

ID N° 13086 - DiVA-Method: Constant Rate Measurement

Wasser 10,1°C - 29,9°C
~luftgesättigt.

Sample/Ref.: **Wasser**

Results at 20,0°C

Viscosity: $\eta_{(499s^{-1})} = 1,002 \pm 0,010 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\nu = 1,004 \pm 0,010 \text{ mm}^2/\text{s}$

- Temperature coefficient: $\kappa_{\eta} = 24,7 \cdot 10^{-3}/\text{K}$

Density: $\rho = 0,99817 \pm 0,000038 \text{ g/cm}^3$

- Coefficient of thermal expansion: $\kappa = 20,1 \cdot 10^{-5}/\text{K}$

Report

• 1. MESSPRINZIP

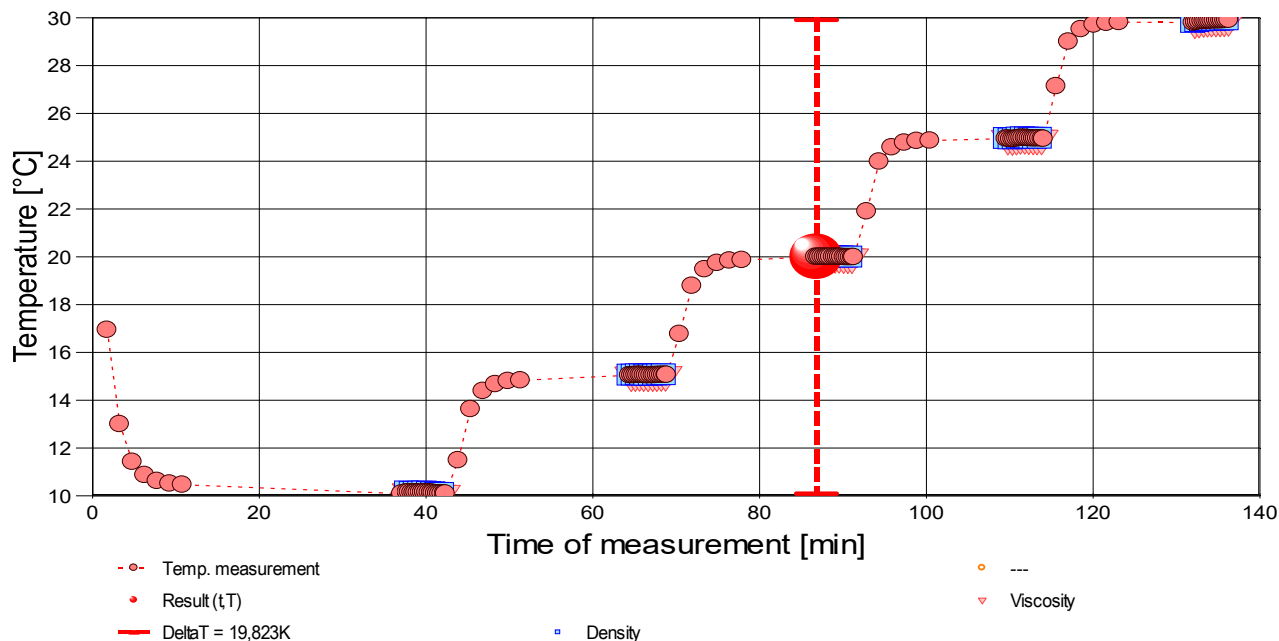
Die 'DiVA'-Methode beruht auf Kraftmessungen an einem Zylinder, der sich in einem zylindrischen Messgefäß mit der Probenflüssigkeit befindet. Dabei ist der zylindrische Messkörper über eine Aufhängung mit einem Kraftsensor verbunden. Das Gefäß wird durch die Plattform vertikal bewegt und positioniert. Wird die Plattform nach unten bewegt, so fließt das Probenfluid um den stillstehenden Messzylinder durch den ringförmigen Spalt. Die lineare Strömung entlang der Messkörperoberfläche überträgt dadurch eine Kraft. Das ist die Schubspannung, die genau der Viskosität der Probe entspricht. - Eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Zylindern fördert parallel ein exakt proportionales Probenvolumen durch den Ringspalt. Das Strömungsprofil ist durch die geometrischen Verhältnisse definiert, Geschwindigkeit, Strömung, Kraft gehorchen wie das *Hagen-Poiseuille*'sche Gesetz der *Navier-Stokes*-Gleichung. M5 DiVA ermöglicht unter Berücksichtigung von Aufhängungs- und Auftriebseffekten sowie der Strömungskinetik die sehr präzise Bestimmung der Viskosität (η). Indem sich, wie in dieser Messung bei gleichbleibender Deformation (der Schergeschwindigkeit 499 s^{-1} kommt etwa die Bedeutung von *leichtem Pumpen, Auftragen* gleich), die Probentemperatur ändert, werden die Temperaturabhängigkeiten der Viskosität (Temperaturkoeffizient κ_{η}) und der Dichte (Ausdehnungskoeffizient κ) bestimmbar und die Arrhenius-Andrade Gleichung wird angewendet, um *Aktivierungs- bzw. Platzwechselenergie* zu bestimmen.

-- Auf den Messkörper wirken stets durch die *Dichte* des Probenfluids bedingte Auftriebskräfte. Die Dichte ρ gibt als *spezifische Masse* die Stoffmenge an, die in einem Volumen vorliegt. Sie ist ebenfalls eine besonders temperaturabhängige Stoffkonstante und wird simultan mittels Auftriebswägung am ruhenden Zylinder-Messkörper bestimmt: Diese *hydrostatische Wägung* basiert darauf, dass "ein in einer Flüssigkeit untertauchender Körper (Messkörper) um den Betrag *leichter* erscheint, wie die seinem Volumen entsprechende Flüssigkeitsmenge wiegt." Damit aus der Auftriebskraft des Messkörpers die Dichte exakt berechnet werden kann, ist das Messkörpervolumen unter den jeweils vorliegenden Bedingungen entscheidend.

- Verglichen mit etablierten Rotationsviskosimeter-Techniken bietet M5 DiVA überhaupt Kohärenz, Integrität und Haltbarkeit, eine deterministische Messtechnik ohne \times Oberflächeneffekte, \times Wirbelbildung, \times Zentrifugalkräfte, \times Lagerreibung oder \times unklare Scher-historien und dazu absolut maximale Ressourceneffizienz. IMETER M5 DiVA-Resultate sind metrologisch rückführbar und kohärent mit Ergebnissen aus Referenzverfahren (Kapillarviskosimeter, Pyknometer). Vgl. Referenz M5 DiVA 'https://imeter.de/?view=article&id=73' - **Beispiele & Auftragsmessungen über 'www.imeter.de/?view=article&id=58'**

• 2. ÜBERSICHT

Dichte und Viskosität wurden 45-mal gemessen. Messdauer zwei Stunden; stufig, zwischen 10,1 und 29,9°C ansteigender Temperaturverlauf, fünf Temperaturniveaus; mit vier Stufen; 4,9 K Temperaturunterschied je Stufe, mit jeweils neun Viskositätsmesswerten. - Diagramm 1. Temperaturverlauf und Übersicht - 't/T-Protokoll'



- Mit Diagramm 1. ('t/T-Protokoll') wird eine Übersicht gezeigt, die den Temperaturverlauf in der Messung und eine Zusammenfassung der Vorgänge anzeigt. -- Die Kreismarkierungen zeigen Temperaturmesswerte an; die blauen Quadrate stehen für Zeitpunkt und Temperaturzuordnung von Dichtemessungen, rote Winkel für Viskositätsmessungen.

• 3. VISKOSITÄTS - MESSUNG

45 Messwerte; Zeitbereich 38 bis 136 min, Temperatur $\Delta T = +19,820 \text{ K}$

Angabewert: $\eta_{20^\circ\text{C}} = 1,002 \pm 0,01 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ bzw. $\pm 1,00\%$ (293,15 K)

Streuung: $\pm 0,0012 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ absolute bzw. 0,12% relative Standardabweichung

Berechnung: quadratische Regressionsgleichung temperaturabhängig.

Temperaturabhängigkeit zwischen 10,093 und 29,913 °C:

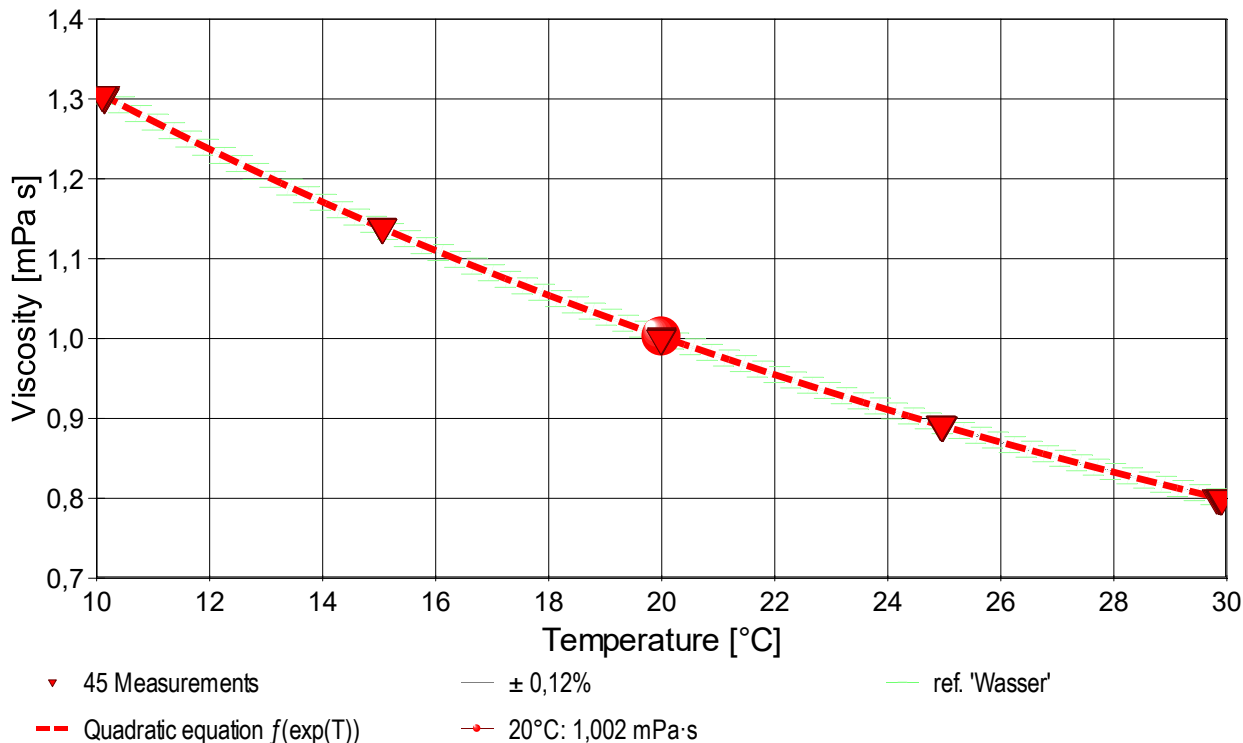
$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = 1,775 \cdot e^{(-0,03243 \cdot \vartheta + 1,923E-04 \cdot \vartheta^2)} \text{ mit } r^2=0,999951, s^2=1,55E-6$$

Messung bei konstanter Schergeschwindigkeit (CR): $\dot{\gamma} = 499 \pm 0,89 \text{ s}^{-1}$.

Der Temperaturkoeffizient der Viskosität κ_η mit $24,7 [10^{-3}K^{-1}]$ entspricht konventionellen Werten gut. Die relative Änderung der Viskosität mit der Temperatur beträgt 2,5%, bzw. 0,025 mPa·s pro Grad bei der Angabetemperatur 20°C.

- Die Messdaten werden automatisch analysiert. Ergebnis und ermittelte Formeln stellen Vorschläge dar, wobei sich aus den Umständen der Messung ggf. andere Zusammenhänge ergeben können. Ein 'normaler' Temperaturkoeffizient der Viskosität reicht bei 25°C von etwa 5 bis $35 \cdot 10^{-3}K^{-1}$. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'hervorragend' zu nennen ist). Die Präzision zwischen den Messwerten und der Regressionsgleichung wird durch die Varianz (s^2) der Residuen qualifiziert - die Standardabweichung ($\sqrt{s^2}$) sollte deutlich kleiner als die anzunehmende Messunsicherheit sein.

→ Diagramm 2. Temperaturabhängigkeit der Viskosität - 'eta-Temp.'



- Das Diagramm 2, "eta-Temp.", zeigt die 45 Viskositätsmesswerte als Dreiecke bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 20°C für die Wasser-Probe ist als Kugelmarke abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird zwischen den beiden feinen Linien ausgewiesen. Der Verlauf der Regressionsfunktion ist als dicke, gestrichelte Linie gezeichnet, und die hinterlegte Referenzfunktion zu 'Wasser-' ist schraffiert in der Breite der Messunsicherheit eingezeichnet.

Die thermodynamische Formulierung gemäß der Arrhenius-Andrade Beziehung lautet für die Wasser-Probe zwischen 10 und 30°C :

$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(T[\text{K}]) = 7,1736 \cdot 10^{-4} \cdot e^{2124,6/T} \text{ mit } r^2=0,99965 \text{ und } s^2=0,000023$$

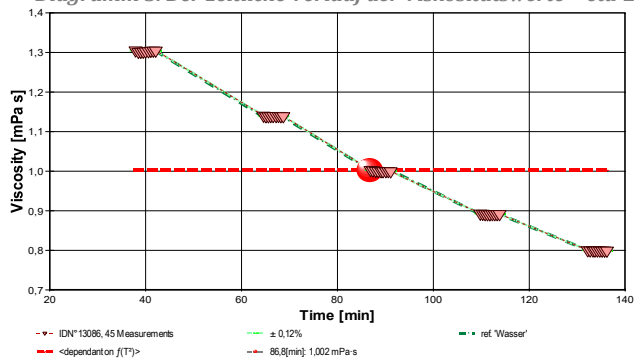
- Die Arrhenius Gleichung der Form " $k = A \cdot e^{-E_a/RT} = \eta$ " gibt in Entsprechung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k die Viskosität η an. In der Gleichung bedeuten die beiden Konstanten 'A' Arrheniusfaktor bzw. eine Materialkonstante ($\ln(A)=-7,2399$) sowie ' E_a ' die Aktivierungs- bzw. Platzwechselenergie. $E_a=-17,665 \text{ kJ/mol}$ (R ist die allgemeine Gaskonstante). Weil A temperaturabhängig ist, gilt die Gleichung als wenig extrapolierbar.

Mit der ebenfalls in Temperaturabhängigkeit gemessenen Dichte (ρ) kann die kinematische Viskosität (ν) gemäß $\nu = \eta / \rho$ als Funktion der Temperatur angegeben werden. Ein Berechnungsterm für ν in der Einheit Centistokes (cSt [mm^2/s]) ergibt sich nach:

$$\nu \text{ [mm}^2/\text{s]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = 1,7755 \cdot e^{(-0,032427 \cdot \vartheta + 1,9229 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2)} / (1,0001 + 3,8423 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta - 5,1114 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

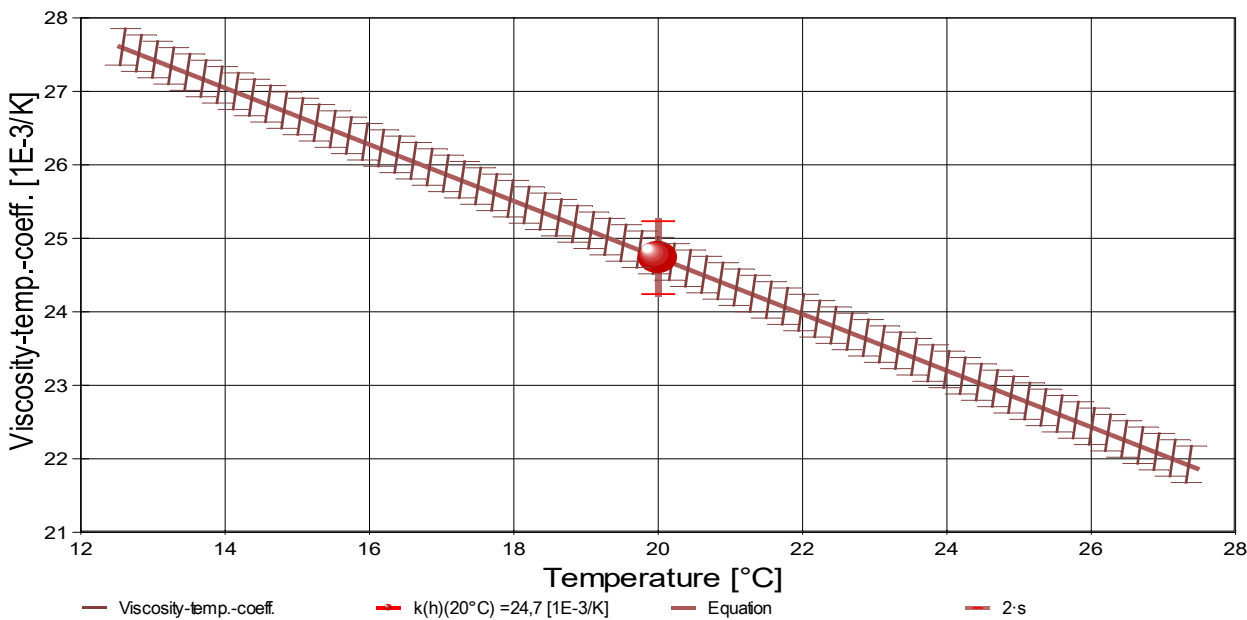
- Die kinematische Viskosität stellt die Zähigkeit eines Fluids inklusive seiner Massenträgheit dar, aus ihr kann ggf. der Viskositätsindex (VI) nach ASTM D2270 berechnet werden.

→ Diagramm 3. Der zeitliche Verlauf der Viskositätswerte - 'eta-Zeit'



- Im Diagramm 3, "eta-Zeit", sind die einzelnen Messwerte als Dreiecke in zeitlicher Sequenz abgebildet. Um die Ausgleichsfunktion bzw. die Messwerte ist der Bereich der Unsicherheit eingezeichnet. Referenzwerte werden zum jeweiligen Zeitpunkt temperaturgetreu dargestellt.

→ Diagramm 4. Temperaturkoeffizient der Viskosität - 'kh-f(T,t)'



- Das Diagramm 4, "κ_η-f(T,t)", zeigt den Verlauf des Viskositäts-Temperaturkoeffizienten κ_η aus der Ableitung der Viskositätsgleichung an. Die Breite der Linie entspricht der angesetzten Präzision. Der Angabewert ist separat eingezeichnet. Aus dem Diagramm ist die relative Änderung der Viskosität in Prozent einfach zu entnehmen, indem der jeweilige Ordinatenwert (in ‰ gegeben) durch Zehn geteilt wird.

Aus der quadratischen Regressionsgleichung der Viskositätsmesswerte ergibt sich für die Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten die folgende Gleichung:

$$\kappa_{\eta} \mid [10^{-3} \cdot K^{-1}] = f(\vartheta [^{\circ}C]) = 32,43 - 0,3846 \cdot \vartheta$$

- Die Präzision der Gleichung wird aus der Regressionsfunktion zu $\pm 0,2 \cdot 10^{-3} / K$ berechnet.

Die Gleichung κ_η liefert zur jeweiligen Temperatur die relative Viskositätsänderung der *Wasser-Probe*.

- Bestimmungsgleichung: $\kappa_{\eta} = -1/\eta \cdot (\partial\eta/\partial T)$. Die Berechnung einer Viskositätsänderung über den Temperaturkoeffizienten κ_η nach ' $\eta = \eta_0 \cdot (1 + \kappa_{\eta} \Delta T)$ ' bzw. ' $\eta = \eta_0 \cdot e^{(\kappa_{\eta} \Delta T)}$ ' ist lediglich über wenige Temperaturgrade mit hinreichender Genauigkeit möglich. Die geeignete Formulierung ergibt sich aus dem über ΔT bestimmten Integral ' $\eta = \eta_0 \cdot e^{\int \kappa_{\eta}(\vartheta) dT}$ ' zur explizit angegebenen Gleichung, also: Die Viskosität η_ϑ bei der Temperatur ϑ kann mit einem bekannten Viskositätswert η₀ und zugehöriger

Temperatur ϑ₀ berechnet werden:

$$\eta_{\vartheta} = \eta_0 \cdot e^{[-0,03243 \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + 1,923E-04 \cdot (\vartheta^2 - \vartheta_0^2)]}$$

- Während die Viskositäts-Temperatur-Gleichung die individuelle Viskosität der 'Wasser-Probe' über den durchmessenen Bereich anzugeben erlaubt, kann ggf. für vergleichbare Fluide von einem bekannten Viskositätswert ausgehend, die Viskosität bei einer anderen Temperatur geschätzt werden.

Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Daten und Ergebnisse der Viskositätsmessung. Weiter unten folgen die Tabellen 2 und 3, wodurch eine vollständige Datenkollektion zu Rückverfolgbarkeit, Diagnose und Überprüfung der Sachverhalte mit diesem Report vorliegt.

Tabelle 1: Daten der Viskositätsmessung

N ^o IDN ^o 13086	t [min]	ϑ [°C]	η [mPa·s]	v _z [mm/s]	F _z [mN]	τ [Pa]	v _{max} [mm/s]	γ̇ [s ⁻¹]	Re [Zahl]
1.	37,9	10,157	1,305	12,25	12,1055	0,6503	97,29	498,16	78,9
2.	38,5	10,135	1,302	12,25	12,0712	0,6484	97,28	498,15	79,1
3.	39,0	10,138	1,302	12,25	12,0739	0,6486	97,28	498,15	79,1
4.	39,5	10,144	1,302	12,25	12,0754	0,6487	97,29	498,15	79,1
5.	40,0	10,148	1,303	12,25	12,0801	0,6489	97,29	498,15	79,0
6.	40,6	10,132	1,303	12,25	12,0858	0,6492	97,28	498,15	79,0
7.	41,1	10,112	1,305	12,25	12,0968	0,6498	97,28	498,14	78,9
8.	41,6	10,096	1,305	12,25	12,1001	0,6500	97,28	498,15	78,9
9.	42,1	10,093	1,305	12,25	12,1008	0,6500	97,28	498,15	78,9
10.	64,6	15,046	1,141	12,25	10,5984	0,5689	97,34	498,77	90,2
11.	65,1	15,052	1,139	12,25	10,5841	0,5681	97,34	498,77	90,3
12.	65,6	15,060	1,139	12,25	10,5855	0,5682	97,35	498,78	90,3
13.	66,1	15,052	1,140	12,25	10,5902	0,5684	97,35	498,78	90,3
14.	66,6	15,044	1,140	12,25	10,5903	0,5684	97,35	498,78	90,3
15.	67,2	15,050	1,140	12,25	10,5912	0,5685	97,35	498,78	90,3
16.	67,7	15,052	1,140	12,25	10,5920	0,5685	97,35	498,78	90,3
17.	68,2	15,058	1,139	12,25	10,5872	0,5683	97,35	498,78	90,3
18.	68,7	15,062	1,139	12,25	10,5866	0,5682	97,35	498,78	90,3
19.	86,9	20,001	1,003	12,25	9,3425	0,5010	97,40	499,39	102
20.	87,4	20,004	1,002	12,25	9,3327	0,5005	97,41	499,40	103
21.	88,0	20,002	1,001	12,25	9,3216	0,4999	97,41	499,40	103
22.	88,5	20,002	1,001	12,25	9,3198	0,4998	97,40	499,39	103
23.	89,1	20,002	1,000	12,25	9,3132	0,4995	97,41	499,40	103
24.	89,5	20,001	1,000	12,25	9,3131	0,4995	97,41	499,40	103
25.	90,1	19,992	1,000	12,25	9,3134	0,4995	97,41	499,40	103
26.	90,6	19,985	1,001	12,25	9,3168	0,4997	97,41	499,40	103
27.	91,1	19,987	0,9999	12,25	9,3112	0,4994	97,41	499,40	103
28.	109,8	24,946	0,8929	12,25	8,3314	0,4464	97,47	500,02	115
29.	110,3	24,929	0,8926	12,25	8,3287	0,4463	97,47	500,02	115
30.	110,8	24,949	0,8917	12,25	8,3202	0,4459	97,47	500,02	115
31.	111,3	24,977	0,8914	12,25	8,3180	0,4457	97,47	500,02	115
32.	111,8	24,980	0,8913	12,25	8,3173	0,4457	97,47	500,02	115

33.	112,3	24,964	0,8917	12,25	8,3204	0,4459	97,47	500,03	115
34.	112,8	24,956	0,8916	12,25	8,3194	0,4458	97,47	500,02	115
35.	113,3	24,955	0,8917	12,25	8,3201	0,4458	97,47	500,02	115
36.	113,8	24,954	0,8917	12,25	8,3209	0,4459	97,47	500,02	115
37.	132,2	29,815	0,8005	12,25	7,4845	0,4007	97,52	500,63	128
38.	132,7	29,848	0,8000	12,25	7,4804	0,4005	97,52	500,63	128
39.	133,3	29,871	0,7999	12,25	7,4788	0,4004	97,53	500,63	128
40.	133,7	29,882	0,7998	12,25	7,4787	0,4004	97,52	500,63	128
41.	134,2	29,887	0,7999	12,25	7,4792	0,4005	97,53	500,64	128
42.	134,7	29,891	0,7997	12,25	7,4771	0,4003	97,53	500,64	128
43.	135,2	29,892	0,7996	12,25	7,4769	0,4003	97,53	500,64	128
44.	135,7	29,900	0,7995	12,25	7,4758	0,4003	97,53	500,64	128
45.	136,2	29,913	0,7995	12,25	7,4751	0,4002	97,52	500,64	128

Tabellensymbole: t Zeitpunkt [min], ϑ Temperatur [°C], η Messwert Viskosität [mPa·s], v_z Beweg- bzw. Relativgeschwindigkeit zwischen Messkörper und Röhre [mm/s], F_z viskositätsbedingte Kraft am Messkörper [mN], τ Schubspannung [Pa], v_{max} maximale Strömungsgeschwindigkeit [mm/s], $\dot{\gamma}$ Schergeschwindigkeit [s⁻¹], Re Reynoldszahl.

- Tabelle 1 listet die wesentlichen Kennzahlen zu den einzelnen Messungen auf. Die zentrale Messgröße ist in der Spalte F_z angegeben; sie ist die 'rein-viskose' Kraft und zentrale Größe für die Berechnung der Viskosität durch die IMETER-Ringspaltgleichung. Sie wird nach Korrekturen aus der stationären Kraft (F_w) erhalten. Berücksichtigt werden die Auftriebskräfte von Zylinder (F_p) und Aufhängung (F_{hp}), der geschwindigkeitsproportionale Druckverlust durch die kinetische Energie und die Reibung in der Einlaufzone des Ringspalt (F_ζ), die viskose Reibung der Messzylinder-Aufhängung im Medium (F_{hh}), die rekursiv bestimmt wird.

Die reibungsbedingte Kraft am Messkörper ergibt sich aus $F_z = F_w - F_p - F_{hp} - F_\zeta - F_{hh}$. Die Korrekturen sind in der nächsten Tabelle aufgeschlüsselt.

Die Schubspannung τ entspricht der rein durch die Viskosität des Mediums je Quadratmeter der Zylindermantelfläche ausgeübten Kraft. v_{max} ist die Maximalgeschwindigkeit eines Newton'schen Fluids im Ringspalt relativ zum Messzylinder. Sie ergibt sich aus der Bewegungsgeschwindigkeit und dem geometrischen Aufbau. Die mittlere Geschwindigkeit (nicht in der Tabelle ausgegeben; $v_m = v_z \cdot ra^2 / (ra^2 - ri^2)$), mit ra Röhrenradius und ri Zylinderradius) wird für die Berechnung der Reynoldszahl benötigt. $Re = \rho \cdot v_m \cdot d / \eta$, mit der charakteristischen Länge d , die (wie bei Rohrströmungen) für den Ringspalt aus dem hydrodynamischen Radius mit $d = 2(ra - ri)$ berechnet wird. Die Scherrate, Schergeschwindigkeit oder Deformation $\dot{\gamma}$, die für die Berechnung verwendet werden, ist berechnet als Geschwindigkeitsgradient unmittelbar an der Zylinderoberfläche.

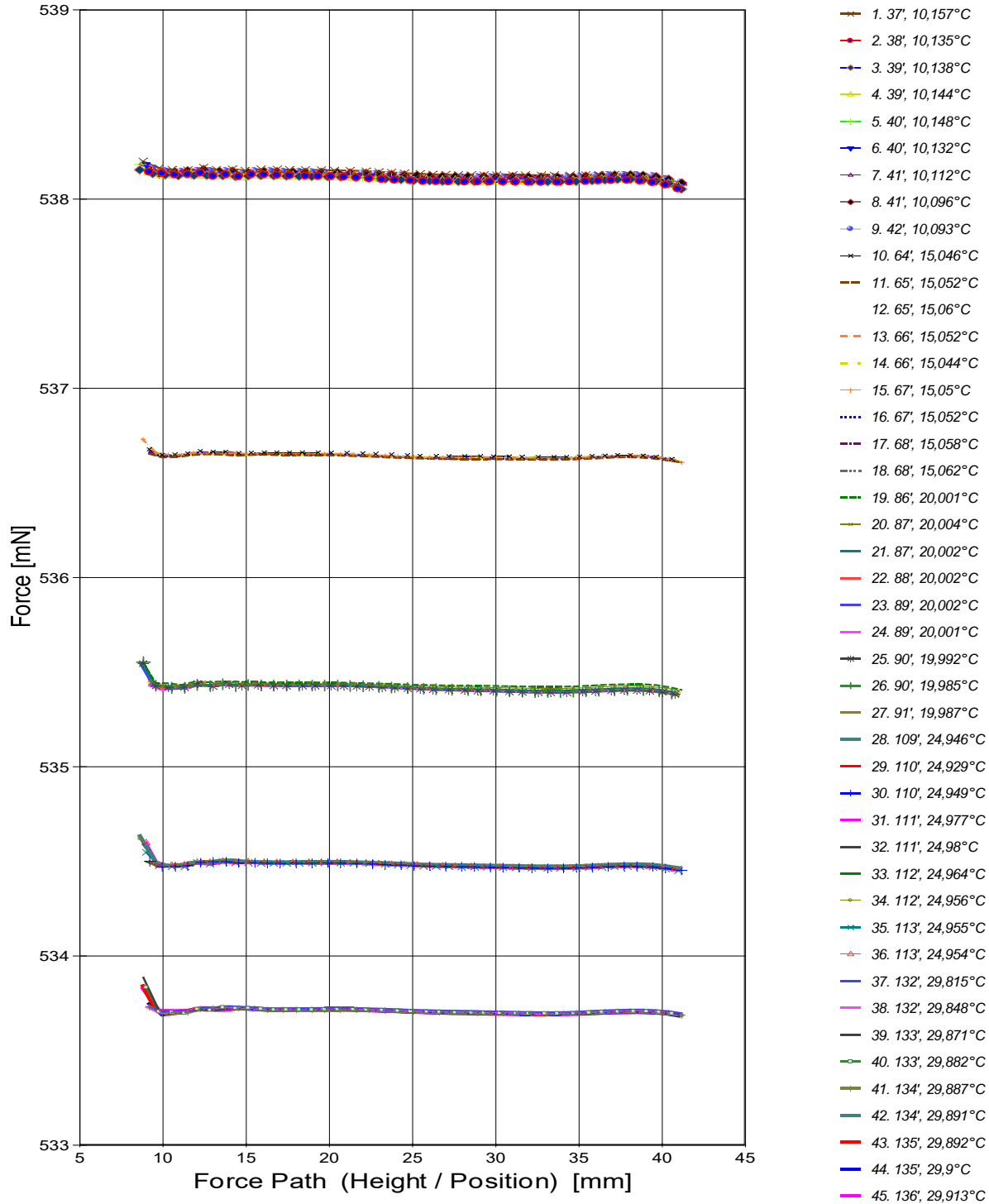
Tabelle 2, Detaildaten zur Viskositätsmessung I.

N°	F_w	σ_{Fw}	$\sigma_{Fw\ rel}$	F_p	F_{hp}	F_ζ	F_{hh}	N/n
			-- Alle Werteinträge in [mN] --					Datenauswahl
1.	538,1293	0,008507	16 ppm	525,5306	0,008078	0,500	0,00110	22/47
2.	538,0945	0,007695	14 ppm	525,5300	0,008058	0,500	0,00110	24/51
3.	538,0975	0,007252	13 ppm	525,5303	0,008076	0,500	0,00110	23/49
4.	538,0985	0,006545	12 ppm	525,5298	0,008019	0,500	0,00109	22/48
5.	538,1031	0,006578	12 ppm	525,5297	0,008038	0,500	0,00109	23/50
6.	538,1087	0,005824	11 ppm	525,5297	0,008137	0,500	0,00111	22/48
7.	538,1191	0,006901	13 ppm	525,5291	0,008117	0,500	0,00111	24/52
8.	538,1222	0,006560	12 ppm	525,5289	0,008135	0,500	0,00111	23/49
9.	538,1232	0,006577	12 ppm	525,5292	0,008096	0,500	0,00110	23/49
10.	536,6440	0,006014	11 ppm	525,5519	0,007934	0,501	9,45E-04	23/49
11.	536,6291	0,005144	9,6 ppm	525,5515	0,008111	0,501	9,65E-04	23/49
12.	536,6333	0,005042	9,4 ppm	525,5543	0,008054	0,501	9,58E-04	23/50
13.	536,6363	0,005299	9,9 ppm	525,5527	0,008150	0,501	9,70E-04	23/49
14.	536,6365	0,004876	9,1 ppm	525,5527	0,008113	0,501	9,66E-04	22/48
15.	536,6375	0,005437	10 ppm	525,5529	0,008150	0,501	9,70E-04	23/49
16.	536,6375	0,005973	11 ppm	525,5519	0,007973	0,501	9,49E-04	23/49
17.	536,6335	0,005389	10 ppm	525,5529	0,008152	0,501	9,70E-04	23/50
18.	536,6327	0,005230	9,7 ppm	525,5526	0,008071	0,501	9,60E-04	23/50
19.	535,4309	0,006012	11 ppm	525,5948	0,008065	0,501	8,46E-04	23/50
20.	535,4223	0,006240	12 ppm	525,5960	0,008124	0,501	8,51E-04	23/50
21.	535,4121	0,007355	14 ppm	525,5970	0,008104	0,501	8,48E-04	23/49
22.	535,4093	0,008681	16 ppm	525,5958	0,008007	0,501	8,38E-04	23/49
23.	535,4039	0,008902	17 ppm	525,5970	0,008026	0,501	8,39E-04	22/48
24.	535,4031	0,008930	17 ppm	525,5964	0,008005	0,501	8,37E-04	22/48
25.	535,4033	0,009825	18 ppm	525,5963	0,008027	0,501	8,39E-04	23/49
26.	535,4064	0,009810	18 ppm	525,5959	0,007967	0,501	8,33E-04	23/49
27.	535,4006	0,009008	17 ppm	525,5958	0,008124	0,501	8,49E-04	23/49
28.	534,4819	0,005924	11 ppm	525,6569	0,008077	0,501	7,55E-04	23/50
29.	534,4786	0,007590	14 ppm	525,6562	0,007997	0,501	7,47E-04	22/48
30.	534,4725	0,007274	14 ppm	525,6586	0,008038	0,501	7,50E-04	22/48
31.	534,4699	0,007324	14 ppm	525,6582	0,008037	0,501	7,50E-04	22/48
32.	534,4698	0,007622	14 ppm	525,6588	0,007997	0,501	7,46E-04	23/50
33.	534,4723	0,007343	14 ppm	525,6582	0,007975	0,501	7,44E-04	23/49
34.	534,4723	0,007970	15 ppm	525,6592	0,007997	0,501	7,46E-04	22/47
35.	534,4715	0,007543	14 ppm	525,6577	0,008018	0,501	7,48E-04	24/51
36.	534,4733	0,007020	13 ppm	525,6588	0,008076	0,501	7,54E-04	23/49
37.	533,7113	0,005950	11 ppm	525,7333	0,008104	0,501	6,80E-04	23/50
38.	533,7064	0,006015	11 ppm	525,7324	0,008005	0,501	6,71E-04	23/50
39.	533,7048	0,006275	12 ppm	525,7324	0,008065	0,501	6,76E-04	23/49
40.	533,7037	0,006447	12 ppm	525,7314	0,007965	0,501	6,68E-04	22/48
41.	533,7031	0,005281	9,9 ppm	525,7304	0,008122	0,501	6,81E-04	23/49
42.	533,7017	0,005560	10 ppm	525,7310	0,008046	0,501	6,74E-04	23/50
43.	533,7019	0,005941	11 ppm	525,7314	0,008045	0,501	6,74E-04	24/51
44.	533,6992	0,005610	11 ppm	525,7299	0,008104	0,501	6,79E-04	22/48
45.	533,6993	0,006988	13 ppm	525,7305	0,007946	0,501	6,66E-04	22/47

Tabellensymbole: F_w Betrag der gemittelten stationären Kraft bei Bewegung des Zylinders [mN], σ_{Fw} Standardabweichung der Kraftmesswerte des stationären Bereichs [mN], $\sigma_{Fw\ rel}$ relative Standardabweichung[-], F_p Auftriebskraft des ruhenden Zylinder inkl. Auftrieb der Suspension [mN], F_{hp} Auftriebskraft durch das tauchende Volumen der Suspension [mN], F_ζ Term für den Druckabfall durch die Bildung des Strömungsprofils (Kinetische Energie-Korrektur) [mN], F_{hh} Kraftwertmittelwert infolge der Flüssigkeitsreibung an der Suspension [mN], N/n Abtastung: Anzahl verwendeter (N) und '/' Anzahl vorhandener Kraftmesswerte (n) zur Bildung von F_w .

- In der Tabelle 2 sind die Mess- und Zwischenergebnisse zur Bilanzierung der Kräfte zusammengestellt. Die dabei in Betracht gezogene Messwertauswahl ist in der letzten Spalte 'N/n' angegeben; durch den angewendeten Cutoff-Algorithmus werden Druckstöße und Pendelvorgänge besonders am Messkurvenanfang ausgeblendet (Das Diagramm 5, Force_Path, unterhalb, zeigt eine größere Wertemenge an, als für die Berechnung verwendet wird). Neben den statischen Korrekturen ist mit F_ζ die kinetischen Energie-Korrektur angegeben, die analog zu (Glas-) Kapillarrisosimetern mit dem Faktor ζ der 'Hagenbach-Couette'-Korrektur entspricht: $F_\zeta = 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot v_m^2 \cdot \zeta$

→ Diagramm 5. Die 'Kraft-Weg-Rohdaten' - 'Force_Path'



→ Diagramm 5, "Force_Path", zeigt die zur Bewegung am Messkörper auftretenden Kräfte Der Streckenbezug ('Position') gibt den Abstand der Messkörperunterseite vom Podest bzw. Gefäßboden an. -- Von den als Messkurven abgebildeten Daten wird lediglich ein zum Kurvenende hin gelegene Teilmenge zur Bestimmung der stationären Gesamtkraft (F_w) verwendet. Abweichungen oder Kurven-Störungen betreffen die Angaben zu Noise und Messunsicherheit Σ_{σ} . Das Gesamtvolumen im Ringspalt von 1,52 cm³ wird über die Bewegungstrecke von 9,2 mm komplett ausgetauscht.

Tabelle 3: Detaildaten zur Viskositätsmessung II.

N°	'Noise' [μPa/mm]	HStart [mm]	L _{ch} [mm]	D _{RSP} [mm]	ΔD _{RSP} [μm]	Ø _{zyl.} [mm]	L _{zyl.} [mm]	Σ _σ [mPa·s]	Σ _{σ,rel.}
1.	2,26E-04	4,925	39,519	0,7689	1,43	14,4665	41,2401	0,013	1,00%
2.	2,76E-04	5,011	39,617	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
3.	2,75E-04	4,913	39,911	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
4.	2,24E-04	4,815	39,813	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
5.	2,11E-04	4,925	39,323	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
6.	2,37E-04	4,913	39,727	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
7.	2,49E-04	4,913	40,094	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
8.	2,67E-04	4,925	39,911	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
9.	2,48E-04	4,913	39,911	0,7689	1,43	14,4665	41,2400	0,013	1,00%
10.	1,91E-04	4,913	39,335	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,012	1,1%
11.	2,17E-04	5,011	39,629	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
12.	1,88E-04	4,913	39,335	0,7685	0,952	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
13.	2,22E-04	4,913	39,911	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
14.	1,79E-04	5,207	39,421	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
15.	2,24E-04	5,011	39,813	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
16.	2,09E-04	4,913	39,715	0,7685	0,953	14,4677	41,2434	0,012	1,1%
17.	2,25E-04	5,109	39,715	0,7685	0,952	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
18.	1,97E-04	4,925	39,519	0,7685	0,952	14,4677	41,2434	0,011	0,97%
19.	2,20E-04	4,913	39,898	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%

20.	2,11E-04	5,023	39,605	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
21.	2,35E-04	4,913	39,519	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
22.	2,15E-04	4,913	39,543	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
23.	2,23E-04	4,913	39,335	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
24.	2,22E-04	5,023	39,029	0,7680	0,477	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
25.	2,42E-04	4,925	39,519	0,7680	0,478	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
26.	2,28E-04	4,913	39,335	0,7680	0,479	14,4688	41,2467	0,01	1,00%
27.	2,63E-04	4,913	39,727	0,7680	0,478	14,4688	41,2467	0,01	1,0%
28.	1,89E-04	4,913	39,727	0,7675	0,00514	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
29.	2,00E-04	4,913	39,335	0,7675	0,00676	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
30.	2,11E-04	4,913	39,911	0,7675	0,00486	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
31.	1,96E-04	5,011	39,445	0,7675	0,00219	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
32.	2,02E-04	4,913	39,531	0,7675	0,00190	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
33.	1,97E-04	4,827	39,605	0,7675	0,00343	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
34.	2,09E-04	4,815	39,825	0,7675	0,00419	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
35.	2,18E-04	4,913	39,727	0,7675	0,00428	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
36.	1,96E-04	4,913	39,519	0,7675	0,00438	14,4700	41,2500	0,009	1,0%
37.	2,01E-04	5,011	39,813	0,7670	-0,458	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
38.	1,75E-04	4,815	39,237	0,7670	-0,461	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
39.	1,93E-04	4,913	39,727	0,7670	-0,463	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
40.	1,76E-04	4,913	39,347	0,7670	-0,464	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
41.	1,84E-04	4,925	39,899	0,7670	-0,465	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
42.	1,74E-04	5,011	39,237	0,7670	-0,465	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
43.	1,84E-04	4,913	39,715	0,7670	-0,465	14,4711	41,2532	0,0081	1,0%
44.	1,69E-04	5,011	39,629	0,7670	-0,466	14,4711	41,2533	0,0081	1,0%
45.	1,81E-04	4,913	39,543	0,7670	-0,467	14,4711	41,2533	0,0081	1,0%

Tabellensymbole: *Noise* Mittelwert von Auslenkungen und höherfrequenten Lastschwankungen 'Schergradienten Fluktuation' im Kurvenzug der Messkraft bestimmt. Der Wert ist über die Geschwindigkeit und Messkörper-mantelfläche normiert [$\mu\text{Pa}/\text{mm}$], H_{Start} Positionshöhe des ersten Messwertes zur stationären Kraft [mm], L_{cp} Länge der Suspension, deren Flüssigkeitsreibung und Auftrieb zur Korrektur der Kraft angewendet wird [mm], D_{RSP} Weite des Ringspalts zwischen Zylindermesskörper und Röhre bei der Temperatur [mm], ΔD_{RSP} Änderung der Spaltweite durch Abweichung von der Bezugstemperatur 25°C [μm], θ_{zyl} Durchmesser des Messzylinders [mm], L_{zyl} Länge des Messzylinders [mm]. $\Sigma\sigma$ Absolute Summe der Unsicherheitsbeiträge, die dem jeweiligen Viskositätswert beigeordnet wird [mPa·s] und $\Sigma\sigma_{\text{rel}}$ relative Unsicherheit des Viskositätswertes.

- Die Spalte 'Noise' in Tabelle 3 stellt die Auswertung der 'Modulationen der stationären Kraft' aus Lastschwankung in aufeinander folgenden Kraftmesswerten im Verhältnis zur dabei zurückgelegten Bewegungstrecke dar ($\Delta F/\Delta s$); Steigungen im Verlauf der Stationärkraft werden ebenfalls in 'Noise' aufsummiert und bilanziert. Die folgenden Rubriken geben gemessene und berechnete geometrische Gegebenheiten der jeweiligen Messung wieder. Die individuellen Gesamtfehlersummen werden in den beiden letzten Spalten ausgegeben; bei idealer Kalibrierung und konformem Aufbau ist der tatsächlich einzuräumende Gesamtfehler um die bedeutenden Beiträge aus den geometrischen Unsicherheiten vermindert!

• 4. DICHTE - MESSUNG

45 Messwerte; Zeitbereich 38 bis 136 min, Temperatur $\Delta T = +19,815 \text{ K}$

Ergebniswert: $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,99817 \pm 0,000038 \text{ g/cm}^3$ bzw. $\pm 38 \text{ ppm}$ (293,15 K, 95,94 kPa)

Streuung: $\pm 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ absolute bzw. 23 ppm relative Standardabweichung

Berechnung: quadratische Regressionsgleichung.

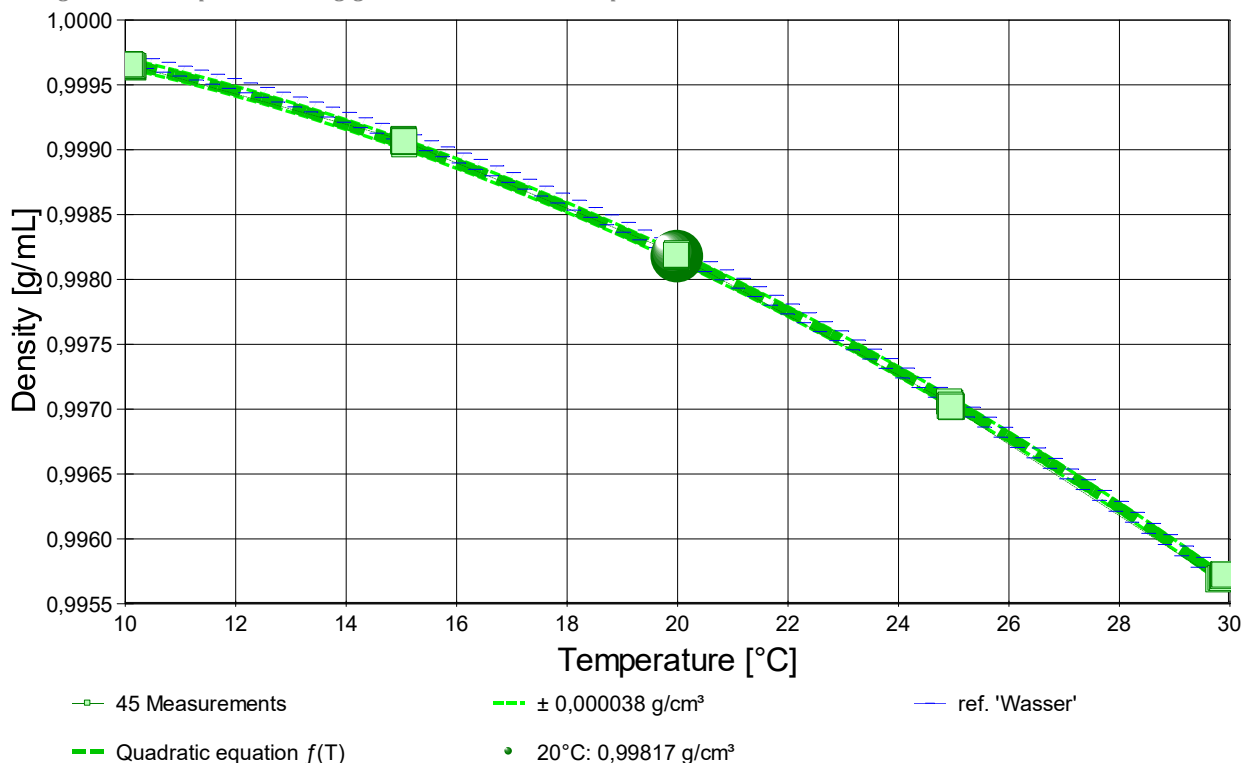
Temperaturgleichung zwischen 10,095 und 29,910 °C:

$$\rho [\text{g/cm}^3] = f(\vartheta [^\circ\text{C}]) = 1,000142 + 0,38423 \cdot \vartheta / 1\text{E}5 - 0,51114 \cdot \vartheta^2 / 1\text{E}5 \text{ mit } r^2 = 0,99975, s^2 = 5,23\text{E}-10$$

Der Ausdehnungskoeffizient κ mit 20,1 [10^{-5}K^{-1}] ist deutlich kleiner als für *Flüssigkeiten normal*. Er entspricht der Dichte-Änderung von 0,20‰, das sind 0,00020 g/cm^3 pro Grad bei der Angabetemperatur 20°C.

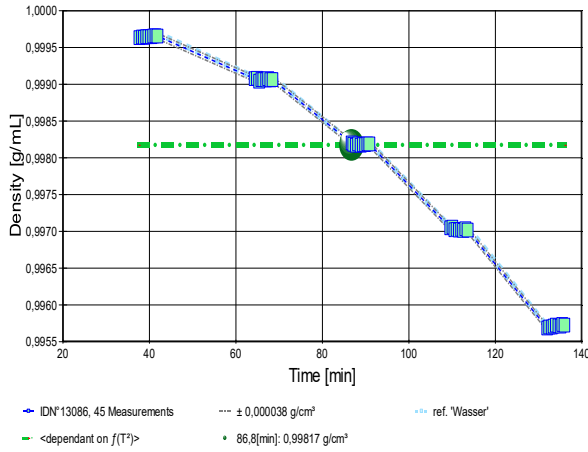
- Die Messdaten werden automatisch analysiert. Ergebnis und ermittelte Formeln stellen Vorschläge dar, wobei sich aus den Umständen der Messung ggf. andere Zusammenhänge ergeben können. Üblicherweise kann der Ausdehnungskoeffizient für Fluide bei 25°C im Bereich zwischen 50 und 150 10^{-5}K^{-1} liegen. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'sehr gut' zu nennen ist). Die Präzision zwischen den Messwerten und der Regressionsgleichung wird durch die Varianz (s^2) der Residuen qualifiziert - die Standardabweichung ($\sqrt{s^2}$) sollte deutlich kleiner als die anzunehmende Messunsicherheit sein.

- Diagramm 6. Temperaturabhängigkeit der Dichte - 'rho-Temp.'



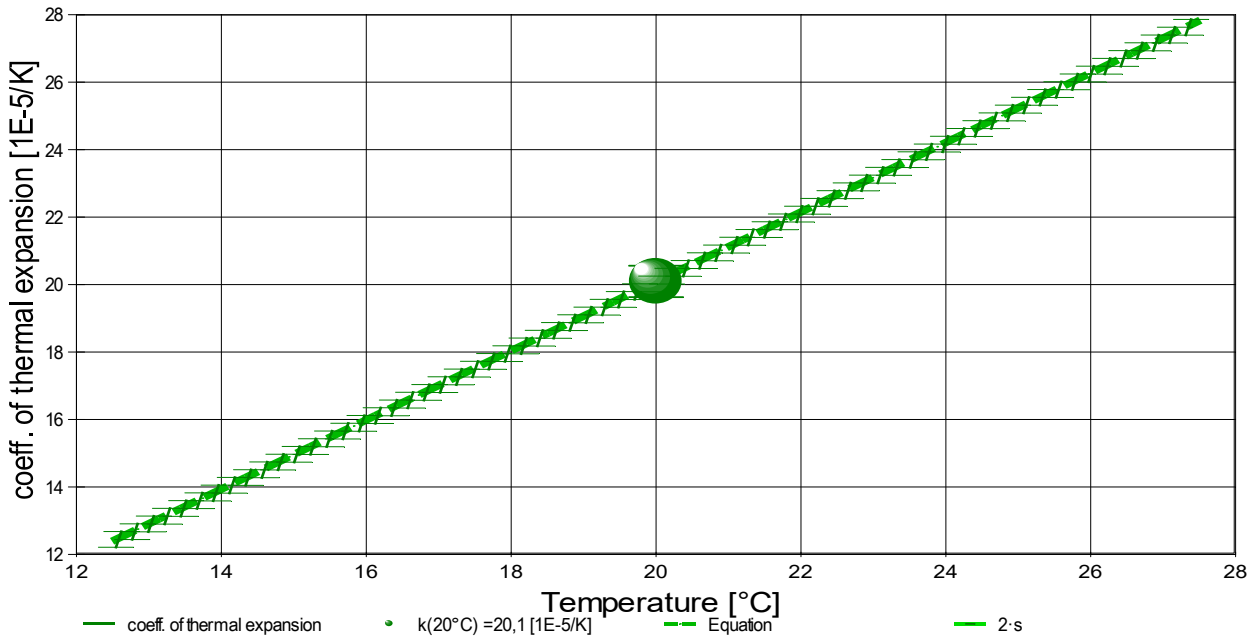
- Das Diagramm 6, "rho-Temp.", zeigt die jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 20°C für die Wasser-Probe ist als Kugel abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird durch gestrichelte Linien ausgewiesen. Der Verlauf der Regressionsfunktion ist als dicke Linie gezeichnet. In Markierungsbreite der Messunsicherheit ist die Referenzfunktion von 'Wasser-' aus der Datenbank abgebildet.

- Diagramm 7. Zeitverlauf der Dichtemesswerte - 'rho-Zeit'



- Im Diagramm 7, "rho-Zeit", sind die einzelnen Messwerte als Quadrate in zeitlicher Sequenz abgebildet. Um die Ausgleichsfunktion bzw. die Messwerte ist der Bereich der Unsicherheit eingezeichnet.

- Diagramm 8: Der Ausdehnungskoeffizient -



- Das Diagramm 8, "k-f(T,t)", zeigt den Verlauf des Ausdehnungskoeffizienten κ der Probe Wasser-Probe entsprechend der unten angegebenen Gleichung an. Die Breite entspricht dem hier angenommenen Fehler. Der Angabewert ist als kugelförmiges Symbol eingezeichnet.

Aus der quadratischen Regressionsgleichung des Dichteverlaufs kann für den Raumausdehnungskoeffizienten eine Gleichung angegeben werden:

$$\kappa \mid [10^{-5} \cdot K^{-1}] = f(\vartheta [^{\circ}C]) = (-0,3842 + 1,022 \cdot \vartheta) / (1,0001 + 3,8423E-06 \cdot \vartheta - 5,1114E-06 \cdot \vartheta^2)$$

Die Genauigkeit der Gleichung wird aus der Regressionsfunktion zu $\pm 0,2 \cdot 10^{-5} / K$ angenommen. Bei 20 °C beträgt die relative Zunahme des Koeffizienten 5,1% pro Grad.

- Um das Volumen bzw. eine Volumenänderung für 'Wasser-Probe' bei einer bestimmten Temperatur ϑ im gültigen Temperaturbereich zu berechnen kann mit dem bei der Temperatur ϑ^0 gegebenen Volumen V_{ϑ^0} das Volumen $V_{I\vartheta}$ bei der Temperatur ϑ über das entsprechende Verhältnis der Dichten bestimmt werden:

$$V_{I\vartheta} = V_{\vartheta^0} \cdot (1,0001 + 3,8423 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^0 - 5,1114 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^{0^2}) / (1,0001 + 3,8423 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta - 5,1114 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

Tabelle 4: Daten der Dichtemessung

N°	t	ϑ	ρ	H	ω	$\Delta\rho_{\omega}$	N	F_A	$F_{korr.}$
IDN°13086	[min]	[°C]	[g/cm³]	[mm]	[s]	[g/cm³]	Werte & Trend	[mN]	[mN], TSymb.
1.	37,7	10,157	0,99963	4,549	0,0	0	1	525,531	-
2.	38,3	10,141	0,99964	4,549	0,0	0	1	525,530	-
3.	38,8	10,143	0,99963	4,549	0,0	0	1	525,530	-
4.	39,3	10,148	0,99964	4,549	0,0	0	1	525,530	-
5.	39,8	10,156	0,99964	4,549	0,0	0	1	525,530	-
6.	40,4	10,140	0,99964	4,549	0,0	0	1	525,530	-
7.	40,9	10,124	0,99965	4,549	0,0	0	1	525,529	-
8.	41,4	10,101	0,99966	4,549	0,0	0	1	525,529	-
9.	41,9	10,095	0,99965	4,549	0,0	0	1	525,529	-
10.	64,4	15,044	0,99907	4,549	0,0	0	1	525,552	-
11.	64,9	15,047	0,99908	4,549	0,0	0	1	525,552	-
12.	65,4	15,061	0,99904	4,549	0,0	0	1	525,554	-
13.	65,9	15,057	0,99906	4,549	0,0	0	1	525,553	-

14.	66,4	15,045	0,99906	4,549	0,0	0	1	525,553	-
15.	67,0	15,048	0,99906	4,549	0,0	0	1	525,553	-
16.	67,5	15,048	0,99907	4,549	0,0	0	1	525,552	-
17.	68,0	15,056	0,99906	4,549	0,0	0	1	525,553	-
18.	68,5	15,060	0,99906	4,549	0,0	0	1	525,553	-
19.	86,8	19,999	0,99820	4,549	0,0	0	1	525,595	-
20.	87,2	20,001	0,99818	4,549	0,0	0	1	525,596	-
21.	87,8	19,998	0,99817	4,549	0,0	0	1	525,597	-
22.	88,3	20,000	0,99818	4,549	0,0	0	1	525,596	-
23.	88,9	20,000	0,99817	4,549	0,0	0	1	525,597	-
24.	89,4	20,000	0,99818	4,549	0,0	0	1	525,596	-
25.	89,9	19,995	0,99818	4,549	0,0	0	1	525,596	-
26.	90,4	19,983	0,99818	4,549	0,0	0	1	525,596	-
27.	90,9	19,983	0,99819	4,549	0,0	0	1	525,596	-
28.	109,6	24,947	0,99704	4,549	0,0	0	1	525,657	-
29.	110,1	24,928	0,99706	4,549	0,0	0	1	525,656	-
30.	110,6	24,934	0,99702	4,549	0,0	0	1	525,659	-
31.	111,1	24,967	0,99702	4,549	0,0	0	1	525,658	-
32.	111,6	24,979	0,99701	4,549	0,0	0	1	525,659	-
33.	112,1	24,968	0,99702	4,549	0,0	0	1	525,658	-
34.	112,6	24,958	0,99701	4,549	0,0	0	1	525,659	-
35.	113,1	24,951	0,99703	4,549	0,0	0	1	525,658	-
36.	113,6	24,958	0,99702	4,549	0,0	0	1	525,659	-
37.	132,0	29,799	0,99568	4,549	0,0	0	1	525,733	-
38.	132,5	29,836	0,99570	4,549	0,0	0	1	525,732	-
39.	133,1	29,866	0,99569	4,549	0,0	0	1	525,732	-
40.	133,5	29,880	0,99571	4,549	0,0	0	1	525,731	-
41.	134,0	29,884	0,99572	4,549	0,0	0	1	525,730	-
42.	134,6	29,892	0,99571	4,549	0,0	0	1	525,731	-
43.	135,1	29,893	0,99571	4,549	0,0	0	1	525,731	-
44.	135,5	29,899	0,99573	4,549	0,0	0	1	525,730	-
45.	136,0	29,910	0,99572	4,549	0,0	0	1	525,731	-

Tabellensymbole: t Zeitpunkt [min], ϑ Temperatur [°C], ρ Dichte [g/cm³], H Positionshöhe der Messkörperunterkante über der Nullhöhe beim Dichtemesswert [mm], ω Beobachtungsdauer der aufgezeichneten Auftriebsmessung [s], $\Delta\rho_\omega$ Standardabweichung der Dichtewerte in der Beobachtungszeit [g/cm³], N Anzahl Auftriebsmesswerte ggf. mit Wägwertezahl und Trend anzeigenden Symbolen, F_A Gewicht des Messkörpers in der Probe (Roh-wert der Auftriebskraft) [mN], $F_{korrr.}$ konstante Korrekturkraft [mN].

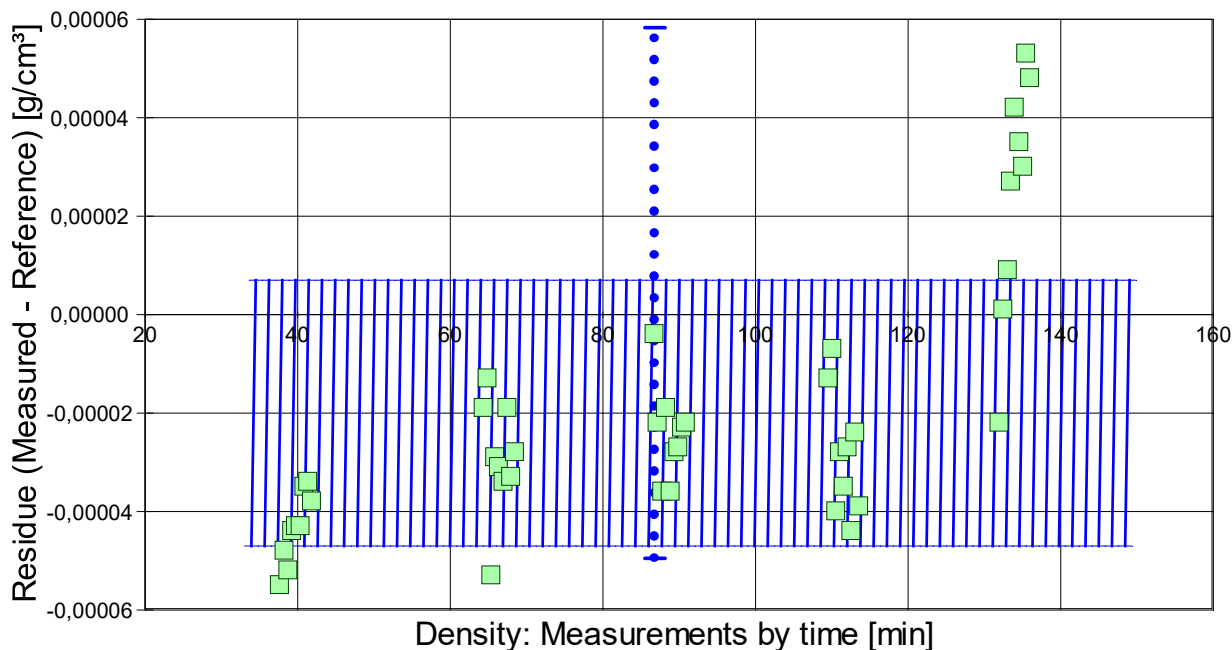
- Die 'Nullhöhe' ist die vertikale Position zu der der Messkörper just auf dem Gefäßboden oder Podest steht ($H=0$ mm).

• 5. REFERENZ VERGLEICH

Beurteilung von Viskositäts- und Dichtemessungen anhand der Residuen: Die Differenzen zwischen Messwerten und zur jeweiligen Temperatur berechneten Sollwerten des Referenzeintrags *Wasser* wird in den Diagrammen unten dargestellt. Die Abbildung der Differenzwerte entspricht der zeitlichen Abfolge der Messwerte. Unterhalb zeigt eine tabellarische Aufstellung den Vergleich zum angegebenen Ergebnis; dieser folgt eine Liste mit Stoffnamen aus der Datenbank mit vergleichbaren Werten.

- **VORSICHT** Die Bedeutung des automatischen Vergleichs mit jeweiligen Referenzwerten ist völlig von der Richtigkeit und Präzision der hinterlegten Stoffdaten abhängig. - *Diagramm 8.*

Referenzabweichung der Dichtemesswerte - 'rho-Residuen'

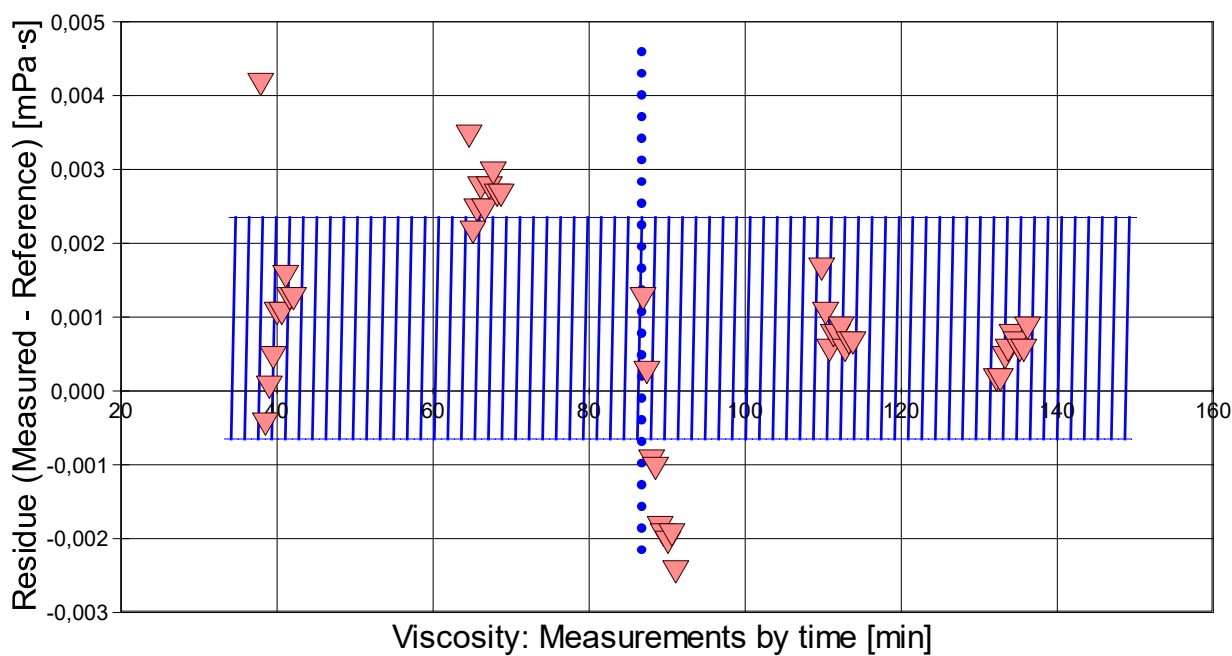


Reference values for 'Wasser' acc. to $f(T[°C])=(99983.952+1695.2577\cdot T-0.79905127\cdot T^2-4.6241757E-3\cdot T^3+1.0584601E-5\cdot T^4-2.8103006E-8\cdot T^5)/(1e5+1688.7236\cdot T)$

Mean and Standarddev. of Residuals: $-2,00E-05 \pm 2,7E-05$ g/cm³, relative: -20 ppm at a spread of 27 ppm

- Das Chart N°9, "rho-Residuen", zeigt temperaturkompensierte Abweichungen der einzelnen Dichtemesswerte zum jeweiligen Wert des Referenzwertes in der zeitlichen Sequenz der Messung. In der Diagrammunterschrift ist die Berechnungsfunktion der Referenzwerte angegeben sowie das mittlere Residuum und die Standardabweichung der Residuen, die im Diagramm schraffiert eingezeichnet ist.

- *Diagramm 9. Referenzabweichung der Viskositätsmesswerte - 'eta-Residuen'*



Reference values for 'Wasser' acc. to $f(T[^\circ\text{C}])=37.1941 \cdot \text{EXP}(1.35960\text{E}+11/(273.15+T)^4 - 1.44585\text{E}+09/(273.15+T)^3 + 6.04736\text{E}+06/(273.15+T)^2 - 1.02607\text{E}+04/(273.15+T))$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $8,49\text{E}-04 \pm 0,0015$ mPa·s, relative: $+0,85\text{‰}$ at a spread of 0,15%

- Das Chart N°10, "eta-Residuen", zeigt temperaturkompensierte Abweichungen der einzelnen Viskositätsmesswerte zum jeweiligen Wert des Referenzwertes in der zeitlichen Sequenz der Messung. In der Diagrammunterschrift ist die Berechnungsfunktion der Referenzwerte angegeben sowie das mittlere Residuum und die Standardabweichung der Residuen, die im Diagramm schraffiert eingezeichnet ist.

• 5.1 Ergebnisvergleich mit der Referenz Wasser bei 20°C

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
ρ	0,99820	0,99817	-0,00003 g/cm ³	30 ppm	0,8
$-\Delta\rho/\Delta T$	0,00021	0,00020	-0,00001 g/cm ³ ·K ⁻¹	5%	@
η	1,002	1,002	$\pm 0,000$ mPa·s	---	@
$-\Delta\eta/\Delta T$	0,025	0,025	$\pm 0,000$ mPa·s·K ⁻¹	---	@

- Der Ergebnisvergleich mit den Angaben, die in der Referenzdatenbank zu 'WASSER' gefunden wurden, stellt die Werteübereinstimmung dar. Der Unterschied wird als absolute Differenz "Probenmesswert minus Referenzwert" und als relative Abweichung angegeben. Das Symbol η steht für die Messgröße, $-\Delta\eta/\Delta T$ für die absolute Änderung bei einem Grad Temperaturabnahme (bei 20°C); die Zahl zu " Δu " gibt ggf. an, um welchen Faktor die absolute Differenz von Mess- und Referenzwert größer ist als die angenommene Messunsicherheit. Das Zeichen "@" bringt zum Ausdruck, dass bei der Messgröße kein signifikanter Unterschied zwischen Mess- und Referenzwert auftritt.

• 5.2. Referenzwerte zu Dichte und Viskosität

--- DICHTE --- REFERENZEN	(g/cm ³)	ABWEICHUNG	REF. ID
1. Wasser ¹	0,9982031	+30 ppm	ID136.8
2. Water (Augsburg, air-free) ¹	0,998204	+30 ppm	ID1253.5
3. Water P&M ¹	0,9982057	+40 ppm	ID1438.1
4. Wasser, SMOW ¹	0,998207	+40 ppm	ID1392.2
5. Water, SMOW ¹	0,9982070	+40 ppm	ID1254.1
6. Liquor cerebrospinalis ²	1,007 (25°C)	+0,88%	ID1278.1
7. TEGO Polyether ¹	1,00922	+1,1%	ID1009.1
8. Toluol ¹	0,866845	-13%	ID1422.7
--- VISKOSITÄT ---	(mPa·s)	ABWEICHUNG	REF. ID
1. Wasser ¹	1,0020	---	ID1174.4
2. Wasser (>40°) ¹	0,9987	-0,30%	ID1133.5
3. Pyridin ¹	0,959	-4,3%	ID107.2
4. Hydrazin ¹	0,942	-6,0%	ID6.2
5. Decane ¹	0,915	-8,7%	ID225.2
6. Essigsäureanhydrid ¹	0,909	-9,3%	ID79.2
7. Tetrachlorethylen ¹	0,891	-11%	ID23.5
8. p-Chlortoluol ¹	0,884	-12%	ID170.8

¹Wert für 20,0°C berechnet. Stoffdaten nur aus dem Referenzdatenbestand Die Liste wird in fallender Reihenfolge der Übereinstimmung aus den besten Treffern in den Einträgen der Referenzdatenbank generiert. Die Vergleichsdaten werden in der Präzision der jeweiligen Eintragsangabe formatiert und die relative Abweichung zum Angabewert der Messung angegeben.

• 6. ANGABEN ZUR KONFIGURATION

a). Messkörper: Name **ISTahl14.5/PA**, b). IdentN° 7014, c). Spaltweite 0,767 mm.

d). **Mess- und Auswertungsverfahren:** Standard. e). Konfigurationstyp DiVA-B (II+).

f). **Messkörperdaten:** Messzylindermasse 54,1632 ± 0,0002 g, ~volumen 6,912689 ± 2,6E-4 cm³, ~durchmesser 14,47 ± 0,01 mm, ~länge 41,25 ± 0,01 mm.

kub. Ausdehnungskoeff. $\kappa [10^{-6}K^{-1}] = f(\vartheta[^\circ C]) = 50,873 - 0,18583 \cdot \vartheta + 3,8490 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 - 1,9601 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^3$

Nicht tauchendes Gewicht am Messzylinder (Lastträger, Haltekonus) 6,3189 g. g). **Messzylindersuspension:** Querschnitt 0,021 mm², Umfang 0,515 mm, h). Aufhängungsart: fixierte Verbindung.

i). **Behälter/Röhre:** Durchmesser 16,005 ± 0,005 mm, ~kub. Ausdehnungskoeffizient 8 · 10⁻⁶K⁻¹.

j). **Bezugstemperatur:** für Abmessungen und Ausdehnungskoeffizienten 25°C.

k). **Kinetische Energie:** Faktor Zeta: $\zeta = 1,358$.

Individuelle Werte: l). Höhe der Flüssigkeitssäule über der Nulllage: 86,3 mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: 45,0 mm.

m). **Messunsicherheiten des Ergebnisses:** Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu 1,00% bestimmt; die n). Messunsicherheit der Dichte ± 0,000038 g/cm³ stammt von oben genannten Unsicherheitsangaben zu Messkörpervolumen und -masse sowie von den gegebenen Spezifikationen zur Kraft- und Temperaturmessung.

- **Die Messunsicherheit** des einzelnen Viskositätsmesswertes wird aus den folgenden Unsicherheitsquellen bestimmt: 1.: der geometrischen Toleranzangaben zu Messkörperdurchmesser, 2.: zur Länge und 3.: zum Radius des Gefäßes. Individuell aus 4.: der Standardabweichung der Messkraft ($\sigma_{F1/2}$), 5.: der Exzentrizität pauschal zu 0.5% (v.M.), 6.: der Unsicherheit der Kalibrierung zu 0.5% (v.M.), 7.: der Geschwindigkeitsangabe zu 0.1%, 8.: pro Grad Temperaturmessunsicherheit werden 5% (v.M.) angesetzt. - Die Gesamtunsicherheiten einer Messung wird aus der Wurzel der Quadratesumme der Einzelunsicherheiten berechnet; diese sind summarisch zu jeder Einzelmessung angegeben in der Spalte σ_y von Tabelle 3, Detaildaten zur Viskositätsmessung II., und in den jeweiligen Diagrammen eingezeichnet.

Temperaturangaben beziehen sich auf die Skala der ITS-90. **Standardabweichungen:** Verschiedentlich werden Regressionsfunktionen mit Standardabweichungen bzw. Varianzen qualifiziert. Diese Angaben werden berechnet aus der Summe der Quadrate der Abweichungen der Einzelwerte zu jeweils berechneten Funktionswerten dividiert durch die Anzahl der Werte weniger 1. Sofern nicht anders bezeichnet, werden für ±(Standardmess-)Unsicherheiten einfache Standardabweichungen - ohne Erweiterungsfaktoren - angegeben, d.h. die Überdeckung betrifft 67% der Werte.

Programm

Data created during execution of the IMPro "DiVA-B-Probenwechsel", type 5/0. Measuring process performed accordingly.

(the digital twin of process IDN°13086 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured raw data)

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZ224-CW) wurde 0,2 Stunden vor dieser Messung von *Labor* justiert.

IMETER ID23903733: Technische Daten: Auflösung des Wägesystems 0,1 mg, Messunsicherheit (Linearität) 0,2 mg, Dichte der Justiermasse ρ_{cal} 8,000 g/cm³, Luftdichte ρ_{air} vgl. Tabelle unten; Schwerebeschleunigung g 9,80769 m/s².

Pt100-Temperaturmessung: Auflösung 0,001[K], Messunsicherheit ± 0,01[K], R° 100,0018[Ohm], AutoCal 10[min] (BN° 3, -10/100°C, 7S, FS15, Offset: -0,005). Die Messauflösung der sekundären Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 6.1.40, LizenzN° *3037-4759*, W. 5.1- Betriebssystem auf PC Ser.N°1480456102 (H, DIE PLATTE#).

Meteorologische Angaben, Luftdichte:

Time [min]	ϕ [%]	T_a [°C]	p_a [kPa]	ρ_{air} [kg/m ³]
0,2	43,04	21,76	95,378	1,12202
64,1	41,91	23,23	95,335	1,11562
86,5	41,52	23,327	95,339	1,1153
109,3	41,06	23,3	95,33	1,1152
131,7	41,58	23,43	95,323	1,11468

Obige Zusammenstellung gibt die Aufzeichnung der Atmosphärendaten für den Aufstellort wieder; darin bedeuten ϕ relative Luftfeuchte (r.H.), T_a Lufttemperatur und p_a absoluter Luftdruck, ρ_{air} die Luftdichte; Die Luftdichte wird dabei aus den Druck-, Temperatur- und Luftfeuchtwerten berechnet.

Kommentar/Bewertung/Interpretation:

Viskositäts- und Dichtemessung über einen Temperaturbereich - hier an Wasser zwischen 10 und 30°C - liefert vier wichtige Kennzahlen der Flüssigkeit simultan.

"Nachtägliche Anmerkungen" sind Anmerkungen, die nach Abschluss des Messablaufs angefügt wurden.