



Redaktionsbeirat: Dr.-Ing. habil. W. Altmann; Nationalpreisträger Prof. Dr.-Ing. H. Effenberger; Prof. Dr.-Ing. M. Engshuber; Nationalpreisträger Verdienter Techniker des Volkes Prof. Dr. rer. oec. Dipl.-Ing. H.-J. Hildebrand; Prof. Dr.-Ing. habil. F. W. Kloeppel; Prof. Dr.-Ing. E. Klose; Nationalpreisträger Dr.-Ing. W. Kluge; Doz. Dr.-Ing. A. Langner; Dr. rer. oec. A. Löffler; Prof. Dr.-Ing. habil. H. Munser; Dipl.-Ing. M. Pustal; Prof. Dr. rer. oec. L. Unger; Dipl.-Ing. A. Wagner; Dr.-Ing. W. Waluszyk
Korrespondierende Mitglieder des Redaktionsbeirats: Ing. G. G. Jakovlev, UdSSR; Doz. Dr. W. W. Sorin, UdSSR; Dipl.-Ing. L. Hibbey, Ungarische Volksrepublik; Prof. V. I. Nitu, SR Rumänien

Leipzig, Januar 1988 · 38. Jahrgang · Heft 1

ISSN 0013-7421

Achim Dittmann und Jochen Klinger, Dresden, und Hans-Joachim Kretzschmar, Rossendorf^{1,2}

Neue international verbindliche Rahmentafeln und eine genaue Zustandsgleichung für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf (Teil I)

1. Einleitung

Mit dem zunehmenden Einsatz der Mikroelektronik in allen Zweigen der Volkswirtschaft stellt sich im großen Maßstab die Forderung nach zugehöriger Software für die verschiedensten Problemlösungen. In den Bereichen der Energietechnik geht es gegenwärtig und in naher Zukunft vor allem um die rechnergestützte Projektierung und eine automatisierte Betriebsführung der Anlagen. Für alle Berechnungen und thermodynamischen bzw. thermohydraulischen Modellierungen der Bauteile und Prozesse sind Stoffwerte der verwendeten Energieträger unabdingbare Voraussetzung.

Der vorliegende Beitrag soll für das nach wie vor am meisten verwendete Arbeitsmittel Wasser eine Hilfe bei der Auswahl und Erstellung von Stoffwertsoftware vermitteln. Vorgestellt werden neue international verbindliche Rahmentafeln für die thermodynamischen Zustandsgrößen spezifisches Volumen und spezifische Enthalpie sowie für den Dampfdruck. Hinzugefügt sind die gültigen Rahmentafeln der Transportgrößen Wärmeleitfähigkeit und dynamische Zähigkeit sowie der Oberflächenspannung.

Rahmentafeln beinhalten Mittelwerte und zugehörige positive und negative Abweichungen – im weiteren Toleranzen genannt –, die auf allen bis zum Zeitpunkt der Herausgabe vorliegenden und als zuverlässig eingeschätzten Meßwerten basieren. Die Größe der Toleranzen wird so festgelegt, daß alle vertrauenswürdigen Versuchsergebnisse eingeschlossen werden. Damit sind sie ein Maß für die Unsicherheit der Mittelwerte [20].

Bei der Entwicklung von Algorithmen bzw. der Verwendung von Gleichungen aus der Literatur zur Berechnung von Stoffdaten sollten für Übergaberechnungen die im folgenden abgedruckten Mittelwerte innerhalb der angegebenen Toleranzen eingehalten werden. Dies ist notwendig, um zum Beispiel ther-

modynamische oder thermohydraulische Prozeßmodellierungen vergleichbar zu gestalten. Erscheinen die Genauigkeitsanforderungen vor allem für methodische Untersuchungen und Echtzeitmodellierungen zu hoch, auch unter dem Aspekt hohen Speicherplatz- und Rechenzeitbedarfs, so sollten wenigstens Referenzvarianten mit Stoffdaten innerhalb der angegebenen Toleranzen zur Prüfung des Einflusses der entstehenden Ungenauigkeiten geschaffen werden. In Garantierechnungen ist in jedem Fall die Verwendung der für industrielle Anwendungen international verbindlichen Gleichungssätze, sogenannter „Formulierungen“, die die Rahmentafeln einhalten, unumgänglich.

2. Neue Entwicklungen in der Erforschung der thermophysikalischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf

Von der internationalen Vereinigung für die Erforschung der Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The International Association for Properties of Steam“ (IAPS) wurden 1985 neue Rahmentafeln einschließlich Toleranzen für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser [1] verabschiedet. Sie lösen die seit 1963 gültigen Tafeln [3] (auch in [20]) ab und stellen den dritten bisher international vereinbarten Genauigkeitsstandard dar. Bereits 1934 wurde die erste Rahmentafel [4] (in [29] in korrigierter und erweiterter Form abgedruckt) herausgegeben. Eine Publikation der „The IAPS Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance“ [1] erweist sich als notwendig, da der neue Standard zum Teil erheblich vom bisherigen „The IFC Skeleton Tables 1963 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ [3] abweicht. Außerdem wurde der Druckbereich stark erweitert. Zur Vollständigkeit seien die zur Zeit gültigen Rahmentafeln für die wichtigsten Transportgrößen beigelegt, da neue Festlegungen für die Größen erst von der nächsten Wasserdampftafelkonferenz 1989 zu erwarten sind.

Schon 1984 wurde von der 10. Wasserdampftafelkonferenz in Moskau („The 10th International Conference on the Properties of Steam“ (10th ICPS)) eine neue, für den gesamten fluiden Zustandsbereich einheitliche kanonische Zustandsgleichung [5] als verbindlich erklärt. Diese als „The IAPS Formulation 1984 for

¹ Prof. Dr. sc. techn. Achim Dittmann und Dr.-Ing. Jochen Klinger, Technische Universität Dresden, Sektion Energieumwandlung, WB Thermodynamik, und Dr.-Ing. Hans-Joachim Kretzschmar, Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, Bereich Reaktorphysik

² Die Autoren möchten sich für die freundliche Mitarbeit bei Frau Ing. I. Zwickler und Frau R. Stamm bedanken.

the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for Scientific and General Use“ bezeichnete Gleichung löst die „The 1968 IFC Formulation for Scientific and General Use“ [9] (ebenfalls [21], [30], [31], [32] zu entnehmen) für vor allem wissenschaftlichen Gebrauch ab. Für industrielle Rechnungen und Modellierungen bleibt weitere zehn Jahre „The 1967 Formulation for Industrial Use“ [10] international gültig. Die Ausgaben der Wasserdampf tafel [20] sind mit dieser Gleichung berechnet und enthalten den zugrunde gelegten Gleichungssatz. Da die neue Gleichung IAPS 1984 für Datenbanken und auch als Standardformulierung im Hintergrund energietechnischer Berechnungen durchaus ihre Bedeutung hat, soll sie mit vorgestellt werden.

Erwähnt sei, daß 1984 erstmalig eine Delegation aus der DDR, unter Leitung von Professor *Dittmann*, TU Dresden, an einer ICPS teilnahm und in einem Beitrag [28] über die Arbeiten des WB Thermodynamik der TU Dresden auf dem Gebiet – Stoffdatenbereitstellung in thermodynamischen bzw. thermohydraulischen Prozeßberechnungen – vortragen konnte, obwohl die DDR nicht Mitglied der IAPS ist.³ Einen Überblick über weitere Ergebnisse der 10. ICPS in Moskau vermittelt [24].

Aufgrund des zu veröffentlichenden umfangreichen Datenmaterials erfolgt die Publikation in zwei Teilen. Zunächst werden die neuen Rahmentafeln für die thermodynamischen Zustandsgrößen IAPS 1985 vorgestellt, wobei die Tabellen selbst erst in der Fortsetzung abgedruckt sind. Der zweite Teil ist dann den gültigen Tafeln für die Transportgrößen und der neuen Formulierung IAPS 1984 gewidmet.

3. Neue Rahmentafeln für thermodynamische Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf

3.1. Siedende Flüssigkeit und trocken gesättigter Dampf

Die neuen Werte aus [1] für den Sättigungsdruck p_d , die spezifischen Volumina v' (siedende Flüssigkeit) und v'' (trocken gesättigter Dampf) sowie die spezifischen Enthalpien h' und h'' in Abhängigkeit von der Sättigungstemperatur T_d enthält Tabelle 1. Mit angegeben ist jeweils die maximal mögliche absolute Abweichung in der gleichen Maßeinheit wie die zugehörige Größe. Zur Veranschaulichung sind im Bild 1 die daraus berechneten relativen Toleranzen über der Sättigungstemperatur aufgetragen. Diesen Tafeln liegen von *Sato*, *Uematsu* und *Watanabe* in [2] vorgeschlagene Werte zugrunde, wobei im gesamten Temperaturbereich die Mittelwerte teilweise verändert und die Toleranzen nochmals durch die IAPS in der endgültigen Version verkleinert wurden. Die genauen kritischen Daten können [23], [24] bzw. [17] entnommen werden. Sie lauten:

$$\left. \begin{aligned} T_k &= (647,14 + \delta) \text{ K} \\ \text{bzw. } t_k &= (373,99 + \delta) \text{ }^\circ\text{C} \\ p_k &= (22,064 + 0,27\delta \pm 0,005) \text{ MPa} \\ v_k &= (0,00311 \pm 0,00003) \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{bzw. } \rho_k &= (322 \pm 3) \text{ kg/m}^3 \\ \text{mit } \delta &= 0,00 \pm 0,10. \end{aligned} \right\} (1)$$

Am Normal-Boile-Punkt bei einer Temperatur von 373,15 K beträgt der Siededruck exakt 0,101325 MPa. Dieser Punkt ist gleichzeitig als Fixpunkt in der „International Practical Temperature Scale of 1968“ (IPTS-68) definiert. Gemäß der fünften internationalen Wasserdampf tafelkonferenz 1956 in London haben die spezifische innere Energie und die spezifische Entropie des siedenden Wassers bei der Tripel-Temperatur 0,01 °C exakt den Wert Null.

Zum Vergleich zeigt Bild 2 die relativen Toleranzen der bisherigen Rahmentafel [3] von 1963. Sie ist auch allen Auflagen von

³ Die Teilnahme wurde durch die Mitglieder des Vorbereitungs komitees der 10. ICPS Prof. *Sytchev*, Sekretär des RGW, und Prof. *Aleksandrov* vom Moskauer Energetischen Institut, Lehrstuhl Theoretische Grundlagen der Wärmetechnik, ermöglicht.

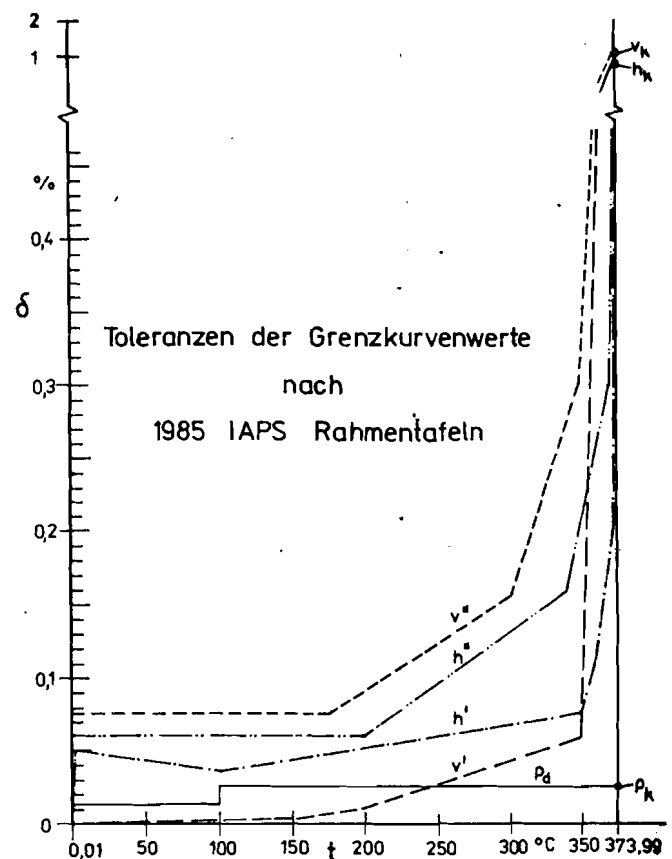


Bild 1. Zugelassene relative Toleranzen der Rahmentafel IAPS 1985 für die thermodynamischen Zustandsgrößen auf der Sättigungskurve

[20] zu entnehmen. Die Gegenüberstellung der Bilder weist auf eine erhebliche Einengung der Toleranzen bei allen Größen im gesamten Parameterbereich hin. In gleicher Weise wurden auch die Mittelwerte verändert. Speziell für p_d und v' sind bei Temperaturen bis etwa 100 °C jetzt die Genauigkeitsanforderungen um eine Größenordnung höher. Sonst wurden die neuen Toleranzen abhängig von der Größe und dem Temperaturbereich bis auf die Hälfte der alten Werte verkleinert.

3.2. Einphasengebiet Flüssigkeit–Dampf

Die seit 1985 verbindlichen Werte für das spezifische Volumen im fluiden Einphasengebiet in Abhängigkeit von Druck und Temperatur entsprechend [1] enthält Tabelle 2. Dazu sind die mit eingetragenen Toleranzen in einem p, T -Diagramm mit Linien konstanten relativen Fehlers (Bild 3) veranschaulicht. Dem gegenüber zeigt Bild 4 die relativen Toleranzen der bisher gültigen Rahmentafel von 1963 [3]. Neben dem bis auf 1000 MPa vergrößerten Druckbereich ist im gesamten Parameterbereich eine Erhöhung der Genauigkeit sowohl der Mittelwerte als auch der Toleranzen zu verzeichnen. Im Flüssigkeitsbereich bei Drücken bis etwa 1 MPa wurden die neuen Toleranzen sogar um eine Größenordnung verringert. Im übrigen fluiden Gebiet betragen sie bis zu 50 % der zulässigen Abweichungen von 1963.

Analog zum spezifischen Volumen sind die neuen Werte der spezifischen Enthalpie nach IAPS 1985 in einem Druck, Temperatur-Raster in Tabelle 3 aufgelistet. Die zugehörigen, möglichen relativen Abweichungen sind im Bild 5 dargestellt. Wiederum ist zu erkennen, daß die im Bild 6 zum Vergleich gezeigten relativen Toleranzen der Rahmentafel von 1963 vor allem im Flüssigkeitsgebiet weit größer sind.

Literatur

[1] Release on The IAPS Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance. Issued by IAPS, 1985

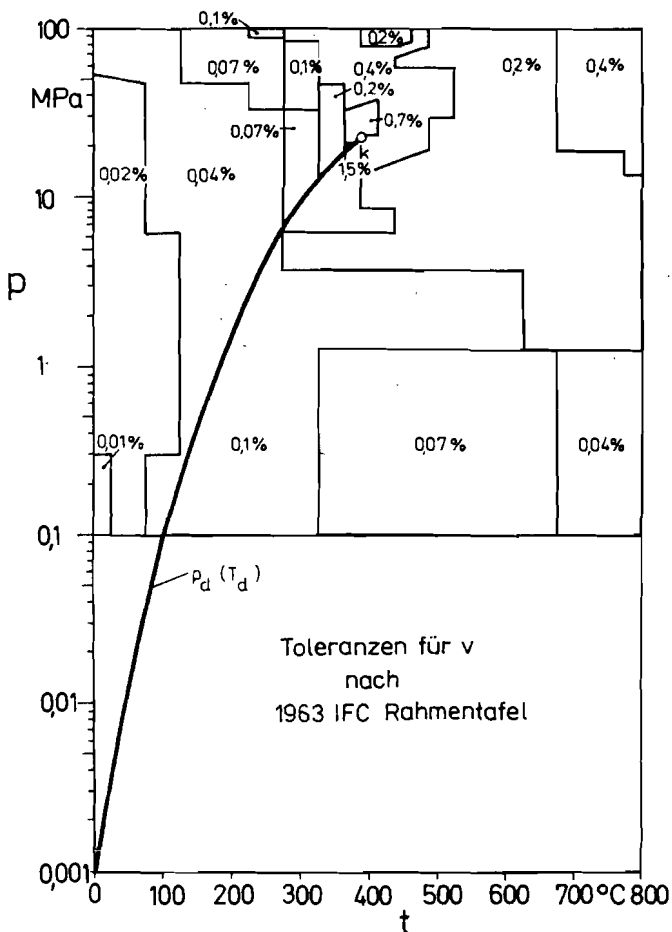
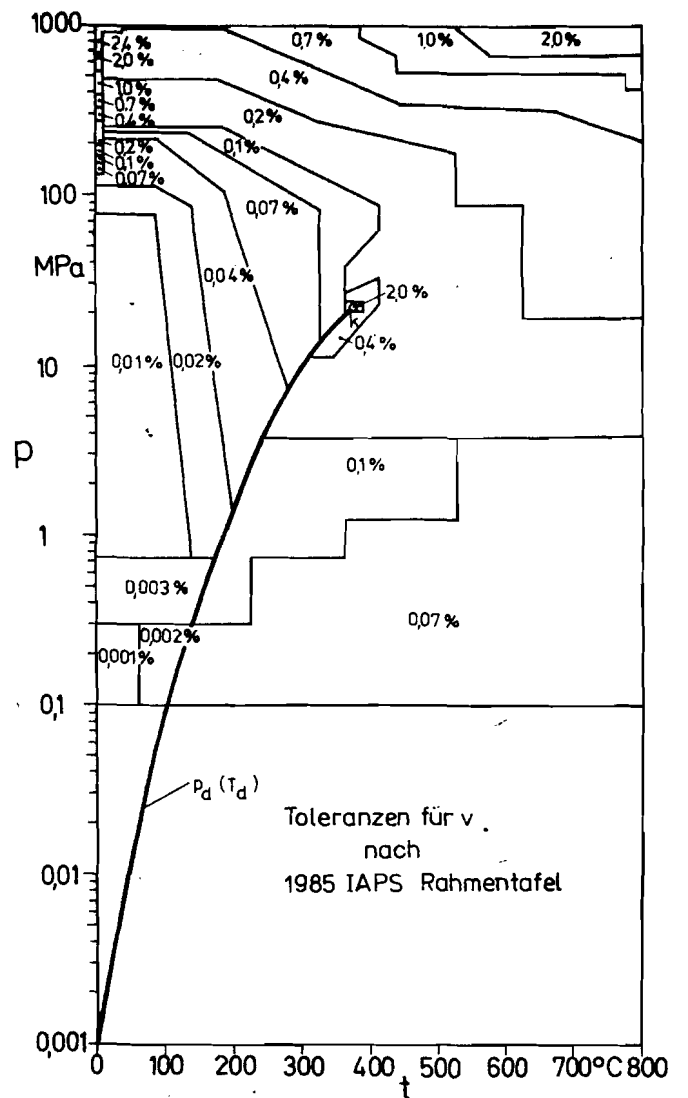
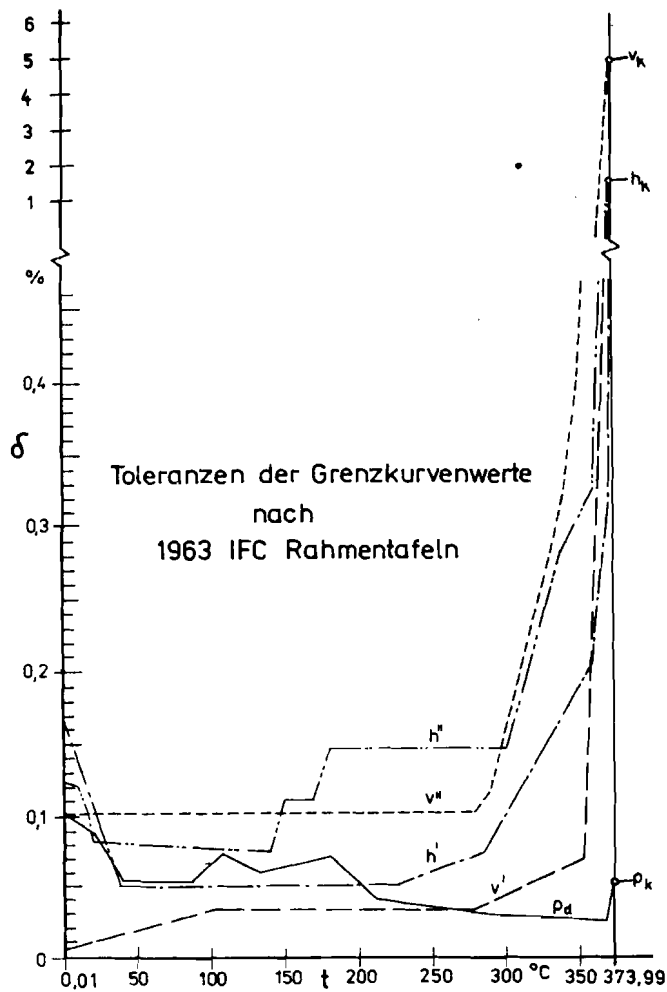


Bild 2 (links oben). Relative Toleranzen der Rahmentafel IFC 1963 für die thermodynamischen Zustandsgrößen auf der Sättigungskurve

Bild 3. Zugelassene relative Toleranzen der Rahmentafel IAPS 1985 für das spezifische Volumen im Einphasengebiet

Bild 4 (links). Relative Toleranzen der Rahmentafel IFC 1963 für das spezifische Volumen im Einphasengebiet

- [2] Sato, H., Uematsu, M., und Watanabe, K.: Proposal of The New Skeleton Tables for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Proceedings of the 10th ICPS, Moscow 1986
- [3] The IFC Skeleton Tables 1963 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Issued by IFC, 1963
- [4] Skeleton Tables for Water and Water Vapor Adopted at the Third International Conference on Steam Tables, London 1934. Mech. Engng. 57 (1935), S. 710-718
- [5] The IAPS Formulation 1984 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for Scientific and General Use. Issued by IAPS, 1984
- [6] The Provisional IAPS Formulation 1982 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for Scientific and General Use. Issued by IAPS, 1982
- [7] 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
- [8] Griggull, U., Straub, J., und Schiebener, P.: Steam Tables in SI-Units. Concise Tables in SI-Units (Students Tables). Berlin-West: Springer-Verlag 1984

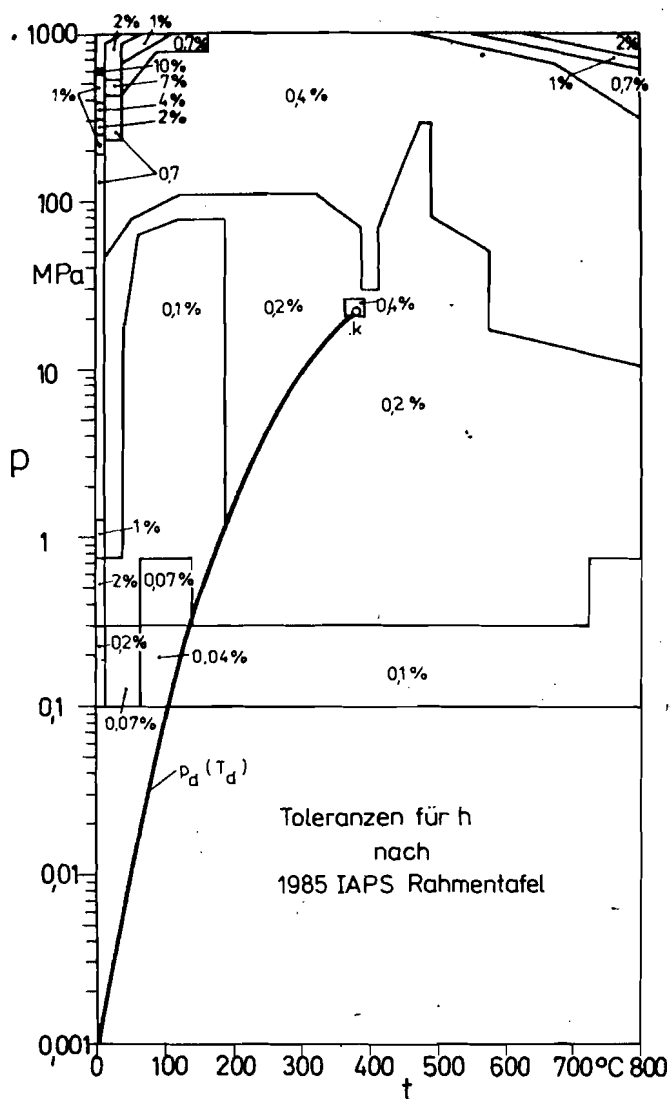


Bild 5. Zugelassene relative Toleranzen der Rahmentafel IAPS 1985 für die spezifische Enthalpie im Einphasengebiet

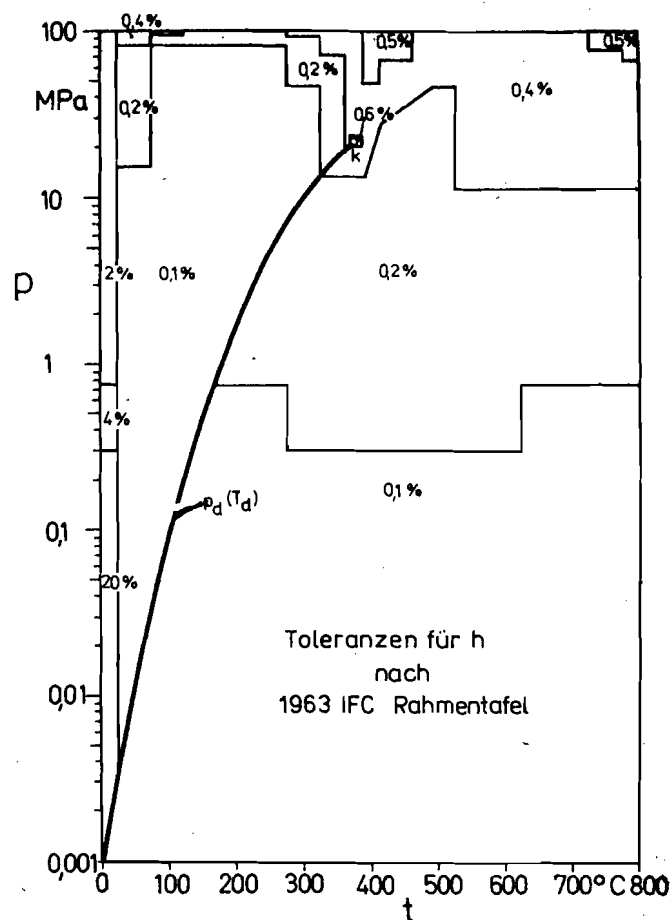


Bild 6. Relative Toleranzen der Rahmentafel IFC 1963 für die spezifische Enthalpie im Einphasengebiet

- [9] The 1968 IFC Formulation for Scientific and General Use. Issued by IFC, 1968
- [10] The 1967 IFC Formulation for Industrial Use. Issued by IFC, 1967
- [11] Release on Thermal Conductivity of Water Substance. Issued by IAPS, 1977
- [12] Sengers, J. V., Watson, J. T. R., Basu, R. S., Kamgar-Parsi, B., and Hendricks, R. C.: Representative Equations for the Thermal Conductivity of Water Substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13 (1984) 3, S. 893-933
- [13] Release on Dynamic Viscosity of Water Substance. Issued by IAPS, 1975
- [14] Sengers, J. V., und Kamgar-Parsi, B.: Representative Equations for the Viscosity of Water Substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13 (1984) 1, S. 185-205
- [15] Release on Surface Tension of Water Substance. Issued by IAPS, 1976
- [16] 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
- [17] Kestin, J., Sengers, J. V., Kamgar-Parsi, B., und Levelt Sengers, J. M. H.: Thermophysical Properties of Fluid H₂O. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13 (1984) 1, S. 175-183
- [18] Scheffler, K., Rosner, N., Straub, J., und Griggull, U.: Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Wasserdampf. *BWK* 31 (1979) 8, S. 326-329
- [19] Scheffler, K., Rosner, N., Straub, J., und Griggull, U.: Der neue internationale Standard der dynamischen Viskosität von Wasser und Wasserdampf. *BWK* 30 (1978) 2, S. 73-78

- [20] Griggull, U.: Properties of Water and Steam in SI-Units. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, München: R. Oldenbourg: 1969, 1979, 1982
- [21] Elsner, N., Fischer, S., und Klinger, J.: Thermophysikalische Eigenschaften von Wasser. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982
- [22] Kretzschmar, H.-J., Schneider, St., Wolf, E., und Klinger, J.: Zur Berechnung der thermophysikalischen Zustandsgrößen von Wasser für thermodynamische und thermohydraulische Prozessmodellierungen. *Energietechnik* 38 (1988) - in Vorbereitung
- [23] Release on IAPS Statement, 1983, of Values of Temperature, Pressure and Density of Ordinary and Heavy Water Substance at their Respective Critical Points. Issued by IAPS, 1983
- [24] Griggull, U.: Neue Entwicklungen in der Wasserdampfforschung. *BWK* 36 (1984) 12, S. 527-528
- [25] Международные таблицы и уравнение для теплопроводности воды и водяного пара. *Теплоэнергетика* 17 (1980) 4, S. 70-73
- [26] Международные таблицы и уравнение для динамической вязкости воды и водяного пара. *Теплоэнергетика* 14 (1977) 4, S. 87-91
- [27] Варгафтик, Н. Б., Волков, Б. Н., und Воляк, Л. Д.: О международных таблицах поверхностного натяжения воды. *Теплоэнергетика* 16 (1979) 5, S. 73-74
- [28] Dittmann, A., Klinger, J., und Kretzschmar, H.-J.: Preparation of Thermodynamic Property Values for Technical Process Calculation. Proceedings of the 10th ICPS, Moscow 1986
- [29] Schmidt, E.: VDI Wasserdampftafeln, 6. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1963
- [30] Ривкин, С. Л., und Александров, А. А.: Теплофизические свойства воды и водяного пара. Изд. Энергия, Москва 1980
- [31] Ривкин, С. Л., und Александров, А. А.: Теплофизические свойства воды и водяного пара. Изд. Энергия, Москва 1975
- [32] Вукалович, М. П., Ривкин, С. Л., und Александров, А. А.: Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд. стандартов, Москва 1969

- [33] Kretzschmar, H.-J., und Klinger, J.: Zur stoffunabhängigen Berechnung von impliziten Zustandsfunktionen – ein Beitrag zur effektiven Bereitstellung von Stoffdaten in thermodynamischen Prozeßberechnungen der Energieanlagentechnik. *Energietechnik* 34 (1984) 6, S. 210–215
- [34] Kretzschmar, H.-J., und Klinger, J.: Ein neues Programmpaket zur Bereitstellung von Stoffwerten in energietechnischen Berechnungen mit stoffunabhängigen Algorithmen für die thermodynamischen Funktionen. Forschungsbericht, WB Thermodynamik, TU Dresden, 1985
- [35] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Schneider, St.: Zur vereinfachten Bereitstellung thermophysikalischer Stoffwerte von Wasser auf Personalcomputer. Forschungsbericht, WB Thermodynamik, TU Dresden, 1986
- [36] Wooley, H. W. in: *Water and Steam: Their Properties and Current Industrial Applications*. Ed. by Straub, J., und Scheffler, K. Oxford: Pergamon Press 1980
- [37] Keenan, J. H., Keyes, F. G., Hill, P. G., und Moore, J. G.: *Steam Tables – Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid and Solid Phases*. New York/London/Sydney/Toronto: John Wiley 1969
- [38] Pollak, R.: Eine neue Fundamentalgleichung zur konsistenten Darstellung der thermodynamischen Eigenschaften von Wasser. *BWK* 27 (1975) 5, S. 210–215
- [39] Kretzschmar, H.-J.: Zur effektiven Bereitstellung von thermophysikalischen Stoffdaten für Wasser – angewendet in instationären thermohydraulischen Modellierungen von Kernreaktoren. Arbeitsbericht Reaktortheorie – 1/86, Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, 1986
- [40] Kretzschmar, H.-J., Klinger, J., und Schneider, St.: Ein komfortables Auskunftsprogramm thermophysikalischer Stoffdaten für Personalcomputer. Forschungsbericht, WB Thermodynamik, TU Dresden, 1985
- [41] Levelt Sengers, J. M. H., Kamgar-Parsi, B., Balfour, F. W., und Sengers, J. V.: Thermodynamic Properties of Steam in the Critical Region. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 12 (1983) 1, S. 1–28

Teil II des Beitrages erscheint im Heft 2/1988 einschließlich aller Tabellen.

Manuskripteingang am 2. 6. 1987

ENA 471/1

Gerd Grabow und Gottfried Gneipel, Freiberg¹

Druckzahl- und Wirkungsgradänderungen bei der Förderung von Feststoff-Flüssigkeits-Gemischen mit Kreiselpumpen

1. Einleitung

In zunehmendem Maße werden von Betreibern der Braunkohlenkraftwerke und anderen Zweigen der Energiewirtschaft an den Hersteller von Kreiselpumpen Forderungen zur Entwicklung von geeigneten Konstruktionen gestellt, die in der Lage sind, den Transport z. B. von Schlacke-Asche-Gemischen über größere Entfernungen als bisher zu gewährleisten.

Dabei ist sowohl für den Projektanten als auch für den Betreiber von besonderem Interesse, welche Druckzahl- und Wirkungsgradänderungen infolge der Förderung des Zweistoff-Gemischs gegenüber reiner Wasserförderung auftreten.

Da diese Feststoff-Flüssigkeits-Gemische inhomogene Fluide sind und die Auslegung der Kreiselpumpen zur Förderung dieser Gemische nicht mit den bekannten Verfahren für reine Flüssigkeiten oder für Flüssigkeits-Gas-Gemische erfolgen kann, sollen im vorliegenden Beitrag Ergebnisse von den an der Bergakademie Freiberg durchgeführten Berechnungen dargestellt werden.

2. Verwendete Beziehungen

Die Druckzahl- und Wirkungsgradabnahme bei der Förderung von Flüssigkeits-Feststoff-Gemischen mit Radialkreiselpumpen ist von einer Vielzahl von Einflußfaktoren abhängig, wobei insbesondere der Volumenstrom \dot{V} , die spezifische Drehzahl n_q , die Feststofftransportkonzentration c_{TF} , der Feststoffkorndurchmesser d_F und das Dichteverhältnis ρ_F/ρ_W zu beachten sind, d. h., es ist

$$\lambda_\psi; \lambda_\eta = f(\dot{V}, n_q, c_{TF}, d_F, \rho_F/\rho_W). \quad (1)$$

Zur Berechnung der Korrekturfaktoren für den Feststofftransport mit Kreiselpumpen wurden schon in einer Reihe von Arbeiten [1] bis [4] Beziehungen abgeleitet und Kurvenverläufe der für

die Auslegung von Kreiselpumpen wichtigen Kennwerte mitgeteilt, so daß hier nur weiterführende Betrachtungen angestellt werden sollen.

Um die relative Abnahme der Druckzahl λ_ψ von Kreiselpumpen bei der Feststoff-Flüssigkeits-Förderung nach

$$\lambda_\psi = 1 - \psi^* \quad (2)$$

gegenüber der reinen Wasserförderung bestimmen zu können, muß der bezogene hydraulische Wirkungsgrad η_b^* aus

$$\eta_b^* = 1 - \sum_i P_{V,i}^* \quad (3)$$

unter Berücksichtigung sämtlicher bezogener Verlustleistungen $P_{V,i}^*$ bestimmt werden. Es gilt

$$\eta_b^* = 1 - (P_{V,L}^* + P_{V,Ge,Sto\beta}^* + P_{V,Ge,R}^*). \quad (4)$$

Berücksichtigt werden dabei die bezogenen Verlustleistungen

$P_{V,L}^*$ durch Wandkontakt der Feststoffpartikel im Laufkanal (Reibung),

$P_{V,Ge,Sto\beta}^*$ durch Wandkontakt im Spiralgehäuse (Stoßwirkung) und

$P_{V,Ge,R}^*$ durch Reibung an der Spiralgehäusewand.

Mit dem Verhältnis der spezifischen Schaufelarbeiten für die Gemischförderung und für die Wasserförderung $\frac{w_{Sch,G}}{w_{Sch,W}}$ kann die Änderung der Energieübertragungszahl ψ^* aus

$$\psi^* = \frac{w_{Sch,G}}{w_{Sch,W}} \cdot \eta_b^* \quad (5)$$

bestimmt werden, und somit ist λ_ψ berechenbar.

Die relative Wirkungsgradabnahme λ_η soll analog zur Gleichung (2) aus

$$\lambda_\eta = 1 - \eta^* \quad (6)$$

bestimmt werden, wobei η^* aus dem bezogenen Wirkungsgrad für die Radseitenreibung und die mechanischen Verluste η_{*R}^* aus

¹ Prof. Dr. sc. techn. Gerd Grabow und Dr.-Ing. Gottfried Gneipel, Bergakademie Freiberg, Sektion Maschinen- und Energietechnik, WB Grundlagen der Energiewandlung