



Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfs

**Neue internationale Rahmentafeln
und ihre Auswertung**

von Dr.-Ing. Franz Mayinger
und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grigull

M·A·N

MASCHINENFABRIK AUGSBURG-NÜRNBERG AG · WERK NÜRNBERG

DK 061.3 (100):546.212-13:533.16:536.23 (083.4)

Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfs

Neue internationale Rahmentafeln und ihre Auswertung

Von **F. Mayinger**, Nürnberg, und **U. Grigull**, München*

Die von der 6. Internationalen Wasserdampfkonzferenz 1963 eingesetzte und bevollmächtigte Arbeitsgruppe zur Aufstellung von Rahmentafeln für Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfs hat ihre Arbeit erfolgreich abgeschlossen. Die Rahmentafeln und die vereinbarten Interpolationsformeln werden wiedergegeben und mit den Werten der VDI-Wasserdampftafeln, 6. Auflage, verglichen. Ergänzend wird ein Diagramm für die Prandtl-Zahl im Bereich der Drücke von 1 bis 500 bar und der Temperaturen von 0 bis 700 °C dargestellt.

Ergänzung der Beschlüsse der 6. Internationalen Wasserdampfkonzferenz

Die 6. Internationale Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfs [1], die im Oktober 1963 in New York stattfand, einigte sich auf verbesserte und erweiterte Internationale Rahmentafeln der thermodynamischen Eigenschaften des Wasserdampfs sowie auf eine Internationale Rahmentafel der Viskosität des Wasserdampfs. Das Studium des augenblicklichen Standes unserer Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit von Wasserdampf konnte auf dieser Konferenz nicht abgeschlossen werden. Deshalb berief die Konferenz eine kleine Arbeitsgruppe, bestehend aus je einem Vertreter¹⁾ der Bundesrepublik Deutschland, der UdSSR, der USA sowie des Vereinigten Königreichs von Großbritannien und Irland (U.K.) mit dem Auftrag, eine Internationale Rahmentafel für die Wärmeleitfähigkeit auszuarbeiten und vorzuschlagen. Das Sekretariat der Konferenz war beauftragt, diesen Vorschlag an alle auf der 6. Internationalen Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfs vertretenen nationalen Delegationen zur schriftlichen Abstimmung zu senden.

Kurz nach Abschluß der Konferenz zeigte eine beim Abfassen des offiziellen Berichts durchgeführte nochmalige Prüfung, daß in der Rahmentafel der Viskosität ein Fehler unterlaufen war. Aus diesem Grund erachtete es das Se-

ekretariat für notwendig, auch die Rahmentafel der Viskosität zur nochmaligen Überarbeitung an diese Arbeitsgruppe zu überweisen. Die Beschlüsse dieser Arbeitsgruppe sollten als Beschlüsse der 6. Internationalen Wasserdampfkonzferenz gelten.

Jedes Mitglied der Arbeitsgruppe stellte nach gründlichem Studium aller in der Literatur verfügbaren experimentellen Arbeiten zunächst einen Rahmentafelvorschlag für die Wärmeleitfähigkeit auf. Diese Vorschläge, die teils mit Hilfe von Näherungsgleichungen, teils graphisch erarbeitet waren, wurden gegenseitig ausgetauscht, auf schriftlichem Wege eingehend diskutiert und abgeglichen. Vom 22. bis 24. Juni 1964 fand eine abschließende Arbeitssitzung statt, die auf Einladung von Professor *B. Vodar* in Paris abgehalten und auf der *M. P. Wukalowitsch* zum Vorsitzenden gewählt wurde. An der Sitzung nahmen 14 Herren als Delegierte und Beobachter aus den Ländern Bundesrepublik Deutschland²⁾, Frankreich, Vereinigtes Königreich, UdSSR und den USA teil. Es wurde eine vollständige Einigung erzielt.

Die neuen Rahmentafeln für die Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit des Wasserdampfs

Die auf dieser Sitzung ausgearbeiteten und in den **Zahlentafeln 1** und **2** wiedergegebenen neuen Internationalen Rahmentafeln der Viskosität und Wärmeleitfähigkeit von Wasserdampf sind soweit wie möglich aus einfachen Gleichungen entwickelt, die so aufgebaut sind, daß sie sich für die Verwendung in elektronischen Rechenanlagen besonders eignen. Sie sind in Einheiten des Internationalen Einheitensystems oder in dekadischen Vielfachen dieser Einheiten aufgestellt. Die Angaben der Tafeln für

*¹⁾ Dr.-Ing. *Franz Mayinger* ist tätig bei der M.A.N., Werk Nürnberg; Prof. Dr.-Ing. *Ulrich Grigull* ist Direktor des Instituts für Technische Thermodynamik der TH München.

²⁾ Die Delegierten der einzelnen Länder zu dieser Arbeitsgruppe waren: *E. A. Bruges* (U.K.), *J. Kestin* (USA), *F. Mayinger* (BRD) und *M. P. Wukalowitsch* (UdSSR).

³⁾ Aus der Bundesrepublik Deutschland nahmen teil die Herren Prof. Dr.-Ing. *U. Grigull*, TH München, Dr.-Ing. *F. Mayinger*, M.A.N., Nürnberg, und Dipl.-Ing. *J. Bach*, TH München.

Zahlentafel 1. Internationale Rahmentafel 1964 für die dynamische Viskosität von Wasser und überhitztem Dampf in 10^{-6} Poise.

Von je zwei übereinander stehenden Zahlen gibt die obere den vereinbarten Weg der dynamischen Viskosität und die untere die Plus/Minus-Toleranz in 10^{-6} Poise an

Druck bar	TEMPERATUR °C																	
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700
1	17 500 400	5 440 140	2 790 1,2	1 810 1,4	1 340 1,6	1 070 1,8	905 2,0	735 7	597 7	458 7	345 8	274 8	214 8	164 8	124 9	94 10	74 10	59 11
5	17 500 400	5 440 140	2 790 70	1 810 50	1 340 1,6	1 070 1,8	905 2,0	735 9	597 10	458 10	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
10	17 500 400	5 440 140	2 790 70	1 810 50	1 340 1,6	1 070 1,8	905 2,0	735 9	597 10	458 10	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
25	17 500 400	5 440 140	2 800 70	1 820 50	1 340 30	1 070 1,8	905 2,0	735 9	597 10	458 10	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
50	17 500 400	5 450 140	2 800 70	1 820 50	1 350 30	1 070 30	905 2,0	735 10	597 10	458 10	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
75	17 500 400	5 450 140	2 800 70	1 830 50	1 350 30	1 080 30	905 2,0	735 10	597 10	458 10	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
100	17 500 400	5 450 140	2 810 70	1 830 50	1 360 30	1 080 30	905 23	735 10	597 10	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
125	17 500 400	5 460 140	2 810 70	1 840 50	1 360 30	1 090 30	911 23	735 10	597 10	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
150	17 400 400	5 460 140	2 820 70	1 840 50	1 370 30	1 100 30	917 23	735 11	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
175	17 400 400	5 460 140	2 820 70	1 850 50	1 380 30	1 100 30	924 23	735 11	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
200	17 400 400	5 460 140	2 830 70	1 860 50	1 380 40	1 110 30	930 23	735 12	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
225	17 400 400	5 460 140	2 830 70	1 860 50	1 390 40	1 120 30	936 23	735 12	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
250	17 400 400	5 470 140	2 840 70	1 870 50	1 390 40	1 120 30	943 24	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
275	17 400 400	5 470 140	2 840 70	1 870 50	1 400 40	1 130 30	949 24	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
300	17 400 400	5 470 140	2 850 70	1 880 50	1 400 40	1 130 30	955 24	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
350	17 300 400	5 480 140	2 860 70	1 890 50	1 420 40	1 150 30	968 24	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
400	17 300 700	5 480 200	2 870 120	1 900 80	1 430 60	1 160 50	981 39	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
450	17 300 700	5 490 220	2 880 120	1 910 80	1 440 60	1 170 50	993 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
500	17 200 700	5 490 220	2 890 120	1 920 80	1 450 60	1 180 50	1 010 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
550	17 200 700	5 500 220	2 900 120	1 930 80	1 460 60	1 200 50	1 020 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
600	17 200 700	5 500 220	2 910 120	1 940 80	1 480 60	1 210 50	1 030 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
650	17 200 700	5 510 220	2 920 120	1 960 80	1 490 60	1 220 50	1 040 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
700	17 100 700	5 510 220	2 930 120	1 970 80	1 500 60	1 230 50	1 060 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
750	17 100 700	5 520 220	2 940 120	1 980 80	1 510 60	1 240 50	1 070 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15
800	17 100 700	5 520 220	2 950 120	1 990 80	1 520 60	1 260 50	1 080 40	735 13	597 11	458 11	345 11	274 11	214 11	164 11	124 12	94 13	74 14	59 15

Zahlentafel 2. Internationale Rahmentafel 1964 für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und überhitztem Dampf in $10^{-3} \text{ W/(m grad)}$.

Von je zwei übereinander stehenden Zahlen gibt die obere den vereinbarten Wert der Wärmeleitfähigkeit und die untere die Plus/Minus-Toleranz in $10^{-3} \text{ W/(m grad)}$ an

Druck bar	TEMPERATUR °C																	
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700
1	569	643	24,8	28,7	33,2	38,2	43,4	49,0	51,9	54,9	58,0	61,1	64,2	67,4	73,9	80,6	87,4	94,3
	11	13	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,6	2,3	2,4	2,6	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8
5	569	644	681	687	33,8	38,6	43,8	49,4	52,3	55,3	58,3	61,4	64,5	67,7	74,3	80,9	87,7	94,6
	11	13	14	14	2,0	2,3	2,6	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7
10	570	644	681	687	35,1	39,3	44,4	49,9	52,8	55,7	58,8	61,8	65,0	68,2	74,7	81,4	88,2	95,0
	11	13	14	14	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7
25	571	645	682	688	665	42,9	46,5	51,6	54,3	57,2	60,2	63,3	66,4	69,6	76,1	82,7	89,5	96,3
	11	13	14	14	13	2,6	2,8	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8
50	573	647	684	690	668	618	52,5	55,4	57,6	60,2	63,0	65,9	68,9	72,0	78,4	85,0	91,7	98,6
	11	13	14	14	13	12	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,1	4,3	4,7	5,1	5,5	5,9
75	575	649	686	691	670	622	63,7	60,8	62,0	63,9	66,3	68,9	71,7	74,7	80,9	87,4	94,0	101
	11	13	14	14	13	12	3,8	3,6	3,7	3,8	4,0	4,1	4,3	4,5	4,9	5,2	5,6	6
100	577	651	688	693	672	625	545	68,8	67,9	68,6	70,2	72,4	74,9	77,6	83,5	89,8	96,4	103
	12	13	14	14	13	13	11	4,1	4,1	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	5,0	5,4	5,8	6
125	579	653	689	695	674	629	552	81,3	75,9	74,5	74,9	76,4	78,4	80,8	86,3	92,4	98,9	105
	12	13	14	14	13	13	11	4,9	4,6	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	5,2	5,5	5,9	6
150	581	655	691	696	676	633	559	104	87,5	82,2	80,7	81,0	82,4	84,3	89,3	95,1	101	108
	12	13	14	14	14	13	11	6	5,3	4,9	4,8	4,9	4,9	5,1	5,4	5,7	6	6
175	583	657	693	698	679	636	565	442	106	92,6	87,9	86,5	86,9	88,3	92,5	98,0	104	110
	12	13	14	14	14	13	11	22	6	5,6	5,3	5,2	5,2	5,3	5,6	5,9	6	7
200	585	659	695	700	681	639	571	454	126	107	96,9	93,1	92,1	92,6	96,0	101	107	113
	12	13	14	14	14	13	11	23	13	6	5,8	5,6	5,5	5,6	5,8	6	6	7
225	587	661	696	701	683	642	577	465	297	130	109	101	98,1	97,4	99,6	104	110	115
	12	13	14	14	14	13	12	23	30	8	7	6	5,9	5,8	6	6	7	7
250	589	662	698	703	685	646	582	476	376	157	125	111	105	103	104	107	112	118
	12	13	14	14	14	13	12	24	38	16	8	7	6	6	6	6	7	7
275	591	664	699	705	687	649	588	486	402	200	147	123	113	109	108	111	115	121
	12	13	14	14	14	13	12	24	40	20	9	7	7	7	6	7	7	7
300	592	666	701	706	689	652	592	496	419	264	171	138	122	116	112	114	118	124
	12	13	14	14	14	13	12	25	42	26	17	8	7	7	7	7	7	7
350	596	669	704	710	693	657	601	514	444	351	239	182	147	132	122	122	125	129
	12	13	14	14	14	13	12	26	44	35	24	11	9	8	7	7	7	8
400	599	672	707	713	697	662	609	529	468	390	296	220	177	153	134	130	132	135
	12	13	14	14	14	13	12	26	47	39	30	22	18	9	8	8	8	8
450	603	675	710	716	701	667	616	541	486	416	338	264	210	180	148	139	139	142
	12	13	14	14	14	13	12	27	49	42	34	26	21	11	9	8	8	8
500	606	678	713	720	704	671	622	552	501	436	370	301	246	206	163	149	147	148
	12	14	14	14	14	13	12	28	50	44	37	30	25	21	10	9	9	9

0 °C und 1 bar gelten nicht für die Sättigungslinie, sondern beziehen sich auf den metastabilen (unterkühlten) Zustand des flüssigen Wassers. Die in unmittelbarer Nähe des kritischen Punkts angegebenen Werte lassen die Möglichkeit eines anomalen Verhaltens der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit in diesem Bereich offen.

Zahlentafel 1 enthält die Werte der dynamischen Viskosität von flüssigem Wasser und überhitztem Dampf für Drücke von 1; 5; 10; 25 bar und dann in Stufen von 25 und 50 bar bis auf 800 bar ansteigend sowie für Temperaturen von 0 bis 700 °C, ansteigend in Stufen von 50 grad. Im flüssigen Bereich mußte längs der Isotherme 350 °C ein kleiner Bereich mangels experimenteller Unterlagen ausgespart werden. Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind in Zahlentafel 2 wiedergegeben. Sie hat die gleichen Druck- und Temperaturstufen wie Zahlentafel 1, reicht jedoch nur bis 500 bar.

Zur Umrechnung der in den Tafeln angegebenen Zahlenwerte auf andere Einheiten dienen folgende Umrechnungs-

gleichungen (die fett gesetzten Ziffern bedeuten, daß diese letzten Stellen genau sind):

Viskosität

1 Poise (P) = 1 dyn s/cm² = 1 g/(cm s) = 0,1 N s/m²
 = 0,1 kg/(m s) = 0,010197 kp s/m²
 1 kp s/m² = 9,80665 N s/m² = 98,0665 Poise (P)

Wärmeleitfähigkeit

1 W/(m grad) = 0,85985 kcal/(m h grad)
 1 kcal/(m h grad) = 1,163 W/(m grad)

Interpolationsgleichungen für die Rahmentafelwerte der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit

Zur Interpolation und analytischen Darstellung der in den Zahlentafeln 1 und 2 aufgeführten Werte hat die Arbeitsgruppe Gleichungen aufgestellt und empfohlen, die die Rahmentafeln mit sehr großer Genauigkeit wiedergeben. Eine Extrapolation mit Hilfe dieser Gleichungen auf höhere Drücke und Temperaturen ist im allgemeinen

nicht zweckmäßig, da sie wegen des Polynomcharakters der meisten Gleichungen zu erheblich falschen Werten führen kann. Die nachfolgend aufgeführten Gleichungen sind mit Angaben über die größtmögliche prozentuale Ungenauigkeit der aus ihnen errechneten Werte versehen. Diese Angaben sind identisch mit den in den Zahlentafeln 1 und 2 abgedruckten Toleranzen.

$$\eta_{10^{-6}P} = 241,4 \cdot 10^{247,8 \left[\left(\frac{T}{^{\circ}K} - 140 \right)^{-1} \right]} \times \left[1 + \frac{(p - p_s)}{10^6 \text{ bar}} \cdot 1,0467 \left(\frac{T}{^{\circ}K} - 305 \right) \right] \dots (5)$$

gilt.

Viskosität

In den nachstehend aufgeführten Gleichungen bedeuten:

- η die dynamische Viskosität,
- ρ die Dichte,
- p den absoluten Druck,
- p_s den absoluten Druck im Sättigungszustand,
- T die Kelvin-Temperatur,
- t die Celsius-Temperatur, definiert durch $t = T - T_0$ mit $T_0 = 273,15^{\circ}K$.

Die Viskosität η_1 des überhitzten Dampfes bei einem Druck von 1 bar und Temperaturen zwischen 100 °C und 700 °C ist eine lineare Funktion der Temperatur und läßt sich darstellen durch die Gleichung:

$$\frac{\eta_1}{10^{-6} P} = 0,407 \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right) + 80,4 \dots (1)$$

Die Toleranzen betragen

- $\pm 1\%$ bei $100^{\circ}C < t \leq 300^{\circ}C$,
- $\pm 3\%$ bei $300^{\circ}C < t \leq 700^{\circ}C$.

Der Einfluß des Drucks muß durch Addieren zweier Korrekturglieder zu Gl. (1) berücksichtigt werden, von denen das eine im Bereich 100 bis 300 °C, das andere von 375 bis 700 °C gilt. Zwei Korrekturglieder sind notwendig, da im ersten Bereich die Viskosität mit steigendem Druck sinkt, im zweiten Bereich steigt.

Für die Viskosität η von 1 bar bis zum Sättigungsdruck und von 100 bis 300 °C, wo der Druckeinfluß negativ ist, gilt mit einer Toleranz von $\pm 1\%$ die Gleichung

$$\frac{\eta}{10^{-6} P} = \frac{\eta_1}{10^{-6} P} - \frac{\rho}{(g/cm^3)} \left[1858 - 5,90 \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right) \right] \dots (2)$$

Hierin bedeutet η_1 die Viskosität beim Druck 1 bar, die aus Gl. (1) zu berechnen ist.

Im Gebiet positiven Druckeinflusses wird die Druckabhängigkeit dadurch berücksichtigt, daß man die Dichte als unabhängige Veränderliche benutzt, die den Rahmentafeln für die thermodynamischen Eigenschaften entnommen ist. Die Viskosität von überhitztem und überkritischem Dampf von 1 bis 800 bar und 375 bis 700 °C läßt sich dann mit einer Toleranz von $\pm 4\%$ in der Form

$$\frac{\eta}{10^{-6} P} = \frac{\eta_1}{10^{-6} P} + 353,0 [\rho/(g/cm^3)] + 676,5 [\rho/(g/cm^3)]^2 + 102,1 [\rho/(g/cm^3)]^3 \dots (3)$$

darstellen.

Die Viskosität von flüssigem Wasser längs der Sättigungslinie von 0 bis 300 °C wird von der Gleichung

$$\frac{\eta}{10^{-6} P} = 241,4 \cdot 10^{247,8 \left[\left(\frac{T}{^{\circ}K} - 140 \right)^{-1} \right]} \dots (4)$$

erfaßt. Die Toleranz beträgt hierbei $\pm 2,5\%$. Der Druckeinfluß wird durch Multiplikation der rechten Seite von Gl. (4) mit dem Faktor

$$\left[1 + \frac{(p - p_s)}{10^6 \text{ bar}} \cdot 1,0467 \left(\frac{T}{^{\circ}K} - 305 \right) \right]$$

berücksichtigt, so daß für das gesamte flüssige Gebiet von 0 bis 300 °C und vom Sättigungsdruck bis 800 bar der Ausdruck

Die Toleranzen betragen

- $\pm 2,5\%$ für $1 \text{ bar} < p \leq 350 \text{ bar}$,
- $\pm 4\%$ für $350 \text{ bar} < p \leq 800 \text{ bar}$.

Wärmeleitfähigkeit

Während die Interpolationsgleichungen für die Viskosität alle in der Rahmentafel aufgeführten Werte umfassen, konnten die Werte der Wärmeleitfähigkeit bei kritischen und überkritischen Zuständen noch nicht in eine analytische Form gebracht werden. Dieser Bereich, in dem keine der im folgenden aufgeführten Gleichungen gültig ist, ist in Zahlentafel 2 mit einer gestrichelten Linie umrandet.

Die Wärmeleitfähigkeit λ_1 des überhitzten Dampfes längs der 1 bar-Linie bei Temperaturen von 100 bis 700 °C wurde in einem Polynom 3. Grades mit der Temperatur als abhängige Veränderliche dargestellt:

$$\frac{\lambda_1}{10^{-3} W/(m \text{ grad})} = 17,6 + 5,87 \cdot 10^{-2} \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right) + 1,04 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right)^2 - 4,51 \cdot 10^{-8} \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right)^3 \dots (6)$$

Die Toleranzen wurden festgelegt auf

- $\pm 3\%$ im Bereich $100^{\circ}C \leq t \leq 400^{\circ}C$,
- $\pm 4\%$ im Bereich $400^{\circ}C < t \leq 700^{\circ}C$.

Für höhere Drücke ist zu Gl. (6) ein von der Temperatur t und der Dichte ρ abhängiges Doppelpolynom zu addieren. Damit läßt sich dann in den Bereichen

- 1 bar $< p \leq 175$ bar : $t_s \leq t \leq 700^{\circ}C$
- 175 bar $< p \leq 225$ bar : $400^{\circ}C \leq t \leq 700^{\circ}C$
- 225 bar $< p \leq 275$ bar : $425^{\circ}C \leq t \leq 700^{\circ}C$
- 275 bar $< p \leq 350$ bar : $450^{\circ}C \leq t \leq 700^{\circ}C$
- 350 bar $< p \leq 450$ bar : $500^{\circ}C \leq t \leq 700^{\circ}C$
- 450 bar $< p \leq 500$ bar : $550^{\circ}C \leq t \leq 700^{\circ}C$

die Wärmeleitfähigkeit λ des überhitzten Dampfes in der Form

$$\frac{\lambda - \lambda_1}{10^{-3} W/(m \text{ grad})} = \left[103,51 + 0,4198 \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right) - 2,771 \cdot 10^{-5} \left(\frac{t}{^{\circ}C} \right)^2 \right] \left(\frac{\rho}{g/cm^3} \right) + \frac{2,1482 \cdot 10^{14}}{(t/^{\circ}C)^{1,20}} \left(\frac{\rho}{g/cm^3} \right)^2 \dots (7)$$

schreiben, wobei λ_1 aus Gl. (6) zu errechnen ist. Die Toleranz erreicht hier einen Wert von $\pm 6\%$. Zu beachten ist, daß Gl. (7) nicht bis zur Sättigungslinie extrapoliert werden kann, da sie hier selbst bei geringer Überschreitung des oben aufgeführten Gültigkeitsbereichs falsche Werte liefert.

Für flüssiges Wasser wird der gesamte Bereich vom Sättigungsdruck bis 500 bar und von 0 bis 350 °C von einer Gleichung erfaßt:

$$\frac{\lambda}{10^{-3} W/(m \text{ grad})} = \alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + \alpha_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 + \alpha_4 \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 + \left(\frac{p - p_s}{\text{bar}} \right) \left[b_0 + b_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + b_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + b_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \right] + \left(\frac{p - p_s}{\text{bar}} \right)^2 \left[c_0 + c_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + c_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + c_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \right] \dots (8)$$

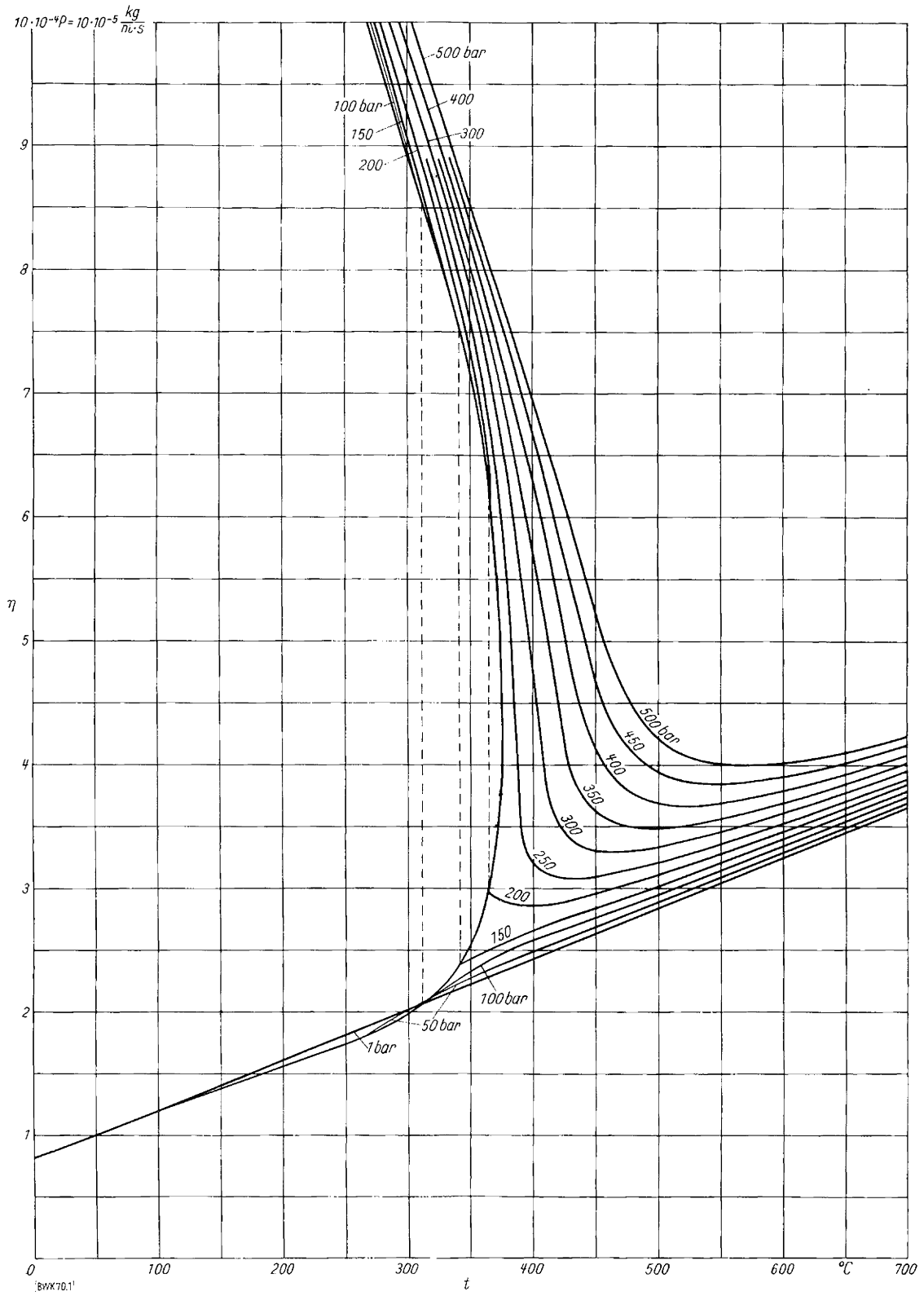


Bild 1. Dynamische Viskosität η von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .

Die hier auftretenden Konstanten haben die Zahlenwerte

$a_0 = -922,47$	$b_2 = -2,0012$
$a_1 = 2839,5$	$b_3 = 0,51536$
$a_2 = -1800,7$	$c_0 = 1,6563 \cdot 10^{-3}$
$a_3 = 525,77$	$c_1 = -3,8929 \cdot 10^{-3}$
$a_4 = -73,440$	$c_2 = 2,9323 \cdot 10^{-3}$
$b_0 = -0,94730$	$c_3 = -7,1693 \cdot 10^{-4}$
$b_1 = 2,5186$	

Die Toleranz beträgt

$\pm 2\%$ im Bereich $0^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}$,
$\pm 5\%$ im Bereich $300^\circ\text{C} < t \leq 350^\circ\text{C}$.

Zur besseren Übersichtlichkeit und bequemerer Verwendbarkeit im praktischen Gebrauch wurden von den Verfassern dieses Berichts in **Bild 1** und **2** die Werte der neuen Rahmentafeln in einem η , t - und λ , t -Diagramm aufgetragen. Soweit die Interpolationsgleichungen die Sättigungslinie nicht einschließen, wurden diese Werte durch sorgfältige graphische Extrapolation ermittelt. Beim η , t -Diagramm liegt im Bereich von 100 bis 300 °C die Sättigungslinie tiefer als die in sie mündenden Isobaren des überhitzten Gebiets, da hier die Viskosität des Dampfes mit steigendem Druck sinkt und mit Annäherung an die Sättigungslinie kleinere Werte annimmt.

Vergleich der neuen Rahmentafeln mit der 6. Auflage der VDI-Wasserdampfatafeln

Die in der 6. Auflage der VDI-Wasserdampfatafeln enthaltenen Tabellen der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich nur sehr wenig von den neuen Rahmentafeln. Dies ist darauf zurückzuführen, daß beide Tafeln sich wesentlich auf dieselben Versuchsergebnisse stützen. Die **Zahlentafeln 3** und **4** enthalten die Werte der dynamischen Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit beider Tafeln³⁾, soweit sie um mehr als die Toleranz der Rahmentafeln voneinander abweichen. Die VDI-Tafeln schreiten in meist geradzahigen Stufen von Temperatur und Druck fort und enthalten somit keine Werte für die Temperaturen 375; 425 und 475 °C und für die Drücke 75; 225 und 275 bar. Diese Temperaturen und Drücke sind deshalb beim Vergleich nicht berücksichtigt.

Zahlentafel 3 zeigt die Toleranzüberschreitungen bei der dynamischen Viskosität. Die Abweichung bei 500 °C und 450 bar ist auf einen Druckfehler in der VDI-Wasserdampfatafel zurückzuführen.

³⁾ Es ist die Ausgabe B der VDI-Wasserdampfatafeln zum Vergleich herangezogen, da diese Ausgabe in den gleichen Einheiten wie die Rahmentafel berechnet ist. Die Folgerungen aus dem Vergleich gelten sinngemäß auch für Ausgabe A.

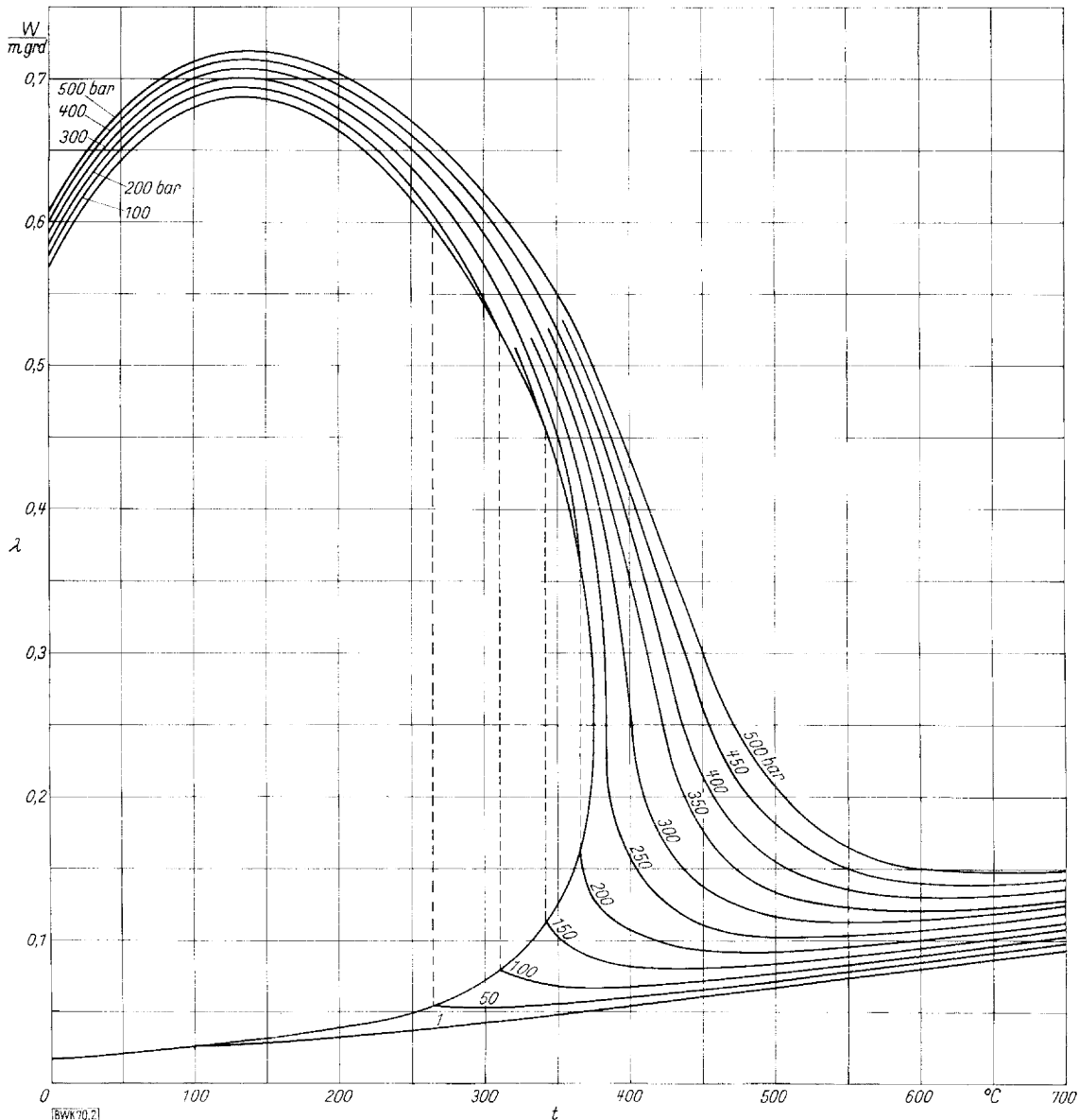


Bild 2. Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .

Zahlentafel 3. Vergleich der dynamischen Viskosität η .

Zustand		Internat. Rahmentafel			VDI-Wasserdampf tabel 1963		
Temperatur °C	Druck bar	η 10 ⁻⁶ Poise	Toleranz = 10 ⁻⁶ Poise	%	η 10 ⁻⁶ Poise	Toleranzüberschreitung 10 ⁻⁶ Poise	%
150	1	141,5	1,4	1	139	1,1	0,8
200	1	161,8	1,6	1	160	0,2	0,1
250	1	182,2	1,8	1	180	0,4	0,2
150	50	1 820	50	3	1 880	10	0,5
300	50	200,6	2,0	1	207	4,4	2,1
150	100	1 830	50	3	1 890	10	0,5
150	150	1 840	50	3	1 900	10	0,5
400	300	458	18	4	479	0,3	0,7
150	350	1 890	50	3	1 950	10	0,5
500	450	393	16	4	345	32	8,2

Zahlentafel 4. Vergleich der Wärmeleitfähigkeit λ .

Zustand		Internat. Rahmentafel			VDI-Wasserdampf tabel 1963		
Temperatur °C	Druck bar	λ 10 ⁻³ W/m grd	Toleranz = 10 ⁻³ W/m grd	%	λ 10 ⁻³ W/m grd	Toleranzüberschreitung 10 ⁻³ W/m grd	%
0	1	569	11	2	552	6	1,0
100	1	24,8	0,8	3	21,7	2,3	0,9
150	1	28,7	0,9	3	27,4	0,4	1,4
250	1	38,2	1,1	3	39,5	0,2	0,5
350	1	49	1,5	3	50,6	0,1	0,2
0	50	573	11	2	554	8,0	1,3
300	50	52,5	3,2	6	56,1	0,7	1,3
0	100	577	12	2	556	11	1,9
0	150	581	12	2	558	11	1,9
0	200	585	12	2	560	13	2,2
0	250	589	12	2	562	15	2,5
0	300	592	12	2	564	16	2,7
0	350	596	12	2	566	18	3,0
0	400	599	12	2	568	19	3,2
0	450	603	12	2	570	21	3,5
0	500	606	12	2	572	22	3,6

Die in der Zahlentafel 4 wiedergegebenen Toleranzüberschreitungen bei der Wärmeleitfähigkeit gruppieren sich im wesentlichen längs der 0 °C-Isotherme sowie in der Nähe der Sättigungslinie.

Weitere Transportgrößen von Wasserdampf

Im Rahmen der Verhandlungen der Arbeitsgruppe wurde auch die Frage nach Aufstellung einer Rahmentafel für die Prandtl-Zahl

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

besprochen. Auf Grund der Tatsachen, daß auf der 6. Internationalen Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfes keine Rahmentafel für die spezifische Wärmekapazität ausgearbeitet wurde und darüber hinaus die Werte für die Prandtl-Zahlen mit sehr großen Toleranzen versehen werden müßten, da hier die Unsicherheiten von Viskosität und Wärmeleitfähigkeit zu addieren sind, kam die Arbeitsgruppe zu dem einstimmigen Entschluß, keine Rahmentafel für die Prandtl-Zahlen aufzustellen.

An den von der 6. Internationalen Konferenz ins Leben gerufenen Lenkungsausschuß [1] wurde die Anregung gegeben, zur nächsten Konferenz, die in etwa fünf Jahren stattfinden soll, nicht nur für die Prandtl-Zahlen und die spezifischen Wärmekapazitäten, sondern auch für die Oberflächenspannung σ und die Laplace-Konstante

$$a = \sqrt{\sigma / (g \Delta \rho)}$$

(mit g als Fallbeschleunigung) die Frage der Aufstellung von Rahmentafeln auf die Tagesordnung zu setzen.

Um dem Praktiker die Arbeit bei der Behandlung von Wärmeübergangsproblemen zu erleichtern, wurden im Rahmen der Ausarbeitung dieses Berichts auch Berechnungen über Prandtl-Zahlen vorgenommen. Als Ergebnis ist in Bild 3 die Prandtl-Zahl über der Temperatur für verschiedene Drücke von 1 bis 500 bar aufgetragen. Diese Werte beruhen auf den neuen Rahmentafeln für die Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit sowie auf den der VDI-Wasserdampf tabel [2] entnommenen spezifischen Wärmekapazitäten, die nur an einzelnen Stellen in der Nähe der Sättigungslinie auf Grund neuerer Messungen von Sirota [3; 4] etwas korrigiert wurden.

In Bild 3 ist der Übersichtlichkeit halber nur die Sättigungslinie des Dampfes (Dampfgehalt $x = 1$) eingezeichnet, auf der Wasserseite wurden die Isobaren nicht bis zur Sättigungslinie verlängert. Das kritische Gebiet, in dem die Prandtl-Zahlen sehr groß werden, ist wegen der großen Unsicherheit der Werte weggelassen. BWK 70

Schrifttum

- [1] Schmidt, E.: Verhandlungen und Ergebnisse der Sechsten Internationalen Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfes. BWK 16 (1964) Nr. 7, S. 322/330.
- [2] VDI-Wasserdampf tabeln. 6. Aufl. Ausgabe B. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1963.
- [3] Sirota, A. M., B. K. Maltsev u. A. Y. Grishkov: Messungen der spezifischen Wärme von Wasser bei hohen Drücken. Teploenergetika 10 (1963) Nr. 9, S. 57/60. Ref.: BWK 16 (1964) Nr. 1, S. 39/40.
- [4] Sirota, A. M., P. E. Belyakova, N. B. Vargaftik, A. A. Tarzimanov u. O. N. Oleshuk: Tabellen der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärme von Wasser und Wasserdampf (engl. Übers.). Allruss. Wärmetechn. Institut (V.T.I.) Moskau 1963.

Bild 3 umseitig

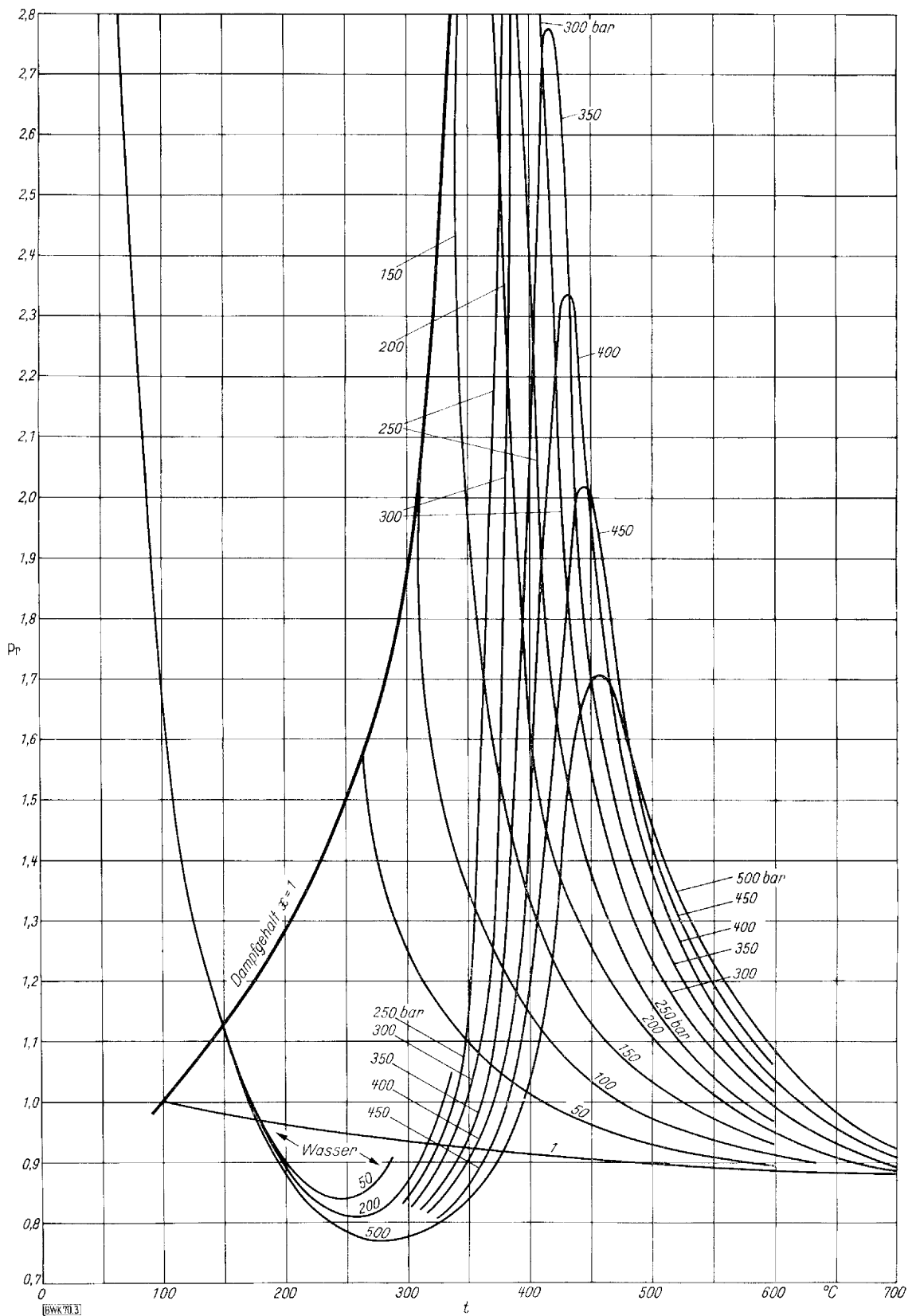


Bild 3. Prandtl-Zahl Pr von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .