

RFH-Köln

# Thermodynamik

# Formelsammlung

© 2006 SAIYA.DE

# 1 Grundlagen

Boltzmannkonstante:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

## 1.3 Größen und Einheitensysteme

Umrechnung Fahrenheit nach Celsius:  $\{t_c\} = \frac{5}{9}(\{t_F\} - 32)$

Umrechnung Celsius nach Kelvin:  $\{T\} = 273,15 + \{t_c\}$

**abgeschlossenes System:** kein Wärme-, Arbeit-, Masseaustausch

**adiabates System:** kein Wärmeaustausch

**arbeitsisoliertes System:** kein Arbeitsaustausch

**geschlossenes System:** kein Masseaustausch

**offenes System:** Wärme-, Arbeit-, Masseaustausch

## 1.5 Die Inneren Zustandsgrößen

Spezifisches Volumen:  $\rho = \frac{1}{v}$

Druck:  $p = \frac{F}{A}$

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

Vakuum:  $V_a = \frac{\Delta p_u}{p_B}$

## 1.6 Prozessgrößen und Prozesse

Volumenänderungsarbeit (geschl. System):  $W_{V,12} = - \int_1^2 p \cdot dW$

Zugeführte Arbeit ist positiv, abgegebene Arbeit negativ.

Technische Arbeit (offenes System):  $W_{t,12} = \int_1^2 V \cdot dp$

Dissipationsenergie (geschlossene Systeme):

$$W_{12} = W_{V,12} + W_{diss}$$

Dissipationsenergie (offene Systeme):  $W_{i,12} = W_{t,12} + W_{diss}$

# 2 Gasgesetze

## 2.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$p \cdot v = R_i \cdot T \quad \text{oder} \quad p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \quad \text{oder} \quad p \cdot V_m = M \cdot R_i \cdot T$$

$$T \quad \text{oder} \quad p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T$$

Avogadro, Anz. Moleküle bei gleich V, T, p:

$$N_A = (6,0221376 \pm 0,0000036) \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$$

Stoffmenge:  $n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$

Masse eines Teilchens:  $m_T = \frac{m}{N}$

Molares Vol. ideales Gas bei Normzustand:

$$V_{m,n} = (22,4141 \pm 0,00019) \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Normvolumen:  $V_n = n \cdot V_{m,n}$

Dichte eines Gases:  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{M}{V_m}$  im Normzustand:  $\rho_n = \frac{M}{V_{m,n}}$

Molares Volumen:  $V_m = M \cdot v$

Universelle molare Gaskonstante:

$$R_m = 8,31451 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} \quad R_m = R_i \cdot M = p \cdot \frac{V_m}{T}$$

## 1.7 Kontinuitätsgleichung für Rohrströmungen

Massenstrom:  $\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A = \text{konst.}$

Volumenstrom:  $\dot{V} = c \cdot A = \text{konst.}$

### 1.8.1 Thermische Dehnung bei Festkörpern

Mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient:

$$\bar{\alpha}_l(t_0; t) = \frac{l(t) - l(t_0)}{l(t_0) \cdot (t - t_0)}$$

Länge des Stabes:  $l(t) = l(t_0) \cdot (1 + \bar{\alpha}_l \cdot (t - t_0))$

Volumen eines Quaders:  $V(t) = V(t_0) \cdot (1 + \bar{\alpha}_V \cdot (t - t_0))$

Stoff	$\alpha$ in 1/K	Stoff	$\alpha$ in 1/K
Aluminium	$23,7 \cdot 10^{-6}$	Kupfer	$17,0 \cdot 10^{-6}$
Blei	$29,3 \cdot 10^{-6}$	Magnesium	$26,0 \cdot 10^{-6}$
Chrom	$8,3 \cdot 10^{-6}$	Platin	$9,0 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$12,3 \cdot 10^{-6}$	Silber	$19,7 \cdot 10^{-6}$
Gold	$14,3 \cdot 10^{-6}$	Zink	$29,0 \cdot 10^{-6}$
Stahl	$11,0 \cdot 10^{-6}$		
Messing	$19,0 \cdot 10^{-6}$		
Eis	$51,0 \cdot 10^{-6}$		

### 1.8.2 Flüssigkeiten

Volumen Flüssigkeit bei 20°C:  $V(t) = V(20^\circ\text{C}) \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta t)$

Stoff	$\gamma$ in 1/K	Stoff	$\gamma$ in 1/K
Benzin	$106 \cdot 10^{-5}$	Glycerin	$50 \cdot 10^{-5}$
Benzol	$124 \cdot 10^{-5}$	Methanol	$120 \cdot 10^{-5}$
Ethanol	$110 \cdot 10^{-5}$	Quecksilber	$18 \cdot 10^{-5}$
Wasser	$20,7 \cdot 10^{-5}$		

### 1.8.3 Ideale Gase

Volumenausdehnungskoeffizient bei konst. Druck:

$$\gamma = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1} \quad \text{Gleiches Gas, isobar: } \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Spezielle Gaskonstante:  $R_i = \frac{R_m}{M}$

Boyle-Mariott, isotherm:  $p \cdot V = \text{konst}$

Gay-Lussac, isobar bzw. isochor:

$$\frac{V}{T} = \text{konst.} \quad \text{und} \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{p}{T} = \text{konst.}$$

## 2.4 Realgas effekte bei hohen Temperaturen und Drücken

Realgasfaktor:  $Z = \frac{p \cdot v}{R_i \cdot T}$  im Normzustand:  $Z_n = \frac{p_n \cdot v_n}{R_i \cdot T_n}$

Gas	Realgasfaktor $Z_n$	Mol. Normvol. $V_{m,n,i}$ m <sup>3</sup> /kmol	Mol. Masse M kg/kmol
Ar	0,9990	22,392	39,948
H <sub>2</sub>	1,0006	22,428	2,0159
CO	0,9993	22,398	28,010
CH <sub>4</sub>	0,9976	22,360	16,043
N <sub>2</sub>	0,9995	22,403	28,0135
O <sub>2</sub>	0,9990	22,392	31,9988
CO <sub>2</sub>	0,9933	22,264	44,0100
SO <sub>2</sub>	0,9760	21,876	64,0650
NH <sub>3</sub>	0,9850	22,078	17,0306

Kompressibilitätszahl:  $K = \frac{Z}{Z_n} = \frac{p \cdot v \cdot T_n}{p_n \cdot v_n \cdot T}$

Reale Dichte eines Gases:  $\rho = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{p_n \cdot T} \cdot \frac{1}{K}$

## 2.5 Gemische idealer Gase

Raumanteile, Volumenanteile:  $r_i = \frac{V_i}{V_M}$

Stoffmengenanteil:  $x_i = \frac{r_i \cdot \rho_{n,i}}{M_i \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{\rho_{n,i}}{M_i} \cdot r_i\right)}$

Massenanteil:  $\mu_i = \frac{m_i}{m_M} = r_i \cdot \frac{M_i}{M_M} = r_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho_M}$

Scheinbare molare Masse des Gasgemisches:  $M_M = \sum_{i=1}^k r_i \cdot M_i$

### 2.5.2 Zustandsgrößen von Gasgemischen

Spezifische Wärmekapazität:  $c_{p,M} = \sum_{i=1}^k \mu_i \cdot c_{p,i}$

Gaskonstante:  $R_M = \sum_{i=1}^k \mu_i \cdot R_i$

Partialdruck:  $p_i = r_i \cdot p$  Partialvolumen:  $V_i = r_i \cdot V_M$

Dichte:  $\rho_M = \sum_{i=1}^k r_i \cdot \rho_i$

## 3 Grundgleichung der Kalorik und Wärmekapazitäten

Wärmemenge:  $Q = n \cdot c_m \cdot \Delta T$

### 3.2 Spezifische Wärmekapazität

Wärmemenge in einem Temperaturbereich:

$$Q_{12} = m \cdot \int_{t_1}^{t_2} c(t) \cdot dt = m \cdot |\bar{c}|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

Mittelwert spez. Wärmekapazität:  $|\bar{c}|_{t_1}^{t_2} = \frac{|\bar{c}|_{0^\circ C}^{t_2} \cdot t_2 - |\bar{c}|_{0^\circ C}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$

#### 3.2.3 Gase

Spezielle Gaskonstante R:  $c_p = c_v + R$

Isotropenexponent:  $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$  bei f Freiheitsgrade:  $\kappa = 1 + \frac{2}{f}$

1-Atomig (Edelgase):  $\kappa = 1,67$

2-Atomig (Luft, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>):  $\kappa = 1,4$

3-Atomig (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>):  $\kappa = 1,33$

Mehr-Atomig (NH<sub>3</sub>):  $\kappa < 1,33$

Mayerschen Gleichungen:  $c_v = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot R$   $c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R$

Bezug auf die Stoffmenge:  $c_{p,m} = c_p \cdot M$  und  $c_{v,m} = c_v \cdot M$

1-Atomig:  $c_{p,m} \approx 20,768 \text{ kJ/kmolK}$

$c_{v,m} \approx 12,472 \text{ kJ/kmolK}$

2-Atomig:  $c_{p,m} \approx 29,101 \text{ kJ/kmolK}$

$c_{v,m} \approx 20,768 \text{ kJ/kmolK}$

3-Atomig:  $c_{p,m} \approx 33,258 \text{ kJ/kmolK}$

$c_{v,m} \approx 24,944 \text{ kJ/kmolK}$

### 3.3 Mischungstemperaturen

Energiebilanz:  $|Q_{ab}| = |Q_{zu}|$  bzw.  $\sum Q_i = 0$

Mischungstemperatur:  $t_m = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$

mehrere Körper:  $t_m = \sum_{i=1}^k \frac{(m \cdot c)_i}{(m \cdot c)_i}$

Vereinfachung für gleiche Stoffe:  $t_m = \sum_{i=1}^k \frac{(m \cdot t)_i}{m_i}$

Mischung von Gasen:  $m_1 c_{p1} (T_1 - T_m) = m_2 c_{p2} (T_m - T_2)$

Mischungstemperatur Kelvin:  $T_m = \frac{p_1 V_1 \frac{c_{p1}}{R_1} + p_2 V_2 \frac{c_{p2}}{R_2}}{\frac{p_1 V_1}{R_1} + \frac{p_2 V_2}{R_2}}$

## 4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

### 4.1 Anwendung auf geschlossene Systeme

Innere Energie U:

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 \quad \text{mit: } W_{12} = W_{v,12} + W_{diss}$$

1. Hauptsatz für geschlossene Systeme:  $dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv$

Arbeitsdicht & geschlossen:  $Q_{12} = U_2 - U_1$

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

### 4.2 Anwendung auf ruhende offene Systeme (+ Massenstrom)

Enthalpie:  $H = U + p \cdot V$  bzw.  $h = u + p \cdot v$

Innere Arbeit:  $W_{i,12} = W_{t,12} + W_{diss}$

$$Q_{12} + W_{i,12} = H_2 - H_1 + \frac{m}{2} (c_2^2 - c_1^2) + m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

Totalenthalpie:  $Q_{12} + W_{i,12} = H_2 - H_1$

1. Hauptsatz für offene Systeme:  $dq = c_p \cdot dT - v \cdot dt$

Stationär durchströmtes System:  $\dot{Q}_{12} + P = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$

Arbeitsdichtes System, Rohrströmung:  $h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$

### 4.3 Anwendung des ersten Hauptsatzes

#### 4.3.1 Einfache Zustandsänderungen bei idealem Gas

Isotherm, geschlossen:

$$dq = p \cdot dv \quad q_{12} = p \cdot (v_2 - v_1)$$

$$q_{12} = R_i T_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R_i T_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2}\right) = p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

Wegen  $w_{v,12} = -q_{12}$  folgt:

$$W_{v,12} = -m R_i T_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = m R_i T_1 \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}$$

Isotherm, offen:

$$dh = c_p \cdot dT \quad \text{also: } dq = -dw_t$$

Integration liefert:  $q_{12} = -w_{t,12}$  und  $w_{t,12} = w_{v,12}$

Isochor, geschlossen:

$$dq = c_v \cdot dT$$

nach Integration:  $q_{12} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$  mit:  $c_v = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot R$

bei Druckänderung:  $q_{12} = \frac{v}{\kappa - 1} \cdot (p_2 - p_1)$  ( $w_{v,12} = 0$ )

Isochor, offen:

$$w_{t,12} = v \cdot (p_2 - p_1) = R_i \cdot (T_2 - T_1)$$

Isobar, geschlossen:

$$dq = c_p \cdot dT \quad q_{12} = c_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_i \cdot (T_2 - T_1)$$

Vergleich isochor-isobar:  $q_{12(isobar)} = \kappa \cdot q_{12(isochor)}$

$$w_{v,12} = p \cdot (v_2 - v_1) = R_i \cdot (T_2 - T_1) \quad w_{t,12} = 0$$

Adiabat (isentrop), geschlossen:

$$dq = 0 \quad \text{folgt: } \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\kappa$$

bzw.  $p \cdot v^\kappa = konst$  (Poissonsche Gleichung)

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \quad \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$w_{V,12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa-1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \quad \text{oder: } w_{V,12} = \frac{R_i T_1}{\kappa-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]$$

Adiabat (isentrop), offen:

$$dq = 0 \quad w_{t,12} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_i \cdot (T_2 - T_1)$$

Vergleich:  $w_{t,12} = \kappa \cdot w_{V,12}$

Polytrop:

$$p \cdot v^n = konst \quad (n = \text{Polytropenexponent})$$

$n=0$ : isobar;  $n=1$ : isotherm;  $n=\kappa$ : isentrop;  $n=\pm\infty$ : isochor

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad \text{und} \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$$

Spezifische Wärmekapazität bei polytropen Vorgängen:

$$c_n = c_v \cdot \frac{n-\kappa}{n-1} \quad q_{12} = c_n (T_2 - T_1)$$

## 5 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

$$\text{Entropie: } ds = \frac{dq}{T} + \frac{dW_{diss}}{T}$$

Hauptgleichungen der Thermodynamik:

$$dU = T \cdot ds - p \cdot dv \quad \text{und} \quad dH = T \cdot ds + v \cdot dp$$

### 5.2 Entropie beim idealen Gas

$$\text{Geschlossene Systeme: } ds = \frac{dq}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{R_i T}{v \cdot T} dv$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\text{Offene Systeme: } ds = \frac{dq}{T} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

## 6 Stoffverhalten

### 6.2 Phasenänderungen

Stoff	Schmelztemperatur $t_{Sch}$ in °C	Schmelzenthalpie $\sigma$ in kJ/kg
Quecksilber (Hg)	-38,9	11,3
Kupfer (Cu)	1083,0	209,3
Wasser (H <sub>2</sub> O)	0,0	333,5
Äthylalkohol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	-114,2	108,0

Verdampfungsenthalpie:

$$r = \phi_v + \psi_v \quad r = h'' - h' \quad \phi_v = u'' - u'$$

$$\psi_v = p(v'' - v')$$

$$r = T_s \cdot (s'' - s')$$

### 4.3.2 Kompressoren

$$\text{Isotherm: } w_{t,12} = R_i T_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\text{Isentrop: } w_{t,12} = R_i T_1 \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]$$

$$\text{Polytrop: } w_{t,12} = R \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

Mehrstufig:  $w_{t,12} = w_{t11'} + w_{t1'2}$

$$w_{t,12} = \frac{n}{n-1} \cdot R_i \cdot T \cdot \left[\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 2\right]$$

( $p_x$  ist ein Druck auf der Zwischenstufe zwischen  $p_1$  und  $p_2$ )

Minimaler Arbeitsaufwand bei:  $\frac{p_x}{p_1} = \frac{p_2}{p_x}$

(gleiches Druckverhältnis in jeder Stufe)

$$\text{Bei m Stufen: } \sqrt[m]{\frac{p_e}{p_1}} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_3} = \dots = \frac{p_e}{p_m}$$

( $p_e$  = Enddruck)

$$\text{Antriebsleistung eines Verdichters: } P = \frac{\dot{m} \cdot w_{t,12}}{\eta_{eff}} = \frac{\dot{W}_{t,12}}{\eta_{eff}}$$

### 5.3 Drosselung als irreversibler Vorgang

1. Hauptsatz, offene Systeme:

$$q_{12} + w_{i,12} = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1)$$

Ideales gas im waagerechten Rohr:

$$h_1 = h_2 \quad (\text{isenthalp}) \rightarrow \text{isotherm}$$

X = 0: Siedende Flüssigkeit

0 < X < 1: Nassdampf

X = 1: trocken gesättigter Dampf

X > 1: überhitzter Dampf

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

mit  $m'$  = Masse siedende Fl.

und  $m''$  = Masse trocken ges. Dampf

$$v_x = v' + x(v'' - v')$$

$$h_x = h' + x(h'' - h')$$

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

## 8 Theorie der Kreisprozesse

### 8.2 Carnot'scher Kreisprozess

Thermischer Wirkungsgrad:  $\eta_{thC} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$

Kreisprozessarbeit:

$$|W| = q_{zu} - |q_{ab}| = (T_{max} - T_{min}) \cdot (s_1 - s_2)$$

Zugeführte Wärme:

$$q_{zu} = q_{34} = T_{max} \cdot (s_4 - s_3) = T_{max} \cdot (s_1 - s_2)$$

abgeführte Wärme:

$$q_{ab} = q_{12} = T_{min} \cdot (s_1 - s_2)$$

Leistungsziffer:  $\epsilon_{C,WPP} = \frac{1}{\eta_{th,C}}$  Allgemein:  $\epsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$

## 9 Angewandte Kreisprozesse (Rechtsprozesse)

Allgemeingültige Formel:  $\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = \frac{w}{q_{zu}}$

### 9.3.1 Otto-Prozess

Kreisprozessarbeit:

$$|W| = Q_{23} + Q_{41} = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2 + T_3 - T_4)$$

Verdichtungsverhältnis:

$$\epsilon = \frac{V_k + V_h}{V_k} \quad \epsilon^\kappa = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^\kappa$$

Thermodynamischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad \text{mit } \epsilon^{\kappa-1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

1-2: isentropische Kompression:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \quad \epsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

2-3: isochore Verdichtung:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} \quad q_{zu} = c_v(T_3 - T_2) \quad \left[c_v = \frac{1}{\kappa-1} R_L\right] \quad T_3 = \frac{p_3 \cdot v_3}{R_L}$$

3-4: isentropische Entspannung:

$$v_2 = v_3 \quad v_4 = v_1$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_3}{T_4} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^\kappa = \frac{p_3}{p_4}$$

### 9.3.2 Diesel-Prozess (klassisch, Gleichdruckprozess)

Kreisprozessarbeit:

$$|W| = Q_{23} + Q_{41} = m \cdot \kappa \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) + m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

Einspritzverhältnis:  $\phi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad (\psi = 1)$

Thermodynamischer Wirkungsgrad:  $\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\phi^{\kappa-1}}{\kappa \cdot (\phi-1)}$

1-2: isentropische Kompression:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \quad \epsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

2-3: isobare Expansion:

$$q_{zu} = c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad \left[c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_L\right] \quad \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

3-4: isentropische Expansion:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} \quad \frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$$

### 9.3.3 Seiliger-Prozess

$$q_{23} = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{34} = c_p(T_4 - T_3)$$

$$q_{51} = c_v(T_5 - T_1)$$

$$w = q_{zu} - |q_{ab}| = \frac{R_i}{\kappa-1} (T_1 - T_2 + T_3 - T_5 + \kappa(T_4 - T_3))$$

Einspritzverhältnis:  $\phi = \frac{V_4}{V_3}$

Drucksteigerungsverhältnis:  $\psi = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$

Thermodynamischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\phi^{\kappa} \psi - 1}{\psi - 1 + \psi \kappa (\phi - 1)}$$

1-2: isentropische Kompression:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \quad \epsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

2-3: isochore Verdichtung:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} \quad T_3 = \frac{p_3 \cdot v_3}{R_L} \quad v_2 = v_3$$

$$q_{zu} = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

3-4: isobare Expansion:

$$\frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} \quad q_{34} = c_p(T_4 - T_3)$$

4-5: isentropische Expansion:

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{\kappa-1} \quad \frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^\kappa \quad T_5 = \frac{p_5 \cdot v_5}{R_L}$$

### Allgemein: polytropisch

wie isentropische Kompression, bzw. Expansion, aber:

- Statt  $\kappa$  wird überall  $n$  gesetzt.
- $c_v = \frac{1}{\kappa-1} R_L \cdot \frac{n-\kappa}{n-1}$  und  $c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_L \cdot \frac{n-\kappa}{n-1}$
- Thermodynamischer Wirkungsgrad **muß** gerechnet werden mit:  $\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = \frac{w}{q_{zu}}$

### Sonstiges

Verhältnis der Massen Kraftstoff zur Luftmasse:  $\frac{m_B}{m_L} = \frac{q_{zu}}{H_U}$

## Hinweise und Impressum:

Zusammengestellt von: M. Kringels ([www.saiya.de](http://www.saiya.de))

Scriptbasis: Technische Thermodynamik für Maschinenbauingenieure Teil 1: Energielehre  
(einsemestrige Vorlesung von Prof. Dr.-Ing. M. Seidel) 2006/2007

Version: 1.1.0

Datum: 11.12.2006



Fehler, Kritik & Hinweise bitte nicht für sich behalten,  
sondern per Mail an [script@saiya.de](mailto:script@saiya.de) melden, damit  
diese Fehler korrigiert werden können. Danke.