

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

*) 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.

¹⁾ 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).

²⁾ 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 61,8 1,6	1 82,2 1,8	2 02,5 2,0	2 23 7	2 33 7	2 43 7	2 53 8	2 64 8	2 74 8	2 84 8	3 04 9	3 25 10	3 45 10	3 65 11
5	17 500 400	5 440 140	2 790 70	1 810 50	1 60,2 1,6	1 81,4 1,8	2 02,3 2,0		2 34 9	2 44 10	2 54 10	2 64 11	2 74 11	2 84 11	3 05 12	3 25 13	3 45 14	3 66 15
10	17 500 400	5 440 140	2 790 70	1 810 50	1 58,5 1,6	1 80,6 1,8	2 02,2 2,0		2 34 9	2 44 10	2 55 10	2 65 11	2 75 11	2 85 11	3 05 12	3 26 13	3 46 14	3 66 15
25	17 500 400	5 440 140	2 800 70	1 820 50	1 340 30	1 77,8 1,8	2 01,6 2,0		2 36 9	2 46 10	2 56 10	2 66 11	2 76 11	2 87 12	3 07 12	3 27 13	3 47 14	3 67 15
50	17 500 400	5 450 140	2 800 70	1 820 50	1 350 30	1 070 30	2 00,6 2,0		2 40 10	2 50 10	2 59 10	2 69 11	2 79 11	2 89 12	3 09 12	3 29 13	3 49 14	3 69 15
75	17 500 400	5 450 140	2 800 70	1 830 50	1 350 30	1 080 30	1 99,2 2,0		2 44 10	2 53 10	2 63 10	2 73 11	2 82 11	2 92 12	3 12 12	3 32 13	3 52 14	3 72 15
100	17 500 400	5 450 140	2 810 70	1 830 50	1 360 30	1 080 30	905 23		2 49 10	2 58 10	2 67 11	2 76 11	2 86 11	2 95 12	3 15 13	3 34 13	3 54 14	3 74 15
125	17 500 400	5 460 140	2 810 70	1 840 50	1 360 30	1 090 30	911 23		2 54 10	2 63 10	2 71 11	2 80 11	2 89 12	2 99 12	3 18 13	3 37 14	3 57 14	3 76 15
150	17 400 400	5 460 140	2 820 70	1 840 50	1 370 30	1 100 30	917 23		2 62 11	2 69 11	2 76 11	2 85 11	2 94 12	3 02 12	3 21 13	3 40 14	3 59 14	3 79 15
175	17 400 400	5 460 140	2 820 70	1 850 50	1 380 30	1 100 30	924 23		2 73 11	2 76 11	2 82 11	2 90 12	2 98 12	3 07 12	3 24 13	3 43 14	3 62 14	3 81 15
200	17 400 400	5 460 140	2 830 70	1 860 50	1 380 40	1 110 30	930 23	735 29	291 12	286 11	289 12	296 12	303 12	311 12	328 13	346 14	365 15	384 15
225	17 400 400	5 460 140	2 830 70	1 860 50	1 390 40	1 120 30	936 23	747 30	491 20	299 12	298 12	302 12	309 12	316 13	332 13	350 14	368 15	386 15
250	17 400 400	5 470 140	2 840 70	1 870 50	1 390 40	1 120 30	943 24	760 30	597 24	321 13	309 12	310 12	315 13	321 13	336 13	353 14	371 15	389 16
275	17 400 400	5 470 140	2 840 70	1 870 50	1 400 40	1 130 30	949 24	772 31	633 25	367 15	324 13	320 13	322 13	327 13	341 14	357 14	374 15	392 16
300	17 400 400	5 470 140	2 850 70	1 880 50	1 400 40	1 130 30	955 24	785 31	657 26	458 18	345 14	331 13	330 13	334 13	346 14	361 14	377 15	395 16
350	17 300 400	5 480 140	2 860 70	1 890 50	1 420 40	1 150 30	968 24	805 32	693 28	573 23	416 17	363 14	351 14	349 14	357 14	369 15	385 15	401 16
400	17 300 700	5 480 200	2 870 120	1 900 80	1 430 60	1 160 50	981 39	825 33	721 29	628 25	503 20	411 16	379 15	369 15	369 15	379 15	392 16	408 16
450	17 300 700	5 490 220	2 880 120	1 910 80	1 440 60	1 170 50	993 40	837 33	743 30	664 27	565 23	468 19	415 17	393 16	383 15	389 16	401 16	415 17
500	17 200 700	5 490 220	2 890 120	1 920 80	1 450 60	1 180 50	1 010 40	850 34	762 30	693 28	609 24	521 21	456 18	421 17	400 16	401 16	410 16	423 17
550	17 200 700	5 500 220	2 900 120	1 930 80	1 460 60	1 200 50	1 020 40	860 34	780 31	716 29	643 26	564 23	497 20	453 18	418 17	414 16	420 17	431 17
600	17 200 700	5 500 220	2 910 120	1 940 80	1 480 60	1 210 50	1 030 40	870 35	795 32	736 29	670 27	600 24	534 21	485 19	439 18	428 17	430 17	439 18
650	17 200 700	5 510 220	2 920 120	1 960 80	1 490 60	1 220 50	1 040 40	882 35	809 32	754 30	693 28	629 25	567 23	516 21	460 18	442 18	441 18	448 18
700	17 100 700	5 510 220	2 930 120	1 970 80	1 500 60	1 230 50	1 060 40	895 36	822 33	770 31	713 28	654 26	596 24	545 22	482 19	458 18	453 18	458 18
750	17 100 700	5 520 220	2 940 120	1 980 80	1 510 60	1 240 50	1 070 40	905 36	835 33	784 31	732 29	676 27	621 25	572 23	504 20	474 19	466 19	468 19
800	17 100 700	5 520 220	2 950 120	1 990 80	1 520 60	1 260 50	1 080 40	915 37	846 34	798 32	748 30	695 28	644 26	596 24	526 21	491 20	478 19	478 19

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

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

$$1 \text{ Poise (P)} = 1 \text{ dyn s/cm}^2 = 1 \text{ g}/(\text{cm s}) = 0,1 \text{ N s/m}^2 = 0,1 \text{ kg}/(\text{m s}) = 0,010197 \text{ kp s/m}^2$$

$$1 \text{ kp s/m}^2 = 9,80665 \text{ N s/m}^2 = 98,0665 \text{ Poise (P)}$$

Wärmeleitfähigkeit

$$1 \text{ W}/(\text{m grad}) = 0,85985 \text{ kcal}/(\text{m h grad})$$

$$1 \text{ kcal}/(\text{m h grad}) = 1,163 \text{ W}/(\text{m grad})$$

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.

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 $T_0 = 273,15$ °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:

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

Die Toleranzen betragen

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

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

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

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

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

darstellen.

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

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

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

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

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

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

gilt.

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:

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

Die Toleranzen wurden festgelegt auf

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

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

die Wärmeleitfähigkeit λ des überhitzten Dampfes in der Form

$$\frac{\lambda - \lambda_1}{10^{-3} \text{ W/(m grad)}} = \left[103,51 + 0,4198 \left(\frac{t}{^\circ\text{C}} \right) - 2,771 \cdot 10^{-5} \left(\frac{t}{^\circ\text{C}} \right)^2 \right] \left(\frac{\rho}{\text{g/cm}^3} \right) + \frac{2,1482 \cdot 10^{14}}{(t/^\circ\text{C})^{4,20}} \left(\frac{\rho}{\text{g/cm}^3} \right)^2 \quad \dots \quad (7)$$

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:

$$\frac{\lambda}{10^{-3} \text{ W/(m grad)}} = a_0 + a_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + a_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + a_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 + a_4 \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 + \frac{(p - p_s)}{\text{bar}} \left[b_0 + b_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + b_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + b_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \right] + \frac{(p - p_s)^2}{\text{bar}^2} \left[c_0 + c_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + c_2 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 + c_3 \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \right] \quad \dots \quad (8)$$

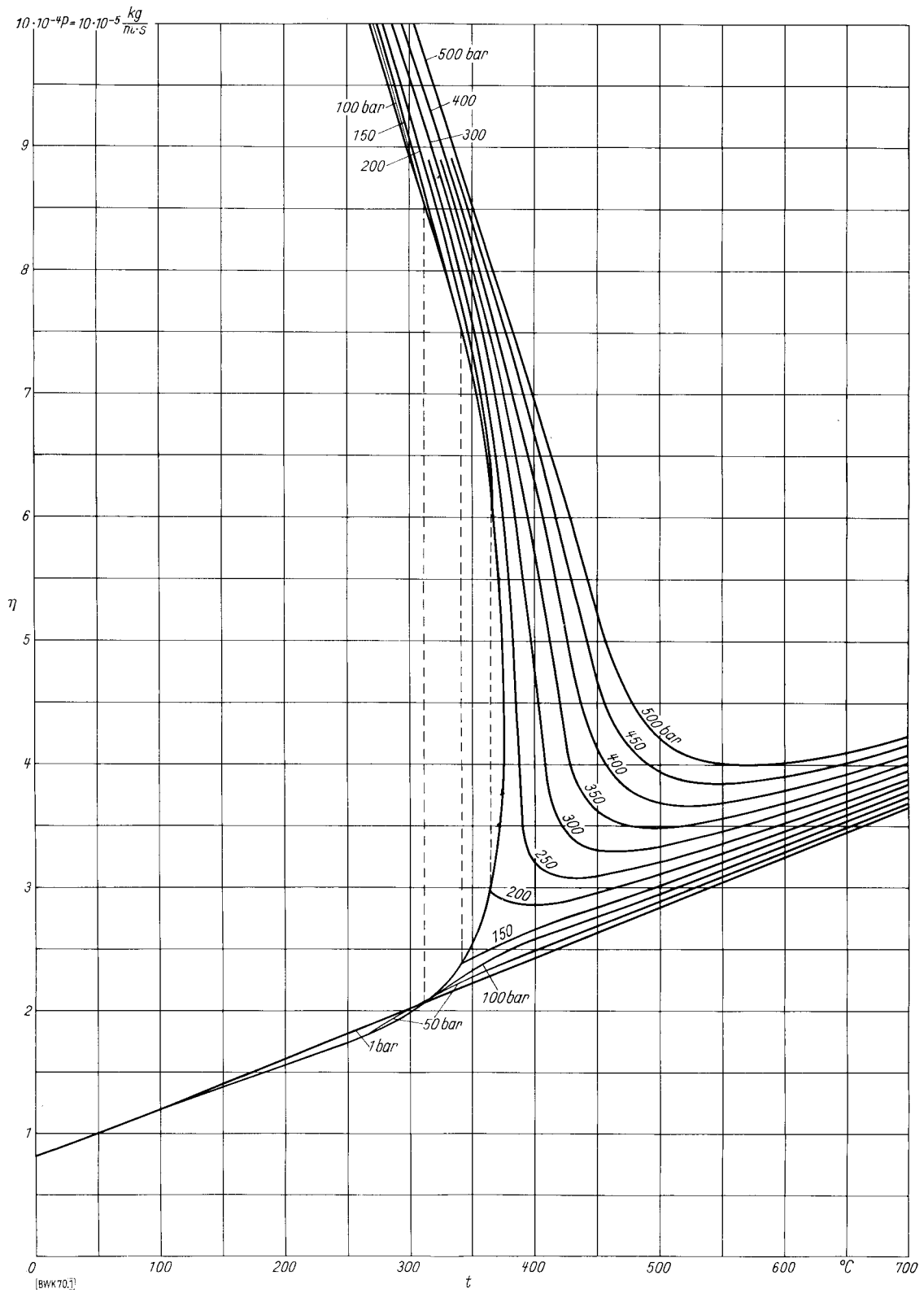


Bild 1. Dynamische Viskosität η von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .

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-Wasserdampf-Tabellen

Die in der 6. Auflage der VDI-Wasserdampf-Tabellen enthaltenen Tabellen der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich nur sehr wenig von den neuen Rahmentafeln. Dies ist darauf zurückzuführen, daß beide Tabellen sich wesentlich auf dieselben Versuchsergebnisse stützen. Die **Zahlentafeln 3** und **4** enthalten die Werte der dynamischen Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit beider Tabellen³⁾, soweit sie um mehr als die Toleranz der Rahmentafeln voneinander abweichen. Die VDI-Tabellen 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-Wasserdampf-Tabell zurückzuführen.

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

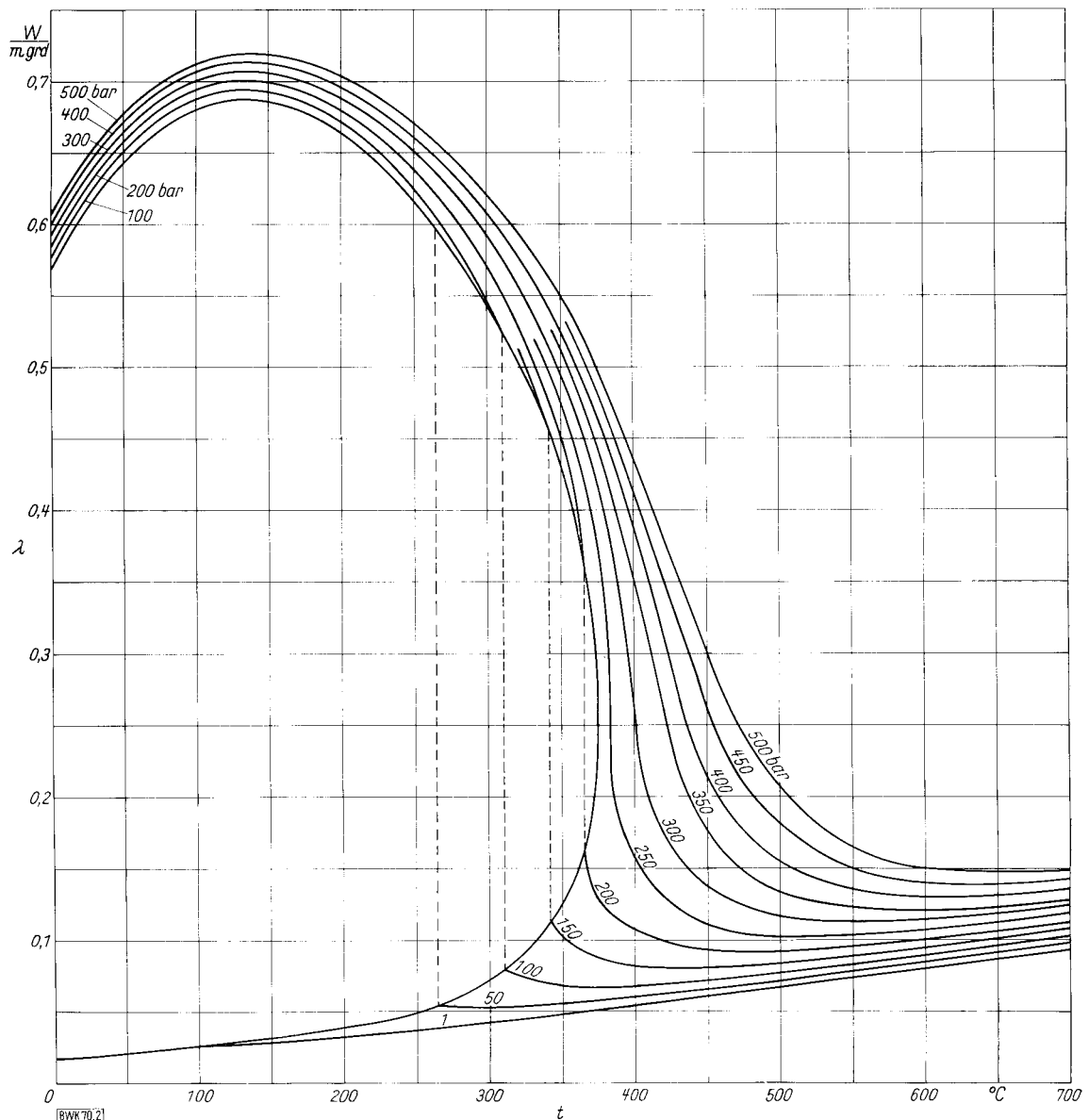


Bild 2. Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .

Zahlentafel 3. Vergleich der dynamischen Viskosität η .

Zustand		Internat. Rahmentafel			VDI-Wasserdampf tabel 1963		
Temperatur °C	Druck bar	η 10 ⁻⁶ Poise	Toleranz \pm 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 \pm 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-Isoterme 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 Pr a n d t l - Z a h l

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

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. 322/30.
- [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. *Teplotnergetika* **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

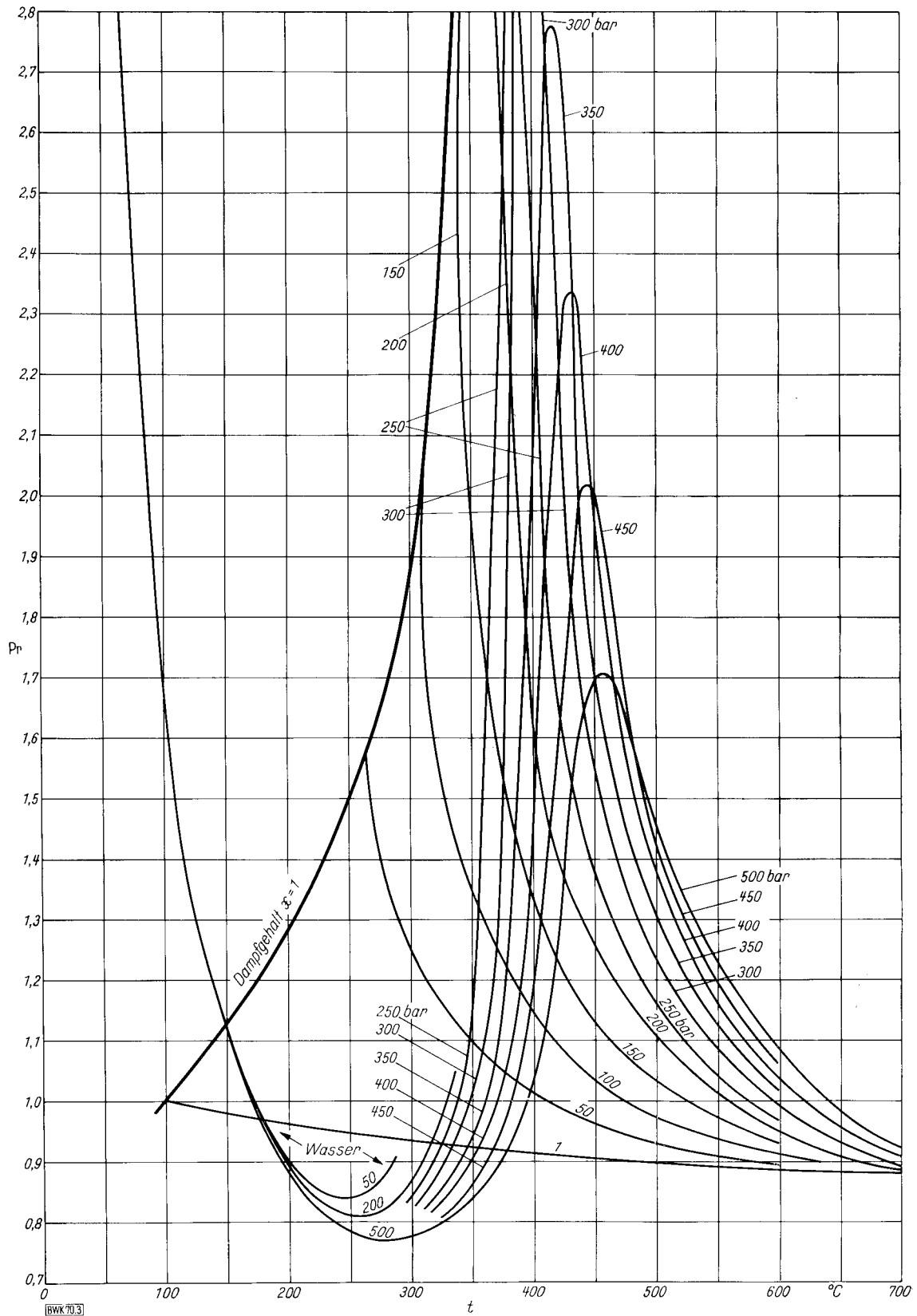


Bild 3. Prandtl-Zahl Pr von Wasser und Wasserdampf abhängig von der Temperatur t .