

Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Prandtl-Zahl von Wasser und Wasserdampf

U. GRIGULL, München, F. MAYINGER, Nürnberg, und J. BACH, München

Zusammenfassung. Die Transportgrößen Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Prandtl-Zahl von Wasser und Wasserdampf werden nach dem heutigen Stand des Wissens in Diagrammen und Zahlentafeln zusammengestellt. Ein Gleichungssystem zu ihrer Berechnung wird mitgeteilt. Zur graphischen Darstellung bewährt sich das Druck-Temperatur-Diagramm mit der Transportgröße als Parameter.

Abstract. The transport properties viscosity, thermal conductivity and Prandtl-number of ordinary water substance are compiled in diagrams and numerical tables with up-to-date-knowledge. A system of equations for their calculation is presented. For graphical illustration the pressure-temperature-diagram with transport property as parameter has proved well.

Einleitung

Von keinem anderen Stoff kennen wir die thermodynamischen und Transportgrößen so gut wie von Wasser und Wasserdampf. Da für absehbare Zeit Wasserdampf das wichtigste Arbeitsmedium für Wärmekraftwerke bleiben wird, hat man zur Ermittlung seiner Eigenschaften ein internationales Forschungsprogramm verabredet, dessen Ergebnisse von der Internationalen Konferenz über die Eigenschaften des Wasserdampfes (kurz Wasserdampfkonzferenz genannt) gesammelt und verglichen werden. Die heutigen Bestwerte der einzelnen Größen und ihre Toleranzen werden in Rahmentafeln zusammengestellt. Zur numerischen Berechnung werden Interpolationsgleichungen aufgestellt, die für elektronische Rechenmaschinen geeignet sind. Über den Stand dieser Arbeiten für Viskosität und Wärmeleitfähigkeit wurde vor einiger Zeit berichtet [1].

Seitdem sind von russischer [2] und deutscher [3] Seite neue Interpolationsgleichungen für die Wärmeleitfähigkeit λ entwickelt worden, deren Ergebnisse im folgenden mit den Werten der Rahmentafeln verglichen und in eng gestuften Tafeln zusammengestellt werden. Außerdem werden die früher [1] mitgeteilten Werte der Viskosität η unter Verwendung der international angenommenen Interpolationsgleichungen bis zu einem Druck von 800 bar erweitert. Die Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$ wird neu berechnet, wobei für die spezifische Wärmekapazität c_p jene Gleichungen verwendet werden, die das International Formulation Committee (IFC) der 6. Wasserdampfkonzferenz aufgestellt hat [4]. Neben der bisher üblichen Auftragung der Transportgrößen über der Temperatur mit dem Druck als Parameter (oder auch über dem Druck mit der Temperatur als Parameter) werden die Transportgrößen η , λ und Pr auch als Parameter in Druck-Temperatur-Diagrammen dargestellt. Man erhält damit eine sehr anschauliche Wiedergabe dieser komplizierten Funktionen.

Viskosität

Bild 1 zeigt die dynamische Viskosität η von Wasser und Wasserdampf im Temperaturbereich von 0 °C bis 700 °C und im Druckbereich von 1 bar bis 800 bar. Die

sehr hohen Werte der Viskosität von Wasser unterhalb von 200 °C sind der einfacheren Darstellung wegen weggelassen. Dieser Bereich kann in der p , t -Ebene mit der Viskosität η als Parameter ohne Schwierigkeit sichtbar gemacht werden (Bild 2). Die dort mit Sättigung bezeichnete Linie ist die Dampfdruckkurve von Wasser. Links und oberhalb dieser Kurve liegt der Bereich der Flüssigkeit, rechts und unterhalb der Bereich des Dampfes. Der kritische Punkt ist mit KP bezeichnet.

Ein Vergleich zwischen Bild 1 und 2 macht den eigentümlichen Einfluß des Druckes auf die Viskosität von überhitztem Dampf deutlich. Zwischen 100 °C und etwa 300 °C fällt die Viskosität mit steigendem Druck, oberhalb dieses Bereiches steigt die Viskosität mit steigendem Druck an. Die genaue Temperatur, bei der $(\partial\eta/\partial p)_T$ das Vorzeichen wechselt, läßt sich zur Zeit nicht angeben, da im Temperaturbereich von 270 bis 380 °C keine Messungen bekannt geworden sind.

Die in den Bildern 1 und 2 dargestellte Viskosität läßt sich durch vier Interpolationsgleichungen berechnen, die weiter unten mitgeteilt werden. Ihre Geltungsbereiche zeigt Bild 3. Der Bereich I gilt für Druckwasser, der Bereich II für überhitzten Dampf mit negativem Druckeinfluß $[(\partial\eta/\partial p)_T < 0]$ und der Bereich III für überhitzten Dampf mit positivem Druckeinfluß $[(\partial\eta/\partial p)_T > 0]$. Für den in Bild 3 schraffierten Bereich besteht zur Zeit keine Interpolationsgleichung. Die in diesem Bereich liegenden Werte der Viskosität in den Bildern 1 und 2 wurden durch graphische Interpolationen zwischen den Nachbarbereichen gewonnen.

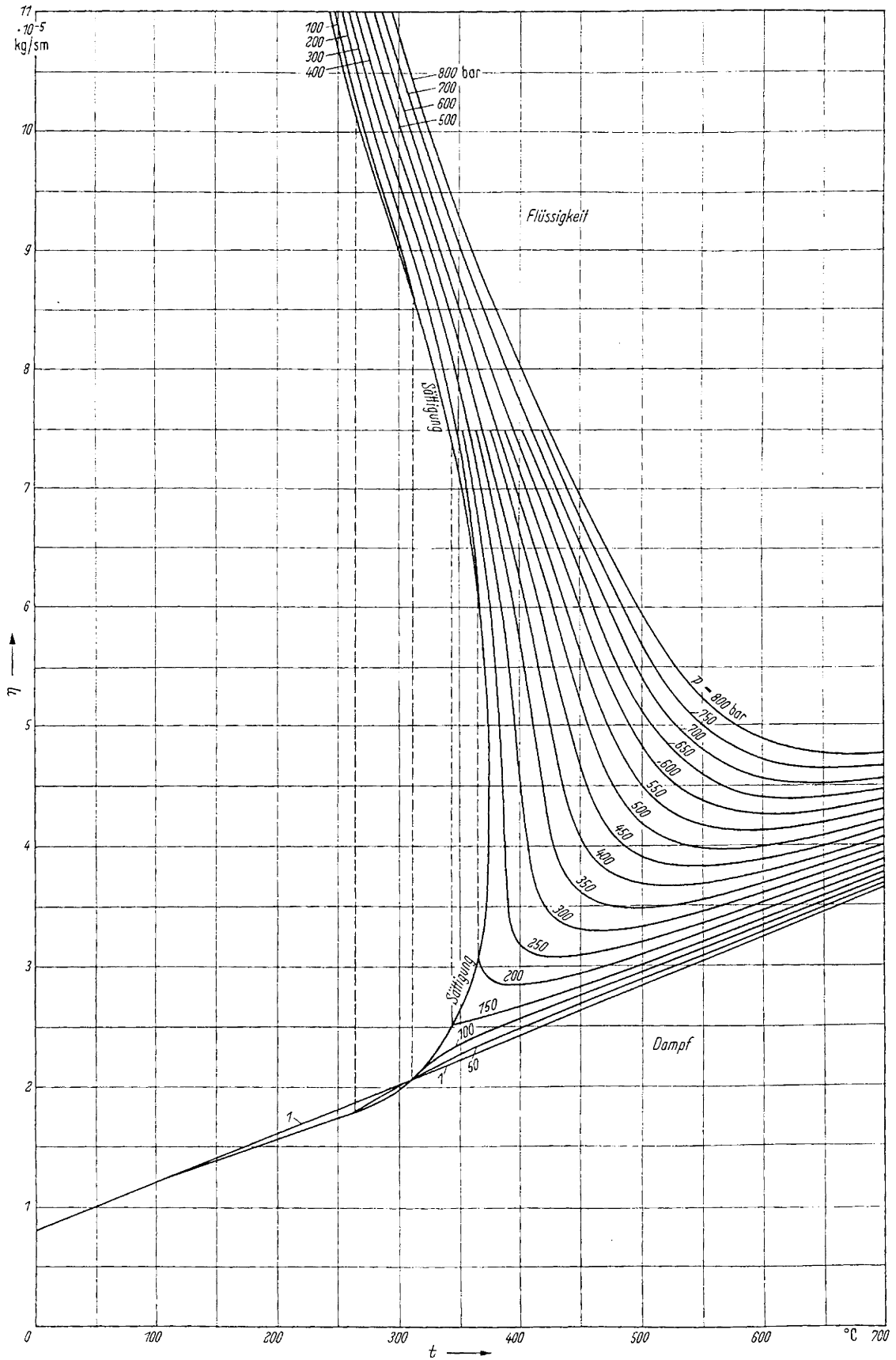
Die in den folgenden Gln. (1) bis (4) verwendeten Formelzeichen bedeuten:

η	dynamische Viskosität
v	spezifisches Volumen
p	Druck
T	Kelvin-Temperatur
Θ	reduzierte Temperatur ($\Theta = T/T_k$)
β	reduzierter Druck ($\beta = p/p_k$)
χ	reduziertes spezifisches Volumen ($\chi = v/v_k$)

Index k kritischer Zustand

Index s Sättigungszustand

Index 1 Zustand bei $p = 1$ bar

Bild 1. Viskosität η von Wasser und Wasserdampf als Funktion der Temperatur t mit dem Druck p als Parameter.

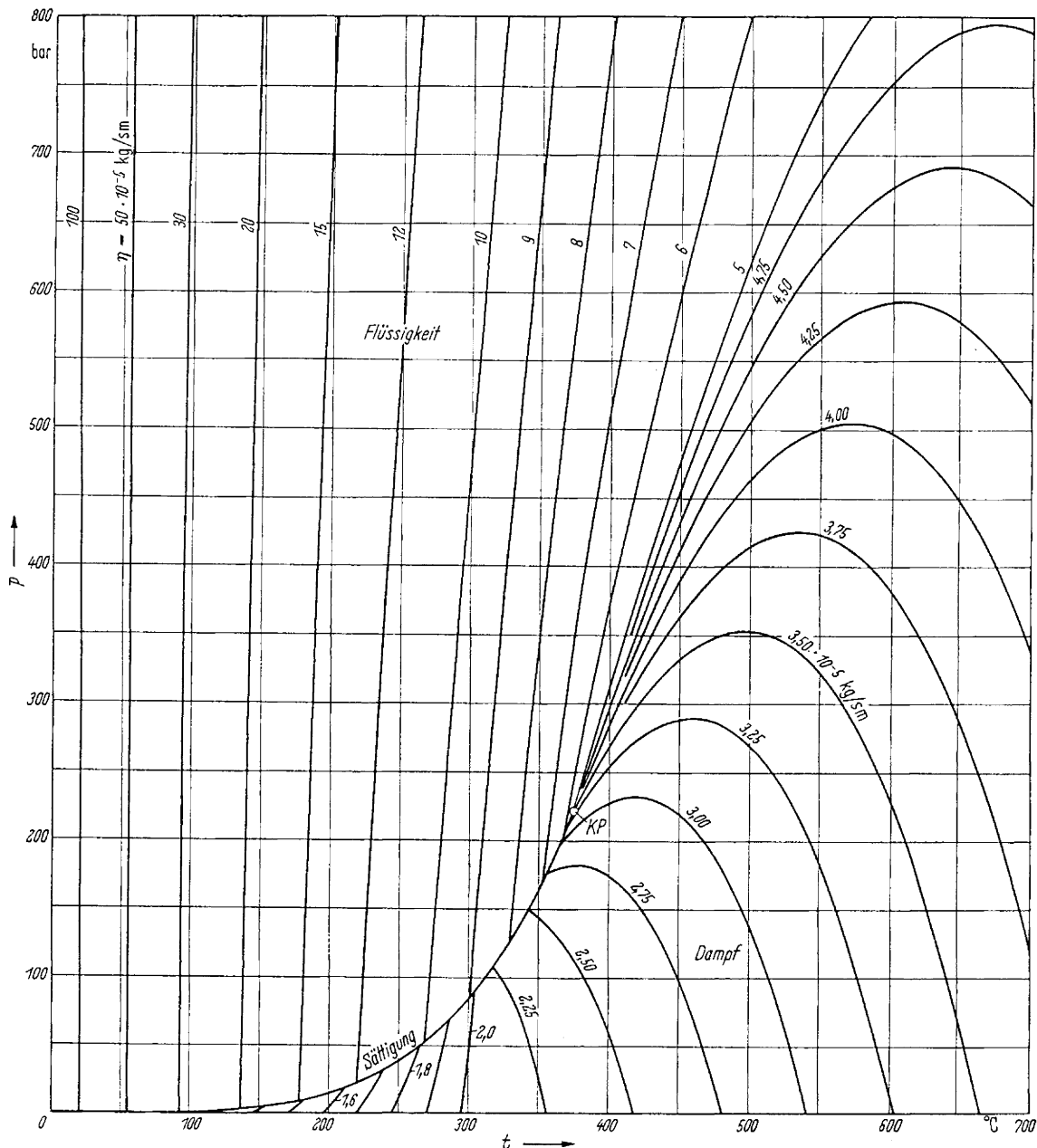


Bild 2. Druck-Temperatur-Diagramm von Wasser und Wasserdampf mit Linien gleicher Viskosität η . KP bedeutet kritischer Punkt.

Für die kritischen Zustandsgrößen von Wasser wurden folgende Werte verwendet:

$$T_k = 647,3 \text{ °K}; p_k = 221,2 \text{ bar}; v_k = 3,17 \text{ cm}^3/\text{g}.$$

Für den Druckwasserbereich I nach Bild 3 gilt folgende Gleichung:

$$\frac{\eta}{10^{-7} \text{ kg/sm}} = a_1 10^{\frac{a_2}{\Theta - a_3}} [1 + (\beta - \beta_a) a_4 (\Theta - a_5)]. \quad (1)$$

Sie ist anwendbar im Temperaturbereich von 0 bis 300 °C und vom Sättigungsdruck bis 800 bar. Die Konstanten dieser und nachfolgender Viskositätsgleichungen

sind weiter unten zusammengestellt.

Die Toleranzen betragen

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

Für überhitzten Wasserdampf bei $p = 1 \text{ bar}$ und für Temperaturen von 100 °C bis 700 °C, also an den Grenzen der Bereiche II und III nach Bild 3, gilt folgende Gleichung:

$$\frac{\eta_1}{10^{-7} \text{ kg/sm}} = b_1 (\Theta - b_2) + b_3. \quad (2)$$

Die Toleranzen betragen

$$\begin{aligned} &\pm 1\% \text{ für } 100^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}, \\ &\pm 3\% \text{ für } 300^\circ\text{C} < t \leq 700^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Für höhere Drücke gilt im Bereich II nach Bild 3 folgende Gleichung:

$$\frac{\eta}{10^{-7} \text{ kg/s m}} = \frac{\eta_1}{10^{-7} \text{ kg/s m}} - \frac{1}{\chi} [c_1 - c_2(\Theta - c_3)]. \quad (3)$$

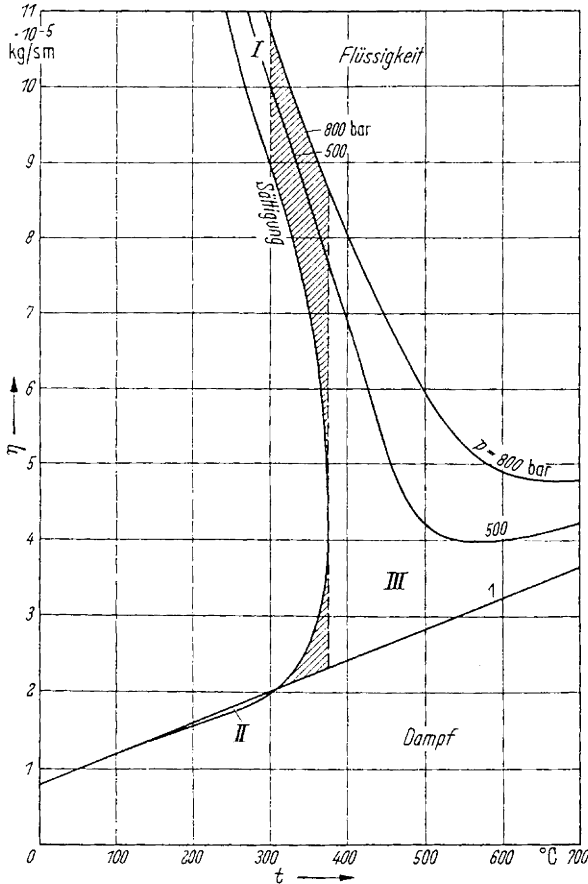


Bild 3. Bereiche I bis III für die Gültigkeit der Interpolationsgleichungen (1) bis (4). Die gestrichelten Linien bezeichnen die Bereichsgrenzen. Im schraffierten Gebiet existiert keine Interpolationsgleichung.

Sie ist anwendbar von 100 °C bis 300 °C und von 1 bar bis zum Sättigungsdruck. Die Toleranz beträgt $\pm 1\%$. Die Viskosität η_1 beim Druck $p = 1$ bar ist nach Gl. (2) zu berechnen.

Für höhere Drücke gilt im Bereich III nach Bild 3 folgende Gleichung:

$$\frac{\eta}{10^{-7} \text{ kg/s m}} = \frac{\eta_1}{10^{-7} \text{ kg/s m}} + \frac{d_1}{\chi} + \frac{d_2}{\chi^2} + \frac{d_3}{\chi^3}. \quad (4)$$

Sie ist anwendbar von 375 °C bis 700 °C und von 1 bar bis 800 bar. Die Toleranz beträgt $\pm 4\%$. Die Viskosität η_1 beim Druck $p = 1$ bar ist nach Gl. (2) zu berechnen. Die zur Anwendung von Gl. (3) und (4) gebrauchten Werte für das spezifische Volumen v sind nach [4] berechnet.

Die in den Gln. (1) bis (4) verwendeten Konstanten haben folgende Werte:

$$\begin{aligned} a_1 &= 2,414\,000\,000 \cdot 10^2 \\ a_2 &= 3,828\,209\,486 \cdot 10^{-1} \\ a_3 &= 2,162\,830\,218 \cdot 10^{-1} \\ a_4 &= 1,498\,693\,949 \cdot 10^{-1} \\ a_5 &= 4,711\,880\,117 \cdot 10^{-1} \\ b_1 &= 2,634\,511\,000 \cdot 10^2 \\ b_2 &= 4,219\,836\,243 \cdot 10^{-1} \\ b_3 &= 8,040\,000\,000 \cdot 10^1 \\ c_1 &= 5,861\,198\,738 \cdot 10^2 \\ c_2 &= 1,204\,753\,943 \cdot 10^3 \\ c_3 &= 4,219\,836\,243 \cdot 10^{-1} \\ d_1 &= 1,113\,564\,669 \cdot 10^2 \\ d_2 &= 6,732\,080\,129 \cdot 10^1 \\ d_3 &= 3,205\,147\,019 \end{aligned}$$

Aus den Gln. (1) bis (4) erhält man η in der Einheit $\text{kg/s m} = \text{N s/m}^2$, der kohärenten Einheit der Viskosität im Internationalen Einheitensystem. Die Umrechnungszahlen zu anderen Einheiten zeigt die nachstehende Tabelle.

	kg/s m	Poise (P)	cP	kps/m ²
1 kg/s m =	1	10	10 ³	0,10197
1 Poise (P) =	0,1	1	10 ²	0,010197
1 cP =	10 ⁻³	10 ⁻²	1	0,00010197
1 kps/m ² =	9,80665	98,0665	9806,65	1

Die Gln. (1) bis (4) sind international vereinbarte Interpolationsgleichungen für die Werte der Viskosität nach den Rahmentafeln der Wasserdampfkonzferenz. Sie entsprechen den Gln. (1) bis (5) nach [1], unterscheiden sich aber von diesen Gleichungen dadurch, daß in der vorliegenden Arbeit die unabhängigen Veränderlichen in dimensionsloser Form eingeführt sind. Bei der graphischen Interpolation zwischen den Bereichen I und III nach Bild 3 stellte sich heraus, daß für Temperaturen von 375 °C bis 420 °C und für Drücke von 500 bar bis 800 bar sowohl die Werte der Rahmentafel als auch die mit Gl. (4) berechneten Werte der Viskosität, die untereinander fast völlig übereinstimmen, einen unwahrscheinlichen Verlauf ergaben. Diese Werte sind als Kreise in Bild 4 eingetragen. Die ausgezogenen Kurven in Bild 4 entsprechen jenen Werten, die von den Verfassern der vorliegenden Arbeit nach dem heutigen Stand der Kenntnis für wahrscheinlich gehalten werden. Diese letztgenannten Viskositätswerte sind in die nachstehende Tabelle 1 aufgenommen. In Tabelle 4, die den Vergleich mit der Rahmentafel wiedergibt, sind die geänderten Rahmentafelwerte kursiv gedruckt. Diese geänderten Werte werden von den Verfassern der vorliegenden Arbeit als neue Rahmentafelwerte vorgeschlagen. Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, überschreiten die nach Gl. (4) berechneten Viskositätswerte im oben angegebenen Bereich die dort zugelassene Toleranz von $\pm 4\%$ auch gegenüber den geänderten Rahmentafelwerten nicht.

• Tabelle 1. Viskosität η von Wasser und Wasserdampf in 10^{-7} kg/s m als Funktion des Druckes p in bar und der Temperatur t in $^{\circ}\text{C}$. Die Werte unterhalb der Treppenkurve beziehen sich auf Wasserdampf

Temp. t in °C	Druck p in bar																		
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
0	17 500	17 500	17 500	17 500	17 500	17 400	17 400	17 400	17 400	17 300	17 300	17 300	17 200	17 200	17 200	17 200	17 100	17 100	17 100
10	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	12 900	12 900	12 900	12 900	12 900	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800
20	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	9 990	9 990	9 980	9 970	9 970	9 960	9 960	9 950	9 940	9 940	9 930	9 920	9 920
30	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 970	7 960	7 960	7 960	7 960	7 960	7 960	7 960
40	6 510	6 510	6 520	6 520	6 520	6 520	6 530	6 530	6 530	6 530	6 540	6 540	6 540	6 540	6 550	6 550	6 550	6 560	6 560
50	5 440	5 440	5 440	5 450	5 450	5 460	5 460	5 470	5 470	5 480	5 480	5 490	5 490	5 500	5 500	5 510	5 510	5 520	5 520
60	4 630	4 630	4 630	4 640	4 640	4 650	4 660	4 670	4 670	4 680	4 690	4 690	4 700	4 710	4 710	4 720	4 730	4 730	4 740
70	4 000	4 010	4 010	4 010	4 020	4 030	4 040	4 040	4 050	4 060	4 070	4 080	4 080	4 090	4 100	4 110	4 120	4 120	4 130
80	3 510	3 510	3 510	3 520	3 530	3 540	3 550	3 550	3 560	3 570	3 580	3 590	3 600	3 610	3 620	3 620	3 630	3 640	3 650
90	3 110	3 110	3 120	3 120	3 130	3 140	3 150	3 160	3 170	3 180	3 190	3 200	3 210	3 220	3 230	3 240	3 250	3 260	3 260
100	121,1	2 790	2 790	2 800	2 810	2 820	2 830	2 840	2 850	2 860	2 870	2 880	2 890	2 900	2 910	2 920	2 930	2 940	2 950
110	125,2	2 520	2 530	2 530	2 540	2 550	2 560	2 570	2 580	2 590	2 600	2 620	2 630	2 640	2 650	2 660	2 670	2 680	2 690
120	129,2	2 300	2 300	2 310	2 320	2 330	2 340	2 350	2 360	2 370	2 380	2 390	2 410	2 420	2 430	2 440	2 450	2 460	2 470
130	133,3	2 110	2 120	2 120	2 130	2 140	2 150	2 160	2 180	2 190	2 200	2 210	2 220	2 230	2 240	2 250	2 260	2 270	2 280
140	137,4	1 950	1 950	1 960	1 970	1 980	1 990	2 000	2 010	2 030	2 040	2 050	2 060	2 070	2 080	2 090	2 100	2 110	2 130
150	141,5	1 810	1 820	1 820	1 830	1 840	1 850	1 870	1 880	1 890	1 900	1 910	1 920	1 930	1 940	1 960	1 970	1 980	1 990
160	145,5	1 690	1 690	1 700	1 710	1 720	1 730	1 750	1 760	1 770	1 780	1 790	1 800	1 810	1 830	1 840	1 850	1 860	1 870
170	149,6	1 590	1 590	1 600	1 610	1 620	1 630	1 640	1 650	1 660	1 680	1 690	1 700	1 710	1 720	1 730	1 740	1 760	1 770
180	153,7	1 496	1 496	1 500	1 510	1 530	1 540	1 550	1 560	1 570	1 580	1 590	1 610	1 620	1 630	1 640	1 650	1 660	1 680
190	157,7	1 410	1 410	1 420	1 430	1 440	1 450	1 470	1 480	1 490	1 500	1 510	1 530	1 540	1 550	1 560	1 570	1 580	1 600
200	161,8	1 340	1 340	1 350	1 360	1 370	1 380	1 390	1 410	1 420	1 430	1 440	1 450	1 460	1 480	1 490	1 500	1 510	1 520
210	165,9	1 270	1 270	1 280	1 290	1 300	1 320	1 330	1 340	1 350	1 360	1 380	1 390	1 400	1 410	1 420	1 430	1 450	1 460
220	169,9	1 220	1 220	1 220	1 230	1 240	1 260	1 270	1 280	1 290	1 300	1 320	1 330	1 340	1 350	1 360	1 380	1 390	1 400
230	174,0	1 171,8	1 167,9	1 170	1 180	1 190	1 200	1 220	1 230	1 240	1 250	1 260	1 280	1 290	1 300	1 310	1 320	1 340	1 340
240	178,1	1 176,1	1 172,8	1 120	1 130	1 140	1 150	1 170	1 180	1 190	1 200	1 210	1 230	1 240	1 250	1 260	1 280	1 290	1 300
250	182,2	1 80,5	177,7	1 070	1 090	1 100	1 110	1 120	1 130	1 150	1 160	1 170	1 180	1 190	1 210	1 220	1 230	1 240	1 260
260	186,2	184,9	182,6	1 030	1 040	1 060	1 070	1 080	1 090	1 110	1 120	1 130	1 140	1 150	1 170	1 180	1 190	1 200	1 220
270	190,3	189,2	187,4	183,8	1 010	1 020	1 030	1 040	1 050	1 070	1 080	1 090	1 100	1 120	1 130	1 140	1 150	1 170	1 180
280	194,5	193,5	192,2	189,5	970	982	994	1 010	1 020	1 030	1 040	1 060	1 070	1 080	1 090	1 110	1 120	1 130	1 140
290	198,4	197,8	196,9	195,1	936	949	961	974	986	999	1 010	1 020	1 040	1 050	1 060	1 070	1 090	1 100	1 110
300	202,5	202,2	201,6	200,6	905	917	930	943	955	968	981	993	1 010	1 020	1 030	1 040	1 060	1 070	1 080
310	207	207	206	206	866	883	894	911	924	938	949	961	975	984	997	1 010	1 020	1 030	1 050
320	211	211	211	211	216	845	859	877	892	906	920	929	943	955	966	978	990	1 000	1 020
330	214	215	216	217	224	804	821	841	858	875	888	900	911	924	935	948	960	972	983
340	219	219	220	222	230	760	782	802	821	840	855	869	880	892	905	918	931	943	955

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Temp. t in $^{\circ}\text{C}$	Druck p in bar														
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
350	223	223	224	227	236	254	280	306	332	358	384	410	436	462	488
360	227	228	229	232	241	257	283	309	335	361	387	413	439	465	491
370	231	232	234	237	246	260	286	312	338	364	390	416	442	468	494
380	235	236	238	242	250	263	288	314	340	366	392	418	444	470	496
390	239	240	242	246	254	266	291	317	343	369	395	421	447	473	499
400	243	244	246	250	258	269	293	319	345	371	397	423	449	475	501
410	247	248	250	254	261	272	297	323	349	375	401	427	453	479	505
420	251	252	254	257	265	275	299	325	351	377	403	429	455	481	507
430	255	257	258	261	269	278	302	328	354	380	406	432	458	484	510
440	260	261	262	265	272	281	305	331	357	383	409	435	461	487	513
450	264	265	266	269	276	285	308	334	360	386	412	438	464	490	516
460	268	269	270	273	280	288	311	337	363	389	415	441	467	493	519
470	272	273	274	277	284	292	314	340	366	392	418	444	470	496	522
480	276	277	278	281	288	295	317	343	369	395	421	447	473	499	525
490	280	281	282	285	292	299	321	347	373	399	425	451	477	503	529
500	284	285	287	289	295	303	325	351	377	403	429	455	481	507	533
510	288	289	291	293	299	306	328	354	380	406	432	458	484	510	536
520	292	293	295	297	303	310	332	358	384	410	436	462	488	514	540
530	296	297	299	301	307	314	336	362	388	414	440	466	492	518	544
540	300	301	303	305	311	317	339	365	391	417	443	469	495	521	547
550	304	305	307	309	315	321	343	369	395	421	447	473	499	525	551
560	308	309	311	313	319	325	347	373	399	425	451	477	503	529	555
570	312	313	315	317	323	329	351	377	403	429	455	481	507	533	559
580	317	317	319	321	326	332	354	380	406	432	458	484	510	536	562
590	321	321	323	325	330	336	358	384	410	436	462	488	514	540	566
600	325	326	327	329	334	340	362	388	414	440	466	492	518	544	570
610	329	330	331	333	338	344	366	392	418	444	470	496	522	548	574
620	333	334	335	337	342	348	370	396	422	448	474	500	526	552	578
630	337	338	339	341	346	351	373	399	425	451	477	503	529	555	581
640	341	342	343	345	350	355	377	403	429	455	481	507	533	559	585
650	345	346	347	349	354	359	381	407	433	459	485	511	537	563	589
660	349	350	351	353	358	363	385	411	437	463	489	515	541	567	593
670	353	354	355	357	362	367	389	415	441	467	493	519	545	571	597
680	357	358	359	361	366	371	393	419	445	471	497	523	549	575	601
690	361	362	363	365	370	375	397	423	449	475	501	527	553	579	605
700	365	366	367	369	374	379	401	427	453	479	505	531	557	583	609

Tabelle 2. Viskosität η , Wärmeleitfähigkeit λ und Prandtl-Zahl Pr von gesättigtem Wasser (η' , λ' , Pr') und gesättigtem Dampf (η'' , λ'' , Pr'') als Funktion der Sättigungstemperatur t_s und des Sättigungsdruckes p_s (Temperaturstufung).

t_s °C	p_s bar	η'			λ'	Pr'		
		10^{-7} kg/s m				10^{-2} W/m grd		
0	0,006108	17 500	80,2	56,9	1,82	13,0	0,815	
10	0,012270	13 000	84,2	58,7	1,88	9,29	0,831	
20	0,02337	10 000	88,2	60,3	1,94	6,94	0,847	
30	0,04241	7 970	92,2	61,8	2,00	5,39	0,863	
40	0,07375	6 510	96,2	63,2	2,06	4,30	0,883	
50	0,12335	5 440	100,2	64,3	2,12	3,54	0,896	
60	0,19920	4 630	104,2	65,4	2,19	2,96	0,913	
70	0,3116	4 000	108,2	66,2	2,25	2,53	0,930	
80	0,4736	3 510	112,2	67,0	2,32	2,20	0,947	
90	0,7011	3 110	116,2	67,6	2,40	1,94	0,966	
100	1,0133	2 790	120,2	68,1	2,48	1,73	0,984	
110	1,4327	2 520	124,2	68,4	2,56	1,56	1,00	
120	1,9854	2 300	128,0	68,7	2,65	1,42	1,02	
130	2,7013	2 110	131,7	68,8	2,75	1,31	1,04	
140	3,614	1 950	135,4	68,8	2,85	1,21	1,06	
150	4,760	1 810	139,0	68,7	2,96	1,14	1,08	
160	6,181	1 690	142,5	68,4	3,08	1,07	1,11	
170	7,920	1 590	146,1	68,1	3,21	1,02	1,13	
180	10,027	1 490	149,6	67,7	3,36	0,970	1,15	
190	12,551	1 410	153,0	67,1	3,51	0,935	1,18	
200	15,549	1 340	156,5	66,5	3,68	0,904	1,21	
210	19,077	1 270	159,9	65,7	3,87	0,881	1,24	
220	23,198	1 220	163,4	64,8	4,07	0,864	1,26	
230	27,976	1 160	167,0	63,9	4,30	0,853	1,29	
240	33,478	1 110	170,7	62,8	4,55	0,846	1,33	
250	39,776	1 070	174,5	61,8	4,84	0,842	1,36	
260	46,943	1 030	178,5	60,3	5,17	0,848	1,40	
270	55,058	994	182,8	59,0	5,55	0,860	1,44	
280	64,202	961	187,5	57,5	6,00	0,883	1,49	
290	74,461	930	192,7	55,8	6,55	0,916	1,54	
300	85,927	901	198,4	54,1	7,22	0,958	1,61	
310	98,700	865	207	52,3	8,06	1,00	1,71	
320	112,89	830	217	50,8	8,65	1,07	1,94	
330	128,63	794	231	48,2	9,60	1,19	2,24	
340	146,05	754	247	46,0	10,7	1,35	2,82	
350	165,35	709	266	43,7	11,9	1,64	3,83	
360	186,75	653	292	39,9	13,7	2,38	5,34	
370	210,54	560	340	34,8	16,6	6,95	15,7	
374,15	221,20	450	450	23,8	23,8	∞	∞	

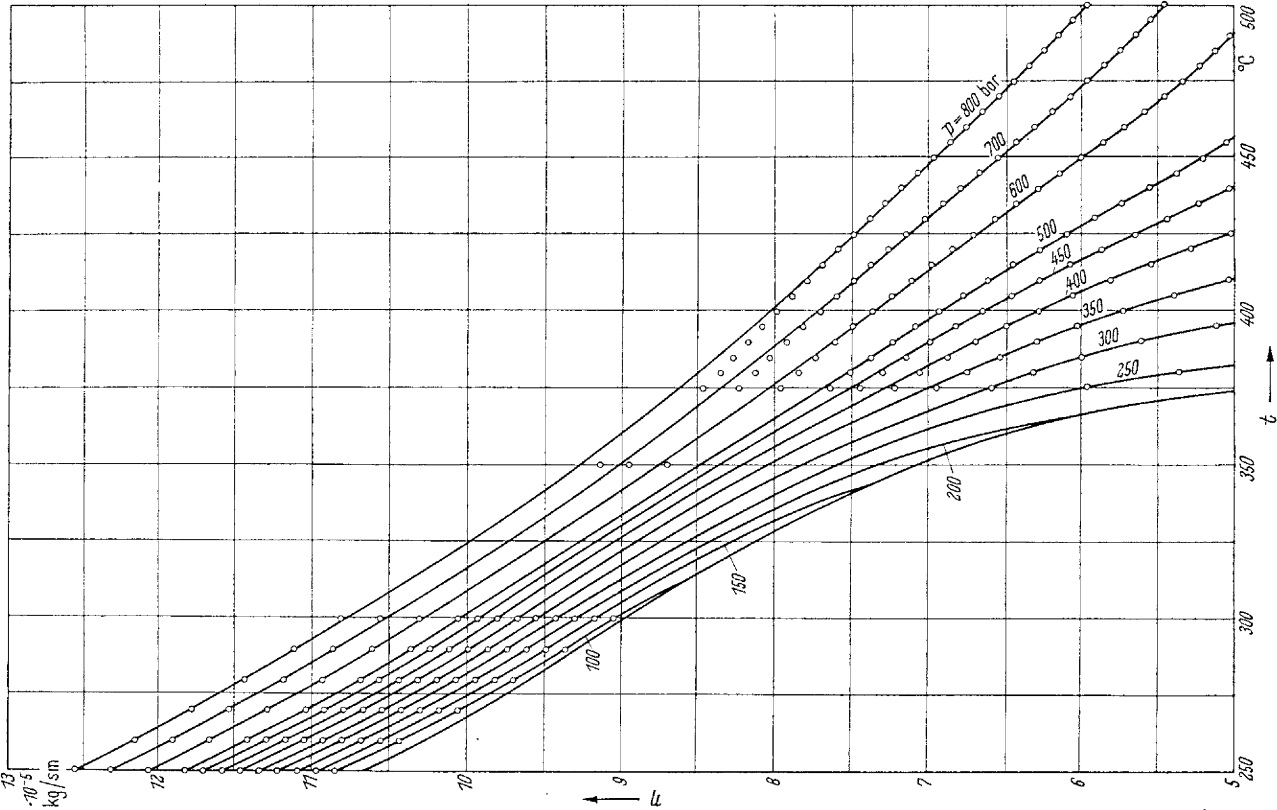


Bild 4. Abweichungen zwischen den η -Werten nach Gl. (4) bzw. denen der Rahmentafel 1964 (Kreise) und dem wahrscheinlichen Verlauf des Isobaren (ausgezogene Linien).

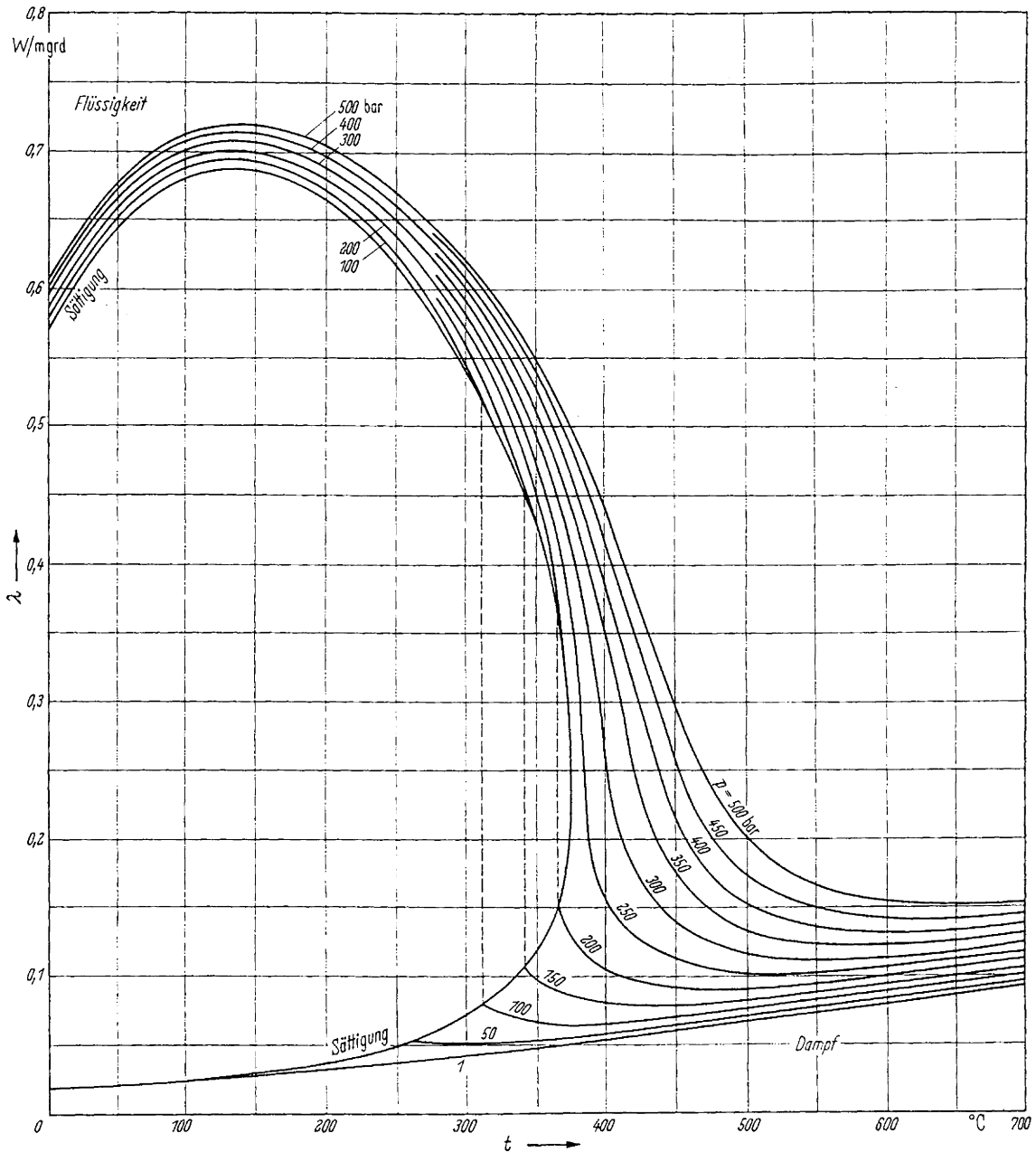


Bild 5. Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf als Funktion der Temperatur t mit dem Druck p als Parameter.

Tabelle 1 enthält die Viskositätswerte von Wasser und Wasserdampf im Temperaturbereich von 0 °C bis 700 °C in Stufen von 10 grd und im Druckbereich von 1 bar bis 800 bar, meist um 50 bar gestuft. Diese Viskositätswerte sind nach den Gln. (1) bis (4) in deren Geltungsbereich berechnet. Im schraffierten Bereich von Bild 3, für den keine Interpolationsgleichung existiert, sind die Viskositätswerte von Tabelle 1 durch graphische Interpolation gewonnen. Dabei wurden in jenem Teil von Bereich III nach Bild 3, in dem gemäß Bild 4 die Berechnung nach Gl. (4) unwahrscheinliche Werte ergab, geänderte Viskositätswerte nach den ausgezogenen Kurven von Bild 4 verwendet.

Die Tabellen 2 und 3 enthalten die Viskositätswerte η' für gesättigtes Wasser und η'' für gesättigten Dampf, wobei Tabelle 2 nach glatten Werten der Sättigungstemperatur t_s und Tabelle 3 nach glatten Werten des Sättigungsdruckes p_s gestuft sind. In diese Tabellen sind auch die Sättigungswerte der Wärmeleitfähigkeit (λ' und λ'') und der Prandtl-Zahl (Pr' und Pr'') aufgenommen.

Tabelle 4 zeigt den Vergleich der nach den Gln. (1) bis (4) berechneten Viskositätswerte mit den Werten der Rahmentafel, die 1964 von einer Arbeitsgruppe der Wasserdampfkongferenz aufgestellt wurde [1] und die daher kurz Rahmentafel 1964 genannt wird. In Ta-

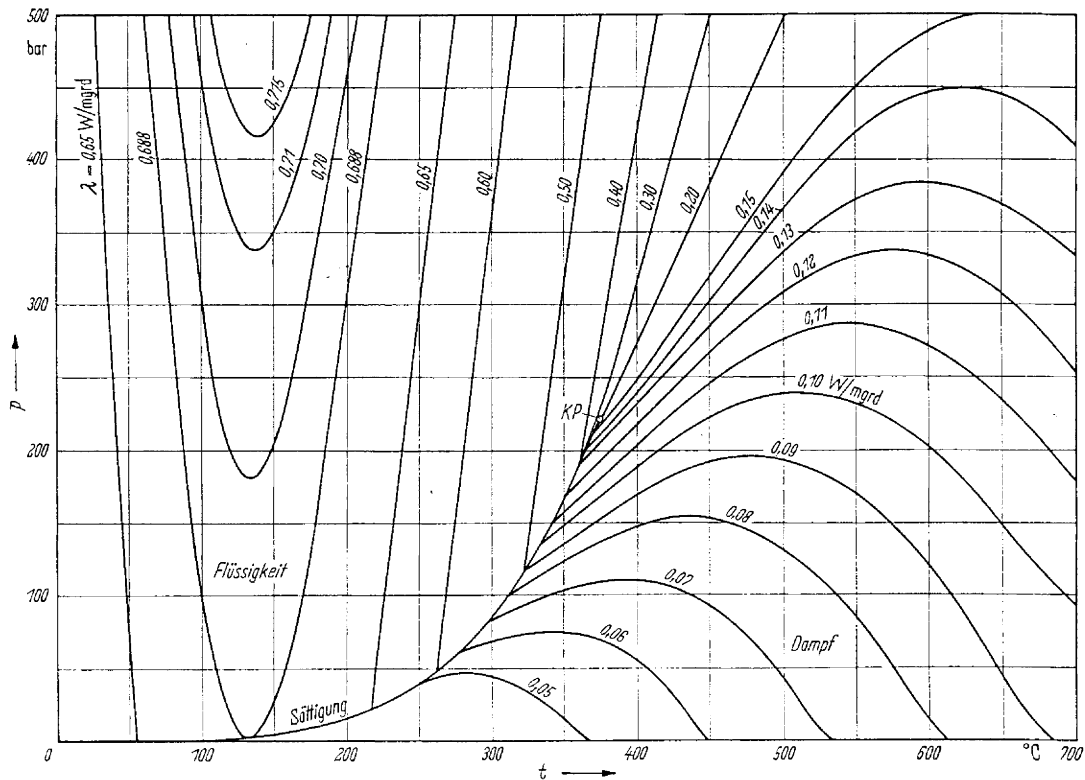


Bild 6. Druck-Temperatur-Diagramm von Wasser und Wasserdampf mit Linien gleicher Wärmeleitfähigkeit λ . KP bedeutet kritischer Punkt.

Tabelle 3. Viskosität η , Wärmeleitfähigkeit λ und Prandtl-Zahl Pr von gesättigtem Wasser (η' , λ' , Pr') und gesättigtem Dampf (η'' , λ'' , Pr'') als Funktion des Sättigungsdruckes p_s und der Sättigungstemperatur t_s (Druckstufung).

p_s	t_s	η'	η''	λ'	λ''	Pr'	Pr''	p_s	t_s	η'	η''	λ'	λ''	Pr'	Pr''
bar	°C	10^{-7} kg/s m		10^{-2} W/m grd		—		bar	°C	10^{-7} kg/s m		10^{-2} W/m grd		—	
0,01	6,983	14 200	83,0	58,1	1,86	10,3	0,829	110	318,05	836	215	50,7	8,50	1,07	1,89
0,05	32,898	7 500	93,4	62,3	2,02	5,03	0,868	120	324,65	813	223	49,3	9,08	1,13	2,06
0,1	45,83	5 850	98,7	63,9	2,10	3,83	0,894	130	330,83	790	232	48,1	9,68	1,20	2,29
0,5	81,35	3 450	113,0	66,9	2,33	2,16	0,953	140	336,64	768	241	46,9	9,97	1,28	2,67
1	99,63	2 800	120,1	68,0	2,48	1,74	0,982	150	342,13	745	252	45,5	10,8	1,40	3,05
10	179,88	1 490	149,6	67,6	3,36	0,971	1,15	160	347,33	724	260	44,1	11,4	1,55	3,56
20	212,37	1 260	160,8	65,5	3,91	0,878	1,24	170	352,26	698	271	42,5	12,2	1,86	3,97
30	233,84	1 140	168,4	63,5	4,38	0,847	1,31	180	356,96	670	283	41,1	13,0	2,09	4,66
40	250,33	1 070	174,6	61,7	4,85	0,845	1,36	190	361,43	643	296	39,4	13,9	2,57	5,85
50	263,91	1 020	180,2	59,9	5,31	0,857	1,41	200	365,70	606	307	37,4	15,0	3,57	8,05
60	275,55	975	185,4	58,1	5,78	0,874	1,47	210	369,78	565	336	34,4	16,4	6,68	15,0
70	285,79	942	190,4	56,4	6,31	0,903	1,52	220	373,69	505	390	26,5	20,0	8,44	17,0
80	294,97	915	195,5	54,8	6,87	0,939	1,58								
90	303,31	888	201	53,4	7,49	0,975	1,64								
100	310,96	860	208	52,0	8,14	1,02	1,72								

belle 4 sind ferner die Unterschiede zwischen den berechneten und den Rahmentafelwerten sowie die Toleranzen der Rahmentafel 1964 eingetragen. Diese geringfügigen Unterschiede rühren bei den mit Gln. (1) bis (3) errechneten Werten von verschiedenem Auf- und Abrunden in der Maschine her, bei den nach Gl. (4) errechneten Werten entstehen sie durch Verwenden der

Dichtewerte nach [4]. Die gemäß Bild 4 geänderten Rahmentafelwerte sind in Tabelle 4 kursiv gedruckt.

Wärmeleitfähigkeit

Bild 5 zeigt die Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf im Temperaturbereich von 0 °C bis 700 °C und im Druckbereich von 1 bar bis 500 bar. In

Tabelle 4. Viskosität η von Wasser und Wasserdampf in 10^{-7} kg/sm (Rahmentafelvergleich).

1. Zeile: Nach den Gln. (1) bis (4) berechneter Wert.

2. Zeile: Wert der Rahmentafel 1964.

3. Zeile: Betrag des Unterschiedes zwischen den Werten nach Zeile 1 und 2.

4. Zeile: Toleranz der Rahmentafel 1964.

Die Werte unterhalb der Treppenkurve beziehen sich auf Wasser. Geänderte Werte in der 2. Zeile gegenüber der Rahmentafel 1964 sind kursiv gedruckt. Alle Werte der 1. bis 4. Zeile beziehen sich auf die Einheit 10^{-7} kg/sm.

Druck p in bar	Temperatur t in °C																
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	700
1	17 500	5 440	121,1	141,5	161,8	182,2	202,5	223	233	243	253	264	274	284	304	325	345
	17 500	5 440	121,1	141,5	161,8	182,2	202,5	223	233	243	253	264	274	284	304	325	345
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	7	7	7	8	8	8	8	9	10	11
5	17 500	5 440	2 790	1 810	160,2	181,3	202,3		234	244	254	264	274	284	305	325	345
	17 500	5 440	2 790	1 810	160,2	181,4	202,3		234	244	254	264	274	284	305	325	345
	0	0	0	0	0	0,1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	1,2	1,8	2,0		9	10	10	11	11	11	12	13	15
10	17 500	5 440	2 790	1 810	158,5	180,5	202,2		234	244	255	265	275	285	305	326	346
	17 500	5 440	2 790	1 810	158,5	180,6	202,2		234	244	255	265	275	285	305	326	346
	0	0	0	0	0	0,1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	1,6	1,8	2,0		9	10	10	11	11	11	12	13	15
25	17 500	5 440	2 800	1 820	1 340	177,7	201,6		236	246	256	266	276	287	307	327	347
	17 500	5 440	2 800	1 820	1 340	177,8	201,6		236	246	256	266	276	287	307	327	347
	0	0	0	0	0	0,1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	1,8	2,0		9	10	10	11	11	12	12	13	15
50	17 500	5 450	2 800	1 820	1 350	1 070	200,6		240	250	259	269	279	289	309	329	349
	17 500	5 450	2 800	1 820	1 350	1 070	200,6		240	250	259	269	279	289	309	329	349
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	2,0		10	10	10	11	11	12	12	13	15
75	17 500	5 450	2 800	1 830	1 350	1 080	199,2		244	253	263	273	282	292	312	332	352
	17 500	5 450	2 800	1 830	1 350	1 080	199,2		244	253	263	273	282	292	312	332	352
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	2,0		10	10	10	11	11	12	12	13	15
100	17 500	5 450	2 810	1 830	1 360	1 090	905		249	258	267	276	286	295	315	334	354
	17 500	5 450	2 810	1 830	1 360	1 080	905		249	258	267	276	286	295	315	334	354
	0	0	0	0	0	10	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	23		10	10	11	11	11	12	13	13	15
125	17 500	5 450	2 810	1 840	1 360	1 090	911		254	263	271	280	289	299	318	337	357
	17 500	5 460	2 810	1 840	1 360	1 090	911		254	263	271	280	289	299	318	337	357
	0	10	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	23		10	10	11	11	12	12	13	14	15
150	17 400	5 460	2 820	1 840	1 370	1 100	917		262	269	276	285	293	303	321	340	359
	17 400	5 460	2 820	1 840	1 370	1 100	917		262	269	276	285	294	302	321	340	359
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	1	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	23		11	11	11	11	12	12	13	14	15
175	17 400	5 460	2 820	1 850	1 380	1 100	924		273	276	282	290	298	307	324	343	362
	17 400	5 460	2 820	1 850	1 380	1 100	924		273	276	282	290	298	307	324	343	362
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	23		11	11	11	12	12	12	13	14	15
200	17 400	5 460	2 830	1 860	1 380	1 110	930		291	286	289	296	303	311	328	346	365
	17 400	5 460	2 830	1 860	1 380	1 110	930	735	291	286	289	296	303	311	328	346	365
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	30	30	23	29	12	11	12	12	12	12	13	14	15
225	17 400	5 460	2 830	1 860	1 390	1 120	936		488	299	298	302	309	316	332	350	368
	17 400	5 460	2 830	1 860	1 390	1 120	936	747	491	299	298	302	309	316	332	350	368
	0	0	0	0	0	0	0		3	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	40	30	23	30	20	12	12	12	12	13	13	14	15
250	17 400	5 470	2 840	1 870	1 390	1 120	943		596	321	309	310	315	321	336	353	371
	17 400	5 470	2 840	1 870	1 390	1 120	943	760	597	321	309	310	315	321	336	353	371
	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	140	70	50	40	30	24	30	24	13	12	12	13	13	13	14	16

Tabelle 4 (Fortsetzung)

Druck p in bar	Temperatur t in °C																		
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700	
275	17 400	5 470	2 840	1 870	1 400	1 130	949		633	368	324	320	322	327	341	357	374	392	
	17 400	5 470	2 840	1 870	1 400	1 130	949	772	633	367	324	320	322	327	341	357	374	392	
	0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	400	140	70	50	40	30	24	31	25	15	13	13	13	13	14	14	15	16	
300	17 400	5 470	2 850	1 880	1 400	1 130	955		658	457	345	331	330	334	346	361	377	395	
	17 400	5 470	2 850	1 880	1 400	1 130	955	785	657	458	345	331	330	334	346	361	377	395	
	0	0	0	0	0	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	400	140	70	50	40	30	24	31	26	18	14	13	13	13	14	14	15	16	
350	17 300	5 480	2 860	1 890	1 420	1 150	968		695	573	417	363	351	349	357	369	385	401	
	17 300	5 480	2 860	1 890	1 420	1 150	968	805	693	573	416	363	351	349	357	369	385	401	
	0	0	0	0	0	0	0		2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	400	140	70	50	40	30	24	32	28	23	17	14	14	14	14	15	15	16	
400	17 300	5 480	2 870	1 900	1 430	1 160	981		722	628	502	412	379	369	369	379	392	408	
	17 300	5 480	2 870	1 900	1 430	1 160	981	825	721	628	503	411	379	369	369	379	392	408	
	0	0	0	0	0	0	0		1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
	700	200	120	80	60	50	39	33	29	25	20	16	15	15	15	15	16	16	
450	17 300	5 490	2 880	1 910	1 440	1 170	993		745	665	565	469	415	393	383	389	401	415	
	17 300	5 490	2 880	1 910	1 440	1 170	993	837	750	664	565	468	415	393	383	389	401	415	
	0	0	0	0	0	0	0		5	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	33	30	27	23	19	17	16	15	16	16	17	
500	17 200	5 490	2 890	1 920	1 450	1 180	1 010		764	693	610	521	456	422	400	401	410	423	
	17 200	5 490	2 890	1 920	1 450	1 180	1 010	850	768	693	609	521	456	421	400	401	410	423	
	0	0	0	0	0	0	0		4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	34	30	28	24	21	18	17	16	16	16	17	
550	17 200	5 500	2 900	1 930	1 460	1 190	1 020		781	717	644	564	496	453	419	414	420	431	
	17 200	5 500	2 900	1 930	1 460	1 200	1 020	860	788	716	643	564	497	453	418	414	420	431	
	0	0	0	0	0	10	0		7	1	1	0	1	0	1	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	34	31	29	26	23	20	18	17	16	17	17	
600	17 200	5 500	2 910	1 940	1 480	1 210	1 030		796	737	671	600	534	485	439	428	430	439	
	17 200	5 500	2 910	1 940	1 480	1 210	1 030	875	804	736	670	600	534	485	439	428	430	439	
	0	0	0	0	0	0	0		8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	35	32	29	27	24	21	19	18	17	17	18	
650	17 200	5 510	2 920	1 960	1 490	1 220	1 040		810	755	694	630	567	516	460	442	441	448	
	17 200	5 510	2 920	1 960	1 490	1 220	1 040	889	821	754	693	629	567	516	460	442	441	448	
	0	0	0	0	0	0	0		11	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	35	32	30	28	25	23	21	18	18	18	18	
700	17 100	5 510	2 930	1 970	1 500	1 230	1 060		823	771	714	655	596	545	482	458	453	458	
	17 100	5 510	2 930	1 970	1 500	1 230	1 060	902	836	770	713	654	596	545	482	458	453	458	
	0	0	0	0	0	0	0		13	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	36	33	31	28	26	24	22	19	18	18	18	
750	17 100	5 520	2 940	1 980	1 510	1 240	1 070		835	785	732	677	622	572	504	474	465	468	
	17 100	5 520	2 940	1 980	1 510	1 240	1 070	914	849	784	732	676	621	572	504	474	466	468	
	0	0	0	0	0	0	0		14	1	0	1	1	0	0	0	1	0	
	700	220	120	80	60	50	40	36	33	31	29	27	25	23	20	19	19	19	
800	17 100	5 520	2 950	1 990	1 520	1 260	1 080		846	799	749	697	645	596	525	491	478	478	
	17 100	5 520	2 950	1 990	1 520	1 260	1 080	926	862	798	748	695	644	596	526	491	478	478	
	0	0	0	0	0	0	0		16	1	1	2	1	0	1	0	0	0	
	700	220	120	80	60	50	40	37	34	32	30	28	26	24	21	20	19	19	

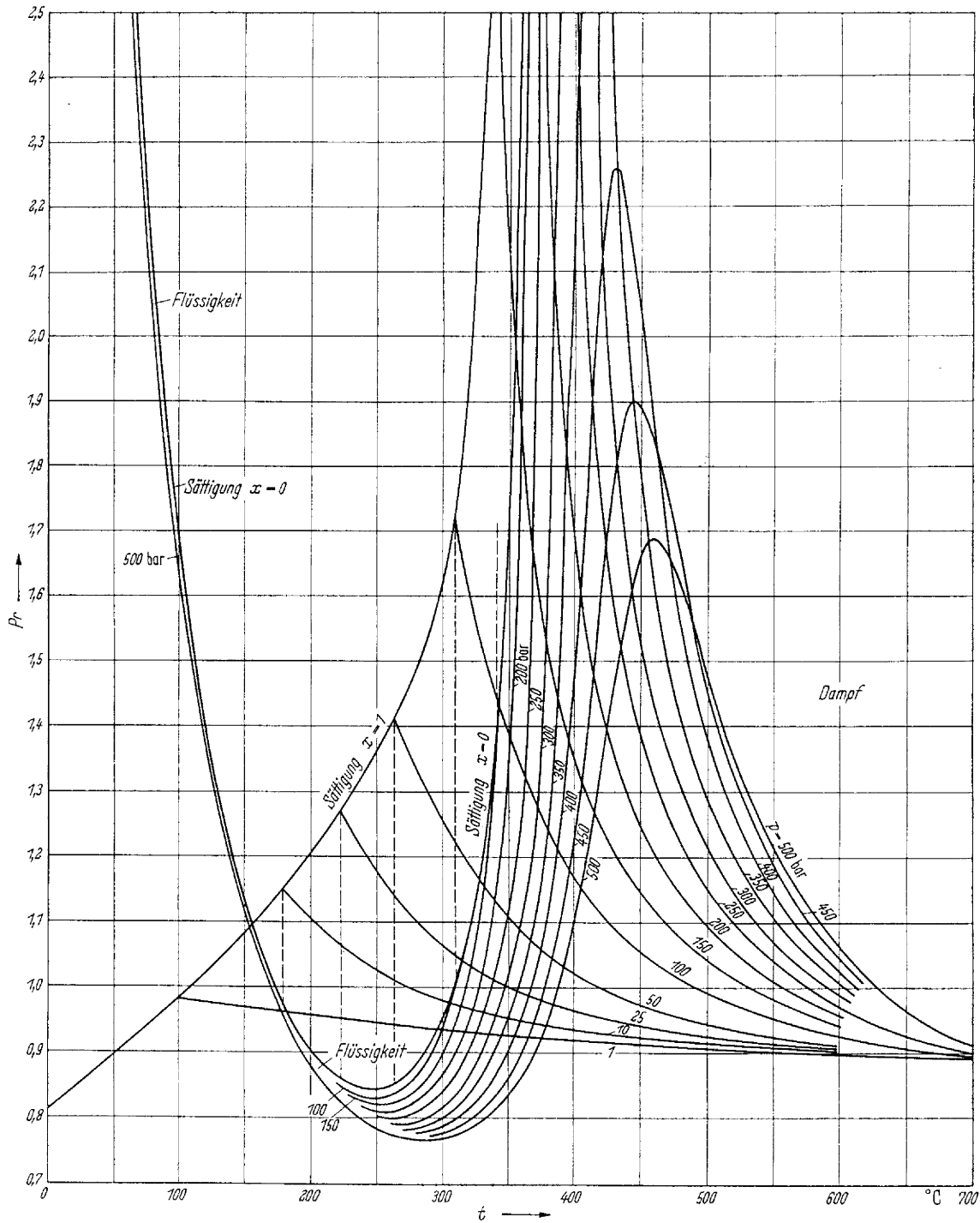


Bild 3. Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$ von Wasser und Wasserdampf als Funktion der Temperatur t mit dem Druck p als Parameter.

$$\begin{aligned} a_4 &= -2,316\,062\,510 \cdot 10^0 \\ b_0 &= -2,095\,427\,600 \cdot 10^{-1} \\ b_1 &= 1,320\,227\,345 \cdot 10^0 \\ b_2 &= -2,485\,904\,388 \cdot 10^0 \\ b_3 &= 1,517\,081\,933 \cdot 10^0 \\ c_0 &= 8,104\,183\,147 \cdot 10^{-2} \\ c_1 &= -4,513\,858\,027 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_2 &= 8,057\,261\,332 \cdot 10^{-1} \\ c_3 &= -4,668\,315\,566 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

Gl. (5) gilt von 0 °C bis 350 °C und vom Sättigungsdruck bis 500 bar. Die Toleranzen betragen

$$\begin{aligned} \pm 2\% &\text{ für } 0\,^\circ\text{C} \leq t \leq 300\,^\circ\text{C} \\ \pm 5\% &\text{ für } 300\,^\circ\text{C} < t \leq 350\,^\circ\text{C} \end{aligned}$$

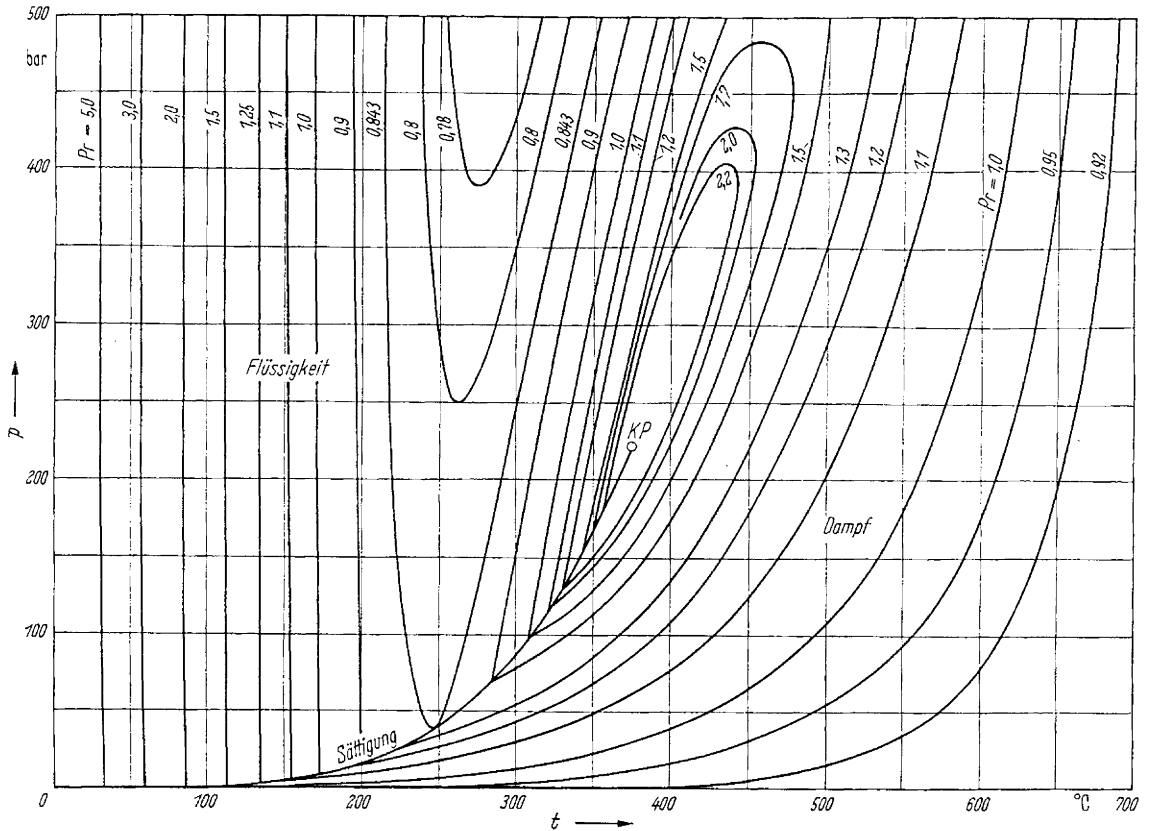


Bild 9. Druck-Temperatur-Diagramm von Wasser und Wasserdampf mit Linien gleicher Prandtl-Zahl Pr . KP bedeutet kritischer Punkt.

Gl. (5) entspricht Gl. (8) in [1]. Sie unterscheidet sich von ihr durch die Wahl anderer Bezugsgrößen für die dimensionslos gemachten unabhängigen Veränderlichen. Die zur Anwendung von Gl. (5) gebrauchten Werte für die Sättigungsdrücke sind nach [4] berechnet.

Für die Bereiche II und III nach Bild 7, das kritische und das überhitzte Gebiet, lassen sich zwei Interpolationsgleichungen [2, 3] verwenden, die zwar zur Zeit nicht international anerkannt sind, die aber mehr leisten, als die entsprechende, 1964 international angenommene Gl. (7) nach [1], auf deren Wiedergabe hier verzichtet sei.

Für den kritischen Bereich II nach Bild 7 handelt es sich um die Gleichung [2]

$$\Theta = \sum_{\nu=0}^{\nu=8} a_{\nu} \left(\frac{\lambda}{W/mgrd} \right)^{\nu} + (\beta - c_0) \sum_{\nu=0}^{\nu=8} b_{\nu} \left(\frac{\lambda}{W/mgrd} \right)^{\nu}. \quad (6)$$

Die Formelzeichen haben die gleiche Bedeutung wie zu den Gln. (1) bis (4). Für die Konstanten in Gl. (6) gelten folgende Werte:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,365\,350\,409 \cdot 10^0 \\ a_1 &= -4,802\,941\,449 \cdot 10^0 \\ a_2 &= 2,360\,292\,291 \cdot 10^1 \\ a_3 &= -5,144\,066\,584 \cdot 10^1 \\ a_4 &= 3,886\,072\,609 \cdot 10^1 \\ a_5 &= 3,347\,617\,334 \cdot 10^1 \\ a_6 &= -1,010\,369\,288 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_7 &= 1,012\,258\,396 \cdot 10^2 \\ a_8 &= -4,569\,066\,893 \cdot 10^1 \\ b_0 &= 1,514\,476\,538 \cdot 10^0 \\ b_1 &= -1,958\,487\,269 \cdot 10^1 \\ b_2 &= 1,136\,782\,784 \cdot 10^2 \\ b_3 &= -3,270\,035\,653 \cdot 10^2 \\ b_4 &= 3,973\,645\,617 \cdot 10^2 \\ b_5 &= 9,682\,365\,169 \cdot 10^1 \\ b_6 &= -7,030\,682\,926 \cdot 10^2 \\ b_7 &= 5,429\,942\,625 \cdot 10^2 \\ b_8 &= -8,566\,878\,481 \cdot 10^1 \\ c_0 &= 1,017\,179\,024 \cdot 10^0 \end{aligned}$$

Gl. (6) ist implizit in λ und beruht auf der Beobachtung, daß die Linien $\lambda = \text{const}$ in der p, t -Ebene nach Bild 6 im kritischen Gebiet nahezu geradlinig verlaufen. Die Toleranz im Bereich II beträgt $\pm 10\%$. Gl. (6) gilt von der Grenze zum Bereich I bei 350°C bis zur Grenze zum Bereich III, die durch die Gleichung

$$\beta = \sum_{\nu=0}^{\nu=2} e_{\nu} \Theta^{\nu} \quad (7)$$

bestimmt ist. Die Konstanten in Gl. (7) haben folgende Werte:

$$\begin{aligned} e_0 &= 5,060\,225\,796 \cdot 10^1 \\ e_1 &= -1,056\,677\,634 \cdot 10^2 \\ e_2 &= 5,596\,905\,687 \cdot 10^1 \end{aligned}$$

Gl. (7) stellt eine Parabel in der p, t -Ebene dar.

Tabelle 5. Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf in 10^{-2} W/m grd als Funktion des Druckes p in bar und der Temperatur t in $^{\circ}\text{C}$. Die Werte unterhalb der Treppenkurve beziehen sich auf Wasserdampf.

Temp. t in $^{\circ}\text{C}$	Druck p in bar												
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
0	56,9	57,0	57,1	57,3	57,7	58,1	58,5	58,9	59,2	59,6	59,9	60,3	60,6
10	58,7	58,8	58,9	59,1	59,5	59,9	60,3	60,7	61,1	61,4	61,8	62,1	62,4
20	60,4	60,4	60,6	60,8	61,2	61,6	62,0	62,3	62,7	63,0	63,4	63,7	64,0
30	61,8	61,9	62,0	62,3	62,7	63,1	63,4	63,8	64,2	64,5	64,8	65,1	65,4
40	63,2	63,2	63,4	63,6	64,0	64,4	64,8	65,1	65,5	65,8	66,1	66,4	66,7
50	64,3	64,4	64,5	64,7	65,1	65,5	65,9	66,2	66,6	66,9	67,2	67,5	67,8
60	65,4	65,4	65,6	65,8	66,1	66,5	66,9	67,2	67,6	67,9	68,2	68,5	68,7
70	66,2	66,3	66,4	66,6	67,0	67,4	67,7	68,1	68,4	68,7	69,0	69,3	69,5
80	67,0	67,1	67,2	67,4	67,7	68,1	68,4	68,8	69,1	69,4	69,7	70,0	70,2
90	67,6	67,7	67,8	68,0	68,3	68,7	69,0	69,3	69,6	70,0	70,3	70,5	70,8
100	2,48	68,1	68,2	68,4	68,8	69,1	69,5	69,8	70,1	70,4	70,7	71,0	71,3
110	2,55	68,5	68,6	68,8	69,1	69,4	69,8	70,1	70,4	70,7	71,0	71,3	71,6
120	2,62	68,7	68,8	69,0	69,3	69,7	70,0	70,3	70,6	70,9	71,2	71,5	71,8
130	2,70	68,8	68,9	69,1	69,4	69,8	70,1	70,4	70,7	71,0	71,4	71,7	72,0
140	2,78	68,8	68,9	69,1	69,4	69,8	70,1	70,4	70,7	71,1	71,4	71,7	72,0
150	2,86	68,7	68,8	69,0	69,3	69,6	70,0	70,3	70,6	71,0	71,3	71,6	72,0
160	2,95	68,5	68,6	68,7	69,1	69,4	70,0	70,1	70,5	70,8	71,1	71,5	71,8
170	3,04	68,1	68,2	68,4	68,8	69,1	69,5	69,8	70,2	70,5	70,9	71,2	71,6
180	3,13	3,36	67,8	68,0	68,3	68,7	69,1	69,5	69,8	70,2	70,6	70,9	71,3
190	3,22	3,42	67,2	67,4	67,8	68,2	68,6	69,0	69,4	69,8	70,2	70,5	70,9
200	3,31	3,50	66,5	66,8	67,2	67,6	68,1	68,5	68,9	69,3	69,7	70,1	70,4
210	3,41	3,57	65,8	66,0	66,5	67,0	67,4	67,9	68,3	68,7	69,1	69,5	69,9
220	3,51	3,66	64,9	65,1	65,7	66,2	66,7	67,2	67,6	68,1	68,5	68,9	69,3
230	3,61	3,74	4,17	64,1	64,7	65,3	65,9	66,4	66,9	67,4	67,8	68,2	68,7
240	3,71	3,83	4,21	63,0	63,7	64,3	64,9	65,5	66,1	66,6	67,0	67,5	67,9
250	3,81	3,92	4,26	61,8	62,5	63,3	63,9	64,6	65,2	65,7	66,2	66,7	67,1
260	3,91	4,02	4,32	60,4	61,3	62,1	62,8	63,5	64,2	64,8	65,3	65,8	66,3
270	4,01	4,11	4,39	5,26	59,8	60,7	61,6	62,4	63,1	63,7	64,3	64,9	65,3
280	4,12	4,21	4,47	5,21	58,2	59,3	60,2	61,1	61,9	62,6	63,3	63,9	64,3
290	4,22	4,31	4,55	5,20	56,5	57,7	58,7	59,7	60,6	61,4	62,2	62,8	63,3
300	4,33	4,42	4,63	5,21	54,5	55,9	57,1	58,2	59,2	60,1	60,9	61,6	62,2
310	4,44	4,52	4,72	5,24	52,3	53,9	55,3	56,6	57,7	58,7	59,6	60,4	61,0
320	4,55	4,63	4,81	5,28	7,58	51,6	53,2	54,7	56,0	57,2	58,2	59,0	59,7
330	4,66	4,73	4,91	5,34	7,21	49,1	50,9	52,6	54,1	55,4	56,6	57,5	58,3
340	4,77	4,84	5,01	5,40	6,97	46,2	48,4	50,3	52,0	53,5	54,8	55,9	56,8
350	4,88	4,95	5,11	5,48	6,83	9,90	45,4	47,6	49,6	51,4	52,9	54,1	55,2
360	4,99	5,06	5,22	5,56	6,75	9,25	41,2	44,4	46,8	48,8	50,6	52,2	53,7
370	5,11	5,17	5,32	5,64	6,71	8,83	13,6	40,4	45,2	46,0	48,1	49,9	51,6
380	5,22	5,29	5,43	5,73	6,70	8,60	12,2	33,4	43,6	42,8	45,2	47,3	49,2
390	5,34	5,40	5,54	5,83	6,71	8,35	11,3	17,6	34,6	39,2	42,1	44,4	46,6
400	5,45	5,52	5,65	5,93	6,74	8,18	10,6	15,4	26,3	35,1	38,8	41,5	43,7
410	5,57	5,63	5,76	6,03	6,79	8,06	10,1	13,9	21,7	30,0	35,4	38,5	41,0
420	5,69	5,75	5,88	6,13	6,85	8,00	9,80	12,9	18,8	25,4	31,6	35,6	38,3
430	5,81	5,87	5,99	6,24	6,91	7,96	9,56	12,1	16,7	22,0	27,4	32,5	35,7
440	5,92	5,99	6,11	6,35	6,99	7,96	9,38	11,5	15,2	19,5	24,1	29,0	33,1
450	6,04	6,11	6,23	6,46	7,07	7,97	9,27	11,1	14,1	17,6	21,5	25,9	30,7
460	6,17	6,23	6,35	6,58	7,16	8,00	9,19	10,8	13,3	16,2	19,6	23,4	27,7
470	6,29	6,35	6,47	6,69	7,26	8,05	9,14	10,6	12,7	15,2	18,0	21,4	25,2
480	6,41	6,47	6,59	6,81	7,36	8,10	9,12	10,4	12,2	14,4	16,9	19,8	23,2
490	6,53	6,59	6,71	6,93	7,46	8,17	9,13	10,4	11,9	13,8	16,0	18,5	21,5
500	6,66	6,72	6,83	7,05	7,57	8,25	9,15	10,3	11,7	13,4	15,3	17,6	20,2
510	6,78	6,84	6,96	7,17	7,68	8,33	9,18	10,2	11,5	13,0	14,8	16,8	19,1
520	6,91	6,97	7,09	7,30	7,79	8,42	9,23	10,2	11,4	12,8	14,4	16,2	18,3
530	7,03	7,10	7,21	7,42	7,91	8,52	9,29	10,2	11,3	12,6	14,1	15,7	17,6
540	7,16	7,22	7,34	7,55	8,03	8,62	9,36	10,3	11,3	12,5	13,8	15,3	17,0

Tabelle 5 (Fortsetzung)

Temp. t in °C	Druck p in bar												
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
550	7,29	7,35	7,47	7,68	8,15	8,73	9,44	10,3	11,3	12,4	13,6	15,0	16,6
560	7,41	7,48	7,60	7,81	8,28	8,84	9,53	10,3	11,3	12,3	13,5	14,8	16,2
570	7,54	7,61	7,73	7,94	8,40	8,96	9,62	10,4	11,3	12,3	13,4	14,6	16,0
580	7,67	7,74	7,86	8,07	8,53	9,07	9,72	10,5	11,3	12,3	13,3	14,5	15,7
590	7,80	7,87	7,99	8,20	8,66	9,19	9,83	10,6	11,4	12,3	13,3	14,4	15,5
600	7,93	8,00	8,12	8,33	8,79	9,32	9,94	10,6	11,4	12,3	13,2	14,3	15,4
610	8,06	8,13	8,25	8,47	8,92	9,45	10,1	10,7	11,5	12,3	13,2	14,2	15,3
620	8,20	8,27	8,39	8,60	9,06	9,58	10,2	10,8	11,6	12,4	13,3	14,2	15,2
630	8,33	8,40	8,52	8,74	9,19	9,71	10,3	11,0	11,7	12,5	13,3	14,2	15,2
640	8,46	8,53	8,66	8,87	9,33	9,84	10,4	11,1	11,8	12,5	13,3	14,2	15,2
650	8,60	8,67	8,79	9,01	9,47	9,98	10,6	11,2	11,9	12,6	13,4	14,2	15,2
660	8,73	8,81	8,93	9,15	9,61	10,1	10,7	11,3	12,0	12,7	13,5	14,3	15,2
670	8,87	8,94	9,07	9,29	9,75	10,3	10,8	11,4	12,1	12,8	13,6	14,3	15,2
680	9,00	9,08	9,21	9,43	9,89	10,4	11,0	11,6	12,2	12,9	13,6	14,4	15,2
690	9,14	9,22	9,35	9,57	10,0	10,5	11,1	11,7	12,3	13,0	13,7	14,5	15,3
700	9,28	9,35	9,49	9,71	10,2	10,7	11,2	11,8	12,5	13,1	13,8	14,6	15,4

Tabelle 6. Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser und Wasserdampf in 10^{-3} W/mgrd (Rahmentafelvergleich).

1. Zeile: Nach den Gln. (5) bis (8) berechneter Wert.

2. Zeile: Wert der Rahmentafel 1964.

3. Zeile: Betrag des Unterschiedes zwischen den Werten nach Zeile 1 und 2.

4. Zeile: Toleranz der Rahmentafel 1964.

Die Werte unterhalb der Treppenkurve beziehen sich auf Wasser. Für alle Werte der 1. bis 4. Zeile gilt die Einheit 10^{-3} W/mgrd.

Druck p in bar	Temperatur t in °C																	
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700
1	569	643	24,8	28,6	33,1	38,1	43,3	48,8	51,6	54,5	57,5	60,4	63,5	66,6	72,9	79,3	86,0	92,8
	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
	0	0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,7	0,8	1,0	1,3	1,4	1,5
	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	38,5	43,6	49,1	51,9	54,8	57,7	60,7	63,7	66,8	73,1	79,6	86,3	93,1
	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
	0	0	0	0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,2	1,3	1,4	1,5
	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	35,0	39,2	44,2	49,5	52,3	55,2	58,1	61,1	64,1	67,2	73,5	80,0	86,7	93,5
	570	644	681	687	35,1	39,1	44,4	49,9	52,8	55,7	58,8	61,8	65,0	68,2	74,7	81,4	88,2	95,0
	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,5
	1	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	42,6	46,3	51,1	53,7	56,5	59,3	62,3	65,3	68,3	74,7	81,2	87,9	94,9
	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
	0	0	0	0	0	0,3	0,2	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,4
	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	665	618	52,1	54,8	56,9	59,3	61,9	64,6	67,5	70,5	76,8	83,3	90,1	97,1
	573	647	684	690	665	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
	0	0	0	0	0	0	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,6	1,5
	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	63,2	60,1	61,1	62,8	65,0	67,4	70,1	72,9	79,0	85,5	92,3	99,4
	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
	0	0	0	0	0	0	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	1,9	1,7	1,6
	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	68,3	67,0	67,4	68,8	70,7	73,1	75,7	81,5	87,9	94,7	102
	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
	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,9	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	2,0	1,9	1,7	1
	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

Tabelle 6 (Fortsetzung)

Druck p in bar	Temperatur t in °C																	
	0	50	100	150	200	250	300	350	375	400	425	450	475	500	550	600	650	700
125	579	653	689	695	674	629	552	81,9	75,5	73,6	73,6	74,8	76,6	78,8	84,2	90,4	97,2	104
	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
	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,4	0,9	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,0	1,7	1
	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	105	87,7	81,8	79,8	79,7	80,7	82,5	87,3	93,2	99,8	107
	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
	0	0	0	0	0	0	0	1	0,2	0,4	0,9	1,3	1,7	1,8	2,0	1,9	1,2	1
	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	105	92,4	87,4	85,6	85,6	86,7	90,7	96,2	103	110
	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
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,2	0,5	0,9	1,3	1,6	1,8	1,8	1	0
	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	128	106	96,7	92,7	91,3	91,5	94,4	99,4	106	112
	585	659	695	700	681	639	571	454	126	107	96,9	93,1	92,1	92,6	96,0	101	107	113
	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0,2	0,4	0,8	1,1	1,6	1,6	1	1
	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	307	125	108	101	97,8	96,8	98,5	103	109	115
	587	661	696	701	683	642	577	465	297	130	109	101	98,1	97,4	99,6	104	110	115
	0	0	0	0	0	0	0	0	10	5	1	0	0,3	0,6	1,1	1	1	0
	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	154	125	111	105	103	103	107	112	118
	589	662	698	703	685	646	582	476	376	157	125	111	105	103	104	107	112	118
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0
	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	587	486	400	201	148	125	114	110	108	110	115	122
	591	664	699	705	687	649	587	486	402	200	147	123	113	109	108	111	115	121
	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	1	1	0	1	0	1
	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	417	263	176	141	124	117	113	114	119	125
	592	666	701	706	689	652	592	496	419	264	171	138	122	116	112	114	118	124
	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	5	3	2	1	1	0	1	1
	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	236	176	148	134	124	123	126	131
	596	669	704	710	693	657	601	514	444	351	239	182	147	132	122	122	125	129
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	1	2	2	1	1	2
	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	467	388	296	216	174	153	136	133	134	138
	599	672	707	713	697	662	609	529	468	390	296	220	177	153	134	130	132	135
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	4	3	0	2	3	2	3
	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	487	415	341	259	205	176	150	143	143	146
	603	675	710	716	701	667	616	541	486	416	333	264	210	180	148	139	139	142
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	5	5	4	2	4	4	4
	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	505	437	370	307	242	202	166	154	152	154
	606	678	713	720	704	671	622	552	501	436	370	301	246	206	163	149	147	148
	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	6	4	4	5	5	5	6
	12	14	14	14	14	13	12	28	50	44	37	30	25	21	10	9	9	9

Tabelle 7. Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$ von Wasser und Wasserdampf als Funktion des Druckes p in bar und der Temperatur t in °C.
Die Werte unterhalb der Treppenkurve beziehen sich auf Wasserdampf.

Temp. t in °C	Druck p in bar												
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
0	13,0	13,0	12,9	12,8	12,6	12,4	12,3	12,1	11,9	11,8	11,6	11,5	11,4
10	9,28	9,26	9,22	9,17	9,05	8,94	8,84	8,73	8,63	8,55	8,45	8,37	8,30
20	6,94	6,93	6,90	6,86	6,79	6,72	6,65	6,59	6,52	6,47	6,40	6,35	6,30
30	5,39	5,38	5,36	5,33	5,28	5,23	5,19	5,14	5,09	5,06	5,02	4,98	4,95
40	4,30	4,30	4,29	4,27	4,23	4,20	4,16	4,13	4,10	4,08	4,05	4,02	4,00
50	3,54	3,53	3,52	3,51	3,48	3,46	3,43	3,41	3,38	3,36	3,34	3,32	3,31
60	2,96	2,96	2,95	2,94	2,93	2,91	2,88	2,87	2,85	2,83	2,82	2,81	2,80
70	2,53	2,53	2,53	2,52	2,50	2,48	2,47	2,46	2,45	2,43	2,42	2,41	2,41
80	2,20	2,20	2,19	2,19	2,18	2,16	2,15	2,14	2,13	2,12	2,12	2,11	2,10
90	1,94	1,93	1,93	1,93	1,92	1,91	1,90	1,89	1,89	1,88	1,87	1,87	1,86
100	0,984	1,73	1,73	1,72	1,71	1,71	1,70	1,69	1,69	1,68	1,68	1,67	1,67
110	0,980	1,56	1,56	1,55	1,54	1,54	1,54	1,53	1,53	1,52	1,52	1,52	1,51
120	0,978	1,42	1,42	1,42	1,41	1,41	1,40	1,40	1,40	1,39	1,39	1,39	1,39
130	0,975	1,31	1,31	1,30	1,30	1,30	1,29	1,29	1,29	1,29	1,28	1,28	1,28
140	0,973	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,20	1,20	1,20	1,20	1,19	1,19	1,19
150	0,970	1,14	1,14	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
160	0,968	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05
170	0,966	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	0,999
180	0,964	1,15	0,970	0,969	0,968	0,965	0,963	0,961	0,960	0,958	0,956	0,956	0,953
190	0,961	1,13	0,935	0,933	0,930	0,927	0,925	0,923	0,921	0,919	0,917	0,917	0,915
200	0,959	1,11	0,904	0,902	0,899	0,896	0,893	0,891	0,888	0,886	0,885	0,884	0,883
210	0,957	1,09	0,881	0,879	0,874	0,869	0,867	0,864	0,862	0,860	0,858	0,856	0,855
220	0,954	1,07	0,863	0,861	0,855	0,850	0,846	0,842	0,840	0,837	0,835	0,834	0,832
230	0,952	1,06	1,25	0,849	0,842	0,835	0,829	0,825	0,822	0,818	0,816	0,815	0,812
240	0,951	1,04	1,22	0,842	0,833	0,826	0,819	0,813	0,808	0,805	0,802	0,799	0,798
250	0,950	1,03	1,18	0,842	0,831	0,820	0,812	0,805	0,799	0,795	0,791	0,788	0,786
260	0,948	1,02	1,16	0,848	0,834	0,821	0,810	0,801	0,794	0,787	0,783	0,780	0,776
270	0,947	1,01	1,13	1,38	0,845	0,829	0,814	0,802	0,793	0,786	0,780	0,774	0,771
280	0,943	0,997	1,10	1,34	0,865	0,841	0,823	0,809	0,796	0,787	0,778	0,772	0,769
290	0,942	0,989	1,08	1,30	0,895	0,864	0,840	0,821	0,805	0,792	0,781	0,774	0,769
300	0,939	0,981	1,07	1,26	0,940	0,899	0,866	0,840	0,819	0,803	0,790	0,779	0,771
310	0,937	0,978	1,05	1,23	1,00	0,947	0,898	0,866	0,839	0,818	0,799	0,785	0,777
320	0,934	0,970	1,04	1,20	1,62	1,02	0,947	0,902	0,866	0,837	0,816	0,796	0,784
330	0,933	0,965	1,03	1,17	1,54	1,12	1,02	0,950	0,902	0,868	0,837	0,815	0,796
340	0,931	0,959	1,01	1,14	1,47	1,33	1,12	1,02	0,950	0,904	0,866	0,837	0,813
350	0,930	0,954	1,00	1,12	1,40	2,19	1,31	1,12	1,02	0,950	0,903	0,867	0,832
360	0,928	0,953	0,994	1,09	1,34	1,90	1,82	1,24	1,10	1,02	0,951	0,901	0,858
370	0,926	0,949	0,990	1,08	1,30	1,71	4,01	1,65	1,22	1,10	1,01	0,940	0,892
380	0,925	0,945	0,982	1,06	1,25	1,55	2,41	4,14	1,45	1,22	1,10	1,01	0,937
390	0,922	0,942	0,974	1,04	1,21	1,45	1,99	5,89	2,45	1,51	1,24	1,10	1,01
400	0,921	0,938	0,968	1,03	1,18	1,37	1,75	2,81	4,27	1,99	1,45	1,22	1,10
410	0,920	0,936	0,962	1,01	1,15	1,31	1,58	2,08	3,52	2,67	1,73	1,37	1,19
420	0,918	0,933	0,956	1,00	1,12	1,26	1,46	1,79	2,48	2,87	2,05	1,56	1,31
430	0,917	0,930	0,952	0,993	1,10	1,22	1,37	1,61	1,92	2,53	2,25	1,74	1,44
440	0,916	0,927	0,947	0,984	1,08	1,18	1,31	1,49	1,70	2,16	2,21	1,88	1,56
450	0,915	0,925	0,943	0,976	1,06	1,15	1,26	1,40	1,56	1,83	2,08	1,90	1,64
460	0,913	0,923	0,939	0,968	1,04	1,13	1,22	1,33	1,45	1,65	1,90	1,85	1,69
470	0,912	0,921	0,936	0,963	1,03	1,10	1,18	1,27	1,37	1,52	1,72	1,77	1,67
480	0,911	0,920	0,933	0,957	1,02	1,08	1,15	1,23	1,32	1,43	1,57	1,69	1,63
490	0,910	0,918	0,930	0,952	1,00	1,06	1,12	1,18	1,27	1,36	1,47	1,57	1,57
500	0,908	0,916	0,928	0,947	0,993	1,05	1,10	1,15	1,22	1,30	1,39	1,46	1,50
510	0,908	0,915	0,925	0,943	0,984	1,03	1,08	1,13	1,18	1,26	1,32	1,51	1,42
520	0,906	0,913	0,922	0,938	0,976	1,02	1,06	1,11	1,15	1,21	1,27	1,34	1,36
530	0,906	0,911	0,921	0,935	0,968	1,01	1,04	1,09	1,12	1,18	1,22	1,28	1,31
540	0,905	0,911	0,918	0,931	0,961	0,998	1,03	1,06	1,10	1,14	1,19	1,24	1,27

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Temp. t in °C	Druck p in bar												
	1	10	25	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
550	0,904	0,909	0,916	0,928	0,955	0,988	1,01	1,04	1,08	1,11	1,16	1,20	1,23
560	0,904	0,908	0,914	0,925	0,948	0,980	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,16	1,19
570	0,903	0,906	0,912	0,922	0,944	0,970	0,989	1,01	1,04	1,07	1,10	1,13	1,15
580	0,902	0,905	0,910	0,919	0,938	0,959	0,979	0,997	1,02	1,04	1,07	1,10	1,12
590	0,901	0,904	0,909	0,917	0,934	0,952	0,969	0,983	1,00	1,03	1,05	1,07	1,10
600	0,900	0,903	0,907	0,915	0,929	0,945	0,958	0,976	0,990	1,01	1,03	1,05	1,07
610	0,900	0,902	0,906	0,912	0,926	0,938	0,947	0,965	0,980	0,998	1,01	1,03	1,04
620	0,898	0,901	0,904	0,910	0,921	0,932	0,942	0,954	0,966	0,982	0,994	1,01	1,02
630	0,897	0,900	0,903	0,908	0,918	0,928	0,937	0,945	0,955	0,970	0,979	0,991	1,00
640	0,897	0,899	0,901	0,906	0,914	0,923	0,933	0,938	0,945	0,958	0,964	0,976	0,981
650	0,896	0,898	0,901	0,904	0,911	0,918	0,924	0,930	0,936	0,946	0,953	0,960	0,964
660	0,895	0,896	0,899	0,902	0,908	0,915	0,917	0,924	0,928	0,936	0,940	0,948	0,951
670	0,894	0,896	0,897	0,900	0,905	0,909	0,912	0,918	0,921	0,927	0,930	0,937	0,940
680	0,894	0,895	0,896	0,898	0,902	0,905	0,908	0,912	0,916	0,918	0,921	0,926	0,930
690	0,893	0,894	0,895	0,896	0,899	0,903	0,903	0,905	0,910	0,911	0,913	0,915	0,920
700	0,892	0,893	0,893	0,895	0,897	0,899	0,902	0,902	0,904	0,905	0,908	0,909	0,910

Für den Bereich III nach Bild 7 kann folgende Gleichung verwendet werden [3]:

$$\frac{\lambda}{W/mgrd} = \frac{A \Theta^{1,445}}{(1 - B d_1 \Theta^{-7})^C} + \frac{d_2 \beta^4 \exp[-9 d_3 (\Theta - 1)]}{1 + d_4 \beta^{-12}} \cdot \{d_5 - d_6 \beta \exp[-d_3 (\Theta - 1)]\} \quad (8)$$

Es bedeuten wie auch bisher $\Theta = T/T_k$ und $\beta = p/p_k$, ferner

$$A = a_1 \beta + a_2$$

$$B = \frac{b_1 \beta^{1,63}}{1 + b_2 \beta^{3,26}}$$

$$C = \frac{c_1 \beta^{1,5} + c_2}{B} - c_3$$

mit folgenden Werten der Konstanten:

$$a_1 = 1,012\,472\,978 \cdot 10^{-2}$$

$$a_2 = 5,141\,900\,883 \cdot 10^{-2}$$

$$b_1 = 6,637\,426\,916 \cdot 10^5$$

$$b_2 = 1,388\,806\,409 \cdot 10^9$$

$$c_1 = 3,388\,557\,874 \cdot 10^5$$

$$c_2 = 5,768\,000\,000 \cdot 10^2$$

$$c_3 = 2,060\,000\,000 \cdot 10^{-1}$$

$$d_1 = 2,100\,200\,454 \cdot 10^{-6}$$

$$d_2 = 2,394\,090\,099 \cdot 10^1$$

$$d_3 = 3,458\,000\,000 \cdot 10^0$$

$$d_4 = 1,363\,235\,390 \cdot 10^1$$

$$d_5 = 1,360\,000\,000 \cdot 10^{-2}$$

$$d_6 = 7,852\,600\,000 \cdot 10^{-3}$$

Die Toleranzen im Bereich III betragen längs der Isobaren $p = 1$ bar

$$\pm 3\% \text{ für } 100^\circ\text{C} \leq t \leq 400^\circ\text{C},$$

$$\pm 4\% \text{ für } 400^\circ\text{C} < t \leq 700^\circ\text{C},$$

im übrigen Gebiet des Bereiches III gelten $\pm 6\%$ mit Ausnahme der unmittelbaren Umgebung des kritischen Punktes, in der die Toleranz $\pm 10\%$ beträgt (vgl. Tabelle 6).

Gl. (8) gilt im Temperaturbereich 100°C bis 700°C und im Druckbereich 1 bar bis 500 bar bis zu der durch Gl. (7) wiedergegebenen Grenze zum Bereich II.

Im schraffierten Gebiet von Bild 7 gibt es zur Zeit keine Interpolationsgleichung. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit λ wurden dort graphisch interpoliert.

Die Gln. (5) bis (8) ergeben die Wärmeleitfähigkeit λ in der Einheit $W/mgrd$. Die Umrechnungszahlen zu anderen Einheiten sind nachstehender Tabelle zu entnehmen.

	$\frac{W}{m\,grd}$	$\frac{W}{cm\,grd}$	$\frac{kcal}{m\,h\,grd}$	$\frac{cal}{cm\,s\,grd}$
$1 \frac{W}{m\,grd} =$	1	10^{-2}	0,85985	$0,23885 \cdot 10^{-2}$
$1 \frac{W}{cm\,grd} =$	10^2	1	85,985	0,23885
$1 \frac{kcal}{m\,h\,grd} =$	1,163	0,01163	1	$2,7778 \cdot 10^{-3}$
$1 \frac{cal}{cm\,s\,grd} =$	418,68	4,1868	360	1

Mit Hilfe der Gln. (5) bis (8) wurde die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet und zusammen mit den graphisch interpolierten Werten im schraffierten Gebiet von Bild 7 in Tabelle 5 in enger Temperaturstufung wiedergegeben. Die Sättigungswerte λ' und λ'' sind in den Tabellen 2 und 3 enthalten, Tabelle 6 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten Werten und denen der Rahmentafel 1964.

Prandtl-Zahl

Aus den Werten der Viskosität η und der Wärmeleitfähigkeit λ wurde die Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$ berechnet, wobei die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p nach [4] ermittelt wurde. Damit

auch die Prandtl-Zahl einen glatten Verlauf im Pr, t -Diagramm bekam, mußten die Werte der Wärmeleitfähigkeit λ im Gebiet des überhitzten Dampfes bei $p = 1$ bar und bei allen Drücken oberhalb 650°C geringfügig geändert werden. Diese Änderungen bezogen sich auf die dritte Stelle des λ -Wertes und lagen in allen Fällen weit innerhalb der Toleranzen der Rahmentafel 1964. Das Pr, t -Diagramm mit dem Druck p als Parameter zeigt Bild 8. Da im kritischen Punkt die Prandtl-Zahl unendlich wird, verlaufen die beiden Grenzkurven $x = 0$ und $x = 1$ (mit x als dem Dampfgehalt) steil nach oben in Richtung auf die kritische Isotherme als Asymptote. Die Prandtl-Zahl von flüssigem Wasser hat bei etwa 250°C ein Minimum. Die Gebiete für Wasser und Dampf überdecken sich teilweise.

Wesentlich übersichtlicher ist die Darstellung im Druck-Temperatur-Diagramm mit Linien $Pr = \text{const}$ gemäß Bild 9. In einem solchen Diagramm kann es keine Überschneidungen geben. Das Maximum im kritischen Punkt (KP) und die Minima im Flüssigkeitsgebiet oberhalb 250°C sind deutlich erkennbar. Bei kleineren Temperaturen verlaufen die Linien $Pr = \text{const}$ im Flüssigkeitsgebiet nahezu als Gerade.

In Tabelle 7 sind die Werte der Prandtl-Zahl in enger Temperaturstufung wiedergegeben, während die Sättigungswerte Pr' und Pr'' in die Tabellen 2 und 3 eingetragen sind.

Die Verfasser danken Herrn Dipl.-Ing. D. HEIN, Nürnberg, für seine Unterstützung bei der Herstellung der Diagramme.

Literatur

- [1] MAYINGER, F., u. U. GRIGULL: Brennstoff-Wärme-Kraft Bd. 17 (1965) Nr. 2, S. 53/60.
- [2] RIVKIN, S. L.: Nicht veröffentlichte Mitteilung aus dem Wärmetechnischen Allrussischen Institut 1966.
- [3] BACH, J., u. U. GRIGULL: Brennstoff-Wärme-Kraft Bd. 18 (1966) Nr. 3, S. 125/127.
- [4] The 1967 IFC Formulation for Industrial Use. A formulation of the thermodynamic properties of ordinary water substance. Prepared by the International Formulation Committee (IFC). February 1967 (erhältlich beim Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf).

Prof. Dr.-Ing. U. GRIGULL und Dipl.-Ing. J. BACH.
Institut für Technische Thermodynamik
der Technischen Hochschule München.

Dr.-Ing. F. MAYINGER.
Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg,
Werk Nürnberg.

Eingegangen am 31. Dezember 1966.