

Formelsammlung Technische Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Lutz Mardorf

Hochschule Osnabrück

Bitte beachten Sie das Urheberrecht.
All rights reserved.
© Lutz Mardorf

1. Zustandsgrößen

1.1 Spezifisches Volumen

In einem Volumen V befindet sich die Masse m und es entsteht der Begriff:

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Spezifisches Volumen	$v = \frac{V}{m}$	$\frac{m^3}{kg}$
Volumen	V	m^3
Masse	m	kg
Dichte (Kehrwert von spez. Volumen)	$\rho = \frac{m}{V}$	$\frac{kg}{m^3}$

1.2 Druck

Bar (bar) und Pascal (Pa)

Druckeinheiten: 1 bar = 10^5 Pa 1 bar = 100 kPa 1 bar = $10^5 \frac{N}{m^2}$

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Bezugsdruck (meist Umgebungsdruck)	p_b	$\frac{N}{m^2}$
Druck oder Absolutdruck	p oder p_{abs}	$\frac{N}{m^2}$
Überdruck	$\Delta p_{\ddot{u}} = p_{(abs)} - p_b$	$\frac{N}{m^2}$
Unterdruck	$\Delta p_u = p_b - p_{(abs)}$	$\frac{N}{m^2}$
Druck durch Eigengewicht	$p = \rho * h * g$	$\frac{N}{m^2}$

1.3 Temperatur

Thermodynamische Temperatur T in Kelvin (K)

„Technische Temperatur“ und Celsius-Temperatur t in ($^{\circ}C$)

Absoluter Nullpunkt bei 0 K = $-273,15^{\circ}C$

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Celsius-Temperatur	$t = T - 273,15 K$	$^{\circ}C$
Temperaturdifferenz	$\Delta t = T_2 - T_1 = t_2 - t_1$	K (immer in Kelvin!)

2. Arbeit, Wärme und 1. Hauptsatz der Thermodynamik

2.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme

Energieänderungen vom Zustand 1 in den Zustand 2 am geschlossenen System:

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Wärme	Q_{12}	kJ
Arbeit	W_{12}	kJ
Innere Energie	$U_1 \quad U_2$	kJ
Volumenänderungsarbeit	$W_{V_{12}}$	kJ
Dissipationsarbeit	$W_{diss_{12}}$	kJ

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1$$

$$Q_{12} + W_{V_{12}} = U_2 - U_1 \quad \text{mit } W_{diss} = 0 \quad W_{12} = W_{V_{12}} + W_{diss_{12}}$$

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen (Stoffwert)	c_{v_m}	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Änderung der Inneren Energie $U_2 - U_1 = m \cdot c_{v_m} \cdot (T_2 - T_1)$

Volumenänderungsarbeit $W_{V_{12}} = - \int_1^2 p \cdot dV$ Fläche im p-V Diagramm auf die V-Achse

Technische Arbeit $W_{t_{12}} = \int_1^2 V \cdot dp$ Fläche im p-V Diagramm auf die p-Achse

Bezugsarbeit $W_{b_{12}} = -p_b \cdot (V_2 - V_1)$

Nutzarbeit $W_{N_{12}} = W_{V_{12}} - W_{b_{12}}$

2.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme

Energieänderungen von Zustand 1 in den Zustand 2 am offenen System:

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Enthalpie	$H_1 \quad H_2$	kJ
Innere Arbeit	$W_{i_{12}}$	kJ
Technische Arbeit	$W_{t_{12}}$	kJ

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

$$Q_{12} + W_{t_{12}} = H_2 - H_1 \quad \text{mit } W_{diss} = 0 \quad W_{i_{12}} = W_{t_{12}} + W_{diss_{12}}$$

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (Stoffwert)	c_{p_m}	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Änderung der Enthalpie $H_2 - H_1 = m \cdot c_{p_m} \cdot (T_2 - T_1)$

$$H = U + pV$$

2.3 Erster Hauptsatz der Thermodynamik für stationäre Fließprozesse

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Wärmestrom	\dot{Q}_{12}	$\frac{kJ}{s} = kW$
Leistung	P_{12}	$\frac{kJ}{s} = kW$
Massenstrom	\dot{m}	$\frac{kg}{s}$
Spezifische Enthalpie	h	$\frac{kJ}{kg}$
Spezifische Innere Energie	u	$\frac{kJ}{kg}$
Spezifische Wärme	q	$\frac{kJ}{kg}$

$$\dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$h = \frac{H}{m}$$

$$q = \frac{Q}{m}$$

$$u = \frac{U}{m}$$

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot h \quad \text{Enthalpiestrom } \frac{kJ}{s} = kW$$

3. Thermische Zustandsgleichung und Normzustand

3.1 Thermische Ausdehnung

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient	α_m	$\frac{m}{K \cdot m} = \frac{1}{K}$
Mittlerer Volumenausdehnungskoeffizient	γ_m	$\frac{m^3}{K \cdot m^3} = \frac{1}{K}$

$$\Delta l = l_2 - l_1 \quad \text{mit } l_1 = l_0 \cdot \left(1 + \alpha_m \frac{t_1}{0} \cdot t_1\right)$$

$$l_2 = l_0 \cdot \left(1 + \alpha_m \frac{t_2}{0} \cdot t_2\right)$$

Länge l_1, l_2 in m

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad \text{mit } V_1 = V_0 \cdot \left(1 + \gamma_m \frac{t_1}{0} \cdot t_1\right)$$

$$V_2 = V_0 \cdot \left(1 + \gamma_m \frac{t_2}{0} \cdot t_2\right)$$

Volumen V_1, V_2 in m^3

3.2 Thermische Zustandsgleichung

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Spezielle oder individuelle Gaskonstante (Stoffwert)	R oder R_i	$\frac{J}{kg \cdot K} = \frac{Nm}{kg \cdot K}$
Druck - Absolutdruck	p	$\frac{N}{m^2}$
Spezifisches Volumen	v	$\frac{m^3}{kg}$
Temperatur	T	K (immer in Kelvin!)
Volumen	V	m^3
Masse	m	kg
Volumenstrom	\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$
Massenstrom	\dot{m}	$\frac{kg}{s}$

$$p \cdot v = R \cdot T$$

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

$$p \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T$$

3.3 Molare Gaskonstante, Molvolumen, Molare Masse

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Molare oder universelle Gaskonstante (Konstante)	R_m	$\frac{kJ}{kmol \cdot K}$
Molare Masse (Stoffwert)	M	$\frac{kg}{kmol}$
Molares Volumen	V_m	$\frac{m^3}{kmol}$
Temperatur	T	K (immer in Kelvin!)
Molzahl	n	$kmol$
Masse	m	kg

$$V_m = M \cdot v$$

$$R_m = R \cdot M \quad \text{mit} \quad R_m = 8,3144 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$m = n \cdot M$$

Molare thermische Zustandsgleichung

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

3.4 Normzustand (N), Normdruck, Normtemperatur

$$p_N = 1,01325 \text{ bar} \quad t_N = 0^\circ\text{C} \quad T_N = 273,15 \text{ K}$$

Normvolumen V_N in Normkubikmeter m_N^3

3.5 Molares Volumen im Normzustand, Stoffwert, ungefähr konstant für alle Gase

$$V_{m_N} = 22,4 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kmol}}$$

3.6 Spezifische Wärmekapazitäten

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (Stoffwert)	c_p	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen (Stoffwert)	c_v	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Isentropenexponent	κ	-
Polytropenexponent	n	-
Mittlere Spezifische Wärmekapazität (im gegebenen Temperaturbereich in $^\circ\text{C}$)	$c_{p_m} \Big _{t_1}^{t_2} \quad c_{v_m} \Big _{t_1}^{t_2}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wahre spezifische Wärmekapazität (Stoffwert $f(t)$)	$c_p(t) \quad c_v(t)$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$$c_p - c_v = R$$

$$c_{p_m} \Big|_{t_1}^{t_2} - c_{v_m} \Big|_{t_1}^{t_2} = R$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\kappa_m = \frac{c_{p_m} \Big|_{t_1}^{t_2}}{c_{v_m} \Big|_{t_1}^{t_2}}$$

$$c_{p_m} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{p_m} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{p_m} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

$t_1 \quad t_2$ in $^\circ\text{C}$!!!

Wärme in kJ in Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität

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

$$Q_{12} = m \cdot (c_p(t_2) \cdot t_2 - c_p(t_1) \cdot t_1)$$

Wärmestrom in kJ/s oder kW in Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität

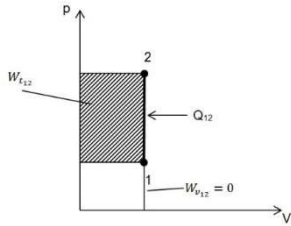
$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot c_{p_m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$$

4. Zustandsänderungen idealer Gas mit $W_{diss}=0$

- **Isochore Zustandsänderung:**

$$V = const$$

$$v = const$$



$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

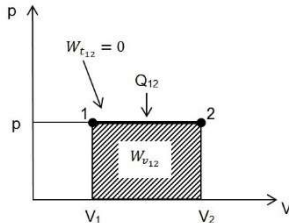
$$W_{v12} = 0$$

$$Q_{12} = m \cdot c_{v,m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t12} = V \cdot (p_2 - p_1)$$

- **Isobare Zustandsänderung**

$$p = const$$



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$W_{v12} = m \cdot R \cdot (T_1 - T_2)$$

$$W_{v12} = p \cdot (V_1 - V_2)$$

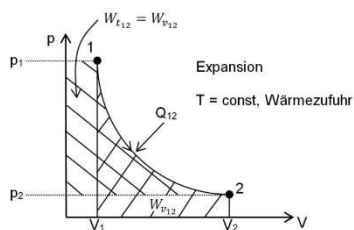
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$Q_{12} = m \cdot c_{p,m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t12} = 0$$

- **Isotherme Zustandsänderung**

$$T = const$$



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_{v12} = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$W_{v12} = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_{v12} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$

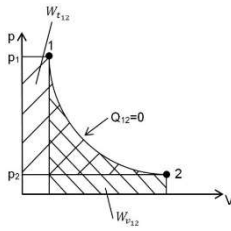
$$Q_{12} = -W_{v12}$$

$$W_{t12} = W_{v12}$$

- **Isentrope Zustandsänderung**

$$Q_{12} = 0$$

$$W_{diss} = 0$$



$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\kappa$$

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

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

$$W_{v_{12}} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$W_{v_{12}} = \frac{m \cdot R}{\kappa - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{v_{12}} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1)$$

$$W_{v_{12}} = U_2 - U_1$$

$$W_{t_{12}} = m \cdot c_{p_m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

- **Polytrope Zustandsänderung**

$$\kappa \rightarrow n$$

$$|Q_{12}| > 0$$

In alle Gleichungen der Isentropen Zustandsänderung wird κ durch n ersetzt!

$$p_1 \cdot V_1^n = p_2 \cdot V_2^n$$

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

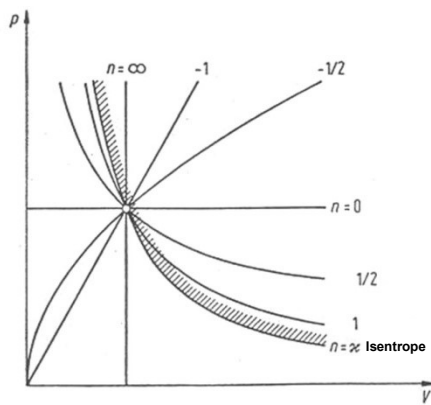
$$\frac{Q_{12}}{W_{v_{12}}} = \frac{n - \kappa}{\kappa - 1}$$

$$W_{v_{12}} = \frac{1}{n - 1} \cdot (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1)$$

$$W_{v_{12}} = m \cdot c_{v_m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{\kappa - 1}{n - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{t_{12}} = m \cdot n \cdot c_{v_m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q_{12} = m \cdot c_{v_m} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$



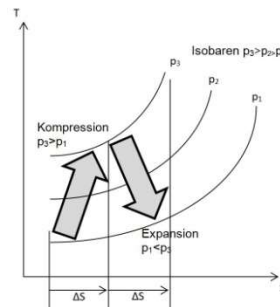
- $n = \infty$ *isochore* Zustandsänderung
- $n = 0$ *isobare* Zustandsänderung
- $n = 1$ *isotherme* Zustandsänderung
- $n = \kappa$ *isentrope* Zustandsänderung
- $0 < n < \infty$ allgemeine *polytrophe* Zustandsänderung
- $1 < n < \kappa$ technische *polytrophe* Zustandsänderung

5. Entropie und 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Entropie	S_1 S_2	$\frac{kJ}{K}$
Spezifische Entropie	s_1 s_2	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$

5.1. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

$$dS = \frac{dQ + dW_{diss}}{T}$$



Irreversibel $W_{diss} > 0$ $S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ + dW_{diss}}{T}$ $S_2 - S_1 = m \cdot \left(c_{p_m} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \right)$

Reversibel $W_{diss} = 0$ $S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T}$

5.2 Irreversible Zustandsänderungen des idealen Gases mit $W_{diss} > 0$

- *Isochore* Zustandsänderung

$$S_2 - S_1 = m \cdot c_{v_m} \left|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = m \cdot c_v \left|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \right. \quad Q_{12} + W_{diss_{12}} = U_2 - U_1$$

- **Isobare Zustandsänderung**

$$S_2 - S_1 = m \cdot c_{p_m} \left|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}\right.$$

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

- **Isotherme Zustandsänderung**

$$S_2 - S_1 = m \cdot R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$Q_{12} + W_{diss_{12}} = -W_{v_{12}} = -W_{t_{12}} = T \cdot (S_2 - S_1)$$

- **Isentrope Zustandsänderung** $S = \text{const}$ $s = \text{const}$

$$Q_{12} = 0 \quad W_{diss_{12}} = 0$$

$$S_2 - S_1 = 0$$

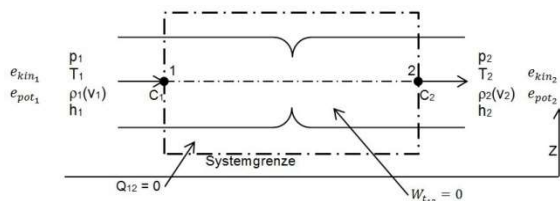
$$Q_{12} + W_{diss_{12}} = 0$$

- **Polytrope Zustandsänderung**

$$S_2 - S_1 = m \cdot c_{v_m} \left|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}\right.$$

$$Q_{12} + W_{diss_{12}} = m \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1} \cdot c_{v_m} \left|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)\right.$$

- **Adiabate Drossel mit $W_{diss} > 0$**



$$H_2 = H_1$$

$$S_2 > S_1$$

$$Q_{12} = 0$$

$$p_2 < p_1$$

Aus $dH = 0$ folgt $dT = 0$ isotherme Zustandsänderung idealer Gase mit $T = T_1 = T_2$

$$W_{diss_{12}} = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$S_2 - S_1 = m \cdot R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

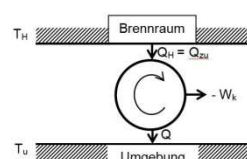
6. Kreisprozesse

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Arbeit des Kreisprozesses	W_K	kJ
der Wärmekraftmaschine zugeführte Wärme bei T_{Hoch}	Q_{zu}	kJ
der Kältemaschine zugeführte Kälte bei T_{tief}	$Q_0 = Q_{zu}$	kJ
Thermischer Wirkungsgrad (Wärmekraftmaschine)	η_{th}	-
Kälteleistungszahl (Kältemaschine)	ε_k	-

$$W_k = \sum W_V = \sum W_t = -\sum Q$$

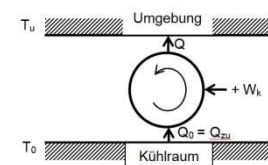
$$\eta_{th} = \frac{|W_k|}{Q_{zu}}$$

Wärmekraftmaschine
 $Q_{zu} = Q_H$



$$\varepsilon_k = \frac{Q_{zu}}{W_k} = \frac{Q_0}{W_K}$$

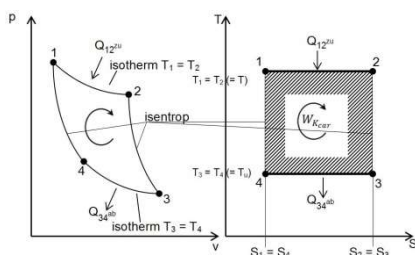
Kältemaschine
 $Q_{zu} = Q_0$



6.1 Thermodynamische Gasprozesse

- Carnot-Prozess

Isotherme und Isentrope Zustandsänderungen



Wärmekraftmaschine:

$T_1 = T_2$ isotherme Wärmezufuhr

$T_3 = T_4$ isotherme Wärmeabfuhr

$p_4 \rightarrow p_1$ isentrope Kompression

$p_2 \rightarrow p_3$ isentrope Expansion

$$W_k = -\left(1 - \frac{T_u}{T}\right) \cdot Q_{zu}$$

Wärmekraftmaschine:

T = höchste Temperatur

T_u = niedrigste Temperatur

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_u}{T}$$

$$W_k = \left(\frac{T_u}{T_o} - 1\right) \cdot Q_o$$

$$\varepsilon_k = \frac{T_o}{T_u - T_o}$$

Kältemaschine:

T_u = höchste Temperatur

T_o = niedrigste Temperatur

- **Joule-Prozess**

Isobare und Isentrope Zustandsänderungen

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_o}{p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$W_K = m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) \cdot \left[1 - \frac{T_1}{T_2}\right]$$

Wärmekraftmaschine:

$T_1 \rightarrow T_2$ – isentrope Kompression

$T_2 \rightarrow T_3$ – isobare Wärmezufuhr

- **Ericsson-Prozess**

Isobare und Isotherme Zustandsänderungen

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

$$W_K = m \cdot R \cdot (T_3 - T_1) \cdot \ln \frac{p}{p_o}$$

Wärmekraftmaschine:

$T_1 \rightarrow T_2$ – isotherme Kompression

$T_2 \rightarrow T_3$ – isobare Wärmezufuhr

T_1 = niedrigste Temperatur

T_3 = höchste Temperatur

- **Stirling-Prozess**

Isochore und Isotherme Zustandsänderungen.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

$$W_K = m \cdot R \cdot (T_3 - T_1) \cdot \ln \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

Wärmekraftmaschine:

$T_2 \rightarrow T_3$ – isochore Kompression

$T_3 \rightarrow T_4$ – isotherme Wärmezufuhr

T_1 = niedrigste Temperatur

T_3 = höchste Temperatur

$$\varepsilon_k = \frac{T_o}{T_u - T_o}$$

$$W_K = m \cdot R \cdot (T_u - T_o) \cdot \ln \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

Kältemaschine:

T_u = höchste Temperatur

T_o = niedrigste Temperatur

6.2 Vergleichsprozesse für Verbrennungsmotoren

isentropische Kompression
 isentropische Expansion
 isochore Wärmeabfuhr als Gaswechsel

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Verdichtungsverhältnis	ε	-
Kompressionsvolumen	V_K	m^3
Hubvolumen	V_H	m^3
Einspritzvolumen	V_E	m^3
Einspritzverhältnis	φ	-
Druckverhältnis	ψ	-
Isentropenexponent	κ	-

- Otto-Prozess

- Gleichraumverfahren
 $p_2 \rightarrow p_3$ isochore Wärmezufuhr

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

gilt nur für $c_v = \text{const}$
 für Kompression und Expansion

- Diesel-Prozess

- Gleichdruckverfahren
 $p_2 \rightarrow p_3$ isobare Wärmezufuhr

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\kappa \cdot \varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\varphi-1}$$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_K + V_H}{V_K}$$

$$\varphi = \frac{V_K + V_E}{V_K}$$

- Seiliger-Prozess

- gemischtes Verfahren
 $p_2 \rightarrow p_3$ isochore Wärmezufuhr
 $p_3 \rightarrow p_4$ isobare Wärmezufuhr

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

gilt nur für $c_v = \text{const}$

$$\psi = \frac{p_3}{p_2}$$

6.3 Technischer Kolbenverdichter

$p_1 \rightarrow p_2$	polytrope Kompression
$p_2 \rightarrow p_3$	isobare Ausschubung
$p_3 \rightarrow p_4$	polytrope Rückexpansion
$p_4 \rightarrow p_1$	isobares Ansaugen

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Schädlicher Raum	$\varepsilon_0 \cdot V_H$	m^3
Füllungsgrad	μ	-
Polytropenexponent	n	-
Aufzubringende technische reversible Arbeit	$W_{t_{rev}}$	kJ

$$\mu = 1 - \varepsilon_0 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$W_K = W_{t_{rev}} = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot (V_1 - V_4) \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

7. Exergie und Anergie

Begriff	Formelzeichen	Dimension
Exergie in jede Energieform umwandelbar	E	kJ
Anergie unterhalb T_u nicht umwandelbar	B	kJ
Exergie der Wärme Q_{12}	$E_{Q_{12}}$	kJ
Anergie der Wärme Q_{12}	$B_{Q_{12}}$	kJ
Exergetischer Wirkungsgrad	η_{Ex}	-

Wärme, Energie $Q = E + B$

- Carnot-Prozess

$$E_{Q_{12}} = \left(1 - \frac{T_u}{T} \right) \cdot Q_{12}$$

T_u = niedrigste Temperatur, Umgebungstemperatur

$$B_{Q_{12}} = \frac{T_u}{T} \cdot Q_{12}$$

T = höchste Temperatur

- **Joule-Prozess**

$$\eta_{Ex} = \frac{|W_K|}{E_{Q_{zu}}} = \frac{\eta_{th}}{1 - \frac{T_u}{T_3 - T_2} \cdot \ln \frac{T_3}{T_2}}$$

- **Otto-Prozess**

$$\eta_{Ex} = \frac{|W_K|}{E_{Q_{zu}}} = \frac{\eta_{th}}{1 - \frac{T_u}{T_3 - T_2} \cdot \ln \frac{T_3}{T_2}}$$

- **Diesel-Prozess**

$$\eta_{Ex} = \frac{|W_K|}{E_{Q_{zu}}} = \frac{\eta_{th}}{1 - \frac{T_u}{T_1} \cdot \frac{\ln \varphi}{\varepsilon^{\kappa-1} \cdot (\varphi-1)}}$$

Stand 3/2021