

• 3. VISKOSITÄTS - MESSUNG

94 Messwerte; Zeitbereich 20 bis 221 min, Temperatur $\Delta T = +24,066$ K

Ergebniswert: $\eta_{20^\circ\text{C}} = 0,2357 \pm 0,0028$ mPa·s bzw. $\pm 1,2\%$ (293,15 K)

Streuung: $\pm 7,9 \cdot 10^{-4}$ mPa·s absolute bzw. 0,34% relative Standardabweichung

Berechnung: lineare Regressionsgleichung.

Temperaturzusammenhang zwischen 9,954 und 34,020 °C:

$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(\vartheta[^\circ\text{C}]) = 0,2883 \cdot e^{(-10,0657 \cdot \vartheta/1000)} \text{ mit } r^2=0,9981, s^2=6,17\text{E-}7$$

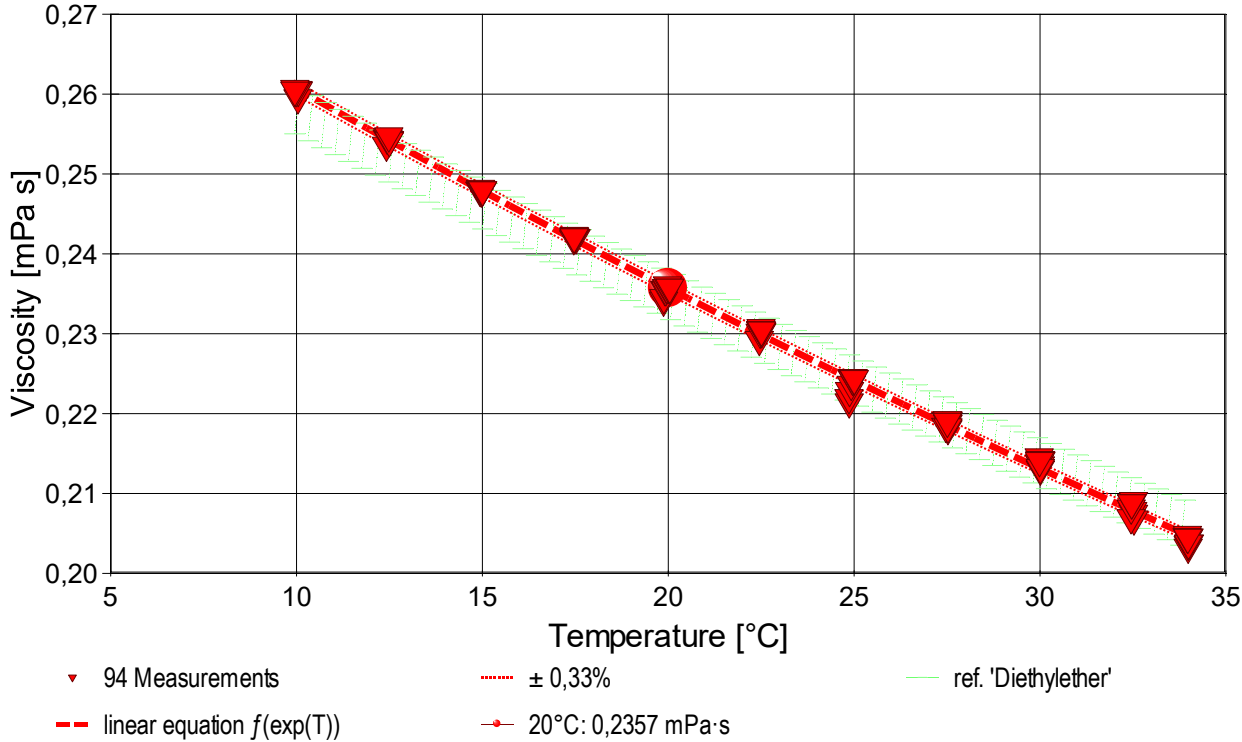
Messung bei konstanter Schergeschwindigkeit (CR): $\dot{\gamma} = 500 \pm 1$ s⁻¹.

Der Temperaturkoeffizient der Viskosität κ_η mit $10,1$ [10⁻³K⁻¹] entspricht normalen Werten im unteren 'Normalbereich'.

Er entspricht der Viskositätsabnahme von 1,0%, entsprechend -0,0024 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 10⁻³K⁻¹. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'brauchbar' 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 94 Viskositätsmesswerte als Dreiecke bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 20°C für die Diethylether-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 'Diethylether-' ist schraffiert in der Breite der Messunsicherheit eingezeichnet.

Die thermodynamische Formulierung gemäß der *Arrhenius-Andrade* Beziehung lautet für die Diethylether-Probe zwischen 10 und 34°C :

$$\eta \text{ [mPa}\cdot\text{s]} = f(T[\text{K}]) = 0,011769 \cdot e^{878,09/T} \text{ mit } r^2=0,9987 \text{ und } s^2=7,7 \cdot 10^{-7}$$

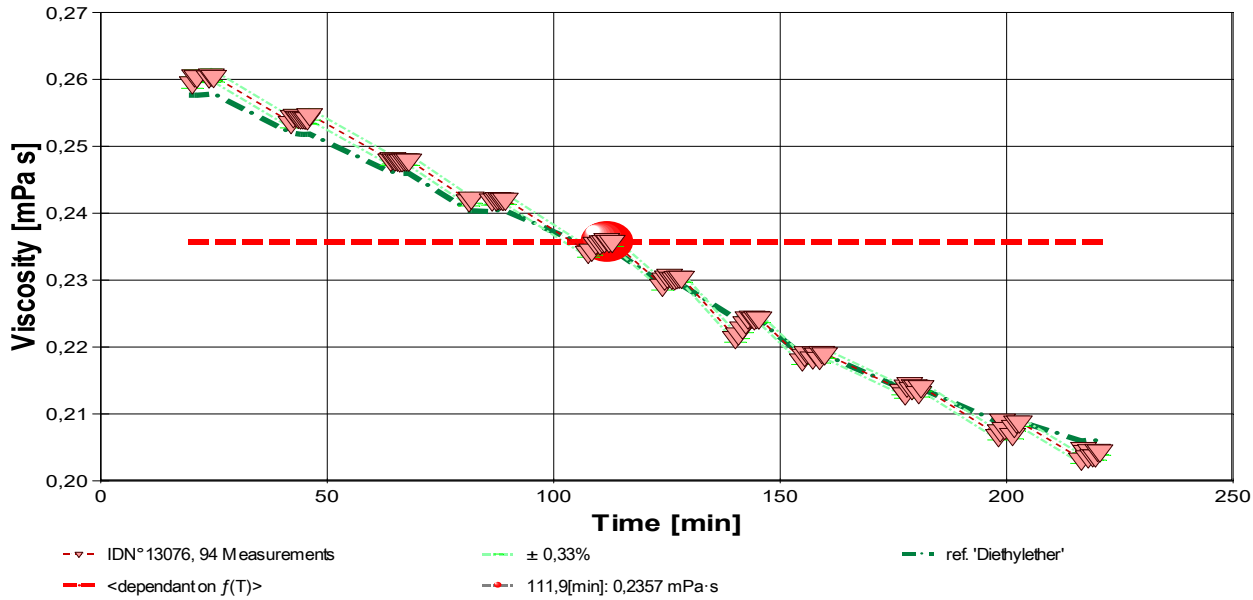
- Die Arrhenius Gleichung der Form " $k = A \cdot e^{-E_a/RT} = \eta$ " gibt in Entsprechung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k die Viskosität η an. In der Gleichung bedeuten die beiden Konstanten 'A' Arrheniusfaktor bzw. eine Materialkonstante ($\ln(A)=-4,44$) sowie ' E_a ' die Aktivierungs- bzw. Platzwechselenergie. $E_a=-7,30$ kJ/mol (R ist die allgemeine Gaskonstante).

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 [mm²/s]) ergibt sich nach:

$$\nu \text{ [mm}^2\text{/s]} = f(\vartheta[^\circ\text{C}]) = 0,28827 \cdot e^{(-0,010066 \cdot \vartheta)} / (0,7378 - 0,0011172 \cdot \vartheta - 1,2461 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

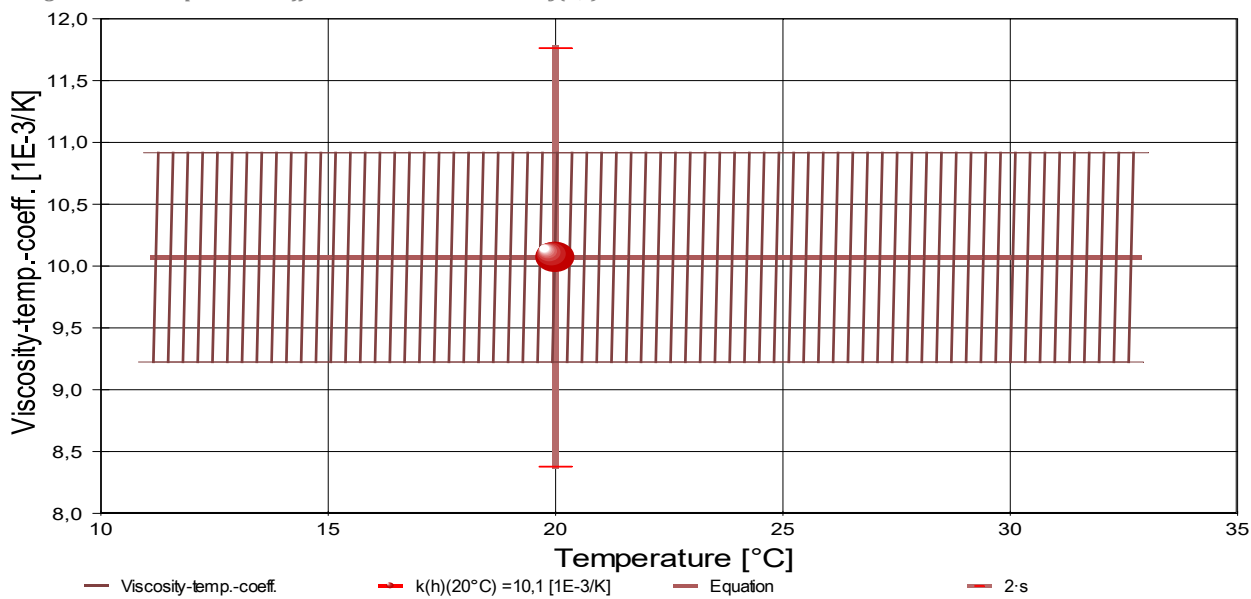
- Die kinematische Viskosität stellt die Zähigkeit eines Fluids inklusive seiner Massenträgheit dar, aus ihr kann ggf. der Viskositätsindex (VI) nach ASTM D2270 berechnet werden. .

- 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 dem Verlauf der Viskositätsmesswerte ergibt sich keine Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten im durchmessenen Intervall: $\kappa_\eta = 10,1 \pm 0,8 [10^{-3} \cdot K^{-1}]$.

Die Abnahme der Viskosität bei steigender Temperatur beträgt *konstant* 1,0% pro Grad.

- Die Viskosität η für eine Temperatur im Messbereich kann ausgehend von einem bekannten Wert η° erfolgen: $\eta = \eta^\circ \cdot e^{(\eta^\circ \Delta T)}$.

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° IDN°13076	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.	20,2	10,038	0,2595	12,25	2,4066	0,1293	97,28	498,13	288
2.	20,7	10,039	0,2606	12,25	2,4163	0,1298	97,28	498,13	287
3.	21,2	10,043	0,2605	12,25	2,4152	0,1297	97,28	498,14	287
4.	23,9	9,985	0,2604	12,25	2,4147	0,1297	97,28	498,12	287
5.	24,4	9,954	0,2607	12,25	2,4174	0,1299	97,28	498,13	287
6.	24,9	9,955	0,2605	12,25	2,4153	0,1298	97,28	498,12	287
7.	42,0	12,418	0,2536	12,25	2,3539	0,1264	97,31	498,44	294
8.	42,5	12,438	0,2545	12,25	2,3621	0,1268	97,31	498,44	293
9.	43,1	12,453	0,2547	12,25	2,3639	0,1269	97,31	498,45	293
10.	43,6	12,472	0,2544	12,25	2,3612	0,1268	97,31	498,44	293
11.	44,1	12,493	0,2543	12,25	2,3603	0,1267	97,31	498,45	293
12.	44,6	12,501	0,2543	12,25	2,3605	0,1268	97,31	498,44	293
13.	45,1	12,498	0,2542	12,25	2,3600	0,1267	97,31	498,44	293
14.	45,6	12,495	0,2542	12,25	2,3592	0,1267	97,31	498,44	293
15.	46,1	12,481	0,2548	12,25	2,3648	0,1270	97,31	498,45	292
16.	64,0	14,930	0,248	12,25	2,3041	0,124	97,3	498,8	300
17.	64,5	14,949	0,2482	12,25	2,3062	0,1238	97,34	498,75	299
18.	65,0	14,954	0,2480	12,25	2,3045	0,1237	97,34	498,76	299

19.	65,5	14,963	0,248	12,25	2,3041	0,124	97,3	498,8	300
20.	66,0	14,968	0,2479	12,25	2,3032	0,1236	97,34	498,76	299
21.	66,5	14,986	0,2479	12,25	2,3035	0,1236	97,34	498,76	299
22.	67,0	15,001	0,2480	12,25	2,3045	0,1237	97,34	498,76	299
23.	67,5	15,006	0,2480	12,25	2,3046	0,1237	97,34	498,77	299
24.	68,0	15,005	0,2480	12,25	2,3043	0,1237	97,34	498,77	299
25.	81,3	17,458	0,2419	12,25	2,2500	0,1207	97,37	499,07	306
26.	81,8	17,463	0,2423	12,25	2,2538	0,1209	97,37	499,07	305
27.	86,4	17,521	0,2420	12,25	2,2514	0,1208	97,38	499,09	305
28.	87,3	17,496	0,2421	12,25	2,2517	0,1208	97,37	499,08	305
29.	87,7	17,476	0,2422	12,25	2,2532	0,1209	97,37	499,07	305
30.	88,3	17,471	0,242	12,25	2,2526	0,121	97,4	499,1	310
31.	88,8	17,465	0,2421	12,25	2,2520	0,1208	97,37	499,08	305
32.	89,3	17,467	0,242	12,25	2,2522	0,121	97,4	499,1	310
33.	107,6	19,874	0,234	12,25	2,1807	0,117	97,4	499,4	310
34.	108,4	19,879	0,235	12,25	2,1837	0,117	97,4	499,4	310
35.	109,3	19,906	0,2355	12,25	2,1931	0,1176	97,41	499,39	313
36.	110,2	19,935	0,235	12,25	2,1927	0,118	97,4	499,4	310
37.	110,7	19,952	0,2358	12,25	2,1954	0,1177	97,40	499,39	312
38.	111,2	19,967	0,236	12,25	2,1956	0,118	97,4	499,4	310
39.	111,7	19,980	0,2361	12,25	2,1985	0,1179	97,40	499,38	312
40.	112,2	20,012	0,2358	12,25	2,1959	0,1178	97,41	499,40	312
41.	112,9	20,038	0,2358	12,25	2,1959	0,1178	97,41	499,41	312
42.	124,0	22,450	0,2293	12,25	2,1371	0,1146	97,43	499,70	320
43.	124,5	22,471	0,230	12,25	2,1457	0,115	97,4	499,7	320
44.	125,1	22,489	0,230	12,25	2,1485	0,115	97,4	499,7	320
45.	125,6	22,497	0,231	12,25	2,1510	0,115	97,4	499,7	320
46.	126,1	22,513	0,230	12,25	2,1469	0,115	97,4	499,7	320
47.	126,7	22,514	0,230	12,25	2,1462	0,115	97,4	499,7	320
48.	127,2	22,497	0,230	12,25	2,1478	0,115	97,4	499,7	320
49.	127,7	22,491	0,2305	12,25	2,1484	0,1152	97,44	499,71	318
50.	128,2	22,508	0,230	12,25	2,1482	0,115	97,4	499,7	320
51.	140,1	24,868	0,221	12,25	2,0663	0,111	97,5	500,0	330
52.	140,8	24,860	0,222	12,25	2,0712	0,111	97,5	500,0	330
53.	141,7	24,875	0,223	12,25	2,0797	0,111	97,5	500,0	330
54.	142,4	24,922	0,224	12,25	2,0869	0,112	97,5	500,0	330
55.	142,9	24,947	0,224	12,25	2,0938	0,112	97,5	500,0	330
56.	143,8	24,957	0,224	12,25	2,0948	0,112	97,5	500,0	330
57.	144,3	24,968	0,224	12,25	2,0927	0,112	97,5	500,0	330
58.	144,8	24,981	0,224	12,25	2,0945	0,112	97,5	500,0	330
59.	145,3	25,004	0,224	12,25	2,0936	0,112	97,5	500,0	330
60.	154,9	27,523	0,2181	12,25	2,0374	0,1091	97,50	500,34	333
61.	155,4	27,527	0,219	12,25	2,0437	0,109	97,5	500,3	330
62.	155,9	27,528	0,219	12,25	2,0474	0,110	97,5	500,3	330
63.	157,2	27,466	0,218	12,25	2,0400	0,109	97,5	500,3	330
64.	157,7	27,472	0,219	12,25	2,0469	0,110	97,5	500,3	330
65.	158,2	27,512	0,219	12,25	2,0452	0,110	97,5	500,3	330
66.	158,7	27,526	0,2183	12,25	2,0395	0,1092	97,50	500,34	333
67.	159,2	27,509	0,2192	12,25	2,0476	0,1097	97,49	500,33	332
68.	159,8	27,507	0,219	12,25	2,0459	0,110	97,5	500,3	330
69.	177,0	30,010	0,2136	12,25	1,9961	0,1069	97,49	500,46	339
70.	177,6	30,010	0,213	12,27	1,9960	0,107	97,7	501,6	340
71.	178,0	29,990	0,214	12,23	1,9997	0,107	97,4	499,9	340
72.	178,6	29,979	0,215	12,22	2,0016	0,107	97,3	499,5	340
73.	179,1	29,986	0,214	12,25	1,9993	0,107	97,5	500,6	340
74.	179,6	30,014	0,214	12,23	1,9994	0,107	97,3	499,7	340
75.	180,1	30,025	0,214	12,24	2,0000	0,107	97,4	500,1	340
76.	180,6	30,010	0,2132	12,24	1,9930	0,1067	97,49	500,44	339
77.	181,1	29,986	0,214	12,24	2,0004	0,107	97,4	500,3	340
78.	198,2	32,529	0,2068	12,26	1,9372	0,1037	97,63	501,36	349
79.	198,6	32,515	0,208	12,29	1,9486	0,104	97,9	502,6	350
80.	199,1	32,515	0,209	12,23	1,9535	0,105	97,4	500,0	340
81.	199,6	32,495	0,208	12,26	1,9479	0,104	97,7	501,6	350
82.	201,3	32,449	0,207	12,27	1,9402	0,104	97,7	501,7	350
83.	201,7	32,453	0,208	12,25	1,9493	0,104	97,6	501,2	350
84.	202,2	32,467	0,209	12,23	1,9507	0,104	97,4	500,0	340
85.	202,8	32,473	0,209	12,23	1,9508	0,104	97,4	500,0	340
86.	216,5	33,985	0,203	12,25	1,9046	0,102	97,6	501,3	350
87.	217,0	33,965	0,205	12,24	1,9173	0,103	97,5	500,8	350
88.	217,5	33,988	0,204	12,26	1,9167	0,103	97,7	501,7	350
89.	218,0	33,987	0,2036	12,24	1,9049	0,1019	97,46	500,56	353
90.	218,5	34,009	0,205	12,26	1,9165	0,103	97,6	501,4	350
91.	219,0	34,020	0,2038	12,25	1,9086	0,1021	97,57	501,14	353
92.	219,6	33,993	0,204	12,26	1,9100	0,102	97,7	501,5	350
93.	220,1	33,956	0,205	12,24	1,9146	0,102	97,5	500,7	350
94.	220,6	33,977	0,205	12,28	1,9199	0,103	97,8	502,3	350

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 Ringspaltes (F_z), die viskose Reibung der Messzylinder-Aufhängung im Medium (F_{hp}), die rekursiv bestimmt wird.

Die reibungsbedingte Kraft am Messkörper ergibt sich aus $F_z = F_w - F_p - F_{hp} - F_z - F_{hp}$. 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; $v_m = v_z \cdot r_a^2 / (r_a^2 - r_i^2)$, 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 $d = 2(r_a - r_i)$ berechnet wird. Die Scherrate, Schergeschwindigkeit oder Deformation $\dot{\gamma}$, die für die Berechnung

Tabelle 2, Detaildaten zur Viskositätsmessung I.

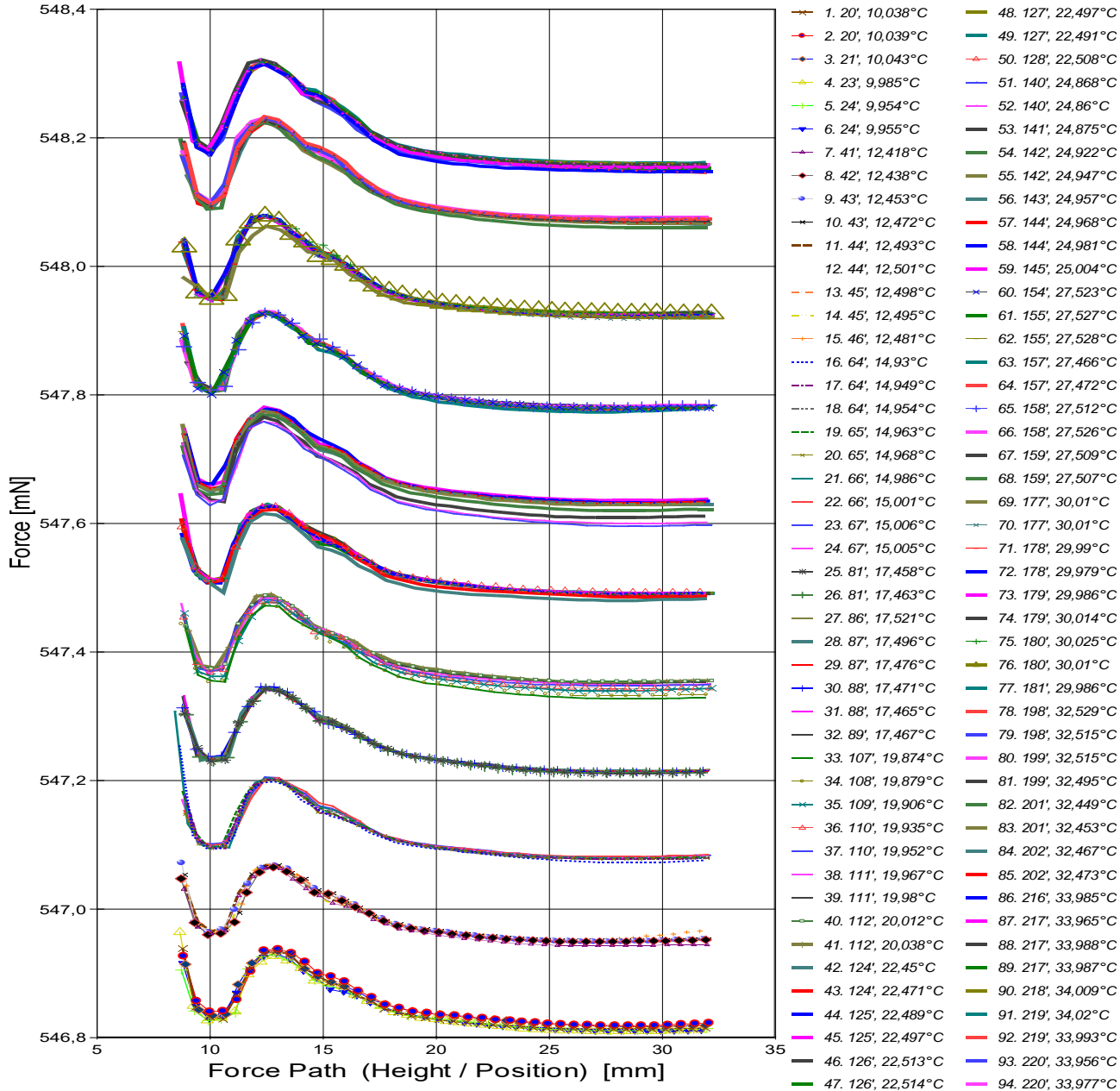
N°	F _w	σ _{Fw}	σ _{Fw rel}	F _ρ	F _{hp}	F _ζ	F _{hη}	N/n
			-- Alle Werteinträge in [mN] --					
Datenauswahl								
1.	546,8216	0,01162	21 ppm	544,0561	0,004852	0,363	1,81E-04	25/53
2.	546,8286	0,01173	21 ppm	544,0535	0,004866	0,364	1,82E-04	25/53
3.	546,8278	0,01193	22 ppm	544,0538	0,004857	0,364	1,82E-04	25/53
4.	546,8204	0,01320	24 ppm	544,0468	0,004818	0,364	1,80E-04	25/53
5.	546,8214	0,01262	23 ppm	544,0451	0,004848	0,364	1,82E-04	25/53
6.	546,8200	0,01277	23 ppm	544,0458	0,004837	0,364	1,81E-04	25/53
7.	546,9443	5,189E-04	0,95 ppm	544,2336	0,005770	0,362	2,11E-04	4/53
8.	546,9575	0,01157	21 ppm	544,2377	0,004829	0,362	1,77E-04	25/53
9.	546,9588	0,01218	22 ppm	544,2371	0,004818	0,362	1,77E-04	25/53
10.	546,9591	0,01069	20 ppm	544,2403	0,004853	0,362	1,78E-04	25/53
11.	546,9591	0,01055	19 ppm	544,2411	0,004859	0,362	1,78E-04	25/53
12.	546,9597	0,01105	20 ppm	544,2415	0,004844	0,362	1,78E-04	25/53
13.	546,9598	0,01102	20 ppm	544,2421	0,004853	0,362	1,78E-04	25/53
14.	546,9570	0,009314	17 ppm	544,2402	0,004853	0,362	1,78E-04	24/52
15.	546,9606	0,009287	17 ppm	544,2381	0,004834	0,362	1,78E-04	24/52
16.	547,0843	0,0132	24 ppm	544,4236	0,00481	0,361	1,73E-04	25/53
17.	547,0874	0,01207	22 ppm	544,4247	0,004834	0,361	1,74E-04	25/53
18.	547,0864	0,01158	21 ppm	544,4254	0,004834	0,361	1,74E-04	25/53
19.	547,0883	0,0133	24 ppm	544,4276	0,00480	0,361	1,72E-04	25/53
20.	547,0874	0,01215	22 ppm	544,4277	0,004821	0,361	1,73E-04	25/53
21.	547,0884	0,01108	20 ppm	544,4284	0,004817	0,361	1,73E-04	24/52
22.	547,0906	0,01139	21 ppm	544,4296	0,004825	0,361	1,73E-04	25/53
23.	547,0905	0,01185	22 ppm	544,4294	0,004828	0,361	1,73E-04	25/53
24.	547,0899	0,01212	22 ppm	544,4291	0,004802	0,361	1,72E-04	25/53
25.	547,2220	0,01345	25 ppm	544,6166	0,004783	0,360	1,68E-04	24/52
26.	547,2216	0,01289	24 ppm	544,6124	0,004788	0,360	1,69E-04	24/52
27.	547,2246	0,01282	23 ppm	544,6179	0,004806	0,360	1,69E-04	25/53
28.	547,2238	0,01216	22 ppm	544,6168	0,004792	0,360	1,69E-04	24/52
29.	547,2239	0,01208	22 ppm	544,6153	0,004805	0,360	1,69E-04	25/53
30.	547,2245	0,0138	25 ppm	544,6165	0,00478	0,360	1,68E-04	25/53
31.	547,2240	0,01264	23 ppm	544,6167	0,004802	0,360	1,69E-04	25/53
32.	547,2255	0,0139	25 ppm	544,6179	0,00478	0,360	1,68E-04	25/53
33.	547,3393	0,0148	27 ppm	544,8044	0,00478	0,359	1,63E-04	25/53
34.	547,3424	0,0132	24 ppm	544,8045	0,00478	0,359	1,64E-04	25/53
35.	547,3494	0,01242	23 ppm	544,8021	0,004807	0,359	1,65E-04	25/53
36.	547,3539	0,0143	26 ppm	544,8070	0,00478	0,359	1,64E-04	25/53
37.	547,3562	0,01206	22 ppm	544,8067	0,004795	0,359	1,65E-04	25/53
38.	547,3587	0,0127	23 ppm	544,8089	0,00479	0,359	1,65E-04	25/53
39.	547,3606	0,01257	23 ppm	544,8080	0,004776	0,359	1,65E-04	25/53
40.	547,3626	0,01181	22 ppm	544,8126	0,004805	0,359	1,65E-04	25/53
41.	547,3619	0,01160	21 ppm	544,8119	0,004813	0,359	1,66E-04	24/52
42.	547,4891	0,01129	21 ppm	544,9990	0,004758	0,358	1,60E-04	24/52
43.	547,4957	0,0124	23 ppm	544,9971	0,00475	0,358	1,60E-04	25/53
44.	547,5008	0,0140	26 ppm	544,9993	0,00473	0,358	1,60E-04	25/53
45.	547,5016	0,0129	24 ppm	544,9976	0,00475	0,358	1,61E-04	25/53
46.	547,5003	0,0140	26 ppm	545,0005	0,00477	0,358	1,61E-04	25/53
47.	547,5002	0,0127	23 ppm	545,0010	0,00476	0,358	1,61E-04	25/53
48.	547,4992	0,0128	23 ppm	544,9985	0,00479	0,358	1,62E-04	25/53
49.	547,5004	0,01109	20 ppm	544,9991	0,004793	0,358	1,62E-04	25/53
50.	547,5024	0,0122	22 ppm	545,0013	0,00474	0,357	1,60E-04	24/52
51.	547,6090	0,0158	29 ppm	545,1910	0,00475	0,356	1,55E-04	25/53
52.	547,6124	0,0155	28 ppm	545,1895	0,00474	0,356	1,55E-04	25/53
53.	547,6205	0,0146	27 ppm	545,1891	0,00472	0,356	1,55E-04	25/53
54.	547,6317	0,0149	27 ppm	545,1931	0,00475	0,356	1,56E-04	25/53
55.	547,6393	0,0137	25 ppm	545,1938	0,00472	0,356	1,56E-04	25/53
56.	547,6400	0,0131	24 ppm	545,1935	0,00476	0,356	1,57E-04	25/53
57.	547,6421	0,0145	26 ppm	545,1977	0,00472	0,356	1,56E-04	25/53
58.	547,6431	0,0132	24 ppm	545,1969	0,00475	0,356	1,57E-04	25/53
59.	547,6458	0,0129	24 ppm	545,2006	0,00474	0,356	1,57E-04	25/53
60.	547,7798	4,883E-04	0,89 ppm	545,3929	0,005634	0,355	1,82E-04	4/53
61.	547,7877	0,0123	22 ppm	545,3936	0,00475	0,355	1,54E-04	25/53
62.	547,7905	0,0139	25 ppm	545,3926	0,00472	0,355	1,53E-04	25/53
63.	547,7834	0,0136	25 ppm	545,3929	0,00472	0,355	1,52E-04	25/53
64.	547,7876	0,0148	27 ppm	545,3902	0,00471	0,355	1,52E-04	25/53
65.	547,7895	0,0130	24 ppm	545,3939	0,00474	0,355	1,53E-04	25/53
66.	547,7838	4,883E-04	0,89 ppm	545,3947	0,005605	0,355	1,81E-04	4/53
67.	547,7908	0,01146	21 ppm	545,3927	0,004718	0,355	1,53E-04	24/52
68.	547,7901	0,0121	22 ppm	545,3938	0,00476	0,355	1,54E-04	25/53
69.	547,9305	0,01041	19 ppm	545,5854	0,004737	0,354	1,50E-04	25/53
70.	547,9315	0,0160	29 ppm	545,5848	0,00470	0,355	1,49E-04	25/53
71.	547,9320	0,0154	28 ppm	545,5841	0,00468	0,353	1,48E-04	25/53
72.	547,9328	0,0140	26 ppm	545,5836	0,00472	0,352	1,50E-04	25/53
73.	547,9326	0,0123	22 ppm	545,5841	0,00473	0,354	1,50E-04	25/53
74.	547,9343	0,0128	23 ppm	545,5871	0,00471	0,352	1,49E-04	25/53
75.	547,9359	0,0118	22 ppm	545,5875	0,00474	0,353	1,50E-04	25/53
76.	547,9265	4,883E-04	0,89 ppm	545,5854	0,005631	0,353	1,78E-04	4/53
77.	547,9342	0,0121	22 ppm	545,5851	0,00470	0,353	1,49E-04	24/52
78.	548,0731	4,883E-04	0,89 ppm	545,7882	0,005599	0,353	1,73E-04	4/53
79.	548,0827	0,0122	22 ppm	545,7839	0,00467	0,355	1,45E-04	24/52
80.	548,0857	0,0132	24 ppm	545,7856	0,00468	0,351	1,46E-04	25/53
81.	548,0805	0,0132	24 ppm	545,7838	0,00469	0,353	1,46E-04	25/53
82.	548,0729	0,0161	29 ppm	545,7836	0,00467	0,354	1,44E-04	25/53
83.	548,0782	0,0136	25 ppm	545,7806	0,00469	0,353	1,45E-04	25/53

84.	548,0786	0,0131	24 ppm	545,7813	0,00469	0,351	1,46E-04	25/53
85.	548,0793	0,0138	25 ppm	545,7819	0,00467	0,351	1,45E-04	25/53
86.	548,1568	0,0128	23 ppm	545,9047	0,00469	0,352	1,42E-04	25/53
87.	548,1637	0,0134	25 ppm	545,8997	0,00466	0,351	1,43E-04	25/53
88.	548,1685	0,0145	26 ppm	545,9037	0,00465	0,353	1,42E-04	25/53
89.	548,1528	0	---	545,9023	0,005492	0,351	1,67E-04	4/53
90.	548,1684	0,0119	22 ppm	545,9044	0,00465	0,352	1,42E-04	24/52
91.	548,1606	0	---	545,9055	0,005458	0,352	1,66E-04	4/53
92.	548,1633	0,0166	30 ppm	545,9055	0,00467	0,352	1,42E-04	24/52
93.	548,1611	0,0128	23 ppm	545,8998	0,00466	0,351	1,42E-04	24/52
94.	548,1691	0,0132	24 ppm	545,9003	0,00467	0,353	1,43E-04	25/53

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], $F_{h\eta}$ 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]	Σσ _{rel.}
1.	2,64E-04	4,754	30,821	0,7689	1,44	14,4665	41,2400	0,003	1,2%
2.	2,75E-04	4,766	30,968	0,7689	1,44	14,4665	41,2400	0,003	1,2%
3.	2,55E-04	4,766	30,797	0,7689	1,44	14,4665	41,2400	0,003	1,2%

4.	2,88E-04	4,754	30,551	0,7689	1,44	14,4665	41,2399	0,0031	1,2%
5.	2,83E-04	4,729	30,907	0,7689	1,45	14,4665	41,2399	0,0031	1,2%
6.	2,60E-04	4,766	30,625	0,7689	1,45	14,4665	41,2399	0,0031	1,2%
7.	5,79E-06	4,778	30,870	0,7687	1,21	14,4670	41,2416	0,0026	1,0%
8.	2,64E-04	4,717	30,870	0,7687	1,21	14,4671	41,2416	0,0029	1,1%
9.	2,79E-04	4,766	30,711	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,003	1,2%
10.	2,31E-04	4,742	30,980	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0029	1,1%
11.	2,36E-04	4,754	31,017	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0029	1,1%
12.	2,52E-04	4,803	30,882	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0029	1,1%
13.	2,59E-04	4,766	30,980	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0029	1,1%
14.	2,25E-04	4,754	30,600	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0028	1,1%
15.	2,90E-04	4,778	30,552	0,7687	1,20	14,4671	41,2416	0,0028	1,1%
16.	2,85E-04	4,754	30,760	0,7685	0,964	14,4676	41,2433	0,003	1,2%
17.	2,64E-04	4,754	30,931	0,7685	0,963	14,4676	41,2433	0,0029	1,2%
18.	2,58E-04	4,766	30,907	0,7685	0,962	14,4676	41,2433	0,0029	1,2%
19.	3,04E-04	4,705	30,845	0,7685	0,961	14,4676	41,2433	0,003	1,2%
20.	2,64E-04	4,754	30,882	0,7685	0,961	14,4677	41,2433	0,0029	1,2%
21.	2,31E-04	4,754	30,576	0,7685	0,959	14,4677	41,2433	0,0029	1,2%
22.	2,48E-04	4,754	30,919	0,7685	0,958	14,4677	41,2433	0,0029	1,2%
23.	2,72E-04	4,705	31,054	0,7685	0,957	14,4677	41,2433	0,0029	1,2%
24.	2,71E-04	4,778	30,662	0,7685	0,957	14,4677	41,2433	0,0029	1,2%
25.	2,84E-04	4,791	30,527	0,7682	0,721	14,4682	41,2450	0,0029	1,2%
26.	2,71E-04	4,803	30,539	0,7682	0,720	14,4682	41,2450	0,0029	1,2%
27.	2,69E-04	4,778	30,944	0,7682	0,715	14,4683	41,2450	0,0029	1,2%
28.	2,61E-04	4,742	30,637	0,7682	0,717	14,4682	41,2450	0,0029	1,2%
29.	2,60E-04	4,766	30,882	0,7682	0,719	14,4682	41,2450	0,0029	1,2%
30.	3,05E-04	4,778	30,687	0,7682	0,720	14,4682	41,2450	0,003	1,2%
31.	2,78E-04	4,766	30,870	0,7682	0,720	14,4682	41,2450	0,0029	1,2%
32.	3,08E-04	4,754	30,796	0,7682	0,720	14,4682	41,2450	0,003	1,2%
33.	3,13E-04	4,778	30,760	0,7680	0,489	14,4688	41,2466	0,003	1,3%
34.	2,96E-04	4,766	30,846	0,7680	0,489	14,4688	41,2466	0,0029	1,2%
35.	2,71E-04	4,778	31,079	0,7680	0,486	14,4688	41,2466	0,0028	1,2%
36.	3,22E-04	4,791	30,980	0,7680	0,483	14,4688	41,2466	0,0029	1,2%
37.	2,70E-04	4,766	31,005	0,7680	0,482	14,4688	41,2466	0,0028	1,2%
38.	2,90E-04	4,766	31,017	0,7680	0,480	14,4688	41,2466	0,0029	1,2%
39.	2,94E-04	4,742	30,796	0,7680	0,479	14,4688	41,2467	0,0028	1,2%
40.	2,64E-04	4,778	31,091	0,7680	0,476	14,4688	41,2467	0,0028	1,2%
41.	2,64E-04	4,766	30,895	0,7680	0,474	14,4688	41,2467	0,0028	1,2%
42.	2,76E-04	4,766	30,772	0,7677	0,243	14,4694	41,2483	0,0027	1,2%
43.	2,89E-04	4,766	30,772	0,7677	0,241	14,4694	41,2483	0,0028	1,2%
44.	3,04E-04	4,766	30,637	0,7677	0,239	14,4694	41,2483	0,0029	1,3%
45.	2,70E-04	4,766	30,748	0,7677	0,239	14,4694	41,2483	0,0028	1,2%
46.	3,13E-04	4,742	30,955	0,7677	0,237	14,4694	41,2483	0,0029	1,3%
47.	2,85E-04	4,766	30,895	0,7677	0,237	14,4694	41,2483	0,0028	1,2%
48.	2,73E-04	4,766	31,078	0,7677	0,239	14,4694	41,2483	0,0028	1,2%
49.	2,48E-04	4,766	31,103	0,7677	0,239	14,4694	41,2483	0,0027	1,2%
50.	2,71E-04	4,754	30,576	0,7677	0,238	14,4694	41,2483	0,0028	1,2%
51.	3,42E-04	4,791	31,029	0,7675	0,0126	14,4700	41,2499	0,0029	1,3%
52.	3,36E-04	4,742	30,857	0,7675	0,0133	14,4700	41,2499	0,0029	1,3%
53.	3,18E-04	4,717	30,748	0,7675	0,0119	14,4700	41,2499	0,0029	1,3%
54.	3,27E-04	4,742	31,090	0,7675	0,00743	14,4700	41,2499	0,0029	1,3%
55.	3,06E-04	4,766	30,650	0,7675	0,00505	14,4700	41,2500	0,0028	1,2%
56.	2,69E-04	4,754	31,066	0,7675	0,00409	14,4700	41,2500	0,0028	1,2%
57.	3,28E-04	4,766	30,735	0,7675	0,00305	14,4700	41,2500	0,0029	1,3%
58.	3,11E-04	4,778	30,895	0,7675	0,00181	14,4700	41,2500	0,0028	1,2%
59.	2,92E-04	4,766	30,833	0,7675	-3,81E-04	14,4700	41,2500	0,0028	1,2%
60.	5,78E-06	4,766	30,956	0,7673	-0,240	14,4706	41,2517	0,0022	1,0%
61.	2,71E-04	4,766	31,054	0,7673	-0,240	14,4706	41,2517	0,0027	1,2%
62.	3,17E-04	4,766	30,907	0,7673	-0,240	14,4706	41,2517	0,0028	1,3%
63.	3,42E-04	4,754	30,821	0,7673	-0,235	14,4706	41,2516	0,0028	1,3%
64.	3,35E-04	4,754	30,674	0,7673	-0,235	14,4706	41,2516	0,0028	1,3%
65.	3,12E-04	4,791	30,943	0,7673	-0,239	14,4706	41,2517	0,0027	1,2%
66.	5,78E-06	4,754	30,760	0,7673	-0,240	14,4706	41,2517	0,0022	1,0%
67.	2,71E-04	4,754	30,551	0,7673	-0,239	14,4706	41,2517	0,0026	1,2%
68.	2,62E-04	4,778	31,115	0,7673	-0,238	14,4706	41,2517	0,0027	1,2%
69.	2,38E-04	4,766	31,103	0,7670	-0,476	14,4712	41,2533	0,0025	1,2%
70.	3,42E-04	4,766	30,809	0,7670	-0,476	14,4712	41,2533	0,0029	1,4%
71.	3,29E-04	4,729	30,699	0,7670	-0,474	14,4712	41,2533	0,0028	1,3%
72.	3,10E-04	4,766	31,042	0,7670	-0,473	14,4712	41,2533	0,0028	1,3%
73.	2,59E-04	4,766	31,115	0,7670	-0,474	14,4712	41,2533	0,0026	1,2%
74.	3,05E-04	4,729	30,932	0,7670	-0,477	14,4712	41,2533	0,0027	1,3%
75.	2,55E-04	4,754	31,078	0,7670	-0,478	14,4712	41,2533	0,0026	1,2%
76.	5,67E-06	4,742	31,102	0,7670	-0,476	14,4712	41,2533	0,0022	1,0%
77.	2,59E-04	4,778	30,601	0,7670	-0,474	14,4712	41,2533	0,0026	1,2%
78.	5,44E-06	4,754	31,017	0,7668	-0,716	14,4718	41,2550	0,0021	1,0%
79.	2,70E-04	4,778	30,478	0,7668	-0,714	14,4717	41,2550	0,0026	1,3%
80.	2,83E-04	4,778	30,809	0,7668	-0,714	14,4717	41,2550	0,0027	1,3%
81.	2,81E-04	4,778	30,907	0,7668	-0,712	14,4717	41,2550	0,0026	1,3%
82.	3,39E-04	4,754	30,796	0,7668	-0,708	14,4717	41,2549	0,0028	1,4%
83.	2,92E-04	4,754	31,005	0,7668	-0,708	14,4717	41,2549	0,0027	1,3%
84.	2,84E-04	4,766	30,931	0,7668	-0,710	14,4717	41,2550	0,0026	1,2%
85.	3,01E-04	4,705	30,809	0,7668	-0,710	14,4717	41,2550	0,0027	1,3%
86.	2,95E-04	4,778	31,005	0,7666	-0,854	14,4721	41,2560	0,0026	1,3%
87.	3,00E-04	4,766	30,846	0,7666	-0,852	14,4721	41,2559	0,0026	1,3%
88.	3,18E-04	4,766	30,784	0,7666	-0,854	14,4721	41,2560	0,0027	1,3%
89.	0	4,754	30,956	0,7666	-0,854	14,4721	41,2560	0,0021	1,0%
90.	2,89E-04	4,766	30,515	0,7666	-0,856	14,4721	41,2560	0,0025	1,2%
91.	0	4,742	30,747	0,7666	-0,857	14,4721	41,2560	0,0021	1,0%

92.	3,46E-04	4,766	30,772	0,7666	-0,855	14,4721	41,2560	0,0029	1,4%
93.	2,95E-04	4,742	30,723	0,7666	-0,851	14,4721	41,2559	0,0026	1,3%
94.	2,78E-04	4,754	30,943	0,7666	-0,853	14,4721	41,2560	0,0026	1,3%

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 [$\text{mPa}\cdot\text{s}$] 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

94 Messwerte; Zeitbereich 20 bis 220 min, Temperatur $\Delta T = +24,087 \text{ K}$

Ergebniswert: $\rho_{20^\circ\text{C}} = 0,71496 \pm 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ bzw. $\pm 45 \text{ ppm}$ (293,15 K, 96,63 kPa)

Streuung: $3,2 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ absolute bzw. **45 ppm** relative Standardabweichung

Berechnung: quadratische Regressionsgleichung temperaturabhängig.

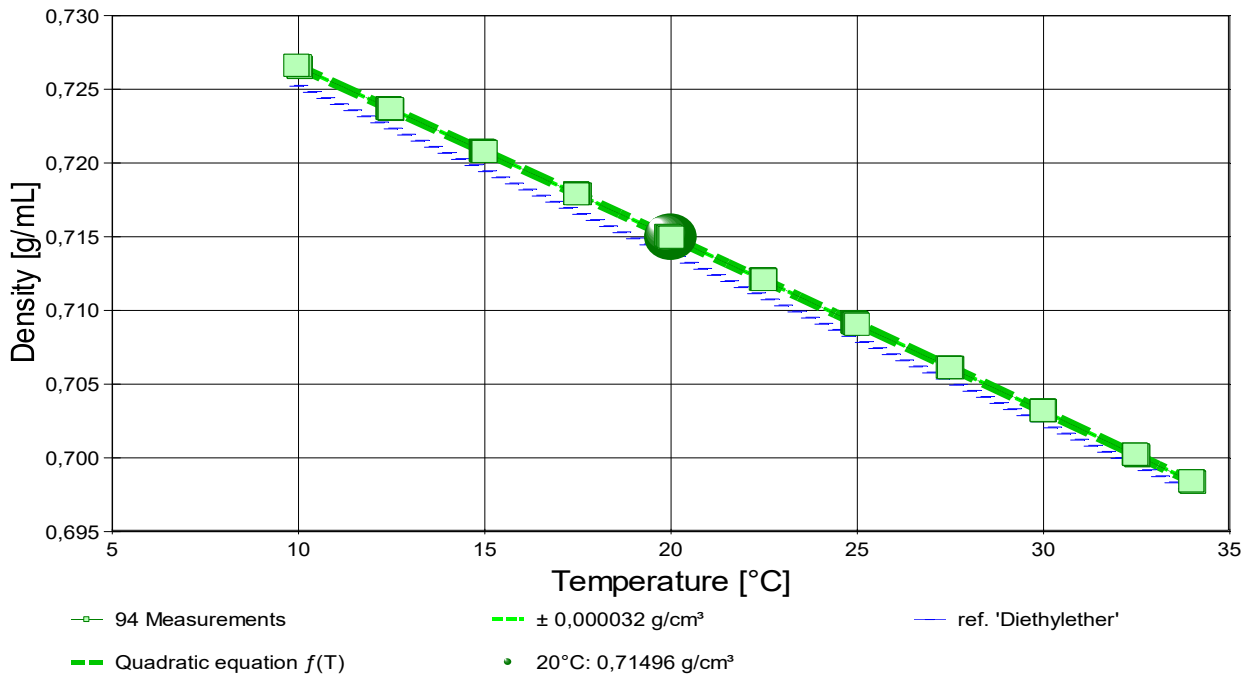
Temperaturabhängigkeit zwischen 9,950 und 34,037 °C:

$\rho [\text{g/cm}^3] = f(\vartheta [^\circ\text{C}]) = 0,737804 - 111,72 \cdot \vartheta / 1\text{E}5 - 0,12461 \cdot \vartheta^2 / 1\text{E}5$ mit $r^2 = 0,999987, s^2 = 1,02\text{E}-9$

Der Ausdehnungskoeffizient κ mit $163,2 [10^{-5}\text{K}^{-1}]$ ist wesentlich größer als für *Flüssigkeiten normal*. Die relative Abnahme der Dichte mit der Temperatur beträgt 0,16%, bzw. $-0,00117 \text{ g/cm}^3$ pro Grad bei der Angabetemperatur 20°C.

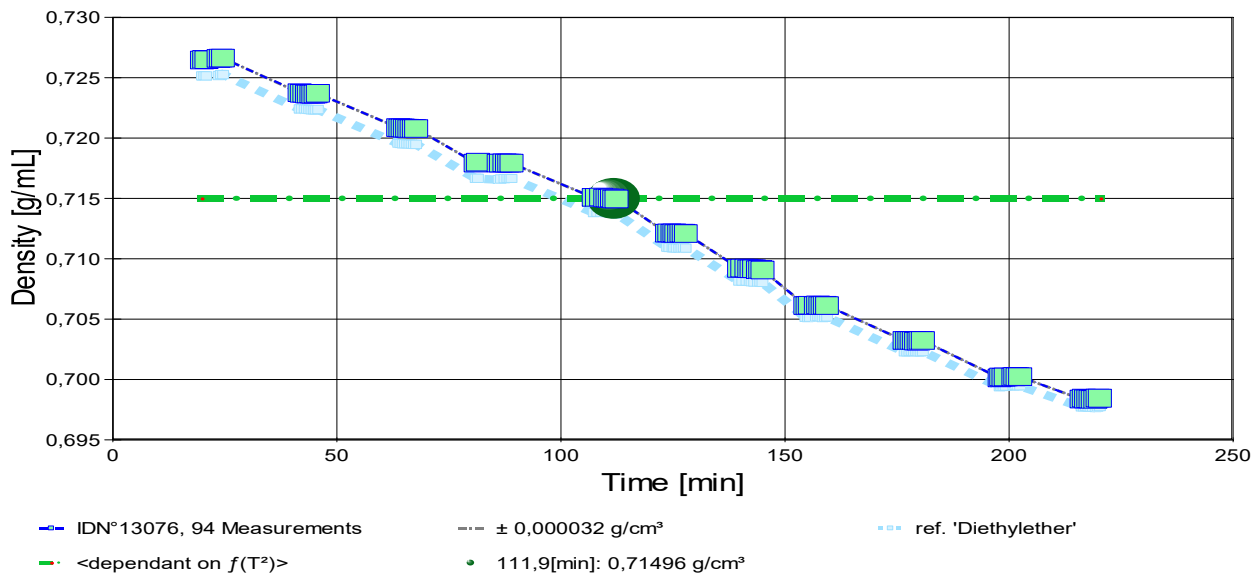
- Die im Vergleich mit dem Wert der Fortpflanzung der Messunsicherheit von $\pm 2,7\text{E}-5 \text{ g/cm}^3$ relativ große Standardabweichung zwischen Gleichung und Messwerten ($\pm 3,2\text{E}-5 \text{ g/cm}^3$) führt dazu, dass die aus der Fortpflanzung der Unsicherheiten berechnete kombinierte Messunsicherheit des Ergebnisses, die gepunktet unterstrichen zum Ergebniswert angegeben ist, durch die Standardmessunsicherheit ersetzt wurde (Evtl. ist der Temperaturbereich für eine bessere Konvergenz von Gleichung und Messwerten zu groß; vgl. Abschnitt weiter unten). --- 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 $150 \cdot 10^{-5}\text{K}^{-1}$. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'ausgezeichnet' 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.'



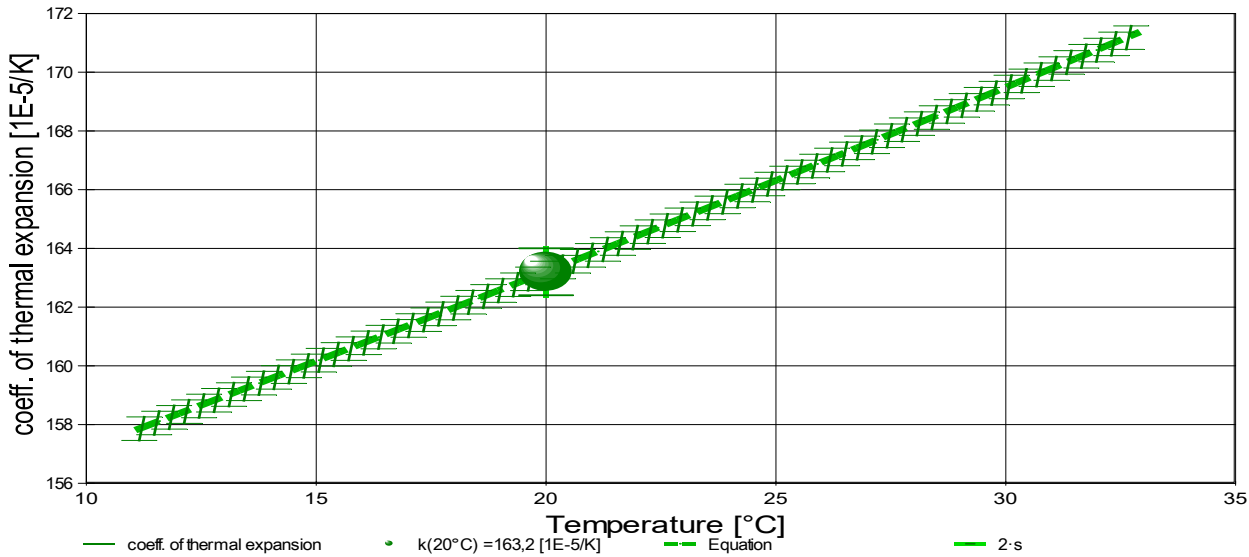
- Das Diagramm 6, "rho-Temp.", zeigt die 94 Dichtemesswerte als Quadratsymbol bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 20°C für die Diethylether-Probe ist als Kugel abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird durch gestrichelte Linien ausgewiesen. Der Verlauf der Regressionsfunktion ist als dicke Linie gezeichnet. In Markierungsbreite der Messunsicherheit ist die Referenzfunktion von 'Diethylether' 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 Diethylether-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:

$$\kappa \mid [10^{-5} \cdot K^{-1}] = f(\vartheta [^{\circ}C]) = (111,7 + 0,2492 \cdot \vartheta) / (0,73780 - 0,0011172 \cdot \vartheta - 1,2461E-06 \cdot \vartheta^2)$$

Die Genauigkeit der Gleichung wird aus der Regressionsfunktion zu $\pm 0,4 \cdot 10^{-5} / K$ angenommen. Bei 20 °C beträgt die relative Zunahme des Koeffizienten 0,38% pro Grad.

Um das Volumen bzw. eine Volumenänderung für 'Diethylether-Probe' bei einer bestimmten Temperatur ϑ im gültigen Temperaturbereich zu berechnen kann mit dem bei der Temperatur ϑ^0 gegebenen Volumen $V_{0\vartheta^0}$ das Volumen $V_{1\vartheta}$ bei der Temperatur ϑ über das entsprechende Verhältnis der Dichten bestimmt werden:

$$V_{1\vartheta} = V_{0\vartheta^0} \cdot (0,7378 - 0,0011172 \cdot \vartheta^0 - 1,2461 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^{02}) / (0,7378 - 0,0011172 \cdot \vartheta - 1,2461 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)$$

Tabelle 4: Daten der Dichtemessung

N°	t	ϑ	ρ	H	ω	Δρ _ω	N	F _A	F _{Korr.}
IDN°13076	[min]	[°C]	[g/cm³]	[mm]	[s]	[g/cm³]	Werte & Trend	[mN]	[mN], TSymb.

1.	20,0	10,048	0,72644	4,549	0,0	0	1	544,056	-
2.	20,5	10,037	0,72648	4,549	0,0	0	1	544,054	-
3.	21,0	10,049	0,72647	4,549	0,0	0	1	544,054	-
4.	23,7	10,021	0,72657	4,549	0,0	0	1	544,047	-
5.	24,2	9,964	0,72660	4,549	0,0	0	1	544,045	-
6.	24,7	9,950	0,72659	4,549	0,0	0	1	544,046	-
7.	41,8	12,426	0,72373	4,549	0,0	0	1	544,234	-
8.	42,3	12,427	0,72367	4,549	0,0	0	1	544,238	-
9.	42,9	12,447	0,72368	4,549	0,0	0	1	544,237	-
10.	43,4	12,460	0,72363	4,549	0,0	0	1	544,240	-
11.	43,9	12,488	0,72362	4,549	0,0	0	1	544,241	-
12.	44,4	12,500	0,72361	4,549	0,0	0	1	544,242	-
13.	44,9	12,502	0,72360	4,549	0,0	0	1	544,242	-
14.	45,4	12,501	0,72363	4,549	0,0	0	1	544,240	-
15.	45,9	12,487	0,72366	4,549	0,0	0	1	544,238	-
16.	63,8	14,924	0,72084	4,549	0,0	0	1	544,424	-
17.	64,3	14,936	0,72082	4,549	0,0	0	1	544,425	-
18.	64,8	14,960	0,72081	4,549	0,0	0	1	544,425	-
19.	65,3	14,961	0,72078	4,549	0,0	0	1	544,428	-

20.	65,8	14,970	0,72078	4,549	0,0	0	1	544,428	-
21.	66,3	14,979	0,72077	4,549	0,0	0	1	544,428	-
22.	66,8	14,995	0,72075	4,549	0,0	0	1	544,430	-
23.	67,3	15,006	0,72075	4,549	0,0	0	1	544,429	-
24.	67,8	15,006	0,72076	4,549	0,0	0	1	544,429	-
25.	81,1	17,461	0,71790	4,549	0,0	0	1	544,617	-
26.	81,6	17,461	0,71796	4,549	0,0	0	1	544,612	-
27.	86,2	17,539	0,71788	4,549	0,0	0	1	544,618	-
28.	86,7	17,512	0,71790	4,549	0,0	0	1	544,617	-
29.	87,5	17,490	0,71792	4,549	0,0	0	1	544,615	-
30.	88,1	17,474	0,71790	4,549	0,0	0	1	544,617	-
31.	88,6	17,473	0,71790	4,549	0,0	0	1	544,617	-
32.	89,1	17,471	0,71788	4,549	0,0	0	1	544,618	-
33.	107,4	19,931	0,71505	4,549	0,0	0	1	544,804	-
34.	108,2	19,912	0,71505	4,549	0,0	0	1	544,805	-
35.	109,1	19,917	0,71508	4,549	0,0	0	1	544,802	-
36.	110,0	19,949	0,71501	4,549	0,0	0	1	544,807	-
37.	110,5	19,948	0,71501	4,549	0,0	0	1	544,807	-
38.	111,0	19,965	0,71498	4,549	0,0	0	1	544,809	-
39.	111,5	19,977	0,71499	4,549	0,0	0	1	544,808	-
40.	112,0	20,001	0,71492	4,549	0,0	0	1	544,813	-
41.	112,5	20,026	0,71493	4,549	0,0	0	1	544,812	-
42.	123,8	22,448	0,71209	4,549	0,0	0	1	544,999	-
43.	124,3	22,471	0,71212	4,549	0,0	0	1	544,997	-
44.	125,0	22,493	0,71208	4,549	0,0	0	1	544,999	-
45.	125,4	22,496	0,71211	4,549	0,0	0	1	544,998	-
46.	125,9	22,513	0,71206	4,549	0,0	0	1	545,001	-
47.	126,5	22,522	0,71206	4,549	0,0	0	1	545,001	-
48.	127,0	22,510	0,71209	4,549	0,0	0	1	544,999	-
49.	127,5	22,493	0,71209	4,549	0,0	0	1	544,999	-
50.	128,0	22,506	0,71205	4,549	0,0	0	1	545,001	-
51.	139,9	24,911	0,70917	4,549	0,0	0	1	545,191	-
52.	140,6	24,911	0,70919	4,549	0,0	0	1	545,190	-
53.	141,5	24,911	0,70920	4,549	0,0	0	1	545,189	-
54.	142,2	24,922	0,70914	4,549	0,0	0	1	545,193	-
55.	142,7	24,952	0,70913	4,549	0,0	0	1	545,194	-
56.	143,2	24,965	0,70913	4,549	0,0	0	1	545,194	-
57.	144,1	24,973	0,70907	4,549	0,0	0	1	545,198	-
58.	144,6	24,980	0,70908	4,549	0,0	0	1	545,197	-
59.	145,1	25,006	0,70903	4,549	0,0	0	1	545,201	-
60.	154,7	27,528	0,70611	4,549	0,0	0	1	545,393	-
61.	155,2	27,532	0,70609	4,549	0,0	0	1	545,394	-
62.	155,7	27,523	0,70611	4,549	0,0	0	1	545,393	-
63.	157,0	27,487	0,70611	4,549	0,0	0	1	545,393	-
64.	157,5	27,464	0,70615	4,549	0,0	0	1	545,390	-
65.	158,0	27,496	0,70609	4,549	0,0	0	1	545,394	-
66.	158,5	27,533	0,70608	4,549	0,0	0	1	545,395	-
67.	159,0	27,522	0,70611	4,549	0,0	0	1	545,393	-
68.	159,5	27,503	0,70609	4,549	0,0	0	1	545,394	-
69.	176,8	30,014	0,70318	4,549	0,0	0	1	545,585	-
70.	177,4	30,021	0,70319	4,549	0,0	0	1	545,585	-
71.	177,9	30,002	0,70320	4,549	0,0	0	1	545,584	-
72.	178,4	29,982	0,70321	4,549	0,0	0	1	545,584	-
73.	178,9	29,991	0,70320	4,549	0,0	0	1	545,584	-
74.	179,4	30,003	0,70316	4,549	0,0	0	1	545,587	-
75.	179,9	30,026	0,70315	4,549	0,0	0	1	545,588	-
76.	180,4	30,023	0,70318	4,549	0,0	0	1	545,585	-
77.	180,9	29,993	0,70319	4,549	0,0	0	1	545,585	-
78.	198,0	32,537	0,70011	4,549	0,0	0	1	545,788	-
79.	198,4	32,525	0,70017	4,549	0,0	0	1	545,784	-
80.	198,9	32,526	0,70015	4,549	0,0	0	1	545,786	-
81.	199,4	32,510	0,70017	4,549	0,0	0	1	545,784	-
82.	201,1	32,475	0,70018	4,549	0,0	0	1	545,784	-
83.	201,5	32,454	0,70022	4,549	0,0	0	1	545,781	-
84.	202,0	32,468	0,70021	4,549	0,0	0	1	545,781	-
85.	202,6	32,480	0,70020	4,549	0,0	0	1	545,782	-
86.	216,3	34,005	0,69834	4,549	0,0	0	1	545,905	-
87.	216,8	33,999	0,69841	4,549	0,0	0	1	545,900	-
88.	217,3	33,987	0,69836	4,549	0,0	0	1	545,904	-
89.	217,8	34,007	0,69838	4,549	0,0	0	1	545,902	-
90.	218,3	34,027	0,69834	4,549	0,0	0	1	545,904	-
91.	218,8	34,025	0,69833	4,549	0,0	0	1	545,906	-
92.	219,4	34,037	0,69833	4,549	0,0	0	1	545,906	-
93.	219,9	33,990	0,69841	4,549	0,0	0	1	545,900	-
94.	220,4	33,977	0,69841	4,549	0,0	0	1	545,900	-

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], *Δρ_ω* Standardabweichung der Dichtewerte in der Beobachtungszeit [g/cm³], *N* Anzahl Auftriebsmessungen ggf. mit Wägwertezahl und Trend anzeigenden Symbolen, *F_A* Gewicht des Messkörpers in der Probe (Roh-wert der Auftriebskraft) [mN], *F_{korr.}* konstante Korrekturkraft [mN].

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

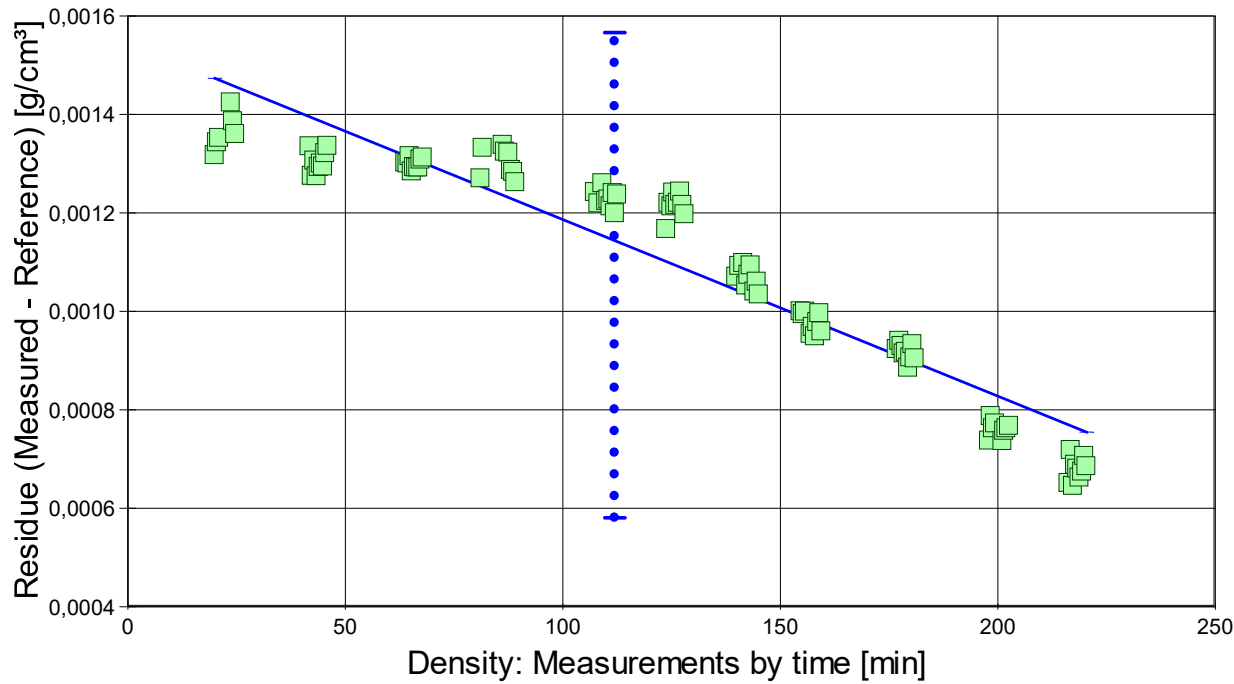
• 5. REFERENZ VERGLEICH

Beurteilung von Viskositäts- und Dichtemessungen anhand der Residuen: Die Differenzen zwischen Messwerten und zur jeweiligen Temperatur berechneten Sollwerten des Referenzeintrags *Diethylether* 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.*

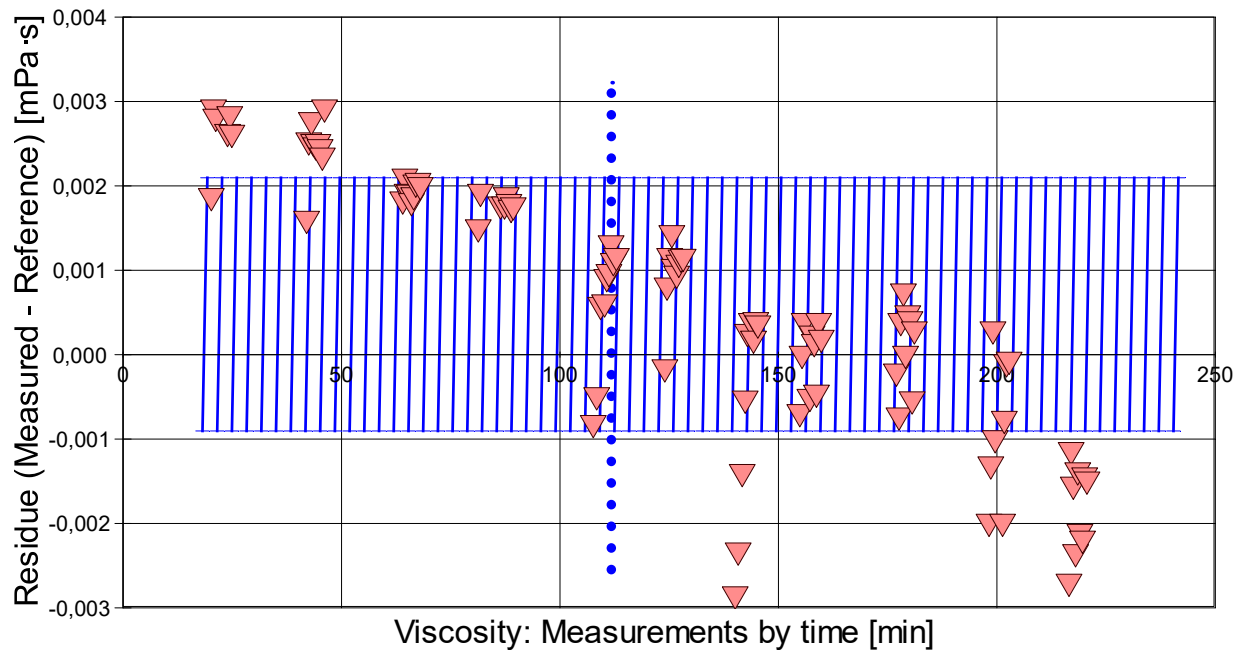
Referenzabweichung der Dichtemesswerte - 'rho-Residuen'



Reference values for 'Diethylether' acc. to $f(T[^\circ\text{C}])=0.7080-1.145\text{E-}3 \cdot (T - 25)$
 Deviance as a function: $f(t[\text{min}]) = 0,00155 - 3,59\text{E-}06 \cdot [\text{min}]$, $r^2= 0,89$ (Mean 0,00109 g/cm³, rel.: +0,15%)

- 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 'Diethylether' acc. to $f(T[^\circ\text{C}])=0.283 \cdot \exp(-0.00935 \cdot T)$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $5,96\text{E-}04 \pm 0,0015$ mPa·s, relative: +0,25% at a spread of 0,64%

- 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 *Diethylether* bei 20°C

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
ρ	0,7137	0,71496	0,0013 g/cm ³	0,2%	47
$-\Delta\rho/\Delta T$	0,001145	0,0012	2,2E-05 g/cm ³ ·K ⁻¹	2%	0,8

Referenz

Messung

 Δ absolut Δ relativ Δ / u

η	0,235	0,2357	7,0E-04 mPa·s	0,3%	@
$-\Delta\eta/\Delta T$	0,00219	0,0024	1,8E-04 mPa·s·K ⁻¹	8%	@

- Der Ergebnisvergleich mit den Angaben, die in der Referenzdatenbank zu 'DIETHYLETHER' gefunden wurden, stellt die Werteübereinstimmung dar. Der Unterschied Δ 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 über ein Grad Temperaturabnahme (bei 20°C); " Δu " ist die Messabweichung im Verhältnis zur Messunsicherheit. Das Zeichen "@" bringt zum Ausdruck, dass die Abweichung weniger als die Hälfte der Messunsicherheit beträgt und kein signifikanter Unterschied zwischen Mess- und Referenzwert vorliegt.

• 5.2. Referenzwerte zu Dichte und Viskosität

--- DICHTEN --- REFERENZEN ---	(g/cm ³)	ABWEICHUNG	REF. ID
1. Propyl amin ²	0,7139 (25°C)	-0,15%	ID94.9
2. Diethylether ¹	0,7137	-0,17%	ID34.3
3. Diisopropylether ²	0,7207 (25°C)	+0,80%	ID36.5
4. Triethylamin ²	0,7245 (25°C)	+1,3%	ID113.7
5. Oktan ¹	0,7026	-1,7%	ID85.0
6. Diethylamin ²	0,7017 (25°C)	-1,9%	ID32.5
7. Isobutyl amin ²	0,7296 (25°C)	+2,0%	ID62.4
8. Decane ¹	0,7308	+2,2%	ID1404.3

--- VISKOSITÄT ---	(mPa·s)	ABWEICHUNG	REF. ID
1. Diethylether ¹	0,235	-0,42%	ID99.6
2. Pentan ¹	0,227	-3,5%	ID1165.6
3. Isopentan ¹	0,224	-5,1%	ID121.2
4. 2-Methyl-2-buten ¹	0,213	-9,6%	ID109.3
5. 1-Hexen ¹	0,263	+12%	ID148.7
6. 1-Penten ¹	0,201	-15%	ID108.7
7. Blausäure ¹	0,193	-18%	ID13.5
8. Dimethyl sulfid ¹	0,298	+27%	ID47.9

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. κ [10⁻⁶K⁻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) 6,3202 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: 77,1 mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: 35,9 mm.

m). **Messunsicherheiten des Ergebnisses:** Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu 1,2% bestimmt; die n). Messunsicherheit der Dichte ± 0,000032 g/cm³ stammt von der Varianz der Regressionsfunktion.

- **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°13076 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured raw data)

Prüfmittel

Die Kraftmesseinrichtung (WZ224-CW) wurde während dieser Messung 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. Akquisition-Softwareversion IMETER 6.1.40, LizenzN° *3037-4759*, W. 5.1- Betriebssystem auf

Justierung der Wägezelle während der Messung:

at 2,1 min, Adjustment 0 ** passed **

Die während der Messung automatisch ausgeführten Wägezellen-Justierungen sind mit relativem End-Zeitpunkt und korrigierter Abweichung oberhalb dokumentiert (die kompletten Kalibrier- und Justierprotokolle sind in der Datei 'imeterData29.cal' gesondert gespeichert).

Meteorologische Angaben, Luftdichte:

Time [min]	ϕ [%]	T_a [°C]	p_a [kPa]	ρ_{air} [kg/m ³]
1,0	45,97	20,68	96,166	1,13546
41,4	45,5	21,09	96,195	1,13416
63,5	45,39	21,3	96,209	1,13364
80,8	45,43	21,347	96,220	1,13339
107,1	45,05	21,48	96,263	1,13338
123,6	44,92	21,51	96,290	1,13362
139,1	44,76	21,53	96,298	1,13364
153,9	44,6	21,62	96,284	1,13313
176,2	45,26	21,654	96,308	1,13317
197,6	45,32	21,73	96,33	1,13312
213,9	45,21	21,74	96,346	1,13328

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:

Ether (Diethylether) Viskosität 4x kleiner als Wasser und 10x größer als Luft: Messung der Temperaturabhängigkeiten bis zur Siedetemperatur bei hohen Raten (500/s) und Reynoldszahlen (Re 280 - 350) mit je 8-Facher Wiederholung einer Temperaturstufe. Die verwendeten Referenzdaten zur Dichte von "Diethylether" sind möglicherweise nicht ganz richtig. Hinweis zu Force-Path: Wegen des großen Ausdehnungskoeffizienten ist für Kräfteverlauf die Dichteänderung bedeutender als die der viskosen Kraft, so verlaufen die Kraft-Weg-Kurven quasi in untypischer Reihenfolge - die oberste Kurvenschar bildet die Werte bei 34°C ab, die nahe am Siedepunkt liegen und mit Re 330 am ehesten chaotisch werden sollten. Andeutung für beginnende Turbulanz zeigen andere Kurven eher.

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