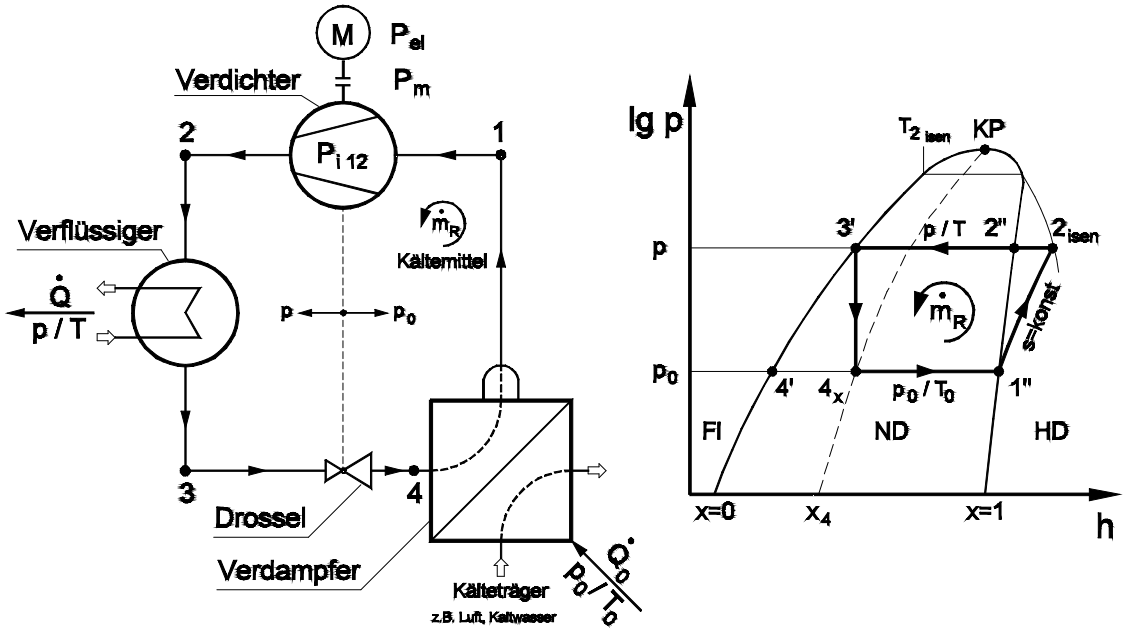


Als Parameter enthält das lg p, h-Diagramm:

- die Isothermen t = konst.
- die Isochoren υ = konst.
- die Dampfanteile x = konst.
- die Isentropen s= konst.

Ein **Verdampfen** bedeutet einen waagerechten Zustandsverlauf innerhalb des Naßdampfgebietes nach ***rechts***, ein **Verflüssigen** den Verlauf nach ***links***.

6.2.2 Prozeß und Flußbild bei einstufiger Verdichtung



① → ② **Isentrope Verdichtung** des Kältemittel im Verdichter

② → ③ **Isobare Verflüssigung** ⇒ Wärmeabgabe $\dot{Q}$

③→ ④ **Adiabate Entspannung** des Kältemittels im Drosselorgan

④→ ① **Isobare Verdampfung** ⇒ Wärmeaufnahme $\dot{Q}_0$

6.2.3 Überhitzung und Unterkühlung

Warum? **Überhitzung** (ÜH) des dampfförmigen Kältemittels:

- garantiert "trockenen" Dampf in den Verdichter anzusaugen, d.h. Vermeidung von Flüssigkeitsschlägen
- gelöste Schmierstoffe aus dem Kältemittel austreiben, damit sie zur Schmierung des Zylinders verfügbar sind, insbesondere bei FKW-Kältemittel, vor allen Dingen bei R 12. Zusätzlich wird dadurch ein "Aufschäumen" des Kurbelwannen-Inhaltes (KM+Öl) vermieden. Dem dient auch bei größeren Verdichtern die (elektronische) Kurbelwannenheizung.

Unterkühlung (UK) des kondensierten (flüssigen) Kältemittels:

- "Kälteleistungsverlust" durch den Drosselvorgang bei gleichem Verdichtungsaufwand (P) zum Teil auszugleichen.
- Vermeidung von Dampfblasenbildung in der Flüssigkeitsleitung (Kavitation).
- Die Unterkühlung wird begrenzt durch die Abkühlung von T (T_3) auf T_0 erforderliche Teilverdampfung entsprechend x_4 , d.h. 4' als Endpunkt der Drosselung ist nicht erreichbar!

Überhitzung und **Unterkühlung** führen zur Vergrößerung der Enthalpiedifferenz $\Delta h_0 = h_1 - h_4$, d.h. entweder:

- Vergrößerung der aufzunehmenden Kälteleistung $\dot{Q}_0$ bei $\dot{m}_R = \textbf{konst.}$
- Verringerung der umlaufenden Kältemittelmenge $\dot{m}_R$ bei $\dot{Q}_0 = \textbf{konst.}$

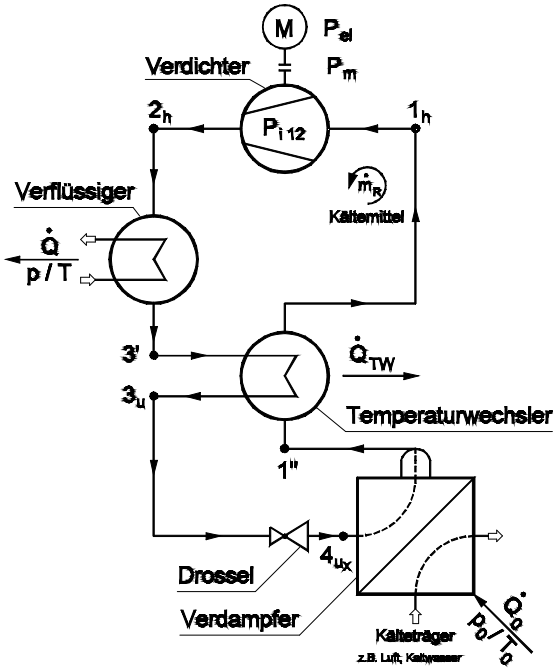
Wodurch?

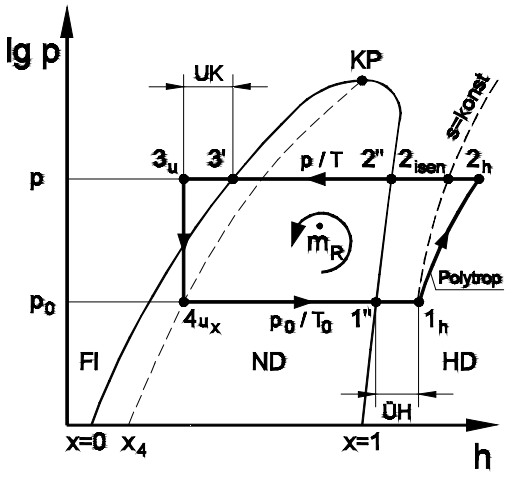
- Vergrößerung der Wärmeübertragungsflächen $(\dot{Q}_0 = A \cdot k \cdot \Delta\vartheta_m)$ im Verdampfer bzw. im Kondensator
- Zwischenschaltung eines Wärmeaustauschers zwischen Kältemittel-Dampfleitung (Verdampferaustritt) und Flüssigkeitsleitung (Kondensataustritt) den sogenannten **"Temperaturwechsler"**

Vorteil: Definierte Überhitzung und Unterkühlung wegen

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{m}_R \cdot (h_1 - h_1') \cong \dot{m}_R \cdot (h_3' - h_{4u})$$

$$\Delta h_{ÜH} \cong \Delta h_{UK}$$

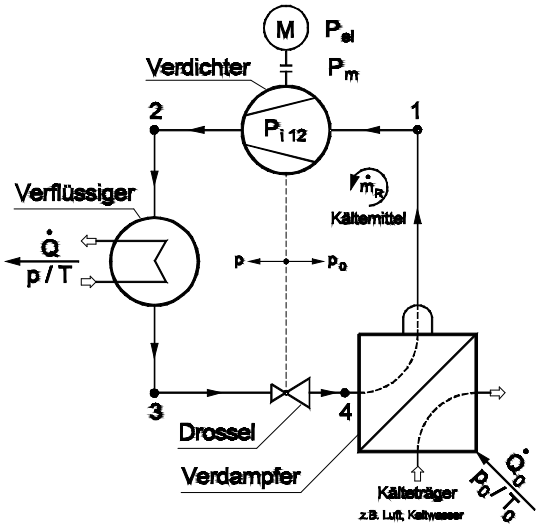


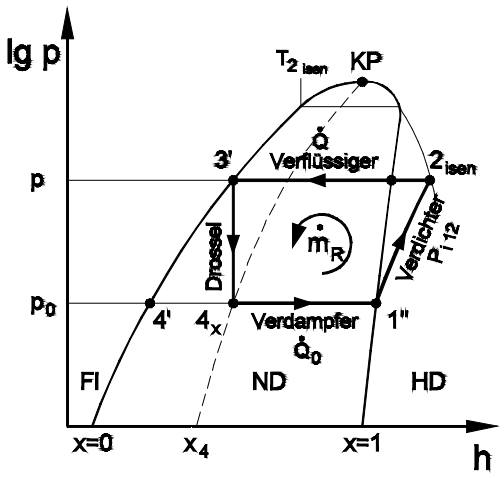


Bei NH_3 als Kältemittel wird die Überhitzung möglichst klein gehalten, um die Verdichtungsendtemperatur (T_2) gering zu halten, wegen der **Zersetzung des Kältemaschinenöles** (hier: Mineralöle) und in Extremfällen auch des NH_3 ! Hier werden in der Regel mechanische Tropfenabscheider als Verdichterschutz eingebaut.

Im Realprozeß treten Druckverluste Δp_V und Δp_K infolge Reibung und Einzelwiderstände auf, die für die Basis der Verfahrensauslegung **nicht** berücksichtigt werden.

6.2.4 Berechnungsgrundlagen





- **Gesamt-Energie-Bilanz:**

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,12} + \dot{Q}_c$$

- **Wärmebilanz am Verdampfer:**

$$\dot{Q}_{0g} = \dot{m}_R \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{0n} = \dot{m}_K \cdot c_K \cdot (t_{K_E} - t_{K_A})$$

Wärmebilanz beim Nutzer, z.B. Luftkühler (L=Luft):

$$\dot{Q}_{0e} = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot c_{p_L} \cdot (t_{L_E} - t_{L_A})$$

Wärmeübertragung:

$$\dot{Q}_{0g} \cong \dot{Q}_{0n} = \dot{Q}_0 = A_V \cdot k_V \cdot \Delta\vartheta_{V_m}$$

- **Wärmebilanz am Verflüssiger:**

$$\dot{Q} = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\dot{Q} \cong \dot{m}_W \cdot c_W \cdot (t_{W_A} - t_{W_E})$$

$\dot{Q}$:	**Kondensator- / Verflüssigerleistung**	
$P_{i\,12}$:	**Innere oder indizierte Verdichterantriebsleistung**	
$\dot{Q}_c$:	**Korrekturwärmestrom** für Wärmeaustausch mit der Umgebung ("Wärmeeinfall oder Kälteverust")	
$\dot{Q}_{0g}$:	**Gesamtkälteleistung** (Bruttokälteleistung) ist der Wärmestrom, welcher der Umgebung durch das Kältemittel entzogen wird.	
$\dot{Q}_{0n}$:	**Nettokälteleistung** ist der Wärmestrom, der dem Kälteträger im Verdampfer vom Kältemittel entzogen wird.	
$\dot{Q}_{0e}$:	**Nutz- oder Effektivkälteleistung** ist der Wärmestrom, dem das Kältemittel oder der Kälteträger nutzbringend (*beim Nutzer*) abführt.	
$\dot{Q}_0$:	**Kälteleistung**	[W]
A_V:	Verdampferfläche	[m^2]
k_V:	Wärmedurchgangskoeffizient, wobei k_V über eine Berechnung kaum verläßlich zugänglich ist	[W / (m^2·K)]

- **Energiebilanz am Verdichter** (siehe auch 4.3.1 Kolbenverdichter):

$$P_{i\,12} = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_1)$$

$$P_{i\,12} = \eta_m \cdot \eta_{el} \cdot P_{el}$$

tatsächlicher Verdichteransaugstrom:

$$\dot{V}_{R1} = \lambda \cdot \dot{V}_H = \dot{m}_R \cdot \upsilon_1$$

Kältemittelmassenstrom:

$$\dot{m}_R = \lambda \cdot \frac{\dot{V}_H}{\upsilon_1}$$

Volumetrische Kälteleistung:

$$q_0 = \frac{h_1 - h_4}{\upsilon_1} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{V}_{R1}}$$

Kälteleistung:

$$\dot{Q}_0 = \lambda \cdot \dot{V}_H \cdot q_0$$

6.2.5 **Bewertungsgrößen für Verdichter-Kälteanlagen** (siehe 4.1 Vergleichsprozesse)

- **Exergetische Wirkungsgrad:**

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x\,Nutz}}{\dot{E}_{x\,Aufwand}} = \frac{\Delta\dot{E}_{x\,\dot{Q}_0}}{P_{el}}$$

$$\Delta\dot{E}_{x\,\dot{Q}_0} = \underbrace{\dot{m}_R \cdot [(h_1 - h_4) - T_a \cdot (s_1 - s_4)]}_{\dot{Q}_{0g}}$$

E_x: Exergie
T_a: Umgebungstemperatur [K]

Energie = Energie + Anergie

- **Carnot-Gütegrad:**

$$\eta_{K_{Car}} = \frac{P_{K_{Car}}}{P_K} = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_{K_{Car}}}$$

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_K}$$

$$\varepsilon_{K_{Car}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{K_{Car}}} = \frac{T_0}{T - T_0}$$

$\eta_{K\,Car}$: **Car**not-Gütegrad für Verdichter-**K**älteanlagen
ε_K: Kälteleistungszahl des Realprozesses
$\varepsilon_{K\,Car}$: Kälteleistungszahl des Carnot-Vergleichprozesses

- **Gütegrad des idealen Vergleichsprozeß:**

$$\eta_{K_{ideal}} = \frac{P_{K_{ideal}}}{P_K} = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_{K_{ideal}}}$$

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_K}$$

$$\varepsilon_{K_{ideal}} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{K_{ideal}}}$$

$$P_{K_{ideal}} = P_{i\,isen} = \dot{m}_R \cdot (h_{2\,isen} - h_1)$$

$\eta_{K\,ideal}$: Gütegrad des **ideal**en Vergleichprozesses
ε_K: Kälteleistungszahl des Realprozesses
$\varepsilon_{K\,ideal}$: Kälteleistungszahl des idealen Vergleichprozesses
$P_{K\,ideal}$: Innere ideale Leistung [W]

- **Innerer (indizierter) Gütegrad:**

$$\eta_{K_i} = \frac{P_{i\,isen}}{P_{i\,pol}} = \frac{(h_{2\,isen} - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

$\eta_{K\,i}$: Innerer Gütegrad
$P_{i\,isen}$: Innere isentrope Leistung [W]
$P_{i\,pol}$: Innere polytrope Leistung [W]

- **Liefergrad** (siehe 4.3.1 Kolbenverdichter)**:**

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{R1}}{\dot{V}_H} = f\left(\frac{p}{p_0}, \dot{V}_{R1}(\ldots\dot{Q}_{0g}), \varepsilon_0, KM\right)$$

(DKV-Arbeitsblatt 3-01)

- **Volumetrische Kälteleistung** (siehe 6.2.4 Berechnungsgrundlagen)**:**

$$q_0 = \frac{\dot{Q}_{0g}}{\dot{V}_{R1}} = \frac{\dot{m}_R \cdot (h_1 - h_4)}{\dot{m}_R \cdot \upsilon_1}$$

- **Normtemperaturen:**

Hierbei handelt es sich um vereinbarte Temperaturen zur einheitlichen Festlegung der Betriebsbedingungen.

z.B. t_0 = -15 °C / t = + 30 °C / t_u = + 25 °C

σ “Normkälteleistung “: $\dot{Q}_0$ = ... kW bei –15 / +30 / +25 °C !

6.2.6 Mehrstufige Kompressions-Kaltdampf-Kälteanlagen (siehe 4.3.2 Mehrstufige Verdichtung)

Gründe für die Mehrstufigkeit:

- Das Druckverhältnis (p/p_0) steigt infolge des Temperaturabstandes T zu T_0, d.h. Belastung der Verdichterkonstruktion (Ventile, Antrieb, ...) und Liefergrad sinkt.
- Möglichkeit der Zwischenkühlung des Kältedampfes und damit Angleichung an die (energetisch optimale) isotherme Verdichtung sowie einen (theoretischen) Arbeitsgewinn.
- Absenkung der Verdichtungs-Endtemperatur T_2 infolge Zwischenkühlung.
- Reduzierung der thermischen Belastung (Zylinder-Temperatur) der einzelnen Verdichter, d.h. ($1-\eta_W$) bzw. Verbesserung der Liefergrade.

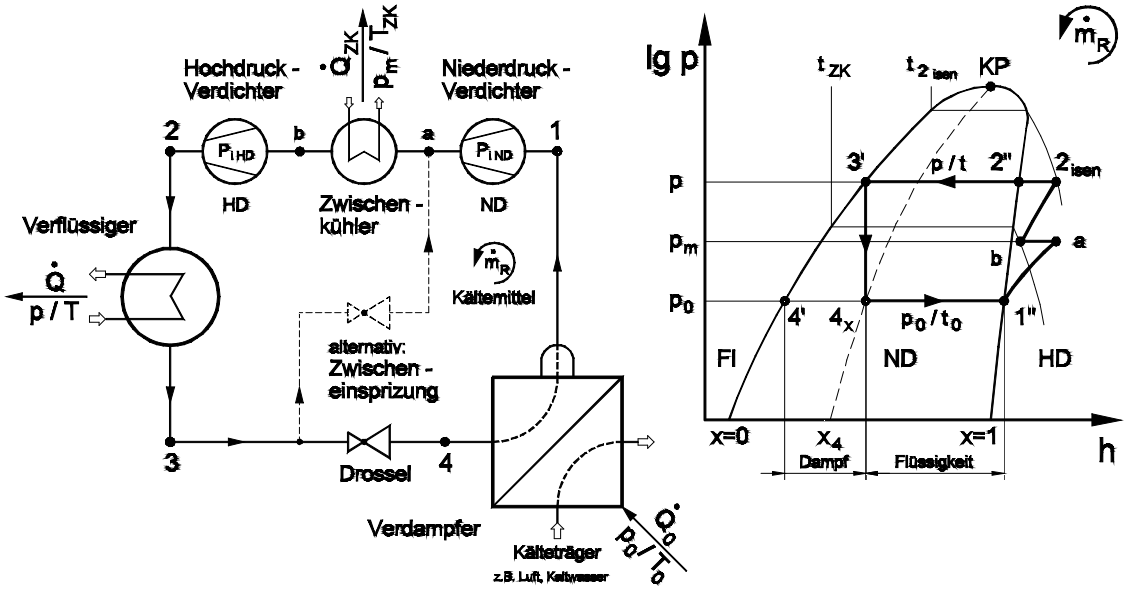
Ungefähre Grenzen für Hubkolbenverdichter:

2-stufig ab $p / p_0 \geq 8$

3- und mehrstufig ab $p / p_0 \geq 25$

Hier interessieren 2-stufige Prozesse, da sie in der Regel den Grenzfall des Kältebedarf in der VT bedeuten.

I. Zweistufiger KKKP mit äußerer indirekter Zwischenkühlung und einfacher Drosselung



Der Prozeß arbeitet mit einem Wärmeaustauscher (mit Wasser gekühlt) zwischen ND- und HD-Stufe als Zwischenkühler.

Nachteile:
- Wärmeaustauscher wird benötigt
- zusätzliches Kühlmittel
- große Drosseldampfmenge (4' - 4_x)

Eine andere Lösung stellt die **Kältemittel (KM) – Einspritzung** zwischen ND- und HD-Stufe dar!
Erforderlich ist eine temperaturgeführte schnelle und exakte Regelung der Einspritzmenge, so daß Naßdampfbildung am HD-Verdichter-Eintritt vermieden wird (Flüssigkeitsschläge!). Gleiches gilt für die Wärmeaustauschregelung (s.o.)!

Gesamt-Energie-Bilanz:

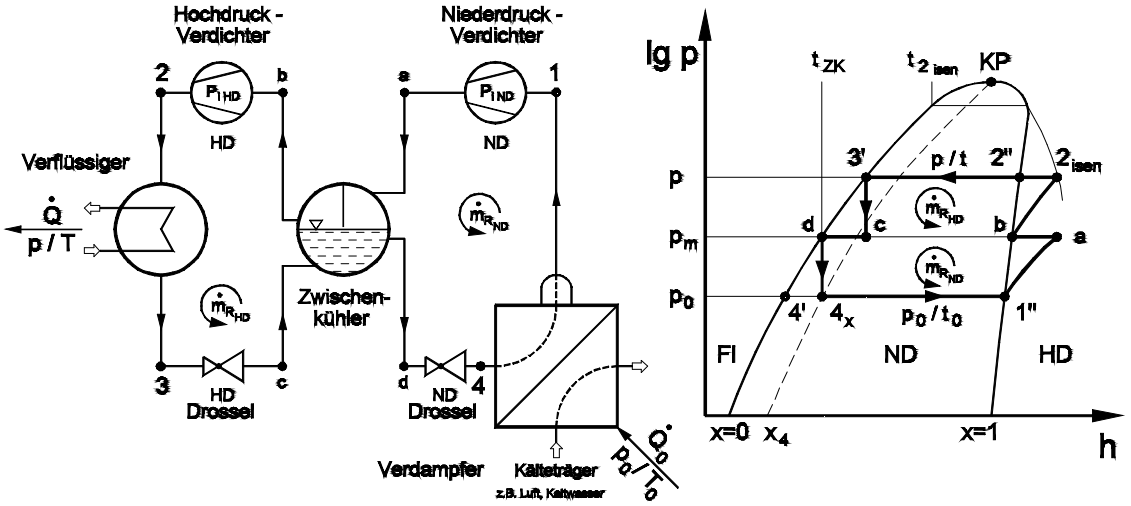
$$\dot{Q} + \dot{Q}_{ZK} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,ND} + P_{i\,HD} + \dot{Q}_c$$

Wärmebilanz am Zwischenkühler:

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{m}_R \cdot (h_a - h_b)$$

$$\dot{Q}_{ZK} \cong \dot{m}_W \cdot c_W \cdot (t_{W_A} - t_{W_E})$$

II. Zweistufiger KKKP mit innerer direkter Zwischenkühlung und zweifacher Drosselung



Die aus dem ND-Teil des Prozesses kommende Kältemittel-Dampfmenge wird durch direkten Wärme- und Stoffaustausch mit der auf den Mitteldruck entspannten Flüssigkeit aus dem Hochdruckteil auf Sättigungstemperatur geführt und als Dampf, vermehrt um die Drosseldampfmenge des HD-Drosselventils sowie der Rückkühlung notwendigen verdampften Menge vom HD-Verdichter des Prozesses abgesaugt.

Vorteile: + einfacher Druckbehälter, auch "Mitteldruckflasche" genannt, anstatt teurem Wärmeaustauscher
+ kein (zusätzliches) Kühlmittel
+ geringe Drosseldampfmenge (4' - 4_x)

Nachteile: – $\dot{m}_{R_{HD}} > \dot{m}_{R_{ND}}$, d.h. größerer HD-Verdichter mit höherer Antriebsleistung

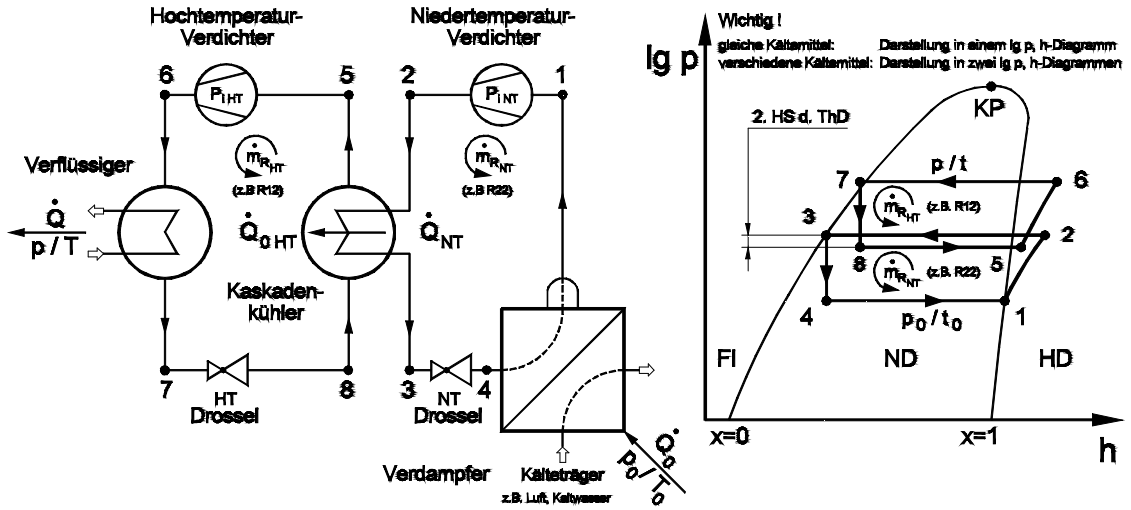
Gesamt-Energie-Bilanz:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,ND} + P_{i\,HD} + \dot{Q}_c$$

Wärmebilanz am Zwischenkühler:

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{m}_{R_{ND}} \cdot (h_a - h_d) = \dot{m}_{R_{HD}} \cdot (h_b - h_c)$$

III. Zweistufige Kaskaden-Kompressions-Kaltdampf-Kälteprozeß



Hierbei werden zwei geschlossene Kältemittelkreisläufe hintereinander geschaltet, so daß der Kondensator der Niedertemperatur (NT)-Stufe **gleichzeitig** Verdampfer der Hochtemperatur (HT)-Stufe ist ("Kaskadenkühler"). Spezifische Größen einschließlich der Güte- und der Wirkungsgrade sind auf die Summe P_i zu beziehen

Gesamt-Energie-Bilanz:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,NT} + P_{i\,HT} + \dot{Q}_c$$

Wärmebilanz am Kaskadenkühler:

$$\dot{Q}_{0_{HT}} = \dot{Q}_{NT} = \dot{m}_{R_{ND}} \cdot (h_2 - h_3) = \dot{m}_{R_{HD}} \cdot (h_5 - h_8)$$

6.3 Kältemittel

Definition Kältemittel nach VGB 20 § 2 (3):
„Kältemittel sind in der Anlage umlaufende Stoffe, durch deren Aggregatzustandsänderungen Wärme entzogen oder abgeführt wird."

6.3.1 Anforderungen

Stoffe die als Kältemittel eingesetzt werden sollen, müssen bestimmte Anforderungen erfüllen !

Thermisch und kalorische Anforderungen:

- Die Betriebsdrücke müssen in günstigen Bereichen liegen, d.h.
  p: niedrig, wegen (Verdichter-) Konstruktion
  p_0: $\geq p_b$, wegen Falschluftansaugung bei Leckagen !
  p / p_O: niedrig, wegen 1-stufiger Verdichtung, z.B. $p / p_O \leq 8$ für Hubkolbenverdichter
- Die Dampfdruckkurve sollte im Arbeitsbereich stetig und eindeutig verlaufen !
- Geringe Temperatur am Austritt des Verdichters $t_{2h} \leq 120...130$ °C,
  wegen Verdichterbelastung insbesondere Ventile und Liefergrad ($\eta_W = f(t_{2h})$) !
- Hohe Verdampfungswärme r = h'' - h' (siehe q_0), wegen geringer Kältemittelumlaufmenge ! Für Kleingeräte sollte aus reglungstechnischen Gründen gegenteilige Forderung (niedrige Verdampfungswärme r), z.B. für Kühlmöbel !
- Kleines spezifisches Volumen (siehe q_0) im Ansaugzustand, wegen kleinerer Kälteanlage, insbesondere des Verdichters !

Chemische und physiologische Anforderungen:

- Es darf die wichtigsten Metalle der Systemkomponenten nicht angreifen, d.h. es soll chemisch indifferent (=nicht reagieren) gegenüber Materialien wie Metalle, Dichtungen, Schmieröl, usw. sein.
- Es darf sich im praktischen Betrieb nicht zersetzen bzw. es sollte chem. stabil und im Arbeitsbereich (T) sein, d.h. weder dissoziieren oder polymerisieren.
- Es darf nicht explosiv sein.
- Es darf nicht brennbar sein.
- Es darf nicht giftig (toxisch) sein.
- Es muß sich mit Öl mischen lassen.
- Es muß umweltfreundlich und gut zu entsorgen sein.

6.3.2 Begriffe und Kurzzeichen nach DIN 8962

Für die gebräuchlichen Kältemittel wird das Buchstabensymbol R (refrigerant) und eine Nummer als Kurzzeichen verwandt. Gelegentlich ist an Stelle von R die Herstellerbezeichnungen in Gebrauch, z.B. Frigen 22 (Hoechst), Kaltron 22 (Kali-Chemie, Hannover) oder Freon 22 (Du Pont, USA).

Bezeichnungschlüssel für halogenierte Kohlenwasserstoffe:

halogenierte Kohlenwasserstoffe → z.B. FCKW, FKW (vollhalogeniert) und H-FCKW, H-FKW (teilhalogeniert), dabei ist Wasserstoff ganz oder teilweise durch Halogene wie Fluor, Chlor,Brom oder Jod ersetzt worden.

	Schlüssel	Beispiel		
Bezeichnung	R x y z	**R 12**		
	p = z	p = 2		
	n + 1 = y	n + 1 = 1	→	n = 0
	m - 1 = x	m - 1 = 0	→	m = 1
Bedingung	$n + p + q = 2 \cdot m + 2$	$0 + 2 + q = 2 \cdot 1 + 2$	→	q = 2
Bestandteile	$C_m H_n F_p Cl_q$	$C_1 H_0 F_2 Cl_2$	→	**CCl_2F_2**

6.3.3 Tabelle der bisher gebräuchlichsten Kältemittel nach DIN 8962

Kurz-zeichen	Benennung	chem. Formel	Molmasse in g/mol	Siedetemperatur in °C bei p = 1013 mbar
halogenierte Kohlenwasserstoffe				
*R 11	Trichlorfluormethan	CCl_3F	137,4	+ 23,7
*R 12	Dichlordifluormethan	CCl_2F_2	120,9	− 29,8
*R 13	Chlortrifluormethan	$CClF_3$	104,5	− 81,5
*R 13B 1	Bromtrifluormethan	$CBrF_3$	148,9	− 57,8
*R 14	Tetrafluormethan	CF_4	88,0	− 72,8
**R 22	Chlordifluormethan	$CHClF_2$	86,5	− 40,8
**R 30	Dichlormethan	CH_2Cl_2	84,9	+ 39,8
**R 40	Chlormethan	CH_3Cl	50,5	− 23,7
**R 50	Methan	CH_4	16,0	−162,0
*R 113	1,1,2-Trichlortri-fluoräthan	$CClF_2–CCl_2F$	187,4	+ 47,5
*R 114	1,2-Dichlortetra-fluoräthan	$CClF_2–CClF_2$	170,9	+ 3,56
**R 142b	1-Chlor-1,1-Difluoräthan	$CH_3–CClF_2$	100,5	− 11,2
**R 152a	1,1-Difluoräthan	$CH_3–CHF_2$	66,0	−24,6
Azeotrope				
R 500	Kältemittel 12/152a 73,8/26,2	CCl_2F_2/ $CH_3–CHF_2$	99,3	− 33,4
R 502	Kältemittel 22/115 48,8/51,2	$CHClF_2$/ $CClF_2–CF_3$	112,0	− 45,56
† Kohlenwasserstoffe				
R 50	Methan	CH_4	16,0	−162,0
R 170	Äthan	$CH_3–CH_3$	30,0	− 88,6
R 290	Propan	$CH_3–CH_2–CH_3$	44,0	− 45,0
R 1150	Äthylen	$CH_2=CH_2$	28,0	−102,0
R 1270	Propylen	$CH_3–CH=CH_2$	42,1	− 47,0
Übrige Kältemittel				
NH3 (R 717)	Ammoniak	NH_3	17,0	− 33,4
CO_2	Kohlendioxid	CO_2	44,0	− 78,5
SO_2	Schwefeldioxid	SO_2	64,1	− 10,0
H_2O (R 718)	Wasser	H_2O	18,0	+100,0
–	Luft	–	29,0	−192,0

* **Vollhalogenierte** Kohlenwasserstoffe
(kein Wasserstoffatom „H" im Molekül)

** **Teilhalogenierte** Kohlenwasserstoffe
(Mindestens ein Wasserstoffatom „H" im Molekül)

† **Kohlenwasserstoffe**
(Neben den zentralen Kohlenstoffatomen „C" nur Wasserstoffatome „H" im Molekül)

6.3.4 Vergleich von Kältemittel

- **Druck**

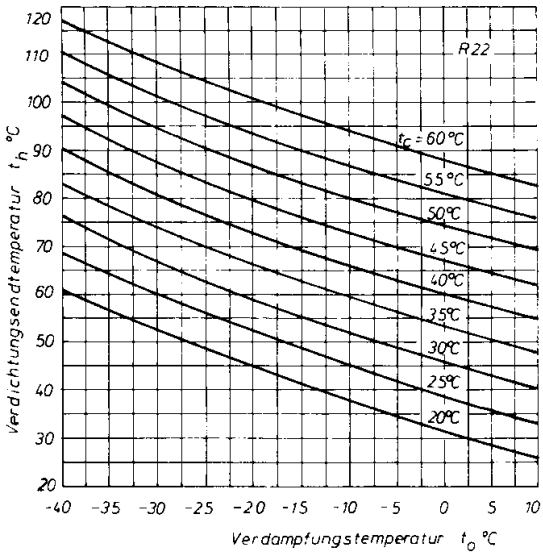
Kältemittel	Verdampfungsdruck p_0 bei –15 °C in bar	Verflüssigungsdruck p bei +30 °C in bar
R 11	0,201	1,266
R 12	1,827	7,465
R 22	2,964	11,880
R 13	13,206	38,649*[1]
R 40	1,487	6,658
R 717 (NH_3)	2,410	11,895
R 718 (H_2O)	0,00656*[2]	0,0424
R 502	3,486	13,189

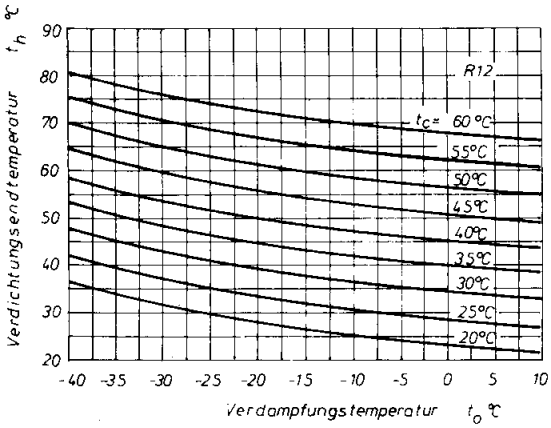
*[1] bei +28,78 °C *[2] bei +1 °C

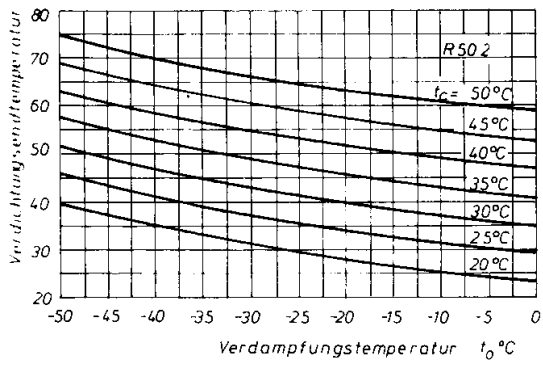
- **Siedetemperatur**

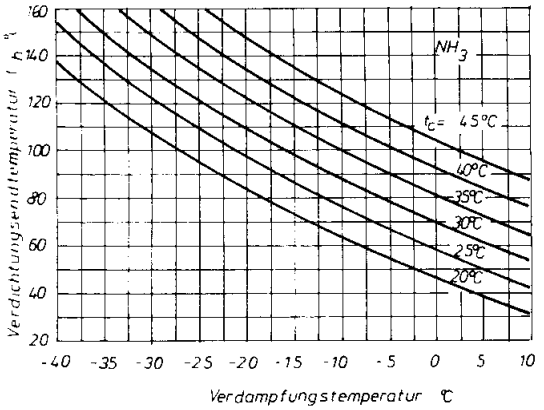
Kältemittel	Siedetemperatur in °C bei 1013 mbar
R 11	+ 23,7
R 12	- 29,8
R 22	- 40,8
R 13	- 81,5
R 40	- 23,7
R 717 (NH_3)	- 33,4
R 718 (H_2O)	+ 100,0
R 502	- 45,6

- **Endtemperaturen von Kältemittel bei isentroper Verdichtung**









- **Spezifisches Volumen**

Kältemittel	Dampf υ''_1 bei –15 °C in m³/kg	Flüssigkeit υ'_4 bei –15 °C in dm³/kg
R 11	0,766	0,638
R 12	0,0914	0,693
R 22	0,0777	0,749
R 13	0,01167	0,829
R 40	0,279	1,013
R 717 (NH_3)	0,5087	1,5185
R 718 (H_2O)	192,60*[1]	1,0001*[1]
R 502	0,050	0,725

*[1] bei +1 °C

- **Verdampfungenthalpie, spez. Kältegewinn, Kältemittelmassenstrom, Hubvolumenstrom**

Kältemittel	Verdampfungenthalpie $r = h''_1 - h'_4$ bei –15 °C in kJ/kg	spez. Kältegewinn $q_0 = h''_1 - h_{4x}$ bei t_0 = -15 °C und t = +30 °C in kJ/kg	Kältemittelmassen-strom für 1 kW in kg/min	Hubvolumen-strom für 1 kW in m³/min
R 11	195,3	156,73	0,3828	0,2928
R 12	159,55	117,16	0,5118	0,0467
R 22	217,00	162,47	0,369	0,0286
R 13	103,73	26,61*[2]	2,25*[2]	0,0262*[2]
R 40	420,48	349,64	0,1716	0,0478
R 717 (NH_3)	1312,68	1102,30	0,054	0,0274
R 718 (H_2O)	2497,78*[1]	2376,29*[1]	0,025*[1]	4,86*[1]
R 502	156,61	104,39	0,5742	0,0287

*[1] bei +1 °C *[2] bei +28,78 °C

- **Mischbarkeit**

Kältemittel	Mischbarkeit mit Öl
R 11	ja
R 12	ja
R 22	ja*
R 13	ja*
R 40	ja
R 717 (NH_3)	nein
R 718 (H_2O)	nein
R 502	ja*

* unter gewissen Bedingungen ist eine Mischlücke vorhanden

- **Neigung zu Undichtigkeiten**

  Je höher die Molmasse, desto geringer ist die Neigung zu Undichtigkeiten !

- **Geruch**

Kältemittel	Mischbarkeit mit Öl
R 11	leicht ätherisch
R 12	leicht ätherisch
R 22	leicht ätherisch
R 13	leicht ätherisch
R 40	süßlich ätherisch
R 717 (NH_3)	reizend
R 718 (H_2O)	geruchlos
R 502	leicht ätherisch

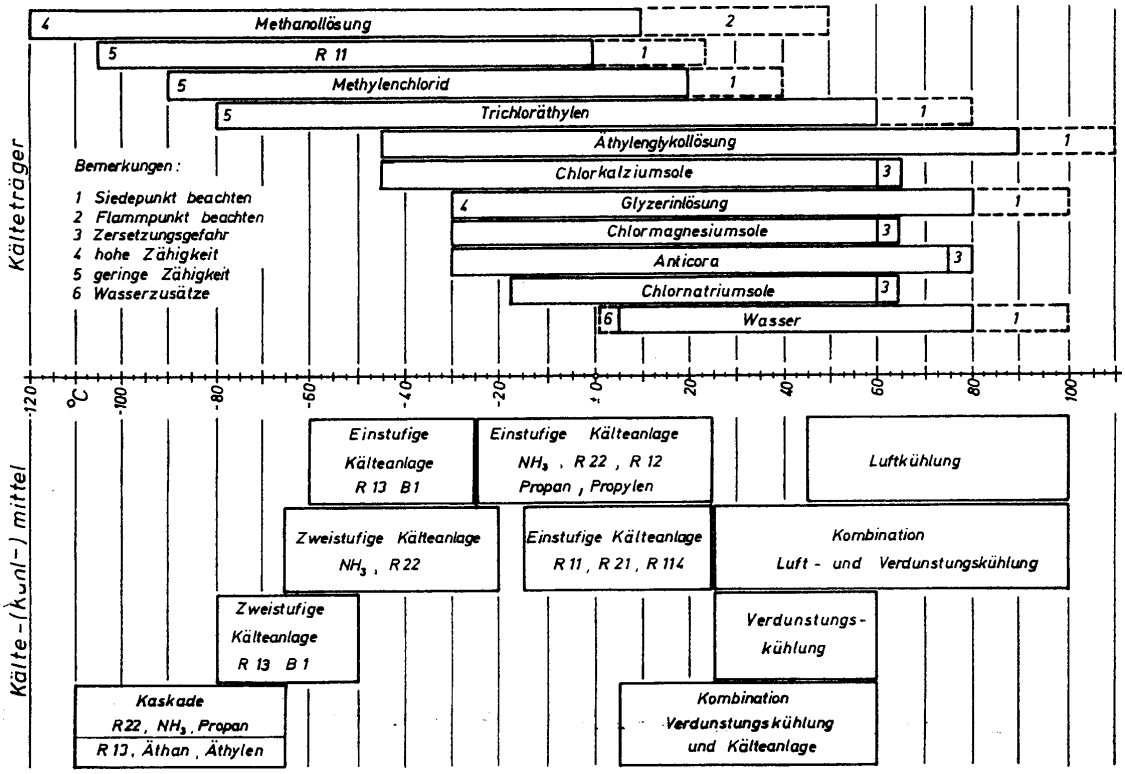
- **Giftigkeit**

Kältemittel	giftig bzw. gefährlich ab einer Konzentration mit Luft
R 11	nein
R 12	nein
R 22	nein
R 13	nein
R 40	2 – 2,5 %
R 717 (NH_3)	0,5 – 0,6 %
R 718 (H_2O)	nein
R 502	nein

- **Brennbarkeit**

Kältemittel	brennbar bzw. explosiv bei einer Konzentration mit Luft
R 11	nein
R 12	nein
R 22	nein
R 13	nein
R 40	8,1 – 17,2 %
R 717 (NH_3)	16,0 – 25,0 %
R 718 (H_2O)	nein
R 502	nein

- **Einsatzbereich von Kältemittel und Kälteträger**



6.3.5 Einteilung und Anwendungsgebiet von Kältemittel

Gemäß DIN 8975 T1 und Unfallverhütungsvorschrift VBG 20 § 3 (1) werden die Kältemittel in folgende Gruppen eingeteilt:

Gruppe 1: Nicht brennbare Kältemittel ohne erhebliche gesundheitsschädigende Wirkung auf den Menschen.
Max. Füllgewicht $\leq$ ***10 kg*** in Kälteanlagen (oder Lagerbehälter) bei Aufstellung (Lagerung) in Räumen mit allgemeinen Zugang.

Gruppe 2: Giftige oder ätzende Kältemittel oder solche, deren Gemisch mit Luft eine untere Zündgrenze (Explosionsgrenze) von mindestens 3,5 Vol-% hat. ***Max. Füllgewicht*** $\leq$ ***2,5 kg***.

Gruppe 3: Kältemittel, deren Gemisch mit Luft eine untere Zündgrenze (Explosionsgrenze) von weniger als 3,5 Vol-% hat. ***Max. Füllgewicht*** $\leq$ ***1 kg***.

Anwendungsgebiet der gebräuchlichsten Kältemittel

Kältemittel	Temperatur-bereich in °C	Anwendungsgebiet	Spezifische Eigenschaften
R 11	$\pm$ 0 bis + 20	Turboverdichter, Groß-Kaltwassersätze für zentrale Klimaanlagen	hohes Molekulargewicht, sonst wie R 12, Kälteträger bis – 100 °C
R 113	$\pm$ 0 bis + 20	Turboverdichter, Groß-Kaltwassersätze für zentrale Klimaanlagen	hohes Molekulargewicht, sonst wie R 12
R 114	- 20 bis + 20	Turboverdichter, Groß-Kaltwassersätze für zentrale Klimaanlagen	hohes Molekulargewicht, sonst wie R 12
R 12	- 40 bis + 10	Kühlschränke, Tiefkühltruhen, Klimageräte, gewerbliche Kälteanlagen, Klimaanlagen jeder Art und Größe, besonders für Anlagen mit Luftkühlern mit direkter Verdampfung, Wetterkühlanlagen, Anlagen zur Kühlung von Lebensmitteln, die ja bei Undichtigkeiten nicht verderben dürfen, Chlor- u. Phosgen-Verflüssigungsanlagen, für alle Anlagen mit großer Reaktionsträgheit zwischen Kältemittel und Kühlgut, Schiffskühlanlagen usw., Ersatz von NH_3 in 1-stufigen Anlagen	seit 1930 auf dem Markt, ungiftig, nicht brennbar, Sicherheitskältemittel, kleine Verdampfungswärme, geringe Wärmeleitfähigkeit, niedrige spez. Wärme, Kälteträger bis – 150 °C
R 22	- 50 bis + 10	Gewerbliche Kälteanlagen, Supermärkte, Kühlschiffe, industrielle Großkälteanlagen, Klimaanlagen- und Geräte, bei denen kleinere Kompressoren als bei R 12 eingesetzt werden sollen, Ersatz von NH_3 in mehrstufigen Anlagen	Mitteldruck-Kältemittel, sonst wie R 12
R 13	- 100 bis - 60	Tieftemperaturkältemittel, Kaskadenkälteanlagen für Labor und industrielle Anwendung, geeignet dort wo CO_2 oder Kohlenwasserstoffe üblich waren	Hochdruckkältemittel, sonst wie R 12
R 717 (NH_3)	- 70 bis + 10	Solekühlanlagen aller Art, Eisfabriken, Kühlhäuser mit direkter oder indirekter Verdampfung, Kunsteisbahnen, Kälteanlagen großer Leistungen für chemische Industrie, Kälteanlagen in der Lebensmittelindustrie wie Schlachthöfe, Fleischwarenfabriken, Geflügelschlachtereien, Brauereien, fischverarbeitende Betriebe, z.Zt. noch gebräuchlichstes und billigstes Kältemittel	billig, korrosiv gegen Cu und dessen Legierungen, geruchsstark, stark giftig, gute thermische und kalorische Eigenschaften
R 718 (H_2O)	$\pm$ 0 bis + 20	Wasserdampfstrahl-Kälteanlagen für große industrielle Kühl- und Klimaanlagen	beschränkter Temperaturbereich, ansonsten Problemlos
R 502	- 60 bis – 20	Für einstufige Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern in Supermärkten und gewerbliche Anlagen	sonst wie R 22

6.3.6 Das Ozonloch und Anforderungen an neue Kältemittel

Ozon ist Sauerstoff, dessen Moleküle, anders als beim Sauerstoff der Atemluft nicht aus zwei (O_2), sondern aus je drei Atomen (O_3) besteht. Dieses Ozon absorbiert einen Teil der gefährlichen ultravioletten Strahlen (UV-Licht).

In den letzten Jahren haben Wissenschaftler festgestellt, daß die Ozonschicht über den beiden Polen, insbesondere über dem Südpol (Antarktis) dünner wird (↵ **Ozonloch**).

Man glaubt gute Gründe dafür zu haben, daß für den Abbau des Ozons auch eine Reihe der gebräuchlichsten Kältemittel, u.a. die vollhalogenierten Fluor**chlor**kohlenwasserstoffe (FCKW), wie z.B. R 11 und R 12, einen hohen Anteil daran haben.

Nach dem Auflösen der Chlor-Atome (Cl) aus dem FCKW-Molekül, hervorgerufen durch die Solarstrahlung, cracken (umwandeln) diese Cl-Atome, die in einer Höhe von 20 bis 30 km befindlichen instabilen Ozon-Verbindungen (O_3) in Sauerstoff (O_2) – und das bis zu 100000 Mal pro Cl-Atom.

Das Ergebnis ist, daß die zuvor durch die Ozonschicht gefilterte UV-Strahlung nun wesentlich intensiver die Erdoberfläche erreicht.

In Bezug auf die mögliche Ozongefährdung können nach der Definition des DKV (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein) **vier Hauptgruppen** unterschieden werden:

Gruppe 1: **FCKW** → vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Sie enthalten immer Fluor (F) und Chlor (Cl) im Molekül, jedoch keinen Wasserstoff (H).
Diese Verbindungsgruppe ist chemisch und thermisch sehr stabil.
ODP-Werte: R 11 = 1, R 12 = 1, R 113 = 0,8

Gruppe 2: **FKW** → vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
Sie enthalten als Halogen nur Fluor (F) im Molekül und sind ebenfalls wasserstoffrei..
Sie sind ebenfalls chemisch und thermisch sehr stabil. Da sie jedoch kein Chlor (Cl) enthalten, haben sie keinen Einfluß auf den Ozonabbau.
ODP-Werte aller FKW's = 0 , z.B. R14 = 0

Gruppe 3: **H-FCKW** → teilhalogenierte Hydrogenfluorchlorkohlenwasserstoffe
Sie enthalten mindestens ein Wasserstoff- (H), Fluor- (F) und Chloratom (Cl).
Im Vergleich zu den FCKW's besitzen sie eine geringere chemische Stabilität und werden daher in der Troposphäre deutlich abgebaut.
ODP-Werte aller H-FCKW's ≤ 0,05 , z.B. R22 = 0,05

Gruppe 4: **H-FKW** → teilhalogenierte Hydrogenfluorkohlenwasserstoffe
Sie enthalten mindestens ein Wasserstoffatom (H) im Molekül, jedoch kein Chlor (Cl).
Da sie jedoch kein Chlor (Cl) enthalten, haben sie keinen Einfluß auf den Ozonabbau.
ODP-Werte aller H-FKW's = 0 , z.B. R 134a = 0, R 124 = 0, R 143a = 0

ODP-Wert → Ozonabbaupotential (Ozone depletion potential)

(H)**GWP-Wert** → Treibhauspotential (Halocarbon global warming potential)

FCKW-Reglementierung nach Montreal-Protokoll, EG-Verordnung, deutsche FCKW-Halon-Verbotsverordnung:

Deutschland	01.01.1992	Verbot für stationäre Neuanlagen mit FCKW-Füllmengen > 5 kg
	01.01.1994	Verbot für mobile Neuanlagen mit FCKW-Füllmengen > 5 kg
	01.01.1995	Verbot für alle Neuanlagen mit FCKW
	01.01.2000	Verbot für alle Neuanlagen mit H-FCKW 22
EG	01.01.1995	Ausstieg aus FCKW-Produktion und Verbrauch in der EG (außer GR)
Welt	01.01.1996	Weltweiter Ausstieg (Montreal-Protokoll)

Anforderungen an neue Kältemittel:

- chlor- und bromfrei, d.h. kein Ozonabbaupotential (ODP = 0),
- reduzierte Treibhauswirksamkeit,
- günstige physiologische Eigenschaften,
- passende physikalische und thermodynamische Eigenschaften,
- Mischbarkeit mit Schmiermitteln,
- Unbrennbarkeit und toxiologische Unbedenklichkeit.

Unter Einbeziehung sowohl der anwendungstechnischen als auch ökologischen Aspekte wird die Palette der in Frage kommenden Substanzen stark eingeengt. Die allseitigen Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre haben die Weltweite Suche nach Ersatzlösungen und -produkten für FCKW's beschleunigt.

Ersatzkältemittel bzw. teilhalogenierte Kältemittel-Substitute (H-FKW, H-FCKW):

Bezeichnung	chem. Formel	Siedepunkt °C	enthält Wasserstoff	chlorfrei	nicht brennbar	ODP	GWP	Ersatz für
R 141b	CH_3-CCl_2F	+32,0	○			0,11	0,12	(R 11)
R 123	CF_3-CHCl_2	+27,6	○		○	0,02	0,02	R 11
R 142b	CH_3-CClF_2	−9,2	○			0,065	0,42	(R 11, 12)
R 124	$CF_2-CHClF$	−12,0	○		○	0,022	0,10	R 114
R 227*	**$CF_3-CHF-CF_3$**	**−16,5**	●	●	●	**0**	**(0,6)**	**R 114**
R 152a	CH_3-CHF_2	−24,7	○	○		0	0,03	(R 12)
R 134a*	**CF_3-CH_2F**	**−26,2**	●	●	●	**0**	**0,25**	**R 12**
R 22*	**$CHClF_2$**	**−40,8**	●		●	**0,055**	**0,36**	**R 502,12**
R 143a*	CH_3-CF_3	−47,4	○	○		0	1,14	**R 502, 22**
R 125*	**CHF_2-CF_3**	**−48,5**	●	●	●	**0**	**0,84**	als Gemisch-komponenten in nahe azeotropen Mischungen. Entwicklungs-produkt
R 32*	CH_2F_2	−51,8	○	○		0	0,13	
R 23*	**CHF_3**	**−82,0**	●	●	●	**0**		**R 13, 503**

Quelle: ODP: UNEP, Nov. 19; GWP: AFEAS, Dez. 91
* = von Hoechst produziert bzw. in Entwicklung

Allgemeine Grundlagen

Kraftmaschinen **Wärme ┘ Arbeit** (Nutzarbeit)
Zufuhr von **Wärme Q (+)** mit Abgabe von innerer bzw. reversible **Arbeit W_K (–)**,
z.B. Gas- und Dampfturbine, Otto- und Dieselmotor

Arbeitsmaschinen **Arbeit ┘ Wärme**
Zufuhr von innerer bzw. reversible **Arbeit W_K (+)** mit Abgabe von **Wärme Q (–)**,
z.B. Ventilator, Pumpe, Verdichter, Wärmepumpen, Kälteanlagen

Vorzeichenregel DIN 1345
positiv **+** allem einem System *zugeführten* Energien (z.B. Arbeit, Wärme)
negativ **–** allem einem System *abgeführten* Energien

Gleichungen

$$V = \upsilon \cdot m \qquad \dot{m} = m \cdot n \qquad m = \dot{m} \cdot t$$

$$\dot{V} = \upsilon \cdot \dot{m} \qquad \dot{V} = A \cdot c \qquad A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

Stoffdaten

Luft:	R_i	**= 287**	J / (kg·K)
	$c_{p\,0\,°C}$	**= 1,0043**	kJ / (kg·K)
	$c_{\upsilon\,0\,°C}$	**= 0,7171**	kJ / (kg·K)
Wasser:	$c_{p\,0\,°C}$	**= 4,186**	kJ / (kg·K)

Ideales Gas

χ **- Wert** (Gas)

1-atomige Gase:	χ **= 1,667**
2-atomige Gase:	χ **= 1,4**
3-atomige Gase:	χ **= 1,3**

Zustandsgleichung $p \cdot \upsilon = R_i \cdot T \qquad p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$

Zustandsänderung

Isochore	V = konst. n = ∞	$\frac{p}{T} = \text{konst.}$	
Isobare	p = konst. n = 0	$\frac{V}{T} = \text{konst.}$	
Isotherme	T = konst. n = 1	$p \cdot V = \text{konst.}$	
Isentrope	S = konst. Q_{isen} = 0 n = χ	$p \cdot V^{\chi} = \text{konst.}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\chi-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$
Polytrope	1 < n < χ	$p \cdot V^{n} = \text{konst.}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

$$n = \frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{\ln\frac{V_1}{V_2}} = \frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{\ln\varepsilon} = \frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{\ln\frac{p_2}{p_1} - \ln\frac{T_2}{T_1}}$$

spez. Wärmemenge

$$q_{ich\,12} = c_\upsilon \cdot (T_2 - T_1) = u_2 - u_1 = w_{e\,isen\,12}$$

$$q_{ib\,12} = c_p \cdot (T_2 - T_1) = h_2 - h_1 = w_{t\,isen\,12}$$

$$q_{iso\,12} = R_i \cdot T \cdot \ln\frac{p_1}{p_2} = R_i \cdot T \cdot \ln\frac{V_2}{V_1} = -w_{e\,iso\,12} = -w_{t\,iso\,12}$$

$$q_{isen\,12} = 0$$

$$q_{pol\,12} = c_\upsilon \cdot \frac{n - \chi}{n - 1} \cdot (t_2 - t_1)$$

Wasserdampf **(Claudius-Rankine-Prozeß)**

Naßdampf

$$u_x = h_x - p \cdot \upsilon_x \cdot 10^{-3}$$

$p \cdot \upsilon_x$ **ist in Joule nicht in kJ !**

$$\upsilon_x = \upsilon' + x \cdot (\upsilon'' - \upsilon')$$

$$h_x = h' + x \cdot r$$

$$s_x = s' + x \cdot (s'' - s')$$

Mischen $(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot h_3 = \dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2$ z.B. Wassereinspritzung

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Adiabate Drossel $h_1 = h_2$ **und** $c_1 = c_2$ auch Expansion

Verlustfreie Turbine $s_1 = s_2$

Verdichter und Kälteanlagen

Verdichter

$$P_{i\,th\,12} = \dot{m}_R \cdot (h_{2\,isen} - h_1)$$

$$P_{i\,12} = \dot{m}_R \cdot (h_{2\,h} - h_1)$$

$$P_{i\,12} = \dot{m}_R \cdot w_{t12}$$

$$P_{i\,12} = \eta_{el} \cdot \eta_m \cdot P_{el}$$

$$\eta_i = \frac{P_{i\,th\,12}}{P_{i\,12}} = \frac{(h_{2\,isen} - h_1)}{(h_{2\,h} - h_1)}$$

$$h_{2\,h} = h_1 + \frac{h_{2\,isen} - h_1}{\eta_i}$$

$$\dot{V}_H = z \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h \cdot n$$

$$V_H = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = \frac{\dot{V}_H}{z \cdot n}$$

$$\dot{V}_{R1} = \dot{m}_R \cdot \upsilon_1 = \frac{\dot{Q}_{og}}{q_o} = \lambda \cdot \dot{V}_H$$

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{R1}}{\dot{V}_H} = \frac{\dot{m}_R \cdot \upsilon_1}{\dot{V}_H} = \frac{\dot{Q}_{og}}{q_o \cdot \dot{V}_H}$$

$$\pi = \frac{p}{p_0} \quad < 8 \text{ für 1-stufige KKKP}$$

$$p_m = \sqrt{p \cdot p_0}$$

$$q_o = \frac{h_1 - h_4}{\upsilon_1} = \frac{\dot{Q}_{og}}{\dot{V}_{R1}}$$

Kondensator

$$\dot{Q} = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\dot{Q} \cong \dot{m}_W \cdot c_W \cdot (t_{W_A} - t_{W_E})$$

Verdampfer

$$\dot{Q}_{0\,g} = \dot{m}_R \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{0\,n} = \dot{m}_K \cdot c_K \cdot (t_{K_A} - t_{K_E})$$

Kälte-Prozeß

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0\,g} + P_{i\,12}$$

$$\eta_{K_{Car}} = \frac{P_{K_{Car}}}{P_{el}} = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_{K_{Car}}}$$

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \qquad \varepsilon_{K_{Car}} = \frac{T_0}{T - T_0}$$

- **Überhitzung und Unterkühlung durchTemperaturwechsler**

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{m}_R \cdot (h_{1h} - h''_1) \cong \dot{m}_R \cdot (h'_3 - h_{3u})$$

$$\Delta h_{ÜH} \cong \Delta h_{UK}$$

- **2-stufiger KKKP mit äußerer indirekter Zwischenkühlung und einfacher Drosselung**

$$\dot{Q} + \dot{Q}_{ZK} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,ND} + P_{i\,HD}$$

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{m}_R \cdot (h_a - h_b) \cong \dot{m}_{ZK,W} \cdot c_{ZK,W} \cdot (t_{ZK,W_A} - t_{ZK,W_E})$$

- **2-stufiger KKKP mit innerer direkter Zwischenkühlung und zweifacher Drosselung**

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,ND} + P_{i\,HD}$$

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{m}_{R_{ND}} \cdot (h_a - h_d) \cong \dot{m}_{R_{HD}} \cdot (h_b - h_c)$$

- **2-stufiger Kaskaden-Kompressions-Kaltdampf-Kälteprozeß**

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{0g} + P_{i\,NT} + P_{i\,HT}$$

$$\dot{Q}_{0_{HT}} = \dot{Q}_{NT} = \dot{m}_{R_{NT}} \cdot (h_2 - h_3) = \dot{m}_{R_{HT}} \cdot (h_5 - h_8)$$

Kreis-Prozeß

$$P = \dot{m} \cdot |w_K|$$

$$w_K = \sum w_e = \sum w_t$$

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{|w_K|}{q_{zu}}$$

Otto, **Diesel**, **Seiliger**, **Joule** und **Stirling** sind Kraftmaschinen-Kreisprozesse

Anhang

Tabelle 1 Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten

Bezeichnung des Vorsatzes	an der Einheit anzubringendes Kurzzeichen	Bedeutung des Vorsatzes
Tera	T	das 10^{12} fache der Einheit
Giga	G	das 10^{9} fache der Einheit
Mega	M	das 10^{6} fache der Einheit
Kilo	k	das 10^{3} fache der Einheit
Hekto	h	das 10^{2} fache der Einheit
Deka	da	das 10^{1} fache der Einheit
Dezi	d	das 10^{-1} fache der Einheit
Zenti	c	das 10^{-2} fache der Einheit
Milli	m	das 10^{-3} fache der Einheit
Mikro	µ	das 10^{-6} fache der Einheit
Nano	n	das 10^{-9} fache der Einheit
Pico	p	das 10^{-12}fache der Einheit

Tabelle 2 Umrechnung von Druckeinheiten

	Pa = N/m²	bar	at	atm	kp/m²	Torr
1 Pa = 1 N/m²	1	10^{-5}	$0{,}102 \cdot 10^{-4}$	$0{,}987 \cdot 10^{-5}$	0,102	0,0075
1 bar = 0,1 MPa	100000 = 10^5	1 = 1000 mbar	1,02	0,987	10200	750
1 at = 1 kp/cm²	98100	0,981	1	0,968	10000	736
1 kp/m²	9,81	$9{,}81 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$0{,}968 \cdot 10^{-4}$	1	0,0736
1 atm = 760 Torr	101325	1,013 = 1013 mbar	1,033	1	10330	760
1 Torr = $\frac{1}{760}$ atm	133	0,00133 = 1,33 mbar	0,00136	0,00132	13,6	1

Tabelle 3 Umrechnung von Druckhöhen (Flüssigkeitssäulen) und Druck (teilweise nur angenähert)

	µbar	mbar	bar	Pa = N/m²
1 mm WS = 1 kp/m² ≈ 1 daN/m²	100	1,1	0,0001	10
1 m WS = 0,1 at = 0,1 kp/cm² ≈ 0,1 daN/cm²	100000	100	0,1	10000
10 m WS = 1 at = 1 kp/cm² ≈ 1 daN/cm²	1000000	1000	1	100000
1 mm Hg (mm QS) = 1 Torr	1330	1,33	0,00133	133

Tabelle 4 Umrechnung von Energie- und Arbeitseinheiten sowie Wärmemengen

	J	kJ	kWh	kcal	PSh	kp m	Wh
1 J = 1 N m = = Ws	1	0,001	$2{,}78 \cdot 10^{-7}$	$2{,}39 \cdot 10^{-4}$	$3{,}77 \cdot 10^{-7}$	0,102	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$
1 kJ =	1000	1	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$	0,239	$3{,}77 \cdot 10^{-4}$	102	$2{,}78 \cdot 10^{-1}$
1 kWh =	3600000	3600	1	860	1,36	367000	1000
1 kcal =	4200	4,2	0,00116	1	0.00158	427	1,163
1 PSh =	2650000	2650	0,736	632	1	270000	736
1 kp m =	9,81	0,00981	$2.72 \cdot 10^{-6}$	0.00234	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$	1	$2{,}72 \cdot 10^{-3}$
1 Wh	3600	3.6	0.001	0,86	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	367	1

Tafel 7 Einige Stoffwerte von Gasen

Gas	Chemisches Symbol	Molare Masse M kg/kmol	Molares Volumen V_{Mn} bei 0 °C, 760 Torr = 1,01132 bar m^3/kmol	Spez. Gaskonst. R_i Nm/kg K J/kg K	Dichte ϱ kg/m³ 0 °C 760 Torr = 1,0132 bar	Spezifische Wärmekapazität 0 °C c_p kJ/kg K	c_v kJ/kg K	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ –
Helium	He	4,003	22,42	2078	0,1785	5,236	3,160	1,66
Wasserstoff	H_2	2,016	22,43	4124,0	0,08987	14,38	10,26	1,402
Stickstoff	N_2	28,016	22,40	296,8	1,2505	1,039	0,743	1,400
Sauerstoff	O_2	32,000	22,39	259,8	1,42895	0,908	0,649	1,399
Luft	–	28,964	22,40	287,0	1,2928	1,006	0,719	1,402
Kohlenoxid	CO	28,01	22,40	296,8	1,2500	1,039	0,743	1,400
Kohlendioxid	CO_2	44,01	22,26	188,9	1,9768	0,821	0,632	1,299
Schwefeldioxid	SO_2	64,06	21,89	129,8	2,9265	0,607	0,477	1,272
Ammoniak	NH_3	17,032	22,08	488,3	0,7713	2,055	1,565	1,313
Methan	CH_4	16,042	22,36	518,8	0,7168	2,156	1,632	1,319

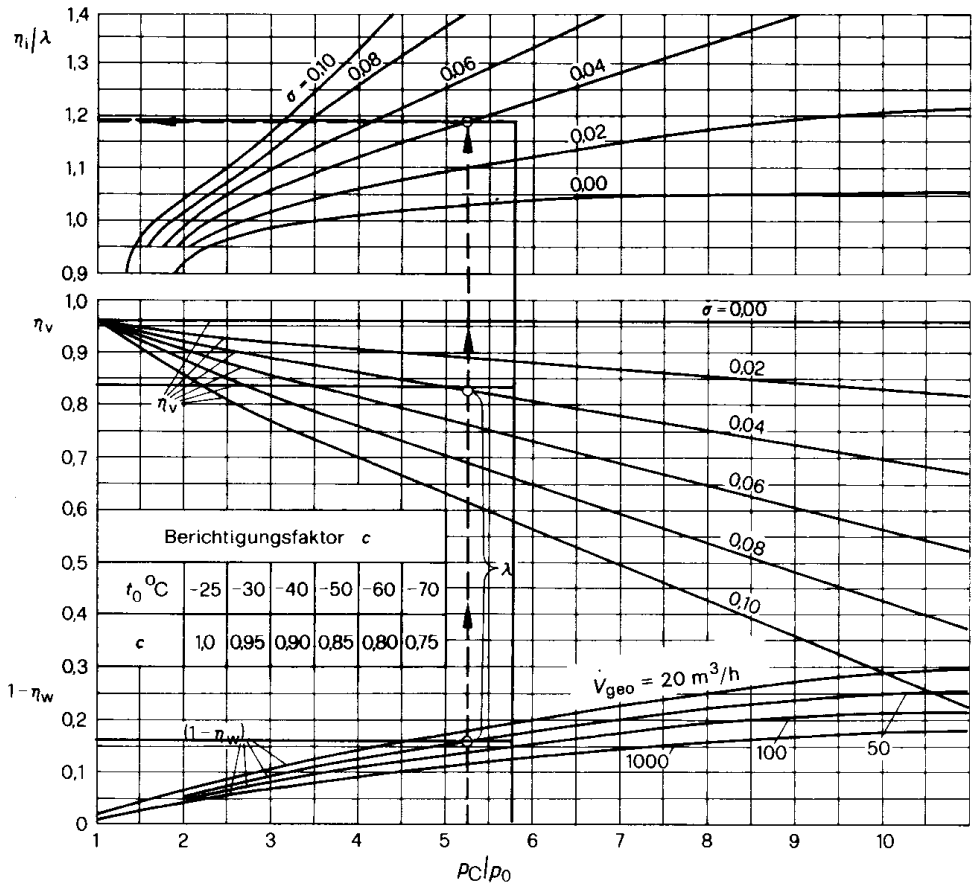
Tafel 10 c_{pm}-Werte für Gase in kJ/kg K = $c_{pm} \mid_0^t$ °C

Temp. in °C	Luft	H_2	N_2	O_2	CO	CO_2	SO_2
0	1,004	14,38	1,039	0,9084	1.039	0,8205	0,607
100	1,007	14,40	1,041	0,9218	1.041	0,8689	0,637
200	1,013	14,42	1,044	0,9355	1.046	0,9122	0,663
300	1,020	14,45	1,049	0,9500	1.054	0,9510	0,687
400	1,029	14,48	1,057	0,9646	1.064	0,9852	0,707
600	1,050	14,55	1,076	0,9926	1.087	1,043	0,740
800	1,072	14,64	1,098	1.016	1.110	1,089	0,765
1000	1,092	14,78	1,118	1.035	1.131	1,126	0,784
1200	1,109	14,94	1,137	1.051	1.150	1,157	0,798
1400	1,124	15,12	1,153	1.065	1.166	1,183	0,810
1600	1,138	15,30	1,168	1.077	1.180	1,206	0,820
1800	1,151	15,48	1,181	1.089	1.193	1,225	0,829
2000	1,162	15,65	1,192	1.099	1.204	1,241	0,837
2200	1,172	15,82	1,202	1.109	1.214	1,256	0,896
2500	1,185	16,07	1,215	1.123	1.226	1,275	0,899

Tafel 11 Polytrope ZÄ von Gasen

$\frac{p_1}{p_2}$	Für n = 1,4	1,3	1,2	1,1	Für n = 1,4	1,3	1,2	1,1
	ist v_2/v_1				ist T_1/T_2			
1,1	1,070	1,076	1,083	1,090	1,028	1,022	1,016	1,009
1,2	1,139	1,151	1,164	1,180	1,053	1,043	1,031	1,017
1,3	1,206	1,224	1,244	1,269	1,078	1,062	1,045	1,024
1,4	1,271	1,295	1,323	1,358	1,101	1,081	1,058	1,031
1,5	1,336	1,366	1,401	1,445	1,123	1,098	1,070	1,038
1,6	1,399	1,436	1,479	1,533	1,144	1,115	1,081	1,044
1,7	1,461	1,504	1,557	1,620	1,164	1,130	1,092	1,050
1,8	1,522	1,571	1,633	1,706	1,183	1,145	1,103	1,055
1,9	1,581	1,638	1,706	1,791	1,201	1,160	1,113	1,060
2,0	1,641	1,705	1,782	1,879	1,219	1,174	1,123	1,065
2,5	1,924	2,023	2,145	2,300	1,299	1,235	1,165	1,087
3,0	2,193	2,330	2,498	2,715	1,369	1,289	1,201	1,105
3,5	2,449	2,624	2,842	3,126	1,431	1,336	1,232	1,121
4,0	2,692	2,907	3,177	3,505	1,487	1,378	1,260	1,134
4,5	2,926	3,178	3,500	3,925	1,537	1,415	1,285	1,147
5,0	3,156	3,449	3,824	4,320	1,583	1,449	1,307	1,157
5,5	3,378	3,712	4,142	4,710	1,627	1,482	1,328	1,167
6,0	3,598	3,970	4,447	5,100	1,668	1,512	1,348	1,177
6,5	3,809	4,218	4,760	5,483	1,707	1,540	1,366	1,186
7,0	4,012	4,467	5,058	5,861	1,742	1,566	1,383	1,194
7,5	4,217	4,710	5,360	6,250	1,778	1,591	1,399	1,201
8,0	4,415	4,950	5,650	6,620	1,811	1,616	1,414	1,208
8,5	4,612	5,187	5,950	6,997	1,843	1,639	1,429	1,215
9,0	4,800	5,420	6,240	7,370	1,873	1,660	1,442	1,221
9,5	4,993	5,651	6,528	7,742	1,903	1,681	1,455	1,227
10,0	5,188	5,885	6,820	8,120	1,931	1,701	1,468	1,233
11	5,544	6,325	7,376	8,845	1,984	1,739	1,491	1,244
12	5,900	6,763	7,931	9,574	2,034	1,774	1,513	1,253
13	6,247	7,193	8,478	10,30	2,081	1,807	1,533	1,263
14	6,587	7,614	9,018	11,01	2,126	1,839	1,549	1,271
15	6,919	8,030	9,551	11,73	2,168	1,868	1,570	1,279
16	7,246	8,438	10,08	12,44	2,208	1,896	1,587	1,287
17	7,566	8,841	10,60	13,14	2,247	1,923	1,604	1,294
18	7,882	9,238	11,12	13,84	2,284	1,948	1,619	1,301
19	8,192	9,631	11,63	14,54	2,319	1,973	1,633	1,307
20	8,498	10,02	12,14	15,23	2,354	1,996	1,648	1,313
21	8,803	10,40	12,64	15,93	2,387	2,019	1,661	1,319
22	9,097	10,78	13,14	16,61	2,418	2,041	1,674	1,324
23	9,390	11,15	13,64	17,30	2,449	2,062	1,688	1,330
24	9,680	11,53	14,13	17,97	2,479	2,082	1,698	1,335
25	9,967	11,89	14,62	18,65	2,508	2,102	1,710	1,340
26	10,25	12,26	15,10	19,34	2,537	2,121	1,721	1,345
27	10,53	12,62	15,58	20,01	2,564	2,140	1,732	1,349
28	10,81	12,98	16,07	20,68	2,591	2,158	1,743	1,354
29	11,08	13,33	16,54	21,36	2,617	2,175	1,753	1,358
30	11,35	13,68	17,02	22,02	2,643	2,192	1,763	1,362

DKV 3-01-Arbeitsblatt



T 5.4 Wasserdampftafel, Sättigungszustand (Drucktafel)[1]

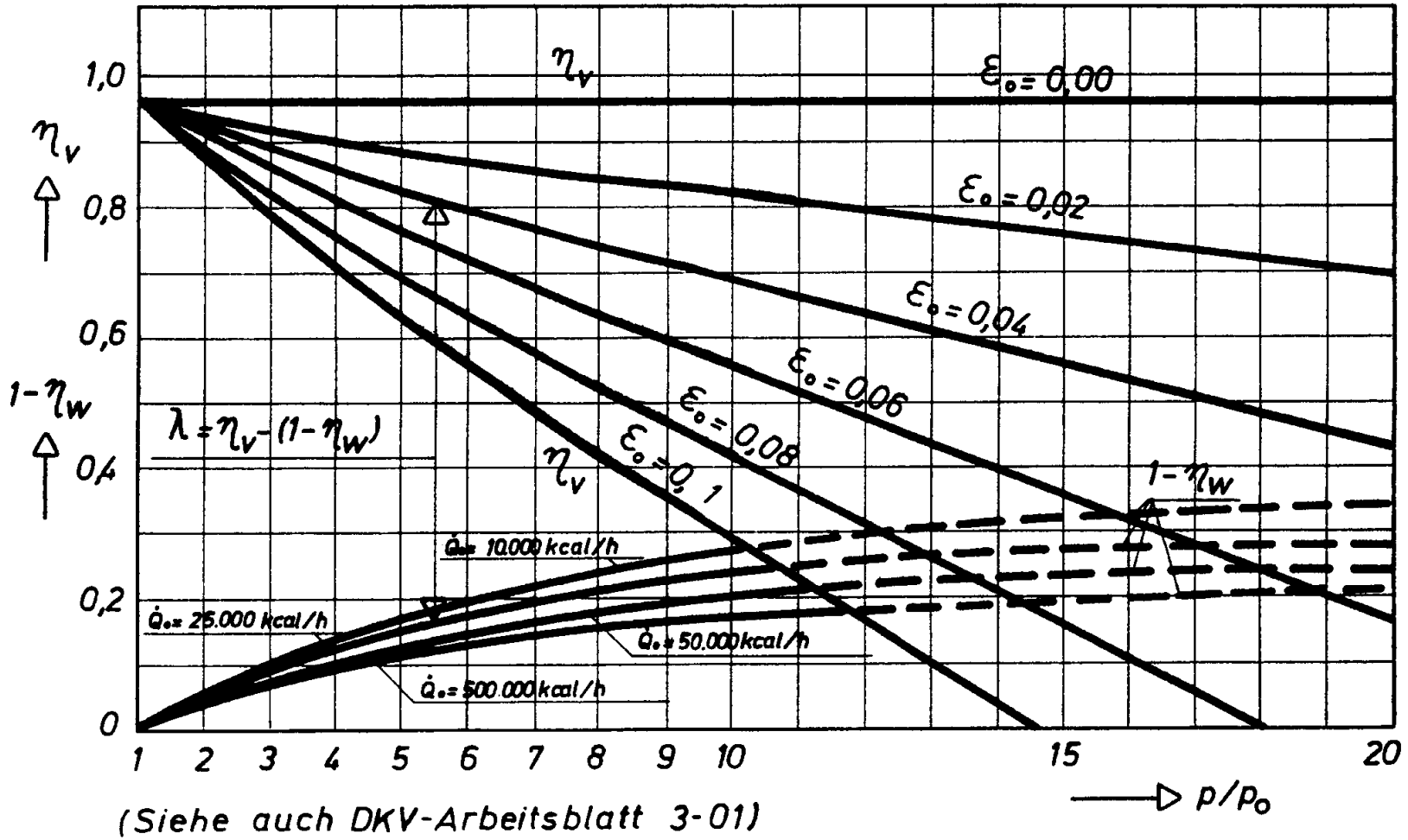
p bar	t °C	v' m³/kg	v'' m³/kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,0061	0	0,0010002	206,3	−0,04	2501,6	2501,6	−0,0002	9,1577
0,01	6,98	0,0010001	129,20	29,34	2514,4	2485,0	0,1060	8,9767
0,02	17,51	0,0010012	67,01	73,46	2533,6	2460,3	0,2607	8,7246
0,03	24,10	0,0010027	45,67	101,00	2545,6	2444,6	0,3544	8,5785
0,04	28,98	0,0010040	34,80	121,41	2554,5	2433,1	0,4225	8,4755
0,05	32,90	0,0010052	28,19	137,77	2561,6	2423,8	0,4763	8,3960
0,06	36,18	0,0010064	23,74	151,50	2567,5	2416,0	0,5209	8,3312
0,07	39,03	0,0010074	20,53	163,38	2572,6	2409,2	0,5591	8,2767
0,08	41,53	0,0010084	18,10	173,86	2577,1	2403,2	0,5925	8,2296
0,09	43,79	0,0010094	16,20	183,28	2581,1	2397,9	0,6224	8,1881
0,1	45,83	0,0010101	14,67	191,83	2584,8	2392,9	0,6493	8,1511
0,2	60,09	0,0010172	7,650	251,45	2609,9	2358,4	0,8321	7,9094
0,3	69,12	0,0010223	5,229	289,30	2625,4	2336,1	0,9441	7,7695
0,4	75,89	0,0010265	3,993	317,65	2636,9	2319,2	1,0261	7,6709
0,5	81,35	0,0010301	3,240	340,56	2646,0	2305,4	1,0912	7,5947
0,6	85,95	0,0010333	2,732	359,93	2653,6	2293,6	1,1454	7,5327
0,7	89,96	0,0010361	2,365	376,77	2660,1	2283,3	1,1921	7,4804
0,8	93,51	0,0010387	2,087	391,72	2665,8	2274,0	1,2330	7,4352
0,9	96,71	0,0010412	1,869	405,21	2670,9	2265,6	1,2696	7,3954
1,0	99,63	0,0010434	1,694	417,51	2675,4	2257,9	1,3027	7,3598
1,1	102,32	0,0010455	1,549	428,84	2679,6	2250,8	1,3330	7,3277
1,2	104,81	0,0010476	1,428	439,36	2683,4	2244,1	1,3609	7,2984
1,3	107,13	0,0010495	1,325	449,19	2687,0	2237,8	1,3868	7,2715
1,4	109,32	0,0010513	1,236	458,42	2690,3	2231,9	1,4109	7,2465
1,5	111,37	0,0010530	1,159	467,13	2693,4	2226,2	1,4336	7,2234
2,0	120,23	0,0010608	0,8854	504,70	2706,3	2201,6	1,5301	7,1268
3,0	133,54	0,0010735	0,6056	561,43	2724,7	2163,2	1,6716	6,9909
4,0	143,62	0,0010839	0,4622	604,67	2737,6	2133,0	1,7764	6,8943
6,0	158,84	0,0011009	0,3155	670,42	2755,5	2085,0	1,9308	6,7575
8,0	170,41	0,0011150	0,2403	720,94	2767,5	2046,5	2,0457	6,6594
10	179,88	0,0011274	0,1943	762,6	2776,2	2013,6	2,1382	6,5828
15	198,29	0,0011539	0,1317	844,7	2789,9	1945,2	2,3145	6,4406
20	212,37	0,0011766	0,0995	908,6	2797,2	1888,6	2,4469	6,3367
30	233,84	0,0012163	0,0666	1007,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
40	250,33	0,0012521	0,0498	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
50	263,91	0,0012858	0,0394	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
60	275,55	0,0013187	0,0324	1213,7	2785,0	1517,3	3,0273	5,8908
70	285,79	0,0013513	0,0274	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
80	294,97	0,0013842	0,0235	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
90	303,31	0,001418	0,0205	1363,7	2744,6	1380,9	3,2867	5,6820
100	310,96	0,001453	0,0180	1408,0	2727,7	1319,7	3,3605	5,6198
110	318,05	0,001489	0,0160	1450,6	2709,3	1258,7	3,4304	5,5595
120	324,65	0,001527	0,0143	1491,8	2689,2	1197,4	3,4972	5,5002
130	330,83	0,001567	0,0128	1532,0	2667,0	1135,0	3,5616	5,4408
140	336,64	0,001611	0,0115	1571,6	2642,4	1070,7	3,6242	5,3803
150	342,13	0,001658	0,0103	1611,0	2615,0	1004,0	3,6859	5,3178
160	347,34	0,001710	0,0093	1650,5	2584,9	934,3	3,7471	5,2531
180	356,96	0,001840	0,0075	1734,8	2513,9	779,1	3,8765	5,1128
200	365,70	0,002037	0,0059	1826,5	2418,4	591,9	4,0149	4,9412
210	369,78	0,002202	0,0050	1886,3	2347,6	461,3	4,1048	4,8223
220	373,69	0,002671	0,0037	2011,1	2195,6	184,5	4,2947	4,5799
221,2	374,15	0,00317		2107,4		0	4,429	

T 5.5 Wasserdampftafel, überhitzter Dampf [1]

p bar	t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
0,2	100	8,585	2686,3	8,1261	350	14,374	3177,1	9,1303
	150	9,748	2782,3	8,3676	400	15,529	3279,4	9,2882
	200	10,907	2879,2	8,5839	450	16,684	3383,4	9,4372
	250	12,064	2977,1	8,7806	500	17,838	3489,0	9,5784
	300	13,219	3076,4	8,9618	600	20,146	3705,4	9,8416
0,4	100	4,279	2683,8	7,8009	350	7,185	3176,8	8,8100
	150	4,866	2780,9	8,0450	400	7,763	3279,1	8,9680
	200	5,448	2878,2	8,2625	450	8,340	3383,1	9,1170
	250	6,028	2976,5	8,4598	500	8,918	3488,8	9,2583
	300	6,607	3075,9	8,6413	600	10,07	3705,3	9,5216
0,6	100	2,844	2681,3	7,6085	350	4,788	3176,4	8,6224
	150	3,238	2779,4	7,8551	400	5,174	3278,8	8,7806
	200	3,628	2877,3	8,0738	450	5,559	3382,9	8,9296
	250	4,016	2975,8	8,2718	500	5,944	3488,6	9,0701
	300	4,402	3075,4	8,4536	600	6,714	3705,1	9,3343
1,0	100	1,696	2676,2	7,3618	350	2,871	3175,6	8,3858
	150	1,936	2776,3	7,6137	400	3,102	3278,2	8,5442
	200	2,172	2875,4	7,8349	450	3,334	3382,4	8,6939
	250	2,406	2974,5	8,0342	500	3,565	3488,1	8,8348
	300	2,639	3074,5	8,2166	600	4,028	3704,8	9,0982
1,2	150	1,611	2774,8	7,5267	400	2,585	3277,9	8,4597
	200	1,808	2874,4	7,7492	450	2,778	3382,1	8,6090
	250	2,004	2973,9	7,9491	500	2,971	3487,9	8,7505
	300	2,198	3074,0	8,1319	550	3,163	3595,4	8,8852
	350	2,391	3175,3	8,3012	600	3,356	3704,6	9,0140
1,5	150	1,285	2772,5	7,4194	400	2,067	3277,5	8,3562
	200	1,444	2872,9	7,6439	450	2,222	3381,7	8,5056
	250	1,601	2972,9	7,8447	500	2,376	3487,6	8,6472
	300	1,757	3073,3	8,0280	550	2,530	3595,1	8,7819
	350	1,912	3174,7	8,1976	600	2,684	3704,4	8,9108
2,0	150	0,9595	2768,5	7,2794	400	1,549	3276,7	8,2226
	200	1,080	2870,5	7,5072	450	1,665	3381,1	8,3722
	250	1,199	2971,2	7,7096	500	1,781	3487,0	8,5139
	300	1,316	3072,1	7,8937	550	1,897	3594,7	8,6487
	350	1,433	3173,8	8,0638	600	2,013	3704,0	8,7776
4,0	150	0,4707	2752,0	6,9285	400	0,7725	3273,6	7,8994
	200	0,5343	2860,4	7,1708	450	0,8309	3378,5	8,0497
	250	0,5952	2964,5	7,3800	500	0,8892	3484,9	8,1919
	300	0,6549	3067,2	7,5675	550	0,9474	3592,8	8,3271
	350	0,7139	3170,0	7,7395	600	1,0054	3702,3	8,4563
6,0	200	0,3520	2849,7	6,9662	450	0,5528	3376,0	7,8600
	250	0,3939	2957,6	7,1829	500	0,5918	3482,7	8,0027
	300	0,4344	3062,3	7,3740	550	0,6308	3590,9	8,1383
	350	0,4742	3166,2	7,5479	600	0,6696	3700,7	8,2678
	400	0,5136	3270,6	7,7090	650	0,7084	3812,1	8,3919
8,0	200	0,2608	2838,6	6,8148	450	0,4137	3373,4	7,7246
	250	0,2932	2950,4	7,0397	500	0,4432	3480,5	7,8678
	300	0,3241	3057,3	7,2348	550	0,4725	3589,0	8,0038
	350	0,3543	3162,4	7,4107	600	0,5017	3699,1	8,1336
	400	0,3842	3267,5	7,5729	650	0,5309	3810,7	8,2579

T 5.5 Wasserdampftabelle, überhitzter Dampf (Fortsetzung) [1]

p bar	t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
10	200	0,2059	2826,8	6,6922	450	0,3303	3370,8	7,6190
	250	0,2327	2943,0	6,9259	500	0,3540	3478,3	7,7627
	300	0,2580	3052,1	7,1251	550	0,3775	3587,1	7,8991
	350	0,2824	3158,5	7,3031	600	0,4010	3697,4	8,0292
	400	0,3065	3264,4	7,4665	650	0,4244	3809,3	8,1537
15	200	0,1324	2794,7	6,4508	450	0,2191	3364,3	7,4253
	250	0,1520	2923,5	6,7099	500	0,2350	3472,8	7,5703
	300	0,1697	3038,9	6,9207	550	0,2509	3582,4	7,7077
	350	0,1865	3148,7	7,1044	600	0,2667	3693,3	7,8385
	400	0,2029	3256,6	7,2709	650	0,2824	3805,7	7,9636
20	250	0,1114	2902,4	6,5454	500	0,1756	3467,1	7,4323
	300	0,1255	3025,0	6,7696	550	0,1876	3577,6	7,5706
	350	0,1386	3138,6	6,9596	600	0,1995	3689,2	7,7022
	400	0,1511	3248,7	7,1296	650	0,2114	3802,1	7,8279
	450	0,1634	3357,8	7,2859	700	0,2232	3916,5	7,9485
30	250	0,07055	2854,8	6,2857	500	0,11608	3456,2	7,2345
	300	0,08116	2995,1	6,5422	550	0,12426	3567,2	7,3748
	350	0,09053	3117,5	6,7471	600	0,13234	3681,0	7,5079
	400	0,09931	3232,5	6,9246	650	0,14036	3795,0	7,6349
	450	0,10779	3344,6	7,0854	700	0,14832	3910,3	7,7564
40	300	0,05883	2962,0	6,3642	550	0,09260	3558,6	7,2333
	350	0,06645	3095,1	6,5870	600	0,09876	3672,8	7,3680
	400	0,07338	3215,7	6,7733	650	0,10486	3787,9	7,4961
	450	0,07996	3331,2	6,9388	700	0,11090	3904,1	7,6187
	500	0,08634	3445,0	7,0909	750	0,11689	4021,4	7,7363
60	300	0,03614	2885,0	6,0692	550	0,06094	3539,3	7,0285
	350	0,04222	3045,8	6,3386	600	0,06518	3656,2	7,1664
	400	0,04738	3180,1	6,5462	650	0,06936	3773,5	7,2971
	450	0,05210	3303,5	6,7230	700	0,07348	3891,7	7,4217
	500	0,05659	3422,2	6,8818	750	0,07755	4010,7	7,5409
80	300	0,02426	2786,8	5,7942	550	0,04510	3519,7	6,8778
	350	0,02995	2989,9	6,1349	600	0,04839	3639,5	7,0191
	400	0,03431	3141,6	6,3694	650	0,05161	3759,2	7,1523
	450	0,03814	3274,3	6,5597	700	0,05477	3879,2	7,2790
	500	0,04170	3398,8	6,7262	750	0,05788	3999,9	7,3999
100	350	0,02242	2925,8	5,9489	600	0,03832	3622,7	6,9013
	400	0,02641	3099,9	6,2182	650	0,04096	3744,7	7,0373
	450	0,02974	3243,6	6,4243	700	0,04355	3866,8	7,1660
	500	0,03276	3374,6	6,5994	750	0,04608	3989,1	7,2886
	550	0,03560	3499,8	6,7564	800	0,04858	4112,0	7,4058
150	350	0,01146	2694,8	5,4467	600	0,02488	3579,8	6,6764
	400	0,01566	2979,1	5,8876	650	0,02677	3708,3	6,8195
	450	0,01845	3159,7	6,1468	700	0,02859	3835,4	6,9536
	500	0,02080	3310,4	6,3487	750	0,03036	3962,1	7,0806
	550	0,02291	3448,3	6,5213	800	0,03209	4088,6	7,2013
200	400	0,00995	2820,5	5,5485	650	0,01967	3671,1	6,6554
	450	0,01271	3064,3	5,9089	700	0,02111	3803,8	6,7953
	500	0,01477	3241,1	6,1456	750	0,02250	3935,0	6,9267
	550	0,01655	3394,1	6,3374	800	0,02385	4065,3	7,0511
	600	0,01816	3535,5	6,5043				



(Siehe auch DKV-Arbeitsblatt 3-01)

Abb. 19: Wandungsverlust $1-\eta_w$ und volumetrischer Wirkungsgrad η_v bei unterschiedlichen Druckverhältnissen p/p_o, unterschiedlichem schädlichen Raum ε_o und verschiedener Maschinengröße $\dot{Q}_o$ = Kälteleistung je Zylinder, berechnet für NH_3-Verdichter