

ID N° 13081 - DiVA-Method: Constant Rate Measurement

Wasser zwischen 0 und 8°C (Anomalie?)

Wirkt sich die Dichteanomalie von Wasser auf die dynamische Viskosität aus?

Sample/Ref.: **Wasser**

Results at **1,0°C**

Viscosity: $\eta_{(497s^{-1})} = 1,734 \pm 0,017 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\nu = 1,734 \pm 0,017 \text{ mm}^2/\text{s}$

- Temperature coefficient: $\kappa_{\eta} = 33,7 \cdot 10^{-3}/\text{K}$

Density: $\rho = 0,99989 \pm 0,000038 \text{ g/cm}^3$

- Coefficient of thermal expansion: $\kappa = -6,3 \cdot 10^{-5}/\text{K}$

Report

• 1. MESSPRINZIP

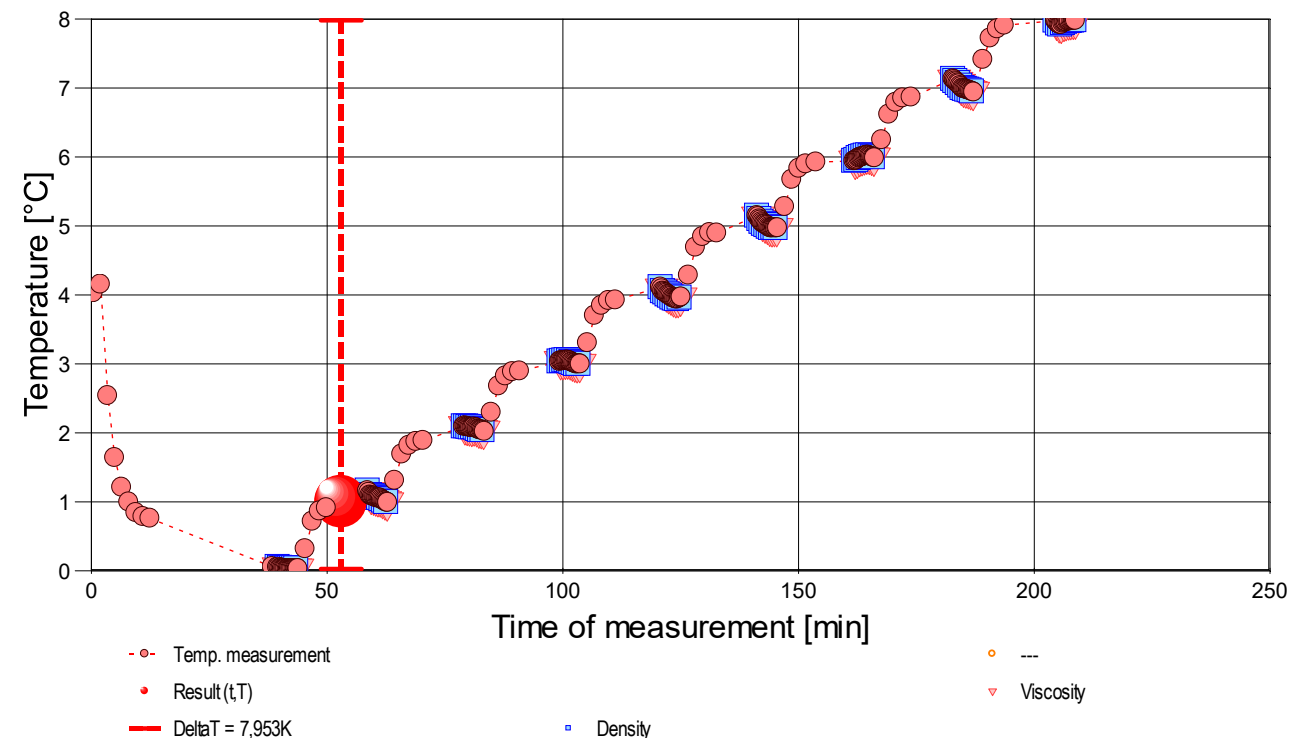
Die 'DiVA'-Methode beruht auf Kraftmessungen an einem Zylinder, der sich in einem zylindrischen Messgefäß mit der Probenflüssigkeit befindet. Dabei ist der zylindrische Messkörper über eine Aufhängung mit einem Kraftsensor verbunden. Das Gefäß wird durch die Plattform vertikal bewegt und positioniert. 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 497 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. Platzwechsellenergie* 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-Ergebnisse 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 81-mal gemessen. Messdauer drei Stunden; stufig, zwischen 0,0 und 8,0°C ansteigender Temperaturverlauf, acht Temperaturniveaus; mit sieben Stufen; 1,1 K Temperaturunterschied je Stufe, mit jeweils rund zehn 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

81 Messwerte; Zeitbereich 40 bis 209 min, Temperatur $\Delta T = +7,950 \text{ K}$

Ergebniswert: $\eta_{1^\circ\text{C}} = 1,734 \pm 0,017 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ bzw. $\pm 0,98\%$ (274,15 K)

Streuung: $\pm 0,0023$ mPa·s absolute bzw. 0,13% relative Standardabweichung

Berechnung: quadratische Regressionsgleichung temperaturabhängig.

Temperaturzusammenhang zwischen 0,029 und 7,979 °C:

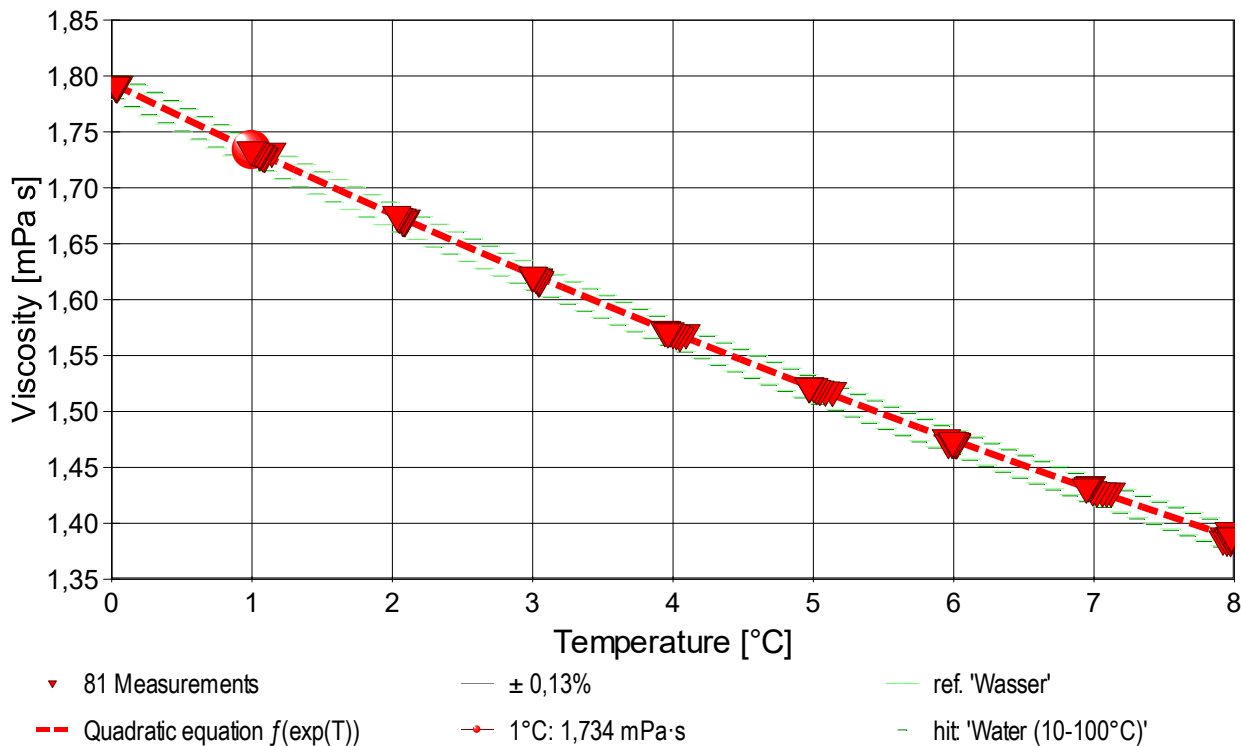
$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = 1,794 \cdot e^{(-0,03426 \cdot \vartheta + 2,644 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2)} \text{ mit } r^2=0,99974, s^2=5,41 \cdot 10^{-6}$$

Messung bei konstanter Schergeschwindigkeit (CR): $\dot{\gamma} = 497 \pm 0,48 \text{ s}^{-1}$.

Der Temperaturkoeffizient der Viskosität κ_η mit $33,7 [10^{-3} \text{K}^{-1}]$ entspricht gewöhnlichen Werten gut (etwas über 'Normal'). Er bewirkt eine Viskositäts-Änderung von 3,4%, das sind 0,058 mPa·s pro Grad bei der Angabetemperatur 1° 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 $35 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. 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 2. Temperaturabhängigkeit der Viskosität - 'eta-Temp.'



- Das Diagramm 2, "eta-Temp.", zeigt die 81 Viskositätsmesswerte als Dreiecke bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 1°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 in der Breite der Messunsicherheit, der Verlauf der Referenzfunktion von 'Wasser-' (aus der Datenbank) und zum Vergleich der Wertebereich der ähnlich viskosen Substanz 'Water (10-100°C)'.

Die thermodynamische Formulierung gemäß der Arrhenius-Andrade Beziehung lautet für die Wasser-Probe zwischen 0 und 8°C :

$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(T[\text{K}]) = 2,1308 \cdot 10^{-4} \cdot e^{2468,4/T} \text{ mit } r^2=0,99982 \text{ und } s^2=0,000006$$

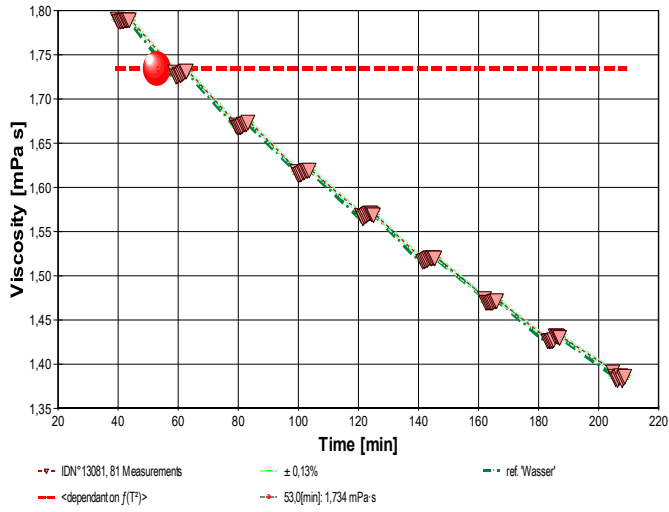
- Die Arrhenius Gleichung der Form " $k = A \cdot e^{-E_a/RT} = \eta$ " gibt in Entsprechung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k die Viskosität η an. In der Gleichung bedeuten die beiden Konstanten 'A' Arrheniusfaktor bzw. eine Materialkonstante ($\ln(A)=-8,4538$) sowie 'E_a' die Aktivierungs- bzw. Platzwechselenergie. $E_a=-20,523$ 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:

$$\nu \text{ [mm}^2/\text{s]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = 1,7936 \cdot e^{(-0,034256 \cdot \vartheta + 2,6444 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2)} / (0,99981 + 8,2583 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta - 9,6351 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

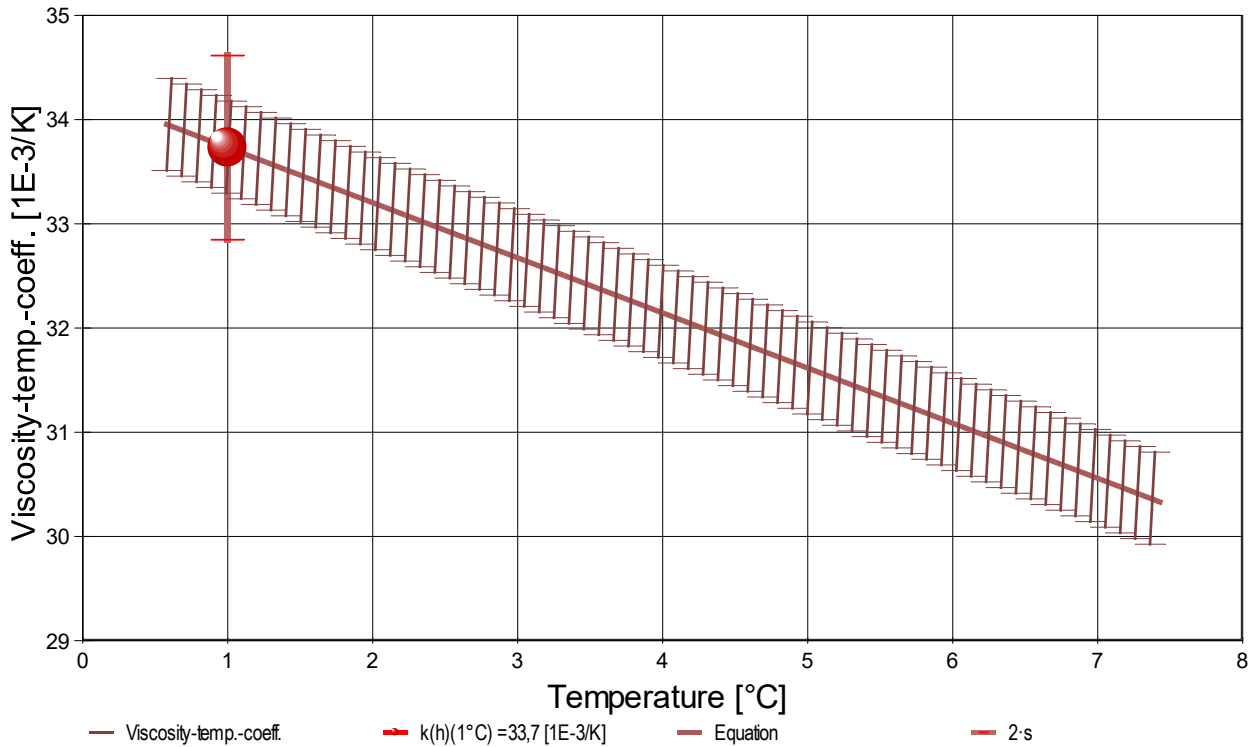
- Die kinematische Viskosität stellt die Zähigkeit eines Fluids inklusive seiner Massenträgheit dar, aus ihr kann ggf. der Viskositätsindex (VI) nach ASTM D2270 berechnet werden. .

- 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, "kh-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:

$$\kappa_\eta \mid [10^{-3} \cdot K^{-1}] = f(\vartheta [^\circ C]) = 34,26 - 0,5289 \cdot \vartheta$$

- Die Präzision der Gleichung wird aus der Regressionsfunktion zu $\pm 0,4 \cdot 10^{-3} / K$ 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 ' $\eta = \eta^\circ \cdot (1 + \kappa_\eta \Delta T)$ ' bzw. ' $\eta = \eta^\circ \cdot e^{(\kappa_\eta \Delta T)}$ ' ist lediglich über wenige Temperaturgrade mit hinreichender Genauigkeit möglich. Die geeignete Formulierung ergibt sich aus dem über ΔT bestimmten Integral ' $\eta = \eta^\circ \cdot e^{\int \kappa_\eta(\vartheta) dT}$ ' zur explizit angegebenen Gleichung, also:

Die Viskosität η_ϑ bei der Temperatur ϑ kann mit einem bekannten Viskositätswert η_0 und zugehöriger Temperatur ϑ_0 berechnet werden:

$$\eta_\vartheta = \eta_0 \cdot e^{[-0,03426 \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + 2,644E-04 \cdot (\vartheta^2 - \vartheta_0^2)]}$$

- 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°	t	ϑ	η	v _z	F _z	τ	v _{max}	γ̇	Re
IDN°13081	[min]	[°C]	[mPa·s]	[mm/s]	[mN]	[Pa]	[mm/s]	[s ⁻¹]	[Zahl]
1.	39,7	0,051	1,793	12,25	16,5512	0,8906	97,16	496,85	57,4
2.	40,2	0,039	1,790	12,25	16,5287	0,8894	97,16	496,84	57,5

3.	40,8	0,033	1,790	12,25	16,5297	0,8895	97,16	496,84	57,5
4.	41,3	0,031	1,791	12,25	16,5340	0,8897	97,16	496,84	57,5
5.	41,8	0,029	1,791	12,25	16,5344	0,8897	97,16	496,84	57,5
6.	42,3	0,032	1,792	12,25	16,5426	0,8902	97,16	496,84	57,5
7.	42,7	0,034	1,791	12,25	16,5407	0,8901	97,16	496,84	57,5
8.	43,2	0,035	1,792	12,25	16,5441	0,8903	97,16	496,84	57,5
9.	43,7	0,032	1,792	12,25	16,5430	0,8902	97,16	496,84	57,5
10.	58,8	1,141	1,733	12,25	16,0055	0,8611	97,17	496,99	59,4
11.	59,3	1,090	1,728	12,25	15,9628	0,8588	97,17	496,97	59,6
12.	59,9	1,079	1,728	12,25	15,9657	0,8590	97,17	496,98	59,6
13.	60,3	1,065	1,730	12,25	15,9838	0,8600	97,17	496,98	59,5
14.	60,8	1,055	1,730	12,25	15,9765	0,8596	97,17	496,98	59,5
15.	61,3	1,052	1,731	12,25	15,9898	0,8603	97,17	496,98	59,5
16.	61,8	1,029	1,732	12,25	16,0012	0,8609	97,17	496,97	59,4
17.	62,3	1,009	1,734	12,25	16,0134	0,8616	97,17	496,97	59,4
18.	62,7	0,993	1,734	12,25	16,0162	0,8617	97,17	496,97	59,4
19.	79,2	2,098	1,673	12,25	15,4587	0,8316	97,18	497,11	61,6
20.	79,7	2,089	1,670	12,25	15,4372	0,8304	97,18	497,11	61,6
21.	80,2	2,082	1,671	12,25	15,4395	0,8305	97,18	497,11	61,6
22.	80,7	2,074	1,671	12,25	15,4416	0,8306	97,18	497,11	61,6
23.	81,2	2,082	1,672	12,25	15,4478	0,8310	97,18	497,11	61,6
24.	81,7	2,069	1,674	12,25	15,4682	0,8321	97,18	497,11	61,5
25.	82,2	2,050	1,674	12,25	15,4682	0,8321	97,18	497,11	61,5
26.	82,7	2,042	1,674	12,25	15,4728	0,8323	97,18	497,10	61,5
27.	83,2	2,032	1,676	12,25	15,4889	0,8332	97,18	497,10	61,4
28.	99,5	3,042	1,620	12,25	14,9789	0,8056	97,20	497,24	63,6
29.	100,0	3,042	1,617	12,25	14,9466	0,8039	97,20	497,23	63,7
30.	100,5	3,048	1,617	12,25	14,9497	0,8040	97,20	497,24	63,7
31.	101,0	3,051	1,618	12,25	14,9574	0,8045	97,20	497,23	63,6
32.	101,6	3,040	1,619	12,25	14,9709	0,8052	97,20	497,24	63,6
33.	102,0	3,022	1,620	12,25	14,9777	0,8056	97,20	497,23	63,6
34.	102,5	3,007	1,622	12,25	14,9915	0,8063	97,19	497,23	63,5
35.	103,0	2,997	1,621	12,25	14,9889	0,8062	97,19	497,23	63,5
36.	103,6	3,001	1,622	12,25	14,9930	0,8064	97,19	497,23	63,5
37.	121,0	4,093	1,570	12,25	14,5251	0,7811	97,21	497,38	65,6
38.	121,5	4,049	1,568	12,25	14,5002	0,7797	97,21	497,37	65,7
39.	122,0	4,024	1,569	12,25	14,5159	0,7806	97,21	497,36	65,6
40.	122,5	4,000	1,570	12,25	14,5253	0,7811	97,21	497,36	65,6
41.	123,0	3,979	1,572	12,25	14,5393	0,7818	97,21	497,35	65,5
42.	123,5	3,954	1,573	12,25	14,5484	0,7823	97,21	497,35	65,5
43.	124,0	3,941	1,573	12,25	14,5521	0,7825	97,21	497,35	65,4
44.	124,5	3,942	1,572	12,25	14,5419	0,7820	97,21	497,35	65,5
45.	125,0	3,963	1,571	12,25	14,5322	0,7815	97,21	497,36	65,5
46.	141,4	5,136	1,519	12,25	14,0531	0,7556	97,22	497,50	67,8
47.	141,9	5,086	1,519	12,25	14,0571	0,7558	97,22	497,50	67,8
48.	142,4	5,047	1,520	12,25	14,0633	0,7561	97,22	497,49	67,8
49.	142,9	5,023	1,521	12,25	14,0694	0,7564	97,22	497,49	67,7
50.	143,4	5,004	1,522	12,25	14,0840	0,7572	97,22	497,49	67,7
51.	143,9	4,977	1,523	12,25	14,0893	0,7575	97,22	497,49	67,6
52.	144,4	4,969	1,522	12,25	14,0849	0,7573	97,22	497,48	67,6
53.	144,9	4,972	1,523	12,25	14,0906	0,7576	97,22	497,49	67,6
54.	145,4	4,970	1,522	12,25	14,0861	0,7573	97,22	497,48	67,6
55.	162,0	5,948	1,476	12,25	13,6663	0,7347	97,23	497,61	69,7
56.	162,5	5,962	1,472	12,25	13,6269	0,7325	97,23	497,61	70,0
57.	163,0	5,988	1,472	12,25	13,6291	0,7327	97,23	497,62	69,9
58.	163,5	6,000	1,472	12,25	13,6277	0,7326	97,23	497,62	69,9
59.	164,0	6,011	1,472	12,25	13,6275	0,7326	97,23	497,62	70,0
60.	164,5	6,022	1,472	12,25	13,6262	0,7325	97,23	497,61	70,0
61.	165,0	6,019	1,473	12,25	13,6377	0,7331	97,23	497,62	69,9
62.	165,5	6,006	1,474	12,25	13,6419	0,7333	97,23	497,62	69,9
63.	166,0	5,992	1,474	12,25	13,6447	0,7335	97,23	497,61	69,9
64.	183,0	7,122	1,429	12,25	13,2369	0,7114	97,28	497,95	72,1
65.	183,5	7,090	1,429	12,25	13,2309	0,7111	97,25	497,76	72,1
66.	184,0	7,060	1,429	12,26	13,2469	0,7120	97,35	498,31	72,1
67.	184,5	7,020	1,429	12,27	13,2568	0,7125	97,43	498,67	72,2
68.	185,0	6,991	1,430	12,26	13,2567	0,7125	97,35	498,30	72,1
69.	185,5	6,981	1,434	12,24	13,2687	0,7132	97,14	497,20	71,7
70.	186,0	6,971	1,434	12,24	13,2690	0,7132	97,14	497,19	71,7
71.	186,5	6,957	1,433	12,25	13,2749	0,7135	97,24	497,74	71,8
72.	187,0	6,945	1,432	12,26	13,2796	0,7137	97,35	498,30	72,0
73.	204,7	7,963	1,393	12,23	12,8902	0,6927	97,11	497,13	73,8
74.	205,3	7,927	1,389	12,26	12,8739	0,6918	97,33	498,23	74,2
75.	205,7	7,919	1,386	12,27	12,8637	0,6913	97,44	498,79	74,4
76.	206,3	7,947	1,385	12,27	12,8536	0,6907	97,44	498,80	74,5
77.	206,8	7,958	1,387	12,25	12,8574	0,6909	97,29	498,06	74,2
78.	207,3	7,968	1,389	12,24	12,8562	0,6909	97,15	497,32	74,0
79.	207,8	7,973	1,384	12,28	12,8556	0,6908	97,48	499,00	74,5
80.	208,3	7,977	1,387	12,25	12,8548	0,6908	97,29	498,06	74,3
81.	208,7	7,979	1,389	12,25	12,8595	0,6910	97,22	497,69	74,1

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_b) 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_{hm}), die rekursiv bestimmt wird.

Die reibungsbedingte Kraft am Messkörper ergibt sich aus $F_z = F_w - F_b - F_{hp} - F_\zeta - F_{hm}$. 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 Bewegungsgleichung und dem geometrischen Aufbau. Die mittlere Geschwindigkeit (nicht in der Tabelle ausgegeben; $v_m = v_z \cdot r_a^2 / (r_i^2 - r_a^2)$, mit r_a Röhrenradius und r_i 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 $d = 2(r_i - r_a)$ berechnet wird. Die Scherrate, Schergeschwindigkeit oder Deformation $\dot{\gamma}$, die für die Berechnung verwendet werden, ist berechnet als Geschwindigkeitsgradient unmittelbar an der Zylinderoberfläche.

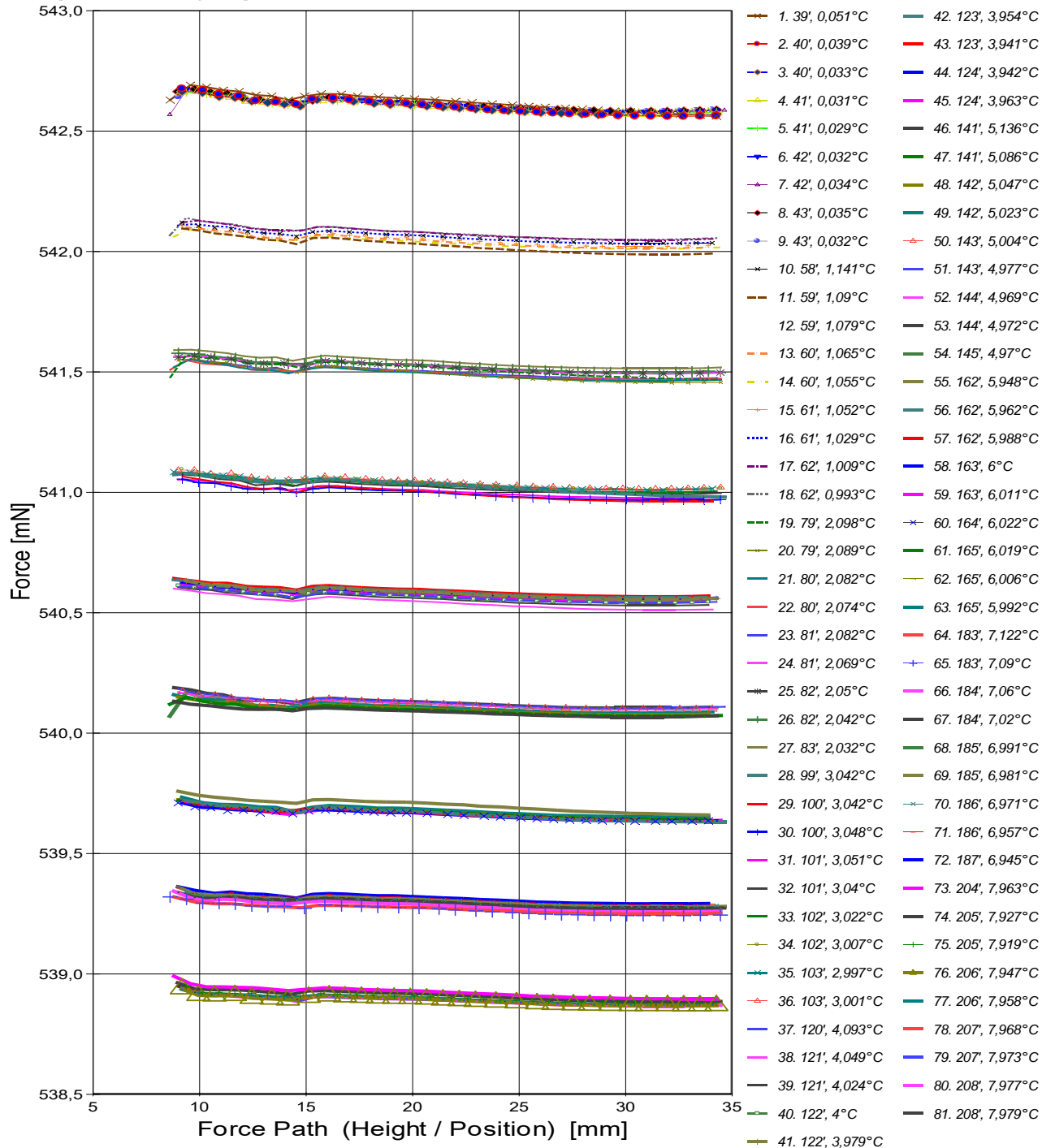
Tabelle 2, Detaildaten zur Viskositätsmessung I.

N°	F_w	σ_{Fw}	$\sigma_{Fw\ rel}$	F_ρ	F_{hp}	F_ζ	$F_{h\eta}$	N/n
			-- Alle Werteinträge in [mN] --					Datenauswahl
1.	542,6019	0,02412	44 ppm	525,5575	0,007035	0,499	0,00132	19/41
2.	542,5799	0,01754	32 ppm	525,5581	0,007174	0,499	0,00134	19/42
3.	542,5811	0,01567	29 ppm	525,5583	0,007093	0,499	0,00133	19/42
4.	542,5870	0,01566	29 ppm	525,5598	0,007031	0,499	0,00131	19/42
5.	542,5874	0,01402	26 ppm	525,5599	0,007113	0,499	0,00133	19/42
6.	542,5953	0,01505	28 ppm	525,5596	0,007034	0,499	0,00132	19/41
7.	542,5933	0,01409	26 ppm	525,5595	0,007092	0,499	0,00133	20/43
8.	542,5970	0,01445	27 ppm	525,5598	0,007070	0,499	0,00132	19/42
9.	542,5963	0,01439	27 ppm	525,5601	0,007055	0,499	0,00132	18/40
10.	542,0491	0,01423	26 ppm	525,5502	0,006955	0,499	0,00126	19/41
11.	542,0065	0,01849	34 ppm	525,5504	0,007017	0,499	0,00127	20/43
12.	542,0099	0,01352	25 ppm	525,5510	0,007114	0,499	0,00128	19/42
13.	542,0285	0,01465	27 ppm	525,5513	0,006955	0,499	0,00126	19/41
14.	542,0217	0,01168	22 ppm	525,5519	0,007114	0,499	0,00128	20/43
15.	542,0355	0,01491	28 ppm	525,5523	0,006916	0,499	0,00125	19/41
16.	542,0464	0,01412	26 ppm	525,5518	0,006998	0,499	0,00127	20/43
17.	542,0596	0,01282	24 ppm	525,5529	0,007072	0,499	0,00128	19/41
18.	542,0616	0,01265	23 ppm	525,5522	0,007114	0,499	0,00129	19/42
19.	541,4959	0,01962	36 ppm	525,5438	0,007055	0,499	0,00123	20/43
20.	541,4744	0,01845	34 ppm	525,5438	0,007074	0,499	0,00123	20/43
21.	541,4779	0,01467	27 ppm	525,5450	0,007036	0,499	0,00123	19/41
22.	541,4800	0,01307	24 ppm	525,5450	0,007097	0,499	0,00124	19/42
23.	541,4859	0,01422	26 ppm	525,5447	0,007016	0,499	0,00122	19/41
24.	541,5066	0,01379	25 ppm	525,5450	0,007076	0,499	0,00124	20/43
25.	541,5067	0,01408	26 ppm	525,5450	0,007035	0,499	0,00123	18/40
26.	541,5103	0,01279	24 ppm	525,5441	0,007035	0,499	0,00123	19/42
27.	541,5276	0,01392	26 ppm	525,5453	0,007056	0,499	0,00123	20/43
28.	541,0116	0,02019	37 ppm	525,5392	0,007074	0,499	0,00120	20/43
29.	540,9793	0,01721	32 ppm	525,5392	0,007056	0,499	0,00119	19/42
30.	540,9834	0,01574	29 ppm	525,5402	0,006974	0,499	0,00118	19/41
31.	540,9910	0,01463	27 ppm	525,5400	0,006958	0,499	0,00117	19/41
32.	541,0054	0,01267	23 ppm	525,5410	0,007117	0,499	0,00120	19/41
33.	541,0123	0,01274	24 ppm	525,5411	0,007075	0,499	0,00120	19/42
34.	541,0258	0,01360	25 ppm	525,5408	0,007035	0,499	0,00119	19/41
35.	541,0235	0,01368	25 ppm	525,5411	0,006996	0,499	0,00118	20/43
36.	541,0272	0,01266	23 ppm	525,5408	0,007151	0,499	0,00121	19/42
37.	540,5523	0,01206	22 ppm	525,5336	0,007038	0,500	0,00115	20/43
38.	540,5272	0,01490	28 ppm	525,5333	0,006997	0,500	0,00114	20/43
39.	540,5432	0,01319	24 ppm	525,5336	0,006977	0,500	0,00114	19/42
40.	540,5529	0,01187	22 ppm	525,5339	0,006978	0,500	0,00114	20/43
41.	540,5661	0,01135	21 ppm	525,5333	0,007134	0,500	0,00117	19/42
42.	540,5754	0,01387	26 ppm	525,5333	0,006857	0,500	0,00113	19/41
43.	540,5802	0,01323	24 ppm	525,5344	0,006915	0,500	0,00114	19/41
44.	540,5695	0,01291	24 ppm	525,5339	0,006958	0,500	0,00114	19/41
45.	540,5599	0,01176	22 ppm	525,5341	0,007037	0,500	0,00115	19/42
46.	540,0771	0,01006	19 ppm	525,5303	0,007036	0,500	0,00112	19/42
47.	540,0808	0,01088	20 ppm	525,5300	0,007096	0,500	0,00112	19/41
48.	540,0874	0,01057	20 ppm	525,5303	0,007015	0,500	0,00111	19/41
49.	540,0947	0,01133	21 ppm	525,5315	0,006996	0,500	0,00111	19/42
50.	540,1090	0,01116	21 ppm	525,5313	0,007018	0,500	0,00111	19/42
51.	540,1144	0,01087	20 ppm	525,5313	0,007074	0,500	0,00112	19/41
52.	540,1090	0,01057	20 ppm	525,5303	0,007076	0,500	0,00112	19/42
53.	540,1152	0,01092	20 ppm	525,5308	0,006996	0,500	0,00111	19/42
54.	540,1112	0,01073	20 ppm	525,5313	0,007015	0,500	0,00111	19/41
55.	539,6878	0,01910	35 ppm	525,5276	0,006918	0,500	0,00107	18/39
56.	539,6499	0,01587	29 ppm	525,5292	0,007096	0,500	0,00109	20/43
57.	539,6517	0,01509	28 ppm	525,5287	0,007016	0,500	0,00108	20/43
58.	539,6488	0,01376	26 ppm	525,5273	0,007053	0,500	0,00108	20/43
59.	539,6493	0,01340	25 ppm	525,5280	0,007074	0,500	0,00109	18/40
60.	539,6485	0,01393	26 ppm	525,5284	0,006976	0,500	0,00107	19/42
61.	539,6591	0,01475	27 ppm	525,5274	0,006919	0,500	0,00106	19/41
62.	539,6632	0,01422	26 ppm	525,5274	0,006977	0,500	0,00107	19/41
63.	539,6669	0,01388	26 ppm	525,5284	0,006995	0,500	0,00108	18/40
64.	539,2607	0,01157	21 ppm	525,5294	0,006997	0,500	0,00104	19/41
65.	539,2543	0,01286	24 ppm	525,5294	0,007035	0,500	0,00105	19/41
66.	539,2716	0,01374	25 ppm	525,5297	0,006994	0,501	0,00104	19/41
67.	539,2825	0,01228	23 ppm	525,5300	0,007132	0,502	0,00107	19/42
68.	539,2825	0,01152	21 ppm	525,5308	0,007117	0,501	0,00106	19/42
69.	539,2918	0,01252	23 ppm	525,5303	0,007075	0,499	0,00106	19/41
70.	539,2925	0,01165	22 ppm	525,5308	0,007094	0,499	0,00106	19/42
71.	539,2991	0,01235	23 ppm	525,5303	0,007033	0,500	0,00105	20/43
72.	539,3056	0,01343	25 ppm	525,5308	0,006897	0,501	0,00103	19/41
73.	538,9116	0,01352	25 ppm	525,5289	0,007034	0,499	0,00102	19/42
74.	538,8989	0,01296	24 ppm	525,5303	0,007073	0,501	0,00103	20/43
75.	538,8892	0,01074	20 ppm	525,5297	0,007114	0,502	0,00103	19/42
76.	538,8806	0,01210	22 ppm	525,5311	0,007033	0,502	0,00102	19/41
77.	538,8821	0,01112	21 ppm	525,5303	0,007095	0,500	0,00103	19/42
78.	538,8792	0,01147	21 ppm	525,5302	0,007131	0,499	0,00103	19/42
79.	538,8814	0,01176	22 ppm	525,5294	0,006936	0,502	0,00100	18/40
80.	538,8786	0,01108	21 ppm	525,5294	0,007055	0,500	0,00102	19/42

Tabellensymbole: F_w Betrag der gemittelten stationären Kraft bei Bewegung des Zylinders [mN], σ_{F_w} Standardabweichung der Kraftmesswerte des stationären Bereichs [mN], $\sigma_{F_w rel}$ 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], $F_{h\eta}$ 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 Messwerteauswahl ist in der letzten Spalte 'N/n' angegeben; durch den angewendeten Cutoff-Algorithmus werden Drückstöße 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-) Kapillarkviskosimetern 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 _{cl} [mm]	D _{RSP} [mm]	ΔD _{RSP} [μm]	Ø _{zyl.} [mm]	L _{zyl.} [mm]	Σ _σ [mPa·s]	Σ _{σ_{rel.}}
1.	4,14E-04	4,925	33,002	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
2.	3,24E-04	4,913	33,014	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
3.	2,72E-04	4,925	33,014	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
4.	2,72E-04	4,925	32,634	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
5.	2,61E-04	5,023	32,916	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
6.	2,59E-04	5,109	32,830	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
7.	2,51E-04	4,913	33,394	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%

8.	2,52E-04	4,913	33,026	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
9.	2,57E-04	4,913	32,830	0,7699	2,43	14,4641	41,2331	0,018	1,0%
10.	2,23E-04	5,011	32,720	0,7698	2,32	14,4643	41,2339	0,018	1,0%
11.	3,09E-04	4,913	32,842	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
12.	2,47E-04	4,913	33,014	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,017	0,98%
13.	2,49E-04	5,011	32,561	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
14.	2,24E-04	5,011	33,112	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,017	0,98%
15.	2,47E-04	4,925	32,622	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
16.	2,36E-04	4,913	32,634	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
17.	2,34E-04	4,913	32,830	0,7698	2,33	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
18.	2,23E-04	4,913	33,210	0,7698	2,34	14,4643	41,2338	0,018	1,0%
19.	3,27E-04	4,925	33,014	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
20.	2,98E-04	4,913	33,222	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
21.	2,34E-04	5,011	33,124	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
22.	2,21E-04	4,913	33,210	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
23.	2,59E-04	5,219	32,720	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
24.	2,27E-04	4,913	33,210	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
25.	2,33E-04	4,925	33,198	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
26.	2,18E-04	4,913	32,646	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
27.	2,19E-04	4,913	33,210	0,7697	2,23	14,4646	41,2345	0,017	1,0%
28.	3,33E-04	4,913	33,406	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
29.	2,91E-04	4,913	32,830	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
30.	2,33E-04	4,913	33,210	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
31.	2,29E-04	4,913	32,634	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
32.	2,23E-04	4,913	33,210	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
33.	2,17E-04	4,913	33,014	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
34.	2,23E-04	4,913	33,222	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
35.	2,30E-04	4,913	32,830	0,7696	2,14	14,4648	41,2351	0,016	0,99%
36.	2,33E-04	4,913	33,222	0,7696	2,13	14,4648	41,2352	0,016	0,99%
37.	1,96E-04	5,121	32,806	0,7695	2,03	14,4651	41,2359	0,016	1,0%
38.	2,41E-04	4,925	32,818	0,7695	2,03	14,4650	41,2359	0,016	1,0%
39.	2,04E-04	4,913	32,634	0,7695	2,03	14,4650	41,2359	0,016	1,0%
40.	1,98E-04	4,925	32,622	0,7695	2,03	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
41.	1,97E-04	5,207	32,732	0,7695	2,04	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
42.	2,13E-04	4,913	32,634	0,7695	2,04	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
43.	2,05E-04	4,925	32,634	0,7695	2,04	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
44.	2,02E-04	4,913	33,014	0,7695	2,04	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
45.	2,02E-04	4,925	32,622	0,7695	2,04	14,4650	41,2358	0,016	1,0%
46.	1,73E-04	4,827	33,124	0,7694	1,92	14,4653	41,2366	0,015	0,99%
47.	1,71E-04	4,925	33,210	0,7694	1,93	14,4653	41,2366	0,015	0,99%
48.	1,77E-04	4,913	32,634	0,7694	1,93	14,4653	41,2366	0,015	0,99%
49.	1,86E-04	4,925	32,818	0,7694	1,93	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
50.	1,74E-04	5,109	32,634	0,7694	1,94	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
51.	1,83E-04	4,925	33,382	0,7694	1,94	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
52.	1,81E-04	4,913	33,026	0,7694	1,94	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
53.	1,81E-04	4,913	32,659	0,7694	1,94	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
54.	1,89E-04	4,901	33,026	0,7694	1,94	14,4653	41,2365	0,015	0,99%
55.	3,08E-04	4,913	32,634	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
56.	2,59E-04	4,913	33,406	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
57.	2,42E-04	4,827	32,904	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
58.	2,07E-04	4,827	33,112	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
59.	2,08E-04	4,925	33,198	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
60.	2,15E-04	4,913	32,646	0,7693	1,83	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
61.	2,27E-04	4,925	32,634	0,7693	1,83	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
62.	2,21E-04	4,913	32,634	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
63.	2,11E-04	4,925	32,634	0,7693	1,84	14,4655	41,2372	0,015	1,0%
64.	1,70E-04	4,913	33,210	0,7692	1,73	14,4658	41,2380	0,014	0,98%
65.	2,00E-04	4,925	33,198	0,7692	1,73	14,4658	41,2380	0,014	0,98%
66.	2,02E-04	5,011	33,112	0,7692	1,73	14,4658	41,2379	0,014	0,98%
67.	1,91E-04	4,925	33,382	0,7692	1,74	14,4658	41,2379	0,014	0,98%
68.	1,65E-04	5,011	33,112	0,7692	1,74	14,4658	41,2379	0,014	0,98%
69.	1,96E-04	4,913	33,406	0,7692	1,74	14,4658	41,2379	0,015	1,0%
70.	1,93E-04	5,011	32,916	0,7692	1,74	14,4657	41,2379	0,015	1,0%
71.	1,80E-04	4,925	32,830	0,7692	1,74	14,4657	41,2379	0,015	1,0%
72.	2,01E-04	4,925	32,622	0,7692	1,74	14,4657	41,2379	0,015	1,0%
73.	2,08E-04	4,913	33,026	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
74.	2,02E-04	4,901	33,222	0,7691	1,65	14,4660	41,2385	0,014	1,0%
75.	1,82E-04	4,925	33,014	0,7691	1,65	14,4660	41,2385	0,014	1,0%
76.	1,77E-04	4,925	33,014	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
77.	1,91E-04	5,023	32,720	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
78.	1,89E-04	5,023	32,916	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
79.	1,81E-04	5,011	32,536	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
80.	1,85E-04	4,913	33,210	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	1,0%
81.	1,76E-04	4,925	32,818	0,7691	1,64	14,4660	41,2386	0,014	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_{C} 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], \varnothing_{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 Bewegung 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. DICHT E-MESSUNG

81 Messwerte; Zeitbereich 40 bis 209 min, Temperatur $\Delta T = +7,953$ K

Ergebniswert: $\rho_{1^\circ\text{C}} = 0,99989 \pm 0,000038$ g/cm³ bzw. ± 38 ppm (274,15 K, 96,63 kPa)

Streuung: $\pm 1,6 \cdot 10^{-5}$ g/cm³ absolute bzw. 16 ppm relative Standardabweichung

Berechnung: quadratische Regressionsgleichung.

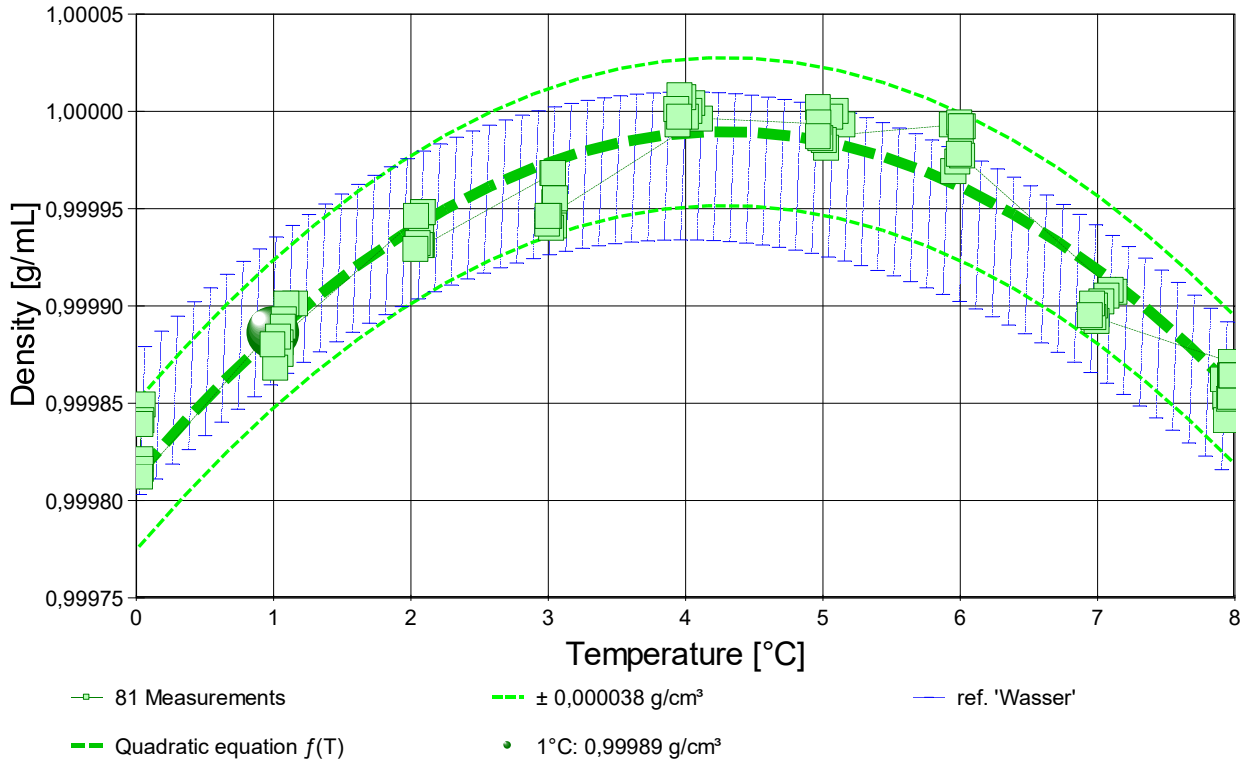
Temperaturzusammenhang zwischen 0,027 und 7,980 °C:

ρ [g/cm³] = $f(\vartheta[^\circ\text{C}]) = 0,999813 + 8,258 \cdot \vartheta/1\text{E}5 - 0,9635 \cdot \vartheta^2/1\text{E}5$ mit $r^2=0,925, s^2=2,69\text{E}-10$

Der Ausdehnungskoeffizient κ mit $-6,3 [10^{-5}\text{K}^{-1}]$ hat bei der Angabetemperatur 1°C ein *falsches Vorzeichen* und einen sehr stark ungewöhnlichen Betrag. Er entspricht der Dichte-Änderung von 63 ppm, entsprechend $-0,00006$ g/cm³ pro Grad bei der Angabetemperatur 1°C.

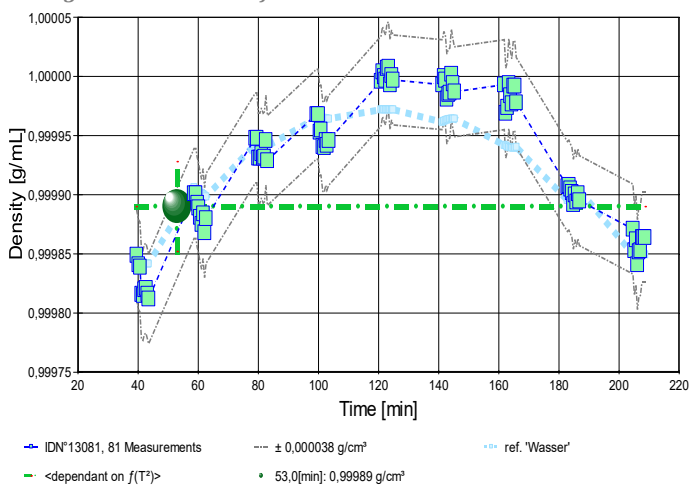
- Die Messdaten werden automatisch analysiert. Ergebnis und ermittelte Formeln stellen Vorschläge dar, wobei sich aus den Umständen der Messung ggf. andere Zusammenhänge ergeben können. Ein 'normaler' Ausdehnungskoeffizient reicht bei 25°C von etwa 50 bis 150 10^{-5}K^{-1} . Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'ungenügend' 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.'



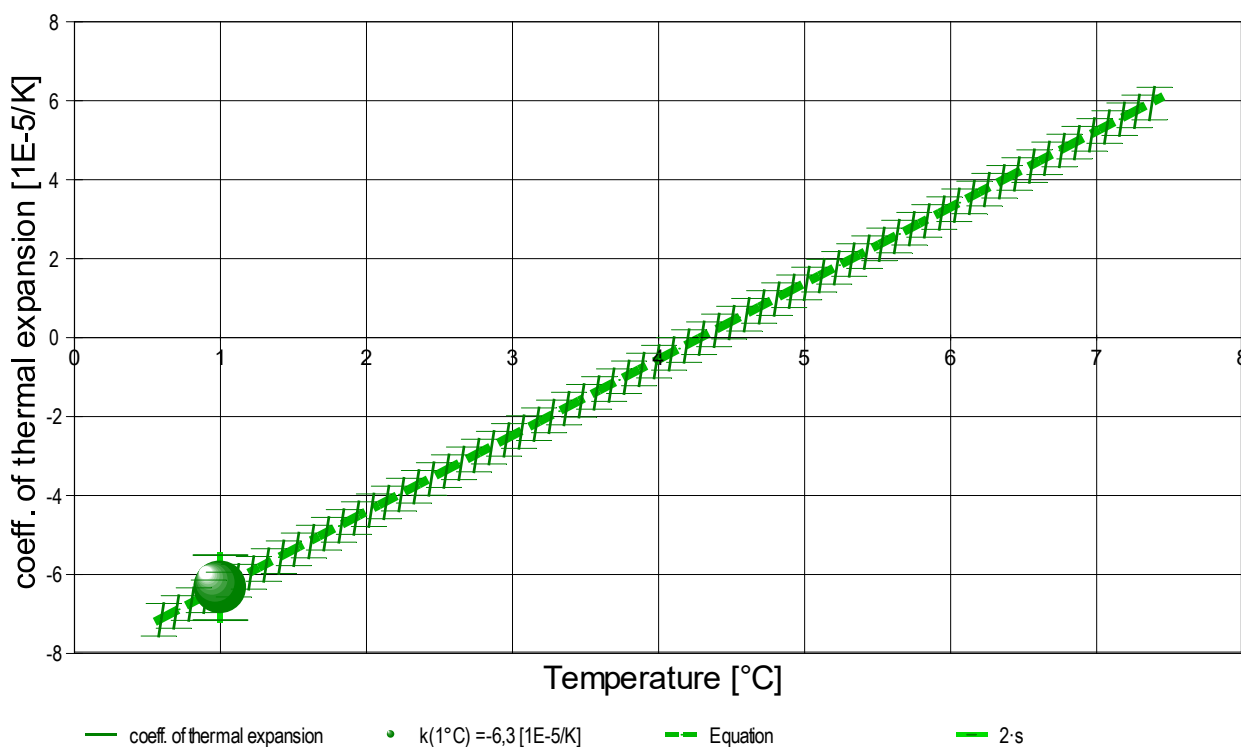
- Das Diagramm 6, "rho-Temp.", zeigt die 81 Dichtemesswerte als Quadratsymbol bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 1°C für die Wasser-Probe ist als Kugel abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird durch gestrichelte Linien ausgewiesen. Der Verlauf der Regressionsfunktion 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, " κ -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:

$$\kappa \text{ [} 10^{-5} \cdot K^{-1} \text{]} = f(\vartheta \text{ [} ^\circ\text{C} \text{]}) = (-8,258 + 1,927 \cdot \vartheta) / (0,99981 + 8,2583E-05 \cdot \vartheta - 9,6351E-06 \cdot \vartheta^2)$$

Die Genauigkeit der Gleichung wird aus der Regressionsfunktion zu $\pm 0,4 \cdot 10^{-5} / K$ angenommen. Bei 1 °C beträgt die relative Zunahme des Koeffizienten der Dichten 30% 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_{ϑ} bei der Temperatur ϑ über das entsprechende Verhältnis der Dichten bestimmt werden:

$$V_{\vartheta} = V_{\vartheta^0} \cdot (0,99981 + 8,2583 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^0 - 9,6351 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^{0^2}) / (0,99981 + 8,2583 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta - 9,6351 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

Tabelle 4: Daten der Dichtemessung

N° IDN°13081	t [min]	ϑ [°C]	ρ [g/cm³]	H [mm]	ω [s]	$\Delta\rho_\omega$ [g/cm³]	N Werte & Trend	F _A [mN]	F _{kor.} [mN], TSymb.
1.	39,5	0,052	0,99985	4,549	0,0	0	1	525,558	-
2.	40,1	0,040	0,99984	4,549	0,0	0	1	525,558	-
3.	40,6	0,034	0,99984	4,549	0,0	0	1	525,558	-
4.	41,1	0,033	0,99982	4,549	0,0	0	1	525,560	-
5.	41,6	0,027	0,99982	4,549	0,0	0	1	525,560	-
6.	42,1	0,031	0,99982	4,549	0,0	0	1	525,560	-
7.	42,6	0,033	0,99982	4,549	0,0	0	1	525,560	-
8.	43,1	0,035	0,99982	4,549	0,0	0	1	525,560	-
9.	43,5	0,032	0,99981	4,549	0,0	0	1	525,560	-
10.	58,6	1,159	0,99990	4,549	0,0	0	1	525,550	-
11.	59,2	1,096	0,99990	4,549	0,0	0	1	525,550	-
12.	59,7	1,079	0,99989	4,549	0,0	0	1	525,551	-
13.	60,1	1,071	0,99989	4,549	0,0	0	1	525,551	-
14.	60,6	1,054	0,99988	4,549	0,0	0	1	525,552	-
15.	61,1	1,055	0,99988	4,549	0,0	0	1	525,552	-
16.	61,6	1,037	0,99988	4,549	0,0	0	1	525,552	-
17.	62,1	1,015	0,99987	4,549	0,0	0	1	525,553	-
18.	62,6	0,995	0,99988	4,549	0,0	0	1	525,552	-
19.	79,0	2,092	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,544	-
20.	79,5	2,091	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,544	-
21.	80,0	2,084	0,99993	4,549	0,0	0	1	525,545	-
22.	80,5	2,076	0,99993	4,549	0,0	0	1	525,545	-
23.	81,0	2,079	0,99994	4,549	0,0	0	1	525,545	-
24.	81,6	2,074	0,99993	4,549	0,0	0	1	525,545	-
25.	82,0	2,053	0,99993	4,549	0,0	0	1	525,545	-
26.	82,5	2,040	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,544	-
27.	83,0	2,037	0,99993	4,549	0,0	0	1	525,545	-
28.	99,3	3,033	0,99997	4,549	0,0	0	1	525,539	-
29.	99,9	3,040	0,99997	4,549	0,0	0	1	525,539	-
30.	100,4	3,047	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,540	-
31.	100,8	3,052	0,99996	4,549	0,0	0	1	525,540	-
32.	101,4	3,045	0,99994	4,549	0,0	0	1	525,541	-
33.	101,9	3,025	0,99994	4,549	0,0	0	1	525,541	-
34.	102,4	3,011	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,541	-
35.	102,8	2,996	0,99994	4,549	0,0	0	1	525,541	-
36.	103,4	2,998	0,99995	4,549	0,0	0	1	525,541	-
37.	120,8	4,110	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,534	-

38.	121,3	4,053	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,533	-
39.	121,8	4,033	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,534	-
40.	122,3	4,006	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,534	-
41.	122,8	3,987	1,00001	4,549	0,0	0	1	525,533	-
42.	123,3	3,960	1,00001	4,549	0,0	0	1	525,533	-
43.	123,8	3,945	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,534	-
44.	124,3	3,937	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,534	-
45.	124,8	3,957	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,534	-
46.	141,2	5,147	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,530	-
47.	141,7	5,098	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,530	-
48.	142,2	5,058	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,530	-
49.	142,7	5,028	0,99998	4,549	0,0	0	1	525,532	-
50.	143,2	5,011	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,531	-
51.	143,7	4,985	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,531	-
52.	144,2	4,968	1,00000	4,549	0,0	0	1	525,530	-
53.	144,7	4,972	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,531	-
54.	145,2	4,968	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,531	-
55.	161,8	5,942	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,528	-
56.	162,3	5,954	0,99997	4,549	0,0	0	1	525,529	-
57.	162,8	5,983	0,99997	4,549	0,0	0	1	525,529	-
58.	163,3	5,996	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,527	-
59.	163,8	6,008	0,99998	4,549	0,0	0	1	525,528	-
60.	164,3	6,017	0,99998	4,549	0,0	0	1	525,528	-
61.	164,8	6,023	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,527	-
62.	165,3	6,009	0,99999	4,549	0,0	0	1	525,527	-
63.	165,8	5,994	0,99998	4,549	0,0	0	1	525,528	-
64.	182,8	7,129	0,99991	4,549	0,0	0	1	525,529	-
65.	183,3	7,099	0,99991	4,549	0,0	0	1	525,529	-
66.	183,8	7,069	0,99991	4,549	0,0	0	1	525,530	-
67.	184,3	7,032	0,99990	4,549	0,0	0	1	525,530	-
68.	184,8	6,996	0,99989	4,549	0,0	0	1	525,531	-
69.	185,3	6,985	0,99990	4,549	0,0	0	1	525,530	-
70.	185,8	6,973	0,99989	4,549	0,0	0	1	525,531	-
71.	186,3	6,963	0,99990	4,549	0,0	0	1	525,530	-
72.	186,8	6,948	0,99989	4,549	0,0	0	1	525,531	-
73.	204,6	7,976	0,99987	4,549	0,0	0	1	525,529	-
74.	205,1	7,934	0,99985	4,549	0,0	0	1	525,530	-
75.	205,6	7,918	0,99986	4,549	0,0	0	1	525,530	-
76.	206,1	7,939	0,99984	4,549	0,0	0	1	525,531	-
77.	206,6	7,958	0,99985	4,549	0,0	0	1	525,530	-
78.	207,1	7,968	0,99985	4,549	0,0	0	1	525,530	-
79.	207,6	7,969	0,99986	4,549	0,0	0	1	525,529	-
80.	208,1	7,976	0,99986	4,549	0,0	0	1	525,529	-
81.	208,6	7,980	0,99986	4,549	0,0	0	1	525,529	-

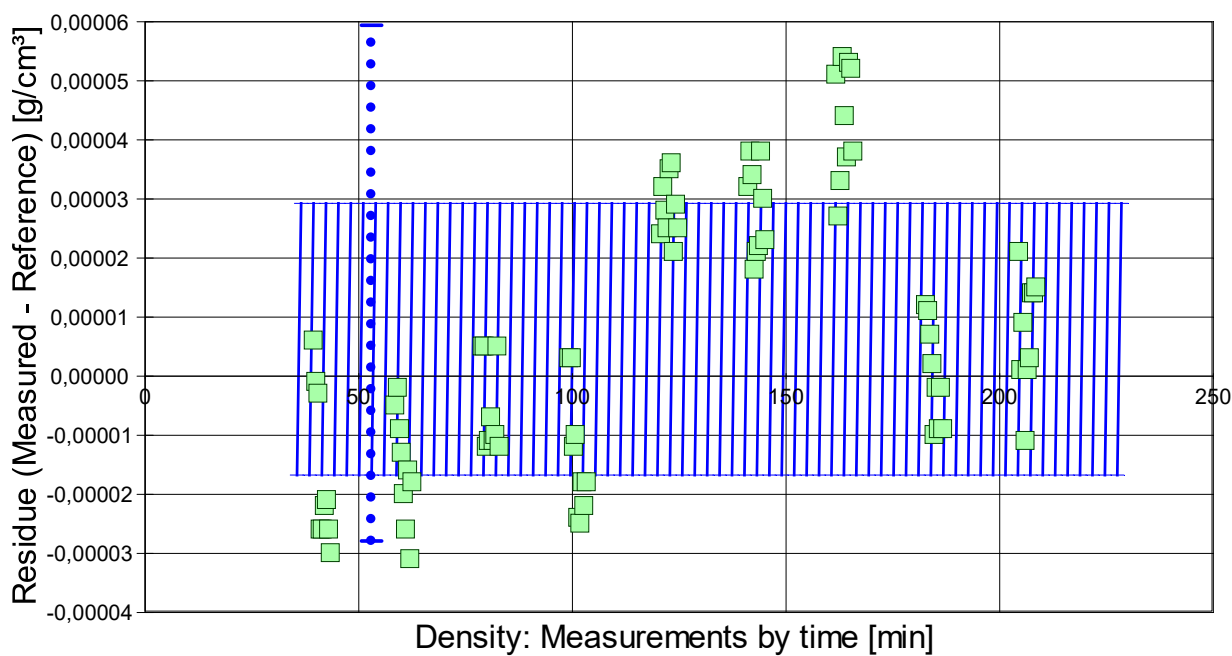
Tabellensymbole: *t* Zeitpunkt [min], *θ* Temperatur [°C], *ρ* Dichte [g/cm³], *H* Positionshöhe der Messkörperunterkannte über der Nullhöhe beim Dichtemesswert [mm], *ω* Beobachtungsdauer der aufgezeichneten Auftriebsmessung [s], *Δρ_ω* Standardabweichung der Dichtewerte in der Beobachtungszeit [g/cm³], *N* Anzahl Auftriebsmesswerte ggf. mit Wägewertezahl 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.

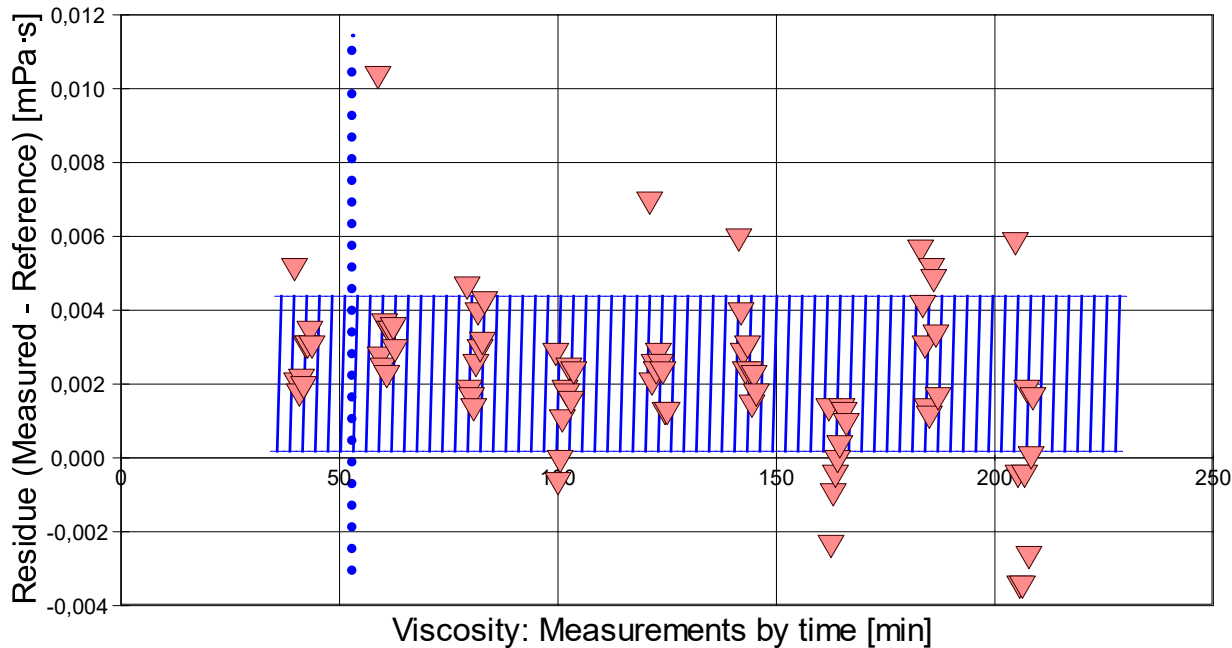
- **VORSICHT** Die Bedeutung des automatischen Vergleichs mit jeweiligen Referenzwerten ist völlig von der Richtigkeit und Präzision der hinterlegten Stoffdaten abhängig. - *Diagramm 8.*
Referenzabweichung der Dichtemesswerte - 'rho-Residuen'



Reference values for 'Wasser' acc. to $f(T[^\circ\text{C}]) = (99983.952 + 1695.2577 \cdot T - 0.79905127 \cdot T^2 - 4.6241757E-3 \cdot T^3 + 1.0584601E-5 \cdot T^4 - 2.8103006E-8 \cdot T^5) / (1e5 + 1688.7236 \cdot T)$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $6,26E-06 \pm 2,3E-05 \text{ g/cm}^3$, relative: +6,3 ppm at a spread of 23 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 $f(T[^\circ\text{C}]) = 37.1941 \cdot \text{EXP}(1.35960E+11/(273.15+T)^4 - 1.44585E+09/(273.15+T)^3 + 6.04736E+06/(273.15+T)^2 - 1.02607E+04/(273.15+T))$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $0,00228 \pm 0,0021 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, relative: +0,13% at a spread of 0,12%

- Das Chart N°10, "eta-Residuen", zeigt temperaturkompensierte Abweichungen der einzelnen Viskositätsmesswerte zum jeweiligen Wert des 'besten Treffers' 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 1°C

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
ρ	0,99990	0,99989	-0,00001 g/cm ³	10 ppm	@
$-\Delta\rho/\Delta T$	-0,00005	-0,00006	-0,00001 g/cm ³ ·K ⁻¹	20%	@

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
η	1,731	1,734	+0,003 mPa·s	0,2%	@
$-\Delta\eta/\Delta T$	0,059	0,058	-0,001 mPa·s·K ⁻¹	2%	@

Referenzdatenbank liefert für η mit **Water (10-100°C)**, 1,7311 mPa·s, einen ähnlichen, präzisen, Vergleichswert. Der Unterschied zum Messwert beträgt absolut 0,003 mPa·s. - 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 1°C); die Zahl zu "Δ u" 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

--- DICHT E --- REFERENZEN ----- (g/cm ³) -----	A B W E I C H U N G -----	REF. ID -----
1. Wasser ¹	0,9998985	+10 ppm ID136.4
2. Water (Augsburg, air-free) ¹	0,999899	+10 ppm ID1253.3
3. Water P&M ¹	0,9999012	+10 ppm ID1438.1
4. Wasser , SMOW ¹	0,999902	+10 ppm ID1392.1
5. Water, SMOW ¹	0,9999017	+10 ppm ID1254.7
6. Liquor cerebrospinalis ²	1,007 (25°C)	+0,71% ID1278.1
7. TEGO Polyether ¹	1,02860	+2,9% ID1009.9
8. Toluol ¹	0,884420	-12% ID1422.9

--- V I S K O S I T Ä T ----- (mPa·s) -----	A B W E I C H U N G -----	REF. ID -----
1. Water (10-100°C) ¹	1,7311	-0,17% ID5.1
2. Wasser ¹	1,7305	-0,17% ID1174.3
3. Ethanol ¹	1,759	+1,4% ID44.1
4. Undekanol ¹	1,6749	-3,4% ID227.8
5. Acetophenon ¹	1,671	-3,6% ID192.4
6. Isobuttersäure ¹	1,825	+5,2% ID88.3
7. Methyl benzoat ²	1,86 (0°C)	+7,3% ID193.5
8. Epichlorhydrin ¹	1,563	-9,9% ID53.1

¹Wert für 1,0°C berechnet. ²tabellierter Referenzwert. 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. $\kappa [10^{-6}K^{-1}] = f(\vartheta[°C]) = 50,873 - 0,18583 \cdot \vartheta + 3,8490 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^2 - 1,9601 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^3$

Nicht tauchendes Gewicht am Messzylinder (Lastträger, Haltekonus) 6,3195 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 $8 \cdot 10^{-6}K^{-1}$.

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: 79,6 mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: 38,3 mm.

m). **Messunsicherheiten des Ergebnisses:** Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu 0,98% 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_{η} 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°13081 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured raw data)

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZ224-CW) wurde zuletzt drei Tage 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]
57,2	34,9	20,150	96,113	1,13823
78,8	35,96	20,23	96,115	1,1378
99,1	36,38	20,33	96,116	1,13739
119,4	37,54	20,37	96,12	1,13717
140,9	37,3	20,390	96,111	1,13697
161,5	37,88	20,457	96,10	1,13652
182,2	38,44	20,51	96,072	1,13589
202,2	38,4	20,6	96,037	1,13526

Obige Zusammenstellung gibt die Aufzeichnung der Atmosphären Daten 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:

Wie wirkt sich die Dichteanomalie von Wasser (maximale Dichte bei 3.98°C) auf die Viskosität aus?

=> Die Dichteanomalie wirkt sich nicht in der dynamischen Viskosität aus - in einer genau bestimmten kinematischen Viskosität, da natürlich schon.

Bei der Angabetemperatur 1°C ist der Ausdehnungskoeffizient negativ. In Diagramm 8 schneidet der Graph des Ausdehnungskoeffizienten die Null-Linie bei rund 4°C. Relativ zu kurz eingestellte Temperierzeiten und DiVA-B Verfahren.

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