

SPRINGER  
REFERENCE

VDI-Gesellschaft  
Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen  
*Hrsg.*

# VDI- Wärmeatlas

*11., bearbeitete und erweiterte Auflage*

VDI



Springer Vieweg

Verein Deutscher Ingenieure  
VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC)  
Herausgeber

# VDI-Wärmeatlas

## 11., bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1151 Abbildungen und 320 Tabellen

Refaktionausschuss der 11. Auflage  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabisch, Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Ernst, Karlsruhe  
Prof. Dr.-Ing. Günter Mayr, Karlsruhe  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Mewes, Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Schaber, Karlsruhe  
Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Darmstadt



Herausgeber  
VDI e.V.  
VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen  
(VDI-GVC)  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf  
Germany

7.–10. Aufl. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994, 1997, 2002, 2006  
1.–6. Aufl. © VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf

ISBN 978-3-642-19980-6 e-ISBN 978-3-642-19981-3  
Print und eBook ISBN 978-3-642-19982-0  
DOI 10.1007/978-3-642-19981-3  
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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


Springer Vieweg  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.  
Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

Springer Vieweg 

## D2.1 Wasser

Wolfgang Wagner<sup>1</sup> · Hans-Joachim Kretzschmar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland

<sup>2</sup>Hochschule Zittau/Görlitz, University of Applied Sciences, Zittau, Deutschland

1 Einleitung .....	175	3 Literatur .....	195
2 Tabellen der thermodynamischen Eigenschaften und der Transportgrößen.....	175		

### 1 Einleitung

Für die Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Wasser existieren zwei Standard-Zustandsgleichungen, die von der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) zu internationalen Standards erhoben worden sind. IAPWS-Standards entsprechen ISO-Standards, die es für Wasser nicht gibt.

Die wissenschaftliche Standard-Zustandsgleichung ist die 1995 von der IAPWS verabschiedete „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“ [1, 2], die kurz als IAPWS-95 bezeichnet wird. Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-95 umfasst für Drücke oberhalb des Drucks am Tripelpunkt den gesamten stabilen fluiden Bereich von der Schmelzdruckkurve (tiefste Temperatur –22,985°C bei 2099 bar) bis zu 1000°C und Drücken bis zu 10000 bar. Die Gleichung kann weit über diese Grenzen hinaus sinnvoll bis zu sehr hohen Temperaturen und Drücken extrapoliert werden. In der Gasphase kann die IAPWS-95 für Temperaturen bis hinab zu –223,15°C für Drücke unterhalb des Sublimationsdrucks [3, 4] bei dieser Temperatur verwendet werden [5].

Der Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf ist die von der IAPWS 1997 verabschiedete „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ [6, 7], kurz als IAPWS-IF97 bezeichnet. Die IAPWS-IF97 besteht aus einem Satz von Gleichungen für verschiedene Bereiche, wobei insgesamt folgender Gültigkeitsbereich abgedeckt wird:

$$0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 800^{\circ}\text{C} \quad p \leq 1000 \text{ bar},$$

$$800^{\circ}\text{C} < t \leq 2000^{\circ}\text{C} \quad p \leq 500 \text{ bar}.$$

Durch Anpassung der sog. Basisgleichungen der IAPWS-IF97 an die IAPWS-95 wurde der Industrie-Standard an den wissenschaftlichen Standard angekoppelt. Die Industrie-Formulation IAPWS-IF97 ist in dem Buch „International Steam Tables“ [7] umfassend beschrieben, in kürzerer Form auch in [6]. Neben den Basisgleichungen (Abhängigkeit der Zustandsgrößen von Druck und Temperatur) der IAPWS-IF97 enthält das Buch (im Gegensatz zu [6]) auch alle sog. Rückwärtsgleichungen, die

in den letzten Jahren als ergänzende Standards entwickelt wurden. Diese Rückwärtsgleichungen erlauben eine sehr schnelle Berechnung der verschiedenen Zustandsgrößen für andere Eingangsgrößen als  $(p, T)$ , z.B.  $(p, h)$ ,  $(p, s)$  und  $(h, s)$  ohne Iteration. Darüber hinaus enthält das Buch auch Druck, Temperatur-Diagramme für 25 Zustandsgrößen, und in [6, 7] sind Angaben zur Unsicherheit der mit der IAPWS-IF97 berechneten Zustandsgrößen spezifisches Volumen, spezifische isobare Wärmekapazität, Schallgeschwindigkeit und Sättigungsdruck enthalten. Unsicherheiten der berechneten spezifischen Enthalpien und Enthalpiedifferenzen findet man in [7, 8].

### 2 Tabellen der thermodynamischen Eigenschaften und der Transportgrößen

Die Werte der thermodynamischen Zustandsgrößen in den Tabellen 1 bis 14 wurden aus der Industrie-Formulation IAPWS-IF97 [6, 7] berechnet.

Die Werte der Transportgrößen wurden aus den IAPWS-Gleichungen für die dynamische Viskosität [7, 9], die Wärmeleitfähigkeit [10] und die Oberflächenspannung [7, 11] ermittelt. Werte weiterer Zustandsgrößen sind in den International Steam Tables [7] tabelliert.

Die Tabellen 1 bis 14 enthalten die folgenden Größen:

$t$	Celsius Temperatur	$\alpha_v$	isobarer Volumen-Ausdehnungskoeffizient, $\alpha_v = (1/v)(\partial v/\partial T)_p$
$T$	absolute Temperatur	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$p$	Druck	$\eta$	dynamische Viskosität
$p_s$	Sättigungsdruck	$\nu$	kinematische Viskosität, $\nu = \eta/\rho$
$\rho$	Dichte	$a$	Temperaturleitfähigkeit, $a = \lambda/(c_p \rho)$
$v$	spezifisches Volumen	Pr	Prandtl-Zahl, $Pr = \eta c_p/\lambda$
$Z$	Realgasfaktor, $Z = p/(\rho RT)$	$\sigma$	Oberflächenspannung
$h$	spezifische Enthalpie		