

ID N° 16855 - DiVA-Method: Rheological Measurement

Aloe Vera Gel, rheo - Gel von einem frischen Blatt

Aloe vera barbadensis Miller 'Sweet Aloe'. 1 Sukkulantenblatt aufgeschnitten, Gel ausgeschabt, homogenisiert und durch ein 0.2mm-Filter per Spritze aufgezogen und in Messzelle transferiert. - Frischblatt, 3h vor dieser Messung geerntet.

Sample/Ref.: **Aloe Vera Gel** • pronounced shear thinning

Results at **25,00°C**

Viscosity: $\eta_{(100,0s^{-1})} = 48,63 \pm 0,92 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\nu = 48,76 \pm 0,92 \text{ mm}^2/\text{s}$

25 shear rates inc.^{+exp}(0,054 → 250) · s⁻¹, resolves $K = 0,22 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0,650}$ and $n = 0,650$ with $\tau^0 = 0,103 \text{ Pa}$

Density: $\rho = 0,99741 \pm 0,00056 \text{ g/cm}^3$

Report

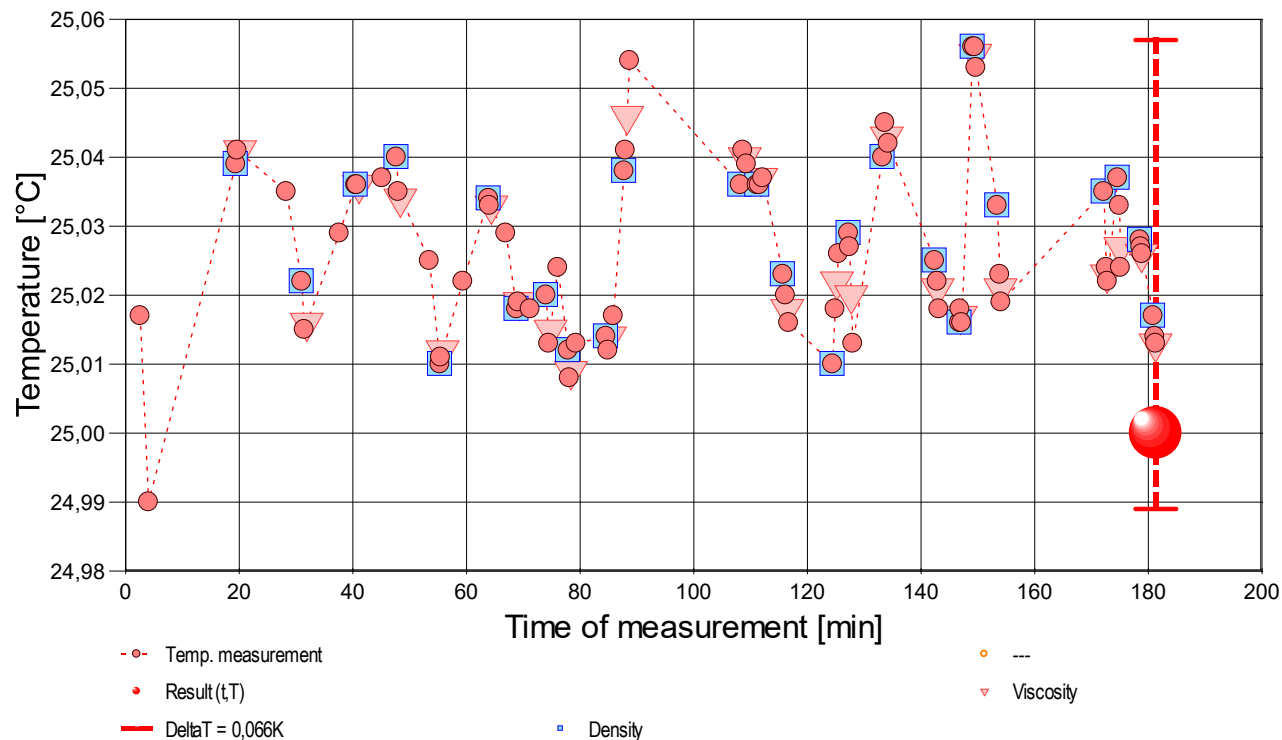
• 1. MESSPRINZIP

Die 'DiVA'-Methode beruht auf Kraftmessungen an einem Zylinder, der sich in einem zylindrischen Messgefäß mit der Probenflüssigkeit befindet. Dabei ist der zylindrische Messkörper über eine Aufhängung mit einem Kraftsensor verbunden. Das Gefäß wird durch die Plattform vertikal bewegt und positioniert. Wird die Plattform nach unten bewegt, so fließt das Probenfluid um den stillstehenden Messzylinder durch den ringförmigen Spalt. Die lineare Strömung entlang der Messkörperoberfläche überträgt dadurch eine Kraft. Das ist die Schubspannung, die genau der Viskosität der Probe entspricht. - Eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Zylindern fördert parallel ein exakt proportionales Probenvolumen durch den Ringspalt. Das Strömungsprofil ist durch die geometrischen Verhältnisse definiert, Geschwindigkeit, Strömung, Kraft gehorchen wie das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz der Navier-Stokes-Gleichung. M5 DiVA ermöglicht unter Berücksichtigung von Aufhängungs- und Auftriebseffekten sowie der Strömungskinetik die sehr präzise Bestimmung der Viskosität (η). Durch Variationen der Relativgeschwindigkeit, liefert die Messung *rheologische Eigenschaften* - die Viskosität in Abhängigkeit vom Schergradienten ($\dot{\gamma}$). Dem hier durchmessenen Bereich 0,054 s⁻¹ bis 249,6 s⁻¹ kommt technisch die Bedeutung von *Oberflächenverlauf bis etwa leichtem Pumpen, Auftragen* zu. -- Auf den Messkörper wirken stets durch die *Dichte* des Probenfluids bedingte Auftriebskräfte. Die Dichte ρ gibt als *spezifische Masse* die Stoffmenge an, die in einem Volumen vorliegt. Sie ist ebenfalls eine besonders temperaturabhängige Stoffkonstante und wird simultan mittels Auftriebswägung am ruhenden Zylinder-Messkörper bestimmt: Diese *hydrostatische Wägung* basiert darauf, dass "ein in einer Flüssigkeit untertauchender Körper (Messkörper) um den Betrag leichter erscheint, wie die seinem Volumen entsprechende Flüssigkeitsmenge wiegt." Damit aus der Auftriebskraft des Messkörpers die Dichte exakt berechnet werden kann, ist das Messkörpervolumen unter den jeweils vorliegenden Bedingungen entscheidend.

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

• 2. ÜBERSICHT

Dichte und Viskosität wurden 25-mal gemessen. Messdauer drei Stunden; Temperaturverlauf blieb im gesamten Zeitraum ziemlich grob isotherm bei 25,0°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.

• 3. VISKOSITÄTS - MESSUNG

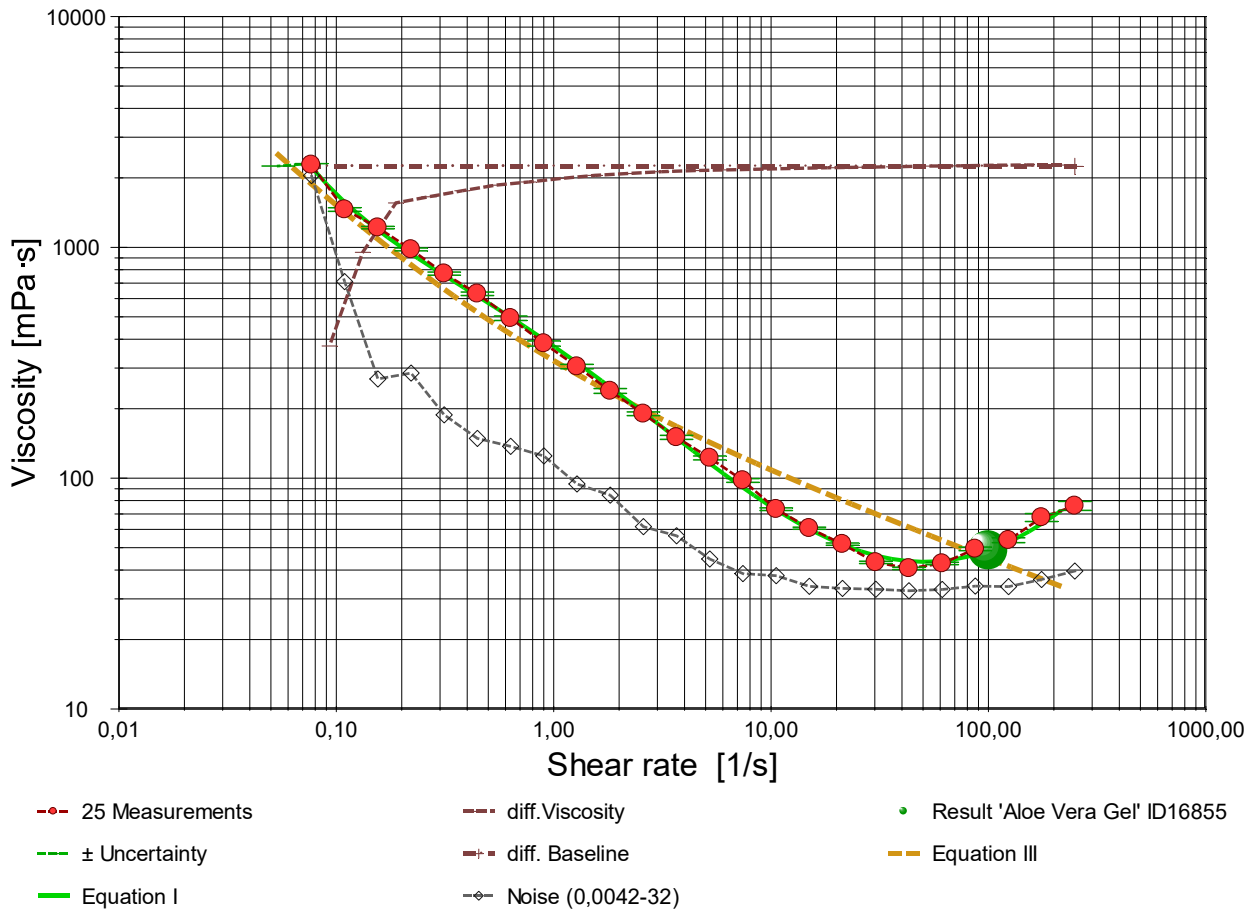
Temperatur **Aloe Vera Gel-Probe** in Rheometrie-Messung: $25,026 \pm 0,012 \text{ °C}$, Zeitbereich: 20,1 bis 181,3 Minuten. Die 25 Viskositätsmesswerte wurden mit ebenso vielen unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten ($\dot{\gamma}$) ermittelt und analysieren den Bereich zwischen 0,054049 bis 249,6 s⁻¹ wobei die *scheinbare* Viskosität (η') Werte zwischen 40,7 bis 2280 mPa·s erreicht. Die Ergebnisangabe der Messung $48,63 \pm 0,92 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ für $\dot{\gamma} = 100,0 \text{ s}^{-1}$ wurde aus einer Regressionsgleichung zu den Messwerten kalkuliert:

$$\eta'_{25,0^{\circ}\text{C}} [\text{mPa}\cdot\text{s}] = f(\dot{\gamma} [1/\text{s}]) = 373,03 \cdot \dot{\gamma}^{-0,65377 - 0,050359 \cdot \ln(\dot{\gamma}) - 5,3202 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(\dot{\gamma})^2 + 0,008046 \cdot \ln(\dot{\gamma})^3 - 7,3649 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(\dot{\gamma})^4}$$

Gleichung I, $r^2 = 0,9988$, $\sigma \pm 0,048\%$

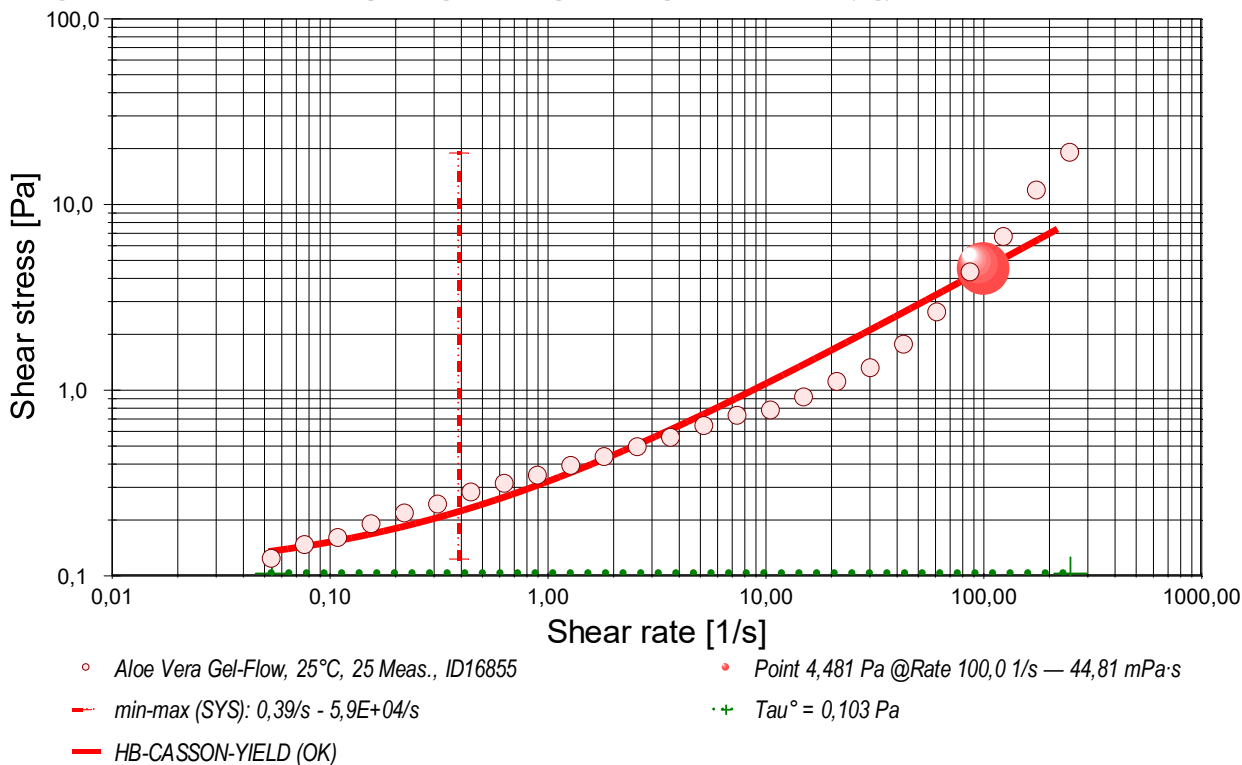
- Es wird von ("scheinbare Viskosität" gesprochen, da bei nicht-newtonischen Fluiden ein parabelförmiges Strömungsprofil ungewiss ist. - Die Regressionsgleichung kombiniert die Menge der Messwerte. Zur Qualitätsbeurteilung, wie gut die Messwerte durch die Regressionsgleichung abgebildet werden, wird der Standardfehler als Gauß'sche Unsicherheit d.h. als *RMSPE (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-Log-Log'



- Das Diagramm 2, "Viskositätskurve-Log-Log", zeigt die Viskositätswerte η' als rote, kugelförmige Markierungen. Senkrechte, grün gezeichnete Linien markieren zugehörige Werte der Messunsicherheit ($\pm 2\sigma$, Tabelle III). Der numerische Differenzenquotient der 25 Scherraten (diff.Viscosity) ist als relative Kurve mit zugehöriger Basislinie mit $d\eta'/d\ln(\dot{\gamma}) = 0$ eingezeichnet. Der Verlauf der Viskositätsänderung bietet mitunter exakt lokalisierbare 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 newtonische Proportionalität aus. Mit raute-förmigen 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 newtonische 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 Aloe Vera Gel bei 25°C beschreibt die Gleichung II in Etwa:

$$\tau \text{ [Pa]} = 0,103 + 0,22 \cdot \dot{\gamma}^{0,65} \quad \text{Gleichung II, } r^2 = 0,66, \sigma \pm 30\%$$

Fließgrenze ($\tau^0 = 0,103 \text{ Pa}$), Konsistenz ($K = 0,22 \text{ Pa}$) und Fließindex ($n = 0,650$) charakterisieren das Fließverhalten der Aloe Vera Gel-Probe; die Kennzahlen ergeben sich aus dem geläufigen Potenzgesetz. Die Ableitung von Gl.II nach der Schergeschwindigkeit ($\dot{\gamma} \rightarrow \dot{\gamma}$) ergibt die Gleichung III zur Beschreibung der Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit:

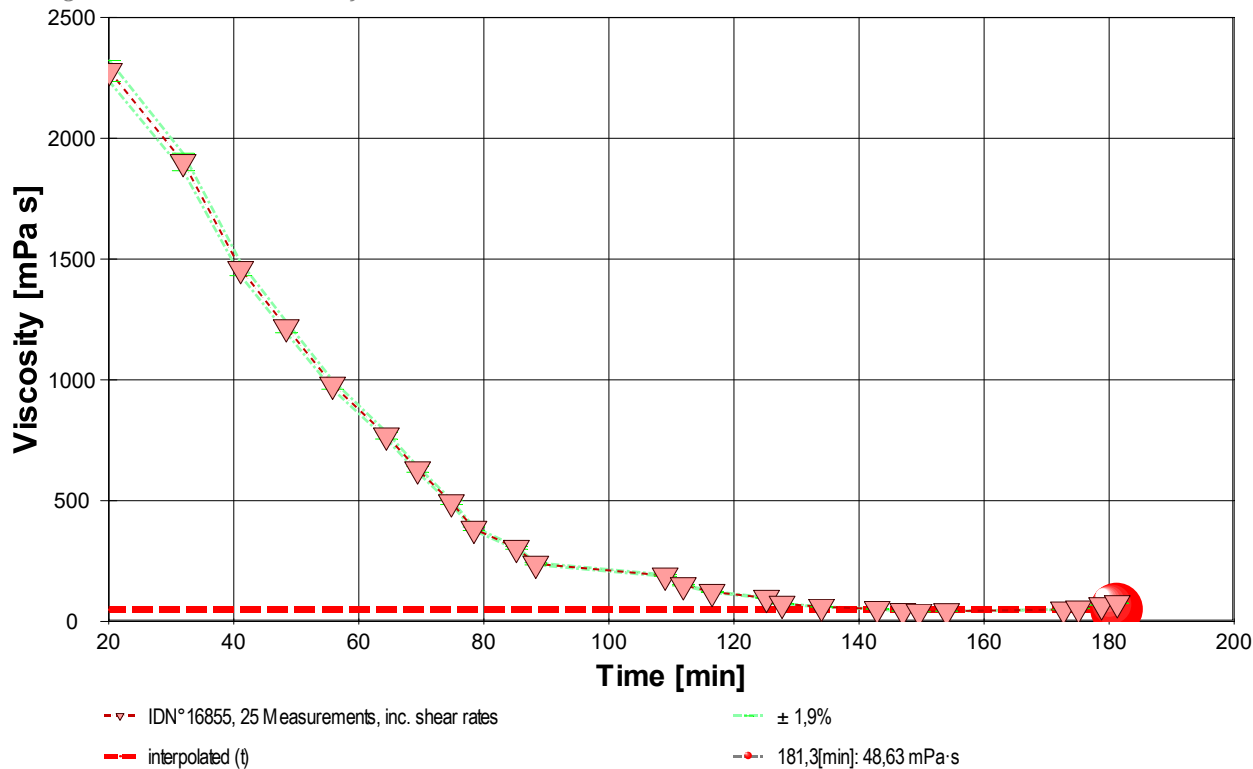
$$\eta' \text{ [Pa}\cdot\text{s]} = 0,103 \cdot \dot{\gamma}^{-1} + 0,22 \cdot \dot{\gamma}^{-0,35} \quad \text{Gleichung III, } r^2 = 0,986, \sigma \pm 30\%$$

Daraus eine Kurzdiagnose zur Aloe Vera Gel-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-Zeit'



- Im Diagramm 4, "eta-Zeit", 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° IDN°16855	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.	20,1	25,041	2279	0,004999	1,0615	0,1232	0,02081	0,054049	1,94E-05
2.	31,9	25,016	1900	0,007107	1,2595	0,146	0,0296	0,07683	3,3E-05
3.	41,1	25,036	1460	0,01010	1,3738	0,159	0,0421	0,1092	6,1E-05
4.	48,4	25,034	1220	0,01436	1,6304	0,189	0,0598	0,1553	1,0E-04
5.	55,8	25,012	980	0,02042	1,8647	0,216	0,0850	0,2207	1,8E-04
6.	64,4	25,033	770	0,02901	2,0810	0,241	0,121	0,3136	3,3E-04
7.	69,4	25,019	630	0,04122	2,4188	0,281	0,172	0,4456	5,8E-04
8.	74,8	25,015	493	0,05862	2,6953	0,313	0,244	0,6337	0,0010
9.	78,4	25,009	384	0,08334	2,9794	0,346	0,347	0,9010	0,0019
10.	85,2	25,014	305	0,1184	3,3625	0,390	0,493	1,280	0,0034
11.	88,3	25,046	239	0,1683	3,7474	0,435	0,701	1,820	0,0062
12.	109,0	25,040	190	0,2393	4,2377	0,492	0,996	2,587	0,011
13.	111,9	25,037	150	0,3400	4,7620	0,552	1,42	3,676	0,020
14.	116,5	25,018	122	0,4833	5,5119	0,639	2,01	5,225	0,035
15.	125,2	25,022	97,7	0,6868	6,2544	0,726	2,86	7,425	0,062
16.	127,7	25,020	73,4	0,9766	6,6805	0,775	4,06	10,56	0,12
17.	134,0	25,043	60,72	1,388	7,8529	0,9111	5,777	15,005	0,201
18.	142,9	25,021	51,80	1,972	9,5215	1,105	8,210	21,324	0,335

19.	147,0	25,017	43,18	2,805	11,2849	1,309	11,67	30,320	0,572
20.	149,6	25,055	40,68	3,987	15,1120	1,753	16,59	43,102	0,864
21.	154,0	25,021	42,71	5,667	22,5517	2,616	23,59	61,261	1,17
22.	172,7	25,023	49,4	8,050	37,0687	4,30	33,5	87,03	1,4
23.	175,1	25,027	53,9	11,45	57,4737	6,67	47,6	123,8	1,9
24.	178,8	25,026	67,6	16,24	102,2834	11,9	67,6	175,6	2,1
25.	181,3	25,013	75,9	23,09	163,3362	18,9	96,1	249,6	2,7

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], $\dot{\gamma}$ 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_ζ), die viskose Reibung der Messzylinder-Aufhängung im Medium ($F_{h\eta}$), die rekursiv bestimmt wird. Die reibungsbedingte Kraft am Messkörper ergibt sich aus $F_z = F_w - F_p - F_{hp} - F_\zeta - F_{h\eta}$. Die Korrekturen sind in der nächsten Tabelle aufgeschlüsselt. Die Schubspannung τ entspricht der rein durch die Viskosität des Mediums je Quadratmeter der Zylindermantelfläche ausgeübten Kraft. v_{max} ist die Maximalgeschwindigkeit eines Newton'schen Fluids im Ringspalt relativ zum Messzylinder. Sie ergibt sich aus der Bewegungsgeschwindigkeit und dem geometrischen Aufbau. Die mittlere Geschwindigkeit (nicht in der Tabelle ausgegeben; $v_m = v_z \cdot r_a^2 / (r_a^2 - r_i^2)$, 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 verwendet werden, ist berechnet als Geschwindigkeitsgradient unmittelbar an der Zylinderoberfläche.

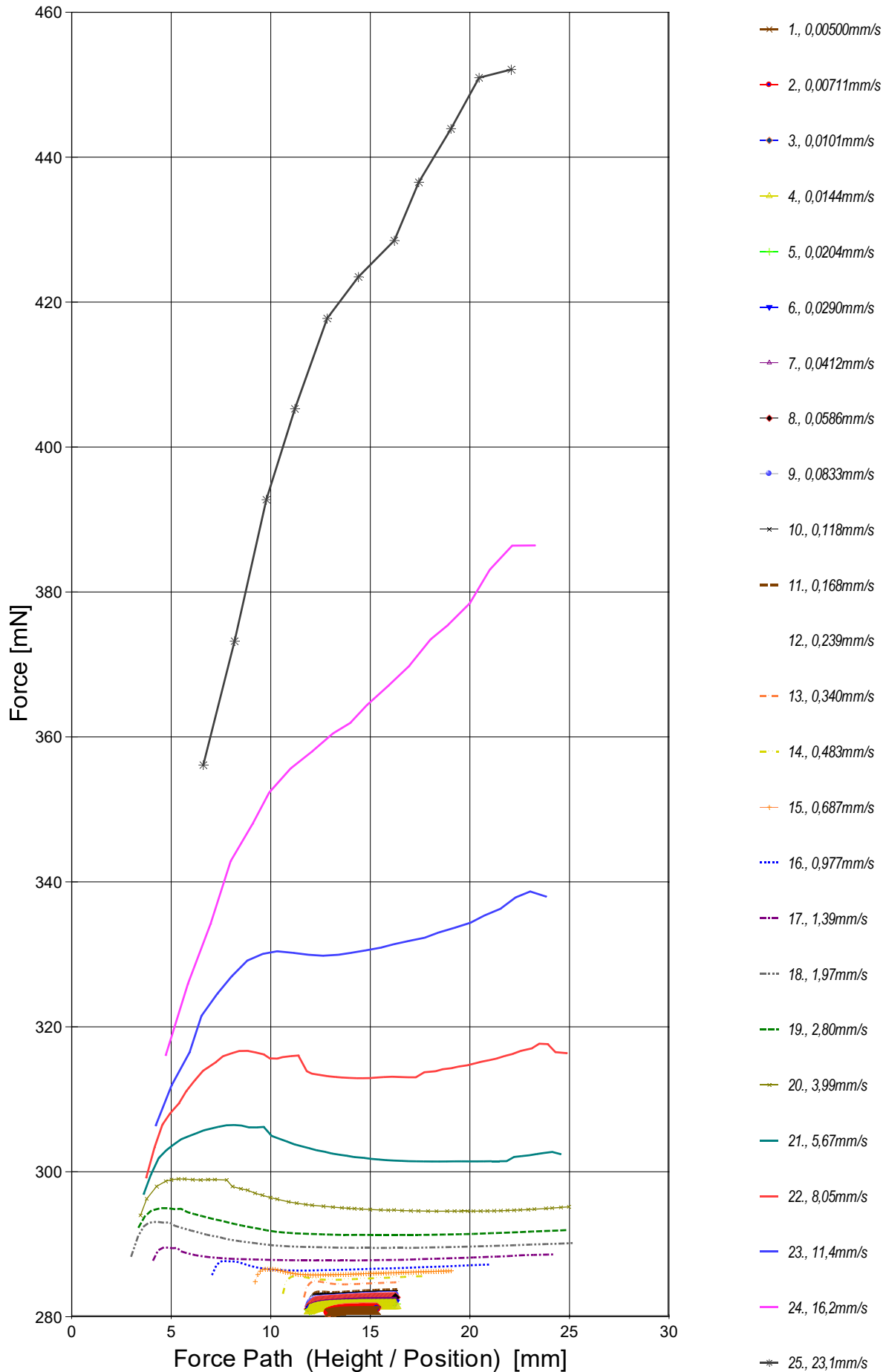
Tabelle 2, Detaildaten zur Viskositätsmessung I.

N°	F_w	σ_{Fw}	$\sigma_{Fw\ rel}$ -- Alle Werteinträge in [mN] --	F_p	F_{hp}	F_ζ	$F_{h\eta}$	N/n Datenauswahl
1.	280,8771	0,004702	17 ppm	279,8189	0,003584	1,93E-08	3,47E-04	47/97
2.	281,1113	0,0178	63 ppm	279,8550	0,00358	3,90E-08	4,12E-04	47/97
3.	281,2483	0,0179	64 ppm	279,8776	0,00358	7,87E-08	4,49E-04	47/97
4.	281,4998	0,0103	37 ppm	279,8725	0,00367	1,59E-07	5,48E-04	47/97
5.	281,7413	0,0161	57 ppm	279,8796	0,00368	3,21E-07	6,27E-04	46/96
6.	281,9949	0,0228	81 ppm	279,9169	0,00368	6,48E-07	7,00E-04	46/96
7.	282,3070	0,0346	0,12‰	279,8911	0,00368	1,31E-06	8,14E-04	46/96
8.	282,5834	0,0521	0,18‰	279,8909	0,00367	2,65E-06	9,05E-04	45/94
9.	282,8865	0,0690	0,24‰	279,9097	0,00367	5,35E-06	0,00100	45/93
10.	283,2866	0,0648	0,23‰	279,9267	0,00368	1,08E-05	0,00113	44/92
11.	283,6591	0,0791	0,28‰	279,9140	0,00367	2,18E-05	0,00126	42/87
12.	284,1519	0,0621	0,22‰	279,9164	0,00367	4,41E-05	0,00142	44/91
13.	284,6425	0,0790	0,28‰	279,8824	0,00371	8,91E-05	0,00162	39/82
14.	285,4432	0,0933	0,33‰	279,9330	0,00389	1,80E-04	0,00196	31/87
15.	286,1751	0,0912	0,32‰	279,9221	0,00412	3,63E-04	0,00236	26/79
16.	286,6323	0,0570	0,20‰	279,9526	0,00372	7,34E-04	0,00228	15/86
17.	287,8095	0,02464	86 ppm	279,9562	0,003700	0,00148	0,00266	9/87
18.	289,5306	0,04742	0,16‰	280,0067	0,004016	0,00299	0,00350	19/83
19.	291,3271	0,05619	0,19‰	280,0359	0,004159	0,00604	0,00430	18/64
20.	295,0781	0,08441	0,29‰	279,9517	0,005593	0,0122	0,00774	3/56
21.	302,5579	0,1399	0,46‰	279,9757	0,005468	0,0247	0,0113	4/56
22.	317,0973	0,530	0,17%	279,9659	0,00536	0,0498	0,0182	5/55
23.	337,6042	1,22	0,36%	280,0080	0,00512	0,101	0,0270	3/27
24.	382,6405	4,00	1,0%	280,1137	0,00487	0,203	0,0457	3/19
25.	443,8110	7,21	1,6%	280,0031	0,00444	0,410	0,0664	3/11

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-) Kapillarrisikometern 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. Sofern sich kein ausreichend stationärer Verlauf zum Kurvenende hin ausbildet, können entsprechende Störungen - oder Probeneigenschaften - als Symptom verschiedener Ursachen gedeutet werden: ein Temperaturgefälle liegt vor, die Probe ist vertikal inhomogen, Mehrphasigkeit, Resonanz, Turbulenz (Re), die Probe scherverdünnend, scherverfestig (bewegzeitabhängig) im Ringspalt. Alle Kurven-Störungen betreffen die Angaben zu Noise und Messunsicherheit $\Sigma\sigma$. Das Gesamtvolumen im Ringspalt von 2,93 cm³ wird über die Bewegungstrecke von 22,0 mm komplett ausgetauscht.

Tabelle 3: Detaildaten zur Viskositätsmessung II.

N°	'Noise' [μPa/mm]	H _{Start} [mm]	L _{Cl} [mm]	D _{RSP} [mm]	ΔD _{RSP} [μm]	Ø _{zyl.} [mm]	L _{zyl.} [mm]	Σσ [mPa·s]	Σσ _{rel.}
1.	32,3	12,903	2,412	1,495	-0,00333	13,0110	43,0020	27	1,2%
2.	16,3	12,902	2,420	1,495	-0,00130	13,0110	43,0020	35	1,8%
3.	10,9	12,901	2,426	1,495	-0,00292	13,0110	43,0020	26	1,8%

4.	3,80	11,939	4,340	1,495	-0,00276	13,0110	43,0020	15	1,2%
5.	4,06	11,939	4,332	1,495	-9,74E-04	13,0110	43,0020	14	1,4%
6.	2,50	11,936	4,352	1,495	-0,00268	13,0110	43,0020	12	1,6%
7.	1,87	11,932	4,367	1,495	-0,00154	13,0110	43,0020	11	1,7%
8.	1,69	11,927	4,333	1,495	-0,00122	13,0110	43,0020	11	2,2%
9.	1,49	11,921	4,354	1,495	-7,30E-04	13,0110	43,0020	9,9	2,6%
10.	0,996	11,953	4,322	1,495	-0,00114	13,0110	43,0020	6,8	2,2%
11.	0,837	11,944	4,343	1,495	-0,00373	13,0110	43,0020	5,7	2,4%
12.	0,471	11,958	4,316	1,495	-0,00325	13,0110	43,0020	3,5	1,8%
13.	0,385	11,682	4,878	1,495	-0,00300	13,0110	43,0020	3	2,0%
14.	0,198	10,622	6,941	1,495	-0,00146	13,0110	43,0020	2,4	2,0%
15.	0,102	9,216	9,842	1,495	-0,00179	13,0110	43,0020	1,8	1,8%
16.	0,0888	7,069	13,966	1,495	-0,00162	13,0110	43,0020	0,98	1,3%
17.	0,0277	4,106	20,022	1,495	-0,00349	13,0110	43,0020	0,64	1,1%
18.	0,0165	3,001	22,158	1,495	-0,00170	13,0110	43,0020	0,59	1,1%
19.	0,0121	3,374	21,427	1,495	-0,00138	13,0110	43,0020	0,49	1,1%
20.	0,00424	3,456	21,513	1,495	-0,00446	13,0110	43,0020	0,47	1,2%
21.	0,0109	3,625	20,909	1,495	-0,00170	13,0110	43,0020	0,51	1,2%
22.	0,0290	3,752	21,092	1,495	-0,00187	13,0110	43,0020	0,87	1,8%
23.	0,0263	4,231	19,576	1,495	-0,00219	13,0110	43,0020	1,3	2,4%
24.	0,0662	4,732	18,514	1,495	-0,00211	13,0110	43,0020	2,7	4,0%
25.	0,118	6,610	15,471	1,495	-0,00105	13,0110	43,0020	3,4	4,5%

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_{Cl}** Länge der Suspension, deren Flüssigkeitsreibung und Auftrieb zur Korrektur der Kraft angewendet wird [mm]. **D_{RSP}** Weite des Ringspalts zwischen Zylindermesskörper und Röhre bei der Temperatur [mm], **ΔD_{RSP}** Änderung der Spaltweite durch Abweichung von der Bezugstemperatur 25°C [μm], **θ_{zyl}** Durchmesser des Messzylinders [mm], **L_{zyl}** Länge des Messzylinders [mm]. **$\Sigma\sigma$** Absolute Summe der Unsicherheitsbeiträge, die dem jeweiligen Viskositätswert beigeordnet wird [mPa·s] und **$\Sigma\sigma_{\text{rel}}$** relative Unsicherheit des Viskositätswertes.

- Die Spalte 'Noise' in Tabelle 3 stellt die Auswertung der 'Modulationen der stationären Kraft' aus Lastschwankung in aufeinander folgenden Kraftmesswerten im Verhältnis zur dabei zurückgelegten Bewegungstrecke dar ($\Delta F/\Delta s$); Steigungen im Verlauf der Stationärkraft werden ebenfalls in 'Noise' aufsummiert und bilanziert. 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

25 Messwerte; Zeitbereich 19 bis 181 min, Temperatur $\Delta T = 0,046 \text{ K}$ ($\vartheta = 25,028 \pm 0,012^\circ\text{C}$)

Angabewert bei 180 min: $\rho_{25^\circ\text{C}} = 0,99741 \pm 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ bzw. $\pm 0,56\text{‰}$ (298,15 K, 95,79 kPa)

Streuung: $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ absolute bzw. $0,56\text{‰}$ relative Standardabweichung

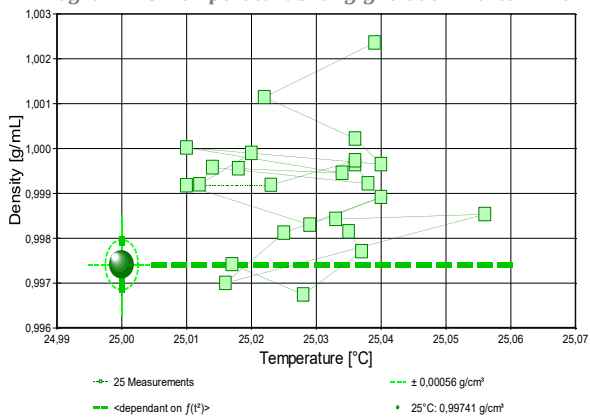
Berechnung: **extrapolierte** lineare Regressionsgleichung zeitabhängig.

Zeitgleichung durch Regression zwischen Minute 19 und 181:

$$\rho(t[\text{min}]) = 1,001508 - 2,260\text{E-}5 \cdot t \quad \text{mit } r^2 = 0,80, s^2 = 3,16\text{E-}7$$

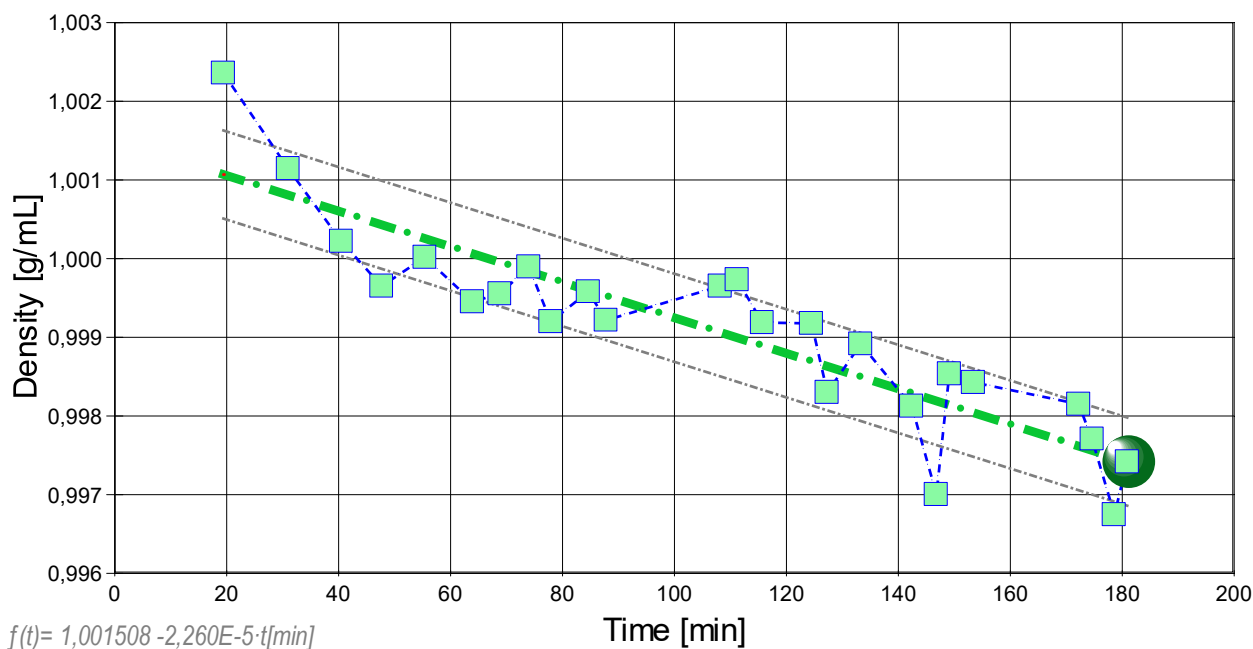
- Die im Vergleich mit dem Wert der Fortpflanzung der Messunsicherheit von $\pm 3,8\text{E-}5 \text{ g/cm}^3$ relativ große Standardabweichung zwischen Gleichung und Messwerten ($\pm 5,6\text{E-}04 \text{ g/cm}^3$) führt dazu, dass die aus der Fortpflanzung der Unsicherheiten berechnete kombinierte Messunsicherheit 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 (wobei ' $r^2=0,80$ ' eine schlechte Korrelation anzeigt). 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 25 Dichtemesswerte als Quadratsymbol bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 25°C für die Aloe Vera Gel-Probe ist als Kugel abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird durch gestrichelte Linien ausgewiesen.

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



--- IDN° 16855, 25 Measurements

--- ± 0,00056 g/cm³

--- Aloe Vera Gel, lin. equation f(t)

• 181,3[min]: 0,99741 g/cm³

- Im Diagramm 7, "rho-Zeit", 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°16855	t [min]	θ [°C]	ρ [g/cm³]	H [mm]	ω [s]	Δρ _ω [g/cm³]	N Werte & Trend	F _A [mN]	F _{korr.} [mN], TSymb.
1.	19,4	25,039	1,00236	2,648	14,3	4,3E-04	13 ₃₀ ↗	279,8189	0,1715 ‡
2.	31,0	25,022	1,00114	2,648	25,3	0,0014	25 ₃₀ ↗	279,8550	0,1592 ‡
3.	40,5	25,036	1,00022	2,648	12,5	7,4E-04	12 ₂₉ ↑	279,8776	0,1451 ‡
4.	47,7	25,040	0,99965	2,648	18,0	9,6E-04	18 ₂₉ ↘	279,8725	0,1173 ‡
5.	55,4	25,010	1,00002	2,648	6,2	3,2E-04	6 ₃₀ ↗	279,8796	0,1390 ‡
6.	63,9	25,034	0,99945	2,648	8,1	6,4E-04	8 ₂₉ ↗	279,9169	0,1538 ‡
7.	68,8	25,018	0,99955	2,648	16,0	6,8E-04	16 ₃₀ ↑	279,8911	0,1319 ‡
8.	74,0	25,020	0,99989	2,648	26,8	0,0014	27 ₃₀ ↗	279,8909	0,1454 ‡
9.	77,9	25,012	0,99920	2,648	11,8	7,4E-04	12 ₃₀ ↗	279,9097	0,1364 ‡
10.	84,6	25,014	0,99958	2,648	20,9	0,0015	21 ₃₁ ↑	279,9267	0,1686 ‡
11.	87,8	25,038	0,99922	2,648	12,7	7,1E-04	12 ₂₉ ↑	279,9140	0,1415 ‡
12.	108,2	25,036	0,99965	2,648	27,2	0,0023	27 ₃₀ ↗	279,9164	0,1611 ‡
13.	111,2	25,036	0,99973	2,648	21,4	0,0012	22 ₃₀ ↔	279,8824	0,1304 ‡
14.	115,7	25,023	0,99919	2,648	27,1	0,0018	27 ₃₀ ↓	279,9330	0,1594 ‡
15.	124,5	25,010	0,99918	2,648	26,7	0,0020	27 ₃₀ ↑	279,9221	0,1479 ‡
16.	127,3	25,029	0,99830	2,648	10,2	5,5E-04	10 ₃₁ ↗	279,9526	0,1436 ‡
17.	133,3	25,040	0,99892	2,648	26,4	0,0021	27 ₃₀ ↑	279,9562	0,1717 ‡
18.	142,4	25,025	0,99812	2,648	27,0	0,0023	27 ₂₈ ↗	280,0067	0,1907 ‡
19.	146,8	25,016	0,99700	2,648	4,2	2,9E-04	4 ₂₉ ↑	280,0359	0,1752 ‡
20.	149,1	25,056	0,99853	2,648	18,9	0,0012	19 ₃₀ ↓	279,9517	0,1520 ‡
21.	153,4	25,033	0,99843	2,648	26,8	0,0019	27 ₃₁ ↗	279,9757	0,1717 ‡
22.	172,2	25,035	0,99815	2,648	27,0	0,0026	27 ₃₀ ↗	279,9659	0,1509 ‡
23.	174,6	25,037	0,99771	2,648	18,1	9,8E-04	18 ₂₉ ↗	280,0080	0,1754 ‡
24.	178,6	25,028	0,99675	2,648	8,3	7,1E-04	8 ₃₁ ↔	280,1137	0,2427 ‡
25.	180,9	25,017	0,99742	2,648	16,9	8,5E-04	17 ₃₀ ↗	280,0031	0,1589 ‡

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 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_{korr.} zuvor gemessene Referenzkraft - d.h. bei abgetrenntem Messkörper mit berechneter Korrektur der Auftriebskraft der austauschenden Suspensionslänge [mN].

- Die 'Nullhöhe' ist die vertikale Position zu der der Messkörper just auf dem Gefäßboden oder Podest steht (H=0mm). Die zu F_{korr.} 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. ANGABEN ZUR KONFIGURATION

a). **Messkörper:** Name *BayStII_13.0/PA*, b). IdentN° 7043, c). Spaltweite 1,495 mm.

d). **Mess- und Auswertungsverfahren:** Axio-Rheometrie. e). Konfigurationstyp DiVA-A (I++).

f). **Messkörperdaten:** Messzylindermasse 32,5795 ± 0,0001 g, ~volumen 4,060751 ± 0,00015 cm³, ~durchmesser 13,011 ± 0,001 mm, ~länge 43,002 ± 0,001 mm, ~kub. Ausdehnungskoeffizient 48,735 · 10⁻⁶K⁻¹. g).

Messzylindersuspension: Querschnitt 0,021 mm², Umfang 0,515 mm, h). Aufhängungsart: IMETER-Patentverfahren (drift- und fehlerfreie Dichtemessung).

i). **Behälter/Röhre:** Durchmesser 16,0005 ± 0,005 mm, ~kub. Ausdehnungskoeffizient 9,2 · 10⁻⁶K⁻¹.

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

k). **Kinetische Energie:** Faktor Zeta: ζ = 1,33.

Individuelle Werte: ^{l)} Höhe der Flüssigkeitssäule über der Nulllage: 76,0 mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: 33,0 mm.

m). Messunsicherheiten des Ergebnisses: Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu 1,9% bestimmt; die ⁿ⁾ Messunsicherheit der Dichte $\pm 0,00056 \text{ g/cm}^3$ 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_n 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. IMPro finished as projected.

(the digital twin of process IDN°16855 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured raw data)

Prüfmittel

Die Wägeeinheit (WZA224) wurde im Messablauf und bereits 3,0 Stunden vor dieser Messung justiert.

IMETER ID23903733: Technische Daten: Auflösung des Wägesystems 0,1 mg, Messunsicherheit (Linearität) 0,2 mg, Dichte der Justiermasse ρ_{cal} 8,00 g/cm³, Luftdichte ρ_{air} vgl. Tabelle unten; Schwerebeschleunigung g 9,80769 m/s².

Pt100-Temperaturmessung: Auflösung 0,001[K], Messunsicherheit $\pm 0,0051$ [K], R° 100,0018[Ohm], AutoCal 30[min] (BN°2, -25/150°C, 4S, FS15, Offset: -0,0226). Die Messauflösung der sekundären Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 7.1.36, LizenzN° *3037-4759*, W. 6.2- Betriebssystem auf PC Ser.N°-2040961689 (C, Windows).

Justierung der Wägezelle während der Messung:

at 13,2 min, Adjustment -0,0002 g

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 'imeterData35.cal' gesondert gespeichert).

Meteorologische Angaben, Luftdichte:

Time [min]	ϕ [%]	T_a [°C]	p_a [kPa]	ρ_{air} [kg/m ³]
11,2	43,42	27,83	95,280	1,09601

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:

Das Aloe Gel der Messung (Blattmark) wird als eine klare, glibbrige und Fäden ziehende (Halb-)Flüssigkeit beschrieben. Ein eigenartiges Fließverhalten kann mit einer Kolbenspritze bei einem hin-und-her-Pumpen beobachtet werden. Dabei bleibt über längere Zeit eine ausgezogene Fluidbrücken zwischen Spritze und einem Behältnis bestehen. Und über - bzw. innerhalb - dieser Kapillarbrücken fließt das Gel beim Pumpen mit relativ hoher Geschwindigkeit, während der Außenbereich der Brücke still steht und wie ein Schlauch wirkt, durch den das Gel strömt.

Diagramm 5, "Force_Path", zeigt anhand den Messkurven, dass demnach je nach Scherung eine leichte Thixotropie bei kleineren Raten aber Rheopexie bei höheren Geschwindigkeiten auftritt (wahrscheinlich unsichtbar mit Rotationsrheometern). Das sehr spezielle Verhalten verbildlicht das Rheogramm (Abb.2), das Scherverdünnung bis 40/s zeigt und darüber dilatant wird - mit einer absoluten Minimumviskosität um 40/s. Schnellere oder langsamere Scherungen werden behindert.

Der deutliche Dichteabfall kann auch Stoffwechselaktivität anzeigen - leben noch Pflanzenzellen und betreiben Stoffwechsel, oder ein Effekt der Viskoelastizität oder der Strukturierung durch die Messung? - Methodisch wäre, nebst anderen IMETER-Analysemöglichkeiten, eine Random-Rate-Messung interessant. Eine Sequenz aus Zufalls-Schergeschwindigkeiten deckt vorhandene Memoryeffekte zuverlässig auf (...).

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