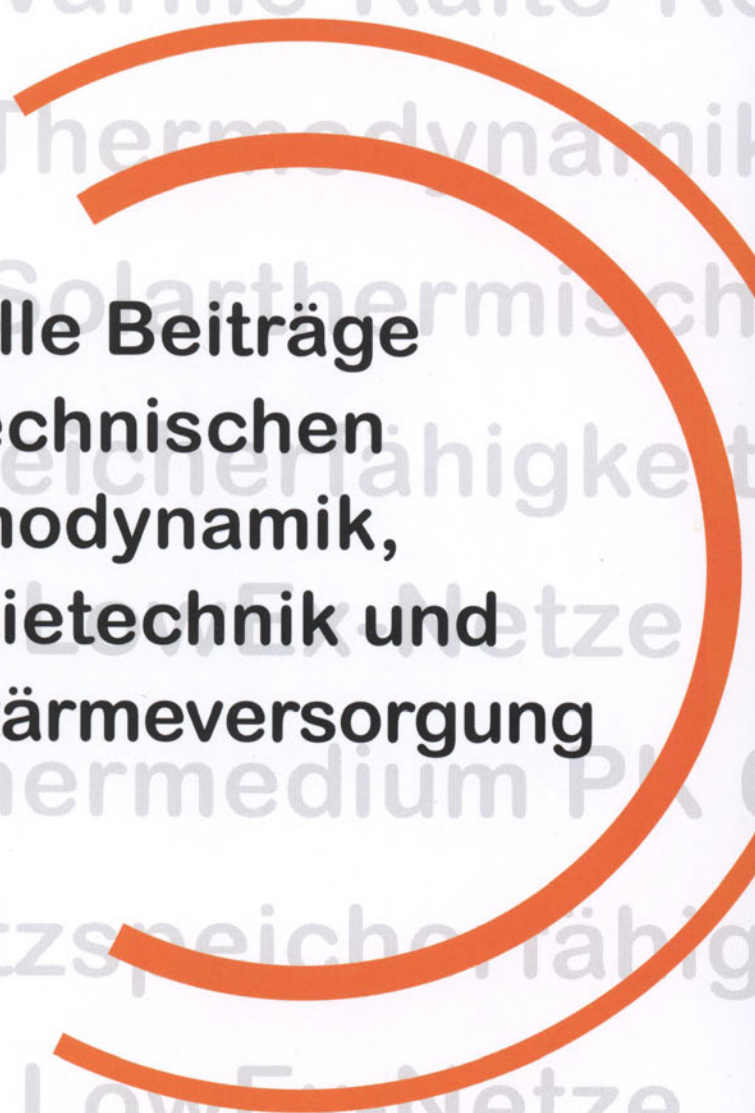


Sonderveröffentlichung

A large, stylized orange graphic consisting of three concentric, curved lines that form a partial circle, resembling a signal or a stylized 'G'. It is positioned behind the main title text.

**Aktuelle Beiträge
zur Technischen
Thermodynamik,
Energietechnik und
Fernwärmeversorgung**

Aktuelle Beiträge zur Technischen Thermodynamik, Energietechnik und Fernwärmeversorgung

1. Auflage 2011

Stand: März 2011

© AGFW/ Fraunhofer IML

98

97

Herausgeber:
AGFW | Der Energieeffizienzverband für
Wärme, Kälte und KWK e. V
Stresemannallee 28
D-60596 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6304-1
Telefax: +49 69 6304-391
E-Mail: info@agfw.de
Internet: www.agfw.de

Verlag:
AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung,
Information und Standardisierung mbH
Stresemannallee 28
D-60596 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6304-1
Telefax: +49 69 6304-391
E-Mail: info@agfw.de
Internet: www.agfw.de

Sonderveröffentlichung
Limitierte Auflage

Hinweis:
Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der
Herausgeber gestattet.
Alle Angaben in dieser Broschüre sind nach bestem Wissen unter Anwendung aller
gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von den Autoren, den Heraus-
gebern und dem Verlag keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Stand: März 2011

© AGFW, Frankfurt am Main

Inhalt

Grußworte	8 -13
Prof. Dr. Cornelia Breitkopf, Prof. Dr. Clemens Felsmann, Dipl.-Ing. Werner Lutsch, Reiner Zieschank, Dr. Christof Regelmann	
Danke für gemeinsame Jahre des Lernens	14
Prof. Dr. Matthias Krause	
Zellulare metallische Werkstoffe für innovative Latentwärme- Speichertechnologien	15
Dr.-Ing. Jens Meinert, Dr.-Ing. Günter Stephani	
Druckluftspeicherung –Technik, Chancen und Probleme	22
Dr.-Ing. habil. Rutger Kretschmer	
KWK-Strom - Bestimmung und Bewertung	30
Prof. Dr. Matthias Krause, Dr. Claudius Nestke	
Untersuchung der Netzspeicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und Integration in die Einsatzoptimierung von Wärmeerzeugern	38
Dipl.-Math. Sebastian Groß	
Autarke thermische Verdichtung zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung? - Eine grundlegende thermodynamische Betrachtung	45
Dipl.-Ing. (FH) Torben Möller	
Modellierung von KWK-Anlagen - Untersuchung zur Transformations- möglichkeit bestehender Fernwärmesysteme in LowEx-Netze	51
Dipl.-Ing. Martin Rhein, Dr.-Ing. Thomas Sander	
Diskretes Gebäudemodell zur dynamischen thermohydraulischen Fernwärmesimulation	57
Dipl.-Ing. (FH) Dominik Haas, Dipl.-Ing. Steffen Robbi	
Entlüftung und Entgasung von Solaranlagen	66
Dr.-Ing. Karin Rühling, Dipl.-Ing. Martin Heymann, Dipl.-Ing. Felix Panitz, Dipl.-Phys. Ralph Eismann	
Integrale Fernwärmesimulation mit TRNSYS-TUD	73
Dipl.-Ing. Steffen Robbi, Dipl.-Ing. (FH) Dominik Haas, Dr.-Ing. Alf Perschke	

Theoretische Analysen zu Rücklauftemperaturen in Gebäudeheiznetzen	81
Dipl.-Ing. Andrea Meinzenbach, Dr.-Ing. Martin Knorr	
Kommunale Energieeffizienz als wesentlicher Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen	88
Dipl.-Ing. Matthias Mischke, Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Pinnau	
Untersuchung des Latentspeichermediums PK 6 für den Einsatz in climatechnischen Anlagen	95
Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Pinnau, Dipl.-Ing. Matthias Mischke, Wolfgang Menzel	
Die Rolle der Thermodynamik bei der Elektromobilität	102
Dipl.-Ing. Lars Schinke, Dipl.-Ing. (FH) Tobias Schulze	
Strömungs- und Wärmeübergang in Kühlkanälen mit Methan	110
Dipl.-Ing. André Schlott	
Numerische Berechnungen von scheidholzbeheizten Kaminöfen	117
Dipl.-Ing. Ulf Sénéchal, Prof. Dr. Tobias Zschunke	
Bereitstellung von thermodynamischen Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik	124
Prof. Dr. Hans-Joachim Kretschmar	
Zyklische Rohr-Boden Interaktion in solarthermischen Wärmenetzen	134
Dr.-Ing. Ingo Weidlich	

Bereitstellung von thermodynamischen Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik

Hans-Joachim Kretzschmar

Hochschule Zittau/Görlitz, Fakultät Maschinenwesen, Fachgebiet Technische Thermodynamik

E-Mail: hj.kretzschmar@hs-zigr.de

1 Einleitung

Die in diesem Beitrag dargestellten Arbeiten stellen eine Fortsetzung der Dresdner Schule auf dem Gebiet der Stoffwert-Thermodynamik dar. Beginnend mit den Arbeiten zu den Eigenschaften des Wasserdampfes und der feuchten Luft durch R. Mollier Anfang des 20. Jahrhunderts, die zur Etablierung des h,s - und des h,x -Diagramms führten, über F. Merkel, der das h,ξ -Diagramm zur Darstellung der Eigenschaften von Gemischen konzipierte, bis hin zu den gemeinsamen Arbeiten von N. Elsner und M. P. Wukalowitsch (Moskauer Energetisches Institut) zu den Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf ab Mitte des vergangenen Jahrhunderts, deren Ergebnisse in gemeinsamen Wasserdampftafeln dokumentiert wurden, entwickelte sich diese Schule an der Technischen Universität Dresden. Einen gewissen Höhepunkt der Arbeiten stellte die 1982 erschienene Wasserdampftafel mit dem Titel "Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser" /Elsner 1982/ dar. Die neben N. Elsner beteiligten Koautoren S. Fischer und J. Klinger waren seit den 60er Jahren maßgeblich an den Arbeiten zur Bereitstellung von Stoffwert-Berechnungsalgorithmen auf der sich entwickelnden Rechentechnik beteiligt. Zugleich erfolgte eine Verbreiterung der Forschung auf weitere Arbeitsfluide der Energietechnik.

Diese Tradition nahm der Jubilar, Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittmann, nach seiner Berufung 1983 als Professor für Technische Thermodynamik auf und führte die Arbeiten auf dem Gebiet der Stoffwert-Thermodynamik konsequent fort. Der Förderung dieser Arbeiten verdankt der Autor maßgeblich seine Weiterentwicklung nach der Promotion 1982 /Kretzschmar 1982/ auf diesem Gebiet. Die Konzeption für Lösungswege einer schnellen Stoffwert-Bereitstellung in energietechnischen Prozessberechnungen wurde in der Veröffentlichung /Kretzschmar 1987/ beschrieben. Eine vollständige Darstellung der Problematik enthält die 1990 abgeschlossene Promotion B /Kretzschmar 1990/ (anerkannt als Habilitation 1992), deren wissenschaftlicher Betreuer und erster Gutachter der Jubilar war.

Ausgehend von den in der Habilitation gezeigten Lösungswegen förderte der Jubilar in den Folgejahren weitergehende und unmittelbar praxisbezogene Aufgabenstellungen und Projekte. Ausgewählte Ergebnisse sollen in den folgenden Abschnitten dargestellt werden.

2 Entwicklung von schnellen Stoffwert-Berechnungsalgorithmen für energietechnische Prozessmodellierungen

Die drei möglichen Lösungswege zur schnellen Ermittlung von Stoffwerten in Prozessberechnungen sind:

- Berechnung mit vereinfachten Zustandsgleichungen bzw. Fundamentalgleichungen,
- Berechnung mit Stoffwert-Gleichungen für alle funktionalen Abhängigkeiten,
- Berechnung durch Interpolation von Stoffdatentabellen.

2.1 Vereinfachte Zustandsgleichungen

Seit Mitte der 1980er Jahre wurden Verfahren zur Erstellung von vereinfachten Zustandsgleichungen an der Professur Technische Thermodynamik der TU Dresden erarbeitet. Hierfür wurden die an der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Verfahren zur Optimierung der Struktur von approximierten Gleichungen /Wagner 1978/, /Wagner 1989/ aufgegriffen und für spezielle Anwendungen modifiziert /Zschunke 1989/.

Im Folgenden erarbeitete T. Zschunke in seiner Dissertation /Zschunke 1990/ eine Methode zur gleichmäßigen Approximation von vereinfachten Zustandsgleichungen. Dieses nichtlineare Verfahren beinhaltete die Minimierung des maximalen Fehlers zwischen einer genauen Ausgangsgleichung und der approximierten vereinfachten Gleichung.

Ausgehend von diesen Untersuchungen entwickelte Th. Willkommen ein Verfahren zur Approximation von numerisch konsistenten Vorwärts- und Rückwärtsgleichungen /Willkommen 1995/. Mit diesem Verfahren konnten beispielsweise zueinander passfähige Gleichungen einerseits für die spezifische Enthalpie als Funktion von Druck und Temperatur $h(p, T)$, als Vorwärtsgleichung bezeichnet, und andererseits für die Temperatur als Funktion von Druck und spezifischer Enthalpie $T(p, h)$, als die zugehörige Rückwärtsgleichung, aufgestellt werden. Solche Funktionen werden in thermodynamischen Berechnungen von energietechnischen Prozessen benötigt.

Parallel entwickelte J. Trübenbach ein Approximationsverfahren zur Erstellung von strukturoptimierten Gleichungen mit minimaler Anwendungsrechenzeit /Trübenbach 1999/. Hierbei wurde der Forderung der Industrie nach Gleichungen, die extrem schnell benötigte Stoffwerte berechnen können, entsprochen.

Höhepunkt dieser Forschungsarbeiten war die Mitarbeit an der Entwicklung einer neuen internationalen Industrie-Formulation für die Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf im Auftrag der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) unter der Federführung von W. Wagner (Ruhr-Universität Bo-

chum). Um vereinfachte Zustandsgleichungen mit geringster Anwendungsrechenzeit erstellen zu können, wurde der für energietechnische Prozessberechnungen benötigte Zustandsbereich (Temperaturen von 0 bis 2000 °C, Drücke bis 100 MPa) in fünf Unterbereiche unterteilt. Gemeinsam mit dem Fachgebiet Technische Thermodynamik der Hochschule Zittau/Görlitz wurden Rückwärtsgleichungen $T(p, h)$ für die Unterbereiche Flüssigkeit und überhitzter Dampf erarbeitet. Außerdem gelang es, eine hoch genaue implizite Gleichung, die nach Dampfdruck p_s und Siedetemperatur T_s umstellbar ist, zu entwickeln. Sie hat die Struktur

$$\beta^2 \vartheta^2 + a_1 \beta^2 \vartheta + a_2 \beta^2 + a_3 \beta \vartheta^2 + a_4 \beta \vartheta + a_5 \beta + a_6 \vartheta^2 + a_7 \vartheta + a_8 = 0$$

mit $\beta = (p_s / p^*)^{0.25}$ und $\vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{a_9}{(T_s / T^*) - a_{10}}$, wobei $p^* = 1 \text{ MPa}$ und $T^* = 1 \text{ K}$

Durch Umstellung nach dem reduzierten Druck β und anschließend nach p_s erhält man die Dampfdruckgleichung $p_s(T)$ und durch Umstellung nach ϑ und anschließend nach T_s die zugehörige Siedetemperaturgleichung $T_s(p)$. Der besondere Vorteil dieser umgestellten Gleichungen ist, dass sie zueinander exakt numerisch konsistent sind. Trotz dieser bemerkenswerten Eigenschaft geben die Gleichungen die Dampfdruckkurve von Wasser vom Tripelpunkt bis zum kritischen Punkt innerhalb der Genauigkeit der Messwerte wieder. Aufgenommen wurden die entwickelten Gleichungen in den internationalen Standard

"Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97)" /Wagner 2000/.

Insgesamt gelang es, die neue Industrie-Formulation in ihrer Anwendungsrechenzeit fünf Mal schneller als die vorherige Industrie-Formulation IFC-67 zu gestalten.

Später wurden vereinfachte Fundamentalgleichungen für eine Reihe weiterer Stoffe durch Span, Wagner und Lemmon entwickelt /Span 2003a/, /Span 2003b/, /Lemmon 2006/.

2.2 Stoffwert-Gleichungen für alle funktionalen Abhängigkeiten

Der zweite Lösungsweg für eine schnelle Stoffwert-Bereitstellung besteht in der Aufstellung von separaten Gleichungen für alle in Prozessberechnungen benötigten Funktionen, beispielsweise von Gleichungen für das spezifische Volumen $v(p, T)$, für die spezifische Enthalpie $h(p, T)$, für die spezifische Entropie $s(p, T)$ und Gleichungen für die zugehörigen Rückwärtsfunktionen $T(p, h)$, $T(p, s)$, $p(h, s)$. Dabei ist es nicht zwingend, dass die Gleichungen $v(p, T)$, $h(p, T)$, und $s(p, T)$ thermodynamisch konsistent zueinander sind. Wichtiger ist die extrem hohe numerische Konsistenz zwischen $T(p, h)$ und $h(p, T)$, zwischen $T(p, s)$ und $s(p, T)$ sowie zwischen

$p(h,s)$ und $h(p,T)$ gekoppelt mit $s(p,T)$. Der Vorteil, alle Abhängigkeiten mit separaten Gleichungen zu berechnen besteht darin, dass jede Gleichung bezüglich Anwendungsrechenzeit optimiert werden kann und Iterationen vermieden werden. In der Dissertation von J.Trübenbach /Trübenbach 1999/ entstand ein Algorithmus zur Erstellung solcher struktur- und anwendungsrechenzeitoptimierter Gleichungen.

Frau K. Knobloch nutzte in ihrer Dissertation /Knobloch 2006/ diesen Algorithmus und erstellte für Wasser und Wasserdampf einen Satz von Rückwärtsgleichungen zur Komplettierung der Industrie-Formulation IAPWS-IF97. Diese wurden von der IAPWS zu den folgenden ergänzenden Standards erhoben:

"Supplementary Release on Backward Equations for pressure as a function of enthalpy and entropy $p(h,s)$ to the Industrial Formulation IAPWS-IF97 for Water and Steam (IAPWS-IF97-S01)" /Kretzschmar 2006/,

"Revised Supplementary Release on Backward Equations for the Functions $T(p,h)$, $v(p,h)$ and $T(p,s)$, $v(p,s)$ for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97-S03 rev.)" /Kretzschmar 2007a/,

"Supplementary Release on Backward Equations $p(h,s)$ for Region 3, Equations as a Function of h and s for the Region Boundaries, and an Equation $T_{\text{sat}}(h,s)$ for Region 4 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97-S04)" /Kretzschmar 2007b/,

"Supplementary Release on Backward Equations for Specific Volume as a Function of Pressure and Temperature $v(p,T)$ for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97-S05)" /Kretzschmar 2009/.

Mit diesen Rückwärtsgleichungen gelang es, die Berechnung von thermodynamischen Prozessberechnungen mit Wasser und Wasserdampf nochmals um den Faktor 2 bis 3 im Vergleich zur originalen IAPWS-IF97 Formulation zu beschleunigen. Eingeflossen sind die Ergebnisse insgesamt in die umfassende Darstellung der Industrie-Formulation für Wasser und Wasserdampf "International Steam Tables" /Wagner 2008/.

2.3 Stoffwert-Berechnung mit Interpolation

Die dritte Verfahrensweise für eine schnelle Stoffwert-Berechnung ist die Interpolation von Werten in gespeicherten Datentabellen, auch als "Table Look Up Methods" bezeichnet. Erste Arbeiten des Autors auf diesem Gebiet sind in der Veröffentlichung /Kretzschmar 1995/ dokumentiert.

Parallel entwickelten K. Miyagawa und P.G. Hill ein als TTSE benanntes Verfahren /Miyagawa 2001/, das 2003 zur IAPWS-Guideline /IAPWS 2003/ erhoben wurde. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Berechnung ausgehend von den abgespeicherten Datenpunkten mit Taylor-Reihen erfolgt, die nicht stetig ineinander übergehen.

Aus diesem Grund wurden die Arbeiten 2005 in Zittau wieder aufgegriffen und seitdem zielstrebig weitergeführt. In der Zwischenzeit war die Voraussetzung für die Anwendung von Interpolationsverfahren durch die enorme Vergrößerung der RAM-Speicher auch in PCs gegeben. Dies war Bedingung, da die Datentabellen zur Interpolation im Hauptspeicher abgelegt werden müssen. Der Lösungsweg, den Herr M. Kunick in seiner Dissertation gegenwärtig verfolgt, beinhaltet eine bi-quadratische und bi-kubische Spline-Interpolation. Es gelang, die rechenzeitintensiven Bestandteile dieser Methode, die Suche nach den benachbarten Datenpunkten in den Datentabellen zum gegebenen Punkt sowie die Verarbeitung der abgespeicherten Werte effektiv zu gestalten. Des Weiteren kann durch geeignete Transformation der beteiligten Größen die Dichte der Datentabellen und damit deren Größe reduziert werden. Ein wesentlicher Vorteil der quadratischen und kubischen Spline-Polynome ist deren Umstellbarkeit nach den Variablen und die daraus resultierende exakte numerische Konsistenz zwischen den interpolierten Vorwärts- und Rückwärtsfunktionen. Der Zwischenstand der Arbeiten wurde in der Veröffentlichung /Kunick 2008/ dokumentiert. Ausgehend von den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass die Interpolation die schnellste Methode für die Stoffwert-Berechnung darstellt. Es zeigte sich, dass die Interpolation der Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf nochmals um den Faktor 2 schneller ist als deren Berechnung in Verbindung mit den in Abschn. 2.2 erläuterten Rückwärtsgleichungen.

Die Akzeptanz und damit die breite Anwendung bedürfen allerdings eines Werkzeuges zur Generierung der Stützdatenraster für den jeweils gesuchten Zustandsbereich und für die vorgegebene Genauigkeit der zu interpolierenden Stoffwerte des gewünschten Fluids inklusive der zugehörigen Spline-Algorithmen. Die Entwicklung eines Programms, das diesen Anforderungen gerecht wird, ist Bestandteil der aktuellen Forschungsarbeiten am Fachgebiet Technische Thermodynamik der Hochschule Zittau/Görlitz in Kooperation mit U. Gampe, Professur für Thermische Energiemaschinen und -anlagen am Institut für Energietechnik der TU Dresden.

3 Bereitstellung von Stoffwerten für energietechnische Prozessberechnungen

3.1 Stoffwert-Bibliotheken

Die Bereitstellung von Stoffwerten der Arbeitsfluide in energietechnischen Prozessberechnungen erfolgt mit Stoffwert-Programmbibliotheken. Auf Grund neu entwickelter energietechnischer Verfahren erweitert sich ständig die Palette der Arbeitsfluide. Am Fachgebiet Technische Thermodynamik der Hochschule Zittau/Görlitz werden gegenwärtig die folgenden Stoffwert-Bibliotheken angeboten:

Stoffwert-Bibliothek	Arbeitsfluid
LibIF97	Wasser und Wasserdampf nach IAPWS-IF97
LibSeaWa	Meerwasser, auch bei hohen Salzkonzentrationen
LibHuAir	Feuchte Luft, auch bei hohen Drücken
LibHuGas	Feuchte Verbrennungsgasgemische, auch bei hohen Drücken
LibIDGAS	Verbrennungsgasgemische nach VDI-4670
LibIdGasMix	Ideale Gasgemische
LibCO2	Kohlendioxid einschl. Trockeneis
LibD4, LibD5, LibD6, LibMD2M, LibMD3M, LibMD4M, LibMDM, LibMM	Silikonöle D4, D5, D6, MD2M, MD3M, MD4M, MDM und MM für ORC-Prozesse
LibH2, LibHe, LibCH3OH	Wasserstoff, Helium, Methanol
LibNH3, LibR134a	Ammoniak, Kältemittel R134a
LibPropan	Propan
LibButan-Iso, LibButan-n	Iso-Butan, n-Butan

LibAmWa	Ammoniak/Wasser-Absorptionsgemische, auch zur Berechnung des Kalina-Prozesses geeignet
LibWaLi	Wasser/Lithiumbromid-Absorptionsgemische

Berechenbar sind alle in den Prozessmodellierungen benötigten Stoffwerte:

Thermodynamische Zustandsgrößen	Transportgrößen
spezifisches Volumen v und Dichte ρ	dynamische Zähigkeit η
spezifische Enthalpie h	kinematische Viskosität ν
spezifische innere Energie u	Wärmeleitkoeffizient λ
spezifische Entropie s	Temperaturleitkoeffizient a
spezifische freie Enthalpie g	Prandtl-Zahl Pr
spezifische isobare Wärmekapazität c_p	
Isentropenexponent κ	
isentropische Schallgeschwindigkeit w	

Thermodynamische Differentialquotienten	Thermodynamische Umkehrfunktionen
isobarer Volumenausdehnungskoeffizient α_v	$T(p, h)$
isotherme Kompressibilität κ_T	$T(p, s)$
(Alle anderen Differentialquotienten können aus $v, s, g, c_p, \alpha_v, \kappa_T$ ermittelt werden.)	$p, T(h, s)$ $p, T(v, u)$

Detaillierte Informationen zu den Stoffwert-Bibliotheken können der Website www.thermodynamik-zittau.de entnommen werden.

Als weitere Software zur Berechnung von Stoffdaten für Fluide und fluide Gemische seien u. a. REFPROP des NIST (USA) und REFLIB des ILK Dresden genannt.

3.2 Add-Ons für Nutzung in Anwenderprogrammen

Zur Nutzung der Stoffwert-Bibliotheken des Fachgebietes Technische Thermodynamik in Anwenderprogrammen wurden die folgenden Add-Ons erarbeitet:

Add-On	Anwenderprogramm
FluidEXL	Excel
FluidMAT	Mathcad
FluidLAB	MATLAB
FluidEES	Engineering Equation Solver EES
FluidDYM	DYMOLA (Modelica) und SimulationX
FluidVIEW	LabVIEW

Genutzt werden die Stoffwert-Bibliotheken mit den genannten Add-Ons inzwischen weltweit von mehr als 180 Unternehmen sowie 50 Universitäten und Hochschulen, u. a. in den USA, Japan, China, Südafrika, Kolumbien, Großbritannien, Spanien, Portugal, Finnland, Dänemark, Niederlande, Schweiz, Österreich, Tschechien und Deutschland.

Für ausgewählte Bibliotheken wurden abgerüstete Excel- und Mathcad-Versionen für Studierende erstellt. Diese können kostenfrei auf der Website www.thermodynamik-formelsammlung.de heruntergeladen werden. Des Weiteren stehen auf dieser Seite die Bibliotheken für Wasserdampf, Verbrennungsgasgemische und feuchte Luft auch für Taschenrechner von Texas Instruments, Casio und Hewlett Packard kostenfrei zur Verfügung. Begonnen wurde die Erarbeitung von Stoffwert-Software für Tablet-PCs und Smartphones.

3.3 Zustandsdiagramme

Eine weitere Arbeitsrichtung der Bereitstellung von Stoffdaten für die Energietechnik ist die Berechnung und Zeichnung von großformatigen druckfertigen Zustandsdiagrammen. So wurden für Wasser Mollier- h,s - und T,s -Diagramme im Format A1 erstellt und publiziert /Kretzschmar 1998-2009/. Als farbige Diagramme im Format

A2 stehen zur Verfügung: $\log p, h$ -Diagramme für Ammoniak, Propan, Iso-Butan und n-Butan, Mollier- h, x -Diagramm für feuchte Luft und h, ξ -Diagramme für Ammoniak/Wasser-Gemische und Wasser/Lithiumbromid-Gemische. Diese genannten Diagramme werden auf Anforderung auch in größeren Stückzahlen versendet.

4 Zusammenfassung

Die dargestellten Forschungsarbeiten und Projekte wurden direkt oder indirekt von Herrn Prof. Dittmann initiiert, gefördert oder wohlwollend unterstützt. Die Dissertationen von T. Zschunke, Th. Willkommen und J. Trübenbach sowie insbesondere die kooperative Promotion von Frau K. Knobloch waren wichtige Meilensteine auf dem Weg der Entwicklung der internationalen Standards für die Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf. Der Autor dankt dem Jubilar, Herrn Prof. Dittmann, für die Förderung und Unterstützung in den vergangenen 30 Jahren.

Literatur

- /Elsner 1982/ Elsner, N.; Fischer, S.; Klinger, J.: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982
- /IAPWS 2003/ IAPWS: Guideline on the Tabular Taylor Series Expansion (TTSE) Method for Calculation of Thermodynamic Properties of Water and Steam Applied to IAPWS-95 as an Example. Available at www.iapws.org
- /Knobloch 2006/ Knobloch, K.: Gleichungen für thermodynamische Umkehrfunktionen von Wasser- u. Wasserdampf im kritischen und überkritischen Zustandsgebiet für energie-technische Prozessberechnungen. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 542, 2006
- /Kretzschmar 1982/ Kretzschmar, H.-J.: Beitrag zur effektiven Startwertbereitstellung für implizite Zustandsfunktionen. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dresden, 1982
- /Kretzschmar 1987/ Kretzschmar, H.-J.; Klinger, J.; Schneider, St.; Dittmann, A.: Zur Bereitstellung thermophysikalischer Stoffdaten für die Modellierung energiewandelnder Prozesse auf Personalcomputer. Wiss. Berichte IHZ 709 (1987), S. 16-22
- /Kretzschmar 1990/ Kretzschmar, H.-J.: Zur Aufbereitung und Darbietung thermophysikalischer Stoffdaten für die Energietechnik. Promotion B, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dresden, 1990 (Anerkennung als Habilitation 1992)
- /Kretzschmar 1995/ Kretzschmar, H.-J.; Stöcker, I.; Nabel, M.; Dittmann, A.: A Method for Generating Interpolation Tables with Optimized Data Density for Fast Interpolations of Thermodynamic Properties in Process Modeling. Transactions ASME 95-WA/HT-36
- /Kretzschmar 1998-2009/ Kretzschmar, H.-J.; Stöcker, I.: Mollier h-s and T-s Diagram for Water and Steam. Springer Verlag, Berlin, 1998, 2003, 2008, 2009
- /Kretzschmar 2006/ Kretzschmar, H.-J.; Cooper, J. R.; Dittmann, A.; Friend, D. G.; Gallagher, J.; Knobloch, K.; Mareš, R.; Miyagawa, K.; Stöcker, I.; Trübenbach, J.; Wagner, W.; Willkommen, Th.: Supplementary Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy $p(h,s)$ to the Industrial Formulation IAPWS-IF97 for Water and Steam. J. Eng. Gas Turbines Power 128 (2006) S. 702-713
- /Kretzschmar 2007a/ Kretzschmar, H.-J.; Cooper, J. R.; Dittmann, A.; Friend, D. G.; Gallagher, J.; Harvey, A. H.; Knobloch, K.; Mareš, R.; Miyagawa, K.; Okita, N.; Stöcker, I.; Wagner, W.; Weber, I.: Supplementary Backward Equations $T(p,h)$, $v(p,h)$, and $T(p,s)$, $v(p,s)$ for the Critical and Supercritical Regions (Region 3) of the Industrial Formulation IAPWS-IF97 for Water and Steam. J. Eng. Gas Turbines Power 129 (2007) S. 294-303

- /Kretzschmar 2007b/ Kretzschmar, H.-J.; Cooper, J. R.; Gallagher, J.; Harvey, A. H.; Knobloch, K.; Mareš, R.; Miyagawa, K.; Okita, N.; Span, R.; Stöcker, I.; Wagner, W.; Weber, I.: Supplementary Backward Equations $p(h,s)$ for the Critical and Supercritical Regions (Region 3) and Equations for the Two-Phase Region and Region Boundaries the IAPWS Industrial Formulation 1997 for Water and Steam. J. Eng. Gas Turbines Power 129 (2007) S. 1125-1137
- /Kretzschmar 2009/ Kretzschmar, H.-J.; Harvey, A. H.; Knobloch, K.; Mares, R.; Miyagawa, K.; Okita, N.; Span, R.; Stöcker, I.; Wagner, W.; Weber, I.: Supplementary Backward Equations $v(p,T)$ for the Critical and Supercritical Regions (Region 3) of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for Water and Steam. J. Eng. Gas Turbines Power 131 (2009) 043101: S. 1-16
- /Kunick 2008/ Kunick, M.; Kretzschmar, H.-J.; Gampe, U.: Fast Calculation of Thermodynamic Properties of Water and Steam in Process Modelling using Spline Interpolation. In: Water, Steam, and Aqueous Solutions, Proceedings of the 15th International Conference on the Properties of Water and Steam, Ed. by R. Span and I. Weber, VDI GET (2008), ISBN 978-3-931384-64-7
- /Lemmon 2006/ Lemmon, E.W.; Span, R.: Short Fundamental Equations of State for 20 Industrial Fluids. J. Chem. Eng. Data 51 (2006) S. 785-850
- /Miyagawa 2001/ Miyagawa, K., Hill, P. G.: Rapid and Accurate Calculation of Water and Steam Properties using the Tabular Taylor Series Expansion Method. J. Eng. Gas Turbines Power 123 (2001) S. 707-712
- /Span 2003a/ Span, R., Wagner, W.: Equations of State for Technical Applications II, Results for Nonpolar Fluids. Int. J. Int. Thermophysics 24 (2003) S. 41-106
- /Span_2003b/ Span, R., Wagner, W.: Equations of State for Technical Applications III, Results for Polar Fluids. Int. J. Int. Thermophysic 24 (2003) S. 111-159
- /Trübenbach 1999/ Trübenbach, J.: Ein Algorithmus zur Aufstellung von rechenzeitorientierten Gleichungen für thermodynamische Zustandsgrößen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 417, 1999
- /Wagner 1978/ Wagner, W.: Eine mathematisch statistische Methode zum Aufstellen thermodynamischer Gleichungen - gezeigt am Beispiel der Dampfdruckkurve reiner fluider Stoffe. Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 3, Nr. 39 (1974)
- /Wagner 1989/ Wagner, W.; Setzmann, U.: A New Method for Optimizing the Structure of Thermodynamic Correlation Equations. Int. J. Thermophysics 10 (1989), S. 1103-1125
- /Wagner 2000/ Wagner, W.; Cooper, J. R.; Dittmann, A.; Kijima, J.; Kretzschmar, H.-J.; Kruse, A.; Mareš, R.; Oguchi, K.; Sato, H.; Stöcker, I.; Šifner, O.; Takaishi, Y.; Tanishita, I.; Trübenbach, J.; Willkommen, Th.: The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. J. Eng. Gas Turbines Power 122 (2000) S. 150-182
- /Wagner 2008/ Wagner, W.; Kretzschmar, H.-J.: International Steam Tables. Springer-Verlag, 2008, www.international-steam-tables.com
- /Willkommen 1995/ Willkommen, Th.: Ein Algorithmus zur Aufstellung numerisch konsistenter Gleichungen für die in Prozessmodellierungen benötigten thermodynamischen Umkehrfunktionen. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 1995
- /Zschunke 1989/ Zschunke, T.; Kretzschmar, H.-J.; Klinger, J.: WAREG - Ein Programm zur nutzerorientierten Erzeugung thermophysikalischer Stoffwert-Berechnungsalgorithmen für thermodynamische und thermohydraulische Prozeßmodellierungen. Kernenergie 32 (1989) S. 198-205
- /Zschunke 1990/ Zschunke, T.: Simultane gleichmäßige Approximation mehrerer nichtlinearer Funktionen - Bestandteil der automatisierten Erstellung von vereinfachten thermodynamischen Stoffwertgleichungen im Programm ECOFIT. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 1990