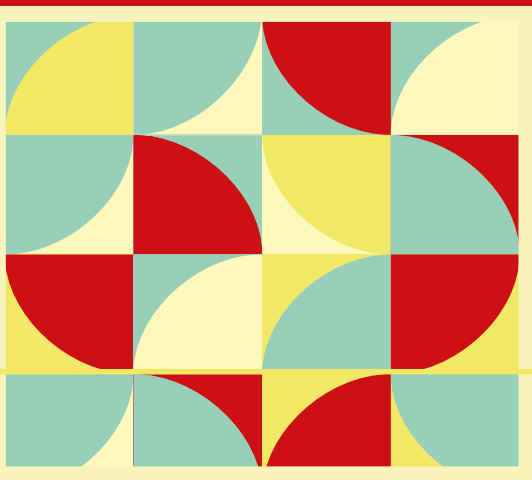


Hans-Joachim Kretzschmar
Ingo Kraft
Tobias Göpfert



Kleine Formelsammlung

Technische Thermodynamik



7., aktualisierte Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Aufgrund der komplexen Strukturen der vorliegenden Inhalte, war es dem Verlag mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht möglich, den Inhalt in barrierefreier Form zur Verfügung zu stellen.

Sollten Sie Bedarf an den Inhalten in barrierefreier Form haben, wenden Sie sich bitte an den Verlag.

Kretzschmar / Kraft / Göpfert
Kleine Formelsammlung
Technische Thermodynamik



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf plus.hanser-fachbuch.de gibt es kostenloses Zusatzmaterial zu diesem Buch. Den Zugangscod finden Sie am Ende des Werkes.



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
Tobias Göpfert

Kleine Formelsammlung

Technische Thermodynamik

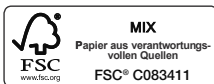
7., aktualisierte Auflage

Über die Autoren:

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

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

Prof. Dr.-Ing. Tobias Göpfert, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig



Print-ISBN: 978-3-446-48530-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-48700-0

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen 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:innen, Herausgeber:innen 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 also 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 benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werkes für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Wilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Thomas West

Titelmotiv: Max Kostopoulos

Satz: Hans-Joachim Kretzschmar

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Vorwort zur siebten Auflage

Die „Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik“ ist inzwischen zu einem Standardwerk geworden. Ihrer kontinuierlichen Fortschreibung verpflichtet hat sich das Autorenteam mit Prof. Dr.-Ing. *Tobias Göpfert*, Professur Angewandte Thermodynamik an der HTWK Leipzig vergrößert. Die vorliegende siebente Auflage wurde durchgesehen 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. Dr. Dr. e. h. *Wolfgang Wagner* †, Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum.

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

Das Kapitel „Ideale Gasgemische“ und ergänzende Software für Excel, MATLAB, Mathcad, IOS und Android stehen auf der Website www.thermodynamik-formelsammlung.de zum Download bereit.

Hans-Joachim Kretschmar, Ingo Kraft und Tobias Göpfert

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 Anwen- dungsfälle	175
11.5	Wärmedurchgang	177
12	Thermodynamik der feuchten Luft	182
12.1	Konstanten und Mittelwerte 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.....	220
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	
	$\log p,h$ -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	$\bar{z} = Z_m = \frac{Z}{n}$	$\boxed{\bar{z} = M \cdot z}$ $M \nearrow A_2$	$\bar{v}, \bar{h}, \bar{s},$ \bar{q}, \bar{w}
Volumenbezogene Größen - auf Volumen V bezogen: → Kleinbuchstabe mit Schlangenlinie (Tilde)	$\tilde{z} = \frac{Z}{V}$	$\tilde{z} = \rho \cdot z$ $\rho \nearrow 3.3$	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	$\dot{Z} = \frac{Z}{t}$	$\boxed{\dot{Z} = \dot{m} \cdot z}$ $\dot{m} \nearrow 5.2$	$\dot{V}, \dot{H},$ $\dot{Q},$ $\dot{W} = P,$ \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	1 J = 1 Nm = 1 Ws	1 kJ = 1000 J
Exergie E		
Wärme Q		
Arbeit W		

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

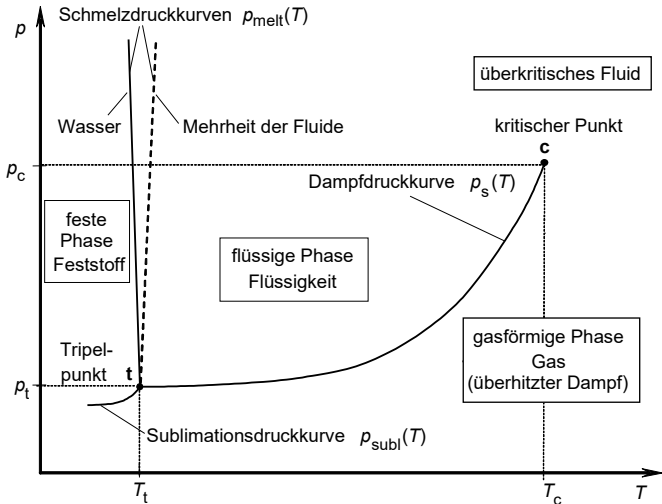
1.3 Umrechnung von Einheiten

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 \rightarrow gasförmig	Verdampfen	$p_t \leq p \leq p_c$
gasförmig \rightarrow flüssig	Kondensieren	
fest \rightarrow flüssig	Schmelzen	$p \geq p_t$
flüssig \rightarrow fest	Erstarren (Gefrieren)	
fest \rightarrow gasförmig	Sublimieren	$p \leq p_t$
gasförmig \rightarrow fest	Desublimieren	

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 die meisten reinen Stoffe durch einen bestimmten Druck p_t und eine bestimmte Temperatur T_t gegeben.

Zustandsgrößen im Einphasengebiet

$$z = f(p, T)$$

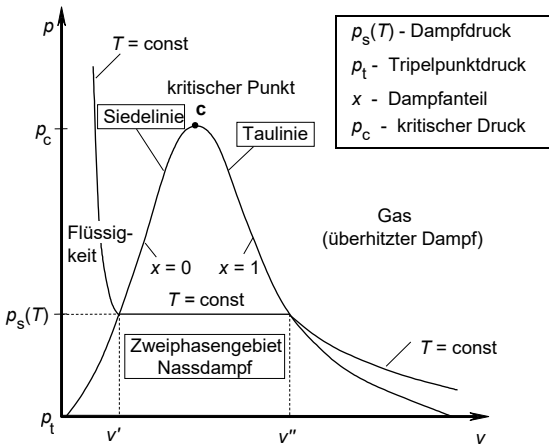
z Zustandsgröße

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

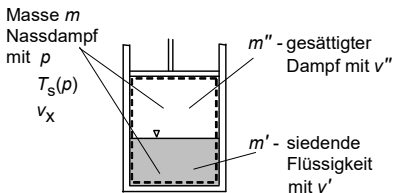
$T_s(p)$ Siedetemperatur beim Druck p ↗ A4, [S6] Werte für Wasser

Zweiphasengemisch Nassdampf

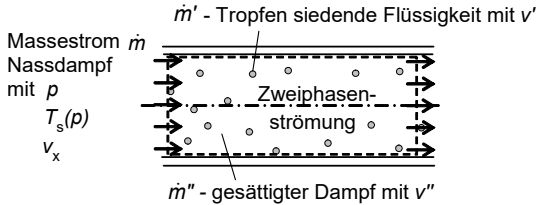
Nassdampf ist das Zweiphasengemisch bestehend aus siedender Flüssigkeit und (trocken) gesättigtem Dampf.

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

Beispiel für Nassdampf im geschlossenen System



Beispiel für Nassdampf im offenen System



Nassdampfmasse und Nassdampfmassestrom

$$m = m' + m''$$

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

Dampfanteil

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

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

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

$$0 \leq x \leq 1$$

$x = 0$ 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

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

z_x spezifische Zustandsgröße des Nassdampfes

x Dampfanteil (Dampfmasseanteil)

z' spezifische Zustandsgröße der siedenden Flüssigkeit

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

z'' spezifische Zustandsgröße des gesättigten Dampfes

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

2.3 Bereiche für Zustandsberechnung

Unterteilung des fluiden Zustandsbereiches für Berechnung der Zustandsgrößen

Reales Fluid

gesamtes fluides Einphasengebiet (Flüssigkeit, Gas, einschließlich überkritisches Fluid)

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

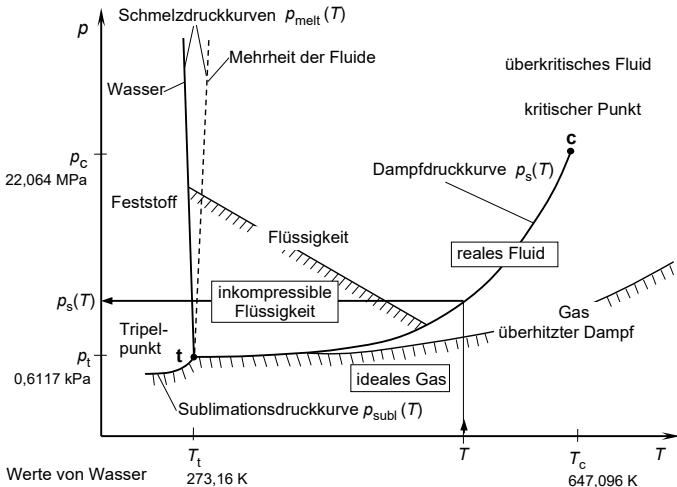
Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

Zweiphasengemisch aus siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf

Die Diagramme in den folgenden Abschnitten zeigen diese genannten 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

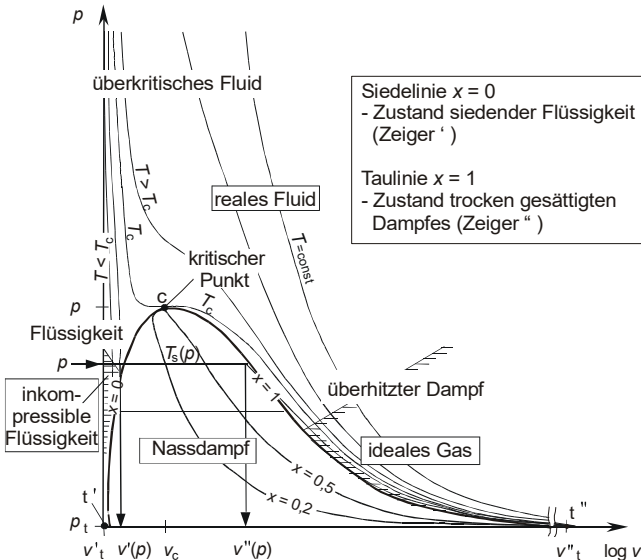
↗ Berechnung in 3.3.4, 4.1.4, 4.2.4, 4.3.4, 4.4.4, 4.5

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

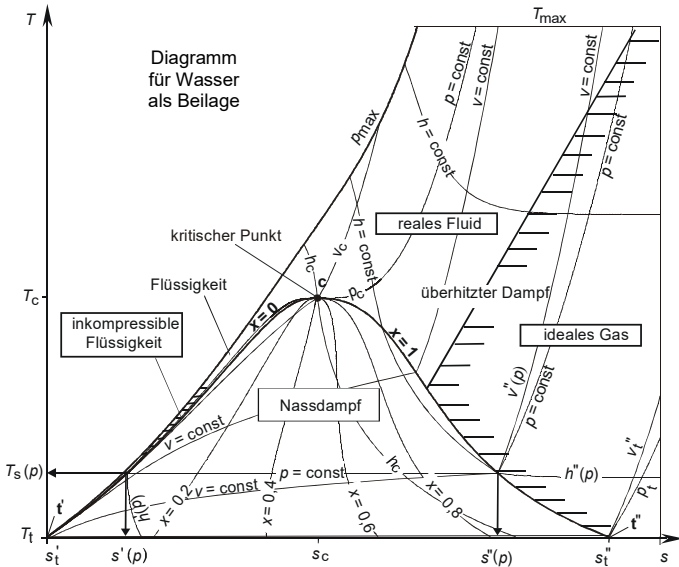
↗ Berechnung von v in 3.3.4

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

incompressible (ideale) Flüssigkeit

↗ Berechnung von S in 4.4.4

Nassdampf einschl. siedender Flüssigkeit und gesättigten Dampfes

↗ Berechnung von S in 4.4.5

