

Aktuelle Probleme der internationalen Wasserdampfforschung – Empfehlungen für die Berechnung der thermophysikalischen Zustandsgrößen

1. Einleitung

Die 11. Internationale Konferenz zur Erforschung der Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf (The 11th International Conference on the Properties of Steam [11. ICPS]) fand vom 3. 9. bis 8. 9. 1989 in Prag statt. Seitens der DDR war die TU Dresden durch Dr.-Ing. Klinger und das Kombinat Verbundnetze Energie durch Dr.-Ing. Kretzschmar vertreten.

Durchgeführt wurde die Tagung von der tragenden internationalen Organisation „The International Association for the Properties of Water and Steam“ (IAPS). Mit der Ausrichtung waren das Institut für Thermomechanik Prag der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, die Karlsuniversität Prag und die ŠKODA-Werke Plzeň betraut.

Insgesamt 105 Teilnehmer aus 14 Staaten Europas, Asiens, Nord- und Südamerikas nahmen an der Konferenz teil. Es wurden 75 Vorträge gehalten, davon 2 von den Teilnehmern der DDR:

„Ein alternatives Verfahren für die numerische Berechnung des Maxwell-Kriteriums in Dampfdruckberechnungen“ und „Ein Programm zur Generierung optimierter Algorithmen für die thermophysikalischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf“.

Die Langfassungen aller Vorträge werden 1990 in den Proceedings der Konferenz „Properties of Water and Steam“ bei Hemisphere Publishers Corporation, Washington (USA) veröffentlicht².

2. Die internationale Organisation für die Erforschung der Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf – IAPS

Vollmitgliedsländer der IAPS sind Kanada, ČSSR, BRD, Frankreich, Japan, UdSSR, Großbritannien und USA. Eine assoziierte Mitgliedschaft besitzen gegenwärtig Argentinien und Dänemark³. Die Instrumentarien der IAPS sind die aller fünf Jahre auf den ICPS stattfindenden Generalmeetings und die jährlichen Sitzungen der Exekutivkomitees. Alle Festlegungen erscheinen in sog. „Releases“ und „Statements“. Sie sind für die Mitgliedsländer verbindlich, und ihre Berücksichtigung wird darüber hinaus international empfohlen.

Folgende Aufgaben nimmt die IAPS wahr:

¹ Prof. Dr. sc. techn. Achim Dittmann und Dr.-Ing. Jochen Klinger, Technische Universität Dresden, WB Thermodynamik, Dr.-Ing. Hans-Joachim Kretzschmar, Kombinat Verbundnetze Energie, Zentrum für Forschung und Technik, Institut für Energieversorgung Dresden

² Die Kurzreferate aller Vorträge und die Langfassungen der Vorträge aus der DDR können bei den Autoren angefordert werden. Darüber hinaus ist es möglich, die Proceedings der Tagung mit allen Langfassungen ab Juni 1990 auszuleihen.

³ Die assoziierte Mitgliedschaft ist auf drei Jahre befristet und kann bis maximal auf sechs Jahre verlängert werden. Sie sollte zur Gründung eines nationalen IAPS-Komitees in Anbahnung einer späteren Vollmitgliedschaft genutzt werden. Während assoziierte Mitgliedsländer keinen finanziellen Beitrag leisten müssen, betragen die jährlichen Aufwendungen für eine Vollmitgliedschaft mindestens 1600 sfr.

1. Prüfung, Bewertung und Standardisierung von Zustandsdaten,
2. Aufstellung, Prüfung und Empfehlung von Berechnungsalgorithmen,
3. Koordinierung internationaler Forschungsarbeiten.

In zwei Arbeitsgruppen und ein Subkomitee sind die Aktivitäten der IAPS gegliedert:

Arbeitsgruppe A

- Thermodynamische, Transport-, Oberflächen- und elektrische Eigenschaften von normalem und schwerem Wasser sowie wässriger Lösungen,
- Verhalten von Zweiphasenströmungen.

Arbeitsgruppe B

- Kraftwerkschemie, Thermodynamik wässriger Lösungen und Elektrolyte,
- Wechselwirkungen der Komponenten von Lösungen untereinander und mit der Umgebung, einschließlich Korrosionsproblemen.

Subkomitee „Industrielle Berechnungen“

- Bereitstellung von vereinfachten Stoffwertalgorithmen für die thermodynamische Berechnung von Kraftwerken und deren Komponenten.

In der Diskussion befindet sich die Gründung einer weiteren Arbeitsgruppe C, die sich ausschließlich Korrosionsproblemen widmen soll.

Die historische Entwicklung der IAPS bis zur 11. ICPS kann den Publikationen [1] bis [3] von Grigull entnommen werden.

3. Ergebnisse der 11. ICPS

Als offizielle Dokumente wurden von der 11. ICPS verabschiedet:

1. ein Standard über die Berechnung der Verflüssigungs- und Sublimationsdruckkurve
„Release on the Pressure along the Melting and the Sublimation Curves of Ordinary Water Substance“,
2. ein Bericht zur elektrischen Leitfähigkeit
„Electrical Conductance of Liquid and Dense Supercritical Water from 0°C to 800°C, and Pressures up to 1000 MPa“ und
3. ein Bericht zur Löslichkeit von Natriumsulfat in wässrigen Lösungen von Natriumchlorid und Schwefelsäure
„Solubility of Sodium Sulfate in Aqueous Mixtures of Sodium Chloride and Sulfuric Acid from Water to Concentrated Solutions, from 250°C to 350°C“.

Folgende Problemkreise beinhalteten die Vorträge:

Thermodynamische Eigenschaften von normalem und schwerem Wasser sowie wässriger Lösungen

- kritischer Vergleich der genauesten thermodynamischen Zustandsgleichungen und Schlussfolgerungen für die Entwicklung einer neuen Gleichung,
- genaueste Gleichungen für die Sublimations- und Schmelzdruckkurve,
- eine neue genaueste Zustandsgleichung für flüssiges Wasser,
- eine neue Gleichung für extrem hohe Drücke,
- neue Erkenntnisse über das Verhalten am kritischen Punkt,

- Beschreibung des Verhaltens am kritischen Punkt mit Scaling-Funktionen,
- neue Erkenntnisse über das metastabile Zustandsverhalten und Nucleation,
- neue Molekülmodelle für Wasser,
- wässrige Lösungen mit NaCl, NaOH, HCl-NaCl, HCl-CO₂, Borsäure, Tetra-N-Pentyl-Ammoniumbromid, Alkalimetallhalogeniden, Erdalkalimetallnitraten, hydrothermalen Elektrolyten und organischen Flüssigkeiten;

Transport-, Grenzflächen- und weitere Eigenschaften

- neue Erkenntnisse zur Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit,
- Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit,
- eine neue Gleichung für die Berechnung des Brechungsindex;

Vereinfachte Zustandsgleichungen für industrielle Berechnungen

- kritischer Vergleich bekannter vereinfachter Zustandsformulierungen,
- eine einfache Zustandsgleichung für überhitzten Dampf,
- Gleichungssätze für begrenzte Zustandsbereiche,
- Polynome für größere Zustandsbereiche,
- optimierte Funktionen für die Phasengrenzkurven,
- Programme zur automatisierten Aufstellung optimierter Stoffwertalgorithmen,
- Programmbibliotheken zur Berechnung der thermophysikalischen Eigenschaften,
- Konzeptionen für Stoffdatenauskuftsprogramme;

Chemische Thermodynamik und Phasengleichgewichte

- Gemisch Wasser - Kohlendioxid in Kraftwerkskreisläufen,
- ein neues Verfahren für die numerische Lösung des Maxwell-Kriteriums;

Kraftwerkschemie

- Kobalt, Aluminium, Zink, Eisen als Korrosionsprodukte,
- Gaslöslichkeiten;

Zweiphasenströmungen

- neue Erkenntnisse über Kondensationseffekte,
- Nichtgleichgewichtsverhalten von Naßdampf.

4. Aktuelle Aufgaben der IAPS

Aufgrund von offensichtlich gewordenen Mängeln der gegenwärtig für die wissenschaftliche Anwendung international verbindlichen Zustandsformulierung IAPS 84 für normales Wasser [4], [9] und der 1990 zu erwartenden neuen Temperaturskala ITS-90 ist vorgesehen, eine neue, noch genauere und umfassendere Zustandsgleichung zu entwickeln. Ihr Gültigkeitsbereich wird sich bis 1200°C und 25000 MPa bzw. bis zur Verfestigungslinie erstrecken. Die Singularitäten am kritischen Punkt sowie die metastabilen Zustandsbereiche „überhitzte Flüssigkeit“ und „unterkühlter Dampf“ sollen noch exakter wiedergegeben werden. Parallel dazu ist die Aufstellung einer ebenso genauen Gleichung für schweres Wasser geplant. Zur Erstellung der Gleichungen soll das fortgeschrittene Optimierungsverfahren von Wagner [21] zur Anwendung kommen.

Insbesondere für die Vorausberechnung von hypothetischen Störfällen in Kernreaktoren ist die möglichst exakte Berechnung der Dissoziation des Wassers im Temperaturbereich weit über 1200°C notwendig. Hierfür sollen ebenfalls neue Algorithmen entwickelt werden.

Die seit 1967 für den industriellen Gebrauch verbindliche Formulierung IFC 67 [8] soll in den nächsten Jahren durch einen neuen Gleichungssatz abgelöst werden. Gegenwärtig ist die IAPS dabei, Forderungen der Anwender bezüglich Zustandsbereich und benötigter funktioneller Abhängigkeiten zusammenzustellen. Auch die DDR ist aufgefordert, hierzu einen signifikanten Beitrag zu leisten. Einige sich auch aus unserer Sicht abhebende Forderungen sind [22]:

Tabelle 1. Häufigkeiten der Berechnungen von wichtigen thermodynamischen Funktionen in Wärmeschaltbildberechnungen des VEB Görtitzer Maschinenbau [22]

Thermodynamische Funktionen	Häufigkeit der Berechnung (in %)
$p_d = f(T_d)$ u. $T_d = f(p_d)$	29
$v = f(p, T)$	3
$h = f(p, T)$	47
$s = f(p, T)$	4
$T = f(p, h)$	16
$T = f(p, s)$	1

Tabelle 2. Berechnung wichtiger thermodynamischer Zustandsfunktionen, ausgehend von der Gibbs-Funktion $g = f(p, T)$

Thermodynamische Funktionen	Berechnung ausgehend von $g(p, T)$
$v = f(p, T)$	$v = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T$
$h = f(p, T)$	$h = g - T \cdot \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p$
$u = f(p, T)$	$u = g - T \cdot \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p - p \cdot \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T$
$s = f(p, T)$	$s = - \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p$
$c_p = f(p, T)$	$c_p = - T \cdot \left(\frac{\partial^2 g}{\partial T^2} \right)_p$
$T = f(p, h)$	eindim. Iteration aus $h = f(p, T)$
$T = f(p, s)$	eindim. Iteration aus $s = f(p, T)$
$p, T = f(s, h)$	zweidim. Iteration aus $h = f(p, T)$ und $s = f(p, T)$

Tabelle 3. Berechnung einiger thermodynamischer Zustandsfunktionen, ausgehend von der Potentialfunktion $s = f(p, h)$

Thermodynamische Funktionen	Berechnung, ausgehend von $s = f(p, h)$
$T = f(p, h)$	$T = \frac{1}{\left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_p}$
$v = f(p, h)$	$v = - \frac{\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_h}{\left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_p}$
$T = f(p, s)$	eindim. Iteration von h aus $s = f(p, h)$, anschl. $T = \frac{1}{\left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_p}$
$p, T = f(s, h)$	eindim. Iteration von p aus $s = f(p, h)$, anschl. $T = \frac{1}{\left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_p}$

- Die neuen Gleichungen sollten weniger Rechenzeit im Vergleich zu IFC 67 benötigen.
- Die Genauigkeit muß nicht über die der IFC 67-Formulierung hinausgehen.
- Unter Berücksichtigung der Häufigkeiten von in Prozeßmodellierungen zu berechnenden thermodynamischen Funktionen, wie sie für Wärmeschaltbildberechnungen in Tabelle 1 zusammengestellt sind, ergeben sich folgende Anforderungen an explizite funktionelle Zustandsabhängigkeiten:
Neben technisch formulierten Gleichungen für die freie Enthalpie als Funktion von Druck und Temperatur $g_f = f(p, T)$ und $g_g = f(p, T)$ sollten passende Potentialgleichungen $s_f = f(p, h)$ und $s_g = f(p, h)$ für den Flüssigkeits- und den Dampfgebiet (Indizes f und g) aufgestellt werden.
Aus der *Gibbs*-Funktion $g = f(p, T)$ müssen alle weiteren thermodynamischen Größen, wie Enthalpie, Entropie, innere Energie, isobare Wärmekapazität, Schallgeschwindigkeit und weitere Differentialquotienten, als Funktion von Druck und Temperatur abgeleitet werden können (Tabelle 2).
Aus der Beziehung $s = f(p, h)$ wären die unbedingt benötigte Funktion $T = f(p, h)$ analytisch sowie $p = f(s, h)$ mit nur eindimensionaler Iteration berechenbar (Tabelle 3). Damit würden die am häufigsten auftretenden Iterationen der Funktion $T = f(p, h)$ (vgl. Tabelle 2) entfallen. Bei der Funktion $T = f(p, s)$ ergibt der Vergleich der Tabellen 2 und 3 keine qualitative Verbesserung. In beiden Fällen muß eindimensional iteriert werden. Die zweidimensionale Iteration von p, T aus $h = f(p, T)$ und $s = f(p, T)$ (vgl. Tabelle 2) kann durch eine eindimensionale von p aus $s = f(p, h)$ und der anschließenden expliziten Berechnung von $T = f(p, h)$ ersetzt werden (vgl. Tabelle 3). Neben der Berechnung von $v = f(p, h)$ ist es nicht notwendig, weitere Größen aus der aufzustellenden Gleichung $s = f(p, h)$ analytisch berechnen zu können, was die Anforderungen an diese Beziehung etwas vermindert.
Für den Dampfdruckzusammenhang sollten separate Gleichungen $p_d = f(T_d)$ und $T_d = f(p_d)$ verfügbar sein. Sie müssen gemäß dem *Maxwell*-Kriterium mit den anderen aufgestellten Beziehungen in den Formen $g_f(p_d, T_d) = g_g(p_d, T_d)$ und $h_g - h_f = T_d(s_g - s_f)$, wobei $s_f = f(p_d, h_f)$, $s_g = f(p_d, h_g)$, korrespondieren.

- Bezüglich des zu erfassenden Zustandsbereichs vertreten wir folgenden Standpunkt:

Der *Flüssigkeitsbereich* sollte sich von etwa 7°C bis zur Siedelinie bzw. bis 360°C und bis 50 MPa erstrecken (Bild 1). Damit würden die Probleme bei der Modellierung der Anomalie des Wassers nicht auftreten. Die Forderung, den Zustandsbereich bis zu der recht hohen Temperatur von 360°C auszudehnen, resultiert aus Aufgabenstellungen bei der Berechnung von Druckwasserreaktoren.

Der *Dampfgebiet* könnte linksseitig von der Taulinie bzw. der zu 360°C gehörigen Taulinienentropie 5,0542 kJ/(kg·K) begrenzt werden. Aus unserer Sicht ist es notwendig, auch den Dampfgebiet bis zu einer Sättigungstemperatur von 360°C auszudehnen, um die Berechnung konventioneller Dampferzeuger mit einzubeziehen. Für energietechnische Aufgabenstellungen würde es genügen, die rechte Seite durch die Entropie 9,5 kJ/(kg·K) bzw. durch die Temperatur 600°C zu begrenzen. Der Druckbereich sollte hier von 0,001 bis 50 MPa reichen (Bild 1), wobei auch ein Maximaldruck von 30 MPa für die meisten praxisrelevanten Aufgabenstellungen genügen würde. Die Phasengrenzkurven Siede- und Taulinie $x = 0$ und $x = 1$ sowie die jeweils dahinter liegenden metastabilen Zustandsbereiche überhitzte Flüssigkeit und unterkühlter Dampf müßten von den Gleichungen mit erfaßt werden. Der nicht berücksichtigte kritische und überkritische Zustandsbereich sollte im Bedarfsfall mit der gültigen wissenschaftlichen Gleichung $f^{wiss}(T, v)$ berechnet werden können. Hieraus ergäbe sich sofort die Forderung, daß die industriell-

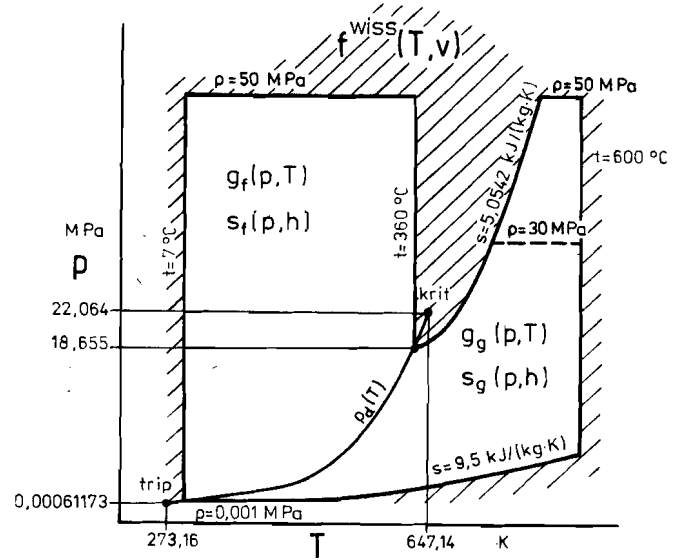


Bild 1. p, T -Diagramm mit Zustandsunterbereichen für eine neue industrielle Formulierung

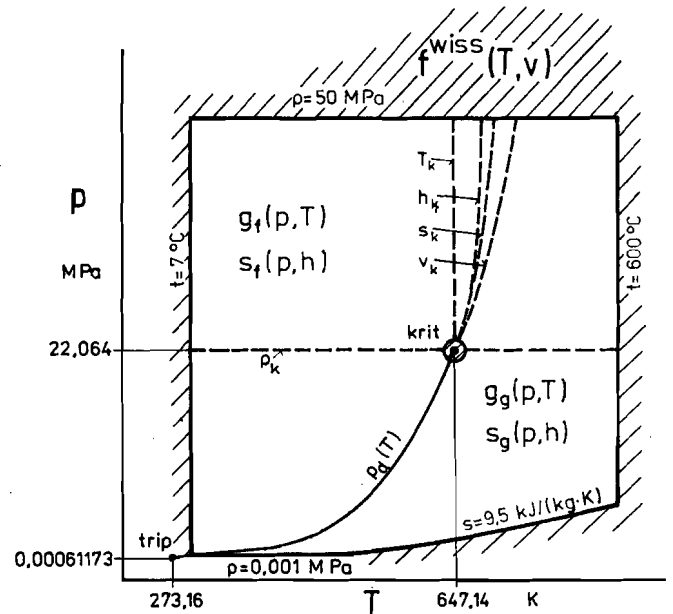


Bild 2. p, T -Diagramm mit gewünschten Zustandsunterbereichen für eine neue industrielle Formulierung (anzustrebende Ideallösung)

len Gleichungen an ihren Gültigkeitsgrenzen möglichst stetig in die existierende wissenschaftliche Formulierung übergehen sollten.

Der mit einer neuen industriellen Formulierung anzustrebende Idealfall wäre erreicht, wenn, wie in den Bildern 2 und 3 dargestellt, die beiden technischen Gleichungssätze die Phasengrenzkurven bis nahe zum kritischen Punkt beschreiben würden und oberhalb davon möglichst stetig ineinander übergingen, wobei die günstigste Lage des Übergangs zu ermitteln wäre. Einige Möglichkeiten für den Übergang sind in den Bildern 2 und 3 alternativ angegeben, z. B. p_k, T_k, v_k, s_k, h_k . Der nicht erfaßte Bereich um den kritischen Punkt müßte so klein sein, daß er in Prozeßmodellierungen übersprungen werden könnte. In diesem Fall würde sich die Verwendung der wissenschaftlichen Formulierung überhaupt erübrigen bzw. nur in extremen Parameterbereichen notwendig sein. Dabei ist uns bewußt, daß die Einbeziehung des kritischen Gebiets jede aufzustellende Zustandsgleichung ganz erheb-

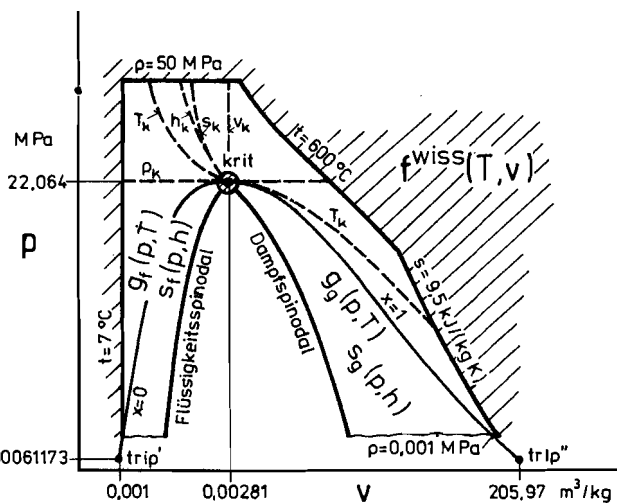


Bild 3. p,v -Diagramm mit gewünschten Zustandsunterbereichen für eine neue industrielle Formulierung (anzustrebende Ideallösung)

lich kompliziert, so daß ein Kompromiß notwendig sein wird. Als der gegenwärtig geeignete Algorithmus zur Erstellung von optimierten Zustandsgleichungen, die diesen Forderungen gerecht werden könnten, bietet sich wiederum nur [21] an.

Weiterhin sollen neue Formulierungen für den Brechungsindex, die Dielektrizitätskonstante und die Henry-Konstante aufgestellt werden.

Auf dem Gebiet wässriger Lösungen geht es darum, leistungsfähige Zustandsgleichungen für wässrige Lösungen zu erarbeiten. Schwerpunktmäßig wendet man sich Lösungen mit Natriumhydroxid und Ammonium-Salz-Lösungen zu.

Zunehmend rückt die Kraftwerkschemie aufgrund der immer relevanter werdenden Korrosionsprobleme in den Vordergrund der Arbeit der IAPS.

Für Hinweise, insbesondere zu den diskutierten Forderungen an eine neue industrielle Formulierung, wären die Autoren dankbar.

5. Schlussfolgerungen für die Stoffwertbereitstellung in Prozeßberechnungen der Energietechnik

Im Ergebnis der 11. ICPS sind für Wasser und Wasserdampf die nachfolgenden *Rahmentafeln* mit Mittelwerten und Toleranzen international verbindlich (Angegeben sind der Name der IAPS-Formulierung, die enthaltenen funktionellen Zusammenhänge, der erfaßte Zustandsbereich und die Literaturquelle, aus der die Informationen bezogen werden können.):

IAPS 85	v, h	$= f(p, T)$	ges. fluider Bereich	[4], [5]
	p_d	$= f(T)$	Phasengrenzkurve	[4], [5]
	v', h'	$= f(T)$	Siedelinie	[4], [5]
	v'', h''	$= f(T)$	Taulinie	[4], [5]
IAPS 85	η	$= f(p, T)$	ges. fluider Bereich	[4], [6]
IAPS 85	λ	$= f(p, T)$	ges. fluider Bereich	[4], [6]
	λ', λ''	$= f(T)$	Phasengrenzkurven	[4], [6]
IAPS 76	σ_d	$= f(T)$	Phasengrenze	[4], [7].

Die darin enthaltenen Mittelwerte und Toleranzen basieren auf allen bis zum Zeitpunkt der Herausgabe vorliegenden und als zuverlässig eingeschätzten Meßdaten [8]. Ihre Einhaltung sollte bei der Entwicklung von Stoffwertalgorithmen bzw. bei der Entnahme von Zustandsgleichungen aus der Literatur unbedingt geprüft werden. Dies ist notwendig, um Prozeßberechnungen im nationalen Maßstab vergleichbar zu gestalten. Erscheinen die

Genauigkeitsanforderungen jedoch für bestimmte Anwendungen so hoch, so müssen zumindest Referenzvarianten mit Stoffwertalgorithmen, die die Rahmentafeln einhalten, geschaffen werden.

In Garantierechnungen ist in jedem Fall die Verwendung von international verbindlichen Gleichungssätzen, sog. Zustandsformulierungen, unumgänglich [4].

Für *industrielle Anwendungen* sind folgende Formulierungen verbindlich:

IFC 67	v, s, h	$= f(p, T)$	Flüss. u. Dampf	[8]
	p, s, h	$= f(T, v)$	krit. Bereich	[8]
	p_d	$= f(T)$	Phasengrenzkurve	[8]
IAPS 85	η	$= f(T, v)$	ges. fluider Bereich	[6]
IAPS 85	λ	$= f(T, v)$	ges. fluider Bereich	[6]
IAPS 76	σ_d	$= f(T)$	Phasengrenze	[7], [18].

Für *wissenschaftliche Aufgabenstellungen* werden die Formulierungen

IAPS 84	p, s, h, c_p, a_s	$= f(T, v)$	ges. fluider Bereich	[4], [9], [10]
			(alle thermodyn. Größen)	
IAPS 85	η	$= f(T, v)$	ges. fluider Ber.	[6]
IAPS 85	λ	$= f(T, v)$	ges. fluider Ber.	[6]
IAPS 76	σ_d	$= f(T)$	Phasengrenze	[7], [18]

empfohlen.

Die bis 1984 für wissenschaftlichen Gebrauch gültige Formulierung IFC 68 sollte nicht mehr verwendet werden, jedoch ist die auf ihr basierende Wasserdampf-tafel [18] durchaus noch für herkömmliche Prozeßberechnungen geeignet.

Spezielle Formulierungen für die *Phasengrenzkurven* sind:

IAPS 86	p_d, v', s', h'	$= f(T)$	Siedelinie	[11]
	v'', s'', h''	$= f(T)$	Taulinie	[11]
IAPS 89	p_s	$= f(T)$	Sublimationskurve	[12]
	p_l	$= f(T)$	Verflüssigungskurve	[12].

Sie sind sowohl für industrielle als auch für wissenschaftliche Aufgabenstellungen anwendbar.

Für *vereinfachte Berechnungen* empfehlen wir

VDI 63	v, s, h, c_p	$= f(p, T)$	Flüss. und Dampf	[13]
	p_d	$= f(T)$	Phasengrenzkurve	[13]
Meyer-Pittroff	T	$= f(p, h)$	Flüss. und Dampf	[14], [15]
	h	$= f(p, s)$	Flüss. und Dampf	[14], [15]
	T_d	$= f(p)$	Phasengrenzkurve	[14], [15]
Schwindt	p, T	$= f(s, h)$	Dampf	[16], [17]
Grigull	η, λ	$= f(p, T)$	Flüss. und Dampf	[19]
Watson	λ	$= f(T, v)$	ges. fluider Ber.	[20]
IAPS 76	σ_d	$= f(T)$	Phasengrenze	[7], [18],

wobei die dabei begangenen Fehler beachtet werden müssen. Alle angegebenen Formulierungen liegen im WB Thermodynamik der TU Dresden und im ZFT-IEV Dresden als FORTRAN- und PASCAL-Unterprogramm-bibliotheken vor. Die auch für ESER-Rechner sowie für 8-, 16- und 32-bit-PC geeigneten Programme stehen zur Nachnutzung bereit. Darüber hinaus existieren Stoffdatenauskuftsprogramme, die einen komfortablen Dampf-tafelersatz darstellen [23]. Für die nutzerorientierte Aufstellung vereinfachter Stoffwertalgorithmen können wir die Programme WAREG und ECOFIT [24] anbieten. Mit diesem Programm ist es möglich, für einen vorgegebenen maximalen Fehler optimierte Zustandsgleichungen für alle interessierenden funktionellen Abhängigkeiten zu approximieren, die dann in Prozeßmodellierungen nutzbar sind.

Die in [4] publizierten Rahmentafeln können auch auf Diskette abgefordert werden.

Die Breite und Relevanz der internationalen Arbeit der IAPS sollte in der DDR zum Anlaß genommen werden, über eine Mitgliedschaft in dieser Organisation zu entscheiden.

Literatur

- [1] Grigull, U.: Neue Entwicklungen in der Wasserdampfforschung. *BWK 36* (1984) 12, S. 527-528
- [2] Grigull, U.: Neuere Entwicklungen in der Wasserdampfforschung. *BWK 38* (1986) 12, S. 547-548
- [3] Grigull, U.: Neuere Entwicklungen in der Wasserdampfforschung. *BWK 40* (1988) 12, S. 499-500
- [4] Dittmann, A., Klinger, J., und Kretzschmar, H.-J.: Neue internationale verbindliche Rahmentafeln und eine genaue Zustandsgleichung für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf, Teil I u. II. *Energietechnik 38* (1988) 1+2, S. 1-5 und S. 48-68
- [5] Alexandrov, A. A.: Skeletnye tablicy udelnogo obema i entalpii vody i vodjanovo para. *Teploenergetika 24* (1987) 3, S. 71-77 (Rahmentafeln für spez. Volumen und Enthalpie von Wasser)
- [6] Sengers, J. V., und Watson, J. T. R.: Improved International Formulations for the Viscosity and Thermal Conductivity of Water Substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data 15* (1986) 4, S. 1291-1314 (Empfohlene internat. Formulierungen für die Viskosität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser)
- [7] Vargaftik, N. B., Volkov, B. N., und Voljak, L. D.: International Tables of the Surface Tension of Water. *J. Phys. Chem. Ref. Data 12* (1983) 3, S. 817-820 (Internat. Tafeln der Oberflächenspannung von Wasser)
- [8] Grigull, U.: Properties of Water and Steam in SI-Units, 3. Auflage. Berlin-W: Springer, 1982 (Eigenschaften von Wasser und Dampf in SI-Einheiten)
- [9] Haar, L., Gallagher, I. S., und Kell, G. S.: Steam Tables, Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI-Units. Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1984 (Dampftafeln, Thermodyn. u. Transportgr. u. Computerprogr. für Wasser und Wasserdampf in SI-Einheiten)
- [10] Grigull, U.: NBS/NRC-Wasserdampftafeln. Berlin-W: Springer, 1988
- [11] Saul, A., und Wagner, W.: International Equations for the Saturation Properties of Ordinary Water Substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data 16* (1987) 4, S. 893-901 (Internat. Gleichung für die Dampfdruckwerte gewöhnlichen Wassers)
- [12] IAPS: Wagner, W., und Saul, A.: Release on the Pressure along the Melting and the Sublimation Curves of Ordinary Water Substance. Report, Gaithersburg, 1989 (Gleichgewichtsdruck entlang der Schmelz- u. Sublimationskurve gewöhnlichen Wassers)
- [13] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampftafeln. 6. Aufl. Berlin-W: Springer, 1963
- [14] Meyer-Pittroff, R., und Grigull, U.: Eine Umkehrfunktion zu der „1967 IFC Formulation for Industrial Use“ für die Berechnung der Temperatur von überhitztem Wasserdampf, abhängig von Druck und Enthalpie. *BWK 21* (1969) 12, S. 636-638
- [15] Meyer-Pittroff, R., Vesper, H., und Grigull, U.: Einige Umkehrfunktionen und Näherungsgleichungen zur „1967 IFC Formulation for Industrial Use“ für Wasser und Wasserdampf. *BWK 21* (1969) 5, S. 239-242
- [16] Dobrendorf, E., und Schwindt, H.: Näherungsformeln für die Zustandsgrößen des Wasserdampfes in Abhängigkeit von Enthalpie und Entropie. *BWK 22* (1970) 12, S. 578-583
- [17] Schwindt, H.: Neue Näherungsformeln für die Zustandsgrößen des Wasserdampfes in Abhängigkeit von Enthalpie und Entropie. *BWK 30* (1978) 1, S. 30-32
- [18] Elsner, N., Fischer, S., und Klinger, J.: Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982
- [19] Grigull, U., Mayinger, F., und Bach, J.: Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Prandtl-Zahl von Wasser und Wasserdampf. *Wärme- u. Stoffübertragung 1* (1968) 1, S. 15-34
- [20] Sengers, J. V., Watson, J. T. R., Basu, R. S., Kamgar-Parsi, B., und Hendricks, R. C.: Representative Equations for the Thermal Conductivity of Water Substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data 13* (1984) 3, S. 893-933 (Repräsent. Gleichungen für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser)
- [21] Setzmann, U., und Wagner, W.: A New Method for Optimizing the Structure of Thermodynamic Correlation Equations. *Int. J. of Thermophysics 10* (1989) 6, S. 1103-1126 (Ein neues Verfahren zur Optimierung der Struktur thermodyn. Gleichungen)
- [22] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Burkner, R.: Anforderungen an eine neue industrielle Formulierung für die thermodynamischen Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf. TU Dresden, WB Thermodynamik, 1989
- [23] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., Schneider, St., und Dittmann, A.: Zur Bereitstellung thermophysikalischer Stoffdaten für die Modellierung energiewandelnder Prozesse auf Personalcomputer. *Wiss. Bericht IHZ, Zittau* (1987) 709, VI/V, S. 16-22
- [24] Zschunke, T., Kretzschmar, H.-J., und Klinger, J.: WAREG - ein Programm zur nutzerorientierten Erzeugung thermophysikalischer Stoffwert-Berechnungsalgorithmen für thermodynamische Prozeßmodellierungen. *Kernenergie 32* (1989) 5, S. 198-205

Manuskripteingang am 28. 12. 1989

ENA 1031

Klaus Franke, Böhlen¹

Zum Einfluß der Elektroenergieversorgung auf das Automatisierungssystem in komplexen Chemieanlagen

1. Einleitung

Die elektrotechnischen Kopplungen zum technologischen Prozeß lassen sich unterteilen in direkte (primäre) Prozeßverbindungen (Antriebsmaschinen, Stelleinrichtungen u. a.) und indirekte (sekundäre) Prozeßverbindungen (Hilfsenergieversorgung (HEV), Steuerspannungsbereitstellung (SSB), Schutz- und leittechnische Anlagen u. a.).

¹ Dipl.-Ing. Klaus Franke, VEB „Otto Grotewohl“ Böhlen, Kombinatbetrieb des VEB Petrochemisches Kombinat Schwedt

Die direkten technologischen Prozeßverbindungen werden im wesentlichen durch den produkt- und stofflichen Zusammenhang bestimmt. Dieser ist produktionspezifisch und hauptsächlich von der Produktionstechnologie abhängig.

Die indirekten Prozeßverbindungen werden durch den Umfang, den Verknüpfungsgrad und die Verarbeitungshierarchie der Automatisierungs- und Leittechnik und ihrer Hilfsenergieversorgung bestimmt. (s. Bild 1)

Für die komplexe Zuverlässigkeitsbewertung von Produktionsanlagen sind die direkten und indirekten Prozeßverbindungen