

# **Technische Thermodynamik / Energielehre**

3. Band eines Kompendiums zur Lehrveranstaltung

## **Formelsammlung**

für das Grundstudium Maschinenbau, Verfahrenstechnik  
und Chemieingenieurwesen



Technische Universität Dresden  
Institut für Energietechnik  
Professur für Technische Thermodynamik  
Dr.-Ing. J. Meinert

Umdruck zur Lehrveranstaltung „Technische Thermodynamik / Teil I - Energielehre“  
für das Grundstudium Maschinenbau / Verfahrenstechnik / Chemieingenieurwesen

8. Auflage, Wintersemester 2009/10

Bearbeiter: Dr.-Ing. J. Meinert  
Bearbeitungsschluss: 31.08.2009

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Quantität von Systemen</b>	<b>5</b>
1.1	Masse(-strom), Stoffmenge(-strom), Volumen(-strom) . . . . .	5
1.2	Homogene Stoffgemische ( $i = 1 \dots k$ Komponenten) . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Thermisches und energetisches Zustandsverhalten</b>	<b>6</b>
2.1	Reine reale Stoffe . . . . .	7
2.2	Ideale / perfekte Gase bzw. Gasgemische . . . . .	8
2.2.1	Thermisches Zustandsverhalten . . . . .	8
2.2.2	Energetisches Zustandsverhalten . . . . .	8
2.3	Feuchte Luft . . . . .	10
2.3.1	Definition wichtiger Größen . . . . .	10
2.3.2	Thermisches Zustandsverhalten . . . . .	10
2.3.3	Energetisches Zustandsverhalten . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Massebilanzen</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Erster Hauptsatz für ruhende Systeme</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Zweiter Hauptsatz für ruhende Systeme</b>	<b>14</b>
5.1	Entropiebilanzen . . . . .	14
5.2	Exergiebilanzen . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Einfache, innerlich reversible Prozesse</b>	<b>16</b>
6.1	Bezeichnungen spezieller Zustandsänderungen . . . . .	16
6.2	Beziehungen zwischen Zustandsgrößen bei perfekten Gasen . . . . .	16
6.3	Spezielle Berechnungsgleichungen für spezifische Prozessgrößen . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Ausgewählte stationäre irreversible Prozesse</b>	<b>18</b>
7.1	Einfache Prozesse mit beliebigen Medien . . . . .	18
7.2	Prozesse mit feuchter Luft . . . . .	19
<b>8</b>	<b>Physikalische Größen und Konstanten sowie deren Einheiten</b>	<b>20</b>
8.1	Ausgewählte Größen mit gebräuchlichen Einheiten . . . . .	20
8.2	Wichtige Konstanten . . . . .	20
8.3	Wichtige angelsächsische Einheiten und deren Umrechnung . . . . .	21
<b>9</b>	<b>Stoffdatentabellen und Zustandsdiagramme</b>	<b>21</b>

## Symbolverzeichnis

### Symbole und Kennzeichnungen

$A$	Fläche
$c$	Strömungsgeschwindigkeit
$c_p$	(isobare) spez. Wärmekapazität
$c_v$	(isochore) spez. Wärmekapazität
$e$	spezifische Exergie
$E$	Exergie des Systeminhaltes
$\dot{E}$	stoffgebundener Exergiestrom
$\dot{E}_P$	Exergie der mechanischen Leistung
$\dot{E}_Q$	Exergie des Wärmestromes
$\dot{E}_V$	Exergieverluststrom
$g$	Erdbeschleunigung
$H [h]$	[spezifische] Enthalpie
$i, j, k, l$	Zählgrößen
$m, \dot{m}$	Masse, Massestrom
$M$	molare Masse
$M_d$	Drehmoment an einer Welle
$n$	Polytrophenexponent
$n$	Drehzahl
$n, \dot{n}$	Stoffmenge, Stoffmengestrom
$p$	Druck, Partialdruck
$P [\equiv \dot{W}]$	mechanische Leistung
$Q [q], \dot{Q}$	[spezifische] Wärme, Wärmestrom
$\hat{q}$	Wärmestromdichte
$R$	spezifische Gaskonstante
$\bar{R}$	universelle (molare) Gaskonstante
$S [s], \dot{S}$	[spezifische] Entropie, Entropiestrom
$S_{irr}, \dot{S}_{irr}$	Entropieproduktion(-strom)
$S_Q, \dot{S}_Q$	Entropie(-strom) infolge Wärme(-strom)
$t$	Celsius-Temperatur
$T$	Kelvin-Temperatur
$U [u]$	[spezifische] innere Energie
$V [v], \dot{V}$	[spezifisches] Volumen, Volumenstrom
$W [w]$	[spezifische] Arbeit
$W_R [w_R]$	[spezifische] Reibungsarbeit
$W_t [w_t]$	[spezifische] technische Arbeit
$W_V [w_V]$	[spezifische] Volumenänderungsarbeit
$x$	Wassergehalt
$x$	Dampfmasseanteil
$y$	allgemeine spezifische Zustandsgröße
$z$	Höhenkoordinate

### Griechische Symbole

$\eta_g$	Gütegrad
$\kappa$	Isentropenexponent
$\mu$	Massestromverhältnis
$\xi$	Masseanteil
$\varrho$	Dichte
$\tau$	Zeit
$\varphi$	relative Luftfeuchte
$\psi$	Stoffmengeanteil (Molanteil)

### Tiefgestellte Indizes

1	Anfangs- bzw. Eintrittszustand <sup>1</sup>
2	End- bzw. Austrittszustand <sup>1</sup>
$BG$	Bilanzgrenze
$E$	Entspannung / Expansion
$i$	Komponente $i$
$fL$	feuchte Luft
$L$	trockene Luft
$M$	Gasgemisch, Mischungszustand
$rev$	inn. reversibler Vergleichsprozess
$S$	Siede- bzw. Sättigungszustand
$U$	Umgebungszustand
$V$	Verdichtung / Kompression

### Hochgestellte Indizes

$y'$	siedende Flüssigkeit
$y''$	trocken gesättigter Dampf
$\bar{y}$	molare Größe

### Wichtige Begriffe

- „...strom“  
→ zeitbezogen
- spezifische Größe  
→ massebezogen
- molare Größe  
→ stoffmengebezogen

<sup>1</sup>bei einfachen Prozessen

# 1 Quantität von Systemen

## 1.1 Masse(-strom), Stoffmenge(-strom), Volumen(-strom)

- Zusammenhang zwischen Masse(-strom) und Stoffmenge(-strom):

$$\boxed{m = n \cdot M} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{\dot{m} = \dot{n} \cdot M} \quad (1)$$

- Zusammenhang zwischen Masse(-strom) und Volumen(-strom):

$$m = \rho V = \frac{V}{v} \quad \text{bzw.} \quad \dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v} \quad (2)$$

## 1.2 Homogene Stoffgemische ( $i = 1 \dots k$ Komponenten)

- Gesamtmasse(-strom):

$$m = \sum_{i=1}^k m_i \quad \rightarrow \quad \dot{m} = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i \quad (3)$$

- Gesamtstoffmenge(-strom):

$$n = \sum_{i=1}^k n_i \quad \rightarrow \quad \dot{n} = \sum_{i=1}^k \dot{n}_i \quad (4)$$

- Masseanteil:

$$\boxed{\xi_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}}} \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^k \xi_i = 1 \quad (5)$$

- Stoffmengeanteil (Molanteil):

$$\boxed{\psi_i = \frac{n_i}{n} = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}}} \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^k \psi_i = 1 \quad (6)$$

- Scheinbare molare Masse:

$$\boxed{M_M = \sum_{i=1}^k \psi_i M_i \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{M_M} = \sum_{i=1}^k \frac{\xi_i}{M_i}} \quad (7)$$

- Weitere Zusammenhänge:

$$\xi_i = \psi_i \frac{M_i}{M_M} \quad \rightarrow \quad \psi_i = \xi_i \frac{M_M}{M_i} \quad \rightarrow \quad M_M = \frac{m}{n} = \frac{m_i}{\xi_i} \frac{\psi_i}{n_i} = M_i \frac{\psi_i}{\xi_i} \quad (8)$$

## 2 Thermisches und energetisches Zustandsverhalten

### • Thermische Zustandsgrößen:

→ Druck  $p$ , Temperatur  $T$ , spezifisches Volumen  $v$ , Dichte  $\varrho$ :

◦ Allgemeiner Zusammenhang (für eine Phase):

$$\boxed{v = v(T, p)} \quad [v] = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \rightarrow \quad \text{Häufig verwendet:} \quad \boxed{\varrho = \frac{1}{v}}$$

### • Energetische Zustandsgrößen (für eine Phase):

→ spezifische innere Energie:	$u = u(T, v)$	$[u] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	{	• Definition: <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"><math>h = u + p v</math></div>
→ spezifische Enthalpie:	$h = h(T, p)$	$[h] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$		
→ spezifische Entropie:	$s = s(T, p)$	$[s] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$		

→ Differenzial der spezifischen Entropie:

$$ds = \frac{du + p dv}{T} = \frac{dh - v dp}{T} \quad (9)$$

→ spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck:

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad [c_p] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (10)$$

→ spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad [c_v] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (11)$$

• **Beachte:** Die Bezeichnungen „bei konstantem Druck“ bzw. „bei konstantem Volumen“ kennzeichnen das Messverfahren zur Bestimmung dieser Wärmekapazitäten. Dies bedeutet **nicht**, dass  $c_p$  bzw.  $c_v$  nur für isobare bzw. isochore Zustandsänderungen angewendet werden dürfen.

→ mittlere spezifische Wärmekapazität im Temperaturbereich  $T_0 \rightarrow T$ :

$$c_{p,m}|_{T_0}^T = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad \text{bzw.} \quad c_{v,m}|_{T_0}^T = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T c_v(T) dT \quad (12)$$

→ Damit ergeben sich die Differenzen der inneren Energie sowie der Enthalpie zu

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= c_{v,m}|_{T_0}^{T_2} (T_2 - T_0) - c_{v,m}|_{T_0}^{T_1} (T_1 - T_0) \\ h_2 - h_1 &= c_{p,m}|_{T_0}^{T_2} (T_2 - T_0) - c_{p,m}|_{T_0}^{T_1} (T_1 - T_0) \end{aligned} \quad (13)$$

## 2.1 Reine reale Stoffe

Alle spezifischen Zustandsgrößen werden **hier** mit  $y$  bezeichnet,  
d. h. die Größe  $y$  kann durch  $v$ ,  $h$ ,  $s$  oder  $u$  ersetzt werden.

- **Charakterisierung des Zustandsverhaltens:**

Bezeichnung	Temperatur	Dampfmasseanteil	Phasentest
unterkühlte Flüssigkeit	$T < T_S(p)$	$x$ nicht definiert	$y < y'$
siedende Flüssigkeit	}	$x = 0$	$y = y'$
Zweiphasengebiet („Nassdampf“)		$0 < x < 1$	$y' < y < y''$
trocken gesättigter Dampf		$x = 1$	$y = y''$
überhitzter Dampf	$T > T_S(p)$	$x$ nicht definiert	$y > y''$

$T_S(p)$  ... Siedetemperatur beim Druck  $p$

- **Ermittlung der Zustandsgrößen:**

→ unterkühlte/siedende Flüssigkeit:

$$y \approx y'(T) \tag{14}$$

$y'$  ... Stoffwerte der siedenden Flüssigkeit (Wasser: Tab. 9.4)

→ Zweiphasengebiet („Nassdampf“) inkl. trocken gesättigter Dampf („Sattdampf“):

$$y = y' + x(y'' - y') \tag{15}$$

$y'$  ... Stoffwerte der siedenden Flüssigkeit (Wasser: Tab. 9.3 / 9.4)

$y''$  ... Stoffwerte des trocken gesättigten Dampfes (Wasser: Tab. 9.3 / 9.4)

- *Dampfmasseanteil:*

- *Spezifische Verdampfungsenthalpie:*

$$x = \frac{m''}{m' + m''} \quad \text{bzw.} \quad x = \frac{y - y'}{y'' - y'} \tag{16}$$

$$h'' - h' = T_S(s'' - s') \tag{17}$$

→ überhitzter Dampf (Gasphase):

$$y = y(p, T) \tag{18}$$

(Wasser: Tab. 9.2 →  $v, u, h, s = f(p, t)$ )

- **Hinweis:**

Tab. 9.4 enthält thermische und energetische Zustandsgrößen  
für siedende Wasserflüssigkeit und trocken gesättigten Wasserdampf.

$t$	$p_S(t)$	$10^3 \cdot v'$	$v''$	$u'$	$u''$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
°C	MPa	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/(kg K)	

Tab. 9.3 analog mit vertauschten Spalten 1 und 2.

## 2.2 Ideale / perfekte Gase bzw. Gasmische

### 2.2.1 Thermisches Zustandsverhalten

- **Thermische Zustandsgleichung (Idealgasbeziehung):** ( $[T] = 1 \text{ K}$ )

→ für reine Gase oder Einzelkomponente  $i$  im nicht reagierenden Gasmisch:

- für stoffdichte Systeme:

$$pV = mRT = n\bar{R}T \quad \rightarrow \quad p_i V = pV_i = m_i R_i T = n_i \bar{R}T \quad (19)$$

- für stoffdurchlässige Systeme (zeitbezogen):

$$p\dot{V} = \dot{m}RT = \dot{n}\bar{R}T \quad \rightarrow \quad p_i \dot{V} = p\dot{V}_i = \dot{m}_i R_i T = \dot{n}_i \bar{R}T \quad (20)$$

→ intensive Schreibweisen bzw. umgestellte Formen:

$$pv = RT \quad \rightarrow \quad p\bar{v} = \bar{R}T \quad \text{bzw.} \quad \frac{p}{T} = \frac{R}{v} = \frac{\bar{R}}{\bar{v}} \quad \text{oder} \quad \varrho = \frac{p}{RT} \quad (21)$$

- **Spezifische Gaskonstante:**

→ Gaskonstante eines Einzelgases ( $M \dots$  molare Masse, aus Tab. 9.1):

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad \text{mit} \quad \bar{R} = 8,3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} \quad (22)$$

→ Scheinbare spezifische Gaskonstante eines Gasmisches:

$$R_M = \frac{\bar{R}}{M_M} \quad \text{mit} \quad M_M \text{ nach Gl. (7)} \quad \text{bzw.} \quad R_M = \sum_{i=1}^k \xi_i R_i \quad (23)$$

- **Partialdruck bzw. Partialvolumen eines Einzelgases in einem Gasmisch:**

$$p_i = \psi_i p \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^k p_i = p \quad \text{bzw.} \quad V_i = \psi_i V \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^k V_i = V \quad (24)$$

### 2.2.2 Energetisches Zustandsverhalten

BEACHTEN: → Gleichungen nur für **perfekte** Gase ( $c_p \neq f(T) = \text{konst.}$ ) gültig.

→ **Bezugszustand**  $[0]$ : Wegen  $h_0 = u_0 + p_0 v_0 = u_0 + RT_0$  darf jeweils nur  $h_0$  **oder**  $u_0$  gleich Null gesetzt werden ( $p_0 v_0 = RT_0 > 0!$ ).

- **Absolutwert / Differenz der spezifischen Enthalpie:**

→ für reine Gase:

$$h = c_p(T - T_0) + h_0 \quad \rightarrow \quad h_0 = h(T_0) \dots \text{Bezugszustand (s. o.)}$$

$$\boxed{h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} h_2 - h_1 &= u_2 - u_1 + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\ &= u_2 - u_1 + R(T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (25)$$



• **Absolutwert / Differenz der spezifischen inneren Energie:**

→ für reine Gase:

$$\begin{aligned}
 u &= c_v (T - T_0) + u_0 && \rightarrow && u_0 = u(T_0) \dots \text{Bezugszustand (s. o.)} \\
 \boxed{u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1)} &&& \rightarrow && \begin{aligned} u_2 - u_1 &= h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\ &= h_2 - h_1 - R(T_2 - T_1) \end{aligned}
 \end{aligned} \quad (26)$$

• **Absolutwert / Differenz der spezifischen Entropie:** ( $[T] = 1 \text{ K}$ )

→ für reine Gase:

$$\begin{aligned}
 s &= c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0} + s_0 = c_v \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{v}{v_0} + s_0 \\
 s_0 &= s(T_0) \dots \text{Bezugszustand (s. o.)} \\
 \boxed{s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}} &&& (27)
 \end{aligned}$$

• **Zusammenhang zwischen  $c_p$ ,  $c_v$  und  $R$ :**

$$\begin{aligned}
 \boxed{c_p - c_v = R} &&& \text{ bzw. } && \bar{c}_p - \bar{c}_v = \bar{R} && (28) \\
 \text{bzw. } \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{c_p}{c_p - R} &&& \rightarrow && c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R; \quad c_v = \frac{R}{\kappa - 1}
 \end{aligned}$$

• **Speziell für (nicht reagierende) Gasgemische gilt:**

→ Allgemein: ( $M \dots$  Gemisch,  $i \dots$  Komponente  $i$ )

$$\boxed{y_M = \sum_{i=1}^k \xi_i y_i} \quad \text{mit } y = \begin{cases} c_p & \dots \text{ (isobare) spezifische Wärmekapazität} \\ c_v & \dots \text{ (isochore) spezifische Wärmekapazität} \\ h & \dots \text{ spezifische Enthalpie} \\ R & \dots \text{ Gaskonstante} \\ s & \dots \text{ spezifische Entropie (Nur bei unver-} \\ & \quad \text{änderlicher Gemischzusammensetzung!)} \\ u & \dots \text{ spezifische innere Energie} \\ v & \dots \text{ spezifisches Volumen} \end{cases} \quad (29)$$

→ Besonderheit bei der Berechnung der spezifischen Entropie eines Gasgemisches unter Berücksichtigung der Mischungseffekte:

$$s_M = \sum_{i=1}^k \xi_i s_i^* \quad \text{mit} \quad s_i^* = c_{p_i} \ln \frac{T_M}{T_0} - R_i \ln \frac{p_i}{p_0} + s_{i0} \quad (30)$$

$s_i^*$  ... spezifische Entropie der Gaskomponente  $i$  im Gasgemisch

$p_i$  ... Partialdruck der Gaskomponente  $i$

## 2.3 Feuchte Luft

### 2.3.1 Definition wichtiger Größen

- **Allgemeine Bezeichnungen:**

$m_L, m_W, m_{fL} \dots$     Trockenluftmasse, Wassermasse, Feuchtluftmasse  
 $p_W \dots$     Partialdruck des Wasserdampfes  
 $p_S(t) \dots$     Sättigungsdruck des Wassers bei  $t$  (aus Tab. 9.4 a)

- **Wassergehalt:**<sup>2</sup>

$$\boxed{x = \frac{m_W}{m_L} = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_L}} \quad \bullet \text{ aber: } \quad \xi_W = \underbrace{\frac{m_W}{m_L + m_W}}_{\text{Masseanteil Wasser}} = \frac{m_W}{m_{fL}} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{fL} &= m_W + m_L \\ m_{fL} &= x m_L + m_L = (1 + x) m_L \end{aligned} \right\} \rightarrow \boxed{m_L = \frac{m_{fL}}{1 + x}}$$

- **Relative Luftfeuchte:**

$$\boxed{\varphi = \frac{p_W}{p_S(t)}} \quad \left\{ \begin{array}{lll} \varphi = 0 & \dots & x = 0 \quad \dots \text{ trockene Luft} \\ 0 < \varphi < 1 & \dots & 0 \leq x \leq x_S(t) \quad \dots \text{ ungesättigte, feuchte Luft} \\ \varphi = 1 & \dots & x = x_S(t) \quad \dots \text{ gesättigte feuchte Luft} \\ \varphi \text{ n. def.} & \dots & x > x_S(t) \quad \dots \text{ übersättigte feuchte Luft} \end{array} \right. \quad (32)$$

- **Weitere Zusammenhänge:**

→ ungesättigte/gesättigte feuchte Luft ( $0 < \varphi \leq 1$ ):

$$\xi_W = \frac{x}{1 + x} \quad \rightarrow \quad \xi_L = 1 - \xi_W \quad (33)$$

$$x = \frac{\xi_W}{1 - \xi_W} = \frac{M_W}{M_L} \frac{\psi_W}{1 - \psi_W} = \frac{M_W}{M_L} \frac{p_W}{p - p_W} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M_W = 18,02 \text{ kg/kmol} \\ M_L = 28,96 \text{ kg/kmol} \end{array} \right. \quad (34)$$

$$x = \frac{M_W}{M_L} \frac{\varphi p_S(t)}{p - \varphi p_S(t)} = 0,622 \frac{\varphi p_S(t)}{p - \varphi p_S(t)} \quad \text{bzw.} \quad \varphi = \frac{p}{p_S(t)} \frac{x}{0,622 + x} \quad (35)$$

Der Sättigungs-Wassergehalt  $x_S(t)$  ist aus Gl. (35) berechenbar mit  $\varphi = 1$ .

### 2.3.2 Thermisches Zustandsverhalten

- **Thermische Zustandsgleichung:** (Gasgemisch aus trockener Luft  $L$  und Wasserdampf  $W$ )

$$\boxed{p V = m R_{fL} T = n \bar{R} T} \quad (36)$$

$$p_W V = m_W R_W T = n_W \bar{R} T \quad \rightarrow \quad p_L V = m_L R_L T = n_L \bar{R} T$$

- **Spezifische (scheinbare) Gaskonstante:**

$$R_{fL} = \xi_W R_W + (1 - \xi_W) R_L = R_W \frac{0,622 + x}{1 + x} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_W = 0,4615 \text{ kJ/(kg K)} \\ R_L = 0,2871 \text{ kJ/(kg K)} \end{array} \right. \quad (37)$$

<sup>2</sup>Wassermasse = **W**asser**D**ampf + **W**asser**F**lüssigkeit + **W**asser**E**is →  $m_W = m_{WD} + m_{WF} + m_{WE}$ .

• **Spezifisches Volumen bzw. Dichte:**

→ ungesättigte/gesättigte feuchte Luft ( $x \leq x_S$ ):

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{R_W T}{p} \frac{0,622 + x}{1 + x} \quad (38)$$

Das spezifische Volumen gesättigter feuchter Luft  $v_S$  ist aus Gl. (38) berechenbar mit  $x = x_S$  ( $x_S$  aus Gl. (35)).

→ übersättigte feuchte Luft ( $x > x_S$ ) mit flüssigem Wasseranteil:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1 + x} \left[ \frac{R_W T}{p} (0,622 + x_S) + (x - x_S) v'(t) \right] \quad (39)$$

$v'(t)$  ... spezifisches Volumen der Wasserflüssigkeit (Tab. 9.4)

### 2.3.3 Energetisches Zustandsverhalten

• **Spezifische Enthalpie der feuchten Luft:**

Spezifische Enthalpie  $h = \frac{H_{fL}}{m_L}$  mit  $[h] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_L}$  (bezogen auf Trockenluftmasse).

→ ungesättigte/gesättigte feuchte Luft ( $x \leq x_S$ ):

$$\frac{h}{\text{kJ/kg}_L} = \left( 1 + 1,86 \frac{x}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \right) \frac{t}{^\circ\text{C}} + 2501 \frac{x}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \quad (40)$$

Die spezifische Enthalpie gesättigter feuchter Luft  $h_S$  ist aus Gl. (40) berechenbar mit  $x = x_S$  ( $x_S$  aus Gl. (35)).

→ übersättigte feuchte Luft ( $x > x_S$ ):

•  $t > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  → mit flüssigem Wasseranteil:

$$\frac{h}{\text{kJ/kg}_L} = \left( 1 - 2,33 \frac{x_S}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} + 4,19 \frac{x}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \right) \frac{t}{^\circ\text{C}} + 2501 \frac{x_S}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \quad (41)$$

•  $t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  → mit festem Wasseranteil (Eis):

$$\frac{h}{\text{kJ/kg}_L} = \left( 1 - 0,23 \frac{x_S}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} + 2,09 \frac{x}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \right) \frac{t}{^\circ\text{C}} + 2835 \frac{x_S}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} - 334 \frac{x}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \quad (42)$$

•  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  → mit teils flüssigem, teils festem Wasseranteil:  $\begin{cases} WF \dots \text{WasserFlüssigkeit} \\ WE \dots \text{WasserEis} \end{cases}$

$$\frac{h}{\text{kJ/kg}_L} = 2501 \frac{x_S}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} - 334 \frac{x_{WE}}{\text{kg}_W/\text{kg}_L} \quad \text{wegen } h_{WF}(0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0 \quad \text{laut Def.} \quad (43)$$

## Vorzeichenregelung für alle Bilanzgleichungen

- Plus (+) ... dem System zugeführt, am System verrichtet
- Minus (-) ... vom System abgeführt, vom System verrichtet

## 3 Massebilanzen

- **Allgemeine Schreibweise:**

$$\boxed{\frac{dm}{d\tau} = \underbrace{\sum_{i=1}^k \dot{m}_i}_{(2)} - \underbrace{\sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j}_{(3)}} \quad (44)$$

- (1) ... zeitliche Änderung der Masse im System (instationäres Glied)
- (2) ... Summe der zugeführten Massenströme (Einlassöffnungen, Index  $i$ )
- (3) ... Summe der abgeführten Massenströme (Auslassöffnungen, Index  $j$ )

- **1. Spezialfall: Stoffdichte Systeme** ( $\dot{m}_i = \dot{m}_j = 0$ , Prozessverlauf  $\boxed{1} \rightarrow \boxed{2}$ )

→ Aus Gl. (44):

$$dm = 0 \quad \rightarrow \quad \text{Integration:} \quad \boxed{m_2 - m_1 = 0} \quad (45)$$

- **2. Spezialfall: Stoffdurchlässige Systeme:**

→ Aus Gl. (44) für stationäres Verhalten ( $dm/d\tau = 0$ ):

$$0 = \sum_{i=1}^k \dot{m}_i - \sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^k \dot{m}_i = \sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j \quad (46)$$

→ Instationäres, einfaches System (mit je einer Ein- und Auslassöffnung):

$$\frac{dm}{d\tau} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (47)$$

→ Spezielle Schreibweise für stationäres System mit je einer Ein- und Auslassöffnung:

$$\boxed{\dot{m}_1 = \dot{m}_2} \quad (48)$$

- **Berechnung des Masse- bzw. Volumenstromes in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und -querschnittsfläche:**

→ Kontinuitätsgleichung für eine eindimensionale Strömung („Pfropfenströmung“):

$$\dot{V} = cA \quad \text{bzw.} \quad \dot{m} = \rho \dot{V} = \rho cA = \frac{cA}{v} \quad (49)$$

$A$  ... Strömungsquerschnittsfläche in  $\text{m}^2$

## 4 Erster Hauptsatz für ruhende Systeme

### • Allgemeine Schreibweise:

$$\underbrace{\frac{dU}{d\tau}}_{(1)} = \underbrace{P}_{(2)} + \underbrace{\dot{Q}}_{(3)} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \dot{m}_i \left( h_i + \frac{c_i^2}{2} + g z_i \right)}_{(4)} - \underbrace{\sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j \left( h_j + \frac{c_j^2}{2} + g z_j \right)}_{(5)} \quad (50)$$

- (1) ... zeitliche Änderung der inneren Energie des Systems (instationäres Glied)
- (2) ... Summe der zu- bzw. abgeführten mechanischen Leistungen
- (3) ... Summe der zu- bzw. abgeführten Wärmeströme (nichtstoffgebundene Energie)
- (4) ... Summe der zugeführten stoffgebundenen Energie (Einlassöffnungen, Index  $i$ )  
( $h_i$  ... thermische,  $c_i^2/2$  ... kinetische und  $g z_i$  ... potenzielle Energie)
- (5) ... Summe der abgeführten stoffgebundenen Energie (Auslassöffnungen, Index  $j$ )

### • 1. Spezialfall: Stoffdichte Systeme ( $\dot{m}_i = \dot{m}_j = 0$ , Prozessverlauf $\boxed{1} \rightarrow \boxed{2}$ )

→ Aus Gl. (50) gilt mit der anschaulicheren Schreibweise  $P \equiv \dot{W}$ :

$$dU = (\dot{W} + \dot{Q}) d\tau = dW + dQ \quad \rightarrow \text{Integration: } \boxed{U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12}} \quad (51)$$

→ Berechnung der Arbeit bei reversibler und damit quasistatischer Zustandsänderung:

$$dW_{rev} = dW_V = -p dV \quad \text{bzw.} \quad W_{12, rev} = W_{V, 12} = - \int_1^{2, rev} p(V) dV \quad (52)$$

○ mit  $dU = dH - d(pV) = dH - p dV - V dp$  wird aus Gl. (51) und (52):

$$dH = dQ + dW_t \quad \text{mit} \quad dW_t = V dp \quad \text{bzw.} \quad H_2 - H_1 = Q_{12} + \int_1^{2, rev} V(p) dp \quad (53)$$

→ Gl. (51) nach Division durch Masse  $m$  (spezifisch):  $u_2 - u_1 = q_{12} + w_{12}$

### • 2. Spezialfall: Stoffdurchlässige Systeme $\boxed{\dot{H} = \dot{m} h}$

→ Aus Gl. (50) für (stationäres Verhalten ( $dU/d\tau = 0$ ):

$$0 = P + \dot{Q} + \sum_{i=1}^k \dot{m}_i \left( h_i + \frac{c_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j \left( h_j + \frac{c_j^2}{2} + g z_j \right) \quad (54)$$

→ Spezielle Schreibweise für stationäres System mit je einer Ein- und Auslassöffnung:

$$\boxed{P_{12} + \dot{Q}_{12} = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]} \quad (55)$$

• Mechanische Leistung an einer Welle:  $P_{12} (= \dot{W}_W) = 2\pi n M_d \begin{cases} n \dots & \text{Drehzahl} \\ M_d \dots & \text{Drehmoment} \end{cases}$

• Gl. (55) nach Division durch Massestrom  $\dot{m}$  (spezifisch):

$$w_{t, 12} + q_{12} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad \text{mit} \quad w_{t, 12} = \frac{P_{12}}{\dot{m}} \left( \equiv \frac{\dot{W}_{t, 12}}{\dot{m}} \right) \quad (56)$$

## 5 Zweiter Hauptsatz für ruhende Systeme

### 5.1 Entropiebilanzen

- **Allgemeine Schreibweise:**

$$\underbrace{\frac{dS}{d\tau}}_{(1)} = \underbrace{\dot{S}_Q}_{(2)} + \underbrace{\dot{S}_{irr}}_{(3)} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \dot{m}_i s_i}_{(4)} - \underbrace{\sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j s_j}_{(5)} \quad (57)$$

- (1) ... zeitliche Änderung der Entropie des Systems (instationäres Glied)
- (2) ... Summe der zu- bzw. abgeführten Entropieströme infolge Wärmetransport
- (3) ... irreversibler Entropieproduktionsstrom
- (4) ... Summe der zugeführten stoffgebundenen Entropie (Einlassöffnungen, Index  $i$ )
- (5) ... Summe der abgeführten stoffgebundenen Entropie (Auslassöffnungen, Index  $j$ )

- **1. Spezialfall: Stoffdichte Systeme** ( $\dot{m}_i = \dot{m}_j = 0$ , Prozessverlauf  $\boxed{1} \rightarrow \boxed{2}$ )

→ Aus Gl. (57) gilt:

$$dS = (\dot{S}_Q + \dot{S}_{irr}) d\tau = dS_Q + dS_{irr} \quad \rightarrow \text{Integration: } \boxed{S_2 - S_1 = S_{Q,12} + S_{irr,12}} \quad (58)$$

→ Gl. (58) nach Division durch Masse  $m$  (spezifisch):  $s_2 - s_1 = s_{q,12} + s_{irr,12}$

- **2. Spezialfall: Stoffdurchlässige Systeme**  $\boxed{\dot{S} = \dot{m} s}$

→ Aus Gl. (57) für stationäres Verhalten ( $dS/d\tau = 0$ ):

$$\dot{S}_Q + \dot{S}_{irr} = \sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j s_j - \sum_{i=1}^k \dot{m}_i s_i \quad (59)$$

→ Spezielle Schreibweise für stationäres System mit je einer Ein- und Auslassöffnung:

$$\boxed{\dot{S}_{Q,12} + \dot{S}_{irr,12} = \dot{m} (s_2 - s_1)} \quad (60)$$

→ Gl. (60) nach Division durch Massestrom  $\dot{m}$  (spezifisch):  $s_2 - s_1 = s_{q,12} + s_{irr,12}$

- **Entropietransport gebunden an Wärme bzw. Wärmestrom:**  $dS_Q = \frac{dQ}{T_{BG}}$

→ Spezialformen bei *lokal einheitlicher* Temperatur der Bilanzgrenze  $T_{BG}$ :

$$S_Q = \frac{1}{T_{BG}} \int_1^2 dQ \quad \rightarrow \quad S_{Q,12} = \frac{Q_{12}}{T_{BG}} \quad \text{bzw.} \quad \dot{S}_{Q,12} = \frac{\dot{Q}_{12}}{T_{BG}} \quad (61)$$

- **Entropieproduktion bzw. Entropieproduktionsstrom:**

→ Ermittlung jeweils als „bilanzschließende“ Größe:

$$\left. \begin{aligned} S_{irr,12} &= S_2 - S_1 - S_{Q,12} \\ \dot{S}_{irr,12} &= \dot{S}_2 - \dot{S}_1 - \dot{S}_{Q,12} \\ &= \dot{m} (s_2 - s_1) - \dot{S}_{Q,12} \end{aligned} \right\} \text{ mit } \left\{ \begin{array}{ll} \text{Prozessklassifizierung:} \\ \dot{S}_{irr,12} > 0 & \text{irreversibel} \\ \dot{S}_{irr,12} = 0 & \text{reversibel} \\ \dot{S}_{irr,12} < 0 & \text{unmöglich} \end{array} \right. \quad (62)$$

## 5.2 Exergiebilanzen

Der Index „U“ bezieht sich auf den Umgebungszustand.

### • Allgemeine Schreibweise:

$$\underbrace{\frac{dE}{d\tau}}_{(1)} = \underbrace{\dot{E}_P}_{(2)} + \underbrace{\dot{E}_Q}_{(3)} - \underbrace{\dot{E}_V}_{(4)} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \dot{m}_i e_i}_{(5)} - \underbrace{\sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j e_j}_{(6)} \quad (63)$$

- (1) ... zeitliche Änderung der Exergie des Systeminhaltes (instationäres Glied)
- (2) ... Summe der zu- bzw. abgeführten Exergien der mechanischen Leistung
- (3) ... Summe der zu- bzw. abgeführten Exergien der Wärme (nichtstoffgebundene Exergie)
- (4) ... Exergieverluststrom
- (5) ... Summe der zugeführten stoffgebundenen Exergie (Einlassöffnungen, Index  $i$ )
- (6) ... Summe der abgeführten stoffgebundenen Exergie (Auslassöffnungen, Index  $j$ )

### • 1. Spezialfall: Stoffdichte Systeme ( $\dot{m}_i = \dot{m}_j = 0$ ): → siehe Fachliteratur

### • 2. Spezialfall: Stoffdurchlässige Systeme: $\dot{E} = \dot{m} e$

→ Aus Gl. (63) für stationäres Verhalten:

$$\dot{E}_P + \dot{E}_Q - \dot{E}_V = \sum_{j=k+1}^l \dot{m}_j e_j - \sum_{i=1}^k \dot{m}_i e_i \quad (64)$$

→ Spezielle Schreibweise für stationäres System mit je einer Ein- und Auslassöffnung:

$$\dot{E}_{P,12} + \dot{E}_{Q,12} - \dot{E}_{V,12} = \dot{E}_2 - \dot{E}_1 = \dot{m} (e_2 - e_1) \quad (65)$$

→ Exergie der mechanischen Leistung:

$$\dot{E}_{P,12} = P_{12} = \dot{m} w_{t,12} \quad (66)$$

→ Exergiestrom des Wärmestromes (allgemeine Form):

$$\dot{E}_{Q,12} = \int_1^2 \left( 1 - \frac{T_U}{T_{BG}} \right) d\dot{Q} \quad (67)$$

○ Spezialform bei *lokal einheitlicher* Temperatur der Bilanzgrenze  $T_{BG}$ :

$$\dot{E}_{Q,12} = \dot{Q}_{12} - T_U \dot{S}_{Q,12} = \left( 1 - \frac{T_U}{T_{BG}} \right) \dot{Q}_{12} \quad (68)$$

→ Exergieverluststrom:

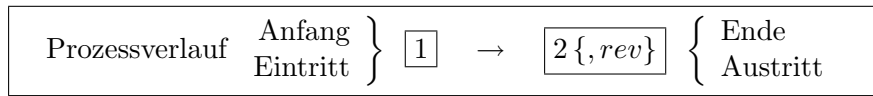
$$\dot{E}_{V,12} = \dot{m} T_U s_{irr,12} = T_U \dot{S}_{irr,12} \quad (69)$$

→ Exergiestrom / Exergiestromdifferenz des Stoffstromes:

$$\dot{E} = \dot{m} \left[ h - h_U - T_U (s - s_U) + \frac{c^2}{2} + g z \right] \quad (70)$$

$$\dot{E}_2 - \dot{E}_1 = \dot{m} (e_2 - e_1) = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 - T_U (s_2 - s_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) \right] \quad (71)$$

## 6 Einfache, innerlich reversible Prozesse



### 6.1 Bezeichnungen spezieller Zustandsänderungen

- Zustandsänderung bei konstantem spezifischen Volumen (**isochor**):

$$dv = 0 \rightarrow \boxed{v = const}$$

- Zustandsänderung bei konstantem Druck (**isobar**):

$$dp = 0 \rightarrow \boxed{p = const}$$

- Zustandsänderung bei konstanter Temperatur (**isotherm**):

$$dT = 0 \rightarrow \boxed{T = const}$$

- Reversible Zustandsänderung in adiabatem System (**adiabat + reversibel = isentrop**):  
 → aus 2. Hauptsatz in differenzieller, spezifischer Schreibweise:

$$ds = \frac{dq}{T} + ds_{irr} \left\{ \begin{array}{l} \text{adiabat} \quad dq = 0 \\ \text{reversibel} \quad ds_{irr} = 0 \end{array} \right\} ds = 0 \rightarrow \boxed{s = const}$$

- Reversible Zustandsänderung allgemein (**polytrop**) → berechenbar nur für perfekte Gase:

$$ds = \frac{dq}{T} + ds_{irr} \left\{ \begin{array}{l} \text{nicht adiabat} \quad dq \neq 0 \\ \text{reversibel} \quad ds_{irr} = 0 \end{array} \right.$$

### 6.2 Beziehungen zwischen Zustandsgrößen bei perfekten Gasen

	Isochore	Isobare	Isotherme	Isentrope	Polytrope
	$v = const$	$p = const$	$T = const$	$s = const$	–
$\frac{v_1}{v_2}$	= 1	$= \frac{T_1}{T_2}$	$= \frac{p_2}{p_1}$	$= \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$	siehe Isentrope ersetze $\kappa$ durch $n$
$\frac{p_1}{p_2}$	$= \frac{T_1}{T_2}$	= 1	$= \frac{v_2}{v_1}$	$= \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$	
$\frac{T_1}{T_2}$	$= \frac{p_1}{p_2}$	$= \frac{v_1}{v_2}$	= 1	$= \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}$	
$s_2 - s_1$	$= c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$	$= c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$	$= R \ln \frac{v_2}{v_1}$	= 0	$= c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1}$
$u_2 - u_1$	$= c_v (T_2 - T_1)$		= 0	$= c_v (T_2 - T_1)$	
$h_2 - h_1$	$= c_p (T_2 - T_1)$		= 0	$= c_p (T_2 - T_1)$	

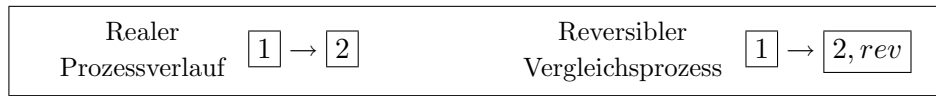


### 6.3 Spezielle Berechnungsgleichungen für spezifische Prozessgrößen

→ Annahme: • Vernachlässigung kinetischer und potenzieller Energie ( $c_2 = c_1, z_2 = z_1$ )

	$q_{12}$	$w_{V,12}$	$w_{t,12} (= P_{12}/\dot{m})$
<b>• bei Zustandsänderungen beliebiger Stoffe</b>			
Isochore	$= u_2 - u_1$	$= 0$	$= v (p_2 - p_1)$
Isobar	$= h_2 - h_1$	$= -p (v_2 - v_1)$	$= 0$
Isentrope	$= 0$	$= u_2 - u_1$	$= h_2 - h_1$
Isotherm	$= T (s_2 - s_1)$	$= u_2 - u_1 - T (s_2 - s_1)$	$= h_2 - h_1 - T (s_2 - s_1)$
<b>• bei Zustandsänderungen perfekter Gase (<math>p v^n = \text{const.}</math>)</b>			
Isochore $n = \pm\infty$	$= c_v (T_2 - T_1)$ $= \frac{p_1 v}{\kappa - 1} \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$ $= \frac{v}{\kappa - 1} (p_2 - p_1)$	$= 0$	$= v (p_2 - p_1)$ $= R (T_2 - T_1)$
Isobare $n = 0$	$= c_p (T_2 - T_1)$ $= -\frac{\kappa}{\kappa - 1} w_{V,12}$	$= p (v_1 - v_2)$ $= R (T_1 - T_2)$	$= 0$
Isotherme $n = 1$	$= -w_{V,12}$ $= -w_{t,12}$	$= R T \ln \frac{p_2}{p_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = p_2 v_2 \ln \frac{p_2}{p_1}$	
Isentrope $n = \kappa$	$= 0$	$= c_v (T_2 - T_1)$ $= \frac{R T_1}{\kappa - 1} \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$ $= \frac{R T_1}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$	$= \kappa w_{V,12}$
Polytrope $n$	$= c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1)$ $= \frac{n - \kappa}{\kappa - 1} w_{V,12}$	$= \frac{R}{n - 1} (T_2 - T_1)$ $= \frac{p_1 v_1}{n - 1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$	$= n w_{V,12}$
<b>• bei Zustandsänderung im Nassdampfgebiet realer Stoffe</b>			
Isochore	$= h'_2 + x_2 (h''_2 - h'_2)$ $- [h'_1 + x_1 (h''_1 - h'_1)]$ $- v (p_2 - p_1)$	$= 0$	$= v (p_2 - p_1)$
Isobare/ Isotherme	$= (h'' - h') (x_2 - x_1)$ $= T (s_2 - s_1)$	$= p (x_2 - x_1) (v'' - v')$	$= 0$
Isentrope	$= 0$	$= h_2 - p_2 v_2 - (h_1 - p_1 v_1)$ mit $h_i = h'_i + x_i (h''_i - h'_i)$ und $v_i = v'_i + x_i (v''_i - v'_i)$	$= h'_2 + x_2 (h''_2 - h'_2)$ $- [h'_1 + x_1 (h''_1 - h'_1)]$

## 7 Ausgewählte stationäre irreversible Prozesse



Die Zustandsgrößen am Ende des reversiblen Vergleichsprozesses 2, rev werden mit Hilfe der Beziehungen aus Kapitel 6 bestimmt.

### 7.1 Einfache Prozesse mit beliebigen Medien

- **Gütegrad der Verdichtung** (Index „V“) bzw. **der Entspannung** (Index „E“):

→ Die eingerahmten Gleichungen sind allgemeingültig.

→ Gütegrade sind definitionsgemäß immer kleiner eins ( $\eta_{g,V/E} < 1$ )

→ Spezielle Voraussetzungen für (Sonder-)Fälle 1 und 2:

Fall 1: • thermisch ideal isoliert (adiabate Hülle,  $\dot{Q}_{12} = 0$ )

• keine Änderung kinetischer und potenzieller Energie ( $c_2 = c_1, z_2 = z_1$ )

Fall 2: • wie Fall 1, jedoch für perfekte Gase mit  $T_{2,rev}$  aus Abschn. 6.2

→ Verdichter:

$$\boxed{\eta_{g,V} = \frac{w_{t,12,rev}}{w_{t,12}}} \quad \text{Fall 1: } \eta_{g,V} = \frac{h_{2,rev} - h_1}{h_2 - h_1}; \quad \text{Fall 2: } \eta_{g,V} = \frac{T_{2,rev} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (72)$$

→ Turbine bzw. Kolbenexpansionsmaschine:

$$\boxed{\eta_{g,E} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12,rev}}} \quad \text{Fall 1: } \eta_{g,E} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,rev} - h_1}; \quad \text{Fall 2: } \eta_{g,E} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2,rev} - T_1} \quad (73)$$

- **Reibungsbehaftete Strömungsvorgänge:** (innere Reibung im Fluid)

→ Annahmen: • thermisch ideal isoliert (adiabate Hülle,  $\dot{Q}_{12} = 0$ )

$$\boxed{h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2 = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1} \quad (74)$$

→ **Spezialfälle:**

◦ Horizontaler Kanal mit konstantem Strömungsquerschnitt  $A$  (siehe auch Gl. (49)):

$$\boxed{h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2}} \quad \text{Masse-erhaltung: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \boxed{\frac{\dot{m}}{A} = \frac{c_1}{v_1} = \frac{c_2}{v_2}} \quad (75)$$

◦ Drosselvorgang:

$$\text{Annahme: } h_i \gg \frac{c_i^2}{2} + g z_i \rightarrow \boxed{h_2 = h_1} \quad (76)$$

◦ Gütegrad einer Düse (Index „Dü“, horizontal  $z_1 = z_2$ ):

$$\eta_{g,Dü} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{c_{2,rev}^2 - c_1^2} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2,rev} - h_1} \quad (77)$$

◦ Gütegrad eines Diffusors (Index „Di“, horizontal  $z_1 = z_2$ ):

$$\eta_{g,Di} = \frac{c_{2,rev}^2 - c_1^2}{c_2^2 - c_1^2} = \frac{h_{2,rev} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (78)$$

## 7.2 Prozesse mit feuchter Luft

- **Annahmen:**
  - keine Zufuhr mechanischer Leistung  $P_{12} = 0$
  - keine Änderung der kinetischen und potenziellen Energie ( $c_2 = c_1, z_2 = z_1$ ),
  - Gesamtdruck  $p$  bleibt in der Regel konstant
  - Ermittlung der Stoffdaten nach Abschn. 2.3

- **Erwärmung bzw. Abkühlung:** Merke: Wassergehalt konstant  $\rightarrow x_2 = x_1$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{H}_{fL,2} - \dot{H}_{fL,1} \rightarrow \boxed{\dot{Q}_{12} = \dot{m}_L (h_2 - h_1)} \quad (79)$$

$\rightarrow \dot{m}_L \dots$  Massestrom trockene Luft

$h_i \dots$  Enthalpien der feuchten Luft entsprechend Gln. (40), (41), (42) in kJ/kg<sub>L</sub>

- **Befeuchtung mit Wasser:** (thermisch ideal isoliertes System)  
(Index „W“, Lufteintritt  $\boxed{1}$ , Luftaustritt  $\boxed{2}$ ,  $\dot{Q} = 0$ )

$\rightarrow$  Energiestrombilanz:  $\dot{m}_L h_1 + \dot{m}_W h_W = \dot{m}_L h_2$  ( $h_W$  aus Abschn. 2.1)

Massestrombilanz:  $\dot{m}_L x_1 + \dot{m}_W = \dot{m}_L x_2$  (Wasser)

$\rightarrow$  Berechnung der Enthalpie des zuzuführenden Wassers:

$$\boxed{h_W = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1}} \quad (80)$$

- **Entfeuchtung:** (thermisch ideal isoliertes System)  
(Lufteintritt  $\boxed{1}$ , Luftaustritt  $\boxed{2}$ ,  $\dot{Q} = 0$ )

$\rightarrow$  Vorgehen: 1. Abkühlen der feuchten Luft bis in den Bereich der übersättigten feuchten Luft [ $t_2 < t_S(p_{W1})$ ]

2. Abscheiden des Wasseranteiles (Flüssigkeit/Eis)  $\rightarrow$  gesättigte feuchte Luft ( $t_2 = t_S(p_{W2})$ ,  $x_S$ ,  $h_S$ ) tritt aus

$\rightarrow$  Energiestrombilanz:  $\dot{m}_L h_1 - \dot{m}_W h_W = \dot{m}_L h_S(t_2)$

Massestrombilanz:  $\dot{m}_L x_1 - \dot{m}_W = \dot{m}_L x_S(t_2)$  (Wasser)

$\rightarrow$  Berechnung des abgeschiedenen Wassermassestromes:

$$\boxed{\dot{m}_W = \dot{m}_L [x_1 - x_S(t_2)]} \quad (81)$$

- **Mischung zweier Feuchtluftmassenströme:** (thermisch ideal isoliertes System)  
(Lufteintritt  $\boxed{1}$  &  $\boxed{2}$ , Luftaustritt  $\boxed{M}$ ,  $\dot{Q} = 0$ )

$\rightarrow$  Energiestrombilanz:  $\dot{m}_{L,1} h_1 + \dot{m}_{L,2} h_2 = \dot{m}_{L,M} h_M$

Massestrombilanz:  $\dot{m}_{L,1} x_1 + \dot{m}_{L,2} x_2 = \dot{m}_{L,M} x_M$  (Wasser)

$\dot{m}_{L,1} + \dot{m}_{L,2} = \dot{m}_{L,M}$  (Luft)

$\rightarrow$  Berechnung der Enthalpie und des Wassergehaltes der Mischungsluft:

$$\boxed{h_M = \frac{\mu h_1 + h_2}{1 + \mu}} \quad \boxed{x_M = \frac{\mu x_1 + x_2}{1 + \mu}} \quad \text{mit } \mu = \frac{\dot{m}_{L,1}}{\dot{m}_{L,2}} \quad (82)$$

## 8 Physikalische Größen und Konstanten sowie deren Einheiten

### 8.1 Ausgewählte Größen mit gebräuchlichen Einheiten

Größe	Symbol	Name der Einheit	Abkürzung	Umrechnung bzw. alternative Einheiten
Druck	$p$	Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}$ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
innere Energie, Wärme, Exergie, Arbeit	$U,$ $Q, E,$ $W$	Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ N m} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$ $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W s} = 3,6 \text{ MJ}$
Enthalpie-, Wärme-, Exergiestrom, Leistung	$\dot{H}, \dot{Q},$ $\dot{E},$ $P (= \dot{W})$	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{N m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$ $1 \text{ PS} = 0,74567 \text{ kW}$
Kraft	$F$	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$
Länge	$L$	Meter	m	
Masse	$m$	Kilogramm	kg	$1 \text{ t (Tonne)} = 10^3 \text{ kg}$
Stoffmenge	$n$	Mol	mol	
Temperatur	$t$ $T$	Grad Celsius Kelvin	°C K	$\frac{T}{\text{K}} = \frac{t}{\text{°C}} + 273,15 \text{ K}$
Zeit	$\tau$	Sekunde	s	$1 \text{ h (Stunde)} = 3600 \text{ s}$

- **Wichtige Vorsätze:** (Die Vorsätze in Klammern sollten i. d. R. nicht verwendet werden.)

Vorsatz	Nano	Mikro	Milli	(Zenti)	(Dezi)	-	(Hekto)	Kilo	Mega	Giga
Symbol	n	$\mu$	m	c	d	-	h	k	M	G
Potenz	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$

### 8.2 Wichtige Konstanten

1. molares Normvolumen  $\bar{v}_N = 22,414 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{physikalischer} \quad p_N = 101\,325 \text{ Pa} \\ \text{Normzustand} \quad T_N = 273,15 \text{ K} \end{array} \right.$
2. universelle Gaskonstante  $\bar{R} = 8,3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$
3. Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

### 8.3 Wichtige angelsächsische Einheiten und deren Umrechnung

Dimension	Einheit	Abkürzung	Umrechnungsgleichung			
Länge	inch		1 inch	=	25,40	mm
	foot	ft	1 ft	=	0,3048	m
	yard	yd	1 yd	=	0,9144	m
Fläche	squareinch	sq. in.	1 sq. in.	=	6,4516	cm <sup>2</sup>
	squarefoot	sq. ft.	1 sq. ft.	=	0,0929	m <sup>2</sup>
Volumen	cubic foot	cu. ft.	1 cu. ft.	=	0,02832	m <sup>3</sup>
Masse	ounce		1 ounce	=	28,35	g
	pound	lb	1 lb	=	0,4536	kg
	short ton	sh. ton	1 sh. ton	=	907,18	kg
	long ton	lg. ton	1 lg. ton	=	1016,1	kg
Kraft	pound	Lb	1 Lb	=	4,4448	N
Druck	pound/squareinch	Lb/sq. in.	1 Lb/sq. in.	=	6,895	kPa
Energie	British thermal unit	B. th. u.	1 B. th. u.	=	1,0551	kJ
Leistung	horse-power	h. p.	1 h. p.	=	0,74567	kW = 1 PS

## 9 Stoffdatentabellen und Zustandsdiagramme

- Luftzusammensetzung (nach ISO 2553):  $\psi_{N_2} = 0,781109$ ,  $\psi_{O_2} = 0,209548$ ,  $\psi_{Ar} = 0,009343$
- Spezifische isobare Wärmekapazität ausgewählter Idealgase<sup>3</sup>:

$$\frac{c_p}{\text{kJ}/(\text{kg K})} = a + b \cdot \left(\frac{T}{\text{K}}\right) + c \cdot \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^2 + d \cdot \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^3 \quad (83)$$

**Tabelle 9.1:** Molare Massen und Koeffizienten der  $c_p$ -Gleichung - Gl. (83) - verschiedener Stoffe

Gas	Symbol	$M$ kg/kmol	Koeffizienten für $c_p$ in Gl. (83)			
			$a$	$10^4 \cdot b$	$10^7 \cdot c$	$10^{11} \cdot d$
Stickstoff	N <sub>2</sub>	28,01	0,9818	1,14	1,17	-5,02
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	32,00	0,7667	5,42	-2,724	5,26
Argon	Ar	39,95	0,5203	0,0	0,0	0,0
Neon	Ne	20,18	1,03	0,0	0,0	0,0
Helium	He	4,00	5,193	0,0	0,0	0,0
Wasser	H <sub>2</sub> O	18,02	1,74	2,54	4,375	-14,18
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	44,01	0,5428	12,43	-6,857	13,64
Kohlenstoffmonoxid	CO	28,01	0,953	2,27	0,304	-3,03
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	64,06	0,4213	8,35	-5,17	11,1
trockene Luft		28,96	0,926	2,12	0,251	-2,58
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	2,02	14,52	-11,32	20,81	-44,7
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	17,03	1,4836	20,62	-1,137	-11,85
Methan	CH <sub>4</sub>	16,04	1,1112	36,3	1,213	-40,8

<sup>3</sup>Näherung durch kubische Polynome, unterschiedliche Quellen

**Tabelle 9.2:** Spezifische thermische und energetische Zustandsgrößen für überhitzten Wasserdampf nach IAPWS-IF97 (*kursiv = trocken gesättigter Dampfzustand*)

<i>t</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
<i>p = 0,1 MPa</i>					<i>p = 0,2 MPa</i>				
<i>99,61</i>	<i>1,6940</i>	<i>2505,5</i>	<i>2674,9</i>	<i>7,3588</i>	<i>120,21</i>	<i>0,8857</i>	<i>2529,1</i>	<i>2706,2</i>	<i>7,1269</i>
100	1,6960	2506,2	2675,8	7,3610	130	0,9104	2545,2	2727,3	7,1796
150	1,9367	2582,9	2776,6	7,6147	150	0,9599	2577,1	2769,1	7,2809
200	2,1725	2658,2	2875,5	7,8356	200	1,0805	2654,7	2870,8	7,5081
250	2,4062	2733,9	2974,5	8,0346	250	1,1989	2731,5	2971,3	7,7100
300	2,6389	2810,7	3074,5	8,2171	300	1,3162	2808,8	3072,1	7,8940
350	2,8710	2888,7	3175,8	8,3865	350	1,4330	2887,3	3173,9	8,0643
400	3,1027	2968,3	3278,5	8,5451	400	1,5493	2967,1	3277,0	8,2235
450	3,3342	3049,4	3382,8	8,6945	450	1,6655	3048,4	3381,5	8,3733
500	3,5656	3132,2	3488,7	8,8361	500	1,7814	3131,3	3487,6	8,5151
550	3,7968	3216,6	3596,3	8,9709	550	1,8973	3215,9	3595,4	8,6501
600	4,0279	3302,8	3705,6	9,0998	600	2,0130	3302,2	3704,8	8,7792
<i>p = 0,3 MPa</i>					<i>p = 0,5 MPa</i>				
<i>133,53</i>	<i>0,6058</i>	<i>2543,2</i>	<i>2724,9</i>	<i>6,9916</i>	<i>151,84</i>	<i>0,3748</i>	<i>2560,7</i>	<i>2748,1</i>	<i>6,8206</i>
150	0,6340	2571,0	2761,2	7,0791	175	0,3995	2601,6	2801,4	6,9427
200	0,7164	2651,0	2866,0	7,3132	200	0,4250	2643,4	2855,9	7,0611
250	0,7965	2729,0	2967,9	7,5181	250	0,4744	2723,9	2961,1	7,2726
300	0,8753	2807,0	3069,6	7,7037	300	0,5226	2803,3	3064,6	7,4614
350	0,9536	2885,9	3172,0	7,8749	350	0,5701	2883,0	3168,1	7,6345
400	1,0315	2966,0	3275,4	8,0346	400	0,6173	2963,6	3272,3	7,7954
450	1,1092	3047,5	3380,2	8,1848	450	0,6642	3045,6	3377,7	7,9464
500	1,1867	3130,5	3486,6	8,3269	500	0,7109	3128,9	3484,4	8,0891
550	1,2641	3215,2	3594,5	8,4622	550	0,7576	3213,9	3592,6	8,2247
600	1,3414	3301,6	3704,0	8,5914	600	0,8041	3300,4	3702,5	8,3543
<i>p = 0,75 MPa</i>					<i>p = 1,0 MPa</i>				
<i>167,76</i>	<i>0,2555</i>	<i>2574,0</i>	<i>2765,6</i>	<i>6,6835</i>	<i>179,89</i>	<i>0,1943</i>	<i>2582,8</i>	<i>2777,1</i>	<i>6,5850</i>
200	0,2791	2633,2	2842,5	6,8520	200	0,2060	2622,3	2828,3	6,6955
250	0,3133	2717,3	2952,3	7,0727	250	0,2327	2710,5	2943,2	6,9266
300	0,3462	2798,6	3058,2	7,2660	300	0,2580	2793,7	3051,7	7,1247
350	0,3784	2879,4	3163,1	7,4415	350	0,2825	2875,7	3158,2	7,3028
400	0,4102	2960,7	3268,4	7,6039	400	0,3066	2957,8	3264,4	7,4668
450	0,4417	3043,2	3374,4	7,7559	450	0,3304	3040,8	3371,2	7,6198
500	0,4731	3126,9	3481,7	7,8994	500	0,3541	3124,9	3479,0	7,7640
550	0,5043	3212,1	3590,4	8,0355	550	0,3777	3210,4	3588,1	7,9007
600	0,5354	3298,9	3700,5	8,1654	600	0,4011	3297,4	3698,6	8,0309
<i>p = 1,5 MPa</i>					<i>p = 2,0 MPa</i>				
<i>198,30</i>	<i>0,1317</i>	<i>2593,5</i>	<i>2791,0</i>	<i>6,4431</i>	<i>212,38</i>	<i>0,0996</i>	<i>2599,2</i>	<i>2798,4</i>	<i>6,3392</i>
250	0,1520	2696,0	2924,0	6,7111	250	0,1115	2680,3	2903,2	6,5474
300	0,1697	2783,7	3038,3	6,9199	300	0,1255	2773,2	3024,3	6,7685
350	0,1866	2868,2	3148,0	7,1035	350	0,1386	2860,5	3137,6	6,9582
400	0,2030	2951,8	3256,4	7,2708	400	0,1512	2945,8	3248,2	7,1290
450	0,2192	3035,9	3364,7	7,4259	450	0,1635	3031,0	3358,1	7,2863
500	0,2352	3120,8	3473,6	7,5716	500	0,1757	3116,7	3468,1	7,4335
550	0,2510	3207,0	3583,5	7,7093	550	0,1877	3203,5	3578,9	7,5723
600	0,2668	3294,5	3694,6	7,8404	600	0,1996	3291,5	3690,7	7,7042

... Fortsetzung von **Tabelle 9.2**

<i>t</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
<i>p</i> = 3,0 MPa					<i>p</i> = 5,0 MPa				
<i>233,86</i>	<i>0,0667</i>	<i>2603,3</i>	<i>2803,3</i>	<i>6,1858</i>	<i>263,94</i>	<i>0,0394</i>	<i>2597,0</i>	<i>2794,2</i>	<i>5,9737</i>
250	0,0706	2644,7	2856,5	6,2893	275	0,0414	2632,3	2839,5	6,0571
300	0,0812	2750,8	2994,3	6,5412	300	0,0453	2698,9	2925,6	6,2109
350	0,0906	2844,4	3116,1	6,7449	350	0,0520	2809,4	3069,3	6,4515
400	0,0994	2933,4	3231,6	6,9233	400	0,0578	2907,4	3196,6	6,6481
450	0,1079	3021,0	3344,7	7,0853	450	0,0633	3000,4	3317,0	6,8208
500	0,1162	3108,5	3457,0	7,2356	500	0,0686	3091,6	3434,5	6,9778
550	0,1244	3196,5	3569,6	7,3767	550	0,0737	3182,3	3550,8	7,1235
600	0,1324	3285,5	3682,8	7,5102	600	0,0787	3273,3	3666,8	7,2604
650	0,1405	3375,6	3797,0	7,6373	650	0,0836	3365,1	3783,3	7,3901
700	0,1484	3467,1	3912,3	7,7590	700	0,0885	3457,9	3900,5	7,5137
750	0,1563	3560,1	4029,0	7,8759	750	0,0933	3551,8	4018,6	7,6321
<i>p</i> = 7,5 MPa					<i>p</i> = 10,0 MPa				
<i>290,54</i>	<i>0,0253</i>	<i>2575,8</i>	<i>2765,8</i>	<i>5,7792</i>	<i>311,00</i>	<i>0,0180</i>	<i>2545,1</i>	<i>2725,5</i>	<i>5,6159</i>
300	0,0267	2613,7	2814,3	5,8644	325	0,0199	2611,4	2810,2	5,7593
350	0,0325	2759,3	3002,7	6,1805	350	0,0224	2699,5	2924,0	5,9458
400	0,0370	2872,0	3149,3	6,4070	400	0,0264	2833,0	3097,4	6,2139
450	0,0410	2973,3	3280,7	6,5954	450	0,0298	2944,4	3242,3	6,4217
500	0,0448	3069,7	3405,3	6,7620	500	0,0328	3046,9	3375,1	6,5993
550	0,0483	3164,1	3526,7	6,9141	550	0,0357	3145,4	3501,9	6,7584
600	0,0518	3257,9	3646,5	7,0555	600	0,0384	3242,1	3625,8	6,9045
650	0,0552	3351,7	3765,9	7,1885	650	0,0410	3338,2	3748,3	7,0409
700	0,0586	3446,2	3885,4	7,3145	700	0,0436	3434,3	3870,3	7,1696
750	0,0619	3541,5	4005,5	7,4348	750	0,0461	3531,0	3992,3	7,2918
<i>p</i> = 12,5 MPa					<i>p</i> = 15,0 MPa				
<i>327,82</i>	<i>0,0135</i>	<i>2505,7</i>	<i>2674,5</i>	<i>5,4640</i>	<i>342,16</i>	<i>0,0103</i>	<i>2455,8</i>	<i>2610,9</i>	<i>5,3108</i>
350	0,0161	2624,7	2826,5	5,7128	350	0,0115	2520,8	2693,0	5,4435
400	0,0200	2789,5	3039,9	6,0431	400	0,0157	2740,5	2975,5	5,8817
450	0,0230	2913,6	3201,4	6,2748	450	0,0185	2880,7	3157,8	6,1433
500	0,0256	3023,2	3343,6	6,4650	500	0,0208	2998,4	3310,8	6,3479
550	0,0280	3126,1	3476,5	6,6317	550	0,0229	3106,3	3450,5	6,5230
600	0,0303	3226,0	3604,8	6,7829	600	0,0249	3209,5	3583,3	6,6797
650	0,0325	3324,4	3730,5	6,9229	650	0,0268	3310,4	3712,4	6,8235
700	0,0346	3422,3	3855,0	7,0542	700	0,0286	3410,2	3839,5	6,9576
750	0,0367	3520,4	3979,0	7,1785	750	0,0304	3509,8	3965,6	7,0839
<i>p</i> = 17,5 MPa					<i>p</i> = 20,0 MPa				
<i>354,67</i>	<i>0,0079</i>	<i>2390,4</i>	<i>2529,1</i>	<i>5,1428</i>	<i>365,75</i>	<i>0,0059</i>	<i>2294,2</i>	<i>2411,4</i>	<i>4,9299</i>
400	0,0125	2684,2	2902,3	5,7209	400	0,0099	2617,8	2816,8	5,5525
450	0,0152	2845,3	3111,3	6,0210	450	0,0127	2807,1	3061,5	5,9041
500	0,0174	2972,4	3276,7	6,2423	500	0,0148	2945,3	3241,2	6,1445
550	0,0193	3085,9	3423,7	6,4266	550	0,0166	3064,8	3396,2	6,3390
600	0,0211	3192,7	3561,5	6,5891	600	0,0182	3175,5	3539,2	6,5077
650	0,0227	3296,1	3694,1	6,7369	650	0,0197	3281,7	3675,6	6,6596
700	0,0243	3397,9	3823,9	6,8738	700	0,0211	3385,5	3808,2	6,7994
750	0,0259	3499,0	3952,1	7,0023	750	0,0225	3488,1	3938,5	6,9301

**Tabelle 9.3:** Spezifische thermische und energetische Zustandsgrößen für siedende Wasserflüssigkeit (') und trocken gesättigten Dampf (") nach IAPWS-IF97 (**Drucktabelle**)

$p_S$	$t_S$	$10^3 \cdot v'$	$v''$	$u'$	$u''$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
MPa	°C	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/(kg K)	
0,001	6,97	1,0001	129,180	29,30	2384,5	29,30	2513,7	0,1059	8,9749
0,002	17,50	1,0014	66,990	73,43	2398,9	73,43	2532,9	0,2606	8,7227
0,003	24,08	1,0028	45,655	100,99	2407,9	100,99	2544,9	0,3543	8,5766
0,004	28,96	1,0041	34,792	121,40	2414,5	121,40	2553,7	0,4224	8,4735
0,005	32,88	1,0053	28,186	137,76	2419,8	137,77	2560,8	0,4763	8,3939
0,006	36,16	1,0064	23,734	151,49	2424,3	151,49	2566,7	0,5209	8,3291
0,007	39,00	1,0075	20,525	163,36	2428,1	163,37	2571,8	0,5591	8,2746
0,008	41,51	1,0085	18,099	173,84	2431,4	173,85	2576,2	0,5925	8,2274
0,009	43,76	1,0094	16,200	183,25	2434,5	183,26	2580,3	0,6223	8,1859
0,01	45,81	1,0103	14,671	191,80	2437,2	191,81	2583,9	0,6492	8,1489
0,02	60,06	1,0171	7,6482	251,38	2456,0	251,40	2608,9	0,8320	7,9072
0,03	69,10	1,0222	5,2286	289,20	2467,7	289,23	2624,6	0,9439	7,7675
0,04	75,86	1,0264	3,9931	317,53	2476,3	317,57	2636,1	1,0259	7,6690
0,05	81,32	1,0299	3,2401	340,42	2483,2	340,48	2645,2	1,0910	7,5930
0,06	85,93	1,0331	2,7318	359,77	2488,9	359,84	2652,9	1,1452	7,5311
0,07	89,93	1,0359	2,3649	376,61	2493,9	376,68	2659,4	1,1919	7,4790
0,08	93,49	1,0385	2,0872	391,56	2498,2	391,64	2665,2	1,2328	7,4339
0,09	96,69	1,0409	1,8695	405,03	2502,1	405,13	2670,3	1,2694	7,3942
0,10	99,61	1,0431	1,6940	417,33	2505,5	417,44	2674,9	1,3026	7,3588
0,15	111,35	1,0527	1,1594	466,92	2519,2	467,08	2693,1	1,4335	7,2229
0,20	120,21	1,0605	0,88574	504,47	2529,1	504,68	2706,2	1,5301	7,1269
0,25	127,41	1,0672	0,71870	535,08	2536,8	535,35	2716,5	1,6072	7,0524
0,30	133,53	1,0732	0,60579	561,13	2543,2	561,46	2724,9	1,6718	6,9916
0,35	138,86	1,0786	0,52420	583,93	2548,5	584,31	2732,0	1,7275	6,9401
0,40	143,61	1,0836	0,46239	604,29	2553,1	604,72	2738,1	1,7766	6,8954
0,45	147,91	1,0882	0,41390	622,73	2557,1	623,22	2743,4	1,8206	6,8560
0,50	151,84	1,0926	0,37480	639,64	2560,7	640,19	2748,1	1,8606	6,8206
0,60	158,83	1,1006	0,31558	669,84	2566,8	670,50	2756,1	1,9311	6,7592
0,70	164,95	1,1080	0,27276	696,37	2571,8	697,14	2762,7	1,9921	6,7070
0,80	170,41	1,1148	0,24033	720,13	2576,0	721,02	2768,3	2,0460	6,6615
0,90	175,36	1,1212	0,21487	741,72	2579,7	742,72	2773,0	2,0944	6,6212
1,00	179,89	1,1272	0,19435	761,56	2582,8	762,68	2777,1	2,1384	6,5850
2,00	212,38	1,1768	0,09958	906,27	2599,2	908,62	2798,4	2,4470	6,3392
3,00	233,86	1,2167	0,06666	1004,7	2603,3	1008,4	2803,3	2,6456	6,1858
4,00	250,36	1,2526	0,04978	1082,4	2601,8	1087,4	2800,9	2,7967	6,0697
5,00	263,94	1,2864	0,03945	1148,1	2597,0	1154,5	2794,2	2,9207	5,9737
6,00	275,59	1,3193	0,03245	1205,8	2589,9	1213,7	2784,6	3,0274	5,8901
8,00	295,01	1,3847	0,02353	1306,0	2570,4	1317,1	2758,6	3,2077	5,7448
10,00	311,00	1,4526	0,01803	1393,3	2545,1	1407,9	2725,5	3,3603	5,6159
12,00	324,68	1,5263	0,01427	1473,0	2514,4	1491,3	2685,6	3,4965	5,4941
14,00	336,67	1,6097	0,01149	1548,3	2477,2	1570,9	2638,1	3,6230	5,3730
16,00	347,36	1,7095	0,00931	1622,3	2431,9	1649,7	2580,8	3,7457	5,2463
18,00	356,99	1,8395	0,00750	1698,9	2374,6	1732,0	2509,5	3,8717	5,1055
20,00	365,75	2,0386	0,00586	1786,3	2294,2	1827,1	2411,4	4,0154	4,9299
22,00	373,71	2,7503	0,00358	1961,4	2085,5	2021,9	2164,2	4,3109	4,5308



**Tabelle 9.4:** Spezifische thermische und energetische Zustandsgrößen für siedende Wasserflüssigkeit (') und trocken gesättigten Dampf (") nach IAPWS-IF97 (**Temperaturtabelle**)

$t_S$	$p_S$	$10^3 \cdot v'$	$v''$	$u'$	$u''$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
°C	MPa	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/(kg K)	
0,01	0,00061	1,0002	206,00	0,00	2374,9	0,00	2500,9	0,0000	9,1555
5	0,00087	1,0001	147,02	21,02	2381,8	21,02	2510,1	0,0763	9,0249
10	0,00123	1,0003	106,31	42,02	2388,7	42,02	2519,2	0,1511	8,8998
15	0,00171	1,0009	77,881	62,98	2395,5	62,98	2528,4	0,2245	8,7804
20	0,00234	1,0018	57,761	83,92	2402,4	83,92	2537,5	0,2965	8,6661
25	0,00317	1,0030	43,341	104,84	2409,2	104,84	2546,5	0,3673	8,5568
30	0,00425	1,0044	32,882	125,74	2415,9	125,75	2555,6	0,4368	8,4521
35	0,00563	1,0060	25,208	146,64	2422,7	146,64	2564,6	0,5052	8,3518
40	0,00738	1,0079	19,517	167,53	2429,4	167,54	2573,5	0,5724	8,2557
45	0,00959	1,0099	15,253	188,43	2436,1	188,44	2582,5	0,6386	8,1634
50	0,01235	1,0121	12,028	209,32	2442,8	209,34	2591,3	0,7038	8,0749
55	0,01576	1,0145	9,5649	230,23	2449,4	230,24	2600,1	0,7680	7,9899
60	0,01995	1,0171	7,6677	251,13	2455,9	251,15	2608,8	0,8312	7,9082
65	0,02504	1,0199	6,1938	272,05	2462,4	272,08	2617,5	0,8935	7,8296
70	0,03120	1,0228	5,0397	292,99	2468,9	293,02	2626,1	0,9550	7,7540
75	0,03860	1,0258	4,1291	313,93	2475,2	313,97	2634,6	1,0156	7,6812
80	0,04741	1,0290	3,4053	334,90	2481,6	334,95	2643,0	1,0754	7,6110
85	0,05787	1,0324	2,8259	355,89	2487,8	355,95	2651,3	1,1344	7,5434
90	0,07018	1,0359	2,3591	376,90	2494,0	376,97	2659,5	1,1927	7,4781
95	0,08461	1,0396	1,9806	397,93	2500,0	398,02	2667,6	1,2502	7,4150
100	0,10142	1,0435	1,6719	418,99	2506,0	419,10	2675,6	1,3070	7,3541
110	0,14338	1,0516	1,2094	461,21	2517,7	461,36	2691,1	1,4187	7,2380
120	0,19867	1,0603	0,89130	503,57	2528,9	503,78	2705,9	1,5278	7,1291
130	0,27026	1,0697	0,66808	546,10	2539,5	546,39	2720,1	1,6346	7,0264
140	0,36150	1,0798	0,50852	588,81	2549,6	589,20	2733,4	1,7393	6,9293
150	0,47610	1,0905	0,39250	631,73	2559,0	632,25	2745,9	1,8420	6,8370
160	0,61814	1,1020	0,30682	674,89	2567,8	675,57	2757,4	1,9428	6,7491
170	0,79205	1,1143	0,24262	718,32	2575,7	719,21	2767,9	2,0419	6,6649
180	1,0026	1,1274	0,19386	762,06	2582,8	763,19	2777,2	2,1395	6,5841
190	1,2550	1,1414	0,15638	806,13	2589,1	807,57	2785,3	2,2358	6,5060
200	1,5547	1,1565	0,12722	850,60	2594,3	852,39	2792,1	2,3308	6,4303
210	1,9074	1,1727	0,10430	895,49	2598,4	897,73	2797,4	2,4248	6,3565
220	2,3193	1,1902	0,08610	940,88	2601,4	943,64	2801,1	2,5178	6,2842
230	2,7968	1,2090	0,07151	986,83	2603,0	990,21	2803,0	2,6102	6,2131
240	3,3467	1,2295	0,05971	1033,4	2603,2	1037,5	2803,1	2,7019	6,1425
250	3,9759	1,2517	0,05009	1080,7	2601,9	1085,7	2801,0	2,7934	6,0722
260	4,6921	1,2761	0,04218	1128,8	2598,8	1134,8	2796,6	2,8847	6,0017
270	5,5028	1,3030	0,03562	1177,9	2593,7	1185,1	2789,7	2,9762	5,9304
280	6,4165	1,3328	0,03015	1228,1	2586,3	1236,7	2779,8	3,0681	5,8578
290	7,4416	1,3663	0,02556	1279,6	2576,4	1289,8	2766,6	3,1608	5,7832
300	8,5877	1,4042	0,02166	1332,7	2563,5	1344,8	2749,6	3,2547	5,7058
310	9,8647	1,4479	0,01834	1387,7	2547,0	1402,0	2727,9	3,3506	5,6243
320	11,284	1,4991	0,01548	1445,1	2526,0	1462,1	2700,7	3,4491	5,5373
330	12,858	1,5606	0,01298	1505,7	2499,3	1525,7	2666,2	3,5516	5,4425
340	14,600	1,6375	0,01078	1570,5	2464,6	1594,4	2622,1	3,6599	5,3359
350	16,529	1,7401	0,00880	1642,1	2418,1	1670,9	2563,6	3,7783	5,2109
360	18,666	1,8945	0,00694	1726,1	2351,3	1761,5	2481,0	3,9164	5,0527
370	21,043	2,2221	0,00495	1845,9	2229,4	1892,6	2333,5	4,1141	4,7996

**Tabelle 9.4 a:** Sättigungsdrucktabelle für Wasser

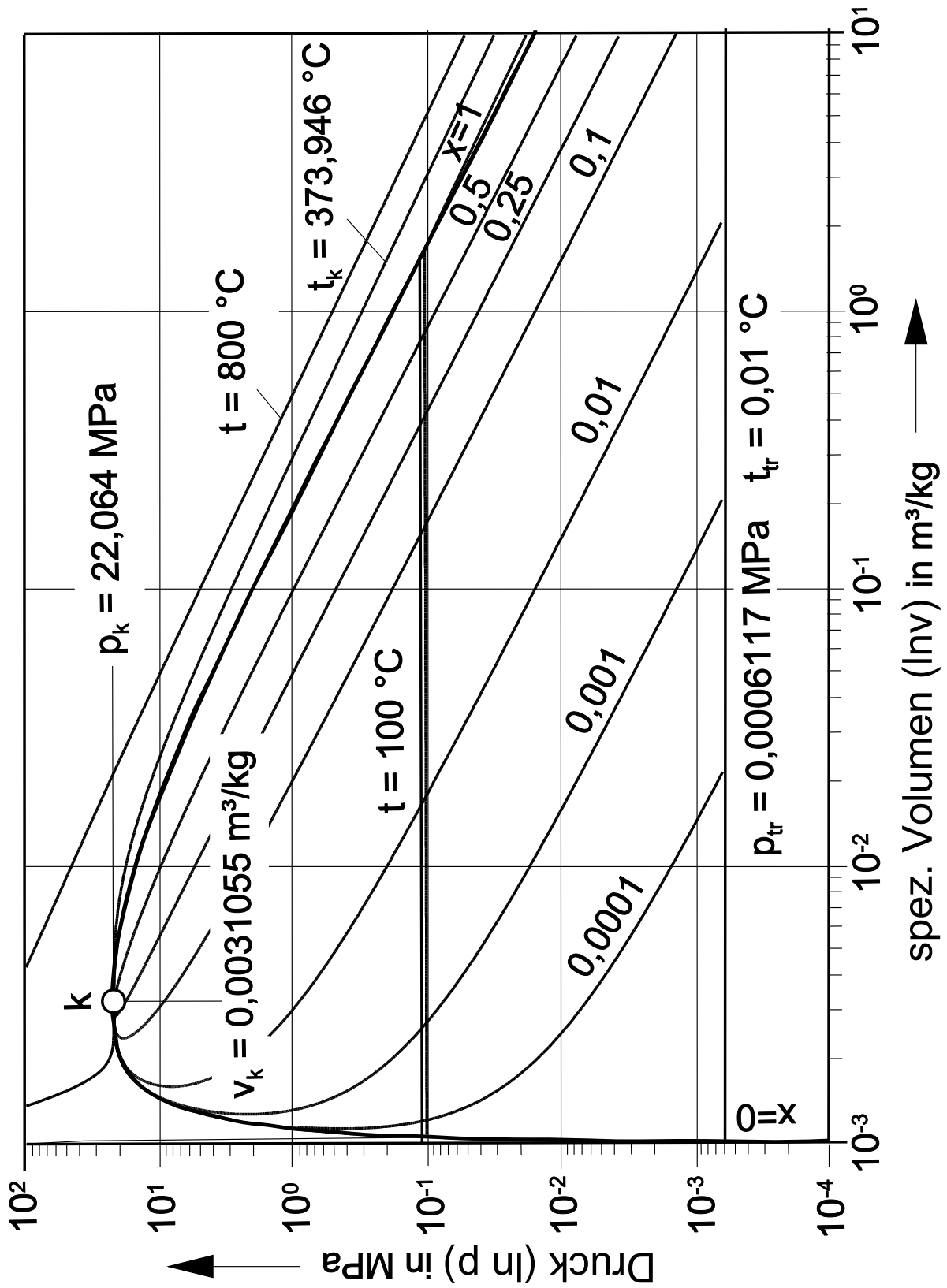
(detaillierterer Auszug der Spalten 1 &amp; 2 aus Tabelle 9.4 insbesondere zur Behandlung „feuchter Luft“)

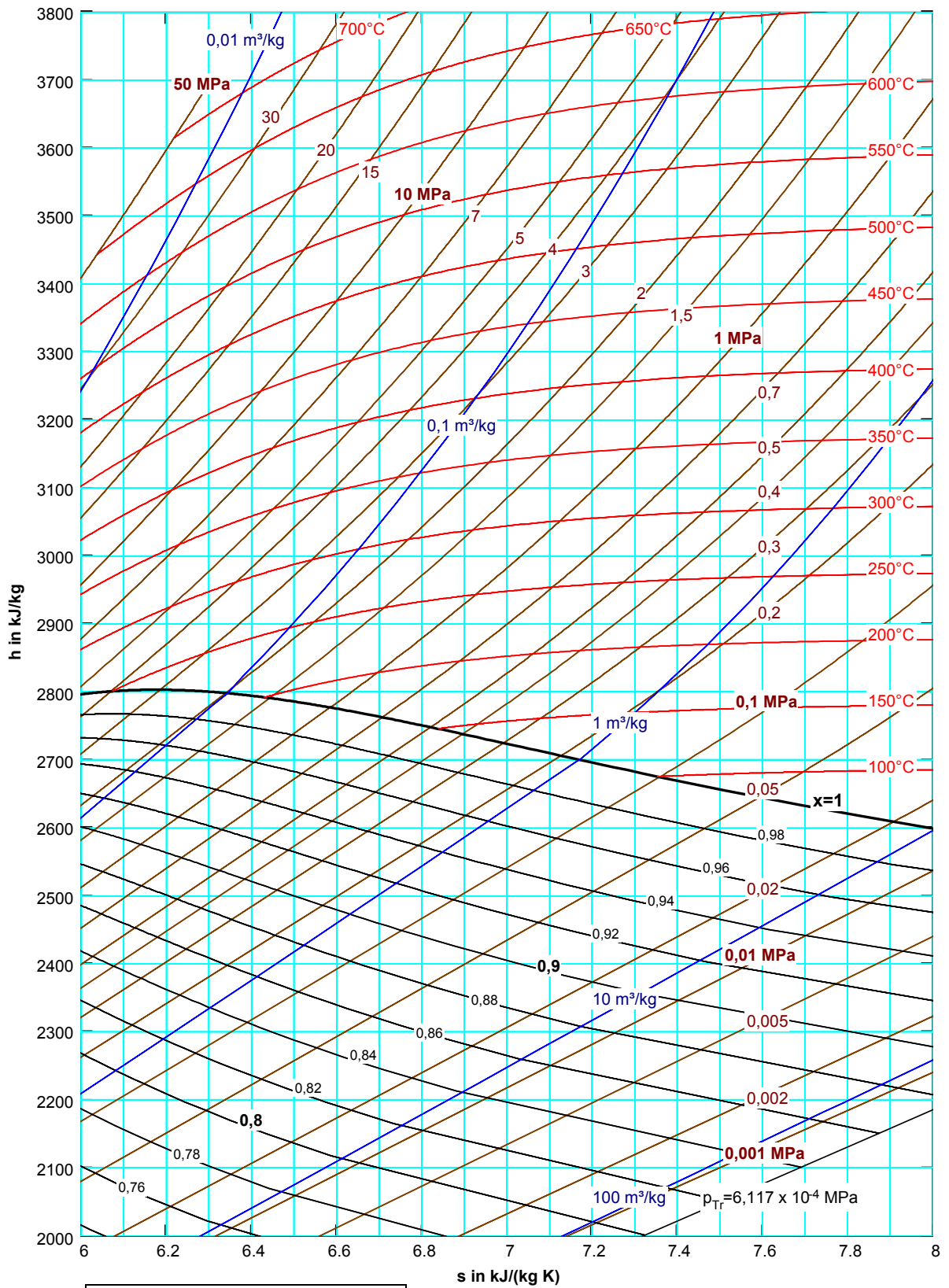
$t_S$	$p_S$	$t_S$	$p_S$	$t_S$	$p_S$
°C	kPa	°C	kPa	°C	kPa
-20	0,1033	20	2,3392	60	19,9458
-18	0,1249	22	2,6452	62	21,8664
-16	0,1507	24	2,9856	64	23,9421
-14	0,1812	26	3,3637	66	26,1827
-12	0,2173	28	3,7828	68	28,5986
-10	0,2599	30	4,2467	70	31,2006
-8	0,3100	32	4,7592	72	34,0001
-6	0,3687	34	5,3247	74	37,0088
-4	0,4375	36	5,9475	76	40,2389
-2	0,5177	38	6,6324	78	43,7031
0	0,6112	40	7,3844	80	47,4147
2	0,7060	42	8,2090	82	51,3875
4	0,8135	44	9,1118	84	55,6355
6	0,9354	46	10,0988	86	60,1738
8	1,0730	48	11,1764	88	65,0174
10	1,2282	50	12,3513	90	70,1824
12	1,4028	52	13,6305	92	75,6849
14	1,5989	54	15,0215	94	81,5420
16	1,8188	56	16,5322	96	87,7711
18	2,0647	58	18,1708	98	94,3902

## Zustandsdiagramme

Auf den nachfolgenden Seiten werden drei wesentliche Zustandsdiagramme - teils als Ausschnitt - veranschaulicht. Dabei handelt es sich um

- das  $p, v$ -Diagramm für Wasser (doppelt logarithmisch, Seite 27),
- das  $h, s$ -Diagramm für Wasser (Ausschnitt, Seite 28) sowie
- das  $h, x$ -Diagramm für feuchte Luft (Seite 29).





**MOLLIER-h,s-Diagramm (Ausschnitt)**  
 für **Wasser**  
 berechnet mit Zustandsgleichungen nach  
 IAPWS-IF97 am ITT der TU Dresden



Bearbeiter: Böhmer

