

dingungen erfaßt werden kann. Die Ergebnisse enthält *Tabelle 2*.

Mit einer Kühlzonenbreite von 5,5 K und einer Warmwassertemperatur von 31,5 °C wurde von einem Betriebszustand des Kühlturms einer Klimaanlage ausgegangen. Setzt man voraus, daß der Kühlturm für einen Betriebszustand gemäß Nr. 1 ausgelegt worden ist und von $t_{w1} = 31,5$ °C das Wasser um 5,5 K abkühlen soll, dann kann diese Kühlleistung auch noch im Naß/Trocken-Betrieb bei kritischen Außenlufttemperaturen erbracht werden. Ist also der Sommerbetrieb das Kriterium für eine Kühl-

turmauslegung, dann ergibt sich in der kühleren Jahreszeit nach dem Umschalten auf nebbefreien Betrieb praktisch keine Leistungseinbuße für den Prozeß.

Zusammenfassung

Es wird eine neue Füllkörpereinheit für Kreuzstromkühltürme beschrieben, die im reinen Naßbetrieb arbeiten können. Durch Umschalten auf einen kombinierten Naß/Trocken-Betrieb kann bei niedrigen Außentemperaturen das Auftreten einer Nebelfahne vermieden werden. Nach dem Umschalten wird bei dem

herkömmlichen Kreuzstrombetrieb nur jeder zweite Kanal mit Wasser beaufschlagt, dagegen bleibt die Luftverteilung praktisch erhalten. Nach dem Austritt aus dem Füllkörper werden die trockenen und übersättigten Luftströme gemischt, so daß der Gesamtzustand der Luft im ungesättigten Bereich liegt und auch nach der Mischung mit der Außenluft noch kein Nebel auftritt.

Schrifttum

- [1] *Bošnjaković, Fr.*: Technische Thermodynamik, II Teil. Dresden und Leipzig: Verlag Theodor Steinkopff 1965. BWK 313

Der neue internationale Standard der dynamischen Viskosität von Wasser und Wasserdampf

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

Für die dynamische Viskosität von Wasser ist nach längerer Vorbereitung eine Rahmentafel neu erarbeitet worden. Neben einer Gleichung der Form $\eta = \eta(\rho, t)$ bildet sie die Grundlage der von der „International Association for the Properties of Steam (IAPS)“ verteilten Darstellung dieser Transportgröße. Die Tafel wird, durch Diagramme ergänzt und gebietsweise erweitert, hier mitgeteilt.

Einleitung

Die 7. Auflage der VDI-Wasserdampftafel von 1968 [1] sowie die internationale Ausgabe von 1969 [2], beide herausgegeben von E. Schmidt, enthalten auch verbindliche Rahmentafeln und Gleichungen der Transportgrößen Wärmeleitfähigkeit λ und dynamische Viskosität η von Wasser. Die Rahmentafel für die dynamische Viskosität wurde von einer von der 6. Internationalen Wasserdampfkonzferenz, New York 1963, autorisierten Arbeitsgruppe erstellt und 1964 zur Veröffentlichung freigegeben [3]. Damit wurden erstmals seit Beginn der Internationalen Wasserdampfkonzferenzen (kurz ICPS) 1929 in London verbindliche Rahmentafeln und Interpolationsgleichungen für die Transportgrößen geschaffen. Die Darstellung der dynamischen Viskosität basierte auf den besten damals verfügbaren Daten, insbesondere auf den Messungen von Sigwart, Mayinger, Moszynski, Timrot und Whitelaw, siehe [4]. Dabei mußten im flüssigen Bereich längs der Isothermen 350 °C die Werte ganz ausgespart werden, da hierfür experimentelle Daten fehlten und eine Interpolation zu gewagt erschien. Der von der Rahmentafel abgesteckte Bereich von 1 bis 800 bar und von 0 bis 700 °C wurde durch vier bereichsweise gültige Interpolationsgleichungen wiedergegeben, wobei für den Bereich zwischen 300 und 375 °C nur graphisch interpolierte Werte vorlagen.

Nach 1964 wurden eine Fülle neuer Messungen bekannt, so daß das „Technische Komitee für Transportgrößen“ auf der 7. ICPS 1968 in Tokio [5] beschloß, durch zusätzliche

experimentelle und theoretische Arbeiten die Lücken in der bestehenden Rahmentafel zu schließen, die Toleranzen zu überprüfen, wenn möglich, zu verringern und den Bereich an den der thermodynamischen Zustandsgrößen bis 1000 bar und 800 °C anzupassen. Zusätzlich sollten die Werte entlang der Sättigungslinie mit aufgenommen werden und die für Eichzwecke wichtige Isobare 1 bar von 0 bis 100 °C festgelegt werden.

Der Weg zum neuen Standard

Mit dieser umfangreichen Aufgabe wurde die Arbeitsgruppe II der „International Association for the Properties of Steam“ (kurz IAPS) beauftragt. Ein Vergleich der neueren Messungen und Gleichungen mit der Rahmentafel von 1964 [7] zeigte systematische Abweichungen und Toleranzüberschreitungen und machte daher eine gründliche Überarbeitung notwendig. Vorbereitend dazu sammelten und analysierten Arbeitsgruppen aus Japan, der Bundesrepublik Deutschland und der UdSSR alle verfügbaren Daten und tauschten ihre Erfahrung aus (zum Beispiel [8, 9]). Es stellte sich heraus, daß nach 1964 mehr experimentelles Material veröffentlicht wurde, als vom Beginn der Viskosimetrie mit Poiseuille 1840 [10] bis zu diesem Zeitpunkt. Bild 1 und 2 zeigen diese Situation recht anschaulich:

Auf *Bild 1* sind alle Messungen für die dynamische Zähigkeit von Wasser und Wasserdampf zwischen 1840 und 1964

Formelzeichen

a_k, b_{ij}	Gleichungskoeffizienten	
p	Druck in bar	
T	Temperatur in K	} nach IPTS 1968
t	Temperatur in °C	
v	spezifisches Volumen in m ³ /kg	
η	dynamische Viskosität in kg/sm	
λ	Wärmeleitfähigkeit in W/Km	
ρ	Dichte in kg/m ³	

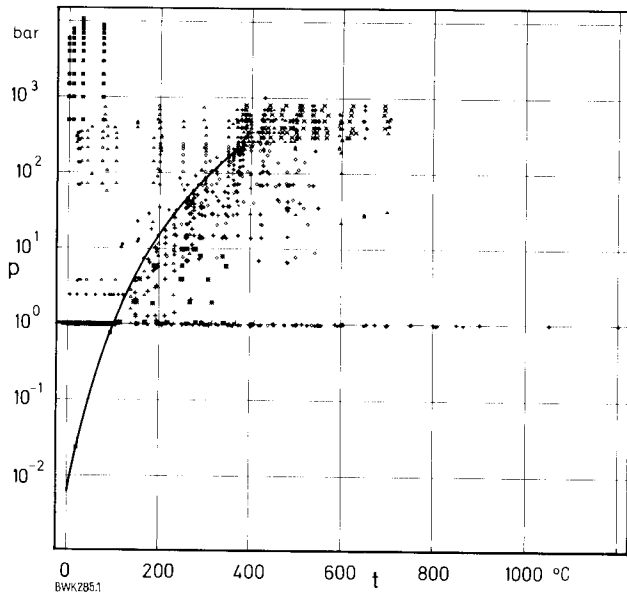


Bild 1: Messungen der dynamischen Viskosität von 1840 bis 1964

dargestellt, Bild 2 umfaßt nur die Messungen der 10 Jahre bis 1974 in der p, t -Ebene. Diese starke Zunahme von Messungen ist sicher auf die verbesserte Meßtechnik, auf den gewachsenen Bedarf genauer Stoffwerte sowie die Anregung durch die IAPS zurückzuführen.

Die Auswahl aus der jetzt vorliegenden großen Anzahl von Daten und eine möglichst objektive Beurteilung und Wichtung als Vorbereitung einer neuen Rahmentafel wurde durch die Zusammenarbeit der Experten aus verschiedenen Nationen in der Arbeitsgruppe II ermöglicht. Zwei Methoden zur Aufstellung eines Standards für die Repräsentation der dynamischen Viskosität boten sich an. Der Weg der russischen und japanischen Delegation, durch Gleichungen alle ausgewählten Messungen zu approximieren und den Ausdruck der Gitterwerte entlang Isobaren und Isothermen als neue Rahmentafel für verbindlich zu erklären, stand im Gegensatz zu unserer Auffassung, die Gitterwerte direkt aus experimentellen Daten zu ermitteln. In diesem Sinn kann und soll gemäß seiner Definition ein Rahmentafelwert nur der Bestwert aller gewichteten und in dessen Umgebung liegenden Messungen sein.

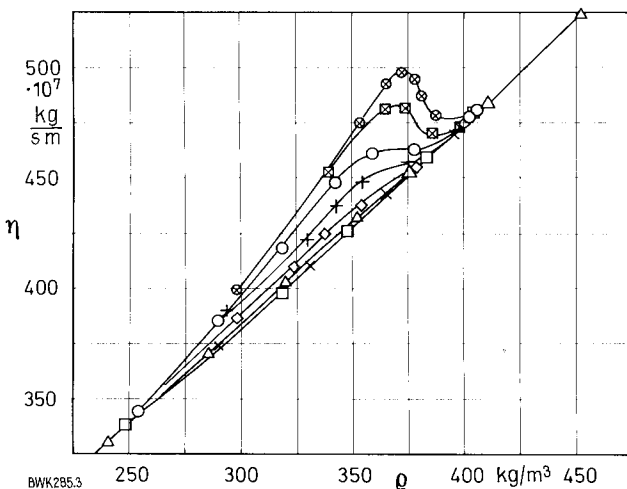


Bild 3: Experimentelle Bestimmung der Viskosität in der Nähe des kritischen Punktes von Rivkin et al. (1974)

- ⊗ 374,2 °C + 375,5 °C □ 380,0 °C
- ⊠ 374,5 °C ◇ 376,0 °C × 390,0 °C
- 375,0 °C △ 377,0 °C

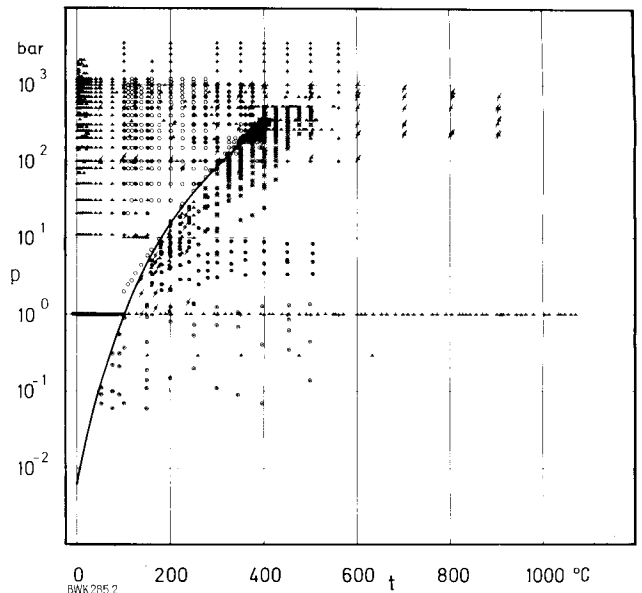


Bild 2: Messungen der dynamischen Viskosität von 1964 bis 1974

Ausführlich wurden die Gründe für diese Darstellung von physikalischen Größen in Form einer Rahmentafel in einem Bericht der 8. ICPS [10] dargelegt. Laufend kann so die Rahmentafel neuen experimentellen und theoretischen Ergebnissen angepaßt werden, ohne daß eine grundlegende Revision notwendig wird. Diese Überarbeitung kann in folgenden Schritten erfolgen:

1. Auswahl der Messungen nach sorgfältiger Durchsicht und Diskussion.
2. Bewertung der Meßreihen durch Wertungsfaktoren.
3. Zusammenfassung der Messungen in der Rahmentafel, die als Wiedergabe der Bestwerte des derzeitigen Standes experimenteller Kenntnis zu verstehen ist.
4. Festlegung von Toleranzen, die so beschaffen sein sollten, daß der physikalische Wert höchstwahrscheinlich innerhalb des Toleranzbandes liegt.
5. Die für den Benutzer wichtigen Gleichungen zur Beschreibung der physikalischen Größe sollen die Rahmentafel in ihren Toleranzen erfüllen und können ebenfalls den Rang eines internationalen Standards erhalten. Jedoch können sie zum jetzigen Zeitpunkt die Rahmentafel nicht ersetzen, da die theoretischen Grundlagen nicht ausreichen.

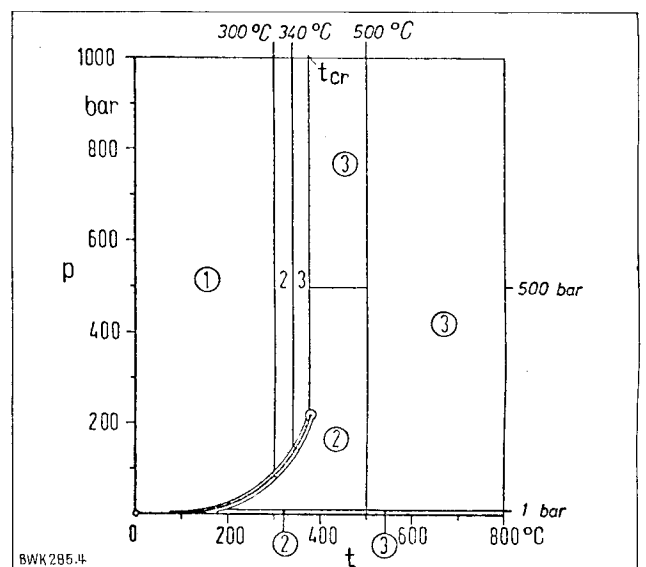


Bild 4: Prozentuale Toleranzen der Rahmentafel

Die neue Rahmentafel

Die unter Punkt 3 genannte Verarbeitung von ausgewählten und gewichteten Daten wurde bei der Aufstellung des Rahmentafelvorschlags der bundesdeutschen Delegation des „Speziellen Komitees“ ausgeführt. Dabei wurden diskrete Meßpunkte in einem vorgegebenen Bereich um einen Gitterpunkt mit Hilfe einer ausgesuchten Gleichung unter Berücksichtigung der Wertung auf diesen Rahmentafelpunkt umgerechnet. Dieser in [11] genauer beschriebene mathematische Algorithmus vermeidet weitestgehend systematische Abweichungen und gibt auch spezielle Bereiche wie zum Beispiel die von russischen Autoren gemessene Anomalie im kritischen Gebiet, Bild 3, richtig wieder. In Tabelle 1 wird die nun gültige Rahmentafel der dynamischen Viskosität im Druckbereich von 1 bis 1000 bar und Temperaturbereich von 0 bis 800°C mit dem jeweiligen absoluten Toleranzbereich angegeben. Ergänzend zeigt Bild 4 die prozentualen Toleranzen in den einzelnen Bereichen. Diese Tafel ist Teil des von der IAPS verteilten Berichts über die Darstellung der dynamischen Viskosität von Wasser [12] und ist somit als neuer international vereinbarter Standard für Garantierechnungen

bindend. Weiterhin wird eine international vereinbarte Interpolationsgleichung vorgeschlagen, die die Rahmentafel in ihren Toleranzen erfüllt. Diese Gleichung in der Form $\eta = \eta(v, T)$ wurde von Alexandrov u.a. [13] entwickelt, wobei v mit Hilfe der IFC-Formulation 1968 zu berechnen ist. Ein Vergleich mit aus der IFC-Formulation 1967 berechneten Werten des spezifischen Volumens v zeigt jedoch [15], daß die Abweichung der daraus berechneten Viskositätswerte im Toleranzband der Rahmentafel liegen.

Die Interpolationsgleichung für η für den ganzen Zustandsbereich von 1 bis 10^3 bar und von 0 bis 800°C lautet:

$$\eta = \eta_0 \exp \left[v^* / v \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^4 b_{ij} (T^*/T - 1)^i (v^*/v - 1)^j \right] \quad (1)$$

$$\eta_0 = (T/T^*)^{1/2} \left[\sum_{k=0}^3 a_k (T^*/T)^k \right]^{-1} \cdot 10^{-6} \text{ kg/s m} \quad (2)$$

T^* und v^* sind Konstanten, die angenähert die kritischen Werte wiedergeben:

$$T^* = 647,27 \text{ K}; \quad v^* = 3,147 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

Tabelle 1: Rahmentafel der dynamischen Viskosität von Wasser in 10^{-6} kg/s m. 2. Zeile: absolute Toleranz

P/T	0	25	50	75	100	150	200	250	300	350	375
0.1	1791 18	891.0 8.9	547.1 5.5	377.3 3.8	12.42 0.25	14.29 0.29	16.26 0.33	18.30 0.37	20.36 0.41	22.43 0.45	23.45 0.47
0.5	1790 18	891.2 8.9	546.7 5.5	378.0 3.8	281.7 2.8	182.3 1.8	16.05 0.32	18.16 0.36	20.25 0.41	22.32 0.45	23.43 0.47
1.0	1789 18	891.1 8.9	546.8 5.5	378.2 3.8	281.9 2.8	182.4 1.8	15.92 0.32	18.09 0.36	20.21 0.40	22.29 0.45	23.40 0.47
2.5	1786 18	890.8 8.9	547.1 5.5	378.5 3.8	282.3 2.8	182.8 1.8	154.6 1.4	17.85 0.36	20.07 0.40	22.22 0.44	23.37 0.47
5.0	1780 18	890.3 8.9	547.7 5.5	379.2 3.8	283.1 2.8	183.4 1.8	135.2 1.4	105.5 1.1	19.88 0.40	22.15 0.44	23.33 0.47
7.5	1774 18	889.8 8.9	548.3 5.5	379.8 3.8	283.8 2.8	184.1 1.8	135.9 1.4	107.2 1.1	19.75 0.40	22.12 0.44	23.34 0.47
10.0	1768 18	889.4 8.9	548.7 5.5	380.4 3.8	284.7 2.9	184.7 1.9	136.4 1.4	107.8 1.1	87.1 1.7	22.16 0.44	23.39 0.47
12.5	1762 18	889.1 8.9	549.1 5.5	381.0 3.8	285.3 2.9	185.3 1.9	137.0 1.4	108.5 1.1	88.0 1.8	22.35 0.45	23.57 0.47
15.0	1756 18	888.7 8.9	549.5 5.5	381.6 3.8	286.0 2.9	186.0 1.9	137.6 1.4	109.1 1.1	89.0 1.8	22.84 0.45	23.88 0.48
17.5	1750 18	888.5 8.9	550.0 5.5	382.3 3.8	286.7 2.9	186.6 1.9	138.2 1.4	109.8 1.1	89.9 1.8	67.3 2.0	24.49 0.49
20.0	1744 17	888.2 8.9	550.4 5.5	382.9 3.8	287.4 2.9	187.3 1.9	138.8 1.4	110.4 1.1	90.8 1.8	69.5 2.1	25.85 0.52
22.5	1738 17	887.9 8.9	550.9 5.5	383.5 3.8	288.0 2.9	187.9 1.9	139.4 1.4	111.1 1.1	91.6 1.8	71.4 2.1	48.2 3.9
25.0	1733 17	887.6 8.9	551.3 5.5	384.2 3.8	288.7 2.9	188.5 1.9	140.0 1.4	111.7 1.1	92.4 1.9	73.0 2.2	58.8 1.2
27.5	1728 17	887.4 8.9	551.8 5.5	384.8 3.9	289.4 2.9	189.1 1.9	140.6 1.4	112.3 1.1	93.1 1.9	74.4 2.2	62.4 1.2
30.0	1723 17	887.2 8.9	552.3 5.5	385.5 3.9	290.0 2.9	189.8 1.9	141.2 1.4	112.9 1.1	93.9 1.9	75.7 2.3	64.9 1.3
35.0	1713 17	886.8 8.9	553.3 5.5	386.7 3.9	291.4 2.9	191.0 1.9	142.3 1.4	114.1 1.1	95.3 1.9	78.0 2.3	68.6 1.4
40.0	1705 17	886.6 8.9	554.3 5.5	388.0 3.9	292.7 2.9	192.2 1.9	143.5 1.4	115.3 1.2	96.5 1.9	79.9 2.4	72.3 1.4
45.0	1697 17	886.5 8.9	555.3 5.6	389.3 3.9	294.0 2.9	193.4 1.9	144.6 1.5	116.4 1.2	97.8 2.0	81.7 2.5	73.7 1.5
50.0	1690 17	886.4 8.9	556.3 5.6	390.6 3.9	295.4 3.0	194.6 2.0	145.8 1.5	117.6 1.2	99.0 2.0	83.4 2.5	75.9 2.3
55.0	1684 17	886.5 8.9	557.4 5.6	392.0 3.9	296.7 3.0	195.8 2.0	146.9 1.5	118.7 1.2	100.2 2.0	84.9 2.6	77.8 2.3
60.0	1679 17	886.7 8.9	558.5 5.6	393.3 3.9	298.0 3.0	197.0 2.0	148.0 1.5	119.7 1.2	101.3 2.0	86.3 2.6	79.5 2.4
65.0	1674 17	886.9 8.9	559.7 5.6	394.6 4.0	299.4 3.0	198.2 2.0	149.0 1.5	120.8 1.2	102.5 2.1	87.7 2.6	81.0 2.4
70.0	1670 17	887.3 8.9	560.9 5.6	395.9 4.0	300.7 3.0	199.4 2.0	150.1 1.5	121.9 1.2	103.6 2.1	89.0 2.7	82.5 2.5
75.0	1666 17	887.7 8.9	562.0 5.6	397.3 4.0	302.0 3.0	200.6 2.0	151.2 1.5	122.9 1.2	104.6 2.1	90.3 2.7	83.9 2.5
80.0	1662 17	888.3 8.9	563.3 5.6	398.6 4.0	303.4 3.0	201.8 2.0	152.3 1.5	123.9 1.2	105.6 2.1	91.4 2.7	85.2 2.6
85.0	1659 17	888.8 8.9	564.5 5.7	400.0 4.0	304.6 3.1	203.0 2.0	153.3 1.5	124.9 1.3	106.6 2.1	92.6 2.8	86.4 2.6
90.0	1656 17	889.5 8.9	565.8 5.7	401.4 4.0	305.9 3.1	204.2 2.0	154.3 1.5	125.9 1.3	107.6 2.2	93.7 2.8	87.5 2.6
95.0	1653 17	890.3 8.9	567.1 5.7	402.8 4.0	307.3 3.1	205.4 2.1	155.4 1.6	126.9 1.3	108.6 2.2	94.7 2.8	88.7 2.7
100.0	1651 17	891.1 8.9	568.4 5.7	404.2 4.0	308.6 3.1	206.5 2.1	156.4 1.6	127.9 1.3	109.6 2.2	95.8 2.9	89.8 2.7

Tabelle 1: (Fortsetzung)

P/T	400	425	450	475	500	550	600	650	700	750	800
0.1	24.47	25.49	26.50	27.51	28.52	30.53	32.55	34.6	36.6	38.6	40.5
	0.49	0.51	0.53	0.55	0.86	0.92	0.98	1.0	1.1	1.2	1.2
0.5	24.44	25.49	26.53	27.57	28.64	30.67	32.77	34.7	36.7	38.5	40.3
	0.49	0.51	0.53	0.55	0.86	0.92	0.98	1.0	1.1	1.2	1.2
1.0	24.43	25.49	26.53	27.58	28.65	30.68	32.79	34.8	36.8	38.5	40.4
	0.49	0.51	0.53	0.55	0.86	0.92	0.98	1.0	1.1	1.2	1.2
2.5	24.41	25.49	26.54	27.59	28.66	30.72	32.84	34.8	36.8	38.6	40.4
	0.49	0.51	0.53	0.55	0.86	0.92	0.99	1.0	1.1	1.2	1.2
5.0	24.42	25.52	26.60	27.66	28.73	30.82	32.77	34.9	36.9	38.7	40.6
	0.49	0.51	0.53	0.55	0.86	0.92	0.98	1.1	1.1	1.2	1.2
7.5	24.46	25.58	26.68	27.76	28.81	30.94	32.87	34.9	37.0	38.9	40.7
	0.49	0.51	0.53	0.56	0.86	0.93	0.99	1.1	1.1	1.2	1.2
10.0	24.52	25.65	26.75	27.82	28.95	31.08	33.02	35.1	37.2	39.0	40.9
	0.49	0.51	0.53	0.56	0.87	0.93	0.99	1.1	1.1	1.2	1.2
12.5	24.69	25.81	26.91	27.98	29.09	31.19	33.2	35.2	37.4	39.2	41.1
	0.49	0.52	0.54	0.56	0.87	0.94	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
15.0	24.98	26.06	27.13	28.18	29.30	31.44	33.4	35.5	37.6	39.4	41.2
	0.50	0.52	0.54	0.56	0.88	0.94	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
17.5	25.37	26.38	27.42	28.42	29.49	31.70	33.7	35.7	37.8	39.6	41.4
	0.51	0.53	0.55	0.57	0.88	0.95	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
20.0	26.03	26.83	27.80	28.75	29.81	31.98	33.9	35.9	38.0	39.8	41.6
	0.52	0.54	0.56	0.58	0.89	0.96	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3
22.5	27.11	27.50	28.31	29.17	30.17	32.38	34.2	36.2	38.2	39.8	41.9
	0.54	0.55	0.57	0.58	0.91	0.97	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3
25.0	29.10	28.43	28.99	29.70	30.56	32.73	34.6	36.5	38.5	40.2	41.9
	0.58	0.57	0.58	0.59	0.92	0.98	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3
27.5	33.88	29.81	29.84	30.33	31.08	33.11	34.9	36.8	38.7	40.4	42.2
	0.68	0.60	0.60	0.61	0.93	0.99	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
30.0	43.97	31.84	30.97	31.06	31.68	33.6	35.3	37.2	39.0	40.7	42.5
	0.89	0.64	0.62	0.62	0.95	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
35.0	56.4	39.47	34.19	33.17	33.10	34.6	36.1	37.9	39.8	41.3	43.0
	1.1	0.79	0.68	0.66	0.99	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
40.0	62.1	49.26	39.16	36.06	35.2	35.7	37.5	38.8	40.4	42.0	43.7
	1.2	0.99	0.78	0.72	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3
45.0	65.8	55.6	44.87	39.90	37.6	37.4	38.6	40.0	41.2	43.1	44.4
	1.3	1.1	0.90	0.80	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3
50.0	68.2	60.1	50.5	44.0	40.5	39.1	40.0	40.6	42.2	43.7	45.3
	2.0	1.8	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4
55.0	70.9	63.6	55.3	48.4	43.9	41.0	41.4	41.8	42.5	44.6	45.9
	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
60.0	73.1	66.1	59.2	52.3	47.6	43.1	41.7	42.9	43.2	44.8	46.6
	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4
65.0	75.2	68.1	62.3	55.5	50.8	45.1	43.2	43.9	44.2	45.4	46.8
	2.3	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4
70.0	76.9	70.5	64.9	58.8	53.7	47.5	44.8	44.3	44.4	46.2	47.4
	2.3	2.1	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4
75.0	78.5	72.2	66.9	61.3	56.2	49.7	45.7	45.5	45.6	46.8	48.1
	2.4	2.2	2.0	1.8	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
80.0	79.9	74.0	68.3	63.6	58.7	52.1	47.4	47.0	46.6	47.3	48.6
	2.4	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5
85.0	81.4	75.8	70.2	65.5	60.8	54.0	49.9	47.6	47.6	48.1	49.3
	2.4	2.3	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5
90.0	82.7	77.2	72.3	67.3	62.8	55.8	51.4	48.9	49.1	48.9	49.7
	2.5	2.3	2.2	2.0	1.9	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
95.0	83.6	78.6	73.8	69.1	64.6	57.7	53.6	50.9	49.5	49.8	50.3
	2.5	2.4	2.2	2.1	1.9	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5
100.0	85.0	79.8	74.6	69.8	66.1	59.3	55.1	52.1	50.5	51.1	51.0
	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5

In Tabelle 2 und 3 sind die numerischen Werte der Konstanten a_k und b_{ij} angegeben.

Tabelle 2: a_k aus Gleichung (2)

k	0	1	2	3
a_k	0,0181583	0,0177624	0,0105287	-0,0036744

Tabelle 3: b_{ij} aus Gleichung (1)

$i \rightarrow$	1	2	3	4	5	
b_{ij}						
0	0,501938	0,162888	-0,130356	0,907919	-0,551119	0,146543
1	0,235622	0,789393	0,673665	1,207552	0,0670665	-0,084337
2	-0,274637	-0,743539	-0,959456	-0,687343	-0,497089	0,195286
3	0,145831	0,263129	0,347247	0,213486	0,100754	-0,032932
4	-0,0270448	-0,0253093	-0,0267758	-0,0822904	0,0602253	-0,0202595

Die Gleichung kann über den Bereich der Rahmentafel hinaus bis 10000 bar für Temperaturen unter 100 °C und bis 3500 bar für Temperaturen zwischen 100 und 560 °C angewandt werden. Sie ist jedoch nicht die einzig mögliche Interpolationsgleichung. Gleichwertig ist die von Nagashima in [14] angegebene Gleichung. Ein η, t -Diagramm mit p als Parameter sowie ein p, t -Diagramm mit Linien gleicher Viskosität zeigen Bild 5 und 6, die mit Hilfe der Gl. (1) gezeichnet wurden. Dabei fällt auf, daß die in Bild 3 dargestellte Anomalie am kritischen Punkt von der Gleichung nicht wiedergegeben wird. Da die Anomalie der Viskosität nur schwach ist, kann sie bei technischen Berechnungen vernachlässigt werden.

Den Anschluß der Rahmentafel an den unterkühlten Bereich gibt Tabelle 4 wieder. Sie enthält die für Eichzwecke wichtige 1 bar Isobare von -25 °C bis 100 °C. Sie ist ebenso

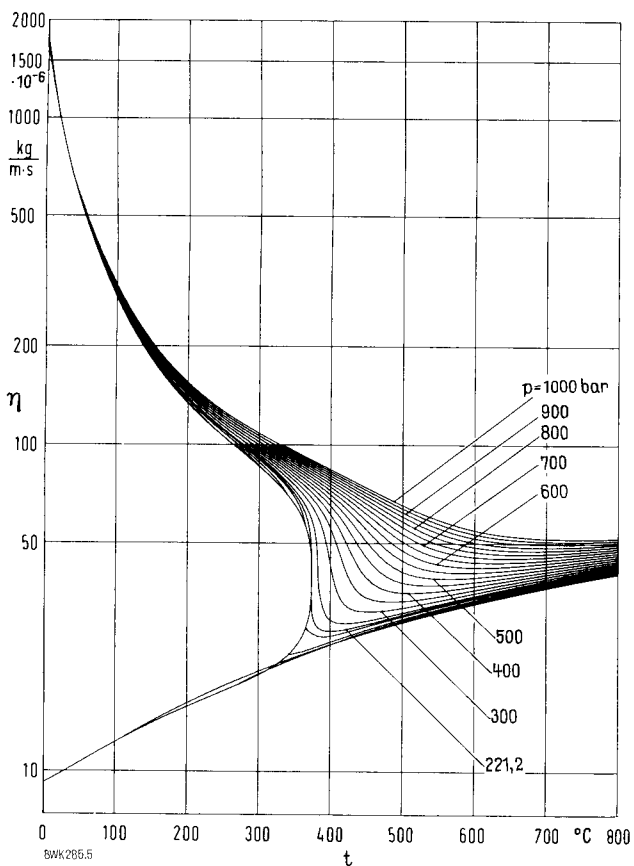


Bild 5: p im η, t -Diagramm

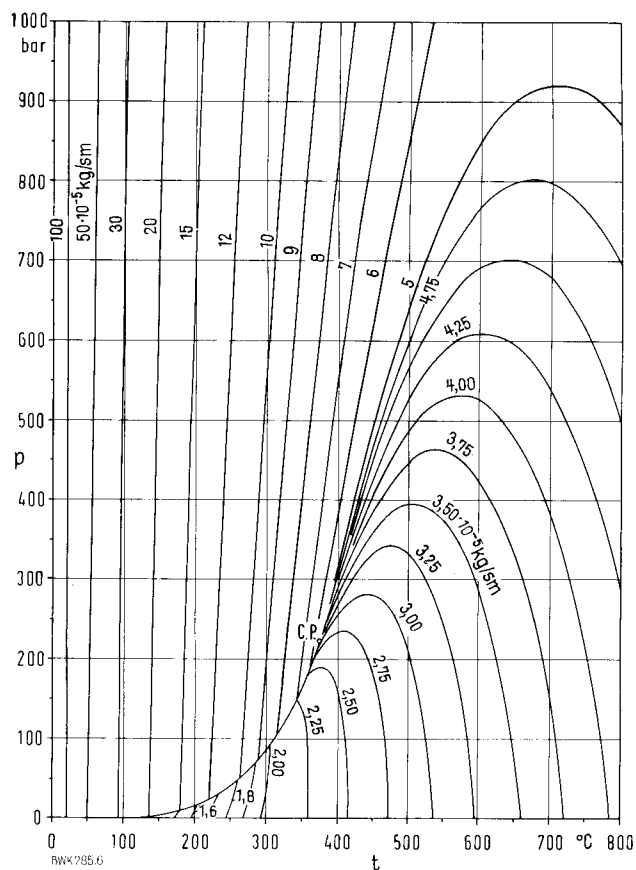


Bild 6: η im p, t -Diagramm

Tabelle 4: Sättigungslinie

t °C	p bar	η 10^{-6} Pa·s	Tol. %	η 10^{-6} Pa·s	Tol. %
0	0,00611	1792,60		8,84	
0,01	0,00611	1791,98		8,84	
10,0	0,01227	1305,46		9,17	
20,0	0,02337	1002,60		9,52	
30,0	0,04241	798,44		9,86	
40,0	0,07375	653,93		10,18	
50,0	0,12335	547,11		10,51	
60,0	0,19920	466,01		10,88	
70,0	0,31162	403,33	1	11,28	4
80,0	0,47360	354,16		11,65	
90,0	0,70109	314,76		12,02	
100,0	1,01325	281,87		12,37	
110,0	1,4327	255,52		12,71	
120,0	1,9854	232,95		13,04	
150,0	4,7600	182,69		14,02	2
200,0	15,549	134,50		15,74	
250,0	39,776	106,50		17,57	
300,0	85,927	85,64		19,53	
350,0	165,35	65,16		23,73	
360,0	186,75	59,72	3	25,68	3
370,0	210,54	52,16		29,72	
372,0	215,62	49,66		31,99	
374,0	220,81	43,57		38,35	
374,15	221,2	40,60	8	40,60	8

Tabelle 5: 1-bar-Linie

t °C	v cm^3/g	η 10^{-6} Pa·s	Tol. %
-25,0	1,0080	5842	
-20,0	1,0053	4342	2
-15,0	1,0033	3342	
-10,0	1,0017	2650	
-5,0	1,0007	2156	1
0,0	1,0002	1792,6	
5,0	1,0000	1517,9	
10,0	1,0002	1305,5	0,3
15,0	1,0008	1137,4	
20,0	1,0017	1002,6	0,1
25,0	1,0028	890,9	
30,0	1,0043	798,4	
35,0	1,0059	720,4	
40,0	1,0078	653,9	
50,0	1,0121	547,1	0,3
60,0	1,0171	466,0	
70,0	1,0228	403,3	
80,0	1,0292	354,2	
90,0	1,0361	314,8	
95,0	1,0398	297,7	
99,0	1,0429	285,0	

wie die in Tabelle 5 angegebenen Werte der dynamischen Viskosität für gesättigtes Wasser und Satttdampf nicht in [12] enthalten. Als neu definierter Standardwert für η bei $t = 20^\circ\text{C}$ und $1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$ wird

$$\eta_{20^\circ\text{C}} = (1,0026 \pm 0,0006) \cdot 10^{-5} \text{ kg/s m}$$

vorgeschlagen.

Schrifttum

[1] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampftafeln. 6. Auflage, Springer-Verlag, 1963.

[2] Schmidt, E.: Properties of Water and Steam in SI-Units. Springer-Verlag, 1969
 [3] Mayinger, F.; Grigull, U.: Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfes. BWK 17 (1965) Nr. 2, S. 53/59.
 [4] Schmidt, E.: Verhandlungen und Ergebnisse der Sechsten Internationalen Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfes. BWK 16 (1964) Nr. 7, S. 322/30.
 [5] Haywood, R.W.: Proceedings of the 7th International Conference on the Properties of Steam. Tokyo, Sept. 1968.
 [6] Proceedings of the 8th International Conference on the Properties of Water and Steam. Giens (Frankreich), Sept. 1974, Vol. I a. II.
 [7] Reimann, M.; Rosner, N.; Scheffler, K.; Meyer-Pittroff, R.: Dynamic Viscosity of Water Substance. A Comparison of New Equations and Measurements. Institut A f. Thermodynamik, TU München, 1973.

- [8] Nagashima, A.; Ikeda, M.: Available Input of the Viscosity of Water and Steam. Keio University, Yokohama, 1973.
- [9] Scheffler, K.; Rosner, N.; Reimann, M.: Available Input of Dynamic Viscosity of Water Substance. Institut A f. Thermodynamik, TU München, 1973.
- [10] Grigull, U.; Reimann, M.; Scheffler, K.: Data Survey of the Viscosity of Pure Water. Paper submitted to the 8th ICPS, Giens, 1974 ([6]).
- [11] Rosner, N.; Reimann, M.; Scheffler, K.; Grigull, U.: Draft of the Skeleton Table for Dynamic Viscosity of Water and Steam. Lehrstuhl A f. Thermodynamik, TU München, 1975, presented to the IAPS meeting of Special Committee.
- [12] Release on Dynamic Viscosity of Water Substance. Issued by the IAPS, Sept. 1975.
- [13] Alexandrov, A.A.; Ivanov, A.I.; Matreev, A.B.: Draft of the Skeleton Tables of the Dynamic Viscosity of Water and Steam (II). Sov. Nat. Com. Prop. Steam, Moskau, 1974.
- [14] Nagashima, A.; Ikeda, M.; Tanishita, I.: Correlation of Viscosity for Water and Steam. Submitted to the 8th ICPS, Giens, 1974, ([6]).
- [15] Scheffler, K.; Straub, J.: The Dynamic Viscosity of Water Substance. A Comparison Between the IFC 1967 and the IFC 1968. Lehrstuhl A f. Thermodynamik, TU München, August 1976.

BWK 285

Tagungen

Wärmepumpen in Betrieb, heute und in Zukunft

Die Tagung*), deren wissenschaftliche Leitung Prof. E. Hahne VDI, Stuttgart, inne hatte, wollte breiten Kreisen der Planer und Benutzer die praktischen Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmepumpen aufzeigen. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte neben dem „Heute“ auch die Zukunft einbezogen werden, was wegen der längeren Dauer von Planungsüberlegungen zweckdienlich schien.

Die Vorträge waren in fünf Gruppen gegliedert: *Komponenten, Systeme, Erfahrungen, Energieversorgung und weitere Entwicklung*. Ein vorausgestellter Übersichtsvortrag gab einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten von Wärmepumpen.

Die Wärmepumpe kann Energie in Form von Niedertemperaturwärme erschließen. Nach einem Überblick (K. Vielhaber) über die wichtigsten Wärmepumpenbauarten, unter denen auch die Peltierwärmepumpe genannt wurde, nannte der Vortragende verschiedene Anwendungen: Bei der Wohnhausheizung, Warmwasserbereitung und Schwimmbadheizung arbeitet die Wärmepumpe als ausschließliches Heizgerät. Der größte Vorteil ergibt sich, wenn gleichzeitig geheizt und gekühlt wird, wie bei Entfeuchtung, Wärmekompensation in größeren Gebäuden durch Verschiebung von Wärme von der warmen zur kalten Seite u. bei Wärmerückgewinnung in industriellen Prozessen. Die Wärmepumpe kann die Wirtschaftlichkeit von Solarheizungen erhöhen, indem sie den Wärmespeicher im Kollektorkreislauf auch bei niedrigen Temperaturen nutzt. Die Primärenergienutzung und die Schonung der Umwelt werden bei Wärmepumpen in besonderem Maße berücksichtigt.

*) Bericht über die gleichlautende Tagung, veranstaltet von der VDI-Gesellschaft Energietechnik am 7. bis 9.11.1977 in München. Die Vorträge sind in dem VDI-Bericht 289 erschienen.

Bevor über Systeme, Erfahrungen und die weitere Entwicklung berichtet werden konnte, bot ein näherer Einblick in die Komponenten der Wärmepumpen wie Verdichter und Kompressoren, Verdampfer und Kondensatoren eine willkommene Einführung in die Problematik. Erst von diesen Grundtatsachen aus war es im Verlauf der Tagung möglich, über optimierte Systeme und Anlagen zu sprechen.

Komponenten

Optimierte Kompressoren mit besonders hohen Wirkungsgraden sind bei Hubkolbenkompressoren für Wärmepumpen (L. Deniselle) ein Mittel, um die Leistungsziffern (Verhältnis aufgewendeter zur abgegebenen Leistung) in eine Größenordnung der wirtschaftlichen Anwendung zu bringen.

Von den noch behandelten Verdichtern war der *Kreiskolbenverdichter* (G. Schindelbauer) von besonderem Interesse. Betriebsergebnisse wurden angegeben und ein Prototyp für die Wärmepumpe eines Einfamilienhauses für eine Wärmeleistung von 7000 bis 15000 kcal/h vorgestellt.

Als nächste Verdichtervariante wurde der *Schraubenverdichter* (R. Klein) vorgestellt, dessen Einsatzgrenze durch die maximal zulässigen Drücke für das Verdichtergehäuse und durch die Lagerbelastungen gegeben ist. So ist für R 22 ein Betriebsdruck von 25 bar für 60 °C Kondensationstemperatur erforderlich (entsprechend einen Abpreßdruck von 42 bar).

Für die Zukunft ist es eine Aufgabe, kleinere Verdichter für den Einfamilienhausbereich zu entwickeln. Ferner wird die Verbesserung der Wirkungsgrade angestrebt, was durch die Verringerung der Spalte und Spiele möglich ist.

Als letzte Verdichtervariante wurden

die *Turboverdichter* behandelt (K. Lüdtke), wobei sich die Ausführungen im wesentlichen auf den einstufigen Verdichter beschränken.

Die zweite Vortragsgruppe bei den Komponenten galt den Verdampfern (M. Hage u. U. Schmitz) und dem Arbeitsmedium (W. Scholten). Um die Auswahl eines optimalen Verdampfers zu erleichtern, wurden die Vor- und Nachteile der einzelnen Bauarten gegenübergestellt: Für hohe Verdampferleistungen ist der überflutete Verdampfer (> 400 kW) hinsichtlich Leistung und Leistungspreisverhältnis vorzuziehen. Für den mittleren Leistungsbereich sind die Einspritzverdampfer vorteilhafter, während im unteren Leistungsbereich (> 40 kW) die kompakten preisgünstigen und korrosionsbeständigen Koaxialverdampfer Vorteile bieten. Luftbeaufschlagte Verdampfer werden größere Bedeutung bekommen. Die zu bewältigenden Probleme liegen im Verteiler, im Expansionsventil und der Luftverteilung im Anstromquerschnitt.

Die Einsatzgrenzen der Arbeitsmedien bestimmen Leistungszahl, volumetrische Heizleistung, Maximaldruck, Druckverhältnis und Verdichtungsendtemperatur. Das sich dabei ergebende Verhältnis aus abgegebener Heizwärme zu aufzubringender Antriebsenergie (Leistungszahl) bestimmt neben dem Preis/Leistungsverhältnis die wirtschaftlichen Grundlagen einer Wärmepumpe. Physikalisch wird der Einsatz von Arbeitsmedien begrenzt durch den niedrigsten Dampfdruck im System $p_{\min} > 1,013 \text{ bar}$ und dem höchsten Dampfdruck $p_{\max} < p$ kritisch.

Systeme

Diese Gruppe umfaßte Ausführungen über Leitsysteme und ausgeführte Planungen der Uni Passau und Bayreuth sowie einer Einfamilienhaussiedlung und