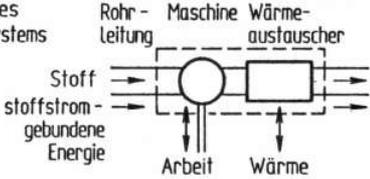
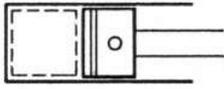
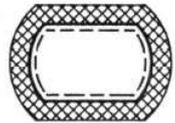
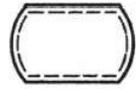
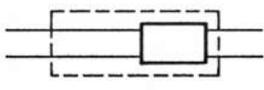
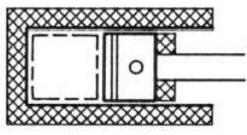
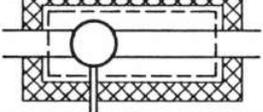


1.0 Systeme:

<p><i>Offene Systeme</i> grenzen einen bestimmten Raum ab.</p> <p><i>Geschlossene Systeme</i> grenzen einen bestimmte Menge Stoff ab.</p>	<p>Allgemeiner Fall des thermodynamischen Systems</p> <p>Offenes System</p> 
<p>Keine Stoffübertragung</p> <p>Geschlossenes System</p> 	<p>Keine Stoffübertragung Keine Energieübertragung</p> <p>Abgeschlossenes System</p> 
<p>Keine Arbeitsübertragung - rigid -</p> <p>Rigides geschlossenes System</p>  <p>Rigides offenes System</p> 	<p>Keine Wärmeübertragung - adiabat -</p> <p>Adiabates geschlossenes System</p>  <p>Adiabates offenes System</p> 

Über *adiabate* Grenzen kann keine Wärme übertragen werden.

Über *diatherme* Grenzen kann nur Wärme übertragen werden.

Über *rigide* Grenzen kann keine Arbeit übertragen werden (ausgenommen Schubarbeit).

Teilsysteme und Gesamtsysteme

Systemgrenzen werden nach Zweckmäßigkeit festgelegt.

Systeme können geteilt oder zusammengefaßt werden.

Mehrphasensysteme sind *heterogen*.

Einphasensysteme sind *homogen*; die physikalischen Eigenschaften haben darin überall den gleichen Wert.

1.1 Gleichgewichte

Jedes sich selbst überlassene geschlossene System strebt einem Gleichgewichtszustand zu, den es niemals ohne Einwirkung von außen verläßt.

Mechanisches Gleichgewicht zwischen zwei geschlossenen Systemen

- stellt sich ein, wenn die Trennwand biegsam oder verschiebbar ist,
- stellt sich nicht ein, wenn die Trennwand *rigid*, also starr oder unverschiebbar ist.

Thermisches Gleichgewicht zwischen zwei geschlossenen Systemen

- stellt sich ein, wenn die Trennwand *diatherm* ist,
- stellt sich nicht ein, wenn die Trennwand *adiabat* ist.

Thermodynamisches Gleichgewicht herrscht zwischen zwei geschlossenen Systemen, wenn diese miteinander im mechanischen, thermischen und außerdem im chemischen Gleichgewicht sind.

Im **Beharrungszustand** befinden sich offene Systeme, in denen keine zeitlichen Änderungen auftreten (*stationärer Prozeß*).

1.2 Stoff und Menge**Masse m , Stoffmenge n , Molmasse M**

$$m = M \cdot n \quad (2.3)$$

(Extensives) **Volumen V , spezifisches Volumen v , molares Volumen oder Molvolumen V_m , Dichte ρ**

$$V = m \cdot v = n \cdot V_m = \frac{m}{\rho} \quad (2.4) \text{ bis } (2.8)$$

Massenstrom \dot{m} , Stoffmengenstrom \dot{n} , Volumenstrom \dot{V}

$$\dot{m} = M \cdot \dot{n} = \frac{\dot{V}}{v} = \dot{V} \cdot \rho \quad (2.12), (2.13)$$

Geschwindigkeit c , Massenstromdichte I , Strömungsquerschnitt A

$$c = \frac{\dot{V}}{A} \quad I = \frac{\dot{m}}{A} = c \rho \quad (2.11), (2.14)$$

$$\text{Kontinuitätsgleichung} \quad \dot{m}_1 = \frac{A_1 \cdot c_1}{v_1} = \frac{A_2 \cdot c_2}{v_2} = \dot{m}_2 \quad (2.15)$$

1.3 Energien:

Wärmestrom	$Q_{12} = \dot{m} q_{12}$	(4.7)	Wärme	$Q_{12} = m q_{12}$	(4.7)
------------	---------------------------	-------	-------	---------------------	-------

Arbeitsleistung	$P_{12} = \dot{m} w_{12}$	(4.8)	Arbeit	$W_{12} = m w_{12}$	(4.34)
-----------------	---------------------------	-------	--------	---------------------	--------

Enthalpiestrom	$\dot{H}_1 = \dot{m} h_1$	(4.4)	Innere Energie	$U_1 = m u_1$	(4.43)
----------------	---------------------------	-------	----------------	---------------	--------

Kinetische Energie	$E_{\text{kin}12} = m e_{\text{kin}12} = m \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)$	(4.5)
--------------------	---	-------

Potentielle Energie	$E_{\text{pot}12} = m e_{\text{pot}12} = m g (z_2 - z_1)$	(4.6)
---------------------	---	-------

Streuenergie	$J_{12} = m j_{12}$	(4.10)
--------------	---------------------	--------

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

1. Hauptsatz der Thermodynamik

Vorzeichenkonvention – Alle zugeführten Energien werden positiv, alle abgeführten Energien werden negativ gerechnet.

Erster Hauptsatz in der Fassung für offene Systeme

Summe der Prozeßgrößen gleich der Änderung der Zustandsgrößen

$$\dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g (z_2 - z_1) \right] \quad (4.3)$$

$$q_{12} + w_{12} = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g (z_2 - z_1) \quad (4.9)$$

Bei einem offenen System ist die Summe aus Wärmestrom und Arbeitsleistung in einem stationären Prozeß gleich der Summe aus den Änderungen der Enthalpieströme sowie der Ströme kinetischer und potentieller Energie der durch das System fließenden Fluidströme.

Erster Hauptsatz in der Fassung für ruhende geschlossene Systeme

$$Q_{12} + W_{V12} + J_{12} = U_2 - U_1 = m (u_2 - u_1) \quad (4.11)$$

$$q_{12} + w_{V12} + j_{12} = u_2 - u_1 \quad (4.12)$$

Die einem ruhenden geschlossenen System in Form von Wärme, Volumenarbeit und Streuenergie zugeführte Energie ist gleich der Zunahme der Inneren Energie des Systems.

Erster Hauptsatz in allgemeiner Fassung

Jedes geschlossene System besitzt eine extensive Zustandsgröße *Energie*.
Die Energie eines Systems kann sich nur durch Transport von Energie über die Grenze des Systems ändern.
Die Energie eines abgeschlossenen Systems bleibt unverändert.

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen.
Prozesse, bei denen Reibung auftritt, sind irreversibel.
Prozesse, bei denen Stoffe vermischt werden, sind irreversibel.
Die adiabate Expansion eines Gases ohne Arbeitsleistung ist irreversibel.
Bei allen Prozessen eines offenen adiabaten Systems zwischen gegebenem Anfangs- und Enddruck liefert die reversible Expansion die größte Arbeitsleistung, verbraucht die reversible Kompression die geringste Arbeitsleistung.

1.5 Arbeit und Arbeitsleistung

Die **Prozeßgröße Arbeit** ist eine Mengengröße und kann mit der extensiven Arbeit W , der spezifischen Arbeit w und der molaren Arbeit W_m sowie der Arbeitsleistung P angegeben werden.

$$W_{12} = m w_{12} = n W_{12} \quad (4.34), (4.35) \quad P_{12} = \dot{m} w_{t12} = \dot{n} W_{mt12} \quad (4.15), (4.36)$$

Arbeiten an offenen Systemen

$$\text{Arbeitsleistung} \quad P_{12} = \dot{m} w_{t12} = \dot{m} \left[\int_1^2 v \, dp + j_{12} + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \right] \quad (4.31)$$

$$\text{Technische Arbeit} \quad W_{t12} = W_{p12} + J_{12} + W_{H12} + W_{B12} \quad (4.30)$$

$$\text{Druckarbeit} \quad W_{p12} = m w_{p12} = m \int_1^2 v \, dp \quad (4.29)$$

$$\text{Volumenarbeit} \quad W_{V12} = m w_{V12} = -m \int_1^2 p \, dv \quad (4.19)$$

$$\text{Schubarbeit} \quad W_{VS12} = m(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (4.22)$$

$$\text{Streuenergie} \quad J_{12} = m j_{12} \quad (4.10)$$

$$\text{Hubarbeit} \quad W_{H12} = m w_{H12} = m g(z_2 - z_1) \quad (4.23)$$

$$\text{Beschleunigungsarbeit} \quad W_{B12} = m w_{B12} = m \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \quad (4.24)$$

Arbeiten an ruhenden geschlossenen Systemen

$$\text{Volumenarbeit} \quad W_{V12} = m w_{V12} = -m \int_1^2 p \, dv \quad (4.19)$$

$$\text{Streuenergie} \quad J_{12} = m j_{12} \quad (4.10)$$

1.6 Wärme, Wärmestrom und Innere Energie

Wärmestrom und Enthalpiestrom bei rigiden offenen Systemen

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} q_{12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (4.4), (4.39), (4.42)$$

Wärme und Innere Energie bei ruhenden rigiden geschlossenen Systemen

$$Q_{12} = m q_{12} = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) \quad (4.40), (4.41), (4.43)$$

Innere Energie

$$U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) \quad U_{m2} - U_{m1} = C_{mv}(T_2 - T_1)$$

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \quad du = c_v dT$$

1.7 Enthalpie und Enthalpiestrom

Die Enthalpie ist ein Zustandsgröße, die den Energiegehalt eines Stoffstromes kennzeichnet und als Summe aus Innerer Energie und dem Produkt aus Druck und Volumen definiert ist.

Definition der Enthalpie $H = U + pV = m(u + pv)$ (4.46)

Die **Zustandsgröße Enthalpie** ist eine Mengengröße und kann mit der extensiven Enthalpie H , der spezifischen Enthalpie h und der molaren Enthalpie H_m sowie dem Enthalpiestrom \dot{H} angegeben werden.

$$H_{12} = m h_{12} = n H_{m12} \quad (4.48) \quad \dot{H}_{12} = \dot{m} h_{12} = \dot{n} H_{m12} \quad (4.49)$$

Praktische Bedeutung

Differenz der Enthalpieströme bei adiabaten Systemen $\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m} (h_2 - h_1) = \dot{m} w_{t12} = P_{12}$ (4.50)

Differenz der Enthalpieströme bei rigiden Systemen $\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m} (h_2 - h_1) = \dot{m} q_{12} = \dot{Q}_{12}$ (4.51)

Zahlenwerte der Enthalpie [Bezugswert $h_0 = h_0(p_0, t_0)$]

Flüssigkeiten $h - h_0 = c_{fl}(t - t_0)$ (4.54)

Gesättigte Flüssigkeit $h' = h'(t)$ (4.56)

Sattdampf $h'' = h''(t)$ (4.56)

Naßdampf $h_d = (1 - x_d) h' + x_d h'' = h' + x_d (h'' - h')$ (4.57)

Dämpfe und reale Gase siehe Abschnitt 5.3 *Zustandsdiagramme*
 Ideale Gase siehe Abschnitt 6.2 *Kalorische Zustandsgleichungen*.

Spezifische Wärmekapazität flüssigen

Wassers bis etwa 170 °C $c_w = 4,186 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ (4.55)

Umwandlungsenthalpien

(Spezifische) Verdampfungsenthalpie $\Delta h_d = h'' - h'$ (4.58)

(Spezifische) Schmelzenthalpie $\Delta h_f = h^{**} - h^*$ (4.59)

(Spezifische) Sublimationsenthalpie $\Delta h_{sub} = h'' - h^*$ (4.60)

Enthalpie

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

$$H_{m2} - H_{m1} = C_{mp} (T_2 - T_1)$$

$$dh = c_p dT$$

1.8 Entropie und Entropiestrom

Definition der Entropie $dS = m \frac{dh - v dp}{T} = m \frac{du + p dv}{T}$ (5.11)

Die **Zustandsgröße Entropie** ist eine Mengengröße und kann mit der extensiven Entropie S , der spezifischen Entropie s und der molaren Entropie S_m sowie dem Entropiestrom \dot{S} angegeben werden.

$$S_{12} = m s_{12} = n S_{m12} \quad (5.16) \quad \dot{S}_{12} = \dot{m} s_{12} = \dot{n} S_{m12} \quad (5.17)$$

Zweiter Hauptsatz $dS_{ad} \geq 0$ (5.15)

Entropiedifferenzen

$$s_2 - s_1 = c_p \ln (T_2/T_1) - R \ln (p_2/p_1)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln (T_2/T_1) + R \ln (v_2/v_1)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln (p_2/p_1) + c_p \ln (v_2/v_1)$$

Zahlenwerte der Entropie [Bezugswert $s_0 = s_0(p_0, t_0)$]

Flüssigkeiten $s - s_0 = c_{fl} \ln (T/T_0)$ (5.25)

Gesättigte Flüssigkeit $s' = s'(t)$ (5.26)

Sattdampf $s'' = s''(t)$ (5.26)

Naßdampf $s_d = (1 - x_d) s' + x_d s'' = s' + x_d (s'' - s')$ (5.27)

Dämpfe und reale Gase siehe Abschnitt 5.3 *Zustandsdiagramme*

Ideale Gase siehe Abschnitt 6.3 *Entropie und Entropiediagramme*

1.9 Zusammenhänge zwischen den spezifischen Wärmen

c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck

c_v spezifische Wärme bei konstantem Volumen

$$c_p - c_v = R$$

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

$$\frac{c_p}{R} = \frac{\kappa}{\kappa - 1}$$

$$\frac{c_v}{R} = \frac{1}{\kappa - 1}$$

2.0 Kreisprozesse

Erster Hauptsatz in der Fassung für Kreisprozesse (Bild 4-25)

$$\dot{Q} + \dot{Q}_0 + P = 0 \quad (4.61) \qquad q + q_0 + w_K = 0 \quad (4.62)$$

Nutzbare Arbeitsleistung eines Kreisprozesses $P = P_T + P_P = -|\dot{Q}| + |\dot{Q}_0| \quad (4.64), (4.65)$

Nutzbare spezifische Arbeit eines Kreisprozesses $w_K = \Sigma w_t = \Sigma w_v \quad (4.63)$

Thermischer Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine $\eta_t = \frac{|P|}{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q} - |\dot{Q}_0|}{\dot{Q}} = 1 - \frac{|\dot{Q}_0|}{\dot{Q}} \quad (4.64), (4.65), (4.66)$

$$\eta_t = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{w}{q_{zu}} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}}$$

2.1 Thermische Maschinen

Wärmekraftmaschine	Kühlmaschine	Wärmepumpe
Zugeführter Wärmestrom \dot{Q} Abwärmestrom \dot{Q}_0 Erzeugte Arbeitsleistung P	Abgegebener Wärmestrom \dot{Q}_c Kälteleistung \dot{Q}_0 Verbrauchte Arbeitsleistung P	Wärmepumpen-Heizleistung \dot{Q}_{WP} Kälteleistung \dot{Q}_0 Verbrauchte Arbeitsleistung P
Energiebilanz $P = -\dot{Q} + \dot{Q}_0 \quad (5.47)$	Energiebilanz $\dot{Q}_0 = \dot{Q}_c - P \quad (5.51)$	Energiebilanz $\dot{Q}_{WP} = -\dot{Q}_0 - P \quad (5.55)$
Thermischer Wirkungsgrad η_t $\eta_t = \frac{ P }{\dot{Q}} \quad (5.48)$	Leistungszahl der Kühlmaschine ϵ_K $\epsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P} \quad (5.52)$	Leistungszahl der Wärmepumpe ϵ_{WP} $\epsilon_{WP} = \frac{ \dot{Q}_{WP} }{P} \quad (5.56)$
CARNOT-Arbeitsfaktor $\eta_C = \frac{T - T_0}{T} \quad (5.50)$	CARNOT-Kühlfaktor $\epsilon_{KC} = \frac{T_0}{T_c - T_0} \quad (5.54)$	CARNOT-Wärmepumpfaktor $\epsilon_{WPC} = \frac{T_c}{T_c - T_0} \quad (5.58)$

Kompression (V Verdichter)	Expansion (T Turbine)	
Reale Arbeit w_i und isentrope Arbeit w_{is}		
$w_{iV} = \Delta h_{iV} > w_{tsV} = \Delta h_{sV}$	(6.51)	$w_{iT} = \Delta h_{iT} < w_{tsT} = \Delta h_{sT}$ (6.53)
Isentrope Gütegrade η_s		
$\eta_{sV} = \frac{\Delta h_s}{\Delta h_i}$	(6.52)	$\eta_{sT} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_s}$ (6.54)
$\eta_{sV} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$	(6.55)	$\eta_{sT} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2s} - T_1}$ (6.56)

	2 Isochoren	2 Isobaren	2 Isothermen
2 Isentropen	OTTO	JOULE CLAUSIUS-RANKINE	CARNOT
2 Isothermen	STIRLING	ERICSSON (ACKERET-KELLER)	

DIESEL	2 Isentropen, 1 Isobare, 1 Isochore
SEILIGER	2 Isentropen, 1 Isobare, 2 Isochoren
PLANK	1 Isentrope, 2 Isobaren, 1 Isenthalpe

Verbrennungsmotoren

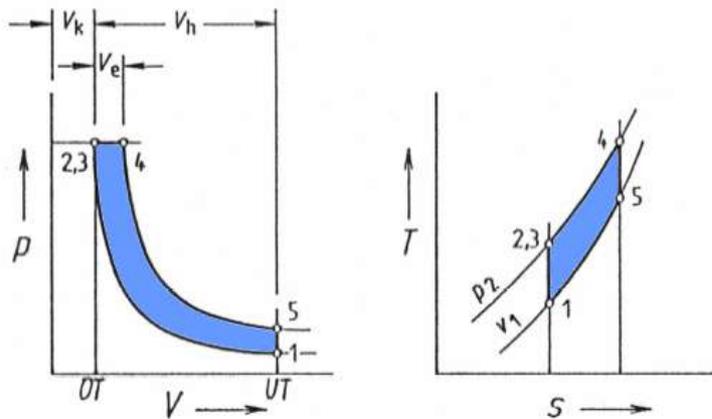


Bild M9-3

DIESEL-Prozeß

- 1-2,3 isentrope Kompression
- 2,3-4 isobare Wärmezufuhr
- 4-5 isentrope Expansion
- 5-1 isochore Wärmeabfuhr
- OT Oberer Totpunkt
- UT Unterer Totpunkt
- V_h Hubvolumen
- V_k Kompressionsvolumen
- V_e Einspritzvolumen

OTTO-Prozeß

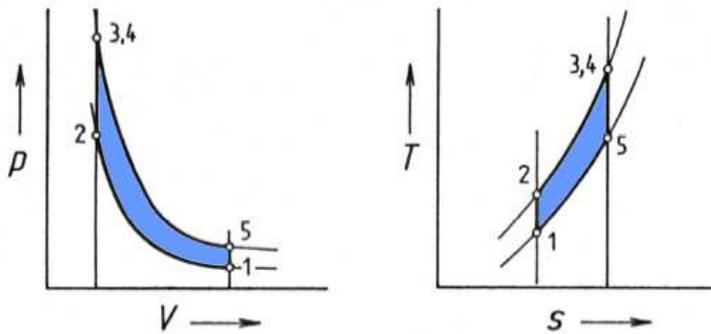


Bild M9-4

OTTO-Prozeß

- 1-2 isentrope Kompression
- 2-3,4 isochore Wärmezufuhr
- 3,4-5 isentrope Expansion
- 5-1 isochore Wärmeabfuhr

SEILIGER-Prozeß

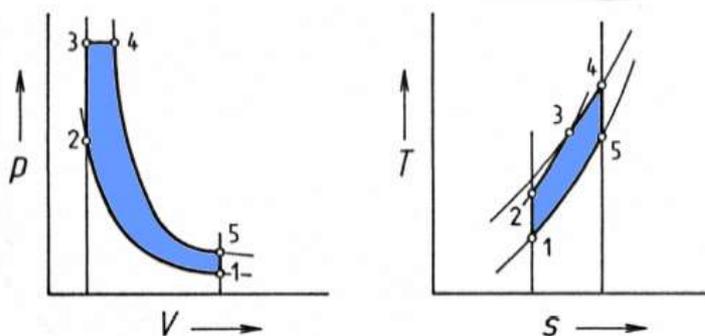


Bild M9-5

SEILIGER-Prozeß

- 1-2 isentrope Kompression
- 2-3 isochore Wärmezufuhr
- 3-4 isobare Wärmezufuhr
- 4-5 isentrope Expansion
- 5-1 isochore Wärmeabfuhr

Kennzahlen für die drei Prozesse

$$\text{Verdichtungsverhältnis} \quad \varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_k + V_h}{V_k} \quad (9.28)$$

$$\text{Einspritzverhältnis} \quad \varphi = \frac{V_4}{V_2} = \frac{V_k + V_e}{V_k} \quad (9.29)$$

$$\text{Drucksteigerungsverhältnis} \quad \psi = \frac{p_3}{p_2} \quad (9.30)$$

Thermische Wirkungsgrade

$$\text{DIESEL-Proze\ss} \quad \eta_t = 1 - \frac{\varphi^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} \kappa (\varphi - 1)} \quad (9.31)$$

$$\text{OTTO-Proze\ss} \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (9.32)$$

$$\text{SEILIGER-Proze\ss} \quad \eta_t = 1 - \frac{\psi \varphi^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} [\psi - 1 + \kappa \psi (\varphi - 1)]} \quad (9.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Mittlerer Arbeitsdruck } p_m \\ \text{(mittlerer indizierter Druck } p_i) \end{aligned} \quad p_m = \frac{|W_K|}{V_h} = \frac{1}{V_h} \oint p \, dV \quad (9.33a)$$

Gasturbinen

JOULE-Prozeß

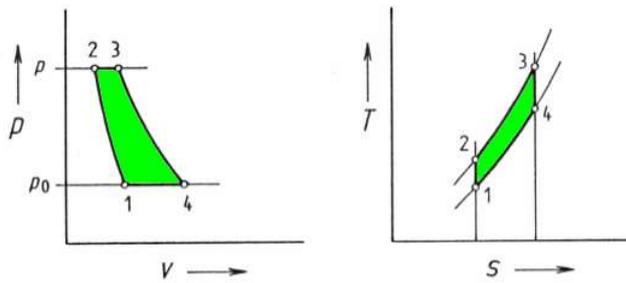


Bild M9-6

JOULE-Prozeß

- 1-2 isentrope Kompression
- 2-3 isobare Wärmezufuhr
- 3-4 isentrope Expansion
- 4-1 isobare Wärmeabfuhr

Thermischer Wirkungsgrad $\eta_t = 1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ (9.43)

ERICSSON-Prozeß

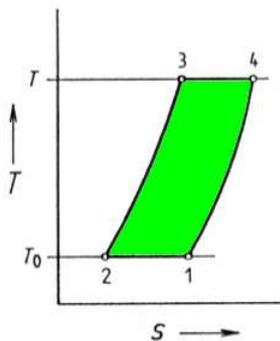


Bild M9-7

ERICSSON-Prozeß

Vergleichsprozess aus zwei Isothermen und zwei Isobaren

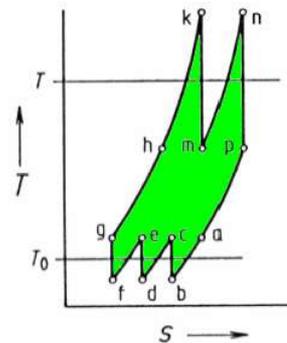


Bild M9-8

Isex-Gasturbinen-Prozeß

Annäherung der Isotherme durch eine Folge von Isentropen und Isobaren

Thermischer Wirkungsgrad $\eta_t = \eta_C = 1 - \frac{T_0}{T}$ (5.50)

Dampfkraftmaschine

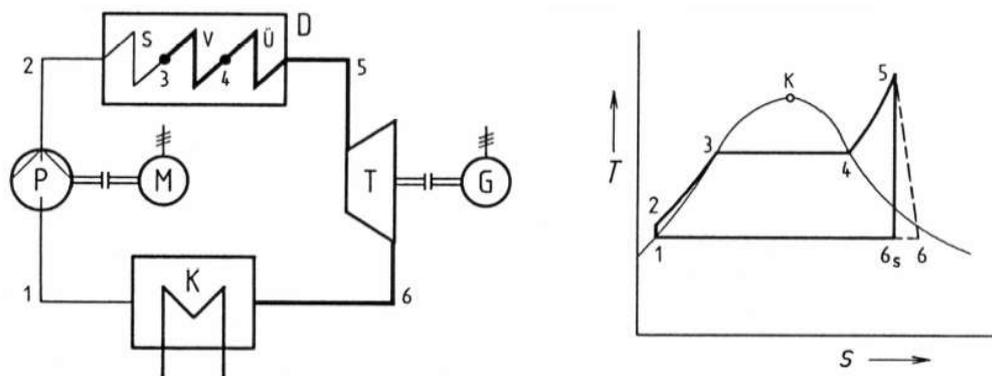


Bild M9-1 Einfache Dampfkraftmaschine

Anlagenschema und CLAUSIUS-RANKINE-Prozeß

P	Speisepumpe	1	Kondensat	Ü	Überhitzer	4	Sattdampf
M	Antriebsmotor	1-2	isentrope Druckerhöhung	5		4-5	isobare Überhitzung
D	Dampferzeuger	2	Speisewasser	T	Turbine	5	Frischdampf
S	Speisewasser- vorwärmung	2-3	isobare Speisewasser- vorwärmung	5-6 _s		5-6 _s	isentrope Expansion
		3	(gesättigte Flüssigkeit)	5-6		5-6	reale Expansion
V	Verdampfer	3-4	isobare Verdampfung	G	Generator	6 _s /6	Abdampf
				K	Kondensator	6 _s /6-1	isobare Kondensation

Wärmezufuhr $\dot{Q}_{25} = \dot{m} (h_5 - h_2)$ (9.1)

Flüssigkeitswärme $q_f = h'_3 - h_2$ (9.2)

Verdampfungswärme $r = h''_4 - h'_3$ (9.3)

Überhitzungswärme $q_{\ddot{u}} = h_5 - h''_4$ (9.4)

Turbinenleistung $P_T = \dot{m} (h_6 - h_5)$ (9.5)

Kondensatorleistung $\dot{Q}_0 = \dot{m} (h'_1 - h_6)$ (9.7)

Speisepumpenleistung $P_P = \dot{m} v'_1 (p_2 - p_1) = \dot{m} (h_2 - h'_1)$ (9.8)

Thermischer Wirkungsgrad $\eta_t = 1 - \frac{h_6 - h'_1}{h_5 - h_2}$ (9.9)

Mittlere Temperatur der Wärmezufuhr $\bar{T} = \frac{h_5 - h_2}{s_5 - s_2}$ (9.12)

Wirkungsgradverbesserung

Zwischenüberhitzung zwischen zwei Turbinenteilen zur Erhöhung des Anteils der bei hohen Temperaturen zugeführten Wärme (Bild 9-3)

Speisewasservorwärmung zur Carnotisierung des Dampfkraftprozesses (Bild 9-4)

Überkritische Verdampfung (Bild 9-6)

Luftvorwärmung zur Ausnutzung der Inneren Energie der Rauchgase

Dampfkältemaschine

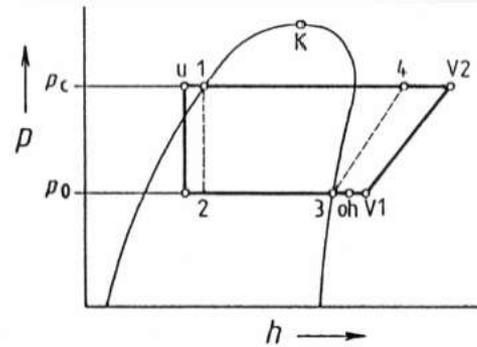
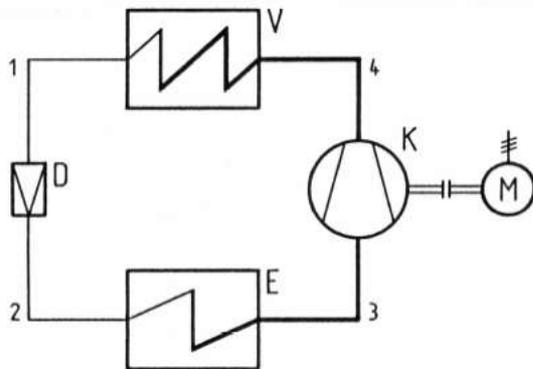


Bild M9-2 Einfache Dampfkältemaschine

Anlagenschema

PLANK-Prozeß

Prozeß mit Unterkühlung und Saugüberhitzung

- D Kältemittelstromregler
- E Verdampfer
- K Kältemittelverdichter
- V Verflüssiger

- 1-2 Drosselung
- 2-3 isobare Wärmezufuhr
- 3-4 isentrope Verdichtung
- 4-1 isobare Wärmeabfuhr

- u Verflüssigeraustritt
- oh Verdampferaustritt
- V1 Verdichtereintritt
- V2 Verdichteraustritt

Unterkühlung $\Delta t_u = t_c - t_u$ (9.20)

Saugüberhitzung am Verdampferaustritt $\Delta t_{oh} = t_{oh} - t_o$ (9.21)

Saugüberhitzung am Verdichtereintritt $\Delta t_{V1} = t_{V1} - t_o$ (9.22)

Kälteleistung $\dot{Q}_0 = \dot{m}_R (h_{oh} - h_u)$ (9.23)

Verdichtungsleistung $P_V = \dot{m}_R (h_{V2} - h_{V1})$ (9.24)

Verflüssigerleistung Heizleistung $\dot{Q}_c = \dot{Q}_{WP} = \dot{m}_R (h_u - h_{V2})$ (9.25)

Kälteleistungszahl $\epsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_V} = \frac{h_{oh} - h_u}{h_{V2} - h_{V1}}$ (9.26)

Heizleistungszahl $\epsilon_{WP} = \frac{|\dot{Q}_{WP}|}{P_V} = \frac{h_{V2} - h_u}{h_{V2} - h_{V1}}$ (9.27)

3.0 Zustandsgleichungen idealer Gase

3.1 Gasgleichung, Gaskonstanten

Gasgleichung

Thermische Zustandsgleichung für das ideale Verhalten von Gasen

$$\text{Spezifische Größen} \quad p v = R T \quad (6.1) \quad \text{Extensive Größen} \quad p V = m R T \quad (6.2)$$

$$\text{Molare Größen} \quad p V_m = R_m T \quad (6.4)$$

$$\text{Differentialiale} \quad v dp + p dv = R dT \quad (6.5) \quad \frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T} \quad (6.6)$$

$$\text{Molare Gaskonstante} \quad R_m = MR = 8,315 \text{ kJ}/(\text{kmol K}) \quad (6.3), (6.9)$$

3.2 Kalorische Zustandsgrößen

Enthalpie

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (6.25)$$

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (6.23)$$

$$H_{m2} - H_{m1} = C_{mp} (T_2 - T_1) \quad (6.27)$$

$$dh = c_p dT \quad (6.21)$$

Innere Energie

$$U_2 - U_1 = m (u_2 - u_1) \quad (6.26)$$

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (6.24)$$

$$U_{m2} - U_{m1} = C_{mv} (T_2 - T_1) \quad (6.28)$$

$$du = c_v dT$$

3.3 Entropie

$$\text{Entropiedifferenzen} \quad s_2 - s_1 = c_p \ln (T_2/T_1) - R \ln (p_2/p_1) \quad (6.42)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln (T_2/T_1) + R \ln (v_2/v_1) \quad (6.43)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln (p_2/p_1) + c_p \ln (v_2/v_1) \quad (6.44)$$

Verdampfen und Verflüssigen**Kritischer Punkt:**

Thermische Zustandsgrößen im kritischen Punkt (Bild 3-8, M3-1, M3-2)

kritische Temperatur T_{kr} , kritischer Druck p_{kr} , kritisches spezifisches Volumen v_{kr}

Oberhalb des kritischen Druckes p_{kr} findet der Phasenwechsel zwischen Flüssigkeit und Dampf ohne Blasen- oder Tropfenbildung statt.

Nassdampf:

Naßdampfzustände im Naßgebiet des p,v -Diagramms (Bild 3-9, M3-1) und auf der Dampfdruckkurve des p,t -Diagramms (Bild 3-10, M3-2)

Sättigungsdampfdruck p' Sättigungstemperatur t' Dampfdruckkurve (3.6), (3.8), (3.9)

$$p = p' = p'' \quad t = t' = t'' \quad p' = p'(t) \text{ oder } t' = t'(p)$$

Dampfgehalt
$$x_d = \frac{m''}{m_d} = \frac{v_d - v'}{v'' - v'} \quad (3.7), (3.14)$$

Masse und Volumen
$$m_d = m' + m'' \quad V_d = V' + V'' \quad (3.10), (3.11)$$

Thermische Zustandsgleichung für Naßdampf

$$v_d = (1 - x_d) v' + x_d v'' = v' + x_d (v'' - v') \quad (3.13)$$

$$x_d = \frac{h - h'}{h'' - h'} = \frac{s - s'}{s'' - s'} = \frac{v - v'}{v'' - v'}$$