

# *Feststoffdichte, Reinheit und Dilatation Aluminium - Werkstoff*

***Die hydrostatische Dichtemessung kann mit IMETER zur Messung der Temperaturkoeffizienten nebst Dichte und parallel zur Gehaltsbestimmung angewendet werden.***

Die Messung ist technisch bedingt sehr genau, weil durch die Differenzwägung im Messablauf Driftstörungen beseitigt werden und durch die Eliminierung des *Meniskusgewichts* auch die andere wesentliche Fehlerquelle entfällt. Darüber hinaus wurde die Wägezelle im Ablauf zyklisch justiert. So ist die Methode unerreichbar sicher, robust und genau.

Die Messung wurde in einem Temperiergefäß mit Deckel ausgeführt (Messzelle) und die Flüssigkeit dabei mit dem integrierten Magnetrührwerk umgewälzt, um im Fluid eine einheitliche Temperatur zu gewährleisten. Dabei diente ein durch IMETER gesteuerter *Ministat*-Thermostat (Peter Huber Kältemaschinenbau GmbH) zur exakten Temperierung.

Die Messungen liefen vollautomatisch bis zur Berichtsabgabe durch: Temperaturangleichung abwarten, umrühren, Probe heben und senken, *Meniskus auslöschen*, gerechte Werte messen, ein paar Mal wiederholen, Temperatur ändern usw. schließlich das Ergebnis ausgeben:

In diesem Dokument wird ein automatisch erzeugter IMETER-Prüfbericht vorgestellt. Die Ausführlichkeit ergibt sich aus der Forderung, dass alle Variablen einer Messung dargestellt werden sollen. Variablen sind ja nicht nur die Messdaten, sondern auch Umstände, Abläufe und die Eigenschaften der Normale. Daher verfügt IMETER über eine Modelliersprache, um Mess- bzw. Steuerungsverfahren zu gestalten („was soll der Fall sein“), zum anderen über analytische Fähigkeiten, um zu bewerten, *was der Fall ist* und um darüber in Berichten Rückkopplung zu geben.

IMETER spart sehr viel Arbeitszeit ein, indem nicht nur das Messen, Steuern und Regeln, sondern auch die beurteilungsreife Darstellung automatisiert ist!

Die Einstellungsvorgaben des Berichts bestimmen dabei Art und Umfang der Informationsdarstellung. Anhand eines vollständigen Berichts wird der Anwender in die Lage versetzt, Plausibilität und Validität einer Messung detailliert zu überprüfen.



## **ID N° 7234 - Density of Solids, Dilatation & Purity**

Title: **Werkstoff-Aluminium - Dilatation**

Remarks:

Zylinder, Vollmaterial. Wasser und Körper vor Messung auf 55°C temperiert (zum Ausgasen des Wassers).  
Temperierung und Temperaturhomogenität durch angesteuertes Magnetrührwerk unterstützt.

Result:  $\rho_{25,00^{\circ}\text{C}} = 2,81689 \pm 0,00005 \text{ g/cm}^3$ ,  $\kappa = (69,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  
**Purity**  $c_{\text{Aluminium, rein / Kupfer, rein}} = 94,103\% \text{ m/m}$   
measured in 'Wasser, Augsburg, Dest.'

### **Report**

**Messprinzip:** Die Dichtebestimmung beruht auf der Messung von Masse und Volumen. Die Volumenbestimmung erfolgt dabei durch die hydrostatische Methode als Auftriebswägung. Diese basiert darauf, dass ein in einer Flüssigkeit untertauchender Körper um so viel leichter erscheint, wie die seinem Volumen entsprechende Flüssigkeitsmenge wiegt. Die Dichte der Flüssigkeit, hier Wasser, Augsburg, Dest., muss sehr genau bekannt sein. Sie ist der Maßstab. Die Bestimmung der Masse erfordert außerdem die Kenntnis des Volumens, damit der Luftauftrieb korrigiert werden kann. In dieser Messung wurde das Volumen 45 Mal durch voneinander unabhängige Auftriebswägungen bestimmt. Die verwendete Meniskus-Eliminier-Technik zeichnet sich durch das Fehlen (bekannter) systematischer Fehler aus und ermöglicht die überhaupt genaueste Dichtemessung an realen Körpern. Und indem die Messungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurden, kann die Abhängigkeit der Materialdichte von der Temperatur und somit der Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden. Die Sicherheit der Ergebnisse wird aus der Analyse der Messunsicherheiten der Einflußgrößen hergeleitet. Zu den Faktoren gehören Spezifikationen und Zustand der Instrumentierung, die Bestimmtheit der Flüssigkeitsdichte und die in der Messung beobachtete Stabilität der Kraft- und Temperaturmessung. Angaben dazu finden Sie in jeweiligen Abschnitten dieses Prüfberichts.

## • Ermittelte Probendaten - Aluminium, rein

- Angaben für  $\vartheta = 25,00 \pm 0,03^\circ\text{C}$ , Luftdichte bei der Probenwägung  $\rho_a = 1,102 \pm 0,0011 \text{ kg/m}^3$  -

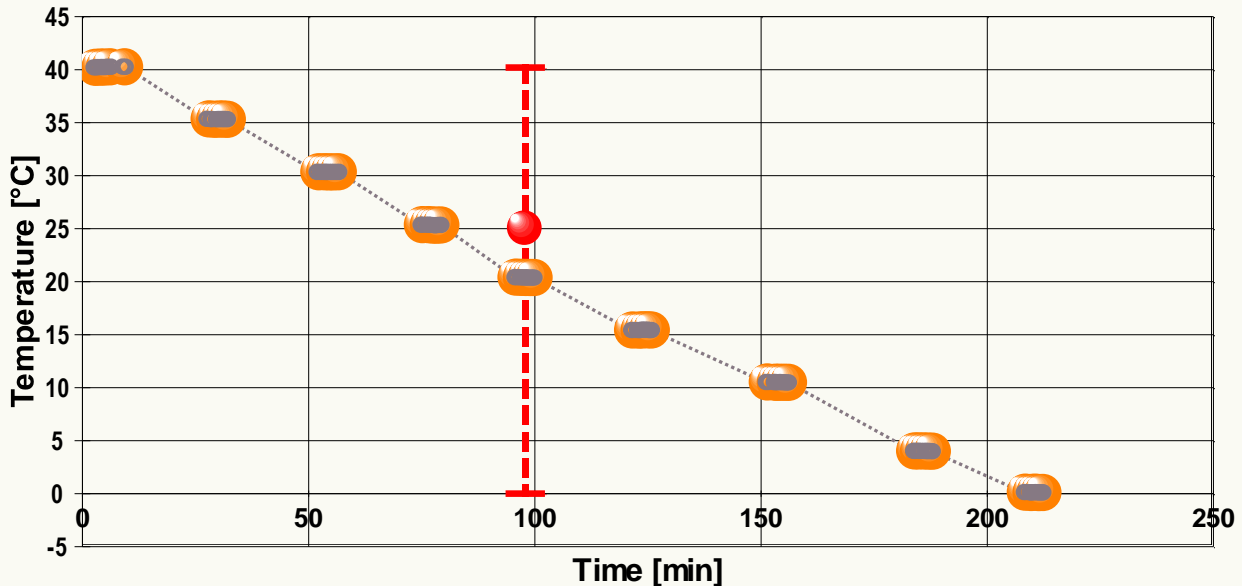
Dichte, spezifische Masse	$\rho$	2,81689	$\pm 0,00052$	$\text{g/cm}^3$	18 ppm
Ausdehnungskoeffizient	$\kappa$	69,5	$\pm 1,5$	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	2,1%
Probenvolumen	$V$	76,878	$\pm 0,0014$	$\text{cm}^3$	19 ppm
Masse der Probe	$m$	216,5572	$\pm 0,00031$	g	1,4 ppm
Wägewert, Probengewicht	$W$	216,5023	$\pm 0,00028$	g	
Gehalt, Reinheit	$c_m$	94,103	% $\text{m/m}$ entspricht 203,7864 g reinem Aluminium, rein		
relative Dichte	$\rho_4^{\vartheta}$	2,81696	---	$\rho_{20}^{\vartheta}$	2,82195
spezifisches Volumen	$v_s$	0,355001	$\text{cm}^3/\text{g}$		
- Auf Standardbedingungen normalisierte Stoff- und Körpermitteinheiten zu $\rho_a = 1.20 \text{ kg/m}^3$ und $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ -					
konventioneller Wägewert	$W_k$	216,4974	g		
Gewichtskraft	$G$	2123,840	mN		
Wichte, spez. Gewicht	$\gamma$	27,6337	$\text{N/cm}^3$		27,6243 p/cm <sup>3</sup>

Die Aufstellung gibt Materialeigenschaften zusammen mit individuellen Probendaten aus. Die Messunsicherheiten sind mit dem Erweiterungsfaktor  $k=2$  angegeben (Details dazu finden Sie bitte weiter unten in diesem Prüfbericht). Die Dichte entspricht nur dann einer Reinstoff-spezifischen Masse, wenn in der Messung tatsächlich die Rohdichte gemessen werden konnte, andernfalls ist das Ergebnis eine Rohdichte bzw. scheinbare Dichte sowie eine scheinbare Masse. Zur isobaren thermischen Wärmedehnung können drei Kennzahlen für die Messtemperatur  $25^\circ\text{C}$  angegeben werden: Der Temperaturkoeffizient der Dichte ( $^{\Delta\rho}/\Delta T = -196 \text{ mg/gK}$ ), der angegebene kubische Ausdehnungskoeffizient ( $\kappa$ ) und der lineare Ausdehnungskoeffizient mit  $\alpha = 23,2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ , der nur für isotrope Materialproben angegeben werden darf. Mit dem 'Wägewert' wird der Gewichtswert angegeben, den die Waage unter der angegebenen Luftdichte anzeigt. Der Unterschied von Wägewert und Masse vergrößert sich mit der Luftdichte umso stärker, je mehr die Dichte der Probe von der Dichte des Justiergewichts der Waage abweicht. Die Masse dieser Probe ist also um 54,9 mg größer als der Wägewert angibt; materialbezogen beträgt der Unterschied bei der vorliegenden Luftdichte rund 0,3‰. Zur Bewertung von Gehalt bzw. Reinheit finden Sie Angaben am Ende des Berichts. Für die Angabe des 'konventionellen Wägewertes', der 'Gewichtskraft' und der 'Wichte'  $\gamma = \rho \cdot g / 9.80665$  ('Pond': 1 p = 9.80665 mN) wurde die Probenmasse mit der Standardluftdichte und -fallbeschleunigung umgerechnet. Die dimensionslose 'relative Dichte' (=Dichtezahl) ist bezogen auf Wasser bei  $4^\circ\text{C}$  ( $\rho = 0.999975 \text{ g/cm}^3$ ) und  $20^\circ\text{C}$  ( $\rho = 0.998207 \text{ g/cm}^3$ ). Sie ist als verlässliche Vergleichsgrößenangabe zu älteren Quellen hilfreich. Das spezifische Volumen ist die reziproke Dichte ('wie viele Milliliter ergeben ein Gramm (Masse)'). Die Dichte in der Einheit 'Unces per cubic Inch' (Unzen pro Kubikzoll) beträgt 1,62827 oz/in<sup>3</sup>. Im Folgenden erhalten Sie Beschreibungen zu den Einzelheiten der durchgeführten Messung.

## • 45 Dichtemesswerte

Gesamtdauer der Aufzeichnungen in der Messung vier Stunden; stufig, zwischen  $40,2$  und  $0,0^\circ\text{C}$  abfallender Temperaturverlauf, neun Temperaturniveaus; mit acht Stufen; grob  $5 \text{ K}$  Temperaturunterschied je Stufe, mit jeweils fünf Messwerten.

### (1) Diagramm 'T(t)' - zur Temperatur im Verlauf der Messung:



--- T [°C]

• Result: Time & Temp.

DT/t= -0,2K/min

— DT=40,17K

• Measurement of Density

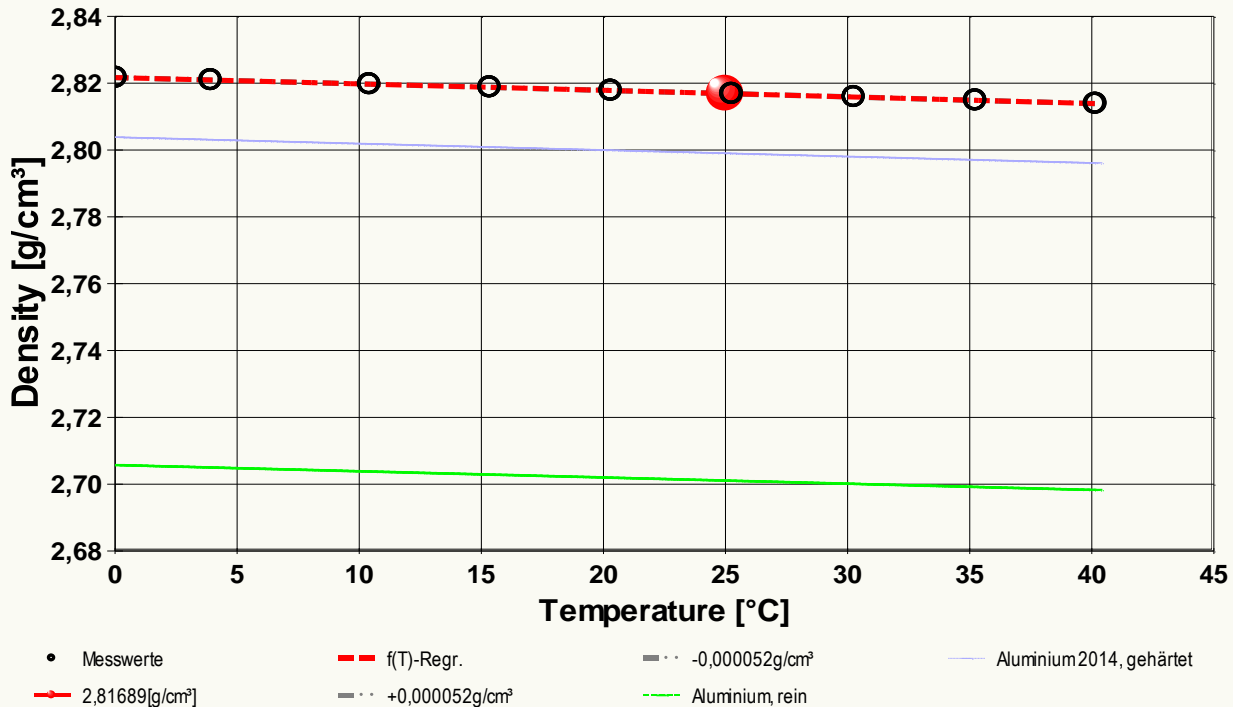
Im Diagramm "T(t)" wird eine Übersicht zum zeitlichen Verlauf der Vorgänge und der dabei gemessenen Temperatur gezeigt. Bedeutung der eingezeichneten Symbole: Die Kreismarkierungen zeigen die Temperaturmessungen an, die kugelförmigen Marken stehen für Zeitpunkt und Temperaturzuordnung von Auftriebsmessungen. Zeitpunkt und Temperatur der Ergebnisangabe werden durch eine Kugel markiert. Die Temperaturspanne in der Messung wird durch die senkrechte gestrichelte Bake angezeigt.

Das ausgegebene Messergebnis der Dichte wurde aus der Regressionsgleichung über den Temperaturverlauf der 45

Einzelergebnisse (0,02 bis 40,18°C), ebenso die Angaben zur Wärmedehnungsmittel. Grundlage ist die Gleichung:  
 $\rho(T) = f(\vartheta[^\circ\text{C}]) = 2,821672 - 1,868130 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta - 1,794626 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2$  (Gl.1)

Die Bestimmtheit der Gleichung ist, gemäß Korrelationskoeffizient  $r^2=0,999949$ , *hervorragend*. Die Standardabweichung  $\sigma_o$  der Gleichung beträgt  $1,9 \cdot 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup> und die Standardabweichung des Mittelwertes  $\sigma_{Mo}$   $2,8 \cdot 10^{-6}$  g/cm<sup>3</sup>. Die empirische Streuung  $\sigma_o$  ist erwartungsgemäß kleiner als die erweiterte Standardmessunsicherheit  $U_o$   $5,2 \cdot 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup>. Die Gleichung kann zur Repräsentation der Wertemenge im Temperaturintervall mit der beigeordneten relativen Unsicherheit  $U_o$  18 ppm verwendet werden.

(2) Diagramm 'rho(T)' - Dichtemesswerte in Abhängigkeit von der Temperatur:



Das Diagramm "rho(T)" zeigt die 45 Dichtemesswerte als Kreissymbole in Temperaturabhängigkeit an. Es werden Messwerte mit dem Bereich der Messunsicherheit in Form einer gestrichelten Linie eingefasst. Der Verlauf der Referenzfunktion zum besten Vergleichswert bzw. der Stoff mit der besten Übereinstimmung nach Datenbankeintrag ist als schraffierter Bereich in Breite der Unsicherheit eingezeichnet.

Im Diagramm zur Temperaturabhängigkeit ist der Werteverlauf von "Aluminium, rein" entsprechend der Referenzdaten eingezeichnet. Im oberen Schaubild ist daneben noch der Datenbank-Stoff mit der ähnlichsten Dichte bei 25°C markiert ("Aluminium 2014, gehärtet"). Die für den Prüfkörper berechnete Messunsicherheit wird durch die Breite der Schraffur für den Referenzverlauf als Dichtebereich ausgewiesen - auch wenn diese wegen der Skalierung als Bereich unsichtbar ist (die vorhandene Unsicherheit der Referenzangabe wird im Diagramm nicht dargestellt).

(3) Datentabelle - Zusammenstellung der Roh- und Ergebnswerte:

N°	t	ρ	ρ <sub>Fl</sub>	Q <sub>Probe</sub>	V <sub>Probe</sub>	ΔT <sub>Akqu.</sub>	ΔT	ΔQ <sub>Probe</sub>	N
[min]	[°C]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[s]	[K]	[g/cm <sup>3</sup> ]		
1.	3,1	40,13	0,992164	2,813849	76,9612	3,6	0,00	5,3E-15	4
2.	4,1	40,15	0,992156	2,813877	76,9604	1,2	0,00	7,5E-15	2
3.	5,1	40,16	0,992152	2,813881	76,9603	1,2	0,00	-8,9E-16	2
4.	6,3	40,18	0,992145	2,813874	76,9605	0,6	0,00	1,8E-15	2
5.	9,5	40,18	0,992145	2,813893	76,9600	1,8	0,00	2,2E-15	3
6.	28,2	35,26	0,993940	2,814817	76,9347	0,6	0,00	4,1E-6	2
7.	29,5	35,23	0,993950	2,814862	76,9335	1,8	0,00	-3,7E-6	3
8.	30,5	35,25	0,993943	2,814888	76,9328	2,4	0,00	3,7E-6	3
9.	31,3	35,25	0,993943	2,814899	76,9325	1,2	-	-	2
10.	32,3	35,23	0,993950	2,814865	76,9334	1,2	0,00	4,1E-6	2
11.	52,4	30,27	0,995563	2,815850	76,9065	3,0	0,00	3,7E-6	4
12.	53,8	30,27	0,995563	2,815873	76,9059	1,2	0,00	1,8E-15	2
13.	54,7	30,26	0,995566	2,815881	76,9056	1,2	0,00	8,9E-16	2
14.	55,7	30,26	0,995566	2,815866	76,9061	1,2	0,00	8,9E-16	2
15.	56,8	30,27	0,995563	2,815892	76,9054	1,2	0,00	2,2E-15	2
16.	75,3	25,28	0,996971	2,816802	76,8805	1,2	0,00	3,1E-15	2
17.	76,7	25,28	0,996971	2,816820	76,8800	0,6	0,00	3,1E-15	2
18.	77,6	25,25	0,996978	2,816823	76,8799	1,2	-	-	2
19.	78,5	25,24	0,996981	2,816849	76,8792	1,2	0,00	-8,9E-16	2
20.	79,4	25,26	0,996976	2,816835	76,8796	1,2	0,00	8,9E-16	2
21.	96,0	20,33	0,998133	2,817763	76,8543	1,8	0,00	3,7E-6	3
22.	97,3	20,32	0,998135	2,817792	76,8535	1,2	0,00	-8,9E-16	2
23.	98,2	20,31	0,998137	2,817798	76,8533	3,0	0,01	5,9E-6	4

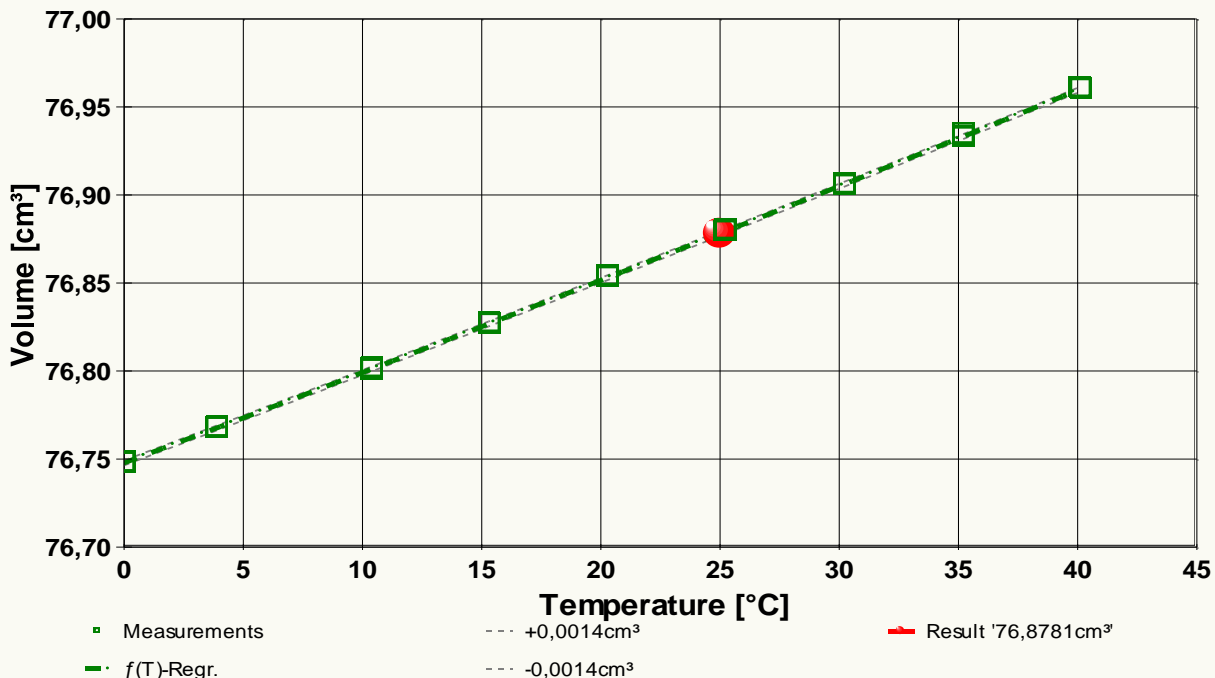
24.	99,2	20,30	0,998139	2,817800	76,8533	2,4	0,00	-4,0E-15	3
25.	100,0	20,30	0,998139	2,817803	76,8532	1,2	0,00	-4,0E-15	2
26.	121,8	15,35	0,999043	2,818738	76,8277	1,8	0,00	3,7E-6	3
27.	123,3	15,34	0,999045	2,818769	76,8269	1,2	0,00	4,1E-6	2
28.	124,1	15,36	0,999042	2,818775	76,8267	1,2	0,00	-8,9E-16	2
29.	125,0	15,37	0,999040	2,818767	76,8269	1,8	0,00	-3,7E-6	3
30.	125,9	15,35	0,999043	2,818780	76,8266	3,0	0,00	-3,7E-6	4
31.	151,6	10,44	0,999656	2,819675	76,8022	0,6	0,00	-2,2E-15	2
32.	153,4	10,43	0,999657	2,819708	76,8013	1,2	0,00	8,9E-16	2
33.	154,2	10,43	0,999657	2,819712	76,8012	1,2	0,00	8,9E-16	2
34.	155,3	10,42	0,999658	2,819722	76,8009	1,2	-	-	2
35.	156,2	10,41	0,999659	2,819732	76,8006	3,0	0,00	-8,9E-16	4
36.	184,1	3,94	0,999968	2,820922	76,7682	3,0	-	-	4
37.	185,0	3,94	0,999968	2,820929	76,7680	1,2	-	-	2
38.	186,1	3,94	0,999968	2,820937	76,7678	1,8	-	-	3
39.	187,1	3,93	0,999968	2,820940	76,7677	1,2	0,00	8,9E-16	2
40.	188,0	3,91	0,999968	2,820940	76,7677	7,2	0,00	-3,7E-6	8
41.	208,6	0,05	0,999839	2,821649	76,7484	1,2	-	-	2
42.	209,9	0,03	0,999838	2,821660	76,7481	3,6	-	-	4
43.	210,8	0,05	0,999839	2,821671	76,7478	0,6	-	-	2
44.	211,6	0,02	0,999837	2,821673	76,7478	1,2	-0,01	5,6E-6	2
45.	212,5	0,03	0,999838	2,821668	76,7479	2,4	0,00	3,7E-6	3

Die Tabelle listet die wesentlichen Daten in zeitlicher Abfolge nummeriert auf. Von links nach rechts: **Zeit** gibt den Zeitpunkt des Messwertes ab Beginn des Ablaufs in Minuten an, **θ** die Temperatur in Celsiusgraden und  $\rho_{Fl}$  die zugehörige Dichte von 'Wasser, Augsburg, Dest.' in g/cm<sup>3</sup>, die den Maßstab der Messung darstellt. Die dazu ermittelte Probendichte  $\rho_{Probe}$  ist ebenfalls in der Einheit g/cm<sup>3</sup> gegeben. **V** ist das Volumen der Probe bei der Temperatur in cm<sup>3</sup>, die aus dem Auftrieb gemäß der Flüssigkeitsdichte berechnet ist. Die Auftriebskraft kann sich durch verschiedene Effekte verändern, insbesondere durch Temperaturangleichung (Konvektion, Volumen Anpassung), Quellung oder Auflösung. Die Beobachtungsdauer - als Stabilitätskriterium des Messwertes - erstreckt sich über die Zeitspanne  $\Delta t_{Akqu.}$ , die in Sekunden angegeben ist. Im selben Zeitraum kann sich die Temperatur ändern (Angabe  $\Delta T$  in Temperaturgraden) und auch die Dichte der Probe  $\Delta \rho_{Probe}$  (wobei die evtl. vorliegende Änderung der Flüssigkeitsdichte hier nicht ausgegeben wird). Temperatur, Dichte und Volumenangaben der ersten Spalten stellen jeweils die Werte am Ende der 'Beobachtungsdauer' dar. **N** gibt die Anzahl der aufgenommenen Messwerte zur Auftriebskraft an. Dichte und Volumen werden um eine Dezimale genauer ausgegeben, um Trends anzuzeigen. Die  $\Delta$ -Angaben zu Temperatur und Dichte über die registrierte Beobachtungsdauer  $\Delta t_{Akqu.}$  wird in der Fortpflanzung der Messunsicherheit verwendet - sie helfen auch, eventuelle Störungen beim Messablauf aufzufinden. Ein rel. großer Zeitraum ist bei einem Gleichgewichtsverfahren der Auftriebsbestimmung ein Hinweis auf Probleme, wie Luftbläschen, Wandkontakt oder (meistens) Konvektionsströmungen bzw. Wärmeaustauscheffekte.

**Bearbeitungshinweis:** Die Tabelle kann zur Weiterbearbeitung per "paste und copy" sehr einfach z.B. nach Excel transferiert werden. Ebenso die Daten, die in ungekürzter Präzision hinter den Diagrammen stehen. Sie können aus dem Diagrammfenster geordnet und als Zahlenwerte (und/oder als Bild) einfügbar in die Zwischenablage übernommen werden.

## • Temperaturabhängigkeit des Probenvolumens

(4) Diagramm 'abs. Volumen' - Volumen der Probe in Temperaturabhängigkeit:



Die Darstellung "abs. Volumen" zeigt die einzelnen Messwerte zum jeweils berechneten Volumen der Probenmenge in Temperaturprojektion. Neben den als Quadrate eingetragenen Volumenwerten ist der Verlauf der Ausgleichsfunktion und der Messunsicherheit des Volumens durch gestrichelte Linien abgebildet. Der im Ergebnis ausgewiesene Ergebniswert zum Volumen ist als Kugel eingetragen.

Der Verlauf der Messwerte zum Körper- bzw. Probenvolumen mit der Temperatur wird durch die folgende Gleichung angepasst:

$$V_T[\text{cm}^3] = f(\theta[^\circ\text{C}]) = 76,7478 + 5,08056 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 5,25935 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 \quad (\text{Gl.2})$$

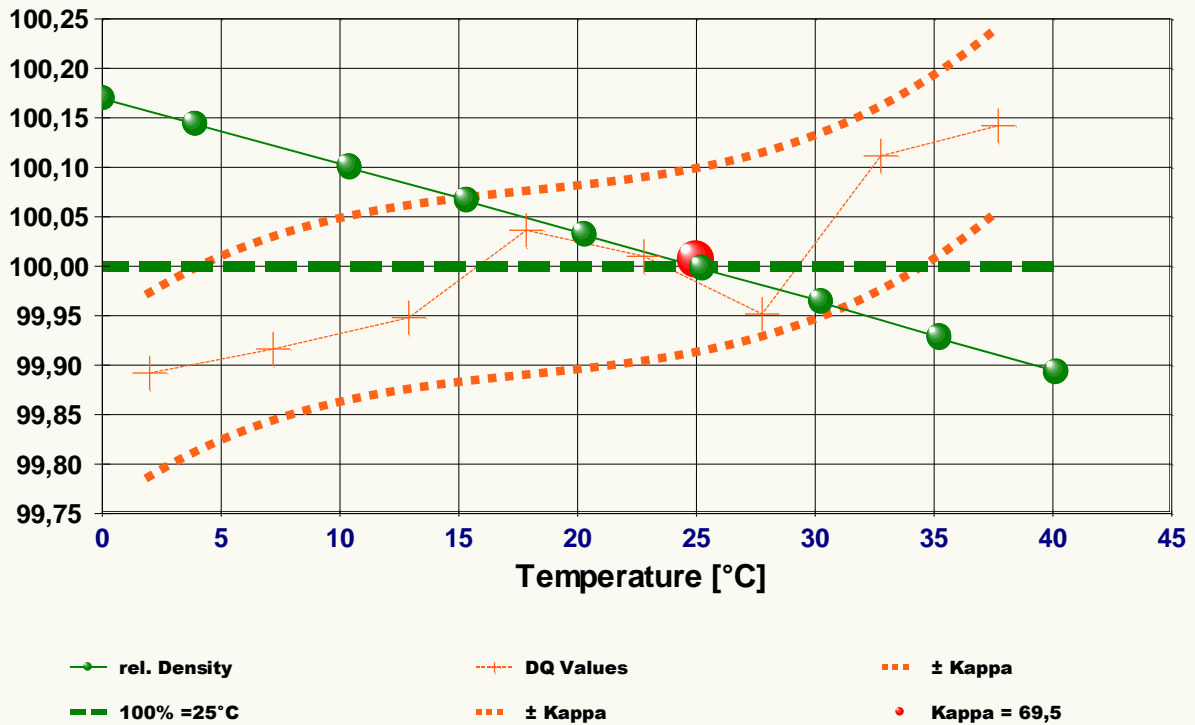
$$r^2 = 0,999949, \sigma_V = 5,06 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3, \sigma_{Vrel.} = 0,18\%, \sigma_{VM} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3.$$

Die erweiterte Messunsicherheit für das Probenvolumen beträgt  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$  - den dreifachen Wert von  $\sigma_V$ .

Die Behandlung des Volumens betrifft besonders diejenigen Fälle, in welchen die Volumeneigenschaft bestimmter Artefakte bzw. Prüfkörper in Frage steht. So kann mittels der Temperaturfunktion eine rationale Handhabung dieser individuellen Eigenschaft ermöglicht werden.

• **Wärmedehnung - Thermodilatation**

(5) *Diagramm 'Drho' - die relative Dichteänderung:*



Im Diagramm "Drho" wird die im Verlauf eingetretene Dichteänderung in einer normalisierten Anzeige präsentiert. Die kugelförmigen Marken zeigen zu den einzelnen Dichtemesswerten deren relative Abweichung zum '100%-Wert bei 25°C, dem Angabewert (2,81689 g/cm³). Zusätzlich werden die ermittelten neun Ausdehnungskoeffizienten, die aus Differenzenquotienten berechnet sind, abgebildet. Diese sind jedoch ohne Y-Achsenbezug in das Diagramm skaliert.

Die Dichte ändert sich über den Verlauf um 2,8%. Für eine erste Untersuchung der Wärmedehnung wurden die Dichtemesswerte in neun Temperaturniveaus zusammengefasst. Aus den Dichte- und Temperatur- Differenzenquotienten ( $\Delta\rho$ ,  $\Delta T$ ) wurden jeweilige Ausdehnungskoeffizienten  $\kappa_\Delta$  berechnet ( $\kappa_\Delta \approx \frac{-\Delta\rho}{\rho \cdot \Delta T}$ ). Die Maximal- und Minimumwerte in den acht  $\kappa_\Delta$ - Berechnungen betragen:

2,0°C :  $\kappa_\Delta = 66,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( $\alpha \sim 22,2$ )  
 37,7°C :  $\kappa_\Delta = 72,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  ( $\alpha \sim 24,0$ )

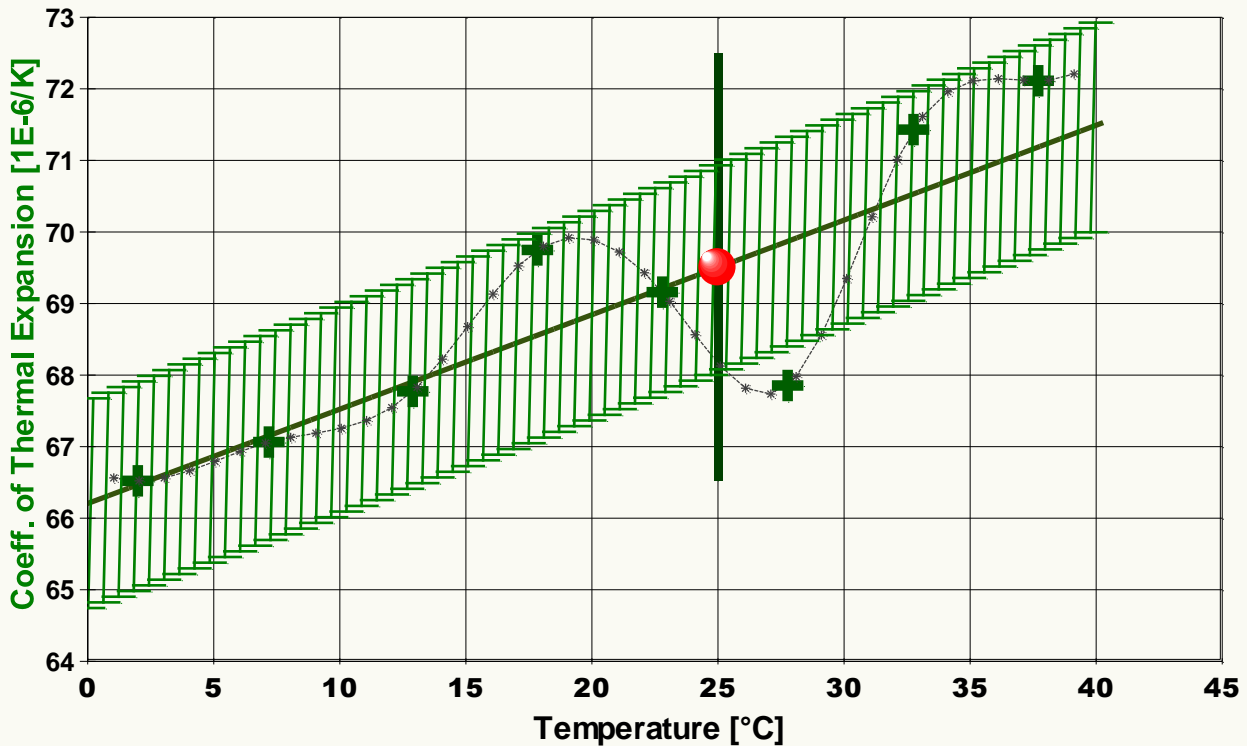
Eine Regression 3. Ordnung über die Einzelwerte erlaubt  $\kappa$  im Intervall als Funktion der Temperatur zu berechnen:

$$\kappa_\Delta \text{ [} 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} \text{]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = 65,56 + 0,3904 \cdot \vartheta - 0,01855 \cdot \vartheta^2 + 3,427 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^3 \quad (\text{Gl.3})$$

mit  $r^2 = 0,81$  und  $\sigma_{\kappa_\Delta} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\sigma_{M \kappa_\Delta} = 0 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$

Für 25°C ergibt sich  $\kappa_\Delta$  aus der Gleichung zu  $69 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ . Im Diagramm 'Drho' sind neben der relativen Dichteänderung auch die einzelnen Differenzenquotienten und die Standardabweichung der Gleichung eingezeichnet. Die nachfolgende Behandlung des Ausdehnungskoeffizienten führt die Berechnung jedoch unmittelbar über die Regressionsfunktion zur Temperaturabhängigkeit der Dichte aus. Aus dieser Form wird der Angabewert für  $\kappa$  verwendet - er wird dadurch um 0,4 Einheiten bzw. 0,6% größer angegeben.

(6) *Diagramm 'kappa(T)' - der Ausdehnungskoeffizient:*



Das Diagramm 5 "kappa(T)" zeigt den Temperaturverlauf des Ausdehnungskoeffizienten an. Am Abszissenwert kann unmittelbar die relative Volumenänderung des Probenmaterials in 'Mikroliter pro Liter und Grad' bei der jeweiligen Temperatur abgelesen werden. Die Breite des schraffierten Bereichs bildet die erweiterte Messunsicherheit ab. Der Angabewert  $\kappa_{25}$  ist als kugelförmiges Symbol eingezeichnet. Im Diagramm sind durch die Kreuz-Markierungen auch die per Differenzenquotienten erhaltenen  $\kappa_d$ -Werte sowie der diskrete Werte-Verlauf in der Glättung durch Splines (Linie mit kleinen Sternmarkierungen) eingetragen [riG 2,07%].

Aus der quadratischen Regressionsgleichung der Dichtemesswerte wird der *thermische isobare und isotherme Raumausdehnungskoeffizienten*  $\kappa$  durch eine Gleichung bestimmt:

$$\kappa \text{ [} 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1} \text{]} = f(\vartheta[\text{°C}]) = (186,813 + 0,358925 \cdot \vartheta) / (2,82167 - 1,86813E-4 \cdot \vartheta - 1,79463E-7 \cdot \vartheta^2) \quad (\text{Gl.4})$$

Für 25°C ergeben Gleichung und Messunsicherheit den Ergebniswert  $\kappa_{25} = 69,5 \pm 1,5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ .

Der für die Angabe der Messunsicherheit bei anderen Temperaturen anzuwendende Relativwert der erweiterten Messunsicherheit  $U_{\kappa}$  beträgt 2,1%. Bei 25 °C zeigt sich eine relative Zunahme des Koeffizienten von 1,9‰ pro Grad. - Der Ausdehnungskoeffizient des Probenmaterials ist hier im Vergleich zu *normalen Feststoffen* metalltypisch groß. Er verläuft mit der Temperatur geringfügig zunehmend.

Um das Volumen bzw. eine Volumenänderung für Aluminium, rein bei einer bestimmten Temperatur  $\vartheta$  im gültigen Temperaturbereich zwischen 0,0 und 40,2°C vorherzusagen, kann mit dem bei der Temperatur  $\vartheta^0$  gegebenen Volumen  $V_{0\vartheta}$  das Volumen  $V_{1\vartheta}$  bei der Temperatur  $\vartheta$  über das entsprechende Verhältnis der Dichten berechnet werden:

$$V_{1\vartheta} = V_{0\vartheta} \cdot (2,8217 - 1,8681 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta - 1,7946 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2) / (2,8217 - 1,8681 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta - 1,7946 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2)$$

Gleichung für ein Kalkulationsprogramm:  $(2,8217 - 1,8681E-4 \cdot x_0 - 1,7946E-7 \cdot x_0^2) / (2,8217 - 1,8681E-4 \cdot x_1 - 1,7946E-7 \cdot x_1^2)$  - mit  $x_0, x_1$  in °C. - Wird stattdessen die angegebene Bestimmungsgleichung für  $\kappa(\vartheta)$  verwendet ( $\kappa = -1/\rho \cdot (\partial\rho/\partial T)$ ), gemäß  $V_1 = V_0(1 + \kappa\Delta T)$  bzw. (besser)  $V_1 = V_0 \exp(\int \kappa(\vartheta) dT)$ .

Die Dimension  $10^{-6} / \text{K}$  für  $\kappa$  bedeutet eine Volumenänderung in Mikroliter pro Liter und Temperaturgrad. Falls das Probenmaterial isotrop ist, kann der lineare Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) im angegebenen Bereich verwendet werden. Mit  $\alpha = \kappa / 3$  bedeutet  $\alpha$  anschaulich, dass ein 1 m langer Stab pro Temperaturgrad bei 25°C seine Länge um 23,2  $\mu\text{m}$  ändert; für eine Dehnung von 1 mm (0.1%) wäre rechnerisch ein  $\Delta T$  von etwa 43 Grad erforderlich.

## • Zusammenfassung zur Messunsicherheit der Einzelwerte

### Messunsicherheit der Dichte - aus der Fortpflanzung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen

nach dem Modell:  $\rho_{\text{Probe}} = (W_2 \cdot \rho_a - W_1 \cdot \rho_{\text{Fl}}) / (W_2 - W_1)$  (Gl.5)

i	$X_j$	$x_j$	$u(x_j)$	$c_j$		$c_j \cdot u(x_j) \text{ [g/cm}^3 \text{]}$	$v_j$	
1	$W_1$	g	216,50230	$1,40 \cdot 10^{-4}$	-0,0238	$1/\text{cm}^3$	$-3,33 \cdot 10^{-5}$	$\infty$
2	$W_2$	g	139,9347	$5,66 \cdot 10^{-4}$	0,0368	$1/\text{cm}^3$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	44
3	$\rho_a$	g/cm <sup>3</sup>	0,0011020	$1,10 \cdot 10^{-6}$	---	---	$-2,01 \cdot 10^{-6}$	$\infty$
4	$\rho_{\text{Fl}}$	g/cm <sup>3</sup>	0,9972534	$5,56 \cdot 10^{-6}$	2,83	---	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$\infty$
$Y \rho_{\text{Probe}}$			g/cm <sup>3</sup>	2,81782	$u(y) = \sqrt{(\sum c_j \cdot u(x_j))^2} =$		$2,63 \cdot 10^{-5}$	$v_{\text{eff}} > 100$

Angabe der erweiterten Messunsicherheit  $U_{\rho}$  aus der kombinierten Standardmessunsicherheit ( $u_{\rho}$ ,  $2,63 \cdot 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup>) mit dem Erweiterungsfaktor  $k_{95} = 1,96$ . Die Werte der Probendichte liegen in der Regel mit einer angenäherten Wahrscheinlichkeit von 95% im Überdeckungsintervall  $\pm 5,2 \cdot 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup> bzw. im Bereich  $\pm 18$  ppm des Messwertes.

Die verwendeten Symbole entsprechen der Nomenklatur des 'GUM' (JCGM 100:2008). Die aufgeführten Eingangsgrößen werden als normalverteilt behandelt. Es bedeuten  $W_1$  das Symbol für die Zufallsvariable  $X_1$  des Wägewerts der Probe; ihr Wert beträgt  $x_1$  g mit der beigeordneten Standardunsicherheit  $u_1(x)$ . Der Sensitivitätskoeffizient  $c_1$  wird aus der partiellen Ableitung der Modellgleichung (Gl.5) nach  $X_1$  mit der Variablen  $x_1$  berechnet. Die Wurzel der summierten Varianzen  $u, c_i$  liefert die kombinierte Standardmessunsicherheit der Feststoffdichte ( $Y \rho_{\text{Probe}}$ ).  $W_2$  steht für die Auftriebswägungen in der Flüssigkeit. Für die Berechnung von  $x_2$  wird der



Mittelwert der Wägungen eingesetzt. Die Standardunsicherheit  $u_2(x)$  wird aus der Messunsicherheit der Waage und Unsicherheit der bei der Auftriebswägung aufgezeichneten Schwankungen der Auftriebskraft bestimmt. Die Anzahl der separaten Auftriebswägungen legt die Angabe der Freiheitsgrade  $\nu_2$  fest (Anzahl - 1 = 44). Die Eingangswerte  $x_1$  und  $u_1(x)$  für das Probengewicht  $W_1$  wurden separat (ggf. extern) bestimmt; weitere Einzelheiten sind in den folgenden Abschnitten angegeben. Das Zeichen  $\rho_a$  steht für die Luftdichte; ihr zugehöriger Größenwert  $x_3$  und  $u_3(x)$  wurde zur Messung angegeben. Das Symbol  $\rho_{Fl}$  steht für die Dichte der Messflüssigkeit. Der für  $\rho_{Fl}$  in  $x_4$  eingesetzte Wert ist der Mittelwert der Flüssigkeitsdichtangaben, wobei  $u_4(x)$  aus der Unsicherheit der Referenzgleichung stammt bzw. empirisch aus zuvor und/oder danach durchgeführten Messungen der Flüssigkeitsdichte übernommen wurde. Die Zahl der effektiven Freiheitsgrade ( $\nu_{eff}$ ) wird nach der Welch-Satterthwaite-Formel berechnet und angegeben. Sie hat dementsprechend Auswirkung auf den Wert des Erweiterungsfaktors  $k$  zur Intervallangabe der Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% und 99%. Ergänzung hierzu: Für  $k_{99}$  wird der Faktor 2,58 erhalten; Dichtewerte liegen mit nahe 99%iger Wahrscheinlichkeit im Überdeckungsintervall  $\pm 6,8 \cdot 10^{-5}$  g/cm<sup>3</sup>.

**Messunsicherheit der Masse** - gemäß der Grundgleichung:

$$m_{Probe} = W_1 \cdot (1 - \rho_a / \rho_{cal}) / (1 - \rho_a / \rho_{Probe}) \quad (Gl.6)$$

$i$	$X_j$	$x_j$	$u(x_j)$	$c_j$		$c_j \cdot u(x_j)$ [g]	$\nu_j$	
1	$W_1$	g	216,5023	$1,40 \cdot 10^{-4}$	1,00	---	$1,40 \cdot 10^{-4}$	-
2	$\rho_a$	g/cm <sup>3</sup>	0,0011020	$1,10 \cdot 10^{-6}$	49,8	cm <sup>3</sup>	$5,48 \cdot 10^{-5}$	-
3	$\rho_{cal}$	g/cm <sup>3</sup>	8,000	$8 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-3}$	cm <sup>3</sup>	$2,98 \cdot 10^{-5}$	-
4	$\rho_{Probe}$	g/cm <sup>3</sup>	2,81782	$2,63 \cdot 10^{-5}$	-0,0301	cm <sup>3</sup>	$-7,92 \cdot 10^{-7}$	-
$Y$	$m_{Probe}$	g	216,5572	$u(y) = \sqrt{(\sum c_j \cdot u(x_j))^2} =$		$1,53 \cdot 10^{-4}$	$\nu_{eff}$	-

Angabe der erweiterten Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Die Masse der Probe  $m_{Probe}$  wird zu  $216,5572 \pm 3,1 \cdot 10^{-4}$  g bestimmt. Die relative Messunsicherheit beträgt 1,4 ppm.

Die Standardmessunsicherheit von  $\rho_{Probe}$  ist die kombinierte Standardmessunsicherheit der Dichtemessung im vorigen Abschnitt. Das Symbol  $\rho_{cal}$  steht für die Dichte des Kalibriergewichtes der Waage.

**Messunsicherheit des Volumens** - über das Verhältnis:

$$V_{Probe} = m_{Probe} / \rho_{Probe}$$

$$u(V_{Probe}) = \sqrt{(u(m_{Probe}) / \rho_{Probe})^2 + (m_{Probe} \cdot u(\rho_{Probe}) / \rho_{Probe}^2)^2} = 0,00072 \text{ cm}^3 \quad (Gl.7)$$

Die erweiterte Messunsicherheit des Probenvolumens wird mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  angegeben, sie beträgt  $0,00144 \text{ cm}^3$  bzw. relativ 19 ppm.

Die Standardmessunsicherheit der Probenmasse  $u(m_{Probe})$  ist die kombinierte Standardmessunsicherheit der Massebestimmung im vorigen Abschnitt.

**Messunsicherheit des kubischen Ausdehnungskoeffizienten** - nach dem linearen Modell:

$$\kappa_{Probe} = -2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) / ((\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot (\rho_1 + \rho_2)) \quad (Gl.8)$$

$i$	$X_j$	$x_j$	$u(x_j)$	$c_j$		$c_j \cdot u(x_j)$ [K <sup>-1</sup> ]	$\nu_j$	
1	$\rho_1$	g/cm <sup>3</sup>	2,821668	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$-8,82 \cdot 10^{-3}$	cm <sup>3</sup> /g·K	$-5,15 \cdot 10^{-7}$	-
2	$\rho_2$	g/cm <sup>3</sup>	2,813876	$5,82 \cdot 10^{-5}$	$8,85 \cdot 10^{-3}$	cm <sup>3</sup> /g·K	$5,15 \cdot 10^{-7}$	-
3	$\vartheta_1$	°C	0,02	0,03	$-1,71 \cdot 10^{-6}$	1/K <sup>2</sup>	$-5,14 \cdot 10^{-8}$	-
4	$\vartheta_2$	°C	40,18	0,03	$1,71 \cdot 10^{-6}$	1/K <sup>2</sup>	$5,14 \cdot 10^{-8}$	-
$Y$	$\kappa_{Probe}$	K <sup>-1</sup>	$6,89 \cdot 10^{-5}$	$u(y) = \sqrt{(\sum c_j \cdot u(x_j))^2} =$		$7,32 \cdot 10^{-7}$	$\nu_{eff}$	-

Die erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) des Ausdehnungskoeffizienten  $U\kappa$  beträgt  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  bei der Temperatur  $20,10^\circ\text{C}$ . Die Messunsicherheit von  $\kappa$  ist zwischen  $0$  und  $40^\circ\text{C}$  über die relative Messunsicherheit von 2,1% weiterzugeben.

Die Symbole  $\rho_1$  und  $\rho_2$  stehen für die Probendichtewerte die zu den Temperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  gehören.

### • Zur Dichte der Messflüssigkeit

Messflüssigkeit 'Wasser, Augsburg, Dest.': Die Dichtedaten wurden als Funktion der Temperatur aus der Referenzdatenbank entnommen. Die Flüssigkeitsdichte  $\rho_{Fl}$  wurde gemäß folgender Bestimmungsgleichung zur jeweiligen Temperatur  $\vartheta$  berechnet:

$$\rho_{Fl} = f(\vartheta[^\circ\text{C}]) = (99983557,6 + 6766,661 \cdot \vartheta - 901,5886 \cdot \vartheta^2 + 9,517959 \cdot \vartheta^3 - 0,1000876 \cdot \vartheta^4 + 5,54E-4 \cdot \vartheta^5) / 1E8 \quad (Gl.9)$$

Beiträge zur Unsicherheit der Flüssigkeitsdichte  $u(\rho_{Fl})$  wurden ebenfalls aus den Referenzdaten bezogen ( $u(\rho_{L,Equ.}) = 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ ) sowie aus der Messunsicherheit der Temperatur ( $u(\rho_{L,Temp.}) = 4,75 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ ) bestimmt und belaufen sich damit auf  $5,56 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ .  $u(\rho_{Fl})$  steuert mit einem Beitrag von 36% einen wesentlichen Anteil zur Gesamtmessunsicherheit der Probendichte bei.

**BEARBEITUNGSHINWEISE:** Beachten Sie bitte, dass die Messunsicherheit der Flüssigkeitsdichte vom System automatisch eingesetzt wurde. Geben Sie ggf. den realistischen Zahlenwert im Datenblatt an. Die Unsicherheit der Flüssigkeitsdichte wird durch die Präzision der Temperaturangabe wesentlich mitbestimmt. Neben der vom System vorgegebenen Messunsicherheit der Temperatur (0,03 K) wird die während der Messung registrierte Schwankung (2,08E-3 K) berücksichtigt.

### • Probenhandhabung und Messtechnik

Das Gewicht von Prüfkörper und Halterung (gesamt 216,6969 g) extern bestimmt. Einsatz einer variablen Prüfkörperaufhängung. Für die Probenbefestigung werden  $0,1946 \pm 0,00005 \text{ g}$  Gewicht berücksichtigt. Zur Auftriebskorrektur durch das Volumen des Probenhalters werden seine Dichte  $18,7 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  und sein kubischer Ausdehnungskoeffizient  $12,9 \pm 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  mit der Bezugstemperatur  $25^\circ\text{C}$  herangezogen. Für die angewendete IMETER-Patentmethode (Meniskus- und Drifteliminierverfahren) wurde der Aufhängungsquerschnitt mit  $0,0314 \text{ mm}^2$  angegeben. Über den Niveau-Unterschied von durchweg 4 mm zwischen Bezugskraft- und Auftriebskraft-Messung ergibt sich ein Beitrag von  $0,13 \text{ mm}^3$ , um den der Volumenauftrieb korrigiert wird.

Jedem messtechnischen Größenwert ist ein Unsicherheitsbetrag zugeordnet. Die Unsicherheitsbeiträge sind von einander unabhängig und wirken sich über die Fortpflanzung der Messunsicherheit (in  $u(W_1)$  und  $u(W_2)$ ) in der Unsicherheit der Ergebnisse dieser Messung direkt aus. Der Unsicherheit aus dem Prüfmittel Waage - **Bearbeitungshinweis:** Da verschiedene Handhabungen, Arbeitsmodi, Probenhalterungen sowie unterschiedliche Quellen und Ausprägungen von Messunsicherheiten auftreten, ist die Rückkopplung über Abläufe und eingesetzte Technik für die Prüfung und Programmentwicklung unabdingbar. Beiträge zur Messunsicherheit des Probengewichts  $u(W_1)$  aus dem Zustand und den Eigenschaften der Waage  $\Rightarrow$  Unsicherheitsbeiträge der Probenwägung mit Verteilungsfaktoren: Reproduzierbarkeit  $u(W\delta_{Rep}) = 50 \mu\text{g} / \sqrt{3}$ , Nullpunkt der Anzeige  $u(W\delta_{Zero}) = 0,10 \text{ mg} / \sqrt{3}$ , Linearität der Anzeige  $u(W\delta_{Lin}) = 0,20 \text{ mg} / \sqrt{3}$ , Justier/Kalibrierreferenz, OIML E2,  $u(W\delta_{cal.}) = 6,9$

ng / 2, Zeit seit letzter Justierung, 50 µg/Tag,  $u(W_{\Delta_{\text{real}}})=7 \mu\text{g} / \sqrt{3}$ . - und entsprechende Messunsicherheitsbeiträge bei der Auftriebswägung als Rückkopplung zu  $u(W_2)$   
 $\Rightarrow$  Unsicherheitsbeiträge der Auftriebswägung, kurz:  $u(W_{\delta_{\text{Rep}}})=50 \mu\text{g} / \sqrt{3}$ ,  $u(W_{\delta_{\text{Zero}}})=0,10 \text{ mg} / \sqrt{3}$ ,  $u(W_{\Delta W})=47 \mu\text{g} / \sqrt{45}$ ,  $u(W_{\delta_{\text{Lin}}})=0,13 \text{ mg} / \sqrt{3}$ ,  $u(W_{\delta_{\text{meas}}})=11 \text{ ng} / 2$ ,  
 $u(W_{\Delta_{\text{Tcal}}})=70 \mu\text{g} / \sqrt{3}$ ,  $u(W_{\Delta_{\text{real}}})=7 \mu\text{g} / \sqrt{3}$ .

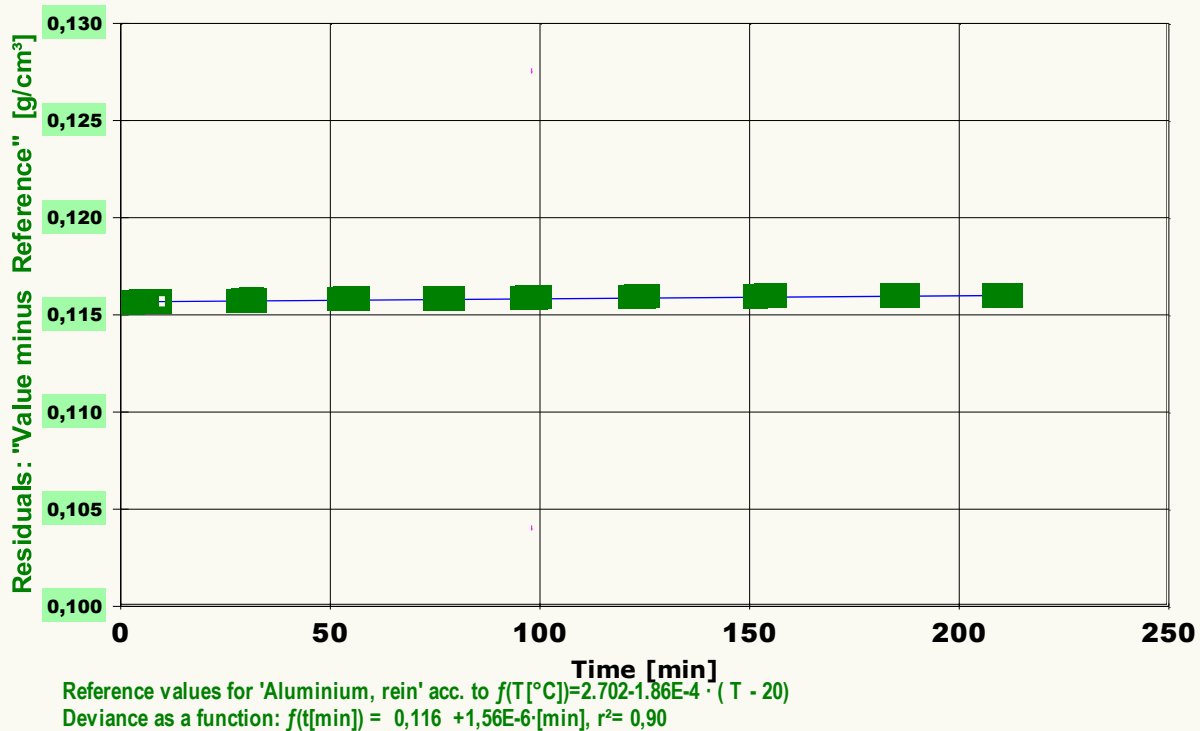
• **Referenzvergleich mit "Aluminium, rein" für 25°C**

	Referenz	Messung	$\Delta$ absolut	$\Delta$ relativ	$\Delta / u$
$\rho$	2,701	2,817	+0,116 g/cm <sup>3</sup>	4%	<b>2231</b>
$-\Delta\rho/\Delta T$	190	196	+6 g·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup>	3%	@

Zum Vergleich der Werte wurde das Messergebnis auf die Präzision der Referenzangabe gerundet. Die Datenbank liefert für  $\rho$  mit **Aluminium 2014, gehärtet**, 2,8 g/cm<sup>3</sup>, einen genaueren Vergleichswert. Der Unterschied zum Messwert beträgt hier 0,017 g/cm<sup>3</sup>.

Der Ergebnisvergleich mit den Angaben, die in der Referenzdatenbank zu 'ALUMINIUM, REIN' gefunden wurden, stellt die Werteübereinstimmung dar. Der Unterschied wird als absolute Differenz "Probenmesswert minus Referenzwert" und als relative Abweichung angegeben. Das Symbol  $\rho$  steht für die Messgröße,  $-\Delta\rho/\Delta T$  für die absolute Änderung bei einem Grad Temperaturabnahme (bei 25°C); die Zahl zu " $\Delta u$ " gibt ggf. an, um welchen Faktor die absolute Differenz von Mess- und Referenzwert größer ist als die angenommene Messunsicherheit. Das Zeichen "@" bringt zum Ausdruck, dass bei der Messgröße kein signifikanter Unterschied zwischen Mess- und Referenzwert auftritt.

(7) **Diagramm 'Messwerteabweichung' - Darstellung der berechneten Residuen:**



Im Diagramm "Messwerteabweichung" wird die (temperaturkompensierte) Abweichung der einzelnen Messwerte zum Referenzwert in zeitlicher Reihe angezeigt. Bei einem gesetzmäßigen Verlauf dieser Residuen wird eine entsprechende lineare oder quadratische Regressionsgleichung ausgegeben.

Im Diagramm wird der Vergleich mit den Daten der gleichnamigen Referenz angezeigt. Der Unterschied zum Referenzwert kann rechnerisch auf einen bestimmte Menge **Kupfer, rein** zurückgeführt werden.

• **Berechnete Zusammensetzung - binäre Mischung**

		% $m/m$	% $V/V$	absolut [g]
Aluminium, rein	:	<b>94,103</b>	<b>98,140</b>	203,7864
Kupfer, rein	:	<b>5,897</b>	<b>1,860</b>	12,7708

Die Bestimmung des Mischungsverhältnisses basiert auf vorliegenden Datenbankeinträgen:

**Aluminium, rein, ID20189.1:**  $\rho_1 = f(\vartheta[^\circ\text{C}])=2.702-1.86E-4 \cdot (\vartheta - 20)$

Präzision: drei gültige Nachkommastellen.

**Kupfer, rein, ID20221.1:**  $\rho_2 = f(\vartheta[^\circ\text{C}])=8.9331-4.502E-4 \cdot (\vartheta - 25)$

Präzision: vier gültige Dezimalen.

$\phi_{1/2}$  - **Mischungskoeffizient:** keiner, es wird ideales Mischungsverhalten angenommen.

Die Berechnung der Reinheit bzw. des Gehalts beruht auf der Beziehung:  $\rho_{\text{Ges}} = (m_1+m_2) / (m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2)$ . Dabei ist  $\rho_{\text{Ges}}$  der hier gemessene Dichtewert, dessen Verhältnis in der Summe der Massen ( $m_1 + m_2$ ) und der Volumen (jeweils  $V=m/\rho$ ) analysiert wird. Für  $\rho_1$  wird die Dichte der Referenz 'Aluminium, rein' eingesetzt. Der  $\phi_{1/2}$  - Koeffizient, der bei relativ hoher Reinheit von "1" kaum verschieden ist und aus ermittelten Dichtewerten der Komponentenmischung dargestellt wird (er ist konzentrationsabhängig), ist der Zahlenwert, der mit  $\rho_1$  multipliziert wird. Er drückt den Schwund ( $\phi_{1/2} > 1$ ) oder die Expansion ( $\phi_{1/2} < 1$ ) durch die Wirkung der Mischung auf die Gesamtdichte aus. Der Wert '1' ist, wie angegeben, für Konglomerate, Lunker, ideale Mischungen sowie in der Regel bei geringfügigen Beimengungen



annehmbare. Bei höheren Anteilen der Verunreinigung (Kupfer, rein) kann sich ein nicht ermittelter  $\phi_{1/2}$  - Koeffizient verstärkt auswirken! **Bearbeitungshinweis:** Bitte beachten Sie, dass Referenzdaten und ggf. der Mischungskoeffizient exakt und korrekt für diese Stoffe zutreffen müssen. Sie können Richtigkeit oder zumindest die Plausibilität z.B. durch Standardadditionsverfahren oder andere Analysen der Zusammensetzung überprüfen.

Die Tabelle unten zeigt die besten Treffer in der Datenbank und deren prozentuale Abweichung zum Dichtemesswert. Einige der Referenzeinträge sind mit Zusatzinformationen versehen. Bei Mineralien werden oft die Mohs-Härte 'MH', Strichfarbe 'SF', metallischer/nichtmetallischer Glanz 'mG/nmG' und andere Angaben ausgegeben. Bei Metallen und Legierungen werden ggf. kurze Zusatzinformationen mitgeliefert, wie 'M' = E-Modul [kp/mm<sup>2</sup>], 'Ts' Schmelztemperatur [°C], 'wLF' Wärmeleitfähigkeit [cal/cm s K], 'k' linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient [1E-6/K], 'sW' spezifische Wärme [cal/K g], 'eLF' elektrische Leitfähigkeit [m/Ohm mm<sup>2</sup>], 'RkT' Temperaturkoeff. des elektrischen Widerstands [1/K]. **Bearbeitungshinweis:** Weitere Informationen finden Sie im jeweiligen Datenbankeintrag. Sie können Referenzdaten entsprechend aktualisieren oder erweitern, um Messergebnisse mit dienlichen Informationen zur 'Ähnlichkeit' von Dichtedaten anzureichern.

## •Vergleichstabelle

REF ERENZ	g/cm <sup>3</sup>	ABWEICHUNG	INFO
1. Talk <sup>2</sup>	2,8	-0,6%	SF weiss, nmG, MH 1
2. Polyhalit <sup>2</sup>	2,8	-0,6%	SF rot, nmG, MH 2 - 6,5
3. Muskovit <sup>2</sup>	2,8	-0,6%	SF weiss, nmG, MH 2-3
4. Aluminium 2014, gehärtet <sup>1</sup>	2,8	-0,63%	
5. Bleiglas (25% PbO) <sup>2</sup>	2,89	+2,6%	
6. Datolith <sup>2</sup>	2,9	+3,0%	SF weiss, nmG, MH 5-6
7. Dolomit <sup>2</sup>	2,9	+3,0%	SF weiss, nmG, MH 3-4
8. Aluminium, rein <sup>1</sup>	2,701	-4,1%	

<sup>1</sup>Wert für 25°C berechnet, <sup>2</sup>tabellierter Referenzwert. Stoffdaten nur aus dem Referenzdatenbestand

Die Liste wird in fallender Reihenfolge der Übereinstimmung aus den besten Treffern in den Einträgen der Referenzdatenbank generiert. Die Vergleichsdaten werden in der Präzision der jeweiligen Eintragsangabe formatiert und die relative Abweichung zum Angabewert der Messung angegeben. **Bearbeitungshinweis:** Herkunft bzw. Richtigkeit der jeweiligen Referenzdaten sowie ggf. Zusatzinformationen können über den Vermerk zur Substanz in der Referenzdatenbank geprüft/geändert werden.

In diesem Bericht werden nicht alle verfügbaren Diagramme ausgegeben. Sie können die Ausgabe der Grafiken durch Aktivierung der entsprechenden "Checkboxen" (unter der Registerkarte "Optionen") bewirken.

**Nicht angezeigte Charts bzw. Auswertungskapitel:** Mit Diagramm 3 "roh(t)" werden Messwerte in zeitlicher Form angezeigt.

**Berichtseinstellungen - aktivierte Ausgabeeinstellungen:** Datenbankvorschläge anzeigen, Erläuterungstexte, detaillierte Ergebnisse, allgemeine Angaben, Vergleichsanalyse, alternative Einheiten, Zusatzinformationen, Bearbeitungshinweise, formatierte Tabellen, Prüfmittelüberwachung, Online-Protokoll, Status und Ausführungshinweise, Berichtseinstellungen, Authentifizierungen.

**Beschränkte Informationsausgabe durch negierte Optionen:** Audit-Trail, sensorische Zusatzdaten + IFG-Ereignisse werden nicht angezeigt.

**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% normalverteilter Werte.

**Form und Informationsfülle** des Prüfberichts ist dadurch bedingt, dass Messdaten durch die zahlreichen Freiheitsgrade sehr vielgestaltig auftreten können. Die Variablen der Messung müssen vollständig dargestellt werden können, um verifizierbar zu sein. Vollständigkeit ist Voraussetzung für die Überprüfbarkeit und Haltbarkeit der Resultate sowie abgeleiteter Schlussfolgerungen. Nicht zuletzt erfordern einschlägige Bestimmungen (GxP, FDA cfr.11/21 etc.) zusammen mit schlicht zeitökonomischen Erwägungen diesen hiermit Großteils erledigten Aufwand. [Prüfberichte, wie dieser, werden dynamisch aus Metadaten erzeugt und benötigen daher sehr wenig Speicherplatz in der Datenbank]. Bei Routinemessungen und/oder für die evtl. parallel noch papieren geführte Ablage sollten die Prüfberichte zur Ressourcenschonung durch entsprechende Einstellungen der Formatier- und Ausgabeoptionen auf das Wesentliche gekürzt werden. Das ganze 'File', inklusive der zu Grunde liegenden Rohdaten, ist stets über die ID (hier Nummer 7234, Datenbank imeterData14) auffindbar und als Referenz oder Vergleich nutzbar. Ggf. enthalten nachfolgend ausgegebene Informationen, je nach Einstellungen und Berichtsvorlage (Stil = 'standard-i1'), verschieden detaillierte Begleitinformationen, wie die Angaben zur Ausführung der Messung, den Audit-Trail und Hinweise zur Prüfmittelüberwachung.

## Programm

Data created during execution of the IMPro "FK\_Dichte\_Ausdehnungskoeff", type 9/136. Measuring process performed accordingly.

## Prüfmittel

Die Kraftmesseinrichtung (WZ224-CW) wurde zuletzt während dieser Messung bei einem 1-Tage Intervall der Prüfmittelüberwachung justiert.

**IMETER ID16405542: Technische Daten:** Auflösung des Wägesystems 0,1 mg, Messunsicherheit (Linearität)<sup>\*)</sup> 0,4 mg, Dichte der Justiermasse  $\rho_{cal}$ <sup>\*)</sup> 8,000 g/cm<sup>3</sup>, Luftdichte  $\rho_a$ <sup>\*)</sup> 1,102 kg/m<sup>3</sup>; Schwerebeschleunigung  $g$ <sup>\*)</sup> 9,80769 m/sec<sup>2</sup>. Die Messauflösung der Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit<sup>\*)</sup> 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 4.1.109, LizenzN° \*3037-4759\*, Windows 5.1- Betriebssystem auf PC Ser.N°143431694 (C, iTop).

<sup>\*)</sup>: **Bearbeitungshinweis:** Die gekennzeichneten Angaben der Systemdaten können nachträglich angepasst werden - etwa um individuelle Messunsicherheiten durch den Messaufbau wirksam werden zu lassen. Änderungen auch an diesen Daten werden im Audit-Log protokolliert und können zurückgenommen werden. - Deaktivieren Sie doch bitte die Bearbeitungshinweise für Kundenberichte!

### Neun Justierungen der Wägezelle während der Messung:

1.	Zeit: 1,1	[min]	Korrektur: -0,0035 [g]
2.	Zeit: 25,7	[min]	Korrektur: -0,0004 [g]
3.	Zeit: 51,4	[min]	Korrektur: -0,0003 [g]
4.	Zeit: 74,2	[min]	Korrektur: -0,0002 [g]
5.	Zeit: 94,8	[min]	Korrektur: -0,0001 [g]
6.	Zeit: 120,4	[min]	Korrektur: 0,0000 [g]
7.	Zeit: 148,5	[min]	Korrektur: 0,0000 [g]

8.	Zeit: 182,9	[min]	Korrektur: 0,0002 [g]
9.	Zeit: 203,3	[min]	Korrektur: -0,0001 [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 'imeterData14.cal' gesondert gespeichert).

Report created by IMETER

[Das Beispiel soll bei dem Feature *Gehaltsbestimmung* nicht missverstanden werden: Werkstoffaluminium besteht natürlich nicht schlicht aus Reinaluminium und Kupfer. Oft sind Magnesium, Silizium, Titan, Zink, Eisen, Mangan, Chrom in Anteilen in den Legierungen zugegen ...]

„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 weiteranalysiert werden.

Jeder, der Messreihen zusammenfasst, forscht, auswertet, QS-Statistiken führt etc., kennt den Fall, dass manche Werte nicht ins Bild passen. Ausreißer? Die Dokumentation von Messungen, wie sie IMETER bietet, erlaubt es, sehr viel später noch die Plausibilität zu überprüfen. Das spart Zeit, Geld und Nerven, gibt Sicherheit und fördert Entdeckungen.



Messtechnik - nachhaltig zusammengefasst

Intelligenter messen.

- ◆ Feststoff- und Flüssigkeitsdichte, Ausdehnungskoeffs.
- ◆ Grenz-, Oberflächenspannung und ~Energie
- ◆ Viskosität, Rheologie, Konsistenz, Textur
- ◆ (Aus-)Härtungszeit, Porosität, Sorptivität u.v.a.
- ◆ freie und spezifische Automationen

©2017 IMETER/MSB Breitwieser MessSysteme

Verantwortung: Michael Breitwieser,

Morellstrasse 4, D-86159 Augsburg

Tel. (+49/0)821/706450, Fax (0)821/7473489

[www.imeter.de](http://www.imeter.de)

IMETER - Dienstleistungen:

[www.imeter.de/adienstleistungen.html](http://www.imeter.de/adienstleistungen.html)

Probieren Sie 's einfach!