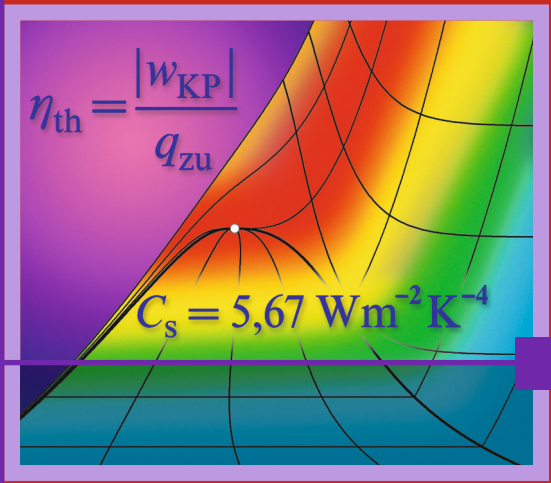
Hans-Joachim Kretzschmar
Ingo Kraft

PLUS.HANSER-FACHBUCH.DE

Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik



6., überarbeitete Auflage

HANSER

Kretzschmar/Kraft

Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik

Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-6ng2r-2ysgc

plus.hanser-fachbuch.de

Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Hans-Joachim Kretzschmar
Ingo Kraft

Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik

6., überarbeitete Auflage

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar, Hochschule Zittau/Görlitz

Prof. Dr.-Ing. Ingo Kraft, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

FSC www.fsc.org MIX Papier aus verantwortungsvollen Quellen FSC® C014889

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München;
Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg
Herstellung: Frauke Schafft
Satz: Hans-Joachim Kretzschmar
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Druck und Binden: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg
Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47028-6
E-Book-ISBN: 978-3-446-47321-8

Vorwort zur sechsten Auflage

Die „Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik“ ist inzwischen etabliert. Die vorliegende sechste Auflage wurde überarbeitet und ergänzt. Sie enthält die wichtigsten Formeln und Berechnungsalgorithmen der Technischen Thermodynamik einschließlich Wärmeübertragung für die Studiengänge und Studienrichtungen

- Maschinenbau
- Energie-, Verfahrens- und Umwelttechnik
- Technische Gebäudeausrüstung und Versorgungstechnik
- Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
- Kälte- und Wärmepumpentechnik
- Wirtschaftsingenieurwesen

an Universitäten, Hochschulen für Angewandte Wissenschaften, Berufsakademien und Fachschulen.

Erfasst werden die folgenden Gebiete der Technischen Thermodynamik

- Energielehre und thermodynamische Stoffeigenschaften
- einfache Prozesse und Kreisprozesse
- Wärmeübertragung
- Thermodynamik der feuchten Luft.

Diese Formelsammlung kann somit als Grundlage für die Berechnung von Maschinen, Apparaten und Anlagen dienen.

Die Darstellung der Energielehre orientiert sich am Lehrkonzept von Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. e. h. *Wolfgang Wagner*, Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum.

Beibehalten wurde die anwendungsorientierte Darstellung. Zur schnellen Nutzung sind die Formelzeichen unmittelbar unter den betreffenden Formeln erläutert. Eine ausführliche Stoffwertsammlung im Anhang und Zustandsdiagramme auf der Webseite *plus.hanser-fachbuch.de* ermöglichen die sofortige Anwendung der Gleichungen.

Das Kapitel "Ideale Gasgemische" und ergänzende Software für Excel, MATLAB, Mathcad, IOS, Android und Taschenrechner stehen auf der Website *www.thermodynamik-formelsammlung.de* zum Download bereit. Des Weiteren können hier Stoffwerte online berechnet werden.

Die Autoren danken Frau Dr.-Ing. *I. Stöcker* † sowie Herrn Dr.-Ing. *S. Herrmann* und Herrn Prof. Dr.-Ing. *M. Kunick* für die Mitwirkung bei der Erstellung der Bilder, Diagramme und Tabellen.

Hans-Joachim Kretzschmar und *Ingo Kraft*

Inhaltsverzeichnis

1 Thermodynamische Größen 11
1.1 Größenarten 11
1.2 Größen und Einheiten 12
1.3 Umrechnung von Einheiten 14

2 Zustandsverhalten reiner Stoffe 15
2.1 Einphasengebiete und Phasenübergänge 15
2.2 Zweiphasengebiet flüssig – gasförmig 16
2.3 Bereiche für Zustandsberechnung 19
2.3.1 Bereiche für Zustandsberechnung im p,T-Diagramm ... 20
2.3.2 Bereiche für Zustandsberechnung im p,v-Diagramm ... 21
2.3.3 Bereiche für Zustandsberechnung im T,s-Diagramm ... 22
2.3.4 Bereiche für Zustandsberechnung im h,s-Diagramm ... 23

3 Thermische Zustandsgrößen 24
3.1 Temperatur 24
3.2 Druck 25
3.3 Dichte und spezifisches Volumen 26
3.3.1 Definitionen 26
3.3.2 Ermittlung von v und ρ für reale Fluide 27
3.3.3 Ermittlung von v und ρ für ideale Gase 27
3.3.4 Ermittlung von v und ρ für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper 30
3.3.5 Ermittlung von v und ρ für Nassdampf 32
3.4 Normzustand und Normvolumen 33

4 Energetische Zustandsgrößen 34
4.1 Wärmekapazitäten 34
4.1.1 Definitionen 34
4.1.2 Ermittlung von c_p und c_v für reale Fluide 34
4.1.3 Ermittlung von c_p und c_v für ideale Gase 35
4.1.4 Ermittlung von c_p und c_v für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper 36
4.1.5 Ermittlung von c_p und c_v für Nassdampf 37
4.2 Isentropenexponent und isentrope Schallgeschwindigkeit 37

4.2.1 Definitionen ... 37
4.2.2 Ermittlung von κ und w für reale Fluide ... 38
4.2.3 Ermittlung von κ und w für ideale Gase ... 38
4.2.4 Ermittlung von κ und w für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten ... 39
4.2.5 Ermittlung von κ und w für Nassdampf ... 39
4.3 Enthalpie und innere Energie ... 40
4.3.1 Definitionen ... 40
4.3.2 Ermittlung von h und u für reale Fluide ... 42
4.3.3 Ermittlung von h und u für ideale Gase ... 42
4.3.4 Ermittlung von h und u für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten und Festkörper ... 47
4.3.5 Ermittlung von h und u für Nassdampf ... 51
4.4 Entropie ... 53
4.4.1 Definition ... 53
4.4.2 Ermittlung von s für reale Fluide ... 54
4.4.3 Ermittlung von s für ideale Gase ... 55
4.4.4 Ermittlung von s für inkompressible (ideale) Flüssigkeiten ... 58
4.4.5 Ermittlung von s für Nassdampf ... 58
4.5 Exergie ... 59
4.5.1 Exergie (der Enthalpie) ... 59
4.5.2 Exergie der inneren Energie ... 60

5 Massebilanz ... 62
5.1 Stoffmenge, Masse und Volumen ... 62
5.2 Massestrom und Volumenstrom ... 63
5.3 Massebilanz bei geschlossenen Systemen ... 63
5.4 Massebilanz bei offenen stationären Systemen ... 64
5.5 Massebilanz bei offenen instationären Systemen ... 66

6 Energiebilanz – 1. Hauptsatz der Thermodynamik ... 67
6.1 Ruhendes geschlossenes System ... 67
6.1.1 Energiebilanz zwischen Zustand 1 und 2 ... 67
6.1.2 Volumenänderungsarbeit ... 68
6.1.3 Äußere Nutzarbeit und Kolbenarbeit ... 70
6.1.4 Dissipierte Arbeiten ... 71
6.1.5 Wärme ... 73

6.1.6 Instationäre Energiebilanz ... 75
6.2 Ruhendes offenes System ... 76
6.2.1 Stationäre Energiebilanz ... 76
6.2.2 Technische Arbeit ... 79
6.2.3 Allgemeine instationäre Energiebilanz ... 81
6.3 Berechnung der Differenzen der spezifischen Enthalpie und der spezifischen inneren Energie ... 82
6.3.1 Reale Fluide ... 82
6.3.2 Ideale Gase ... 82
6.3.3 Inkompressible (ideale) Flüssigkeiten ... 86
6.3.4 Nassdampf ... 90

7 Entropiebilanz – 2. Hauptsatz der Thermodynamik ... 91
7.1 Ruhendes geschlossenes System ... 91
7.1.1 Entropiebilanz zwischen Zustand 1 und 2 ... 91
7.1.2 Entropie der Wärme ... 92
7.1.3 Entropieproduktion ... 93
7.1.4 Dissipationsenergie ... 95
7.2 Ruhendes offenes System ... 96
7.3 Berechnung der Differenzen der spezifischen Entropie ... 98
7.3.1 Reale Fluide ... 98
7.3.2 Ideale Gase ... 98
7.3.3 Inkompressible (ideale) Flüssigkeiten ... 101
7.3.4 Nassdampf ... 103

8 Exergiebilanz ... 104
8.1 Ruhendes geschlossenes System ... 104
8.1.1 Exergiebilanz zwischen Zustand 1 und 2 ... 104
8.1.2 Exergie der Wärme ... 105
8.1.3 Exergieverlust ... 106
8.2 Ruhendes offenes System ... 107
8.3 Berechnung der Differenzen der spezifischen Exergie ... 110

9 Einfache Prozesse ... 111
9.1 Grundlagen der thermodynamischen Modellierung technischer Prozesse ... 111
9.2 Technische Anwendungen ... 117
9.2.1 Fluide in Behältern mit starren Wänden ... 117
9.2.2 Fluide unter konstantem Druck ... 118

9.2.3 Mischen von Fluidströmen 120
9.2.4 Verdichten und Pumpen von Fluidströmen..... 121
9.2.5 Entspannung von Fluidströmen in Turbinen..... 125
9.2.6 Drosselentspannung 128

10 Kreisprozesse 130
10.1 Grundlagen 130
10.2 Gasturbinenanlagen-JOULE-Prozess..... 136
10.3 Dampfturbinenanlagen-CLAUSIUS-RANKINE-Prozess 139
10.4 Kältemaschinen- und Wärmepumpen-Prozess 143

11 Wärmeübertragung..... 146
11.1 Transporteigenschaften der Stoffe..... 146
11.2 Wärmeleitung 147
11.2.1 Grundlagen..... 147
11.2.2 Ebene Wand 150
11.2.3 Zylinderwand (Rohrwand) 151
11.2.4 Kugelwand 153
11.3 Konvektiver Wärmeübergang..... 154
11.3.1 Temperaturfeld..... 155
11.3.2 Wärmestrom und Wärmeübergangskoeffizient..... 156
11.3.3 Ähnlichkeitskennzahlen 158
11.3.4 Wärmeübergang bei freier Konvektion..... 160
11.3.5 Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion 165
11.4 Wärmestrahlung 170
11.4.1 Energiebilanz 170
11.4.2 Zweiflächenstrahlungsaustausch..... 172
11.4.3 Strahlungsaustauschkoeffizient (resultierender Strahlungskoeffizient) für ausgewählte Anwendungsfälle 175
11.5 Wärmedurchgang 177

12 Thermodynamik der feuchten Luft 182
12.1 Konstanten für die Zustandsberechnung 182
12.2 Arten der feuchten Luft..... 184
12.3 Zusammensetzung der feuchten Luft 186
12.3.1 Allgemeine Zusammensetzung der feuchten Luft – Wassergehalt 186
12.3.2 Ungesättigte feuchte Luft – relative Feuchte..... 189

12.3.3 Gesättigte feuchte Luft 192
12.3.4 Übersättigte feuchte Luft (Nebel) 194
12.4 Luftspezifisches Volumen und Dichte 194
12.5 Spezifische Wärmekapazitäten 197
12.6 Isentropenexponent und isentrope Schallgeschwindigkeit 198
12.7 Luftspezifische Enthalpie und innere Energie 199
12.8 Luftspezifische Entropie 202
12.9 Taupunkttemperatur 202
12.10 Feuchtkugeltemperatur (Kühlgrenztemperatur) 203
12.11 Das h_{1+x},x_W-Diagramm 205
12.12 Bilanzierung von Prozessen mit feuchter Luft 206
12.13 Anwendung der Zustandsberechnung von feuchter Luft auf feuchte Gase 210

Literaturverzeichnis 211

Anhang

A Stoffwertsammlung 213

A1 Stoffunabhängige Konstanten 213
A2 Stoffspezifische Konstanten 213
A3 Stoffwerte von Gasen im Idealgaszustand 215
A4 Stoffwerte von siedendem Wasser und gesättigtem Wasserdampf 215
A5 Stoffwerte von Wasser (reales Fluid) 221
A6 Stoffwerte von Wasserflüssigkeit (ideal) 222
A7 Stoffwerte von Luft (reales Fluid) 223
A8 Stoffwerte von Luft bei p = 0,101325 MPa 224
A9 Transportgrößen von Feststoffen (Mittelwerte) 225
A10 Gesamtemissionsverhältnisse von Stoffen (Mittelwerte) 226
A11 Heizwerte und Brennwerte 227
A12 Sättigungspartialdruck von Wasser 228

B Zustandsdiagramme auf plus.hanser-fachbuch.de

Mollier h,s-Diagramm von Wasserdampf
T,s-Diagramm von Wasser und Wasserdampf
lg p,h-Diagramme von Ammoniak und Propan
h_{1+x},x_W-Diagramme von feuchter Luft

Sachwortverzeichnis 229

1 Thermodynamische Größen

1.1 Größenarten

Für eine allgemeine Größe Z gilt:

Größenart	Definition	Umrechnung	Beispiele
Spezifische Größen - auf Masse m bezogen: → Kleinbuchstabe	$\boxed{z = \frac{Z}{m}}$		$v, h, s,$ q, w
Molare Größen - auf Stoffmenge n (Molmenge) bezogen: → Kleinbuchstabe quer überstrichen	$\overline{z} = Z_{\mathrm{m}} = \frac{Z}{n}$	$\boxed{\overline{z} = M \cdot z}$ M ↗ A2	$\overline{v}, \overline{h}, \overline{s}$, $\overline{q}$, $\overline{w}$
Volumenbezogene Größen - auf Volumen V bezogen: → Kleinbuchstabe mit Schlangenlinie (Tilde)	$\tilde{z} = \frac{Z}{V}$	$\tilde{z} = \rho \cdot z$ ρ ↗ 3.3	ρ , $\tilde{q}$
Flächenbezogene Größen - auf Fläche A bezogen: → Kleinbuchstabe mit Dach	$\hat{z} = \frac{Z}{A}$		$\hat{q}$
Zeitbezogene Größen (Ströme, Leistungen) - auf Zeit t bezogen : → Großbuchstabe mit Punkt	$\dot{Z} = \frac{Z}{t}$	$\boxed{\dot{Z} = \dot{m} \cdot z}$ $\dot{m}$ ↗ 5.2	$\dot{V}$, $\dot{H}$, $\dot{Q}$, $\dot{W} = P$, $\dot{m}$, $\dot{n}$
Zeit- und flächenbezogene Größen (Stromdichten) - auf Zeit und Fläche A bezogen : → Kleinbuchstabe mit Punkt und Dach	$\hat{\dot{z}} = \frac{\dot{Z}}{A}$		$\hat{\dot{m}}$, $\hat{\dot{q}}$

1.2 Größen und Einheiten

Größe	SI-Einheit	Empfohlene Einheit
Länge z	1 m	1 m
Fläche A	1 m^2	1 m^2
Volumen V	1 m^3	1 m^3
Zeit t	1 s	1 s
Geschwindigkeit c	1 m s^{-1}	1 m s^{-1}
Masse m	1 kg	1 kg
Stoffmenge n (Molmenge)	1 mol	1 kmol = 1000 mol
Molare Masse M	1 kg mol^{-1}	1 kg $kmol^{-1}$ = 0,001 kg mol^{-1}
Kelvin-(thermodynamische) Temperatur T	1 K	1 K
Celsius-Temperatur ϑ	1 °C	1 °C
Kraft F	1 N = 1 kg m s^{-2}	1 kN = 1000 N
Druck p	1 Pa = 1 N m^{-2}	1 kPa = 1000 Pa
	1 bar = 10^5 Pa = 0,1 MPa	1 kPa = 0,01 bar
Enthalpie H innere Energie U freie Energie F freie Enthalpie G Exergie E Wärme Q Arbeit W	1 J = 1 Nm = 1 Ws	1 kJ = 1000 J

Größe	SI-Einheit	Empfohlene Einheit
spezifische Enthalpie h spezifische innere Energie u spezifische freie Energie f spezifische freie Enthalpie g spezifische Exergie e spezifische Wärme q spezifische Arbeit w	1 J kg^{-1} = 1 Nm kg^{-1} = 1 m^2 s^{-2}	1 kJ kg^{-1} = 1000 J kg^{-1} = 1000 m^2 s^{-2}
spezifische Wärmekapazitäten c_p, c_v spezifische Entropie s spezifische Gaskonstante R	1 J kg^{-1} K^{-1} = 1 Nm kg^{-1} K^{-1}	1 kJ kg^{-1} K^{-1} = 1000 J kg^{-1} K^{-1}
Enthalpiestrom $\dot{H}$ Exergiestrom $\dot{E}$ Wärmestrom bzw. Wärmeleistung $\dot{Q}$ Arbeitsleistung $P = \dot{W}$	1 W = 1 J s^{-1} = 1 Nm s^{-1}	1 kW = 1000 W = 1000 J s^{-1}
Entropiestrom $\dot{S}$ Wärmekapazitätsstrom $\dot{C}$	1 W K^{-1} = 1 Nm s^{-1} K^{-1}	1 kW K^{-1} = 1000 J s^{-1} K^{-1}
Wärmeleitkoeffizient λ	1 W m^{-1} K^{-1}	1 W m^{-1} K^{-1}
Wärmeübergangskoeffizient α Wärmedurchgangskoeffizient k	1 W m^{-2} K^{-1}	1 W m^{-2} K^{-1}

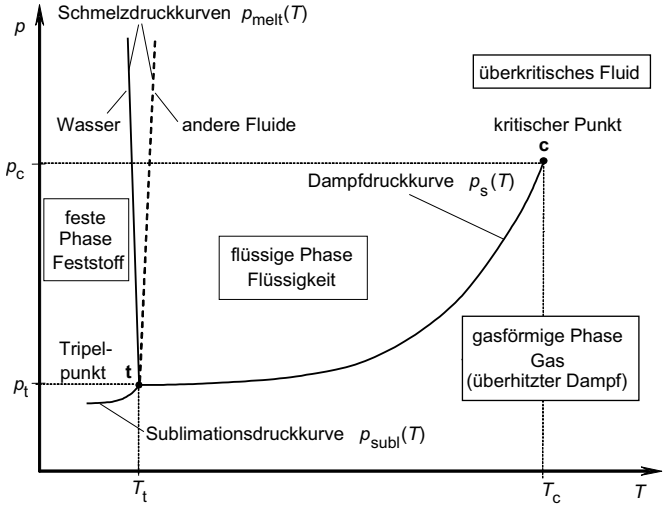
1.3 Umrechnung von Einheiten

Einheit	Umrechnung in SI-Einheit			
Inch	1 in (")	=	0,0254	m
Foot (12 in)	1 ft	=	0,3048	m
Yard (3 ft)	1 yd	=	0,9144	m
Gallon (U.S.)	1 gal	=	0,0037854	m^3
Gallon (U.K.)	1 gal	=	0,0045461	m^3
Barrel Petrol (U.S.)	1 barrel Petrol	=	0,1589873	m^3
Foot per minute	1 ft min^{-1}	=	0,00508	m s^{-1}
Yard per second	1 yd s^{-1}	=	0,9144	m s^{-1}
Mile per hour	1 mile h^{-1}	=	1,6093	km h^{-1}
Square foot per second	1 ft^2 s^{-1}	=	0,092903	m^2 s^{-1}
Pound	1 lb	=	0,4535924	kg
Cubic foot per pound	1 ft^3 lb^{-1}	=	0,0624280	m^3 kg^{-1}
Pound per cubic foot	1 lb ft^{-3}	=	16,0185	kg m^{-3}
Pound-force per square inch	1 psi (1 lbf in^{-2})	=	6,894757	kPa
Pound per foot and second	1 lb ft^{-1} s^{-1}	=	1,48816	Pa s
Horsepower	1 hp	=	0,74570	kW
British thermal unit	1 Btu	=	1,055056	kJ
Btu per hour	1 Btu h^{-1}	=	0,2930711	W
Btu per pound	1 Btu lb^{-1}	=	2,326	kJ kg^{-1}
Btu per pound and Rankine	1 Btu lb^{-1} $°R^{-1}$	=	4,1868	kJ kg^{-1} K^{-1}
Btu per hour, foot, and Rankine	1 Btu h^{-1} ft^{-1} $°R^{-1}$	=	1,73073	W m^{-1} K^{-1}
Btu per hour, square foot, and Rankine	1 Btu h^{-1} ft^{-2} $°R^{-1}$	=	5,678263	W m^{-2} K^{-1}

2 Zustandsverhalten reiner Stoffe

2.1 Einphasengebiete und Phasenübergänge

Einphasengebiete im *p*,*T*-Diagramm



Phasenübergänge

Übergang	Bezeichnung	Druckbereich
flüssig → gasförmig gasförmig → flüssig	Verdampfen Kondensieren	$p_t \leq p \leq p_c$
fest → flüssig flüssig → fest	Schmelzen Erstarren (Gefrieren)	$p \geq p_t$
fest → gasförmig gasförmig → fest	Sublimieren Desublimieren	$p \leq p_t$

p_t Tripelpunktdruck, p_c kritischer Druck

Tripelpunkt eines Stoffes

Am Tripelpunkt liegt ein reiner Stoff gleichzeitig in allen drei Phasen (Feststoff, Flüssigkeit und Dampf) im Sättigungszustand vor. Er ist für jeden Stoff durch einen bestimmten Druck p_t und eine bestimmte Temperatur T_t naturgesetzlich gegeben.

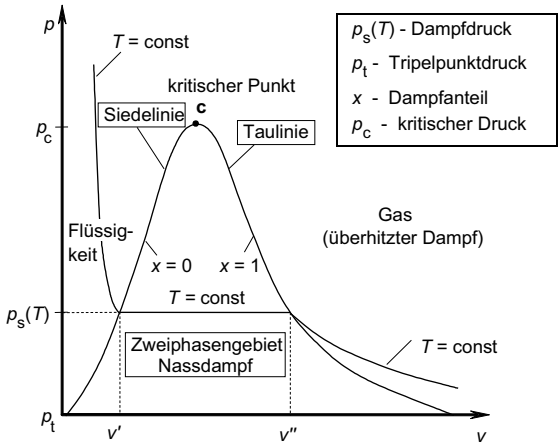
Zustandsgrößen im Einphasengebiet

$$\boxed{z = \mathrm{f}(p, T)}$$

z Zustandsgröße
p Druck
T Temperatur

2.2 Zweiphasengebiet flüssig – gasförmig

Fluides Zweiphasengebiet im *p*,*v*-Diagramm



Siedelinie: Zustände siedender Flüssigkeit

Taulinie: Zustände trocken gesättigten Dampfes

Fluidbezeichnungen

Zustand	Temperatur	Bezeichnung
Flüssigkeit	$T < T_s(p)$	(unterkühlte) Flüssigkeit
	$T = T_s(p)$	siedende Flüssigkeit
Zweiphasengemisch	$T = T_s(p)$	Nassdampf
Dampf (Gas)	$T = T_s(p)$	(trocken) gesättigter Dampf, auch Sattdampf genannt
	$T > T_s(p)$	überhitzter Dampf, auch Heißdampf genannt

T Temperatur

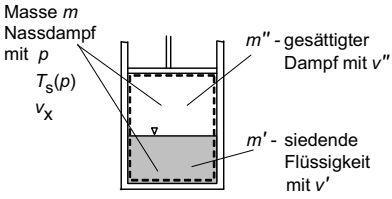
$T_s(p)$ Siedetemperatur beim Druck p ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

Zweiphasengemisch Nassdampf

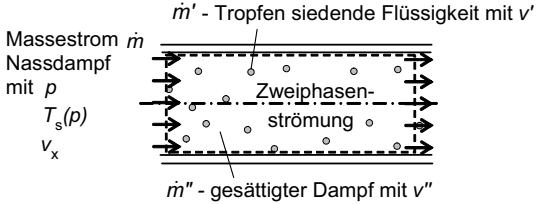
Nassdampf ist das Zweiphasengemisch bestehend aus siedender Flüssigkeit und (trocken) gesättigtem Dampf

Zustand	Bezeichnung
Siedende Flüssigkeit:	Zeiger: '
Gesättigter Dampf:	Zeiger: "
Nassdampf (spezifische Zustandsgrößen):	Index: x

Nassdampf im geschlossenen System



Nassdampf im offenen System



Nassdampfmasse und Nassdampfmassestrom

$$\boxed{m = m' + m''} \qquad \boxed{\dot{m} = \dot{m}' + \dot{m}''}$$

Dampfanteil

$$\boxed{x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''}} \qquad \boxed{x = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}' + \dot{m}''}}$$

x Dampfanteil (Dampfmasseanteil)

m, $\dot{m}$ Nassdampfmasse bzw. -massestrom

m', $\dot{m}'$ Masse bzw. Massestrom der enthaltenen siedenden Flüssigkeit

m'', $\dot{m}''$ Masse bzw. Massestrom des enthaltenen gesättigten Dampfes

Definitionsbereich des Dampfanteils x

$$\boxed{0 \le x \le 1}$$

$x = 0$ bei siedender Flüssigkeit (Siedelinie)

$0 < x < 1$ bei Nassdampf

$x = 1$ bei gesättigtem Dampf (Taulinie)

Siedetemperatur und Dampfdruck

$T_s(p)$ Siedetemperatur beim Druck p ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

$p_s(T)$ Dampfdruck bei Temperatur T ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

Spezifische Zustandsgrößen des Zweiphasengemisches Nassdampf (Sättigungszustand)

Für $z = v, h, u, s, e$ gilt

$$\boxed{z_x = z' + x \cdot (z'' - z')}$$

z_x spezifische Zustandsgröße des Nassdampfes

x Dampfanteil (Dampfmasseanteil)

z' spezifische Zustandsgröße der siedenden Flüssigkeit

$$\boxed{z' = \mathrm{f}(T) \text{ oder } = \mathrm{f}(p)}$$

z'' spezifische Zustandsgröße des gesättigten Dampfes

$$\boxed{z'' = \mathrm{f}(T) \text{ oder } = \mathrm{f}(p)}$$

2.3 Bereiche für Zustandsberechnung

Unterteilung des fluiden Zustandsbereiches für Berechnung der Zustandsgrößen

Reales Fluid
gesamtes fluides Einphasengebiet (Flüssigkeit und Gas)

Sonderfall: ideales Gas
Zustandsbereich, in dem die Zustandsgrößen eines Gases mit guter Näherung wie die eines idealen Gases berechnet werden können

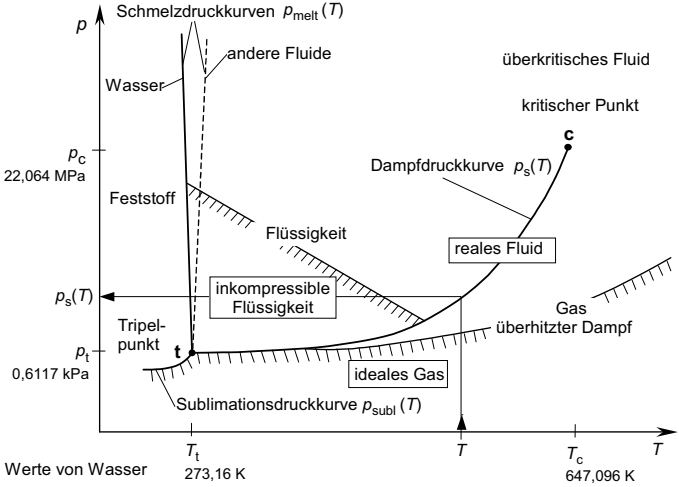
Sonderfall: inkompressible (ideale) Flüssigkeit
Zustandsbereich, in dem eine Flüssigkeit mit guter Näherung als inkompressibel (ideal) berechnet werden kann

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes
Zweiphasengemisch aus siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf

Die Diagramme der folgenden Abschnitte zeigen die Bereiche für die Zustandsberechnung.

2.3.1 Bereiche für Zustandsberechnung im *p*,*T*-Diagramm

p,*T*-Diagramm mit Bereichen für die Zustandsberechnung



Bereiche für Zustandsberechnung

reales Fluid

↗ Berechnung in 3.3.2, 4.1.2, 4.2.2, 4.3.2, 4.4.2, 4.5

ideales Gas

↗ Berechnung in 3.3.3, 4.1.3, 4.2.3, 4.3.3, 4.4.3, 4.5

inkompressible (ideale) Flüssigkeit

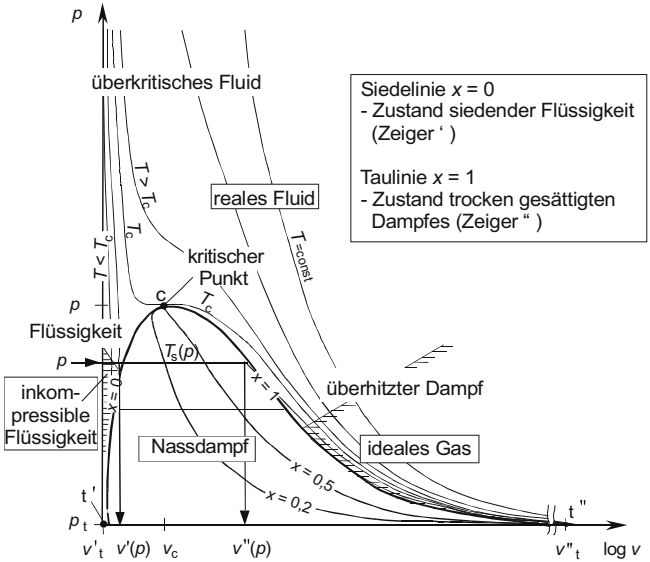
↗ Berechnung in 3.3.4, 4.1.4, 4.2.4, 4.3.4, 4.4.4, 4.5

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung in 3.3.5, 4.1.5, 4.2.5, 4.3.5, 4.4.5, 4.5

2.3.2 Bereiche für Zustandsberechnung im *p*,*v*-Diagramm

p,*v*-Diagramm mit Bereichen für die Zustandsberechnung



Bereiche für Zustandsberechnung

reales Fluid

↗ Berechnung von v in 3.3.2

ideales Gas

↗ Berechnung von v in 3.3.3

inkompressible (ideale) Flüssigkeit

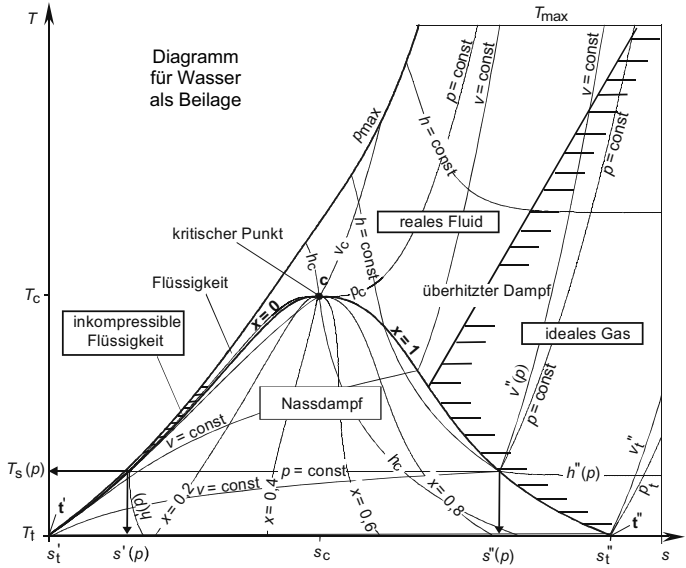
↗ Berechnung von v in 3.3.4

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung von v in 3.3.5

2.3.3 Bereiche für Zustandsberechnung im *T*,*s*-Diagramm

T,*s*-Diagramm mit Bereichen für die Zustandsberechnung



Bereiche für Zustandsberechnung

reales Fluid

↗ Berechnung von s in 4.4.2

ideales Gas

↗ Berechnung von s in 4.4.3

inkompressible (ideale) Flüssigkeit

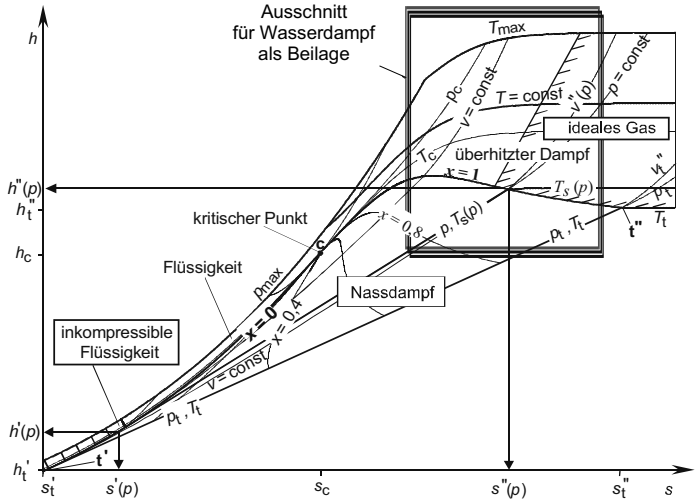
↗ Berechnung von s in 4.4.4

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung von s in 4.4.5

2.3.4 Bereiche für Zustandsberechnung im *h*,*s*-Diagramm

h,*s*-Diagramm mit Bereichen für die Zustandsberechnung



Bereiche für Zustandsberechnung

reales Fluid

↗ Berechnung von h in 4.3.2, s in 4.4.2

ideales Gas

↗ Berechnung von h in 4.3.3, s in 4.4.3

inkompressible (ideale) Flüssigkeit

↗ Berechnung von h in 4.3.4, s in 4.4.4

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung von h in 4.3.5, s in 4.4.5