

95

Der Windeinfluß auf den Volumenstrom von Naturzugkühltürmen

Schrifttum

- [1] Baer, E. et al.: Untersuchungen zur Schwadenströmung in den Kronen von Naturzugkühltürmen. In: VDI-Berichte Nr. 298 (1977), S. 81/86
- [2] VDI-Kühlturmregeln (DIN 1947): Leistungsversuche an Kühltürmen. Berlin/Köln: Beuth-Vertrieb 1959
- [3] HHT-Programm: (Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine großer Leistung) Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Phase IB, Abschlußbericht, HHT 30, (März 1978)
- [4] Rühl, H.: Konvergente Gestaltung der Kühlturmkrone großer Rundkühltürme im Zusammenwirken mit einer aufwärtssprühenden Wasserverteilung. VGB-Kraftwerkstechnik 58 (1978) Nr. 4, S. 289/97.

- [5] Baer, E. et al.: Untersuchungen an einem Naturzugnaßkühlturm. Fortschritt-Bericht VDI-Z., Reihe 15, Nr. 5, (1974)
- [6] Truckenbrodt, E.: Strömungsmechanik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1968
- [7] Schmitt, H.: Umlenkung eines runden turbulenten Freistrahls durch den Querwind. DFVLR-Bericht; IB 061-72 A 24 (1972)
- [8] Wooler, P.T. et al.: Pressure Distribution on a Rectangular Wing with a Jet Exhausting Normally into an Airstream. J. Aircraft, Vol. 4 (1967) Nr. 6
- [9] Schymanietz, K.: Untersuchung der Strömungs- und Mischungsvorgänge in Freistrahlen mit Queranblasung. Diss. RWTH Aachen, 1977
- [10] Delany, Noel, K. et al.: Low-Speed Drag of Cylinders of Various Shapes. Naca, Techn. Note 3088, Washington 1953
- [11] Prandtl, L.: Strömungslehre. Braunschweig: Vieweg-Verlag 1965 BWK 393

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Wasserdampf

K. Scheffler, N. Rosner, J. Straub und U. Grigull, München

Die Darstellung der Transportgrößen von reinem Wasser wurde 1978 durch die Bearbeitung der Wärmeleitfähigkeit λ ergänzt. Die Rahmentafel der Wärmeleitfähigkeit zusammen mit zwei Gleichungen für den industriellen beziehungsweise wissenschaftlichen Anwendungsbereich bilden die zum internationalen Standard erhobene Empfehlung der „International Association for the Properties of Steam (IAPS)“. Die Entstehung dieses Standards sowie dessen Inhalt werden hier dargestellt.

Einleitung

Wasser gehört durch seine außergewöhnliche Bedeutung in der Energiewirtschaft wohl zu den Stoffen, deren Eigenschaften durch Messungen und deren Auswertung und Darstellung am besten bekannt sind. Die Erforschung der thermodynamischen Größen von Wasser lief daher stets parallel zur industriellen Anwendung in den Kreisprozessen der Kraftwerke, die heute fast ausschließlich Wasser als Medium der Energieumwandlung benutzen. So ist ohne genaue Kenntnis der Zustands- und Transportgrößen von Wasser eine apparativ und sicherheitstechnisch optimale Auslegung von Wärmekraftwerken nicht möglich.

Die thermodynamischen Zustandsgrößen sind entsprechend ihrer Bedeutung hinreichend genau bekannt und Verbesserungen nur mit erheblichem Arbeitsaufwand über einen längeren Zeitraum möglich. Die Transportgrößen bedurften jedoch einer grundsätzlichen Überarbeitung. Die 7. Auflage der VDI-Wasserdampf-tafel von 1968 [1] sowie die internationale Ausgabe in SI-Einheiten von 1969 [2] enthalten verbindliche Rahmentafeln und Gleichungen der Transportgrößen. Festgelegt wurden diese Tafeln und Gleichungen schon 1964 von einer Arbeitsgruppe, die von der 6. Internationalen Wasserdampfkongferenz 1963 den Auftrag erhalten hatte, die Transportgrößen zu standardisieren. Damit wurden erstmals die zu dieser Zeit als Bestwerte der Transportgrößen erachteten Werte mit ihren Toleranzen in Form von Rahmentafeln und Interpolationsgleichungen geschaffen. Die nach 1964 bekanntgewordenen neuen Messungen sowie Vergleiche zu existierenden Gleichungen zeigten die Notwendigkeit, diesen Standard neu zu bearbeiten und durch eine Erweiterung des Bereichs

bis 1000 bar und 800°C sowie durch die Aufnahme der Werte entlang der Sättigungslinie den gestellten Forderungen anzupassen.

Der Weg zum neuen Standard

Die Arbeitsgruppe II der IAPS, die sich ausschließlich mit den Transportgrößen von Wasser beschäftigt, erhielt den Auftrag, die dynamische Viskosität η und Wärmeleitfähigkeit λ grundlegend zu überarbeiten. Für die dynamische Viskosität η wurde der neue internationale Standard vor einiger Zeit mitgeteilt [3; 4]. Die Bearbeitung der Wärmeleitfähigkeit λ wurde gleichzeitig in Angriff genommen, erwies sich jedoch durch die geringere Anzahl vertrauenswürdiger Daten sowie die schwierige Darstellung im kritischen Gebiet als umfangreicher. Ein Vergleich der bis 1973 vorhandenen Gleichungen und Daten [5] zeigte systematische Abweichungen und Toleranzüberschreitungen neuer Messungen zur Rahmentafel von 1964. Es wurden daher alle Messungen der Wärmeleitfähigkeit λ unabhängig von mehreren Gruppen gesammelt [6; 7] und innerhalb der Arbeitsgruppe, die sich aus Mitgliedern der Nationen Japan, UdSSR, Frankreich, USA, UK und der Bundesrepublik Deutschland zusammensetzt, überprüft.

Daraus resultierte ein einheitliches Wertungsschema, das entsprechend der individuellen Auffassung, Rahmentafeln oder Gleichungen als primäre Darstellungsmöglichkeit der Transportgrößen zu bevorzugen, als Grundlage herangezogen wurde. Die Gründe für die von bundesdeutschen Mitgliedern der Arbeitsgruppe vertretene Auffassung, die Gitterwerte der Rahmentafeln direkt aus experimentellen Daten zu ermitteln, wurden ausführlich in [8] für die dynamische Viskosität η diskutiert und in [3] kurz zusammengefaßt; sie gelten jedoch generell für alle Größen. Das

Formelzeichen

p	Druck in bar	} nach IPTS 1968
T	Temperatur in K	
t	Temperatur in °C	
v	spezifisches Volumen in m ³ /kg	
η	dynamische Viskosität in kg/s·m	
λ	Wärmeleitfähigkeit in W/K m	
ρ	Dichte in kg/m ³	

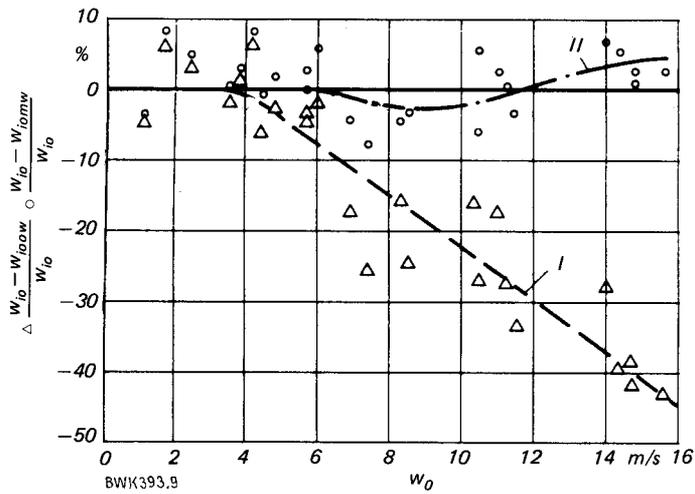


Bild 9: Einfluß des Windes auf die Schwadengeschwindigkeit (Vergleich Messung-Rechnung, Messungen am Kühlturm Kraftwerk Meppen)

w_{10}	gemessene Schwadengeschwindigkeit am KT-Austritt
$w_{10,0}$	berechnete Schwadengeschwindigkeit am KT-Austritt (ohne Wind einfluß)
$w_{10,mw}$	berechnete Schwadengeschwindigkeit am KT-Austritt (mit Wind einfluß)
w_0	Windgeschwindigkeit Höhe KT-Austritt

4.4. Rechengang

Zur Berechnung der Schwadengeschwindigkeit w_{10} an der Kühlturmkrone nach Gl. (3) fehlt noch der Druckverlustbeiwert ζ_i der Einbauten. Er kann aus Messungen bei Windstille bzw. geringer Windgeschwindigkeit berechnet werden. Dazu wird Gl. (3) umgestellt in

$$\zeta_i = \frac{2g(\rho_{am}(\Delta z_1 + \Delta z_2) - \rho_i \Delta z_2 - \rho_{im} \Delta z_1) - \rho_i}{w_{10}^2} - \frac{\rho_{im} \frac{D_{10}^4}{D_{iu}^4}}{\rho_{im} \frac{D_{10}^4}{D_{iu}^4}}$$

Man erhält für den Kühlturm des Kraftwerks Meppen $\zeta_i = 30,1$ entsprechend einem Δp_i bei Windstille von $\Delta p_i \cong 80 \frac{N}{m^2}$.

Nach Gl. (3) kann damit die Geschwindigkeit w_{10} berechnet werden. Dabei muß allerdings der Druckbeiwert ζ_{w_0} zunächst geschätzt werden, d.h. w_{10} kann nur iterativ bestimmt werden, da Gl. (3) eine Funktion $w_{10} = f(w_{10}, \dots, \dots)$ darstellt.

5. Ergebnisse

Bild 9 gibt die Abhängigkeit der Schwadenaustrittsgeschwindigkeit vom Wind wieder: Kurve I zeigt den Verlauf der ohne Wind einfluß nach Gl. (3a) berechneten Austrittsgeschwindigkeit, subtrahiert von der gemessenen tatsächlichen Austrittsgeschwindigkeit, aufgetragen über der Windgeschwindigkeit in Höhe Kühlturmkrone. Benutzt wurden nur die Meßpunkte, bei denen neben den in Kap. 3 erwähnten Voraussetzungen zusätzlich ein Einfluß der Kraftwerksgebäude auf den Wind ausgeschlossen werden kann. Die Meßpunkte mit den entsprechenden kritischen Windrichtungen wurden nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden nur Punkte stabiler Wetterlagen ausgewertet, wobei die Daten des Außenluftzustandes und des Kühlturmschwadens sowie die Windgeschwindigkeiten über einen Zeitraum von 1 h vor der Messung gemittelt wurden. Es zeigt sich, daß bei Windgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s die Schwadenaustrittsgeschwindigkeit um mehr als

40% reduziert wird. Die Ursache für die starke Streuung der Punkte liegt darin, daß die Windgeschwindigkeit in Höhe Lufteintritt von der an der Kühlturmkrone i.a. abweicht, Bild 10, also die Vertikalgeschwindigkeitswerte sowohl über w_0 wie auch über w_u aufgetragen werden müßten. Die zweite Einflußgröße w_u ist also in dieser Darstellung nicht berücksichtigt worden.

Kurve II zeigt für die gleichen Meßpunkte die Abweichungen der nach Gl. (3) berechneten Schwadengeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Wind einflusses von den gemessenen Werten.

Man sieht, daß die Abweichungen kleiner als 9% sind und eine klare Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit nicht mehr festzustellen ist.

Die im Bereich zwischen 5 m/s und 10 m/s auftretenden relativ großen negativen Abweichungen könnten als Folge der in [1] und [5] beschriebenen instationären Vorgänge, der „Kaltlufteinbrüche“, gedeutet werden. Sie könnten durch eine zusätzliche Berücksichtigung dieser Vorgänge vermutlich noch reduziert werden.

Insgesamt ist festzustellen, daß mit dem beschriebenen Modell des stationären Wind einflusses auf die Schwadengeschwindigkeiten die Schwadengeschwindigkeiten bei stärkerem Seitenwind berechnet werden können.

Die Übereinstimmung mit den Meßresultaten ist angesichts der Schwierigkeiten bei der Ausmessung derartig großer Strömungsquerschnitte gut.

Mit Hilfe von Meßergebnissen, die an anderen Kühltürmen ermittelt wurden, sollte nun die Anwendbarkeit des Modells auch auf andere Naturzugkühltürme überprüft werden. Dabei müssen jedoch äußere Unterschiede (mehrere Kühltürme nah beieinander, Lärmschutzwälle, Relief u.a.) wie auch prinzipielle Unterschiede (z.B. höherer Lufteintritt bei Trockenkühltürmen) berücksichtigt werden.

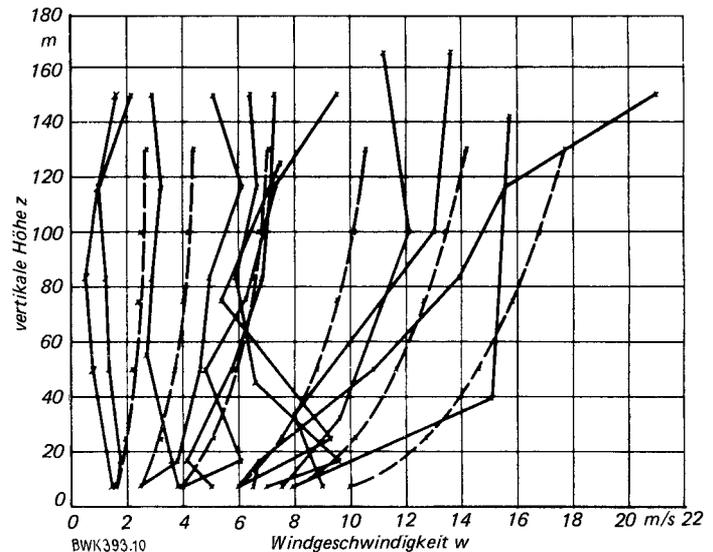


Bild 10: Vergleich des gemessenen vertikalen Windgeschwindigkeitsverlaufs mit nach DIN 1947, Entwurf 1974, berechneten Werten (Basis sind die gemessenen Windgeschwindigkeiten in 7,5 m Höhe).

- theoretisch nach: $w_0 = w_u \left(\frac{z_0}{z_u}\right)^{\frac{1}{5}}$ (DIN 1947, Entwurf 1974)
- gemessen
- w Windgeschwindigkeit
- o oben
- u unten
- z Höhe vom Erdboden aus gerechnet

Tabelle 1: Wertungsschema

Ref.	Autor	val. prec.	Jahr	Ref.	Autor	val. prec.	Jahr
1100	Vargaftig	3	1946	1350	LeNeindre	2	1968
1110	Schmidt	3	1932	1360	Bury	3	1968
1111	Milberton	0	1935	1370	Tarzimanov	2	1968
1120	Timrot	3	1935	1380	Brain	2	1969
1130	Vargaftig	3	1935	1390	Rastorgujev	100	1970
1140	Timrot	3*	1939	1400	Bach	2	1970
1150	Timrot	3	1940	1410	LeNeindre	2 (6)	1973
1160	Keyes	100	1950	1420	LeNeindre	2 (6)	1973
1170	Schmidt	2	1955	1430	Tarzimanov	2 [3]	1973
1180	Challoner	2	1955	1440	Bury	2 (6)	1973
1190	Lawson	3	1955	1450	Mashirov	2	1968
1200	Vargaftig	2	1956	1460	Tarzimanov	2	1970
1210	Vargaftig	3	1959	1470	Vargaftig	2	1973
1220	Vargaftig	2	1959	1480	Sirota	100	1973
1230	Vargaftig	3	1960	1490	Minamiyama	2	1974
1240	Vines	3	1960	1500	Rastorgujev	2	1974
*250	Geier	100	1961	1510	Sirota	2 (6)	1974
60	Venart	3	1965	1520	Castelli	2	1974
1270	Tarzimanov	2	1962	1530	Amirchanov	2	1974
1280	Amirchanov	100	1963	1540	Takizawa	2	1974
1290	Vukalovitch	5*	1963	1550	Minamiyama	0	1975
1300	Keyes	3	1964	1560	Minamiyama	0	1975
1310	Vargaftig	3	1964	1570	Tsederberg	0	1975
1320	Brain	2	1967	1580	Sirota	0	1976
1330	Amirchanov	4 (10)	1968	1590	Sirota	0	1976
1340	Cherneeva	4*	1968				

* Nicht für gesamten Bereich; () Kritisches Gebiet; [] Sättigungslinie; 0 Neuere Messungen (nach internat. Wertung aufgenommen)

Wertungsschema ist in Tabelle 1 wiedergegeben, wobei die Referenznummer mit den in [6] aufgeführten Messungen der verschiedenen Autoren übereinstimmt. Der Wertungsfaktor gibt eine Art „Toleranzband“ für die Daten der jeweiligen Autoren an, wobei 100 bei der praktischen Ausführung eine Ablehnung dieser Messungen bedeutet. Diese Messungen wurden nur in Gebieten berücksichtigt, in denen keine weitere Information über den Verlauf der Transportgröße vorlag.

Auf dieser Grundlage wurde nach einem Verfahren, das sich schon bei der Konstruktion der Rahmentafel für die dynamische Viskosität η bewährt hat, die Rahmentafel für die Wärmeleitfähigkeit λ aufgebaut. Dabei werden diskrete Messungen unter Berücksichtigung der Wertung aus einem begrenzten Gebiet um den gewählten Rahmentafel-Gitterwert auf diesen Wert umgerechnet. Dieser Transport ursprünglich gemessener Werte auf den Gitterwert erfolgte durch Hilfsgleichungen, die in einem über das begrenzte Gebiet hinausgehenden Bereich die Messungen approximierten. Mit anderen Worten: die Messungen wurden auf Rahmentafelwerte kondensiert und dabei die Wertung berücksichtigt. Die gefundenen Gitterwerte geben somit das Mittel gewerteter Messungen in der näheren Umgebung dieses Punktes wieder; die Standardabweichung erlaubt eine Aussage über die Toleranz, innerhalb der sich mit großer Wahrscheinlichkeit der physikalisch richtige Wert befindet. Besondere Aufmerksamkeit erfordern dabei die Randgebiete sowie Punkte entlang der Sättigungslinie. Nachdem der erste Entwurf dieser Rahmentafel der Arbeitsgruppe für Transportgrößen vorgelegt wurde [9], wurden vier Gleichungen für den Bereich von 0 bis 800 °C und 0 bis 1000 bar präsentiert. Die Beurteilung und Auswahl dieser Gleichungen erfolgte durch ein neutrales Gremium, bestehend aus R. C. Hendricks (NASA, Cleveland, USA) und dem Autor. Als Beurteilungskriterien galten

1. Form der Gleichung,
2. Übereinstimmung mit der Rahmentafel,
3. Übereinstimmung mit Daten,
4. Verträglichkeit mit den verschiedenen Zustandsgleichungen,
5. Rechenzeit und Programmieraufwand,
6. Verlauf außerhalb der Bereichsgrenzen,
7. Verlauf der Ableitungen,
8. Verwendbarkeit im kritischen Gebiet,
9. Systematische Abweichungen.

Bei der Auswahl der Gleichungen wurden großmaßstäbliche Computerzeichnungen erstellt, die eine exakte Überprüfung der aufgestellten Beurteilungskriterien ermöglichten. Alle Gleichungen wurden mit den vorhandenen Zustandsgleichungen für Wasser, das sind die IFC 1967 for Industrial Use, die IFC 1968 for Scientific and General Use, die MIT-Gleichung und die Pollak-Gleichung [10 bis 13] getestet. Das Ergebnis dieser Beurteilung wurde auf dem Arbeitsgruppentreffen der IAPS 1977 in Moskau vorgetragen und daraus die Gleichungen für den industriellen und wissenschaftlichen Bereich ausgewählt.

Rahmentafel und Gleichungen

Der vorgelegte Rahmentafelentwurf wurde nochmals überarbeitet, wobei in gewissen Bereichen nur eine Änderung der Toleranzen notwendig war. Die nun verabschiedete Rahmentafel wird in einem p, t -Gitter in Tabelle 2 wiedergegeben, wobei die Wärme-

leitfähigkeit in $10^{-3} \frac{W}{Km}$ ausgedrückt wurde. Die in Klammern

gesetzten Werte sind durch Messungen sehr wenig abgesichert und stellen daher nur Anhaltswerte dar. Die Werte in der 2. Reihe geben das festgelegte Toleranzband in absoluten Beträgen von λ wieder. Tabelle 3 enthält die aus Messungen approximierten Werte der Sättigungslinie für das gesättigte Wasser (λ') und den Satttdampf (λ''). Die Werte in unmittelbarer Umgebung des kritischen Punktes sind wiederum durch Messungen nicht abgesichert und es fehlt daher die Angabe des Toleranzbandes $\pm \Delta \lambda$.

Bei der Bewertung der vorgelegten Gleichungen wurde die für den industriellen Anwendungsbereich besonders geeignete Gleichung von J. Yata und T. Minamiyama [14] ausgewählt, während für den wissenschaftlichen Bereich die von R. S. Basu; J. Watson und J. V. Sengers vorgestellte Gleichung geeigneter erschien [15; 16].

Die empfohlene Gleichung für den industriellen Bereich hat den Vorteil eines einfachen Aufbaus; die Eingangsgrößen sind t und v , wobei v aus der IFC 1967 zu berechnen ist. Jedoch führt die Verwendung der getesteten Zustandsgleichungen [10 bis 13] zu keinen nennenswerten Änderungen in der Wiedergabe von λ . Die Gleichung ist durch eine Abfrage entlang der kritischen Isotherme im Dampfgebiet in 2 Bereiche aufgeteilt, was eine leichte Diskontinuität der Ableitung an der Schnittstelle zur Folge hat. Dies ist jedoch für den praktischen Gebrauch zu vernachlässigen. Die Gleichung gibt auch außerhalb des Gültigkeitsbereichs die Wärmeleitfähigkeit physikalisch sinnvoll wieder, so daß bis 1500 °C und 3000 bar extrapoliert werden kann. Im kritischen Gebiet werden die gemessenen Daten gut dargestellt. Auch an kleineren Rechnern kann diese Gleichung günstig angewendet werden. Sie hat den Aufbau:

$$\lambda = \lambda_0 + \bar{\lambda} + \Delta \lambda \quad (1)$$

mit

$$\lambda_0 = \left(\frac{T}{T^*}\right)^{1/2} \sum_{i=0}^3 a_i \left(\frac{T}{T^*}\right)^i \quad (2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Wasserdampf

Tabelle 2: Rahmentafel

t_{in} t_{out} °C	0	25	50	75	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700	750	800
1	563.0	610.0	643.2	664.0	25.0	28.9	33.3	38.1	43.3	49.0	52.0	54.9	57.9	60.6	63.8	67.1	73.1	79.9	86.4	93.4	100.5	107.5
5	11.3	12.2	12.9	13.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
10	563.4	610.5	643.2	664.3	680.3	687.6	34.1	38.7	43.7	49.1	52.6	55.5	58.5	61.4	64.5	67.7	74.0	80.5	87.2	93.8	100.9	108.0
25	563.7	610.8	643.3	665.5	680.9	687.8	35.9	39.5	44.3	49.5	53.0	56.0	58.6	61.7	64.7	68.0	74.3	81.0	87.7	94.3	101.4	108.6
50	565.6	611.1	643.7	666.2	682.4	690.3	668.5	43.8	46.5	50.9	54.7	56.9	59.6	62.6	65.6	68.7	75.1	81.5	88.8	95.3	102.4	109.5
75	567.0	612.6	645.2	667.5	683.4	691.2	671.4	625.0	52.7	54.1	56.5	58.6	60.9	64.0	66.4	69.3	75.4	81.5	88.8	95.7	103.6	109.6
100	570.0	613.8	646.6	668.8	684.7	694.1	673.0	628.5	63.6	59.6	60.5	62.7	64.0	66.7	69.5	73.3	80.0	87.3	96.4	101.0	108.1	112.4
125	571.3	616.3	649.1	671.6	687.4	697.2	678.0	634.0	56.1	61.2	62.4	64.2	65.4	68.4	72.1	75.6	82.5	89.4	97.5	102.9	111.2	118.1
150	572.7	616.5	650.4	672.9	689.3	699.7	680.0	638.3	56.5	61.8	63.0	64.8	66.1	69.1	72.8	76.3	83.2	90.1	98.2	103.6	111.9	118.8
175	572.7	618.1	651.4	674.3	690.6	700.9	682.3	639.1	57.0	62.5	63.7	65.5	66.8	69.8	73.5	77.0	83.9	90.8	99.0	104.3	112.7	119.7
200	573.8	619.1	652.9	675.8	691.1	703.2	683.7	640.9	57.5	63.0	64.2	66.0	67.3	70.3	74.0	77.5	84.4	91.3	99.5	104.8	113.2	120.2
225	574.1	620.5	653.8	677.9	692.4	705.3	685.8	645.8	58.1	63.6	64.8	66.6	67.9	70.9	74.6	78.1	85.0	91.9	100.1	105.4	113.8	120.8
250	576.7	621.2	655.2	678.8	694.3	707.3	689.3	648.1	58.7	64.2	65.4	67.2	68.5	71.5	75.2	78.7	85.6	92.5	100.7	106.0	114.4	121.4
275	577.6	622.3	656.2	679.8	696.1	707.5	690.4	651.3	58.9	64.4	65.6	67.4	68.7	71.7	75.4	78.9	85.8	92.7	101.0	106.3	114.7	121.7
300	577.9	623.4	657.8	681.1	697.1	710.4	692.3	652.6	59.3	64.8	66.0	67.8	69.1	72.1	75.8	79.3	86.2	93.1	101.4	106.7	115.1	122.1
350	579.9	625.0	660.2	684.1	700.0	713.6	696.5	659.6	60.1	65.6	66.8	68.6	69.9	72.9	76.6	80.1	87.0	93.9	102.2	107.5	115.9	122.9
400	582.8	626.5	662.4	686.5	701.8	717.1	700.4	664.1	608.3	65.2	66.4	68.2	69.5	72.5	76.2	79.7	86.6	93.5	101.8	107.1	115.5	122.5
450	583.6	629.0	664.1	689.7	704.7	721.0	704.0	670.1	615.3	65.7	66.9	68.7	70.0	73.0	76.7	80.2	87.1	94.0	102.3	107.6	116.0	123.0
500	586.4	630.5	666.0	691.8	707.8	724.1	708.1	673.1	621.5	66.9	68.1	69.9	71.2	74.2	77.9	81.4	88.3	95.2	103.5	108.8	117.2	124.2
550	588.6	633.3	666.6	693.9	710.5	726.1	712.1	677.8	628.8	67.5	68.7	70.5	71.8	74.8	78.5	82.0	88.9	95.8	104.1	109.4	117.8	124.8
600	590.1	634.8	670.4	696.6	712.6	729.2	715.3	682.1	633.8	68.9	69.9	71.7	73.0	76.0	79.7	83.2	90.1	97.0	105.3	110.6	119.0	126.0
650	592.1	638.2	672.8	699.4	715.3	732.6	718.4	687.5	638.6	70.9	71.9	73.7	75.0	78.0	81.7	85.2	92.1	99.0	107.3	112.6	121.0	128.0
700	596.7	639.3	674.1	702.4	717.5	735.4	721.0	691.3	645.2	72.3	73.3	75.1	76.4	79.4	83.1	86.6	93.5	100.4	108.7	114.0	122.4	129.4
750	598.6	640.8	675.2	704.7	719.6	738.0	725.4	695.7	648.0	73.5	74.5	76.3	77.6	80.6	84.3	87.8	94.7	101.6	110.0	115.3	123.7	130.7
800	12.0	12.8	13.5	14.1	14.4	14.8	14.5	13.9	13.0	17.7	16.6	20.4	18.7	16.9	15.0	13.1	10.8	10.9	9.9	9.3	9.0	8.9
850	599.2	644.7	677.2	706.9	723.4	739.3	728.8	698.7	653.1	79.9	56.3	52.1	47.9	43.5	39.2	34.5	29.7	24.8	20.9	16.3	11.7	10.5
900	601.4	646.5	679.9	706.4	726.0	741.6	732.4	702.2	659.4	60.3	57.1	53.2	48.8	44.7	40.0	36.1	31.2	26.0	22.5	18.0	13.5	9.3
950	604.5	648.2	680.6	709.7	728.0	744.6	734.9	707.1	664.6	11.1	57.8	54.3	49.9	45.6	42.4	38.4	33.0	28.0	23.8	19.3	14.8	10.3
1000	608.3	649.9	685.2	713.3	730.8	747.7	738.7	710.9	669.3	615.3	58.6	55.2	51.0	47.3	43.5	39.6	34.2	29.2	24.9	20.6	16.1	11.6
	12.2	13.0	13.7	14.3	14.6	15.0	14.8	14.2	13.4	18.5	17.6	22.1	20.4	18.9	17.4	15.9	12.9	13.6	12.1	11.3	10.7	10.3
	12.2	13.0	13.7	14.3	14.7	15.0	14.8	14.9	14.9	62.4	59.3	56.0	51.9	48.3	44.5	41.1	37.7	28.7	25.5	22.0	17.5	13.0
										18.7	17.8	22.4	20.8	19.3	17.8	16.5	13.5	14.4	12.8	11.8	11.0	10.8

Tabelle 3: Sättigungslinie

T	P	λ'	$\pm \Delta \lambda'$	λ''	$\pm \Delta \lambda''$
0.00	0.006108	569	11	16.7	0.5
0.01	0.006112	565	11	16.7	0.5
10	0.01223	584	12	17.4	0.5
20	0.02337	602	12	18.1	0.5
30	0.04242	617	12	19.0	0.6
40	0.07375	631	13	19.7	0.6
50	0.1234	642	13	20.4	0.6
60	0.1992	652	13	21.2	0.6
70	0.3116	660	13	22.2	0.7
80	0.4736	669	13	23.1	0.7
90	0.7011	675	14	24.0	0.7
100	1.013	679	14	25.0	0.8
110	1.433	681	14	25.7	0.8
120	1.984	685	14	26.8	0.8
130	2.701	686	14	28.7	0.9
140	3.614	686	14	29.7	0.9
150	4.760	686	14	31.0	0.9
160	6.180	682	14	31.9	1.3
170	7.920	678	14	33.6	1.3
180	10.03	674	13	35.2	1.3
190	12.55	670	13	37.2	1.2
200	15.55	664	13	38.8	1.4
210	19.08	654	13	40.5	1.7
220	23.20	643	13	43.2	1.3
230	27.98	632	13	45.3	1.4
240	33.48	626	12	47.9	1.4
250	39.78	615	12	51.0	1.5
260	46.94	602	12	54.2	1.6
270	55.05	590	12	57.7	1.7
280	64.19	577	11	61.3	1.8
290	74.45	564	11	67.3	2.1
300	85.92	547	11	73.2	3.7
310	98.69	532	11	79.8	4.2
320	112.9	512	10	88.3	4.7
330	128.6	485	10	99.1	5.9
340	146.1	455	13	116.7	7.9
350	165.4	447	11	138	11
360	186.7	425	23	174	15
370	210.5	418	36	293	55
371	213.1	429	38	331	62
372	215.6	450	42	377	123
373	218.2	520	--	464	140
374	220.9	793	--	791	----
374.15	221.2	914	--	914	----

Tabelle 4: Numerische Konstanten der Gl. (1) bis (9)

In- dex	a	W/Km	b	W/Km	B	C	d	W/Km
0	1,02811·10 ⁻²		-3,97070·10 ⁻¹		-	-	-	-
1	2,99621·10 ⁻²		4,00302·10 ⁻¹		-1,71587·10 ⁻¹	6,42857·10 ⁻¹	7,01309·10 ⁻²	
2	1,56146·10 ⁻²		1,06000		2,39219	-4,11717	1,18520·10 ⁻²	
3	-4,22464·10 ⁻³		-		-	-6,17937	1,69937·10 ⁻³	
4	-		-		-	3,08976·10 ⁻³	-1,02000	
5	-		-		-	8,22994·10 ⁻²	-	
6	-		-		-	1,00932·10 ¹	-	

$T^* = 647,3 \text{ K}$ $\rho^* = 317,7 \text{ kg/m}^3$

Die Werte der numerischen Konstanten sind in Tabelle 4 wiedergegeben.

Die Gleichung für die wissenschaftliche Anwendung wurde speziell an die Bedingungen des kritischen Bereiches und an die Wiedergabe des Hintergrundes in einer der Viskositätsgleichung ähnlichen Form angepaßt. Als Nachteil ergibt sich, daß durch die physikalisch begründete Verwendung der isothermen Kompressibilität χ_T und der dynamischen Viskosität η im Ansatz für den kritischen Term $\Delta\lambda$ zur Berechnung die Zustandsgleichung IFC 1968 for General and Scientific Use sowie die Gleichung für die dynamische Viskosität notwendig ist.

Die Gleichung hat die Form:

$$\lambda = \lambda_0 \exp \left\{ \frac{\rho}{\rho^*} \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^5 b_{ij} \left(\frac{T^*}{T} - 1 \right)^i \left(\frac{\rho}{\rho^*} - 1 \right)^j \right\} + \Delta\lambda \quad (10)$$

mit

$$\lambda_0 = \left(\frac{T}{T^*} \right)^{1/2} \left[\sum_{k=0}^3 a_k \left(\frac{T^*}{T} \right)^k \right]^{-1} \quad (11)$$

$$\Delta\lambda = \frac{C}{\eta} \left(\frac{T\rho^*}{T^*\rho} \right)^2 \left[\frac{\partial(p/\rho^*)}{\partial(T/T^*)} \right]_\rho \chi_T^\omega \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^{1/2} \times \exp \left\{ -A \left(\frac{T}{T^*} - 1 \right)^2 - B \left(\frac{\rho}{\rho^*} - 1 \right)^4 \right\} \quad (12)$$

wobei

$$\chi_T = \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right) \left\{ \frac{\partial(\rho/\rho^*)}{\partial(P/P^*)} \right\}_T$$

die reduzierte isothermische Kompressibilität bedeutet.

Die numerischen Werte der Konstanten sind:

$$\begin{aligned} T^* &= 647,27 \text{ K} & C &= 3,7711 \cdot 10^{-8} \text{ W Pa s/K m} \\ \rho^* &= 317,763 \text{ kg/m}^3 & \omega &= 0,4678 \\ p^* &= 221,15 \text{ bar} & A &= 18,66 \\ & & B &= 1,00 \end{aligned}$$

Die Koeffizienten a_k :

$$\begin{aligned} a_0 &= +2,02223 \\ a_1 &= +14,11166 \\ a_2 &= +5,25597 \\ a_3 &= -2,01870 \end{aligned}$$

Die Koeffizienten b_{ij} enthält Tabelle 5.

Tabelle 5: Koeffizienten b_{ij}

i \ j	0	1	2	3	4
0	+1,329 304 6	+1,701 836 3	+5,224 615 8	+8,712 767 5	-1,852 599 9
1	-0,404 524 37	-2,215 684 5	-10,124 111	-9,500 061 1	+0,934 046 90
2	+0,244 094 90	+1,651 105 7	+4,987 468 7	+4,378 660 6	0,0
3	+0,018 660 751	-0,767 360 02	-0,272 976 94	-0,917 837 82	0,0
4	-0,129 610 68	+0,372 833 44	-0,430 833 93	0,0	0,0
5	+0,044 809 953	-0,112 031 60	+0,133 338 49	0,0	0,0

$$\bar{\lambda} = b_0 + b_1 \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right) + b_2 \exp \left[B_1 \left(\frac{\rho}{\rho^*} + B_2 \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \left[d_1 \left(\frac{T^*}{T} \right)^{10} + d_2 \right] \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^{1,8} \exp \left\{ C_1 \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^{2,8} \right] \right\} + \\ &+ d_3 S \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^Q \exp \left\{ \frac{Q}{R} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^R \right] \right\} + \\ &+ d_4 \exp \left[C_2 \left(\frac{T}{T^*} \right)^{1,5} + C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho} \right)^5 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

und

$$Q = 2,0 + C_5 (\Delta T^*)^{-0,6} \quad (5)$$

$$R = Q \left(\frac{T}{T^*} \right) + 1,0 \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} (\Delta T^*)^{-1,0} & \text{für } T/T^* \geq 1 \\ C_6 (\Delta T^*)^{-0,6} & \text{für } T/T^* < 1 \end{cases} \quad (7)$$

und

$$\Delta T^* = \left| \frac{T}{T^*} - 1,0 \right| + C_4 \quad (9)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Wasserdampf

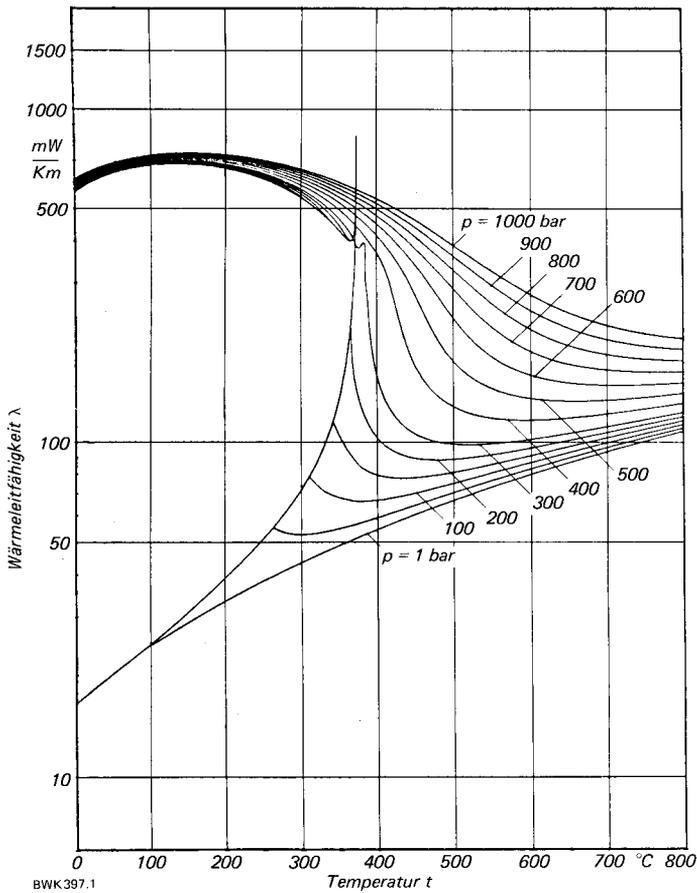


Bild 1: λ , t -Diagramm

Die in Bild 1 und 2 dargestellten Diagramme der Wärmeleitfähigkeit wurden mit Hilfe der Gleichung für den industriellen Bereich gezeichnet. Beide Diagramme geben den auch durch die IFC – 1967 festgelegten Bereich bis 800 °C und bis 1000 bar wieder.

Schrifttum

- [1] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampftafeln. 6. Auflage, Springer-Verlag, 1968
- [2] Schmidt, E.: Properties of Water and Steam in SI-Units. Springer-Verlag, 1969
- [3] Scheffler, K.; Rosner, N.; Straub, J.; Grigull, U.: Der internationale Standard der dynamischen Viskosität von Wasser und Wasserdampf. BWK 30 (1978) Nr. 2, S. 73/78
- [4] Scheffler, K.; Straub, J.; Grigull, U.: The Dynamic Viscosity of Water Substance. Proceedings of the 7th Symposium on Thermophysical Properties, ASME 1977, S. 684/694
- [5] Reimann, M.; Rosner, N.; Scheffler, K.; Meyer-Pitroff, R.: Thermal Conductivity of Water Substance. A Comparison of New Equations and Measurements. Institut A für Thermodynamik, TU München (1973)
- [6] Scheffler, K.; Rosner, N.; Reimann, M.: Available Input of the Thermal Conductivity of Water Substance. Institut A für Thermodynamik, TU München (1974)
- [7] Alexandrov, A.A.: Draft of the Skeleton Table for the Thermal Conductivity of Water and Steam. Moscow Power Institute (1974)

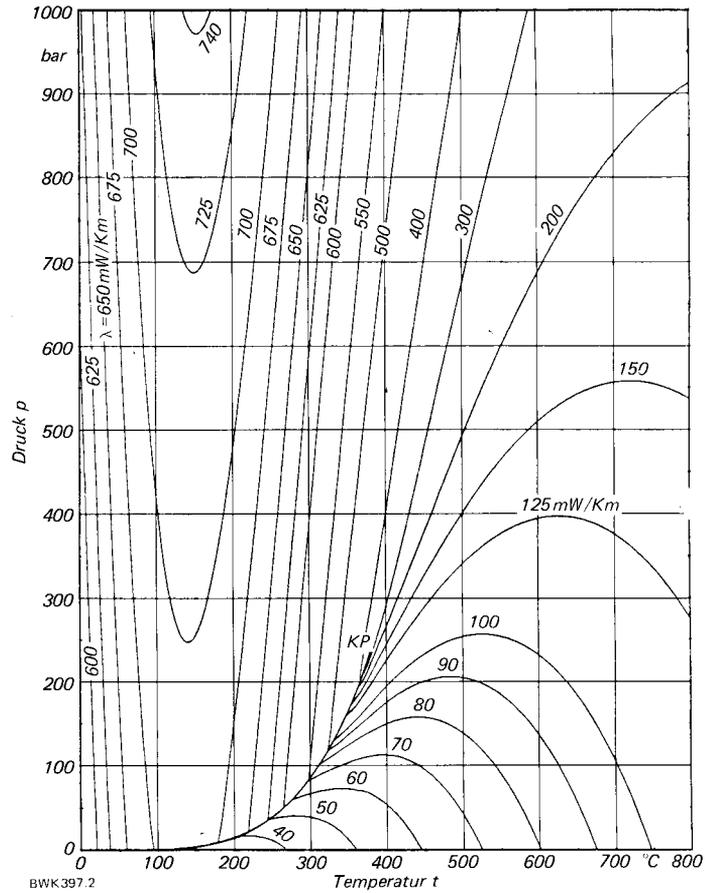


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit λ im p , t -Diagramm

- [8] Grigull, U.; Reimann, M.; Scheffler, K.: Data Survey of the Viscosity of Pure Water. Invited Paper, Proc. 8th ICPS, France, 1 (1974), 113
- [9] Scheffler, K.; Rosner, N.; Grigull, U.: Draft of the Skeleton Table Proposal for Thermal Conductivity of Water Substance. Lehrstuhl A f. Thermodynamik, T.U. München (1975)
- [10] "The IFC – 1967 Formulation for Industrial Use". Issued by the International Formulation Committee of the 6th Conference on the Properties of Steam (1967), siehe auch [1, 2]
- [11] "The IFC – 1968 Formulation for General and Scientific Use". New York, A.S.M.E. (1968)
- [12] Keenan, J.H.; Keyes, F.G.; Hill, P.G.; Moore, J.G.: Steam Tables. New York: John Wiley & Sons, Inc. (1969)
- [13] Pollak, R.: Zustandsgleichung für Wasser und Wasserdampf. BWK 27 (1975) Nr. 5, S. 210/215. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1974
- [14] Minamiyama, T.; Yata, J.: A Formulation of Thermal Conductivity. Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, Japan, siehe auch [17]
- [15] Sengers, J.V.; Basu, R.S.: A New Equation for the Thermal Conductivity of Water and Steam. Washington: Nat. Bur. Standards, siehe auch [17]
- [16] Watson, J.T.R.: (1) Zero Density Equation for Steam; (2) Proposed Representative Equation for the Thermal Conductivity of Water-Substance outside the Critical Region. Properties of Fluids Division, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, Scotland (1977), siehe auch [17]
- [17] "Release on Thermal Conductivity of Water Substance". Issued by the International Association for the Properties of Steam. Sekretär: Dr. H.J. White, Washington: Nat. Bur. Stand. (1977)

BWK 397