

ID N° 25121 - DRT - Surface Tension / Interpol.

Executed on Sep 10, 2026, by M. Breitwieser

65µL Wasser

Flüssigkeit/Vergleich:'Wasser'

Result: $\gamma_{27,13^{\circ}\text{C}} = 70,32 \pm 0,33 \text{ mN/m}$

Report

1. Eigenschaft und Methode

Die *Oberflächenspannung* γ ist die kohäsiv wirkende *Flächenenergie*, die eine flüssige Phase zusammenhält und Ausdruck der darin zu Tage tretenden intermolekularen Kräfte ist. Die Einheit 'mN/m' (Kraft pro Länge bzw. 'mJ/m²', Arbeit pro Fläche) bedeutet eine reversible Energiemenge, die aufzuwenden ist, um 1 m² neue Oberfläche zu schaffen bzw. die freigesetzt wird, wenn Oberfläche (z.B. durch Vereinigung von Tröpfchen) verschwindet. Das Augenscheinliche der Eigenschaft *Oberflächenspannung* besteht in der mehr oder weniger leichten Verformbarkeit der flüssigen Oberfläche. Die hier zur Messung angewandte *Ringmethode* beruht auf Kraftmessung bei *Deformation der Oberfläche*: Ein waagerechter Draht ring wird in die Flüssigkeit getaucht und herausgehoben. Beim Herausziehen wächst die Zugkraft durch die Oberflächenwölbung und die Hebung der Flüssigkeitsmenge und nimmt einen parabelförmigen Verlauf an. Entscheidend ist die im Parabelscheitel vorliegende Maximalkraft (FMax). Sie entspricht im Verhältnis zum Ringumfang der *Oberflächenspannung*. Das angewendete DRT-System ermöglicht unter Berücksichtigung des Anfangskontaktwinkels (θ) an der Dreiphasengrenze die metrologisch fundierte Messung der wirklichen *Oberflächenspannung*.
Angewandtes Verfahren und Ergebnisberechnung: ausdauernde Messungen über eine Zeitspanne hinweg; Ergebnisangabe aus dem Zeitverlauf auf einen vom Prüfer festgelegten Zeitpunkt linear interpoliert.

2. Übersicht, Temperatur

Die *Oberflächenspannung* wurde 48-mal gemessen, Nettodauer des Messablaufs eine Stunde; unruhige Temperaturzunahme von 27,14 auf 27,84°C.

- Temperaturfunktion $T[^{\circ}\text{C}] \rightarrow f(t) = 27,117 + 0,009723 \cdot t[\text{min}]$ mit $r^2=0,984$ und $s^2=0,00081$

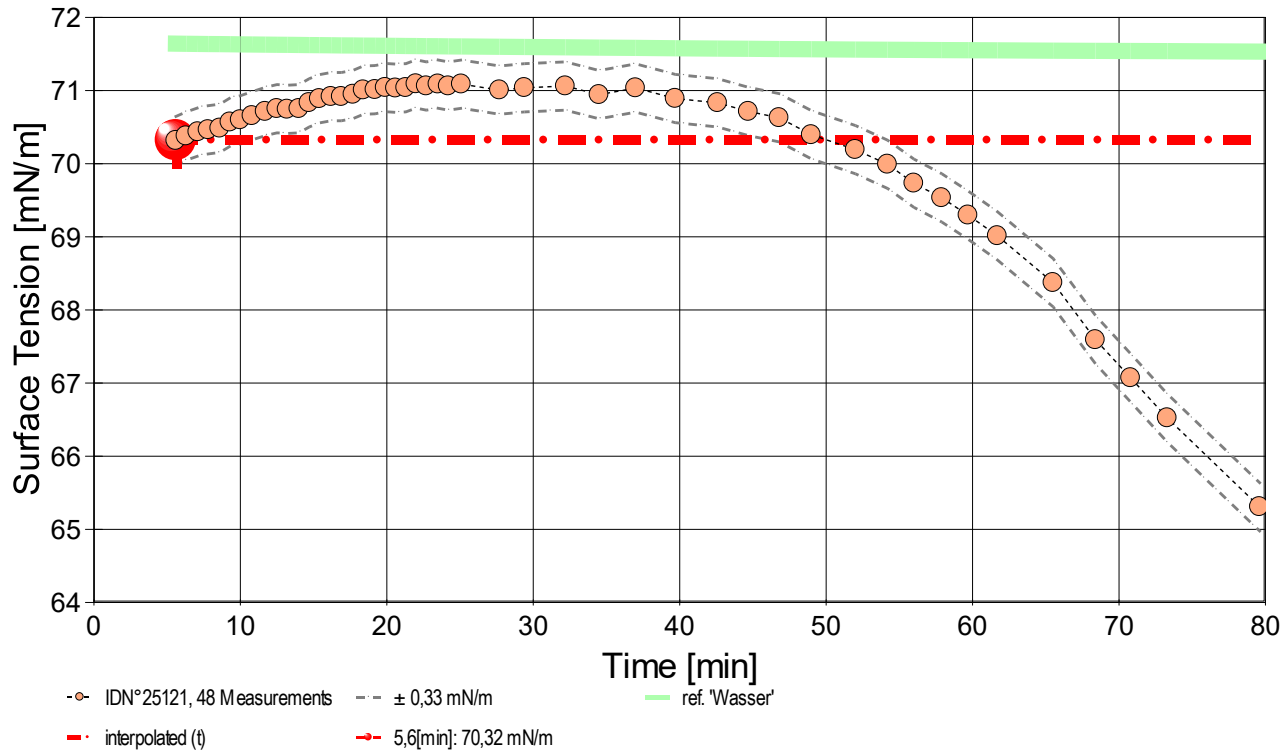
3. Ergebniszusammenfassung

48 Messwerte; Zeitbereich 6 bis 80 min, Temperatur $\Delta T = +0,700 \text{ K}$

Ergebnis: $70,32 \pm 0,33$ (Interpolation by time on measurements at 5,6 min)

[Average: 70,27 mN/m, Standard deviation: $\pm 1,3 \text{ mN/m}$]

- Diagramm 1. Zeitprojektion der Messwerte - 'Zeitprojektion²'



- Im Diagramm "Zeitprojektion²" sind die einzelnen Messwerte als Kreissymbole in der zeitlichen Reihenfolge eingetragen. Um die Messwerte ist der Bereich der Messunsicherheit eingezeichnet. Der ausgewiesene Angabewert ist als dickere, gestrichelte, waagerechte Linie eingezeichnet. Als gestrichelte Linie werden Datenbank-Referenzwerte von 'Wasser' temperaturkompensiert eingezeichnet.

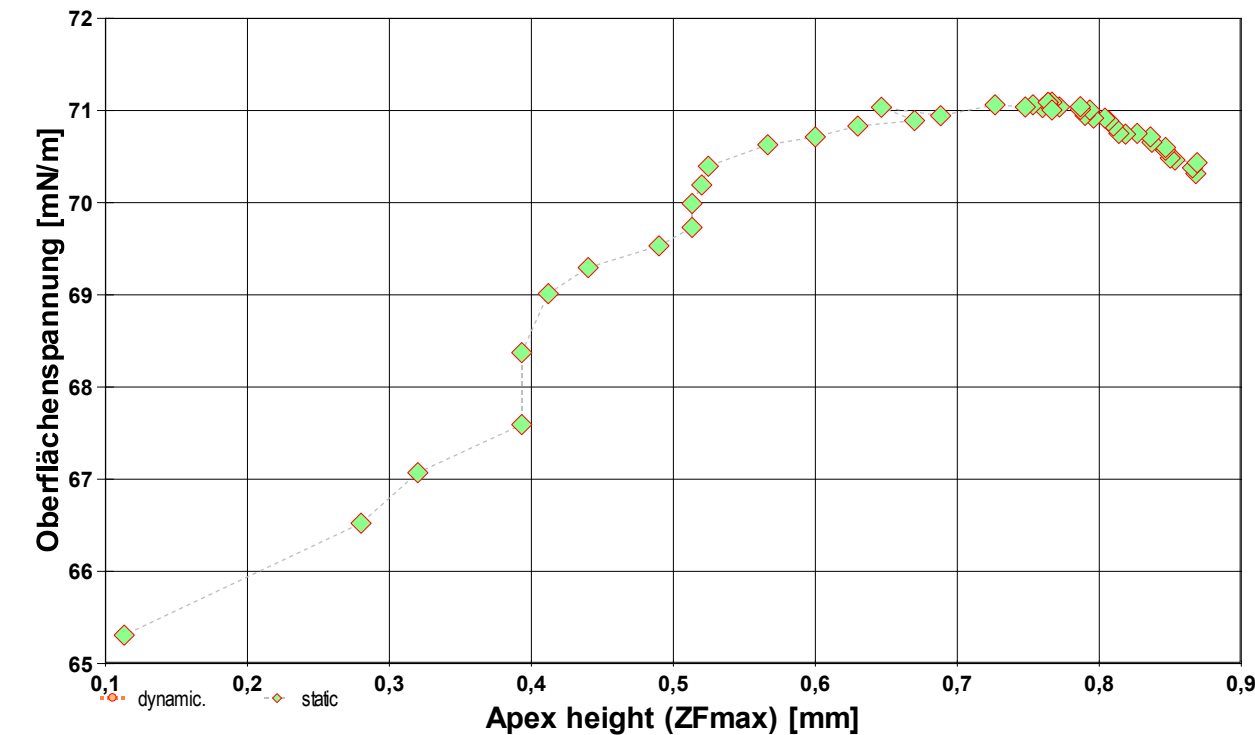
Tabelle 1: Protokoll der Mess- und Ergebnisdaten

N°	t [min]	θ [°C]	nPos -	ΔZ [mm]	h_{γ} [mm]	W_{γ} [mg]	γ [mN/m]	$\tau_{rel.}$ [s]	$\Delta \rho$ [g/cm ³]
1.	5,6	27,135	9	0,32	0,868	246,33	70,32	18,9	0,9954
2.	6,3	27,145	10	0,36	0,866	246,54	70,38	21,2	0,9954
3.	7,1	27,157	10	0,36	0,869	246,73	70,43	23,5	0,9954
4.	7,8	27,168	10	0,36	0,853	246,84	70,46	20,1	0,9954

5.	8,6	27,178	10	0,36	0,850	246,91	70,48	18,3	0,9954
6.	9,3	27,189	10	0,36	0,847	247,20	70,57	19,4	0,9954
7.	10,0	27,199	10	0,36	0,847	247,31	70,60	17,4	0,9954
8.	10,8	27,209	10	0,36	0,837	247,50	70,65	17,7	0,9953
9.	11,7	27,221	10	0,36	0,836	247,70	70,71	20,0	0,9953
10.	12,5	27,231	10	0,36	0,827	247,84	70,75	18,7	0,9953
11.	13,2	27,240	10	0,36	0,819	247,81	70,74	17,3	0,9953
12.	14,0	27,251	10	0,36	0,814	247,84	70,75	20,2	0,9953
13.	14,7	27,260	10	0,36	0,810	248,11	70,83	13,4	0,9953
14.	15,4	27,269	10	0,36	0,807	248,31	70,89	16,2	0,9953
15.	16,2	27,279	10	0,36	0,804	248,41	70,92	15,4	0,9953
16.	16,9	27,288	10	0,36	0,796	248,41	70,92	14,7	0,9953
17.	17,7	27,297	10	0,36	0,790	248,51	70,95	15,1	0,9953
18.	18,4	27,306	10	0,36	0,793	248,71	71,01	13,4	0,9953
19.	19,2	27,315	10	0,36	0,787	248,73	71,01	16,6	0,9953
20.	19,9	27,324	10	0,36	0,787	248,84	71,04	13,9	0,9953
21.	20,6	27,332	10	0,36	0,760	248,80	71,03	14,4	0,9953
22.	21,3	27,340	10	0,36	0,772	248,83	71,04	11,6	0,9953
23.	22,0	27,349	10	0,36	0,767	249,01	71,09	12,3	0,9953
24.	22,7	27,357	10	0,36	0,764	248,91	71,06	11,2	0,9953
25.	23,5	27,365	10	0,36	0,764	249,00	71,09	12,8	0,9953
26.	24,2	27,374	10	0,36	0,753	248,91	71,06	13,2	0,9953
27.	25,1	27,383	10	0,36	0,764	249,00	71,09	15,2	0,9953
28.	27,7	27,412	10	0,36	0,767	248,71	71,01	14,2	0,9953
29.	29,4	27,428	25	0,96	0,748	248,83	71,04	73,0	0,9953
30.	32,2	27,458	25	0,96	0,727	248,91	71,06	81,7	0,9953
31.	34,5	27,485	30	1,16	0,688	248,50	70,94	83,3	0,9953
32.	37,0	27,509	30	1,16	0,647	248,81	71,04	83,6	0,9953
33.	39,7	27,540	35	1,36	0,670	248,32	70,89	104,0	0,9953
34.	42,6	27,568	30	1,16	0,630	248,11	70,83	93,1	0,9952
35.	44,7	27,586	35	1,36	0,600	247,70	70,71	102,6	0,9952
36.	46,8	27,609	35	1,36	0,567	247,41	70,63	96,0	0,9952
37.	49,0	27,628	35	1,36	0,525	246,60	70,40	93,9	0,9952
38.	52,0	27,656	35	1,36	0,520	245,90	70,19	91,7	0,9952
39.	54,2	27,672	30	1,16	0,513	245,21	69,99	92,5	0,9952
40.	56,0	27,687	30	1,16	0,513	244,31	69,73	89,1	0,9952
41.	57,9	27,700	30	1,16	0,490	243,61	69,53	89,4	0,9952
42.	59,7	27,712	30	1,16	0,440	242,80	69,30	86,6	0,9952
43.	61,7	27,724	30	1,16	0,412	241,82	69,01	94,4	0,9952
44.	65,5	27,752	50	1,96	0,393	239,61	68,37	88,7	0,9952
45.	68,4	27,768	40	1,56	0,393	236,91	67,59	89,2	0,9952
46.	70,8	27,782	40	1,56	0,320	235,10	67,07	86,8	0,9952
47.	73,3	27,795	40	1,56	0,280	233,20	66,52	87,6	0,9952
48.	79,6	27,835	35	1,36	0,113	229,00	65,31	63,2	0,9952

In der Tabelle gibt **t** den Zeitpunkt des Messwertes und **θ** die zugehörige Temperatur an. **n_{pos}** steht für die Anzahl der Kraft/Positionsweite der Messkurvenabtastung über die Strecke **ΔZ**. Die Spalte **h_γ** gibt die Lamellenhöhe am Scheitel der Messkurve über dem Flüssigkeits-Nullniveau an (ZFmax). An dieser Stelle beträgt das Gewicht der Lamelle **W_γ**. Diese Gewichtskraft ist unter den Messumständen proportional zur daraus berechneten Oberflächenspannung **γ**. Die Zeitspanne **τ_{rel.}** gibt die Dauer beim Auszug der Lamelle bis zum Erreichen des Scheitelpunktes an. In der Spalte **Δρ** ist die Dichtedifferenz (d.h. der Dichte von Wasser abzüglich der Luftdichte) bei der Temperatur angegeben.

– Diagramm 2. Lamellenhöhe in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung - 'Lamellenhöhen'²¹



- Das Chart "Lamellenhöhen²¹" stellt die Oberflächenspannung in einen Zusammenhang mit der 'Lamellenhöhe' im Punkt der maximalen Kraft bzw. Spannung. Die Abhängigkeit ist in der Regel proportional; die Lamellenhöhe wird grundsätzlich durch die Oberflächenspannung selbst, den Gefäßdurchmesser und dem Kontaktwinkel θ der Dreiphasenkontaktlinie an der Gefäßwand bestimmt.

• 4. Auswertungsverfahren & Messkörper

Berechnung: Young-Laplace-Petzoldt (YLP).
Messsystem: DRT-ES5, mittlerer Ringradius $R=2,5$ mm, Drahradius $r=0,1$ mm, linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha=8,9\cdot10^{-6}K^{-1}$. Ring ohne geometrische Korrektur (d.h. $f_G\equiv 1$); Innendurchmesser des Messgefäßes $\varnothing=7,250$ mm, Gefäßvolumen $0,0645\text{ cm}^3$; Anfangs-Kontaktwinkel an der Dreiphasengrenze $\theta=90^\circ$.
Probensubstanz: Wasser, kapillare Länge $a=2,68$ mm, Dichte $\rho=0,9965\text{ g/cm}^3$ (bei $27,1^\circ\text{C}$); die Dichtedifferenz $\Delta\rho$ wird zur jeweiligen Temperatur aus den Referenzangaben berechnet.

- Die geometrischen Angaben zum Messring beziehen sich auf die Bezugstemperatur 25°C . Von der Flüssigkeitsdichte wird stets die zur Messung vorliegende Luftdichte ρ_a abgezogen. Die Berechnung der Dichte ρ zur jeweils vorliegenden Temperatur erfolgt mittels vorhandener Referenzdaten zu Wasser automatisch. Hierzu wird die Gleichung ' $\Delta\rho\text{ [g/cm}^3\text{]}=f(\theta[^\circ\text{C}])=(99983.952+1695.2577\cdot\theta-0.79905127\cdot\theta^2-4.6241757\text{E-}3\cdot\theta^3+1.0584601\text{E-}5\cdot\theta^4-2.8103006\text{E-}8\cdot\theta^5)/(1\text{e}5+1688.7236\cdot\theta)-\rho_a$ ' verwendet.

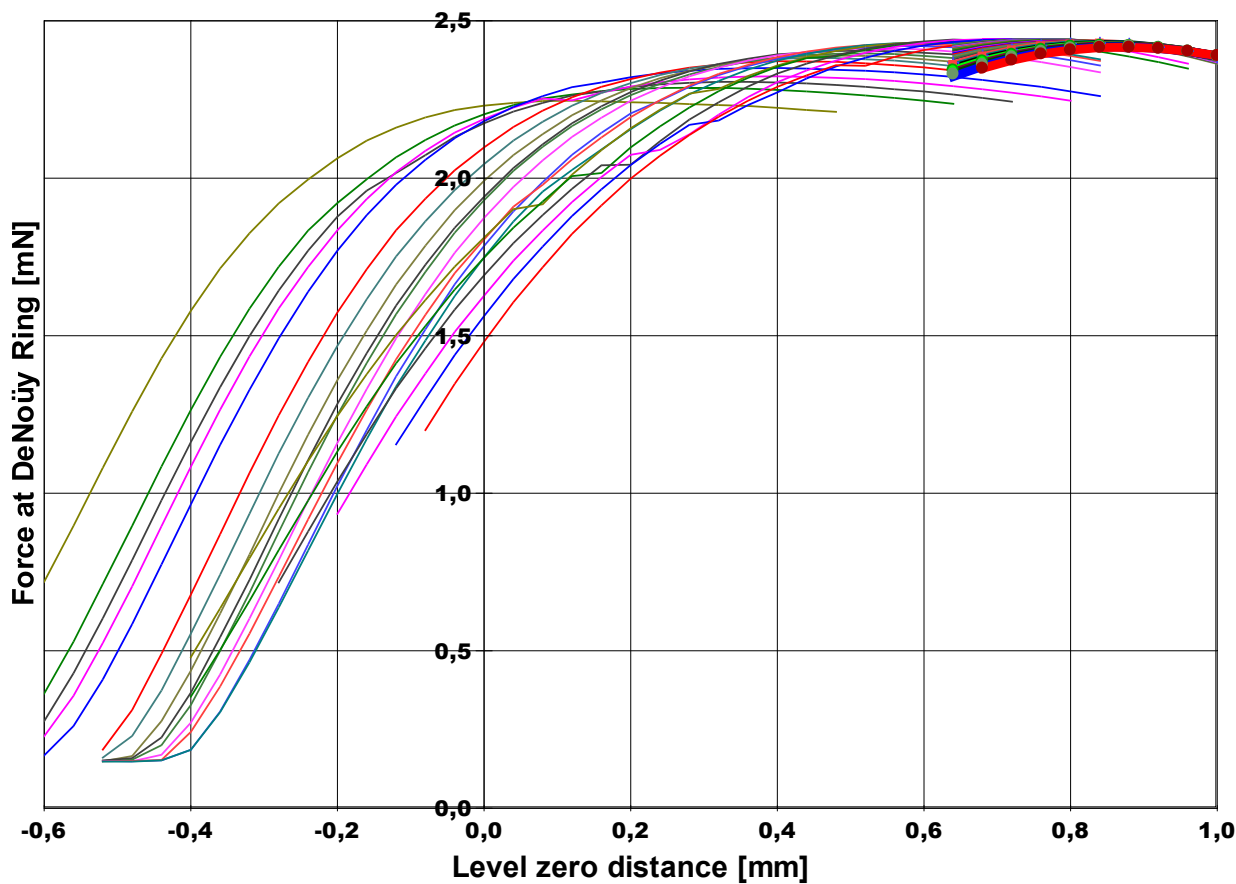
Tabelle 2: Zu Berechnung und Klassifikation der einzelnen Messwerte

N°	$F_{\text{max.}}$ [mN]	$F_{\text{bz.}}$ [mN]	f_k -	v_z [mm·s ⁻¹]	X [mm]	t_x [s]	ΩK -
1.	2,4159	0,0000	0,9144 p ¹	0,0106	-	-	³ pS
2.	2,4180	0,0000	0,9144 p ¹	0,0113	-	-	³ pS
3.	2,4199	0,0000	0,9144 p ¹	0,0102	-	-	³ pS
4.	2,4209	0,0000	0,9144 p ¹	0,00993	-	-	³ pS
5.	2,4216	0,0000	0,9144 p ¹	0,0109	-	-	³ pS
6.	2,4245	0,0000	0,9144 p ¹	0,0103	-	-	³ pS
7.	2,4255	0,0000	0,9144 p ¹	0,0115	-	-	³ pS
8.	2,4274	0,0000	0,9144 p ¹	0,0113	-	-	³ pS
9.	2,4294	0,0000	0,9145 p ¹	0,00998	-	-	³ pS
10.	2,4307	0,0000	0,9145 p ¹	0,0107	-	-	³ pS
11.	2,4304	0,0000	0,9145 p ¹	0,0115	-	-	³ pS
12.	2,4307	0,0000	0,9145 p ¹	0,00991	-	-	³ pS
13.	2,4334	0,0000	0,9145 p ¹	0,0120	-	-	³ pS
14.	2,4353	0,0000	0,9145 p ¹	0,00990	-	-	³ pS
15.	2,4363	0,0000	0,9145 p ¹	0,0104	-	-	³ pS
16.	2,4363	0,0000	0,9145 p ¹	0,0109	-	-	³ pS
17.	2,4373	0,0000	0,9145 p ¹	0,0106	-	-	³ pS
18.	2,4393	0,0000	0,9145 p ¹	0,0120	-	-	³ pS
19.	2,4395	0,0000	0,9145 p ¹	0,00963	-	-	³ pS
20.	2,4405	0,0000	0,9145 p ¹	0,0115	-	-	³ pS
21.	2,4402	0,0000	0,9145 p ¹	0,0111	-	-	³ pS×
22.	2,4404	0,0000	0,9145 p ¹	0,0103	-	-	³ pS
23.	2,4422	0,0000	0,9145 p ¹	0,00976	-	-	³ pS
24.	2,4412	0,0000	0,9145 p ¹	0,0107	-	-	³ pS
25.	2,4421	0,0000	0,9145 p ¹	0,00937	-	-	³ pS
26.	2,4412	0,0000	0,9145 p ¹	0,00911	-	-	³ pS
27.	2,4421	0,0000	0,9145 p ¹	0,00789	-	-	³ pS
28.	2,4393	0,0000	0,9145 p ¹	0,00843	-	-	³ pS
29.	2,4404	0,0000	0,9145 p ¹	0,0115	-	-	³ kS
30.	2,4412	0,0000	0,9145 p ¹	0,0103	-	-	³ kS
31.	2,4372	0,0000	0,9145 p ¹	0,0110	-	-	³ kS
32.	2,4403	0,0000	0,9145 p ¹	0,0110	-	-	³ kS
33.	2,4354	0,0000	0,9145 p ¹	0,0104	-	-	³ kS
34.	2,4334	0,0000	0,9145 p ¹	0,0112	-	-	³ kS
35.	2,4294	0,0000	0,9145 p ¹	0,0113	-	-	³ kS
36.	2,4265	0,0000	0,9144 p ¹	0,0112	-	-	³ kS
37.	2,4186	0,0000	0,9144 p ¹	0,0119	-	-	³ kS
38.	2,4117	0,0000	0,9144 p ¹	0,0118	-	-	³ kS
39.	2,4049	0,0000	0,9143 p ¹	0,0112	-	-	³ kS
40.	2,3961	0,0000	0,9143 p ¹	0,0117	-	-	³ kS
41.	2,3893	0,0000	0,9143 p ¹	0,0112	-	-	³ kS
42.	2,3813	0,0000	0,9142 p ¹	0,0115	-	-	³ kS
43.	2,3717	0,0000	0,9142 p ¹	0,00975	-	-	³ kS
44.	2,3500	0,0000	0,9141 p ¹	0,0113	0,960	133,27	³ kS
45.	2,3235	0,0000	0,9139 p ¹	0,0112	0,920	128,87	³ kS
46.	2,3058	0,0000	0,9138 p ¹	0,0111	0,840	125,67	³ kS
47.	2,2872	0,0000	0,9137 p ¹	0,0105	0,760	125,37	³ kS
48.	2,2460	0,0000	0,9135 p ¹	0,0114	0,600	107,20	³ kS

F_{max} gibt den interpolierten Kraftmesswert am Scheitelpunkt an (F_{max} bei ZF_{max}); der Kraftbezugswert ist mit F_{bz} bezeichnet. Berechnung: $\gamma=f_G\cdot f_k\cdot W_Y/(4\pi\cdot R\cdot g)$ mit $W_Y=(F_{\text{max.}}-F_{\text{bz.}}+F_{\text{Ringauftrieb}})\cdot g$. Die Größen $F_{\text{bz.}}$ und $F_{\text{Ringauftrieb}}$ betragen 0 bei 'Messungen mit tariertem Ring'. Der Faktor f_k der die Ringgeometrie und Dichteverhältnisse berücksichtigt, kann nach verschiedenen Rechenverfahren bestimmt werden, die jeweils in technischen Normen vorgeschrieben sein können. Um die Herkunft des Faktors f_k kenntlich zu machen, wird ein angehängtes Zeichen zugefügt: **h** steht für (interpolierte) Werte aus den original Harkins und Jordan Tabellen ('†' zeigt nicht interpolierbare Randlagen in der Tabelle an), **f** steht für die Tabellen nach Fox und Chrisman, **z** für Zuidema und Waters, **p** steht für den IMETER/Petzoldt'schen Lösungsalgorithmus, der die zugrundeliegende Differenzialgleichung adressiert sowie **w** für die unkorrigierte 'F/2U'-Berechnung des Näherungswertes. Mit v_z wird die Abzugsgeschwindigkeit angegeben, also die Geschwindigkeit, mit der Ring und Flüssigkeitsoberfläche zur Messung auseinander bewegt wurden. Falls während des Lamellenauszugs ein Bruch der Flüssigkeitslamelle auftrat, gibt **X** die Bruchhöhe und t_x dafür den relativen Zeitpunkt an.

Die Angabe ΩK ist das Klassifizierungskennzeichen der Messkurve: ¹' steht für eine Messkurve mit kurz zuvor ermittelter Bezugskraft; bei ²' wurde die Bezugskraft übernommen; ³' bedeutet ohne Bezugskraft (tariert); 'k' bezeichnet vollständige Kurvenzüge, 'p' Teilkurven, 's' Einzelpunkt, 'r' Sonderformen; 'D' steht für dynamische Messkurven, 'S' für statische Mehrpunkt- oder 'M' Einzelpunktmessungen. Ein 'x' wird angehängt, wenn der Messwert unsicher ist und aus nicht-idealen Messkurven ermittelt wurde, z.B. bei verzerrierter Parabelform. → Diagramm 3.

Messkurven - Grundlage der Bestimmung der Oberflächenspannung - 'Measuring Curves'²¹

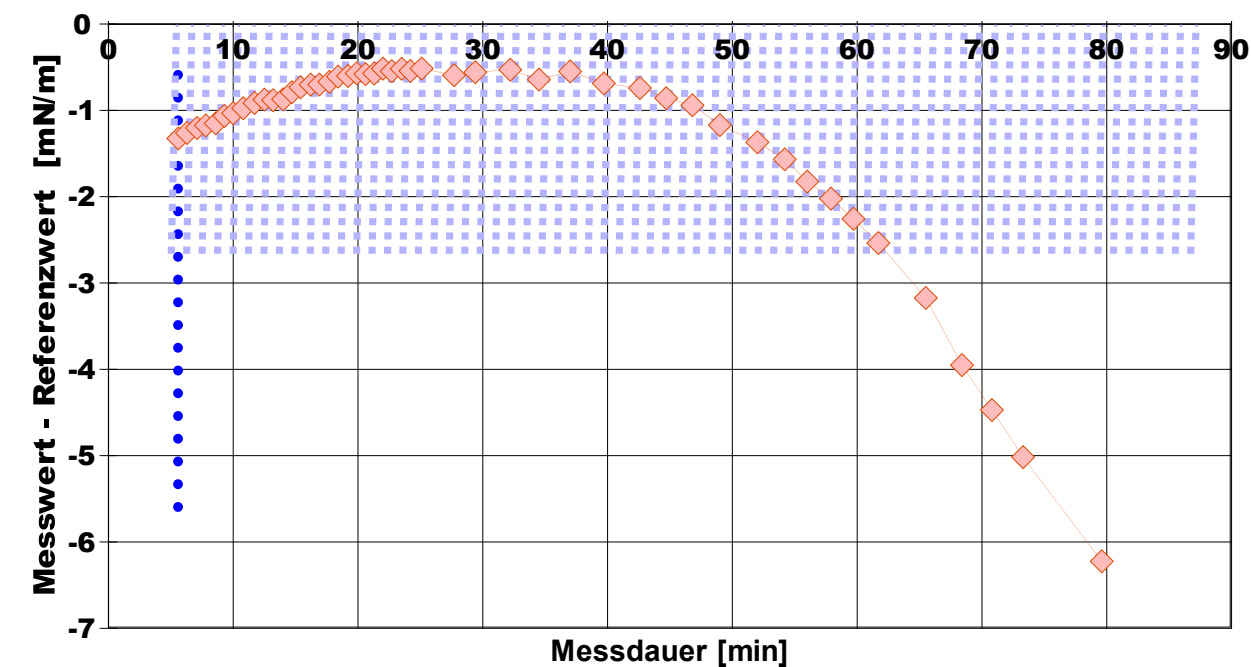


N°1, 5,3 min, 27,135°C, 0,868 mm	N°11, 13,0 min, 27,24°C, 0,819 mm	N°21, 20,4 min, 27,332°C, 0,760 mm	N°31, 33,2 min, 27,485°C, 0,688 mm	N°
N°2, 6,0 min, 27,145°C, 0,866 mm	N°12, 13,7 min, 27,251°C, 0,814 mm	N°22, 21,1 min, 27,34°C, 0,772 mm	N°32, 35,6 min, 27,509°C, 0,647 mm	N°
N°3, 6,8 min, 27,157°C, 0,869 mm	N°13, 14,5 min, 27,26°C, 0,810 mm	N°23, 21,8 min, 27,349°C, 0,767 mm	N°33, 38,0 min, 27,54°C, 0,670 mm	N°
N°4, 7,5 min, 27,168°C, 0,853 mm	N°14, 15,2 min, 27,269°C, 0,807 mm	N°24, 22,6 min, 27,357°C, 0,764 mm	N°34, 41,1 min, 27,568°C, 0,630 mm	N°
N°5, 8,3 min, 27,178°C, 0,850 mm	N°15, 16,0 min, 27,279°C, 0,804 mm	N°25, 23,3 min, 27,365°C, 0,764 mm	N°35, 43,0 min, 27,586°C, 0,600 mm	N°
N°6, 9,0 min, 27,189°C, 0,847 mm	N°16, 16,7 min, 27,288°C, 0,796 mm	N°26, 24,1 min, 27,374°C, 0,753 mm	N°36, 45,2 min, 27,609°C, 0,567 mm	N°
N°7, 9,8 min, 27,199°C, 0,847 mm	N°17, 17,4 min, 27,297°C, 0,790 mm	N°27, 24,9 min, 27,383°C, 0,764 mm	N°37, 47,4 min, 27,628°C, 0,525 mm	N°
N°8, 10,5 min, 27,209°C, 0,837 mm	N°18, 18,2 min, 27,306°C, 0,793 mm	N°28, 27,5 min, 27,412°C, 0,767 mm	N°38, 50,5 min, 27,656°C, 0,520 mm	N°
N°9, 11,4 min, 27,221°C, 0,836 mm	N°19, 19,0 min, 27,315°C, 0,787 mm	N°29, 28,2 min, 27,428°C, 0,748 mm	N°39, 52,7 min, 27,672°C, 0,513 mm	
N°10, 12,2 min, 27,231°C, 0,827 mm	N°20, 19,7 min, 27,324°C, 0,787 mm	N°30, 30,9 min, 27,458°C, 0,727 mm	N°40, 54,6 min, 27,687°C, 0,513 mm	

- Im Diagramm "Measuring Curves²" werden die zu Grunde liegenden einzelnen Kraftmesswerte als 'Messkraft' gegen 'Lamellenhöhe' für alle Messpunkte der 48 Messkurven dargestellt. Eine Messkurve beschreibt einen Oberflächenspannungswert. Qualität und Korrektheit einer Messung zeichnen sich durch entsprechend glatt-konkave Kurvenzüge im Bereich der Kraftmaxima aus ($h_Y = h_T$).

• 5. Referenzdatenvergleich

→ Diagramm 4. IST/SOLL-Vergleich in zeitlicher Abfolge der Messwerte - 'DeltaChart'



Reference values for 'Wasser' acc. to $f(T[^\circ\text{C}])=235.8 \cdot (1-(T+273.15)/647.096)^{1.256} \cdot (1-0.625 \cdot (1-(T+273.15)/647.096))$
Mean and Standarddev. of Residuals: $-1,32 \pm 1,3$ mN/m, relative: -1,9% at a spread of 1,8%

- Das Chart "DeltaChart" zeigt die temperaturkompensierten Abweichungen der einzelnen Messwerte zum Referenz- bzw. Erwartungswert in zeitlicher Sequenz. - In Diagrammen wird der Datenbereich entsprechend vergrößert dargestellt. Messbedingungen und Gültigkeiten, Korrektheit der Referenz, Streuung, Trend, Abweichung und Messunsicherheit der Messwerte sind in Betracht.

• 6. Referenzvergleich mit Wasser bei 27.13°C

	Referenz	Messung	Δ absolut	Δ relativ	Δ / u
γ	71,64	70,32	-1,3 mN/m	-1,8%	-4

- Der Ergebnisvergleich mit den Angaben, die in der Referenzdatenbank zu 'WASSER' gefunden wurden, stellt die Werteübereinstimmung dar. Der Unterschied Δ wird als absolute Differenz "Probenmesswert minus Referenzwert" und als relative Abweichung angegeben. Das Symbol γ steht für die Messgröße; " Δu " ist die Referenzabweichung im Verhältnis zur Messunsicherheit.

• 7. Meldungen & Hinweise

- Bei den folgenden Messkurven traten Störungen auf, so dass für diese Werte kein Ergebnis angegeben werden kann!
Zeit 74,4 min: keine verwertbare Messkurve (zu wenig Datenpunkte), Zeit 76,5 min: keine verwertbare Messkurve (zu wenig Datenpunkte)
- 48 Messwerte wurden als Absolutwerte mit Bezugskraft 0 bestimmt (tariert Start).

• 8. Inline IMProReports

IMPro Konfig. Start 18:13:02/0,10 [min] - Oberflächenbestimmung: Antast-Auflösung 0,001 mm, Z-Toleranz -0,02 mm.
Probenmenge: 0,0645 g transferiert mit $\rho = 0,9966$ g/cm³ $\rightarrow$ 64,72 μ L, (Spritzenauswägung) 2,05 [min].
Berühr-Position Fluidoberfläche: 21,081 [mm], Δ 0,091, Gewicht (Oberfl.Berührung): 0,12628 [g], 3,78 [min].
Berühr-Position Kachelboden: 22,618 [mm], Δ 0,065, Gewicht (elast. Bodenkontakt): -1,12231 [g], 5,08 [min].
Füllstand-Bruttohöhe: 1,537 mm $\leftrightarrow$ Netto-Füllstand 1,548 mm bei Kacheltiefe 1,563 mm ergibt Δ -0,015 mm.

- MessSequenz -

Nr.	Zeit (min)	Fmax (mN)	ZFmax (mm)	Temp. (°C)	Letztes Lamellengewicht (g) (mN) Z H (mm)
1	5,72	2,416	20,389	27,136	0,2435 2,388 -1,000 20,269
2	6,48	2,417	20,389	27,147	0,2435 2,388 -1,000 20,269
3	7,25	2,419	20,389	27,159	0,2435 2,388 -1,000 20,269
4	8,02	2,422	20,429	27,169	0,2434 2,387 -1,000 20,269
5	8,78	2,422	20,429	27,180	0,2434 2,387 -1,000 20,269
6	9,53	2,423	20,429	27,190	0,2433 2,386 -1,000 20,269
7	10,26	2,425	20,429	27,201	0,2433 2,386 -1,000 20,269
8	10,98	2,427	20,429	27,210	0,2433 2,386 -1,000 20,269
9	11,93	2,429	20,429	27,226	0,2432 2,385 -1,000 20,269
10	12,71	2,430	20,429	27,233	0,2432 2,385 -1,000 20,269
11	13,43	2,431	20,429	27,241	0,2431 2,384 -1,000 20,269
12	14,24	2,432	20,429	27,251	0,2430 2,383 -1,000 20,269
13	14,94	2,433	20,469	27,261	0,2428 2,381 -1,000 20,269
14	15,71	2,435	20,469	27,270	0,2428 2,381 -1,000 20,269
15	16,46	2,436	20,469	27,279	0,2426 2,379 -1,000 20,269

16	17,19	2,436	20,469	27,289	0,2426 2,379 -1,000	20,269
17	17,94	2,437	20,469	27,298	0,2425 2,378 -1,000	20,269
18	18,67	2,438	20,469	27,307	0,2424 2,377 -1,000	20,269
19	19,43	2,439	20,469	27,316	0,2422 2,375 -1,000	20,269
20	20,15	2,440	20,469	27,324	0,2421 2,373 -1,000	20,269
21	20,86	2,440	20,469	27,333	0,2419 2,372 -1,000	20,269
22	21,57	2,440	20,509	27,341	0,2418 2,371 -1,000	20,269
23	22,33	2,442	20,509	27,349	0,2417 2,371 -1,000	20,269
24	23,06	2,441	20,509	27,357	0,2416 2,370 -1,000	20,269
25	23,80	2,442	20,509	27,366	0,2413 2,367 -1,000	20,269
26	24,58	2,441	20,509	27,375	0,2411 2,365 -1,000	20,269
27	25,40	2,442	20,509	27,385	0,2410 2,364 -1,000	20,269
28	27,98	2,439	20,509	27,413	0,2419 2,372 -1,000	20,269
29	29,57	2,440	20,509	27,431	0,2464 2,417 -0,880	20,389
30	32,32	2,441	20,549	27,460	0,2470 2,422 -0,840	20,429
31	34,86	2,441	20,549	27,487	0,2409 2,363 -0,960	20,309
32	37,32	2,440	20,629	27,512	0,2447 2,400 -0,880	20,389
33	40,06	2,435	20,589	27,548	0,2394 2,348 -0,960	20,310
34	42,81	2,433	20,629	27,569	0,2463 2,416 -0,760	20,509
35	45,00	2,430	20,669	27,590	0,2423 2,376 -0,840	20,430
36	47,18	2,426	20,709	27,611	0,2419 2,372 -0,840	20,430
37	49,27	2,419	20,669	27,630	0,2403 2,357 -0,840	20,430
38	52,42	2,413	20,749	27,658	0,2381 2,335 -0,840	20,430
39	54,33	2,404	20,749	27,673	0,2439 2,392 -0,640	20,629
40	56,18	2,396	20,749	27,687	0,2429 2,382 -0,640	20,629
41	58,06	2,389	20,789	27,702	0,2416 2,370 -0,640	20,629
42	59,91	2,381	20,789	27,714	0,2402 2,356 -0,640	20,629
43	62,02	2,371	20,829	27,727	0,2388 2,342 -0,640	20,629
44	66,73	2,349	20,869	27,755	0,0031 0,030 -1,360	19,910
45	69,16	2,322	20,869	27,769	0,0032 0,031 -0,960	20,310
46	71,62	2,306	20,909	27,784	0,0032 0,031 -0,960	20,310
47	74,14	2,287	20,949	27,798	0,0034 0,033 -0,960	20,310
48	76,29	2,272	21,029	27,809	0,0035 0,034 -0,760	20,510
49	78,36	2,269	21,109	27,823	0,0035 0,034 -0,760	20,510
50	80,53	2,245	21,149	27,837	0,0036 0,035 -0,760	20,510

- **Inline Reports** = durch das IMPro während des Ablaufs der Messung erzeugt Ausgaben, die das laufende IMPro über die Funktion 'Create Report' mit Dokumentenstatus erzeugt.

• 9. Extended Weighing Record

N°	Time [min]	Weigh [g]	Std.Dev. ± [g]	Counts [n]	Duration [s]	Trend/ Quality	r ²	Tare [g]
1.	2,31	-0,00013	0,00005	33	1,53	√		0,338686
2.	3,75	0,1263	0,0001	33	1,53		0,37 [←]	0,338557
3.	5,06	-1,12	0,09	34	1,54		0,10 [→]	0,338557
4.	80.67	0.0038	0.0002	33	1.52		0.46 [←]	0.338557

- Die Tabelle stellt die Ergebnisse der Mittelwerts-Wägungen zusammen (*lWeighing-Funktion*). Ausgegeben werden: Zeitpunkt der Wägung ab Start des IMPros (*Time [min]*), Wägewert (*Weigh [g]*) mit dabei aufgezeichneter Streuung (Standardabweichung, *Std.Dev. ±[g]*), Anzahl der Einzelwägungen (*Counts [n]*), Dauer der Wägung (*Duration [s]*) und eine Trendanalyse (*Trend/Quality, r²*) sowie der Inhalt des Tara-Speichers (*Tare [g]*).

Temperaturangaben beziehen sich auf die Skala der ITS-90. **Standardabweichungen:** Verschiedentlich werden Regressionsfunktionen mit Standardabweichungen bzw. Varianzen qualifiziert. Diese Angaben werden berechnet aus der Summe der Quadrate der Abweichungen der Einzelwerte zu jeweils berechneten Funktionswerten dividiert durch die Anzahl der Werte weniger 1. Sofern nicht anders bezeichnet, werden für ±(Standardmess-)Unsicherheiten einfache Standardabweichungen - ohne Erweiterungsfaktoren - angegeben, d.h. die Überdeckung betrifft 67% der Werte.

IMPro

Execution & Audit-Trail

Data created during execution of the IMPro *"DRT-III, 10.09.26, 42427"*, type 1/38. Time Period of the Accomplishment: Sep., 10. 2026 between 18:12:56 and 19:33:42, elapsed time: one hour. IMPro finished as projected. The complete Report first was presented on Sep., 10.26 at 19:34. Original data was changed as reported to Audit-Log:

Backup of state and individual IMPro configuration and variable values at the End 50 [n]:

Weight of Ring & Holder: 0,3386g. Timeshift-Constant WZDt= 0,316s.

Y/N: Dynamic_Measurement Dynamic_Measurement.

Variables: StatStabilisingTime 0,15s.

Numbers:

Abs. Positions/Way: Starthöhe 21,909mm, POS_OBERFLÄCHE_IMPro 20,99, POS_OBERFLÄCHE_ERMITTELT 21,081 [mm] (=> *Delta=0,0910 [mm]*), POS_Decke_l_auf_Haube_fre 19,2, POS_NullNiveauYLP 21,269 [mm] = Href, Kacheldurchmesser & Ø 3,625 90°, Kachelinnenhöhe 1,563, Exp.Füllhöhe (Boden bis YLP-Nullniveau) Bottom_Distance 1,2640 mm, FüllstandKorrPerTorusvolumen 0,0120 mm, Antast-Wegauflösung ±0,001 mm, Absolute Z-Toleranz -0,02 mm.

Rel. Positions/Way: Z_Touch_Zero_Distance 0,1880 [mm], MeasWay MeasWaymm, MeasFreqTime: MeasFreqTimes, StatTear_Inkrement -0,04mm,

Speed: SlowMoveSpeed 0,1mm/s, MediumMoveSpeed 1mm/s, FastMoveSpeed 5mm/s, StatLamella_tear_Speed 0,5mm/s.

Other: Stop_IMPro -3 [CodeN°], MaxMessDauer 12000 [s].

**** CHANGE(ES) IN DATA SHEET - by user M. Breitwieser **** Day/Time: 21.09.2026 17:11:58 ****

[1. Bemerkung : from] ' Hamilton 100µL.

Probenmenge: 0,0645g, 64,72µL, Oberfl. 21,081, Kachelboden 22,61753 mm.' [to] "

[2. Überschrift/Titel : from] 'Wasser ~65 µL OHNE PTFE-HAUBE' [to] '65µL Wasser'

-- Reasons given for the change in the Dataset: "

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZA224) wurde 1,5 Stunden vor dieser Messung von M. Breitwieser justiert. Die letzte vollständige Prüfung der Positioniervorrichtung von **IMETER** (ID23903733) erfolgte am 21.04.25. 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} 1,10601 kg/m³; Schwerebeschleunigung g 9,80769 m/s². Pt100-Temperaturmessung: Auflösung 0,001 K, Messunsicherheit $\pm 0,01$ K, R° 100.0056 Ω , Kalibrierintervall 30 min (BN°1, -41/200°C, 3S, FS15,8, Korrekturfunktion: - 0,0056 + 0,997592· ϑ + 2,20167E-05· ϑ^2 - 4,78434E-08· ϑ^3). Die Messauflösung der sekundären Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 7.5.18, LizenzN° *3037-4759*, W. 6.2,9200- Betriebssystem auf PC Ser.N°6995684 (C, SSD).

• 10. Kommentar/Bewertung/Interpretation

1. Die 'Kachel' (das Probengefäß wird "Kachel" genannt) ist aus Edelstahl mit scharfer Kante. Die Befüllung erfolgt mit einer präzisen μ L-Spritze - die Füllmenge wird zusätzlich durch Auswiegen sichergestellt. Mit dem Ring - als mechanischem Oberflächendetektor - wird der Füllstand der Kachel μ m-genau mit dem trockenen Ring von oben angetastet, dannach wird die Höhe des Kachelbodens tastend bestimmt. Dadurch ist der Grad der Befüllung sichergestellt. --- Die 'Create-Report'-Funktion der Software wird eingesetzt, um die diagnostischen Daten aus dem Ablauf in den Prüfbericht zu transportieren und darin auch die genauen Zeitpunkte der Vorgänge zu protokollieren.

2. Die Probensubstanz ist Wasser - ohne Zweifel über dessen Reinheit. Geringe Abweichungen durch Temperaturabweichung liegen vor, da ohne Kachel-Temperierung gemessen. Eine Diskrepanz zwischen gemessener Temperatur und der tatsächlich unbekannten Probentemperatur liegt also vor und führt zu einer Mißweisung der Referenzwertbestimmung. "Ohne Haube" - die Verdampfung ist gewollt, um die Auswirkung der dadurch verursachten Pegelabsenkung zu studieren. Alle absoluten Positionen beziehen sich auf die zur ersten Messung ermittelte Pegelhöhe als Nullpunkt (in Höhe der Kachel-Kante). Der Verlauf von ZFmax (Lamellenhöhe bei Fmax; Diagramm 2) zeigt in erster Linie die Niveauabsenkung durch das verdampfende Wasser und nicht den wirklichen Verlauf von ZFmax.

3. Das Ergebnis der Auswertung betrifft den allerersten Messwert - die erste Messkurve. Nur hier, wo der Füllstand noch korrekt ist, ist auch das Ergebnis kohärent. Der fk-Faktor gilt für die 90°-Kantenfüllung und verliert seine Gültigkeit, weil der Gibbs-Kantenwinkel am Kachelradius unter 90° absinkt. Der Beginn ist bereits durch eine geringe Unterfüllung nicht perfekt. Mit der Niveauabsenkung durch verdampfen fällt der Kontaktwinkel an der Triple Line (die ja identisch mit der Gibbs-Kante ist) und fk wird zunehmend falsch. Bei 89.1°-Kantenwinkel fällt fk von 0.9144 auf 0.9135. --- Außerhalb des akademischen Interesses ist der Pegelabfall durch Verdampfung kein wirkliches Problem, da unter einem Verdampfungsschutz gearbeitet wird. Und für metrologische Messung im Rahmen von Dienstleistungen genügen die ersten 3-5 Werte zur Bestimmung der Oberflächenspannung den Erfordernissen.

4. Während des Messablaufs wurden die Start- und Ausziehhöhen im steuernden IMPro verändert, um auch einige vollständige Messkurven und Kurvenabrisse aufzuzeichnen; durch tiefer Setzung der Kurvenstarthöhe konnte dem Niveauabfall begegnet werden und mehrmals der tatsächlich vorliegende Pegel am Messkurvenanfang bestimmbar gemacht werden .

5. Für die Referenzabweichung zu 'Wasser' wird aktuell die Qualität der Kachel-Kante verantwortlich gemacht, die sich möglicherweise anhand der relativ zu kurzen ZFmax kenntlich macht (ZFmax = gemessene Höhe über Nullniveau, wo der Parabelscheitel die Maximalkraft Fmax angibt). Ein Beitrag, der Fmax reduzieren kann, liefert nicht zuletzt der Ring selbst durch die Lötstellen der senkrecht auf dem Ring stehenden Haltestreben. Beide geometrischen Störungen des Ideals haben das Potential sowohl Fmax als auch ZFmax zu verkleinern.

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