

ID N° 14806 - M5 DiVA, Constant Rate Measurement

Pentane, 100/s

Pentane: Sigma-Aldrich reagent grade 98%, Lot#BCBG3631V

Sample/Ref.: **Pentan**

Results at **25,0°C**

Viscosity: $\eta (100,0s^{-1}) = 0,2158 \pm 0,0034 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\nu = 0,3472 \pm 0,0055 \text{ mm}^2/\text{s}$

Density: $\rho = 0,62147 \pm 0,000052 \text{ g/cm}^3$

Report

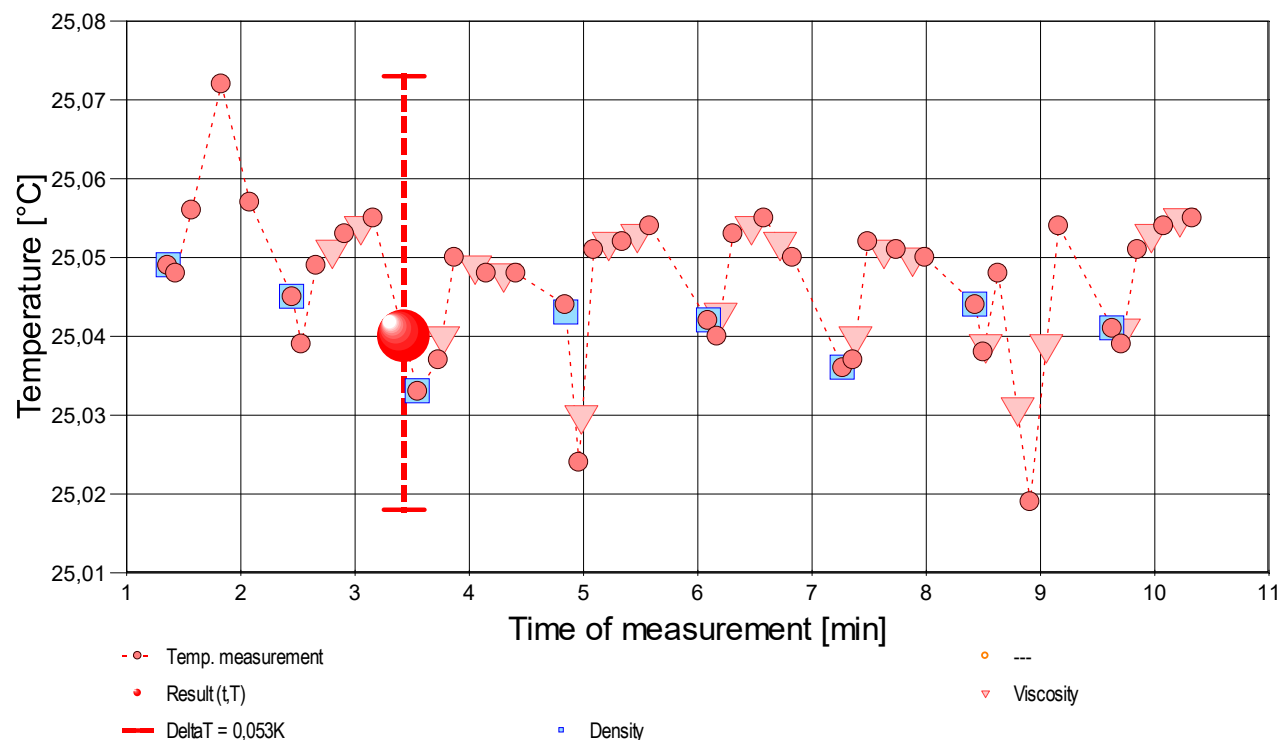
• 1. MESSPRINZIP

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). Indem die Viskositätsmessung bei gleichbleibender Deformation (der Schergeschwindigkeit 100 s^{-1} kommt etwa die Bedeutung von *leichtem Pumpen, Auftragen* gleich), wie in dieser Messung, 20-Mal wiederholt ausgeführt wird, gibt die Standardabweichung der Viskosität (und der Dichte) die Wiederholpräzision an. -- Auf den Messkörper wirken stets durch die *Dichte* des Probenfluids bedingte Auftriebskräfte. Die Dichte ρ gibt als *spezifische Masse* die Stoffmenge an, die in einem Volumen vorliegt. Sie ist ebenfalls eine besonders temperaturabhängige Stoffkonstante und wird simultan mittels Auftriebswägung am ruhenden Zylinder-Messkörper bestimmt: Diese *hydrostatische Wägung* basiert darauf, dass "ein in einer Flüssigkeit untertauchender Körper (Messkörper) um den Betrag *leichter* erscheint, wie die seinem Volumen entsprechende Flüssigkeitsmenge wiegt." Damit aus der Auftriebskraft des Messkörpers die Dichte exakt berechnet werden kann, ist das Messkörpervolumen unter den jeweils vorliegenden Bedingungen entscheidend.

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

• 2. ÜBERSICHT

Die Viskosität wurde 20-mal gemessen, die Dichte acht-mal. Messdauer zehn Minuten; Temperaturänderung im Bereich von 25,02 bis 25,07°C. - *Diagramm 1. Temperaturverlauf und Übersicht - 't/T-Protokoll'*



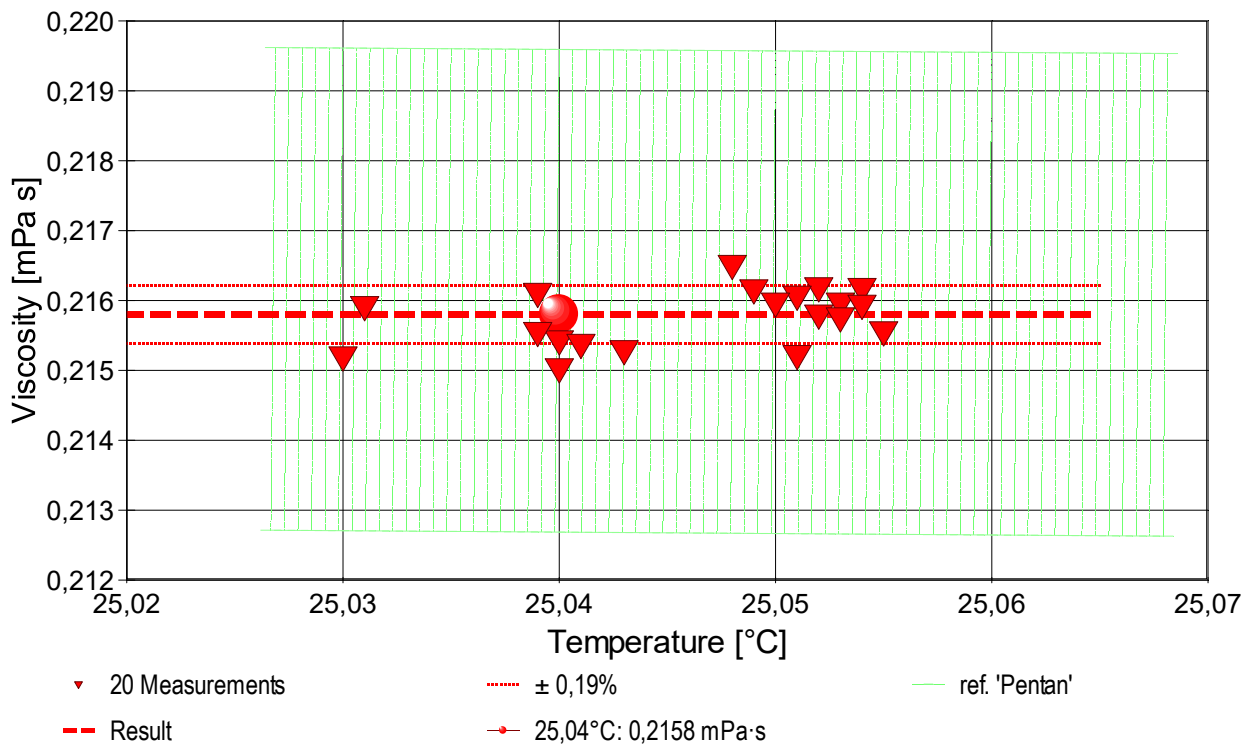
- Mit Diagramm 1. ('t/T-Protokoll') wird eine Übersicht gezeigt, die den Temperaturverlauf in der Messung und eine Zusammenfassung der Vorgänge anzeigt. -- Die Kreismarkierungen zeigen Temperaturmesswerte an; die blauen Quadrate stehen für Zeitpunkt und Temperaturzuordnung von Dichtemessungen, rote Winkel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

• 3. VISKOSITÄTS - MESSUNG

20 Messwerte; Zeitbereich 3 bis 10 min, Temperatur $\Delta T = 0,025 \text{ K}$

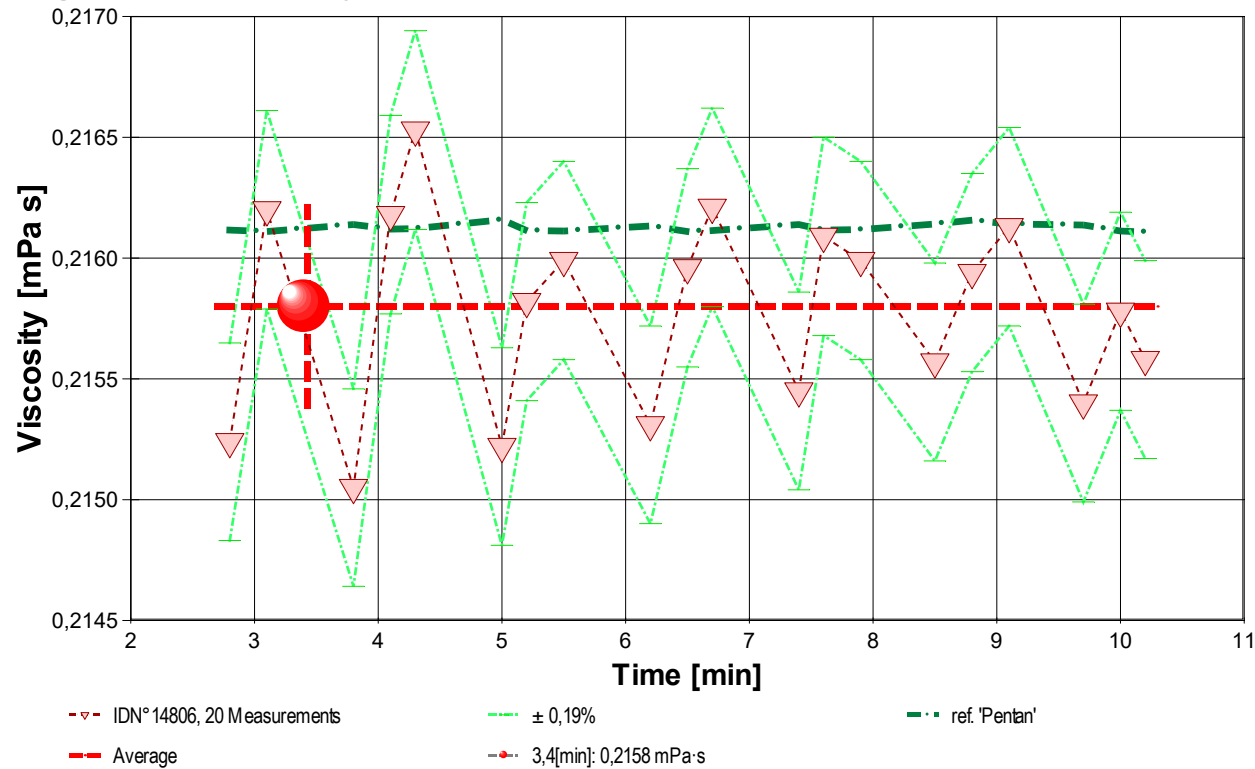
Ergebnis: $0,2158 \pm 0,016 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ als Mittelwert. Das Streuungsmaß ' $\pm 0,00041 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ' ist erheblich geringer als der ausgewiesene Fehlerbereich ($\pm 0,016 \text{ mPa}\cdot\text{s}$).

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



- Das Diagramm 2, "eta-Temp.", zeigt die 20 Viskositätsmesswerte als Dreiecke bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 25,04°C für die Pentan-Probe ist als Kugelmarke abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird zwischen den beiden feinen Linien ausgewiesen, und die hinterlegte Referenzfunktion zu 'Pentan-' ist schraffiert in der Breite der Messunsicherheit eingezeichnet.

- 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.

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°14806	[min]	[°C]	[mPa·s]	[mm/s]	[mN]	[Pa]	[mm/s]	[s ⁻¹]	[Zahl]
[1.	1,5	25,049	0,209	3,013	0,3612	0,0209	21,7	100,0	76]*
[2.	1,7	25,065	0,212	3,013	0,3659	0,0212	21,7	100,0	75]*
[3.	2,0	25,064	0,213	3,013	0,3686	0,0213	21,7	100,0	74]*
[4.	2,6	25,040	0,214	3,013	0,3692	0,0214	21,7	100,0	74]*
5.	2,8	25,051	0,215	3,013	0,3719	0,0215	21,7	100,0	74
6.	3,1	25,054	0,216	3,013	0,3736	0,0216	21,7	100,0	73
7.	3,8	25,040	0,215	3,013	0,3716	0,0215	21,7	100,0	74
8.	4,1	25,049	0,216	3,013	0,3735	0,0216	21,7	100,0	73

9.	4,3	25,048	0,217	3,013	0,3741	0,0217	21,7	100,0	73
10.	5,0	25,030	0,215	3,013	0,3719	0,0215	21,7	100,0	74
11.	5,2	25,052	0,216	3,013	0,3729	0,0216	21,7	100,0	73
12.	5,5	25,053	0,216	3,013	0,3732	0,0216	21,7	100,0	73
13.	6,2	25,043	0,215	3,013	0,3720	0,0215	21,7	100,0	73
14.	6,5	25,054	0,216	3,013	0,3731	0,0216	21,7	100,0	73
15.	6,7	25,052	0,216	3,013	0,3736	0,0216	21,7	100,0	73
16.	7,4	25,040	0,215	3,013	0,3723	0,0215	21,7	100,0	73
17.	7,6	25,051	0,216	3,013	0,3734	0,0216	21,7	100,0	73
18.	7,9	25,050	0,216	3,013	0,3732	0,0216	21,7	100,0	73
19.	8,5	25,039	0,216	3,013	0,3725	0,0216	21,7	100,0	73
20.	8,8	25,031	0,216	3,013	0,3731	0,0216	21,7	100,0	73
21.	9,1	25,039	0,216	3,013	0,3734	0,0216	21,7	100,0	73
22.	9,7	25,041	0,215	3,013	0,3722	0,0215	21,7	100,0	73
23.	10,0	25,053	0,216	3,013	0,3728	0,0216	21,7	100,0	73
24.	10,2	25,055	0,216	3,013	0,3725	0,0216	21,7	100,0	73

*[Angaben der Messung N° 1, 2, 3, 4 wurden durch den Prüfer von der mathematischen Auswertung abgekoppelt.]

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

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

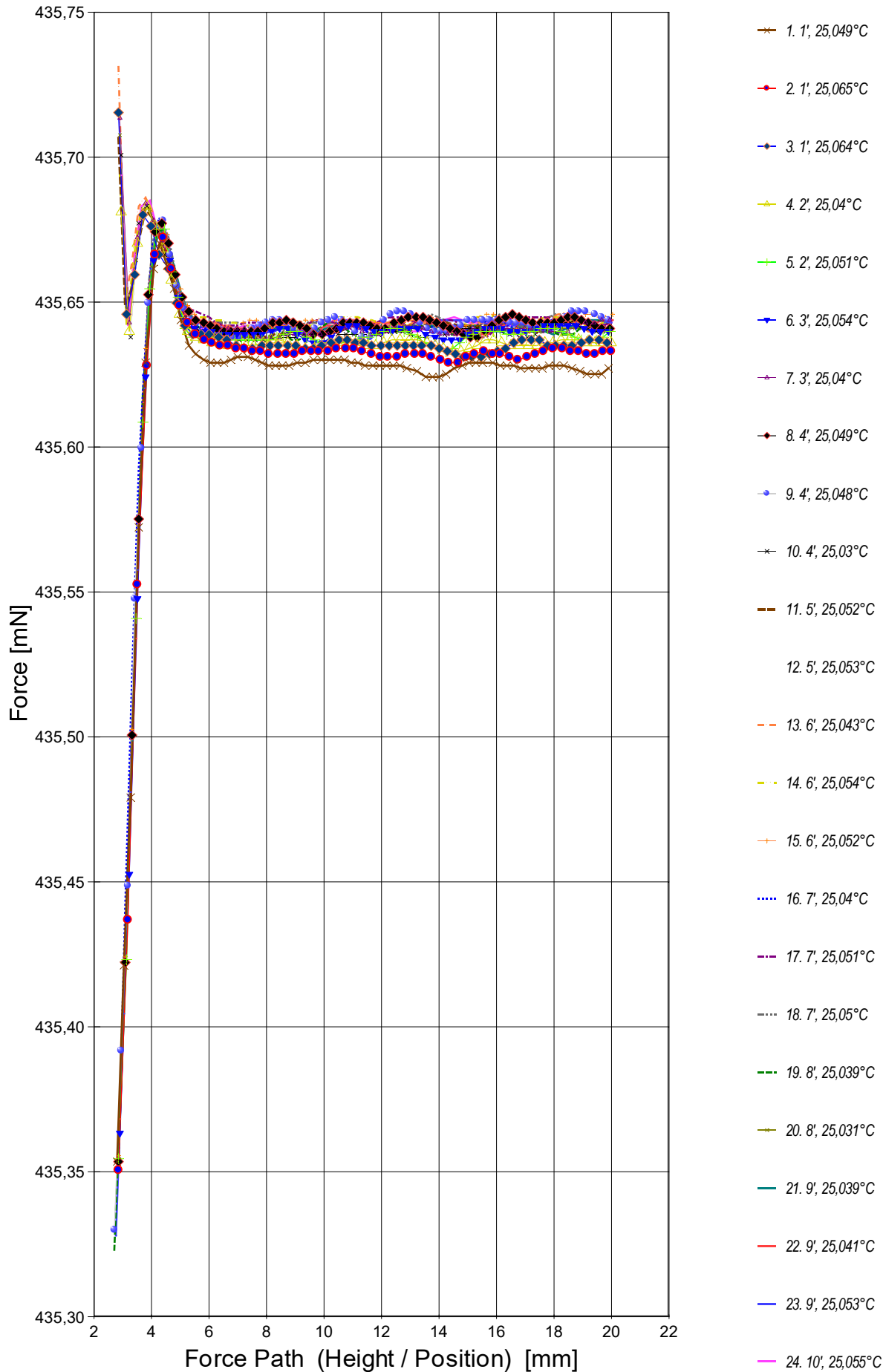
N°	F_w	σ_{Fw}	$\sigma_{Fw\ rel}$ -- Alle Werteinträge in [mN] --	F_p	F_{hp}	F_ζ	$F_{h\eta}$	N/n Datenauswahl
[1.	435,6272	0,00149	3,4 ppm	435,2528	0,00220	0,0153	1,97E-05	32/68]*
[2.	435,6318	0,00126	2,9 ppm	435,2528	0,00220	0,0153	1,99E-05	28/59]*
[3.	435,6346	0,00181	4,2 ppm	435,2528	0,00219	0,0153	2,00E-05	28/59]*
[4.	435,6357	0,00119	2,7 ppm	435,2534	0,00221	0,0153	2,02E-05	28/59]*
5.	435,6384	0,00213	4,9 ppm	435,2534	0,00221	0,0153	2,03E-05	34/71
6.	435,6401	0,00147	3,4 ppm	435,2534	0,00220	0,0153	2,03E-05	28/59
7.	435,6406	0,00129	3,0 ppm	435,2560	0,00219	0,0153	2,02E-05	28/59
8.	435,6426	0,00206	4,7 ppm	435,2560	0,00219	0,0153	2,03E-05	34/71
9.	435,6432	0,00239	5,5 ppm	435,2560	0,00219	0,0153	2,03E-05	34/72
10.	435,6400	0,00154	3,5 ppm	435,2550	0,00218	0,0153	2,01E-05	28/59
11.	435,6412	0,00142	3,3 ppm	435,2550	0,00202	0,0153	1,87E-05	23/49
12.	435,6413	0,00164	3,8 ppm	435,2550	0,00220	0,0153	2,03E-05	34/71
13.	435,6419	0,00170	3,9 ppm	435,2567	0,00219	0,0153	2,02E-05	34/72
14.	435,6430	0,00130	3,0 ppm	435,2567	0,00220	0,0153	2,03E-05	33/69
15.	435,6434	0,00202	4,6 ppm	435,2567	0,00221	0,0153	2,05E-05	34/72
16.	435,6420	0,00181	4,2 ppm	435,2567	0,00219	0,0153	2,02E-05	34/72
17.	435,6431	0,00190	4,4 ppm	435,2567	0,00220	0,0153	2,04E-05	34/72
18.	435,6430	0,00189	4,3 ppm	435,2567	0,00221	0,0153	2,04E-05	34/72
19.	435,6403	0,00125	2,9 ppm	435,2547	0,00219	0,0153	2,02E-05	34/71
20.	435,6409	9,08E-04	2,1 ppm	435,2547	0,00220	0,0153	2,04E-05	33/69
21.	435,6412	0,00123	2,8 ppm	435,2547	0,00221	0,0153	2,04E-05	33/70
22.	435,6419	0,00134	3,1 ppm	435,2566	0,00220	0,0153	2,03E-05	33/69
23.	435,6425	9,26E-04	2,1 ppm	435,2566	0,00221	0,0153	2,04E-05	33/70
24.	435,6422	0,00126	2,9 ppm	435,2566	0,00219	0,0153	2,02E-05	32/68

*[Angaben der Messung N° 1, 2, 3, 4 wurden durch den Prüfer von der mathematischen Auswertung abgekoppelt.]

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 Messwertauswahl ist in der letzten Spalte 'N/n' angegeben; durch den angewendeten Cutoff-Algorithmus werden Drückstöße und Pendelvorgänge besonders am Messkurvenanfang ausgeblendet (Das Diagramm 4, Force_Path, unterhalb, zeigt eine größere Wertemenge an, als für die Berechnung verwendet wird). Neben den statischen Korrekturen ist mit F_ζ die kinetischen Energie-Korrektur angegeben, die analog zu (Glas-) Kapillarrisosimetern mit dem Faktor ζ der 'Hagenbach-Couette'-Korrektur entspricht: $F_\zeta = 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot v_m^2 \cdot \zeta$

- Diagramm 4. Die 'Kraft-Weg-Rohdaten' - 'Force_Path'



- Diagramm 4, "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 scherverdünn, scherverfestigt (bewegzeitabhängig) im Ringspalt. Alle Kurven-Störungen betreffen die Angaben zu Noise und Messunsicherheit $\Sigma\sigma$. Das Gesamtvolumen im Ringspalt von 1,75 cm³ wird über die Bewegungstrecke von 10,9 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]	Σσ [mPa·s]	Σσ _{rel.}
[1.]	5,84E-04	2,803	17,090	0,8512	-0,00360	14,2991	43,0800	0,0029	1,4%]*

[2.	7,79E-04	2,851	17,135	0,8512	-0,00477	14,2991	43,0800	0,0028	1,3%]*
[3.	5,90E-04	2,851	16,994	0,8512	-0,00470	14,2991	43,0800	0,0031	1,5%]*
[4.	6,22E-04	2,944	17,042	0,8512	-0,00294	14,2991	43,0800	0,0028	1,3%]*
5.	0,00104	2,851	17,090	0,8512	-0,00375	14,2991	43,0800	0,0032	1,5%
6.	5,82E-04	2,899	16,994	0,8512	-0,00397	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
7.	5,38E-04	2,899	17,042	0,8512	-0,00294	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
8.	0,00118	2,851	17,090	0,8512	-0,00360	14,2991	43,0800	0,0032	1,5%
9.	0,00126	2,709	17,184	0,8512	-0,00353	14,2991	43,0800	0,0033	1,5%
10.	7,06E-04	2,944	16,855	0,8512	-0,00220	14,2991	43,0800	0,003	1,4%
11.	5,84E-04	2,854	16,780	0,8512	-0,00382	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
12.	9,22E-04	2,896	17,045	0,8512	-0,00389	14,2991	43,0800	0,003	1,4%
13.	0,00103	2,851	17,042	0,8512	-0,00316	14,2991	43,0800	0,003	1,4%
14.	7,52E-04	2,899	17,042	0,8512	-0,00397	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
15.	0,00106	2,851	17,184	0,8512	-0,00382	14,2991	43,0800	0,0032	1,5%
16.	0,00122	2,848	16,997	0,8512	-0,00294	14,2991	43,0800	0,0031	1,4%
17.	8,59E-04	2,896	17,045	0,8512	-0,00375	14,2991	43,0800	0,0031	1,4%
18.	0,00134	2,896	17,090	0,8512	-0,00367	14,2991	43,0800	0,0031	1,4%
19.	6,61E-04	2,706	17,138	0,8512	-0,00286	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
20.	3,73E-04	2,899	17,090	0,8512	-0,00228	14,2991	43,0800	0,0027	1,3%
21.	7,36E-04	2,851	17,000	0,8512	-0,00286	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
22.	7,63E-04	2,899	17,135	0,8512	-0,00301	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%
23.	4,03E-04	2,761	17,226	0,8512	-0,00389	14,2991	43,0800	0,0027	1,3%
24.	7,46E-04	2,944	17,045	0,8512	-0,00404	14,2991	43,0800	0,0029	1,3%

*[Angaben der Messung N° 1, 2, 3, 4 wurden durch den Prüfer von der mathematischen Betrachtung abgekoppelt.]

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

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

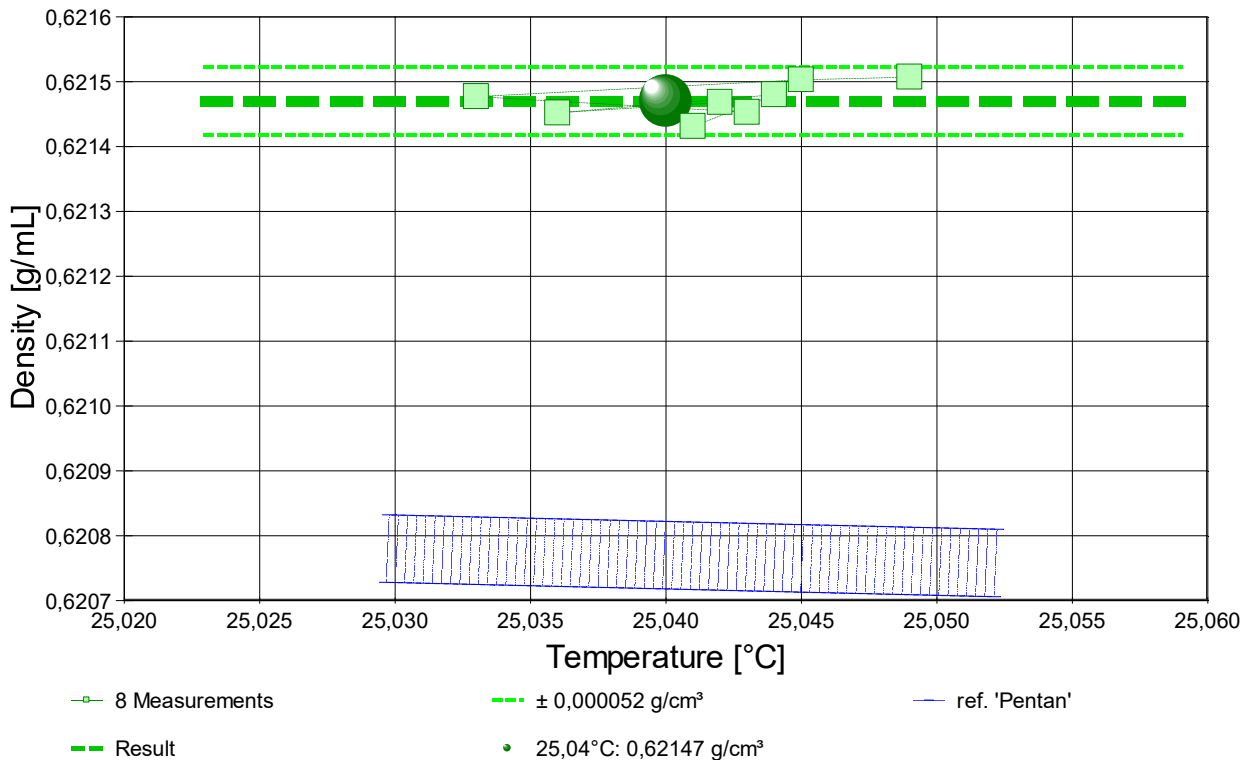
• 4. DICHT E - MESSUNG

Acht Messwerte; Zeitbereich 1 bis 10 min, Temperatur $\Delta T = 0,016 \text{ K}$

Ergebnis: $0,62147 \pm 0,000052 \text{ g/cm}^3$ als Mittelwert

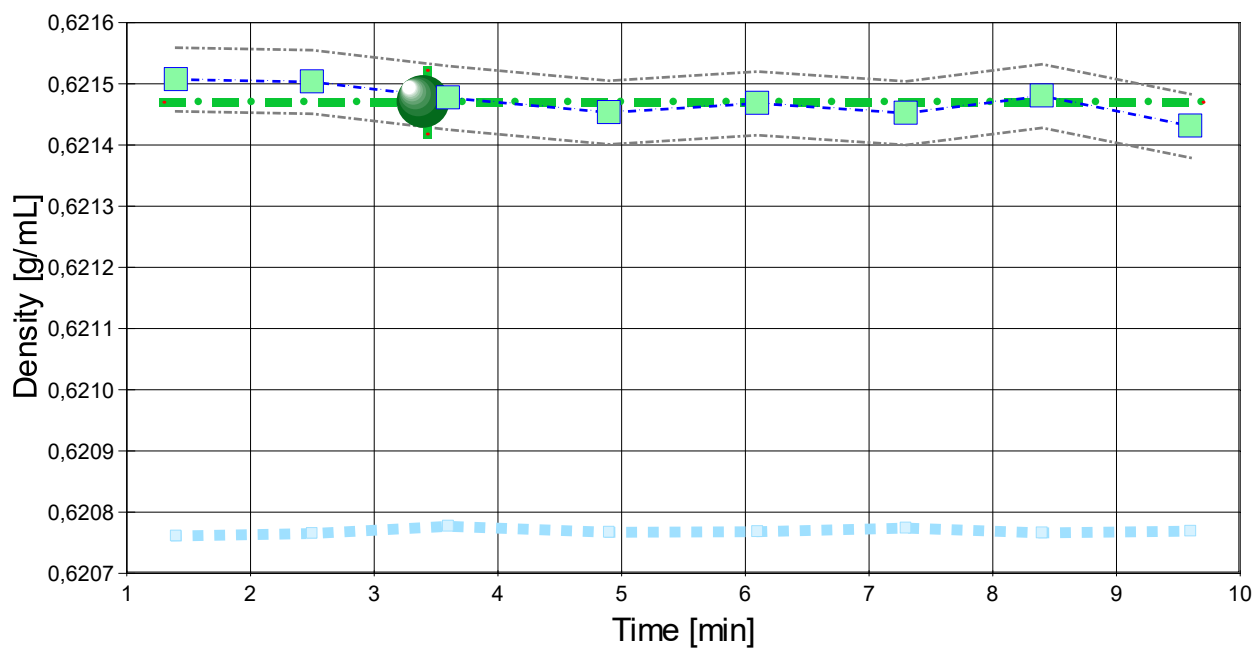
Die Standardabweichung ' $\pm 0,000026 \text{ g/cm}^3$ ' ist geringer als der angegebene Fehlerbereich ($\pm 0,000052 \text{ g/cm}^3$).

- Diagramm 5. Temperaturabhängigkeit der Dichte - 'rho-Temp.'



- Das Diagramm 5, "rho-Temp.", zeigt die acht Dichtemesswerte als Quadratsymbol bei der jeweils beigemessenen Temperatur. Der Angabewert bei 25,04°C für die Pentan-Probe ist als Kugel abgebildet; der Bereich der Messunsicherheit wird durch gestrichelte Linien ausgewiesen. In Markierungsbreite der Messunsicherheit ist die Referenzfunktion von 'Pentan-' aus der Datenbank abgebildet.

- Diagramm 6. Zeitverlauf der Dichtemesswerte - 'rho-Zeit'



- IDN° 14806, 8 Measurements --- ± 0,000052 g/cm³ - - - ref. 'Pentan'
 - Average • 3,4[min]: 0,62147 g/cm³

- Im Diagramm 6, "rho-Zeit", sind die einzelnen Messwerte als Quadrate in zeitlicher Sequenz abgebildet. Um die Ausgleichsfunktion bzw. die Messwerte ist der Bereich der Unsicherheit eingezeichnet.

Tabelle 4: Daten der Dichtemessung

N° IDN°14806	t [min]	ϑ [°C]	ρ [g/cm ³]	H [mm]	ω [s]	Δρ _ω [g/cm ³]	N Werte & Trend	F _A [mN]	F _{korr.} [mN], TSymb.
1.	1,4	25,049	0,62151	2,248	4,1	6,3E-06	4 ₂₉ ↗	435,2528	0,0009 ‡
2.	2,5	25,045	0,62150	2,248	5,2	-3,6E-06	5 ₂₉ ↗	435,2534	0,0012 ‡
3.	3,6	25,033	0,62148	2,248	10,7	-1,3E-05	11 ₃₁ ↗	435,2560	0,0022 ‡
4.	4,9	25,043	0,62145	2,248	6,9	-3,1E-06	7 ₃₀ ⇔	435,2550	-0,0002 ‡
5.	6,1	25,042	0,62147	2,248	5,0	-5,9E-06	5 ₂₉ ↗	435,2567	0,0025 ‡
6.	7,3	25,036	0,62145	2,248	5,2	-4,2E-06	5 ₃₁ →	435,2567	0,0014 ‡
7.	8,4	25,044	0,62148	2,248	4,1	3,5E-06	4 ₃₁ ↗	435,2547	0,0011 ‡
8.	9,6	25,041	0,62143	2,248	4,9	3,4E-06	5 ₃₀ →	435,2566	0,0001 ‡

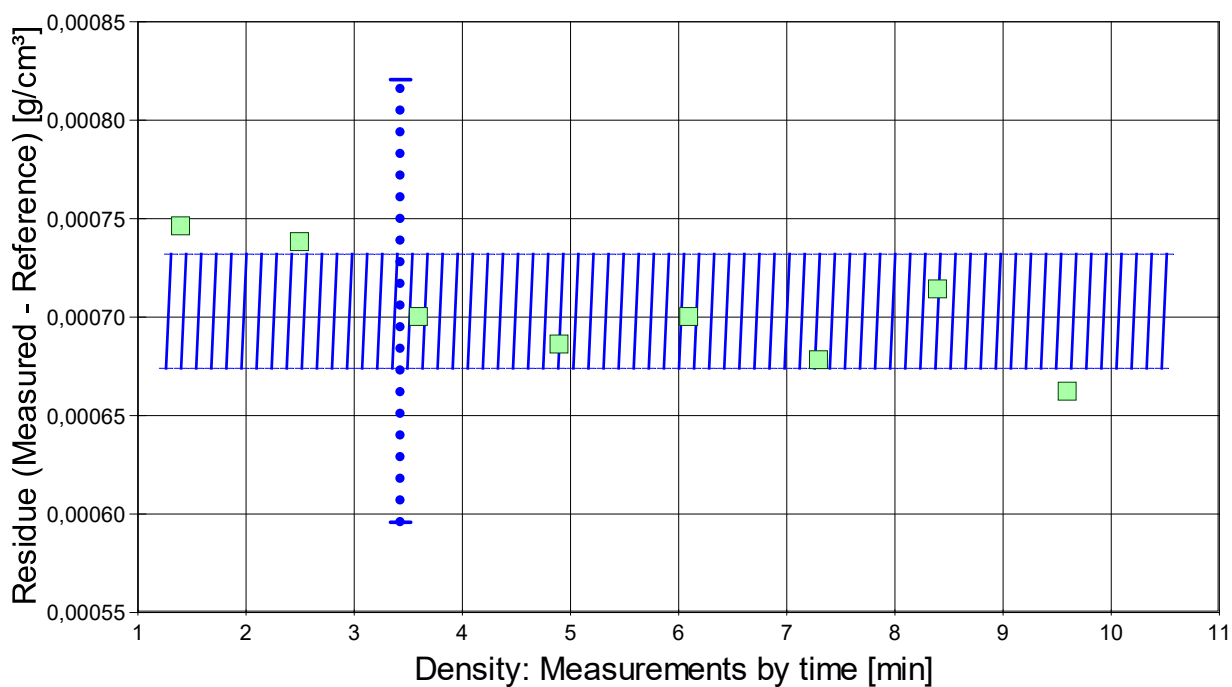
Tabellensymbole: t Zeitpunkt [min], ϑ Temperatur [°C], ρ Dichte [g/cm³], H Positionshöhe der Messkörperunterkante über der Nullhöhe beim Dichtemesswert [mm], ω Beobachtungsdauer der aufgezeichneten Auftriebsmessung [s], Δρ_ω Dichteänderung in der Beobachtungszeit [g/cm³], N Anzahl Auftriebsmesswerte ggf. mit Wägewertzahl 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 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_{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. REFERENZ VERGLEICH

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

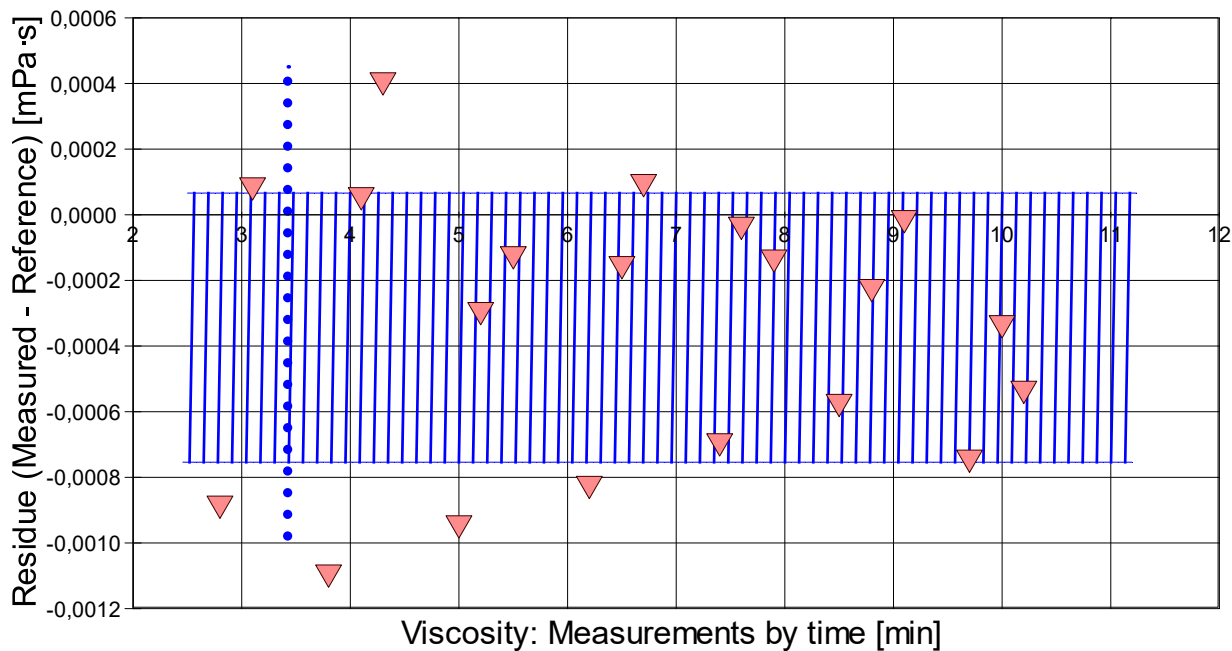
- **VORSICHT** Die Bedeutung des automatischen Vergleichs mit jeweiligen Referenzwerten ist völlig von der Richtigkeit und Präzision der hinterlegten Stoffdaten abhängig. - Diagramm 6. Referenzabweichung der Dichtemesswerte - 'rho-Residuen'



Reference values for 'Pentan' acc. to $f(T[^\circ\text{C}]) = -8.63096\text{E-}07 \cdot T^2 - 9.44605\text{E-}04 \cdot T + 6.44964\text{E-}01$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $7,03\text{E-}04 \pm 2,9\text{E-}05 \text{ g/cm}^3$, relative: +0,11% at a spread of 47 ppm

- Das Chart N°7, "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 7. Referenzabweichung der Viskositätsmesswerte - 'eta-Residuen'



Reference values for 'Pentan' acc. to $f(T[^\circ\text{C}]) = 0.275 \cdot \exp((-0.00971 \cdot T + 3.65\text{E-}06 \cdot T^2))$
 Mean and Standarddev. of Residuals: $-3,44\text{E-}04 \pm 4,1\text{E-}04 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, relative: -0,16% at a spread of 0,19%

- Das Chart N°8, "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 Pentan bei 25,04°C

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
ρ	0,6208	0,62147	$6,7\text{E-}04 \text{ g/cm}^3$	0,1%	13

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
η	0,2161	0,2158	$-3,0\text{E-}04 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	0,1%	@

- Der Ergebnisvergleich mit den Angaben, die in der Referenzdatenbank zu 'PENTAN' 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; " 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.

• 6. ANGABEN ZUR KONFIGURATION

- a). **Messkörper:** Name *MK_ESA1a*, b). IdentN° 7022, c). Spaltweite 0,851 mm.
d). **Mess- und Auswertungsverfahren:** Standard. e). Konfigurationstyp DiVA-A (I++).
f). **Messkörperdaten:** Messzylindermasse $48,1349 \pm 0,0003$ g, ~volumen $6,054 \pm 0,0005$ cm³, ~durchmesser $14,2991 \pm 0,001$ mm, ~länge $43,08 \pm 0,001$ mm, ~kub. Ausdehnungskoeffizient $53,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. g). **Messzylindersuspension:** Querschnitt $0,0201$ mm², Umfang $0,502$ mm, h). Aufhängungsart: IMETER-Patentverfahren (*drift- und fehlerfreie Dichtemessung*).
i). **Behälter/Röhre:** Durchmesser $16,0015 \pm 0,0005$ mm, ~kub. Ausdehnungskoeffizient $20 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.
j). **Bezugstemperatur:** für Abmessungen und Ausdehnungskoeffizienten 25°C .
k). **Kinetische Energie:** Faktor Zeta: $\zeta = 1,37$.
Individuelle Werte: l). Höhe der Flüssigkeitssäule über der Nulllage: $72,8$ mm, max. Bewegungstrecke in der Phase: $29,7$ mm.

m). **Messunsicherheiten des Ergebnisses:** Die Unsicherheit der Viskositätsangabe wurde aus dem Mittelwert der relativen Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu $1,6\%$ bestimmt; die n). Messunsicherheit der Dichte $\pm 0,000052$ g/cm³ stammt von oben genannten Unsicherheitsangaben zu Messkörpervolumen und -masse sowie von den gegebenen Spezifikationen zur Kraft- und Temperaturmessung.

- **Die Messunsicherheit** des einzelnen Viskositätsmesswertes wird aus den folgenden Unsicherheitsquellen bestimmt: 1.: der geometrischen Toleranzangaben zu Messkörperdurchmesser, 2.: zur Länge und 3.: zum Radius des Gefäßes. Individuell aus 4.: der Standardabweichung der Messkraft ($\sigma_{F1/2}$), 5.: der Exzentrizität pauschal zu $0,5\%$ (v.M.), 6.: der Unsicherheit der Kalibrierung zu $0,5\%$ (v.M.), 7.: der Geschwindigkeitsangabe zu $0,1\%$, 8.: pro Grad Temperaturmessunsicherheit werden 5% (v.M.) angesetzt. - Die Gesamtunsicherheiten einer Messung wird aus der Wurzel der Quadratesumme der Einzelunsicherheiten berechnet; diese sind summarisch zu jeder Einzelmessung angegeben in der Spalte σ_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.

(the digital twin of process IDN°14806 provides on demand reports with more details, audit-log protocol and structured raw data)

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZA224) wurde 1,7 Stunden vor dieser Messung von *Labor* justiert.

IMETER ID23903733: Technische Daten: Auflösung des Wägesystems $0,1$ mg, Messunsicherheit (Linearität) $0,2$ mg, Dichte der Justiermasse ρ_{cal} $8,000$ g/cm³, Luftdichte ρ_{air} vgl. Tabelle unten; Schwerebeschleunigung g $9,80769$ m/s². Pt100-Temperaturmessung: Auflösung $0,001$ [K], Messunsicherheit $\pm 0,01$ [K], R° $100,0018$ [Ohm], AutoCal 60 [min] (BN° 3, $-10/100^\circ\text{C}$, 4S, FS15, Offset: $-0,0361$). Die Messauflösung der sekundären Temperaturmessung beträgt $0,01$ K, die Unsicherheit $0,03$ K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 7.0.53, LizenzN° *3037-4759*, W. 6.2- Betriebssystem auf PC Ser.N°6995684 (C, SSD).

Meteorologische Angaben, Luftdichte:

Time [min]	ϕ [%]	T_a [°C]	p_a [kPa]	ρ_{air} [kg/m ³]
1,0	50,37	21,98	97,530	1,14566

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

Kommentar/Bewertung/Interpretation:

Dichteabweichung zu Referenzwert Pentan - durch die 98%ige Reinheit der Probe erklärbar. Die Viskosität von Pentan wird allenfalls noch von Isopentan (2-Methylbutan, Kp. $27,8^\circ\text{C}$) mit $0,23$ mPa s bei 20°C erreicht oder leicht unterboten. Allein Butan wäre noch fluider und mit IMETER ohne Weiteres messbar (Kp. $-0,5^\circ\text{C}$). Für noch präziserer Messungen sollte eine längere Ruhezeit für das Abklingen von Wirbeln vorhergesehen werden. Obwohl die Reynoldszahl in der Messung die moderaten ~ 75 Re nicht überschreitet zeigen die Kraftkurven eine evtl. vermeidbare Unruhe an.

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