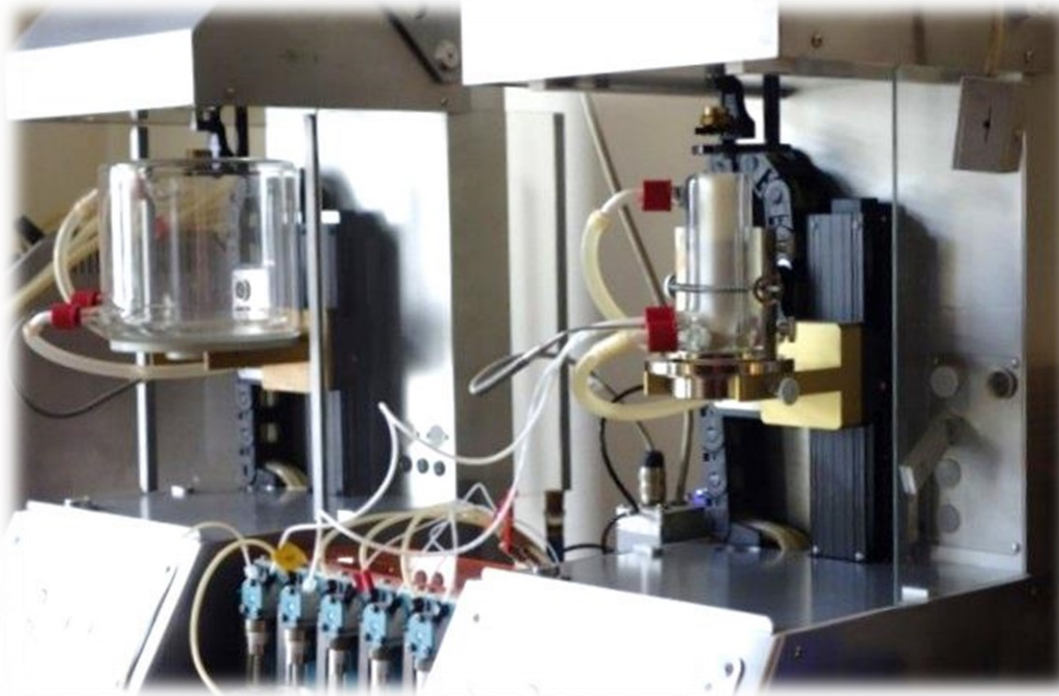


Rheometer-Funktion / Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit

Fließverhalten von Buttermilch



Dieses Beispiel dokumentiert die Messung der scheinbaren Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate an „Buttermilch mit Butterflocken“.

Ergebnisse der Messung sind dynamische und kinematische Viskosität, die Fließgrenze, die Dichte und Dichtegradienten der Probe.

Zeitverlauf der wiederholten Scherratensequenz von Viskosität und Dichte zeigen Veränderungen der Probe.



IMETER V.5.6 rev.22

I-Report (C9FE3CR16312B), IMETER / ©MSB

ID N° 11144 - DiVA-Method: Rheological Measurement

Buttermilch mit Butterflocken

Buttermilch: Ist eine solche Probe messbar? Verändert sie sich bei der Messung? Wie wirken sich die Butterflocken aus? Fließgrenze? Mögliche Aussage zur Stabilität durch die Bestimmung des Dichtegradienten am Ende der Messung.

Sample/Ref.: **Buttermilch** • pronounced shear thinning

Results at **25,00°C**

Viscosity: $\eta_{(50,0s^{-1})} = 115,6 \pm 1,7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\nu = 123,9 \pm 1,8 \text{ mm}^2/\text{s}$

3 x 35 shear rates $\text{inc.}^{+\text{exp}(0,5 \rightarrow 91)} \cdot \text{s}^{-1}$, resolves $K=0,766 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0,517}$ and $n=0,517$ with $\tau^0=0,557 \text{ Pa}$

Density: $\rho = 0,9203 \pm 0,00078 \text{ g}/\text{cm}^3$

- Kinetic ρ -coefficient: $\tau = 42 \cdot 10^{-5}/\text{min}$

Vertical gradient of density: 3,5%

Report

Autogener Prüfbericht mit Erklärungen. Diese sind formatiert wie dieser Text. Nachfolgend eine Erklärung zum Prinzip der Messung:

• 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 exakt ringförmigen Spalt. Die lineare Strömung entlang der Messkörperoberfläche überträgt dadurch eine Kraft. Das ist die Schubspannung, die von der Viskosität erzeugt wird. - Eine genaue Bewegungsgeschwindigkeit fördert ein exakt proportionales Probenvolumen durch den Ringspalt. Das Strömungsprofil ist definiert, Strömung, Kraft, Geschwindigkeit und geometrische Verhältnisse folgen Navier-Stokes sowie einer analogen Form des Hagen-Poiseuille'schen Gesetzes und erlauben unter Berücksichtigung von Aufhängungs- und

Auftriebseffekten und der Strömungskinetik eine ungewöhnlich genaue Bestimmung der absoluten Viskosität Newtonscher Fluide. Für nicht so normale Flüssigkeiten wird *Viskosität 'scheinbare Viskosität'* genannt. Über die Variation der Bewegungsgeschwindigkeit ist die Rheometerfunktion angesprochen - d.h. die Messung der 'Viskosität' in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit. Dem hier durchmessenen Bereich 0,502 bis 90,674 /s kommt technisch die Bedeutung von *Oberflächenverlauf* bis etwa *Rühren, stärkerem Mischen* zu. -- Bei Stillstand wirkt auf den Messkörper die Auftriebskraft. - Die Dichte ρ (*spezifische Masse, Massekonzentration*) gibt die Stoffmenge an, die in einem bestimmten Volumen vorliegt. Sie ist ebenfalls eine temperatur- und druckabhängige Stoffkonstante. Die Dichte der untersuchten Flüssigkeit wurde hier simultan (sequenziell) 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 die Bestimmtheit des Messkörpervolumens unter vorliegenden Umständen entscheidend - entsprechendes gilt hinsichtlich der geometrischen Verhältnisse und der Geschwindigkeit für die Viskositätsmessung -

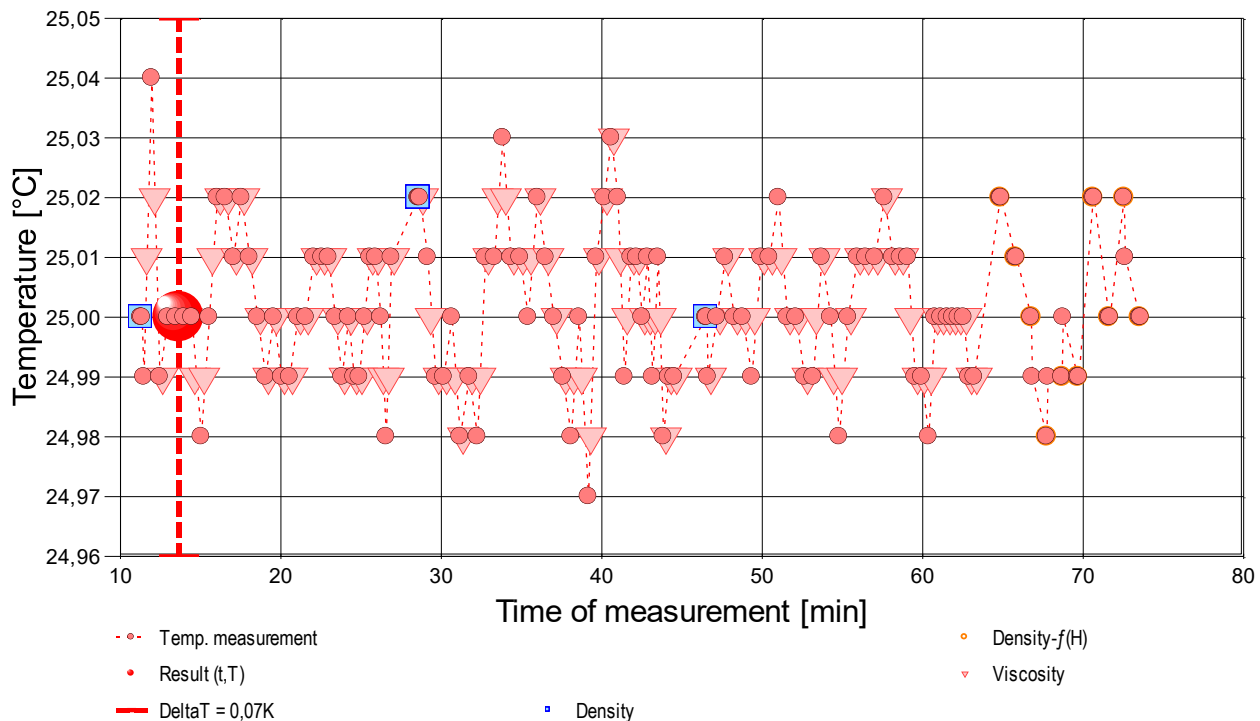
Wird der vertikale Ort der Dichtemessung verändert - d.h. der Messkörper in verschiedene Höhen in der Röhre zur Messung der Dichte bewegt, kann die vertikale Dichteänderung - d.h. der Dichtegradient - gemessen werden.

- IMETER M5 DiVA-Ergebnisse sind metrologisch rückführbar und kohärent mit Ergebnissen aus Referenzverfahren (Glaskapillarviskosimeter, Hydrometer, Pyknometer). Referenz M5 DiVA 'https://imeter.de/?view=article&id=73' - **Beispiele & Auftragsmessungen über 'www.imeter.de/?view=article&id=58'**

• 2. ÜBERSICHT

Die Viskosität wurde 105-mal gemessen, die Dichte drei-mal sowie ein Dichtegradient. Messdauer eine Stunde; Temperaturverlauf blieb im gesamten Zeitraum in etwa isotherm bei 25°C. - *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 und orange Kreuze für Auftriebsmessungen für die Bestimmung von Dichtegradienten. sowie ein Dichtegradient.

• 3. VISKOSITÄTS - MESSUNG

Probentemperatur in Rheometrie-Messung: $25,00 \pm 0,01$ °C, Zeitbereich: 11,6 bis 63,4 Minuten.

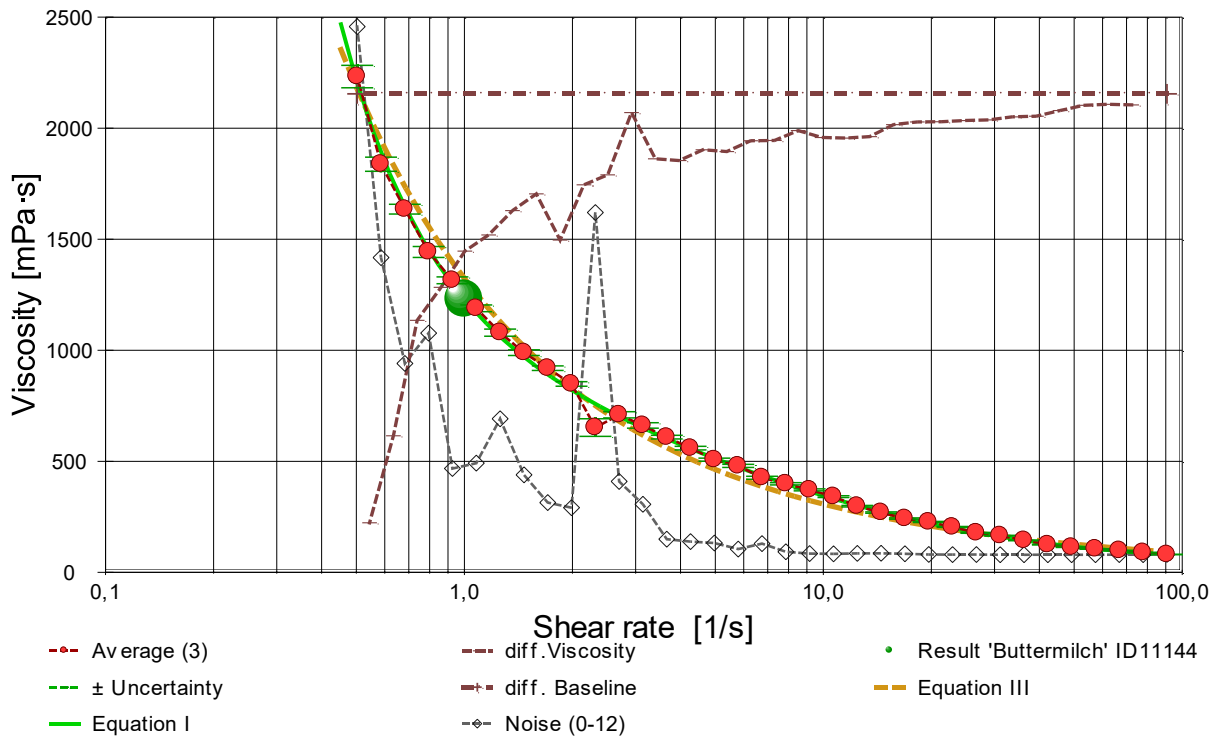
Die 105 *Viskositätsmesswerte* wurden mit 35 unterschiedlichen Scherraten ($\dot{\gamma}$) ermittelt und analysieren den Bereich zwischen $0,5023$ bis $90,674$ s^{-1} wobei die *scheinbare Viskosität* (η') Werte zwischen $79,2$ bis 2460 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ erreicht. Die Ergebnisangabe der Messung 1230 ± 18 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ für $\dot{\gamma}=1,00$ s^{-1} wurde aus einer Regressionsgleichung zu den Messwerten bestimmt:

$$\eta'_{25,0^\circ\text{C}} [\text{mPa}\cdot\text{s}] = f(\dot{\gamma} [1/\text{s}]) = 1229,8 \cdot \dot{\gamma}^{(-0,68207 + 0,18468 \cdot \ln(\dot{\gamma}) - 0,074821 \cdot \ln(\dot{\gamma})^2 + 0,0083574 \cdot \ln(\dot{\gamma})^3)}$$

$$\text{Gleichung 1, } r^2 = 0,9989, \sigma \pm 0,036\%$$

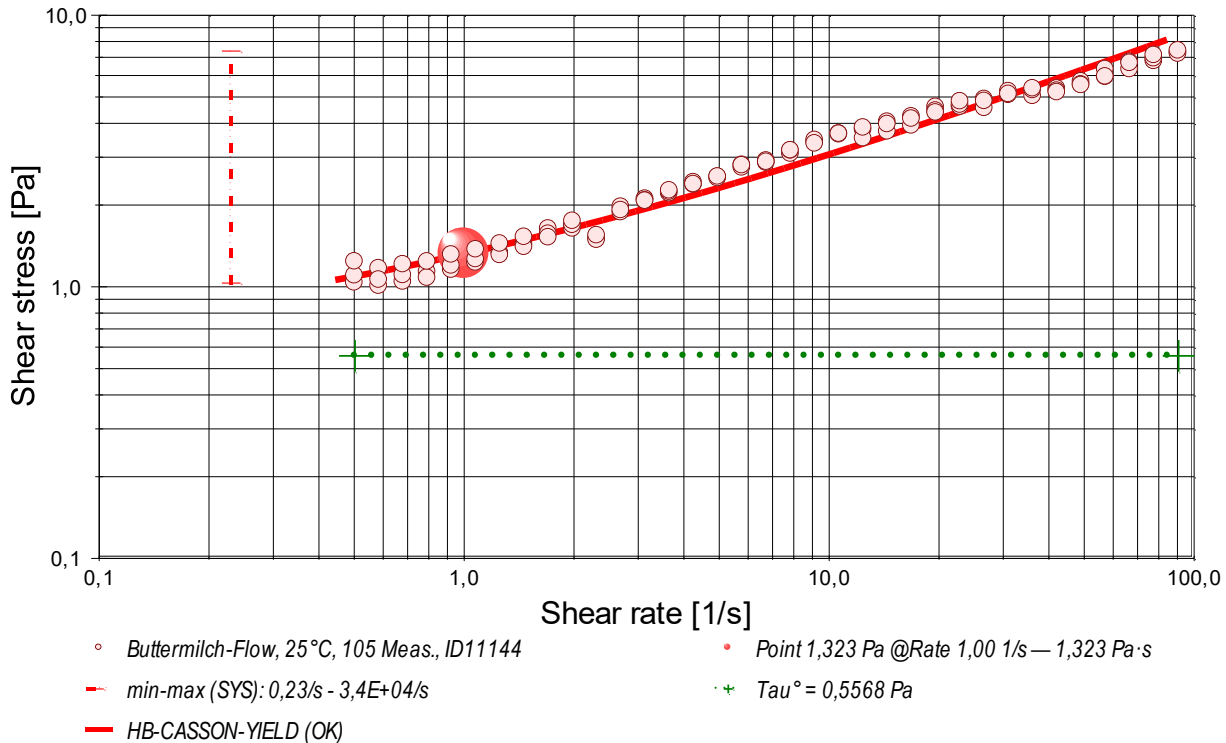
- Es wird von ("*scheinbare Viskosität*") gesprochen, da bei nicht-newtonischen Fluiden ein parabelförmiges Strömungsprofil ungewiss ist. - Die Regressionsgleichung kombiniert die Menge der Messwerte. Zur Qualitätsbeurteilung, wie gut die Messwerte durch die Regressionsgleichung abgebildet werden, wird der Standardfehler als Gauß'sche Unsicherheit d.h. als *RMSP* (*Root Mean Square Percentage Error*) bestimmt, der Wurzel aus dem mittleren quadratischen relativen Fehler. Diese Messunsicherheit wird als relative Standardabweichung " $\sigma \pm U\%$ " der Regressionsgleichung ausgewiesen.

- *Diagramm 1. Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit - 'Viskositätskurve-Lin-Log'*



- Das Diagramm 2, "Viskositätskurve-Lin-Log", zeigt die Viskositätswerte η' als rote, kugelförmige Markierungen. Senkrechte, grün gezeichnete Linien markieren zugehörige Werte der Messunsicherheit ($\pm \Sigma \sigma$, Tabelle III). Die Ausgangsdaten stammen von einer Messwert-Mittelung über gleiche Scherraten in den drei durchlaufenen Zyklen (vgl. *Zeit-Visko-Chart*). Der numerische Differenzenquotient der 35 Scherraten (diff.Viscosity) ist als relative Kurve mit der Basislinie bei $d\eta'/d\ln(\dot{\gamma}) = 0$ eingezeichnet. Der Verlauf zeigt lokal rheologische Qualitäten: ein Kurvenverlauf über der Nullbezugslinie ('diff.Baseline') bedeutet Dilatanz, unter Null liegt Strukturviskosität vor, eine Differenziallage, auf oder dicht an der Null-Linie, drückt newtonsche Proportionalität aus. Mit rautenförmigen Marken wird 'Noise' (als strukturell-dissipatives Merkmal der Schergradienten Fluktuation) angezeigt. Die zwei Regressionsgraphen nach Gleichung I und Gleichung III zeigen im Diagramm die mathematischen Näherungen an die Messwerte.

- Diagramm 2. Verhältnis von Schubspannung und Schergeschwindigkeit - 'Fließkurve (log)'



- Die dynamische Viskosität ist definiert als das Verhältnis von Schubspannung zu Schergeschwindigkeit ($\eta = \tau / \dot{\gamma}$) und ist für newtonsche Fluide zu allen Verhältnisse von τ und $\dot{\gamma}$ konstant. - Das Diagramm 3, "Fließkurve (log)", zeigt die Lage der einzelnen Messwerte in den Koordinaten von Schergeschwindigkeit und Schubspannung. Der Verlauf markiert die sog. Fließkurve. Zu den Werten ist die Regressionsfunktion (Gleichung II) gemäß Herschel & Buckley (HB) eingezeichnet.

Die rheologischen Verhältnisse in **Buttermilch** bei 25°C beschreibt die Gleichung II insgesamt unbefriedigend:

$$\tau \text{ [Pa]} = 0,5568 + 0,7662 \cdot \dot{\gamma}^{(0,5166)} \quad \text{Gleichung II, } r^2 = 0,952, \sigma \pm 9,4\%$$

Fließgrenze ($\tau^0 = 0,5568 \text{ Pa}$), Konsistenz ($K = 0,7662 \text{ Pa}$) und Fließindex ($n = 0,5166$) charakterisieren das Fließverhalten der Buttermilch-Probe; die Kennzahlen ergeben sich aus dem geläufigen Potenzgesetz. Die Ableitung von Gl.II nach der Schergeschwindigkeit ($\gamma \rightarrow \dot{\gamma}$) ergibt die Gleichung III zur Beschreibung der Viskosität als Funktion der Scherrate:

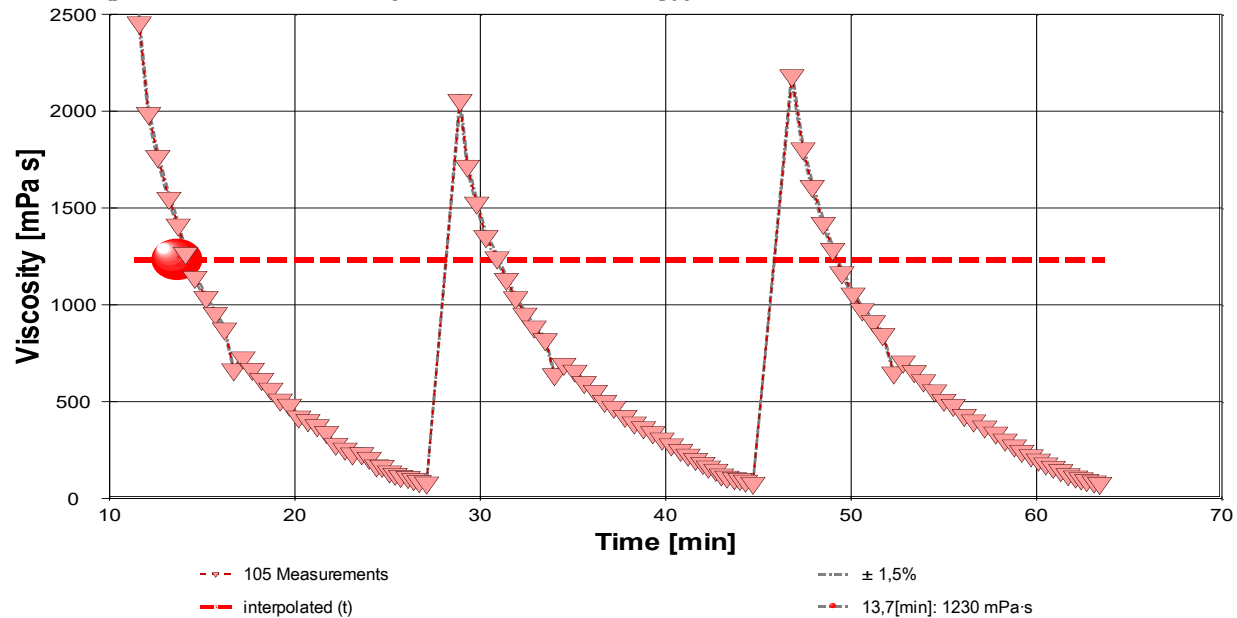
$$\eta' \text{ [Pa}\cdot\text{s]} = 0,5568 \cdot \dot{\gamma}^{(-1)} + 0,7662 \cdot \dot{\gamma}^{(-0,4834)} \quad \text{Gleichung III, VK=89\% } \sigma_{\text{abs.}} 0,068 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Der Flow-Index n klassifiziert die Buttermilch-Probe: • **dominante Pseudoplastizität.**

- Intermediäres Verhalten: Yield-Stress und Konsistenzfaktor stehen in einem kompetitiven Gleichgewicht (Bingham-Charakteristik).
- Der Yield Stress ist konsistent mit der strukturellen Viskosität der Probe.
- Der Verlauf des $\tau/\dot{\gamma}$ -Differenzials im Viskositätsdiagramm ermöglicht die Beurteilung spezifischer Flußmodifikatoren anhand des Verlaufs der *differenziellen Viskosität* ($\dot{\gamma}$).

- Die Begriffe 'Yield Stress', 'Fließgrenzspannung', 'Fließgrenze' sind synonym, um eine *Rigidität* am quasi ruhenden Fluid zu quantifizieren.
- <Bitte beachten: die automatisch erzeugten Texte und Gleichungen sind grundsätzlich mit Vorsicht zu betrachten. Verfahren und aufbereitete Ergebnisse erfordern Expertise und fachmenschliche Besprechung.>

- Diagramm 4. Der zeitliche Verlauf der Viskositätswerte - 'eta-f(t)'



- Im Diagramm 4, "eta-f(t)", sind die einzelnen Messwerte als Dreiecke in zeitlicher Sequenz abgebildet. - Die Darstellung zeigt die Viskositätswerte entsprechend der Chronologie der angewendeten Scherraten.

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°11144	[min]	[°C]	[mPa·s]	[mm/s]	[mN]	[Pa]	[mm/s]	[s ⁻¹]	[Zahl]
1.	11,6	25,01	2460	0,08313	3,8937	1,24	0,262	0,5025	2,8E-04
2.	12,1	25,02	1990	0,09686	3,6728	1,16	0,305	0,5855	4,1E-04
3.	12,6	24,99	1770	0,1129	3,8023	1,21	0,356	0,6823	5,4E-04
4.	13,2	25,00	1550	0,1315	3,8890	1,23	0,414	0,7947	7,1E-04
5.	13,7	25,00	1410	0,1532	4,1273	1,31	0,483	0,9261	9,1E-04
6.	14,1	25,00	1270	0,1785	4,3099	1,37	0,562	1,079	0,0012
7.	14,6	24,99	1140	0,2080	4,5323	1,44	0,655	1,257	0,0015
8.	15,2	24,99	1040	0,2423	4,7974	1,52	0,763	1,465	0,0020
9.	15,7	25,01	956,3	0,2822	5,1441	1,632	0,8889	1,7061	0,00249

10.	16,2	25,02	876,4	0,3289	5,4930	1,742	1,036	1,9880	0,00316
11.	16,7	25,02	666	0,3832	4,8615	1,54	1,21	2,316	0,0049
12.	17,2	25,01	727	0,4464	6,1894	1,96	1,41	2,699	0,0052
13.	17,7	25,02	668	0,5201	6,6255	2,10	1,64	3,144	0,0066
14.	18,2	25,01	616,1	0,6060	7,1163	2,257	1,909	3,6634	0,00829
15.	18,7	25,00	566	0,7060	7,6190	2,42	2,22	4,268	0,011
16.	19,2	24,99	509,9	0,8226	7,9942	2,536	2,591	4,9727	0,0136
17.	19,7	25,00	484	0,9584	8,8333	2,80	3,02	5,794	0,017
18.	20,2	24,99	422	1,117	8,9849	2,85	3,52	6,750	0,022
19.	20,7	24,99	403,1	1,301	9,9942	3,170	4,098	7,8649	0,0272
20.	21,2	25,00	377,3	1,516	10,8994	3,457	4,774	9,1631	0,0339
21.	21,7	25,00	342,3	1,766	11,5205	3,654	5,562	10,676	0,0436
22.	22,2	25,01	281,9	2,058	11,0541	3,506	6,481	12,438	0,0616
23.	22,7	25,01	256,4	2,397	11,7169	3,716	7,551	14,492	0,0789
24.	23,1	25,01	231,5	2,793	12,3252	3,909	8,797	16,885	0,102
25.	23,6	25,00	232,7	3,254	14,4327	4,578	10,25	19,672	0,118
26.	24,0	24,99	209,5	3,792	15,1364	4,801	11,94	22,920	0,153
27.	24,4	25,00	170,0	4,418	14,3108	4,539	13,91	26,704	0,220
28.	24,7	24,99	168,1	5,147	16,4896	5,230	16,21	31,113	0,259
29.	25,1	24,99	138,7	5,997	15,8501	5,027	18,89	36,249	0,365
30.	25,4	25,00	126,7	6,987	16,8701	5,351	22,01	42,234	0,466
31.	25,7	25,01	115,5	8,140	17,9209	5,684	25,64	49,207	0,596
32.	26,1	25,01	109,9	9,484	19,8709	6,303	29,87	57,332	0,729
33.	26,4	24,99	99,44	11,05	20,9419	6,642	34,80	66,796	0,939
34.	26,7	24,99	88,76	12,87	21,7774	6,907	40,55	77,824	1,23
35.	27,1	25,01	81,44	15,00	23,2809	7,384	47,24	90,674	1,56
36.	28,9	25,02	2060	0,08309	3,2560	1,03	0,262	0,5023	3,4E-04
37.	29,3	25,00	1720	0,09681	3,1685	1,01	0,305	0,5852	4,8E-04
38.	29,8	24,99	1530	0,1128	3,2834	1,04	0,355	0,6821	6,3E-04
39.	30,3	24,99	1350	0,1315	3,3931	1,08	0,414	0,7947	8,3E-04
40.	30,9	24,99	1244	0,1532	3,6325	1,152	0,4825	0,92603	0,00105
41.	31,4	24,98	1130	0,1785	3,8548	1,22	0,562	1,079	0,0013
42.	31,9	24,99	1040	0,2079	4,1120	1,30	0,655	1,257	0,0017
43.	32,4	24,99	954	0,2423	4,4030	1,40	0,763	1,465	0,0022
44.	32,9	25,01	887,1	0,2823	4,7732	1,514	0,8892	1,7066	0,00272
45.	33,5	25,02	821	0,3289	5,1463	1,63	1,04	1,988	0,0034
46.	34,0	25,02	640	0,3832	4,6772	1,48	1,21	2,316	0,0051
47.	34,5	25,01	695	0,4464	5,9097	1,87	1,41	2,698	0,0055
48.	35,1	25,01	659	0,5201	6,5339	2,07	1,64	3,144	0,0067
49.	35,6	25,01	601	0,6060	6,9349	2,20	1,91	3,663	0,0086
50.	36,2	25,02	555	0,7060	7,4674	2,37	2,22	4,268	0,011
51.	36,7	25,01	503	0,8226	7,8884	2,50	2,59	4,973	0,014
52.	37,2	25,00	473	0,9584	8,6320	2,74	3,02	5,793	0,017
53.	37,8	24,99	426	1,117	9,0579	2,87	3,52	6,750	0,022
54.	38,3	24,99	391	1,301	9,7058	3,08	4,10	7,865	0,028
55.	38,8	24,99	366,4	1,516	10,5863	3,358	4,774	9,1633	0,0353
56.	39,3	24,98	341,4	1,766	11,4895	3,644	5,562	10,676	0,0442
57.	39,8	25,01	308,7	2,058	12,1070	3,840	6,481	12,439	0,0569
58.	40,3	25,02	278,4	2,397	12,7206	4,035	7,551	14,492	0,0735
59.	40,8	25,03	249,9	2,793	13,3041	4,220	8,797	16,884	0,0954
60.	41,2	25,01	225,6	3,254	13,9902	4,437	10,25	19,673	0,123
61.	41,6	25,00	203,4	3,792	14,6983	4,662	11,94	22,920	0,159
62.	42,0	25,01	183,2	4,418	15,4213	4,891	13,91	26,704	0,206
63.	42,3	25,01	164,0	5,147	16,0920	5,104	16,21	31,113	0,268
64.	42,7	25,00	147,7	5,997	16,8792	5,354	18,89	36,250	0,347
65.	43,0	25,00	122,7	6,987	16,3379	5,182	22,01	42,235	0,486
66.	43,3	25,00	111,9	8,140	17,3622	5,507	25,64	49,208	0,621
67.	43,7	25,00	103,4	9,484	18,6822	5,926	29,87	57,332	0,783
68.	44,0	24,98	100	11,05	21,1278	6,70	34,8	66,80	0,94
69.	44,3	24,99	91,3	12,87	22,3997	7,10	40,5	77,82	1,2
70.	44,7	24,99	80,27	15,00	22,9478	7,279	47,24	90,674	1,59
71.	46,8	24,99	2180	0,08312	3,4603	1,10	0,262	0,5024	3,2E-04
72.	47,4	25,00	1810	0,09688	3,3363	1,06	0,305	0,5856	4,6E-04
73.	47,9	25,01	1613	0,1129	3,4689	1,100	0,3554	0,68219	5,97E-04
74.	48,5	25,00	1420	0,1315	3,5636	1,13	0,414	0,7947	7,9E-04
75.	49,0	25,00	1288	0,1532	3,7598	1,193	0,4825	0,92603	0,00102
76.	49,5	25,00	1167	0,1785	3,9696	1,259	0,5622	1,0790	0,00131
77.	50,1	25,01	1060	0,2079	4,1895	1,33	0,655	1,257	0,0017
78.	50,6	25,01	975	0,2423	4,5034	1,43	0,763	1,464	0,0021
79.	51,2	25,01	914,5	0,2823	4,9198	1,560	0,8891	1,7064	0,00263
80.	51,7	25,00	847	0,3289	5,3116	1,68	1,04	1,988	0,0033
81.	52,3	25,00	650	0,3831	4,7429	1,50	1,21	2,316	0,0050
82.	52,8	24,99	706	0,4465	6,0096	1,91	1,41	2,699	0,0054
83.	53,4	25,00	657	0,5202	6,5116	2,07	1,64	3,144	0,0068
84.	53,9	25,01	609	0,6060	7,0348	2,23	1,91	3,663	0,0085
85.	54,5	24,99	557,0	0,7061	7,4949	2,377	2,224	4,2681	0,0108

86.	55,0	24,99	509	0,8226	7,9766	2,53	2,59	4,973	0,014
87.	55,5	25,00	482	0,9584	8,8026	2,79	3,02	5,794	0,017
88.	56,1	25,01	430	1,117	9,1604	2,91	3,52	6,750	0,022
89.	56,6	25,01	402	1,301	9,9686	3,16	4,10	7,865	0,028
90.	57,2	25,01	371	1,516	10,7119	3,40	4,77	9,163	0,035
91.	57,8	25,02	339	1,766	11,4228	3,62	5,56	10,68	0,044
92.	58,3	25,01	303,3	2,058	11,8924	3,772	6,481	12,438	0,0579
93.	58,8	25,01	272,9	2,397	12,4679	3,955	7,551	14,492	0,0750
94.	59,2	25,00	245,3	2,793	13,0600	4,142	8,798	16,885	0,0972
95.	59,7	24,99	221,9	3,254	13,7599	4,364	10,25	19,673	0,125
96.	60,1	24,99	200,0	3,792	14,4498	4,583	11,94	22,919	0,162
97.	60,5	24,99	180,2	4,418	15,1698	4,812	13,91	26,705	0,209
98.	60,9	25,00	163,0	5,147	15,9853	5,070	16,21	31,113	0,270
99.	61,3	25,00	145,5	5,997	16,6289	5,274	18,89	36,249	0,352
100.	61,7	25,00	124,3	6,987	16,5571	5,252	22,01	42,234	0,480
101.	62,1	25,00	112,4	8,140	17,4432	5,533	25,64	49,207	0,618
102.	62,4	25,00	103,0	9,484	18,6198	5,906	29,87	57,330	0,786
103.	62,7	25,00	94,37	11,05	19,8723	6,303	34,80	66,795	0,999
104.	63,1	24,99	86,77	12,87	21,2883	6,752	40,55	77,823	1,27
105.	63,4	24,99	79,22	15,00	22,6470	7,183	47,24	90,674	1,62

Tabellensymbole: *t* Zeitpunkt [min], *θ* Temperatur [°C], *η'* Messwert *scheinbare* 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], *γ* 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_ρ*) 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 $F_z = F_w - F_ρ - F_{hp} - F_ζ - F_{hm}$. 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 Beweggeschwindigkeit 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 *γ*, die für die Berechnung verwendet werden, ist berechnet als Geschwindigkeitsgradient unmittelbar an der Zylinderoberfläche.

Tabelle 2, Detaildaten zur Viskositätsmessung I.

N°	<i>F_w</i>	<i>σ_{F_w}</i>	<i>σ_{F_w rel}</i>	<i>F_ρ</i> -- Alle Werteinträge in [mN] --	<i>F_{hp}</i>	<i>F_ζ</i>	<i>F_{hm}</i>	<i>N/n</i> Datenauswahl
1.	193,1079	0,0956	0,49‰	189,2276	0,0233	1,87E-06	0,00983	44/92
2.	192,8863	0,0664	0,34‰	189,2276	0,0234	2,54E-06	0,00929	44/92
3.	193,0161	0,0470	0,24‰	189,2276	0,0234	3,44E-06	0,00965	44/92
4.	193,1030	0,0618	0,32‰	189,2276	0,0235	4,67E-06	0,00990	44/92
5.	193,3418	0,0290	0,15‰	189,2276	0,0236	6,35E-06	0,0106	44/92
6.	193,5249	0,0402	0,21‰	189,2276	0,0237	8,62E-06	0,0111	44/92
7.	193,7477	0,0446	0,23‰	189,2276	0,0239	1,17E-05	0,0117	44/92
8.	194,0135	0,0377	0,19‰	189,2276	0,0240	1,59E-05	0,0125	44/92
9.	194,3610	0,02405	0,12‰	189,2276	0,02419	2,16E-05	0,0135	44/92
10.	194,7108	0,03178	0,16‰	189,2276	0,02424	2,93E-05	0,0144	39/92
11.	194,0774	0,288	0,15‰	189,2276	0,0248	3,97E-05	0,0131	38/92
12.	195,4090	0,0880	0,45‰	189,2276	0,0244	5,40E-05	0,0163	31/92
13.	195,8463	0,0972	0,50‰	189,2276	0,0243	7,32E-05	0,0174	25/92
14.	196,3384	0,03136	0,16‰	189,2276	0,02425	9,94E-05	0,0187	20/92
15.	196,8424	0,0993	0,50‰	189,2276	0,0250	1,35E-04	0,0206	30/92
16.	197,2187	0,04936	0,25‰	189,2276	0,02433	1,83E-04	0,0210	15/92
17.	198,0599	0,0919	0,46‰	189,2276	0,0279	2,49E-04	0,0266	14/92
18.	198,2121	0,0936	0,47‰	189,2276	0,0252	3,38E-04	0,0245	19/92
19.	199,2246	0,02465	0,12‰	189,2276	0,02902	4,59E-04	0,0313	5/92
20.	200,1333	0,05420	0,27‰	189,2276	0,03189	6,23E-04	0,0376	6/92
21.	200,7569	0,06257	0,31‰	189,2276	0,03247	8,45E-04	0,0404	6/92
22.	200,2875	0,02685	0,13‰	189,2276	0,02406	0,00115	0,0287	4/90
23.	200,9526	0,05606	0,28‰	189,2276	0,02443	0,00156	0,0309	7/89
24.	201,5634	0,07017	0,35‰	189,2276	0,02568	0,00212	0,0342	7/87
25.	203,6834	0,06174	0,30‰	189,2276	0,03616	0,00287	0,0564	4/85
26.	204,3908	0,06083	0,30‰	189,2276	0,03605	0,00390	0,0590	4/81
27.	203,5567	0,01286	63 ppm	189,2276	0,02387	0,00529	0,0369	3/79
28.	205,7529	0,04905	0,24‰	189,2276	0,03655	0,00719	0,0651	3/79
29.	205,1048	0,009153	45 ppm	189,2276	0,02446	0,00976	0,0418	4/74
30.	206,1318	0,02153	0,10‰	189,2276	0,02552	0,0132	0,0464	10/71
31.	207,1912	0,02911	0,14‰	189,2276	0,02648	0,0180	0,0512	14/67
32.	209,1650	0,06915	0,33‰	189,2276	0,03672	0,0244	0,0788	3/58
33.	210,2504	0,07700	0,37‰	189,2276	0,03785	0,0331	0,0856	3/52
34.	211,0942	0,07731	0,37‰	189,2276	0,03271	0,0450	0,0769	15/45

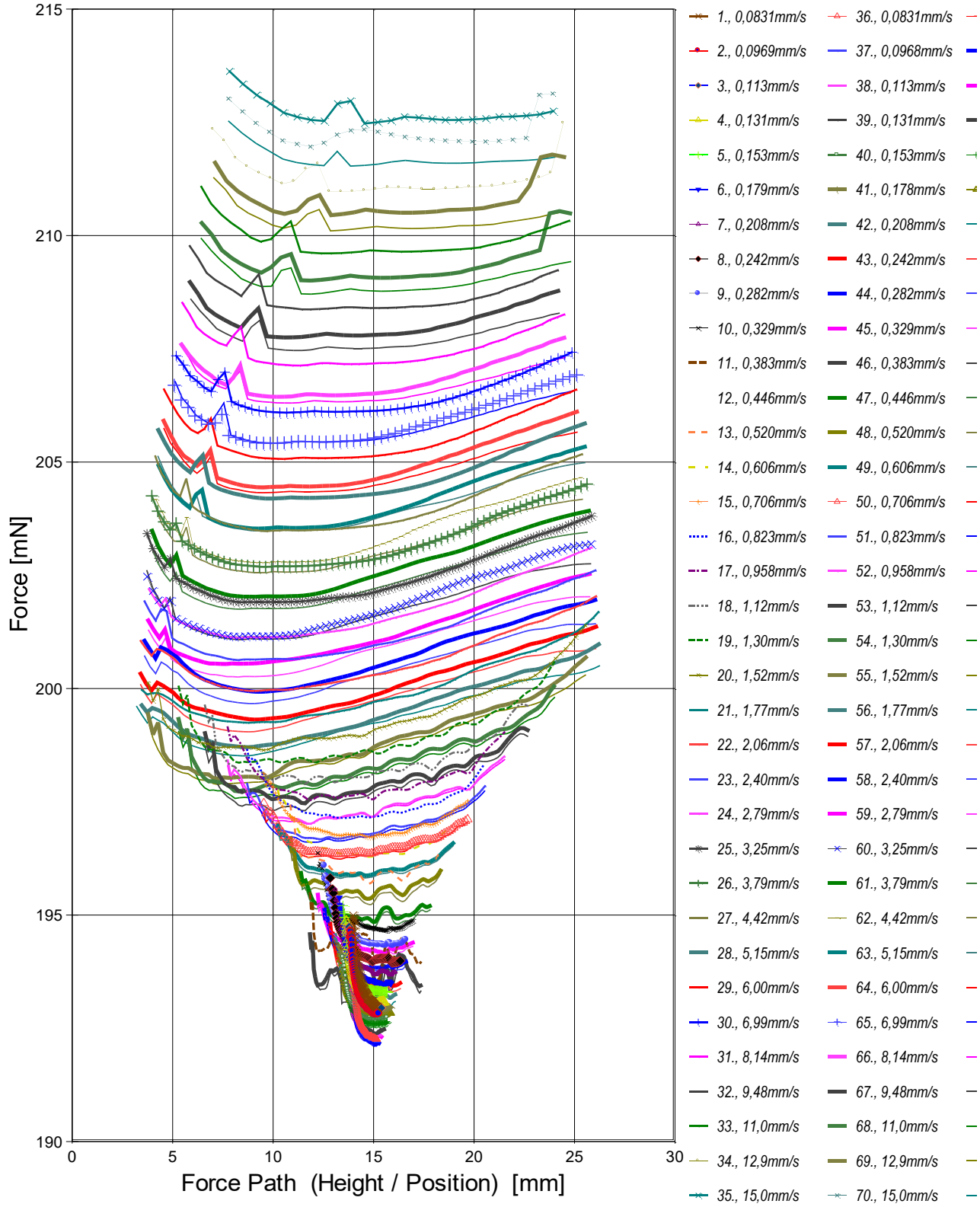
35.	212,6168	0,1255	0,59‰	189,2276	0,03122	0,0611	0,0784	19/39
36.	192,3309	0,0540	0,28‰	189,0903	0,0236	1,89E-06	0,00822	44/92
37.	192,2432	0,0248	0,13‰	189,0903	0,0237	2,57E-06	0,00802	44/92
38.	192,3583	0,0231	0,12‰	189,0903	0,0238	3,49E-06	0,00833	44/92
39.	192,4682	0,0402	0,21‰	189,0903	0,0238	4,74E-06	0,00864	44/92
40.	192,7082	0,01505	78 ppm	189,0903	0,02393	6,43E-06	0,00929	44/92
41.	192,9309	0,0266	0,14‰	189,0903	0,0240	8,73E-06	0,00990	44/92
42.	193,1887	0,0407	0,21‰	189,0903	0,0242	1,18E-05	0,0106	44/92
43.	193,4804	0,0293	0,15‰	189,0903	0,0243	1,61E-05	0,0114	44/92
44.	193,8516	0,01581	82 ppm	189,0903	0,02431	2,18E-05	0,0124	37/92
45.	194,2257	0,0338	0,17‰	189,0903	0,0244	2,96E-05	0,0134	33/92
46.	193,7550	0,282	0,15%	189,0903	0,0250	4,02E-05	0,0125	36/92
47.	194,9909	0,0971	0,50‰	189,0903	0,0247	5,46E-05	0,0156	32/92
48.	195,6166	0,103	0,53‰	189,0903	0,0256	7,41E-05	0,0179	29/92
49.	196,0187	0,0911	0,46‰	189,0903	0,0252	1,01E-04	0,0187	32/92
50.	196,5525	0,0916	0,47‰	189,0903	0,0259	1,37E-04	0,0207	25/92
51.	196,9748	0,0847	0,43‰	189,0903	0,0258	1,85E-04	0,0217	22/92
52.	197,7204	0,0830	0,42‰	189,0903	0,0282	2,52E-04	0,0260	16/92
53.	198,1476	0,109	0,55‰	189,0903	0,0277	3,42E-04	0,0268	15/92
54.	198,7977	0,0880	0,44‰	189,0903	0,0291	4,64E-04	0,0302	11/92
55.	199,6815	0,06158	0,31‰	189,0903	0,03225	6,30E-04	0,0365	8/92
56.	200,5887	0,07136	0,36‰	189,0903	0,03498	8,55E-04	0,0430	6/92
57.	201,2090	0,07039	0,35‰	189,0903	0,03581	0,00116	0,0464	8/90
58.	201,8254	0,06507	0,32‰	189,0903	0,03586	0,00158	0,0488	8/89
59.	202,4116	0,07083	0,35‰	189,0903	0,03581	0,00214	0,0509	7/87
60.	203,1013	0,06104	0,30‰	189,0903	0,03601	0,00290	0,0539	7/85
61.	203,8133	0,06241	0,31‰	189,0903	0,03618	0,00394	0,0569	6/81
62.	204,5403	0,06675	0,33‰	189,0903	0,03608	0,00535	0,0595	5/79
63.	205,2159	0,06599	0,32‰	189,0903	0,03656	0,00726	0,0629	5/79
64.	206,0089	0,05295	0,26‰	189,0903	0,03671	0,00986	0,0663	3/74
65.	205,4597	0,009498	46 ppm	189,0903	0,02424	0,0134	0,0423	3/72
66.	206,4924	0,01929	93 ppm	189,0903	0,02545	0,0182	0,0472	8/67
67.	207,8240	0,02856	0,14‰	189,0903	0,02705	0,0247	0,0540	12/58
68.	210,2994	0,416	0,20%	189,0903	0,0380	0,0335	0,0858	4/52
69.	211,5886	0,327	0,15%	189,0903	0,0381	0,0454	0,0913	4/45
70.	212,1450	0,1046	0,49‰	189,0903	0,03110	0,0617	0,0763	18/39
71.	192,3150	0,0576	0,30‰	188,8696	0,0236	1,89E-06	0,00873	44/92
72.	192,1906	0,0409	0,21‰	188,8696	0,0237	2,57E-06	0,00844	44/92
73.	192,3236	0,01329	69 ppm	188,8696	0,02376	3,49E-06	0,00880	44/92
74.	192,4185	0,0406	0,21‰	188,8696	0,0238	4,74E-06	0,00907	44/92
75.	192,6151	0,01313	68 ppm	188,8696	0,02394	6,43E-06	0,00961	44/92
76.	192,8254	0,02445	0,13‰	188,8696	0,02405	8,73E-06	0,0102	44/92
77.	193,0457	0,0440	0,23‰	188,8696	0,0242	1,18E-05	0,0108	44/92
78.	193,3604	0,0290	0,15‰	188,8696	0,0243	1,61E-05	0,0117	44/92
79.	193,7778	0,02028	0,10‰	188,8696	0,02448	2,18E-05	0,0129	43/92
80.	194,1706	0,0358	0,18‰	188,8696	0,0246	2,96E-05	0,0139	40/92
81.	193,6003	0,285	0,15%	188,8696	0,0250	4,02E-05	0,0127	35/92
82.	194,8704	0,106	0,54‰	188,8696	0,0247	5,46E-05	0,0158	33/92
83.	195,3738	0,0978	0,50‰	188,8696	0,0246	7,42E-05	0,0171	25/92
84.	195,8984	0,0467	0,24‰	188,8696	0,0246	1,01E-04	0,0185	21/92
85.	196,3597	0,04123	0,21‰	188,8696	0,02462	1,37E-04	0,0197	18/92
86.	196,8427	0,0764	0,39‰	188,8696	0,0250	1,85E-04	0,0213	20/92
87.	197,6707	0,0858	0,43‰	188,8696	0,0280	2,52E-04	0,0264	16/92
88.	198,0297	0,120	0,61‰	188,8696	0,0276	3,42E-04	0,0271	15/92
89.	198,8406	0,0988	0,50‰	188,8696	0,0304	4,64E-04	0,0323	11/92
90.	199,5869	0,0686	0,34‰	188,8696	0,0325	6,30E-04	0,0373	10/92
91.	200,3010	0,0741	0,37‰	188,8696	0,0352	8,55E-04	0,0429	13/92
92.	200,7726	0,06973	0,35‰	188,8696	0,03471	0,00116	0,0441	15/90
93.	201,3507	0,06882	0,34‰	188,8696	0,03491	0,00158	0,0466	14/89
94.	201,9457	0,07037	0,35‰	188,8696	0,03502	0,00214	0,0489	12/87
95.	202,6489	0,08024	0,40‰	188,8696	0,03499	0,00290	0,0515	13/85
96.	203,3427	0,07356	0,36‰	188,8696	0,03555	0,00394	0,0549	9/81
97.	204,0668	0,07039	0,34‰	188,8696	0,03547	0,00535	0,0575	9/79
98.	204,8878	0,06405	0,31‰	188,8696	0,03618	0,00726	0,0619	7/79
99.	205,5364	0,06607	0,32‰	188,8696	0,03594	0,00986	0,0639	7/74
100.	205,4591	0,01066	52 ppm	188,8696	0,02480	0,0134	0,0439	5/71
101.	206,3534	0,02203	0,11‰	188,8696	0,02596	0,0182	0,0484	10/67
102.	207,5410	0,03399	0,16‰	188,8696	0,02733	0,0247	0,0544	13/58
103.	208,8078	0,03939	0,19‰	188,8696	0,02885	0,0335	0,0613	14/52
104.	210,2455	0,09646	0,46‰	188,8696	0,03306	0,0454	0,0752	17/45
105.	211,6237	0,07279	0,34‰	188,8696	0,03194	0,0617	0,0773	18/39

.....
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_z Term für den Druckabfall durch die Bildung des Strömungsprofils (*Kinetische Energie-Korrektion*) [mN], F_{hf} 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 Messwerterauswahl ist in der letzten Spalte 'N/n' angegeben; durch den angewendeten Cutoff-Algorithmus werden Drückstöße und Pendelvorgänge besonders am Messkurvenanfang ausgeblendet (Das Diagramm 5, eta-Raw (M), unterhalb, zeigt eine größere Wertemenge an, als für die Berechnung verwendet wird). Neben den statischen Korrekturen ist mit F_c die kinetischen Energie-Korrektur angegeben, die analog zu (Glas-)Kapillarviskosimetern mit dem Faktor ζ der 'Hagenbach-Couette'-Korrektur entspricht: $F_c = 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot v_m^2 \cdot \zeta$

- Diagramm 5. Die 'Kraft-Weg-Rohdaten' - 'eta-Raw (M)'



- Diagramm 5, "eta-Raw (M)", 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 2,07 cm³ wird über die Bewegungstrecke von 18,3 mm komplett ausgetauscht.

Tabelle 3: Detaildaten zur Viskositätsmessung II.

N°	'Noise' [µN/mm]	Hstart [mm]	Lcη [mm]	DRSP [mm]	ΔDRSP [µm]	Øzyl. [mm]	Lzyl. [mm]	Σσ [mPa·s]	Σσrel.
1.	14,8	13,945	1,250	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	66	2,7%
2.	7,41	13,841	1,456	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	42	2,1%
3.	5,51	13,722	1,697	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	29	1,6%
4.	5,68	13,583	1,978	2,005	0	11,9900	23,5000	30	1,9%
5.	2,04	13,420	2,305	2,005	0	11,9900	23,5000	18	1,3%
6.	2,36	13,231	2,683	2,005	0	11,9900	23,5000	18	1,4%
7.	2,75	13,010	3,131	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	17	1,5%
8.	1,79	12,753	3,648	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	14	1,3%
9.	1,28	12,454	4,248	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	11	1,2%
10.	0,991	12,106	4,942	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	10	1,1%
11.	6,80	11,698	5,755	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	40	6,0%
12.	1,47	11,226	6,714	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	13	1,8%
13.	1,24	10,674	7,818	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	12	1,8%
14.	0,272	10,029	9,111	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	6,9	1,1%
15.	0,375	9,283	10,614	2,005	0	11,9900	23,5000	9,5	1,7%
16.	0,236	8,409	12,360	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	6,1	1,2%
17.	0,136	7,393	14,402	2,005	0	11,9900	23,5000	7,1	1,5%
18.	0,305	6,206	16,789	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	6,2	1,5%
19.	0,0327	4,828	19,546	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	4,2	1,0%
20.	0,0240	3,225	22,783	2,005	0	11,9900	23,5000	4,3	1,1%
21.	0,0246	2,674	24,047	2,005	0	11,9900	23,5000	4	1,2%
22.	0,0627	2,678	24,013	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	3	1,1%
23.	0,0781	2,686	24,072	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	2,9	1,1%
24.	0,0516	2,700	23,985	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	2,7	1,2%
25.	0,00836	2,698	24,121	2,005	0	11,9900	23,5000	2,6	1,1%
26.	0,00711	2,702	24,058	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	2,3	1,1%
27.	0,0142	2,715	23,979	2,005	0	11,9900	23,5000	1,7	1,0%
28.	0,00367	2,726	24,330	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	1,8	1,1%
29.	0,00588	2,733	24,148	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	1,4	1,0%
30.	0,00630	2,767	24,202	2,005	0	11,9900	23,5000	1,3	1,0%
31.	0,00626	2,778	24,152	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	1,2	1,0%
32.	0,00273	2,768	24,242	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	1,2	1,1%
33.	0,00256	2,791	25,260	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	1,1	1,1%
34.	0,00496	2,814	25,491	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	0,96	1,1%
35.	0,0171	2,856	25,590	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	0,94	1,2%
36.	9,42	13,945	1,248	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	41	2,0%
37.	5,39	13,842	1,455	2,005	0	11,9900	23,5000	23	1,3%
38.	3,32	13,722	1,696	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	19	1,2%
39.	4,35	13,583	1,979	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	22	1,6%
40.	1,74	13,420	2,302	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	14	1,1%
41.	1,86	13,231	2,682	2,005	3,18E-04	11,9900	23,5000	14	1,2%
42.	2,89	13,010	3,126	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	15	1,4%
43.	1,74	12,753	3,640	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	12	1,3%
44.	0,971	12,454	4,241	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	9,6	1,1%
45.	1,06	12,105	4,943	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	10	1,2%
46.	7,80	11,698	5,756	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	39	6,1%
47.	1,66	11,225	6,705	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	14	2,0%
48.	0,955	10,674	7,815	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	13	2,0%
49.	0,416	10,030	9,110	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	10	1,7%
50.	0,268	9,281	10,613	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	9	1,6%
51.	0,271	8,408	12,383	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	7,5	1,5%
52.	0,130	7,394	14,397	2,005	0	11,9900	23,5000	6,7	1,4%
53.	0,208	6,210	16,791	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	6,8	1,6%
54.	0,0938	4,827	19,540	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	5,4	1,4%
55.	0,0316	3,225	22,794	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	4,3	1,2%
56.	0,0235	2,672	24,065	2,005	3,18E-04	11,9900	23,5000	4,1	1,2%
57.	0,0204	2,680	24,007	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	3,6	1,2%
58.	0,0157	2,682	24,067	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	3,2	1,1%
59.	0,0136	2,686	23,901	2,005	-4,78E-04	11,9900	23,5000	2,9	1,2%
60.	0,00994	2,701	24,099	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	2,5	1,1%
61.	0,00844	2,706	24,145	2,005	0	11,9900	23,5000	2,3	1,1%
62.	0,00731	2,720	23,917	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	2	1,1%
63.	0,00601	2,726	24,330	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	1,8	1,1%
64.	0,00343	2,744	24,173	2,005	0	11,9900	23,5000	1,6	1,1%
65.	0,00891	2,746	24,461	2,005	0	11,9900	23,5000	1,3	1,1%
66.	0,00511	2,794	24,136	2,005	0	11,9900	23,5000	1,1	0,98%
67.	0,00622	2,768	24,261	2,005	0	11,9900	23,5000	1,1	1,1%
68.	0,0150	2,835	25,260	2,005	3,18E-04	11,9900	23,5000	2,2	2,2%

69.	0,0104	2,827	25,517	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	1,6	1,8%
70.	0,0104	2,841	25,575	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	0,9	1,1%
71.	10,6	13,945	1,249	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	44	2,0%
72.	6,76	13,841	1,457	2,005	0	11,9900	23,5000	30	1,7%
73.	3,76	13,722	1,698	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	18	1,1%
74.	4,56	13,583	1,975	2,005	0	11,9900	23,5000	22	1,5%
75.	1,90	13,420	2,304	2,005	0	11,9900	23,5000	14	1,1%
76.	1,82	13,231	2,684	2,005	0	11,9900	23,5000	14	1,2%
77.	3,31	13,011	3,125	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	16	1,5%
78.	1,74	12,754	3,642	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	12	1,2%
79.	1,20	12,455	4,247	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	10	1,1%
80.	1,06	12,106	4,937	2,005	0	11,9900	23,5000	11	1,3%
81.	7,93	11,698	5,769	2,005	0	11,9900	23,5000	40	6,2%
82.	1,71	11,225	6,717	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	15	2,1%
83.	1,14	10,673	7,821	2,005	0	11,9900	23,5000	12	1,8%
84.	0,351	10,031	9,106	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	7,5	1,2%
85.	0,238	9,280	10,610	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	6,5	1,2%
86.	0,282	8,409	12,362	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	7,2	1,4%
87.	0,125	7,392	14,413	2,005	0	11,9900	23,5000	6,9	1,4%
88.	0,235	6,210	16,784	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	7,2	1,7%
89.	0,0862	4,828	19,564	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	5,8	1,4%
90.	0,0358	3,221	22,773	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	4,5	1,2%
91.	0,0272	2,676	24,089	2,005	-3,18E-04	11,9900	23,5000	4,1	1,2%
92.	0,0225	2,680	23,986	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	3,6	1,2%
93.	0,0170	2,679	24,077	2,005	-1,59E-04	11,9900	23,5000	3,2	1,2%
94.	0,0145	2,691	23,902	2,005	0	11,9900	23,5000	2,8	1,1%
95.	0,0146	2,698	24,073	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	2,6	1,2%
96.	0,0109	2,699	24,061	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	2,3	1,2%
97.	0,00891	2,706	24,006	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	2	1,1%
98.	0,00660	2,721	24,335	2,005	0	11,9900	23,5000	1,8	1,1%
99.	0,00585	2,739	24,184	2,005	0	11,9900	23,5000	1,6	1,1%
100.	0,00512	2,746	24,286	2,005	0	11,9900	23,5000	1,3	1,0%
101.	0,00541	2,770	24,201	2,005	0	11,9900	23,5000	1,2	1,1%
102.	0,00625	2,778	24,298	2,005	0	11,9900	23,5000	1,1	1,1%
103.	0,00716	2,824	25,293	2,005	0	11,9900	23,5000	0,98	1,0%
104.	0,00568	2,827	25,452	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	0,97	1,1%
105.	0,0118	2,871	25,650	2,005	1,59E-04	11,9900	23,5000	0,85	1,1%

Tabellensymbole: *Noise* Mittelwert von Auslenkungen und höherfrequenten Lastschwankungen 'Schergredienten 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_{Ch} 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]. Σ_{σ} Absolute Summe der Unsicherheitsbeiträge, die dem jeweiligen Viskositätswert beigeordnet wird [mPa·s] und $\Sigma_{\sigma_{\text{rel}}}$ relative Unsicherheit des Viskositätsmesswertes.

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

• 4. DICHTE - MESSUNG

Drei Messwerte; Zeitbereich 11 bis 46 min, Temperatur $\Delta T = 0,02 \text{ K}$ ($\vartheta = 25,01 \pm 0,01^\circ\text{C}$)

Ergebniswert bei 14 min: $\rho_{25^\circ\text{C}} = 0,9203 \pm 7,8 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ bzw. $\pm 0,85\text{‰}$ (298,15 K)

Streuung: $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ absolute bzw. $0,85\text{‰}$ relative Standardabweichung

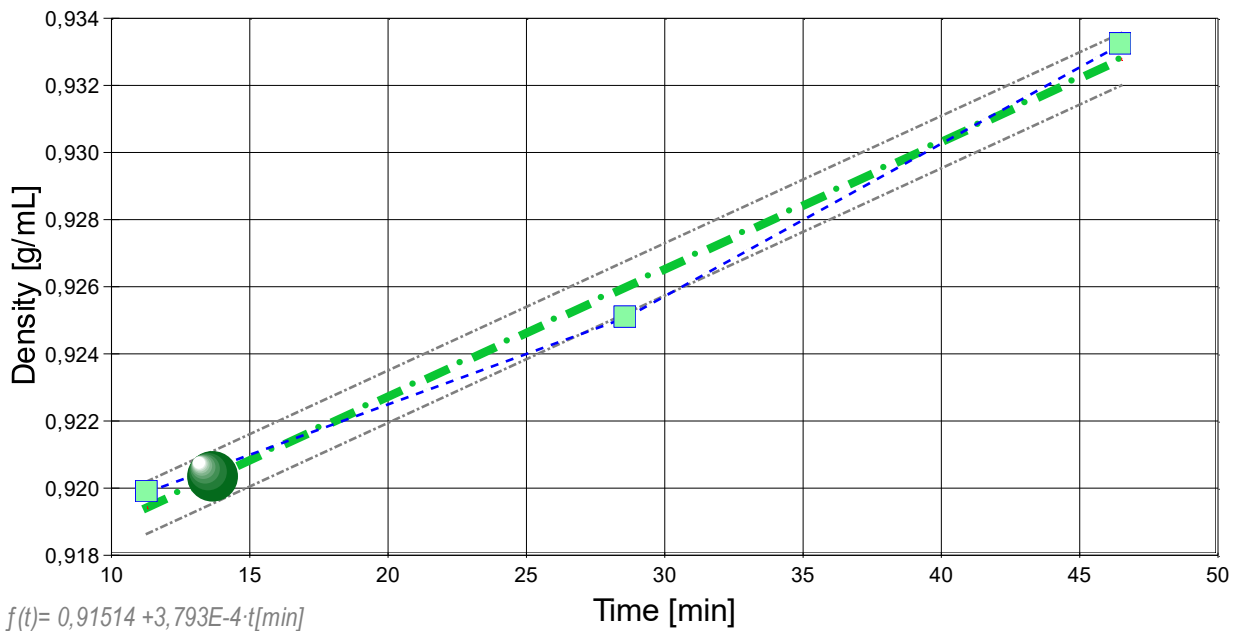
Berechnung: lineare Regressionsgleichung zeitabhängig.

Zeitzusammenhang durch Regression zwischen Minute 11 und 46:

$$\rho(t[\text{min}]) = 0,91514 + 3,793\text{E-}4 \cdot t \quad \text{mit } r^2 = 0,987, s^2 = 6,02\text{E-}7$$

- Die im Vergleich mit dem Wert der Fortpflanzung der Messunsicherheit von $\pm 0,00017 \text{ g/cm}^3$ relativ große Standardabweichung zwischen Gleichung und Messwerten ($\pm 7,8\text{E-}04 \text{ g/cm}^3$) 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. --- Die Messdaten werden automatisch analysiert. Ergebnis und ermittelte Formeln stellen Vorschläge dar, wobei sich aus den Umständen der Messung ggf. andere Zusammenhänge ergeben können. Der Korrelationskoeffizient zeigt die Qualität der gegenseitigen Abhängigkeit an (r^2 , der hier wohl 'mäßig' 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. Zeitverlauf der Dichtemesswerte - ' $\rho\text{-f}(t)^2$ '



- - - 3 Measurements
 - - - $\pm 0,00078 \text{ g/cm}^3$
 - - - lin. equation $f(t)$
 • 13,7[min]: 0,9203 g/cm^3

- Im Diagramm 6, "rho-f(t)²", sind die einzelnen Messwerte als Quadrate in zeitlicher Sequenz abgebildet. Die Darstellung zeigt die Dichtewerte entsprechend der chronologischen Abfolge der Visko-Scherraten

Tabelle 4: Daten der Dichtemessung

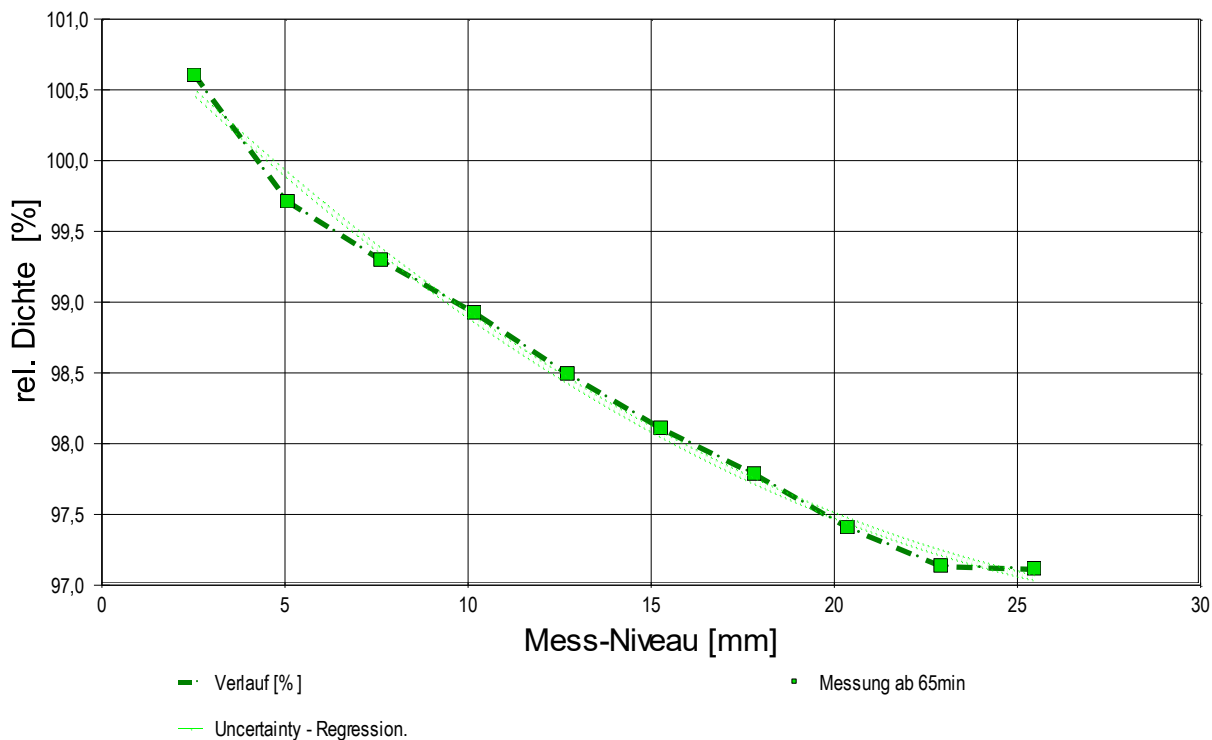
N° IDN°11144	t [min]	θ [°C]	ρ [g/cm ³]	H [mm]	ω [s]	Δρ _ω [g/cm ³]	N Werte & Trend	F _A [mN]	F _{korrr.} [mN], TSymb.
1.	11,3	25,00	0,9199	5,650	3,5	0,0011	14	189,228	0,012 ‡
2.	28,6	25,02	0,9251	5,650	3,5	0,0016	14	189,090	0,016 ‡
3.	46,5	25,00	0,9332	5,650	3,7	0,0011	14	188,870	0,015 ‡
4.	64,9	25,02	0,9388	2,548 ◊	3,5	0,0012	14	188,715	0,012 ‡
5.	65,8	25,01	0,9305	5,097 ◊	3,4	9,1E-04	14	188,943	0,015 †
6.	66,8	25,00	0,9266	7,645 ◊	3,7	0,0011	14	189,050	0,017 †
7.	67,8	24,98	0,9231	10,194 ◊	3,5	0,0013	14	189,147	0,020 †
8.	68,7	24,99	0,9191	12,742 ◊	3,3	9,1E-04	13	189,259	0,023 †
9.	69,7	24,99	0,9155	15,290 ◊	3,5	0,0013	14	189,359	0,026 †
10.	70,6	25,02	0,9125	17,839 ◊	3,5	0,0012	14	189,443	0,029 †
11.	71,6	25,00	0,9090	20,387 ◊	3,5	0,0016	14	189,541	0,031 †
12.	72,6	25,02	0,9064	22,936 ◊	3,5	9,8E-04	14	189,613	0,034 †
13.	73,5	25,00	0,9063	25,484 ◊	3,5	0,0010	14	189,621	0,037 †

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 Dichteänderung 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.} zuvor gemessene Referenzkraft - d.h. bei abgetrenntem Messkörper mit berechneter Korrektur der Auftriebskraft der austauchenden Suspensionslänge [mN].

- Die 'Nullhöhe' ist die vertikale Position zu der der Messkörper just auf dem Gefäßboden oder Podest steht (H=0mm). Die zu F_{korrr.} nachgestellten Zeichen '†' oder '‡' symbolisieren die jeweils angewandten Mess- und Korrekturverfahren ('°' für Dichtemesswerte nach klassischem Verfahren, '‡' für absolute Werte mit Drift- und Meniskuseliminierung (Patentverfahren)). '†' steht für 'übertragene Korrekturkraft'

• 5. DICHTEGRAIENT

- Diagramm 6. Der vertikaler Dichtegradient - 'rho-f(H)²'



- Das Diagramm 7, "rho-f(H)2", zeigt die relative Dichte in Abhängigkeit von der vertikalen Position an - den Dichtegradienten.

Eine Messung in zehn Positionen im Zeitraum zwischen 64,9 bis 73,5 Minuten. Niveaubereich der Untersuchung von 2,548 bis 25,484 mm über dem Gefäßboden.
Dem Bezugswert "100%" entsprechen $0,938804 \text{ g/cm}^3$. Die ermittelte Abnahme der vertikalen Dichte beträgt max. 3,5%, bzw. $-1,7 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ als Absolutwert - über die Auslenkung von 22,936 mm. Zur Repräsentation der relativen Dichteänderung kann die Regressionsgleichung dienen:

$$\rho_{\text{rel.}}[\%] = f(H[\text{mm}]) = 101,11 - 0,2595 \cdot H + 0,0039419 \cdot H^2 \quad r^2 = 0,9937$$

• 6. ANGABEN ZUR KONFIGURATION

- a). **Messkörper:** Name **12 /16 DiVA-Std**, b). IdentN° 382, c). Spaltweite 2,005 mm.
d). **Mess- und Auswertungsverfahren:** Axio-Rheometrie. e). Konfigurationstyp DiVA-A (I++).
f). **Messkörperdaten:** Messzylindermasse $21,8282 \pm 0,0002 \text{ g}$, ~volumen $2,7594 \pm 0,0005 \text{ cm}^3$, ~durchmesser $11,99 \pm 0,002 \text{ mm}$, ~länge $23,5 \pm 0,01 \text{ mm}$, ~kub. Ausdehnungskoeffizient $48 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. g). **Messzylindersuspension:** Querschnitt $0,12570 \text{ mm}^2$, Umfang $1,2571 \text{ mm}$, h). Aufhängungsart: IMETER-Patentverfahren (drift- und fehlerfreie Dichtemessung).
i). **Behälter/Röhre:** Durchmesser $16 \pm 0,001 \text{ mm}$, ~kub. Ausdehnungskoeffizient $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
j). **Bezugstemperatur:** für Abmessungen und Ausdehnungskoeffizienten 25°C .
k). **Kinetische Energie:** Faktor Zeta: $\zeta = 1$.
l). **Individuelle Werte:** Höhe der Flüssigkeitssäule über der Nulllage: 52,0 mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: 28,5 mm.
m). **Messunsicherheiten des Ergebnisses:** Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu 1,5% bestimmt; die ⁿ⁾ Messunsicherheit der Dichte $\pm 0,00078 \text{ g/cm}^3$ 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 \pm (Standardmess-)Unsicherheiten einfache Standardabweichungen - ohne Erweiterungsfaktoren - angegeben, d.h. die Überdeckung betrifft 67% der Werte.

Programm

Data created during execution of the IMPro "DiVA-A1", type 5/0. Measuring process performed accordingly.

(the digital twin of process IDN°11144 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured basal raw data)

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZ224-CW) wurde 1,1 Stunden vor dieser Messung von *Labor* justiert.

IMETER ID16405542: 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} 1,104 kg/m³;

Schwerebeschleunigung g 9,80769 m/s². Die Messauflösung der Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 5.6.34, LizenzN° *3037-4759*, W. 6.0-Betriebssystem auf PC Ser.N°609650943 (C,).

Kommentar/Bewertung/Interpretation:

Für ein zweiphasiges Fluid - weitgehend monodisperse Suspension weicher Partikel in einer zähen Matrix - da ist das beste Modell einer technischen Situation - und dazu ohne Probleme mit Chemikaliensicherheit, Buttermilch mit Butterflocken. Die Butterflocken werden durch die Scherung durch die Messung offenbar nicht verändert. Obwohl eine Betrachtung der Fließkurve (Wiederholte Scherraten) differenzierte Betrachtungen erlaubt. Wenn man will. Leider gelingt die Dichtemessungen nicht gut, da Auftrieb durch die Fließgrenze im Milchprodukt behindert wird.

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

Report created & printed by IMETER®

„Der automatische Bericht präsentiert die Datenlage und führt eine (Vor-)Interpretation aus. Die Tabellendaten sind in Spalten Tab-separiert und können somit sehr einfach z.B. in Excel ...



Intelligenter messen.

©IMETER / MSB Breitwieser MessSysteme
Morellstrasse 4, D-86159 Augsburg
Tel. (+49/0)821/706450
www.imeter.de

IMETER - Dienstleistungen:
www.imeter.de/dienstleistungen.html