Bericht zur Messung der Feststoffdichte an einem Körper mit negativer Wärmedehnung

©2017 IMETER - MessSysteme
Tel. (+49)(0) 821/706450

www.imeter.de

IMETER Anwendungen

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. Variabel sind ja nicht nur die Messdaten, sondern auch Umstände, Abläufe und die Eigenschaften der Normale. Daher verfügt IMETER zum einen über eine Modellier-sprache, 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.

Dichte und Wärmedehnung sind im Großen und Kleinen Eigenschaften, mit welchen in Materialwissenschaften umgegangen wird und besonders die Wärmedehnung ist ein sehr wichtiger Faktor. Bei Materialverbünden und beim Verkleben von Materialien verursacht die thermische Dehnung allzu oft die Alterung. Denn die Materialien bewegen sich dann mit Temperaturänderungen gegeneinander, wenn die Ausdehnungskoeffizienten verschieden sind, was die Regel ist. Die Verbundstellen werden belastet und verschleißen. Innerhalb von Materialverbünden entstehen mechanische Spannungen, wenn sich die Temperatur ändert. Gerade in der Mikroelektronik, wo sich Bauteile rasch aufheizen können, ist dies ein Problem, das gerne gelöst wäre. Thermische Spannungen zerstören einfachere Glassorten beim Abschrecken – sie haben relativ hohe Ausdehnungskoeffizienten, wohingegen Quarzglas fast glühend in Wasser abgeschreckt werden kann, ohne dass es zerspringt. Es hat einen kleinen Temperaturkoeffizienten. Neben der *Temperaturwechsel-Selbstzerlegung* im Allgemeinen ist ein weiterer Aspekt der Wärmedehnung die Maßhaltigkeit. Darum werden für besondere Instrumente und präzise Optiken kostbare Materialien wie Invar® oder Zerodur® eingesetzt. Diese haben minimale Ausdehnungskoeffizienten und sind ziemlich teuer. Daher werden sie nur für ausgesuchte Anwendungen eingesetzt.

Könnte eine Möglichkeit gefunden werden, günstigere Werkstoffe in ihrer Wärmedehnung zu manipulieren, dürften sich daraus neue, weitreichende Anwendungsmöglichkeiten erschließen. Sei es, indem verschiedene Stoffarten in Punkto Wärmedehnung kompatibel gemacht würden oder indem die Wärmedehnung soweit abgestellt wird, dass Werkstoffe sich bei Temperaturänderung nicht mehr in sich verspannen und damit langlebiger werden, da sie weniger Alterungswirkungen erfahren (Langlebigkeit bzw. Nachhaltigkeit). Allgemein könnten solchermaßen Präzisionswerkstoffe entstehen, die bisher hochpreisige Applikationen sehr verbilligen.

Die Naturgesetze können natürlich nicht manipuliert werden, doch sind offenbar in der Materialforschung Möglichkeiten außer Acht gelassen. Nämlich solche abseits der kompositorischen und molekularen Zugänge, solche aus geometrischen Erwägungen synthetisierte. – Nun, ändert sich bei einem sphärisch gewölbten Objekt die Temperatur, dann führt dies zu einer Kompression/Dilatation im Material. Das fällt gar nicht auf, ist nach außen hin, d.h. volumenbezogen, symmetrisch. Die thermische Dehnung wird als mechanische Spannung im Kompressionsmodul gespeichert. Was wäre, wenn solche Strukturen aus verschiedenen Materialien die gegeneinander konkav/konvex angeordnet sind? Etwa ineinander stehenden Röhren? Etwa ein Innenrohr mit großer Wärmedehnung und eine Außenhülle aus einem Material mit geringerem Ausdehnungskoeffizienten? – Im Beispiel dieser Messung ist in ein Quarzrohr ein AR-Glasrohr eingesetzt; die Wärmedehnung des weichen AR-Glases ist deutlich größer als die des umgebenden Quarzglases. Das Innenrohr dehnt sich stärker als das Außenrohr mit der Folge, dass das Volumen kleiner wird!
Im Beispiel dieses Prüfberichts wurde dieser Körper per Feststoffdichtemessung untersucht: Das Volumen des Körpers verringert sich bei Temperaturerhöhung, die Dichte nimmt zu, die Dilatation ist negativ!

ID N° 11396 - Density of Solids & Coefficient of thermal Expansion

Title: **MK "Nullausdehnung" – KoMAK11**
Remarks: Test des Messkörpers "Doppelrohr" Höhe 90mm, Außenrohr: Quarz / Innenrohr: AR-Weichglas. Prüfung in dest. Wasser
Result: $\varrho_{10,00°C}$ **= 1,62245 ±0,00001 g/cm³, κ = (-13,14 ±1,02)·10⁻⁶·K⁻¹**
Sample measured in '*Wasser*'

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, 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 60 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 - MK "Nullausdehnung" - Wasser

- Angaben für ϑ = 10,00 ±0,03°C, Luftdichte bei der Probenwägung ρ_a = 1,1336 ±0,001 kg/m³ -

Dichte, spezifische Masse	ϱ	**1,622454**	**± 0,000012**	**g/cm³**	**7,4 ppm**
Ausdehnungskoeffizient	κ	**-13,14**	**± 1,02**	**10⁻⁶·K⁻¹**	**7,7%**
Probenvolumen	V	**39,3226**	**± 0,00030**	**cm³**	**7,6 ppm**
Masse der Probe	m	**63,79904**	**± 0,00016**	**g**	**2,5 ppm**
Wägewert, Probengewicht	W	**63,7635**	**± 0,00015**	**g**	
relative Dichte	ϱ_4^ϑ	**1,622494**	**---**	ϱ_{20}^ϑ 1,625368	
spezifisches Volumen	v_s	**0,6163503**	**cm³/g**		

- Weitere Stoff- und Körpermaßeinheiten zu ρ_a = 1.20 kg/m³ und g = 9.81 m/s² -

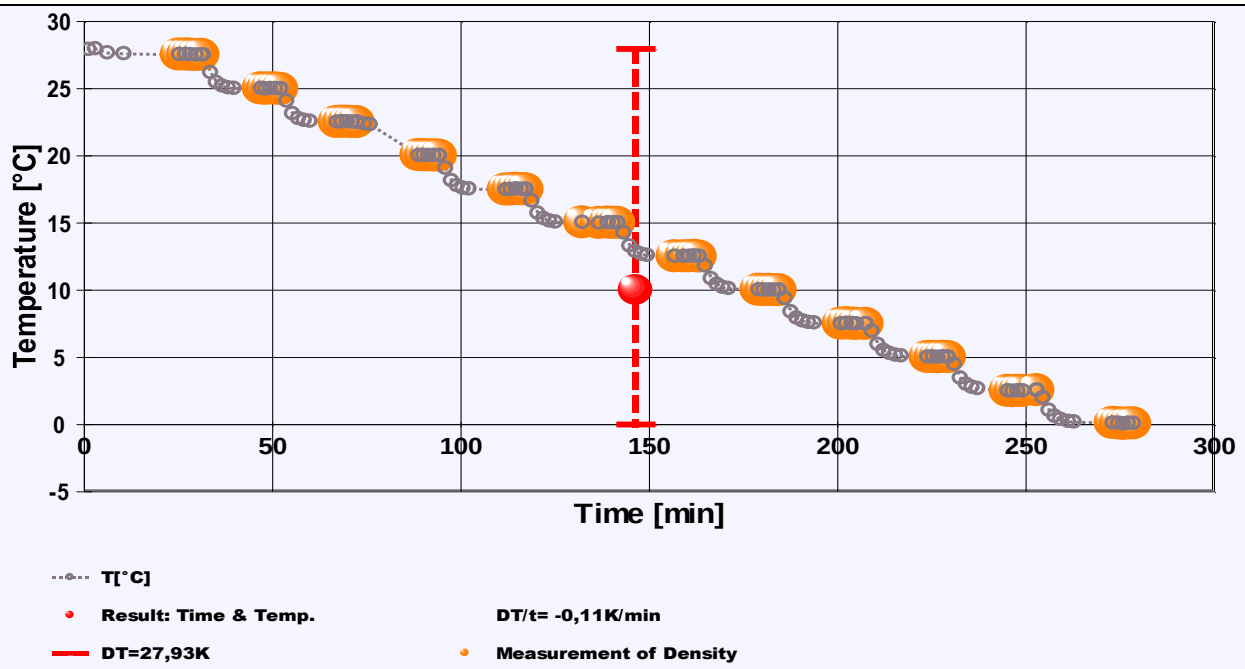
konventioneller Wägewert	W_k	**63,7614**	**g**	
Gewichtskraft	G	**625,500**	**mN**	625,286 p
Wichte, spez. Gewicht	γ	**15,91627**	**N/cm³**	15,91084 p/cm³

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 Reindichte gemessen werden konnte, andernfalls ist das Ergbnis eine Rohdichte bzw. scheinbare Dichte sowie eine scheinbare Masse. Zur isobaren thermischen Wärmedehnung können drei Kennzahlen für die Messtemperatur 10°C angegeben werden: Der Temperaturkoeffizient der Dichte ($^{\Delta\varrho}/_{\Delta T}$ = 21,3 mg/gK), der angegebene kubische Ausdehnungskoeffizient (κ) und der lineare Ausdehnungskoeffizient mit α= -4,38 10⁻⁶·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 35,5 mg größer als der Wägewert angibt; materialbezogen beträgt der Unterschied bei der vorliegenden Luftdichte rund 0,6‰. Für die Angabe des 'konventionellen Wägewertes', der 'Gewichtskraft' und der 'Wichte' γ = ϱ·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°C (ρ =0.999975 g/cm³) und 20°C (ρ =0.998207 g/cm³). 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 0,9378378 oz/in³. Im Folgenden erhalten Sie Beschreibungen zu den Einzelheiten der durchgeführten Messung.

• 60 Dichtemesswerte

Gesamtdauer der Aufzeichnungen in der Messung fünf Stunden; stufig, zwischen 28,0 und 0,0°C abfallender Temperaturverlauf, zwölf Temperaturniveaus; mit elf Stufen; 2,5 K Temperaturunterschied je Stufe, mit jeweils fünf Messwerten.

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



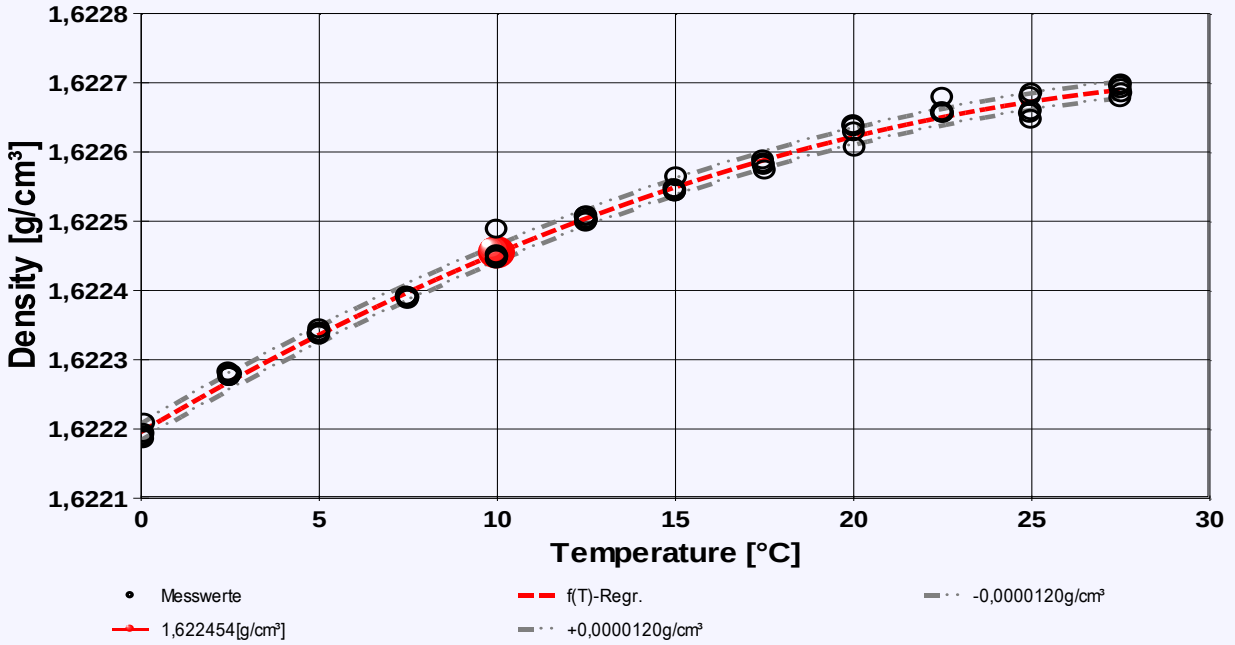
Im Diagramm "T(t)" wird eine Übersicht zum zeitlichen Verlauf der Vorgänge und der dabei gemessenen Temperatur gezeigt. Bedeutung der eingezeichneten Symbole: Die Kreismarkierungen zeigen die Temperaturmessungen an, die kugelförmigen Marken stehen für Zeitpunkt und Temperaturzuordnung von Auftriebsmesswerten. 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 60 Einzelergebnisse (0,03 bis 27,53°C), ebenso die Angaben zur Wärmedehnungermittelt. Grundlage ist die Gleichung:

$$\varrho(T) = f(\vartheta[°C]) = 1{,}6221959 + 3{,}0266604 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta - 4{,}4761591 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^{2} \qquad \text{(Gl.1)}$$

Die Bestimmtheit der Gleichung ist, gemäß Korrelationskoeffizient r^2=0,9953, *einigermaßen gut*. Die Standardabweichung σ_ϱ der Gleichung beträgt $1{,}1 \cdot 10^{-5}$ g/cm^3 und die Standardabweichung des Mittelwertes $\sigma_{M\varrho}$ $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ g/cm^3. Die empirische Streuung σ_ϱ ist kleiner als die erweiterte Standardmessunsicherheit U_ϱ $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ g/cm^3. Die Gleichung kann zur Repräsentation der Wertemenge im Temperaturintervall mit der beigeordneten relativen Unsicherheit U_ϱ 7,4 ppm verwendet werden.

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



Das Diagramm "rho(T)" zeigt die 60 Dichtemesswerte als Kreissymbole in Temperaturabhängigkeit an. Es werden Messwerte mit dem Bereich der Messunsicherheit in Form einer gestrichelten Linie eingefasst.

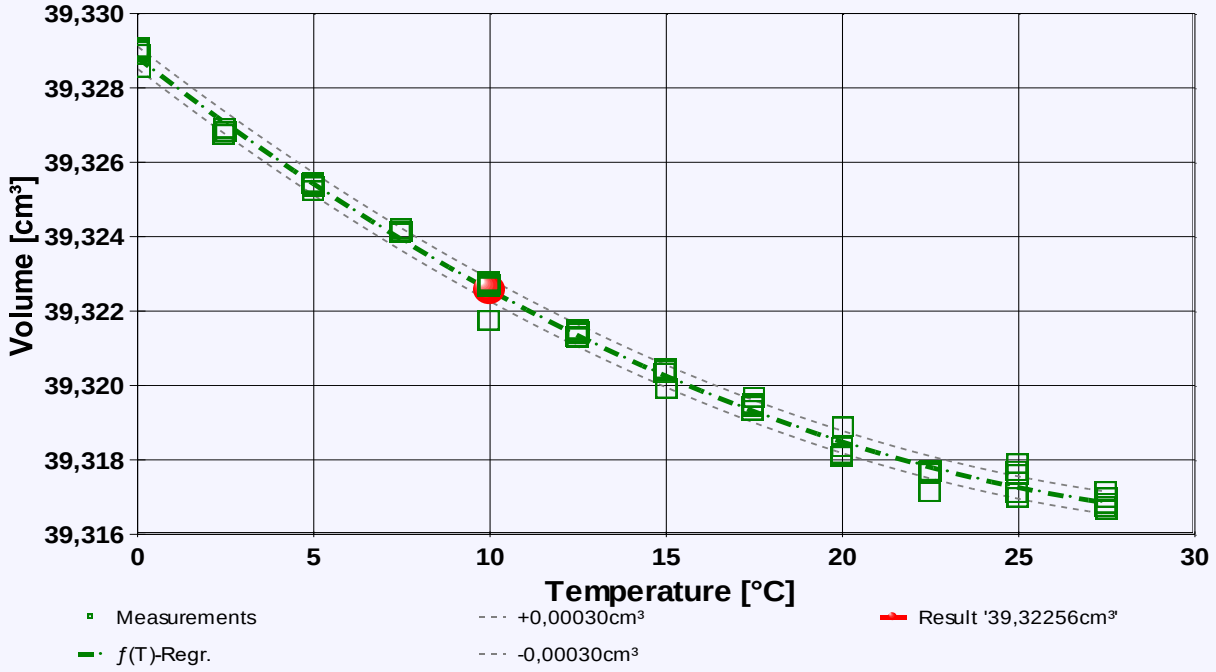
(3) Datentabelle - Zusammenstellung der Roh- und Ergebniswerte:

N° [min]	t [°C]	ϑ [g/cm³]	ρ_{Fl} [g/cm³]	ϱ_{Probe} [cm³]	V_{Probe} [s]	$\Delta t_{Akqu.}$ [K]	ΔT [g/cm³]	$\Delta\varrho_{Probe}$	N
1.	25,2	27,52	0,996372	1,6226978	39,31665	4,2	0,00	3,4E-6	4
2.	26,8	27,53	0,996370	1,6226848	39,31696	9,0	0,00	5,9E-6	7
3.	28,1	27,51	0,996375	1,6226910	39,31681	1,8	0,00	1,7E-6	2
4.	29,6	27,49	0,996381	1,6226950	39,31672	4,8	0,00	3,0E-6	4
5.	31,2	27,50	0,996378	1,6226778	39,31713	1,8	0,00	1,2E-6	2
6.	47,0	25,00	0,997048	1,6226846	39,31697	1,8	0,00	8,4E-7	2
7.	48,1	24,97	0,997056	1,6226796	39,31709	3,0	0,00	4,5E-7	3
8.	49,3	24,99	0,997051	1,6226591	39,31759	3,0	0,00	-2,1E-6	3
9.	50,6	24,99	0,997051	1,6226469	39,31788	3,6	0,00	4,6E-6	3
10.	52,1	24,96	0,997058	1,6226552	39,31768	1,8	0,00	1,7E-6	2
11.	67,1	22,50	0,997658	1,6226785	39,31712	4,8	0,00	1,2E-5	4
12.	68,4	22,52	0,997654	1,6226550	39,31769	1,2	0,00	3,9E-7	2
13.	69,7	22,52	0,997654	1,6226559	39,31767	3,6	-	-	3
14.	71,1	22,50	0,997658	1,6226579	39,31762	1,2	0,00	2,5E-6	2
15.	72,4	22,49	0,997661	1,6226559	39,31767	1,8	0,00	2,1E-6	2
16.	88,8	20,04	0,998198	1,6226064	39,31886	3,0	-0,01	-3,9E-6	3
17.	90,1	20,02	0,998202	1,6226286	39,31832	1,8	-	-	2
18.	91,4	20,01	0,998204	1,6226371	39,31812	4,2	0,00	1,7E-6	4
19.	92,7	20,01	0,998204	1,6226358	39,31815	8,4	0,00	-3,9E-7	6
20.	94,1	20,00	0,998206	1,6226391	39,31807	6,6	0,00	-8,4E-7	5
21.	112,0	17,47	0,998694	1,6225881	39,31931	1,8	0,00	-1,3E-6	2
22.	113,3	17,48	0,998692	1,6225835	39,31942	1,8	0,00	8,4E-7	2
23.	114,6	17,52	0,998685	1,6225735	39,31966	1,8	0,00	2,5E-6	2
24.	116,0	17,49	0,998690	1,6225814	39,31947	3,0	0,00	1,7E-6	3
25.	117,2	17,49	0,998690	1,6225801	39,31950	1,8	-	-	2
26.	132,1	15,03	0,999097	1,6225638	39,31990	9,6	0,00	1,7E-6	7
27.	136,7	14,98	0,999105	1,6225467	39,32031	1,8	0,00	8,4E-7	2
28.	139,0	15,01	0,999100	1,6225440	39,32038	6,6	0,00	8,4E-7	5
29.	140,4	15,00	0,999102	1,6225418	39,32043	1,2	0,00	8,4E-7	2
30.	141,6	15,00	0,999102	1,6225418	39,32043	1,8	0,00	1,2E-6	2
31.	156,8	12,51	0,999440	1,6225075	39,32126	1,2	0,00	2,1E-6	2
32.	159,2	12,50	0,999441	1,6224981	39,32149	1,2	0,00	2,6E-6	2
33.	160,7	12,51	0,999440	1,6225025	39,32138	3,0	0,00	-4,5E-7	3
34.	161,9	12,53	0,999437	1,6225011	39,32142	3,0	0,00	-1,7E-6	3
35.	163,2	12,49	0,999442	1,6225064	39,32129	1,2	0,00	8,4E-7	2
36.	179,1	10,01	0,999701	1,6224487	39,32269	1,8	0,00	2,5E-6	2
37.	180,4	9,99	0,999703	1,6224882	39,32173	4,2	0,00	1,7E-6	4
38.	181,8	10,00	0,999702	1,6224472	39,32272	1,8	0,00	2,5E-6	2
39.	183,0	9,99	0,999703	1,6224449	39,32278	3,0	0,00	6,3E-6	3
40.	184,4	9,99	0,999703	1,6224512	39,32263	3,0	0,00	-3,9E-7	3
41.	200,9	7,49	0,999880	1,6223895	39,32412	1,8	0,00	1,7E-6	2
42.	202,3	7,52	0,999878	1,6223894	39,32412	1,8	0,00	3,3E-6	2
43.	203,8	7,50	0,999879	1,6223866	39,32419	1,8	0,00	8,3E-7	2
44.	205,0	7,47	0,999881	1,6223913	39,32408	1,8	0,00	1,7E-6	2
45.	207,4	7,47	0,999881	1,6223913	39,32408	4,8	0,00	1,7E-6	4
46.	224,0	5,01	0,999967	1,6223351	39,32544	1,2	0,00	8,3E-7	2
47.	225,4	5,01	0,999967	1,6223443	39,32522	1,2	0,00	1,2E-6	2
48.	226,6	4,99	0,999967	1,6223368	39,32540	1,2	0,00	-1,2E-6	2
49.	228,0	5,02	0,999966	1,6223398	39,32533	1,2	0,00	3,0E-6	2
50.	229,3	5,00	0,999967	1,6223379	39,32537	3,0	0,00	1,3E-6	3
51.	245,2	2,49	0,999957	1,6222751	39,32689	3,0	0,00	1,3E-6	3
52.	246,5	2,46	0,999956	1,6222819	39,32673	1,8	0,00	1,7E-6	2
53.	247,8	2,49	0,999957	1,6222789	39,32680	4,2	-	-	4
54.	249,1	2,49	0,999957	1,6222751	39,32689	4,2	0,00	2,1E-6	4
55.	252,8	2,54	0,999958	1,6222788	39,32680	3,0	0,00	4,6E-6	3
56.	273,0	0,10	0,999849	1,6222079	39,32852	7,8	-	-	6
57.	274,6	0,08	0,999848	1,6221931	39,32888	3,0	0,00	5,5E-6	3
58.	275,9	0,03	0,999845	1,6221876	39,32901	1,2	0,00	8,3E-7	2
59.	277,1	0,07	0,999847	1,6221852	39,32907	1,8	0,00	8,3E-7	2
60.	278,5	0,07	0,999847	1,6221899	39,32896	1,2	0,00	3,8E-6	2

*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'** in g/cm³, die den Maßstab der Messung darstellt. Die dazu ermittelte Probendichte ϱ_{Probe} ist ebenfalls in der Einheit g/cm³ gegeben. **V** ist das Volumen der Probe bei der Temperatur in cm³, die aus dem Auftrieb gemäß der Flüssigkeitsdichte berechnet ist. Die Auftriebskraft kann sich durch verschiedene Effekte verändern, insbesondere durch Temperaturangleichung (Konvektion, Volumenanpassung), 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 **ΔT** in Temperaturgraden) und auch die Dichte der Probe $\Delta\varrho_{Probe}$ (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 Δ-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.*

- **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:

$$V_T[\mathrm{cm}^3] = f(\vartheta[°\mathrm{C}]) = 39{,}32881 - 7{,}336677\cdot10^{-4}\cdot\vartheta + 1{,}085299\cdot10^{-5}\cdot\vartheta^2 \quad \text{(Gl.2)}$$

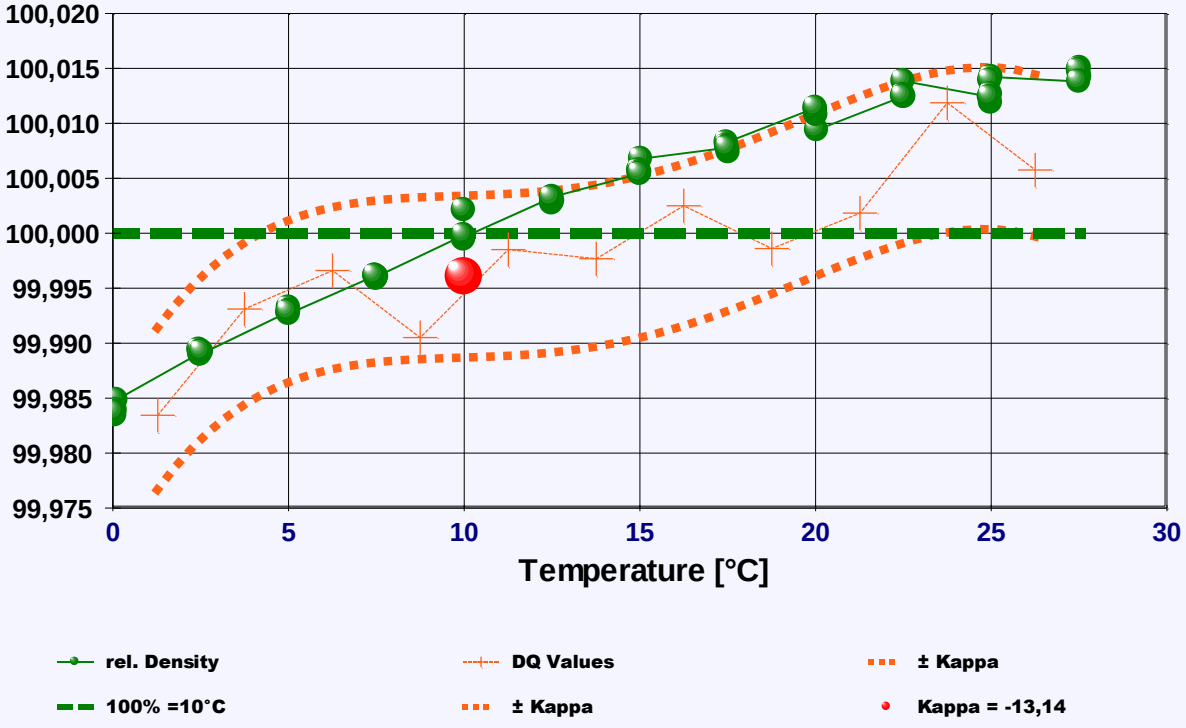
$r^2 = 0{,}9953$, $\sigma_V = 2{,}66\cdot10^{-4}\ \mathrm{cm}^3$, $\sigma_{Vrel.} = 0{,}16‰$, $\sigma_{VM} = 3{,}5\cdot10^{-5}\ \mathrm{cm}^3$.

Die erweiterte Messunsicherheit für das Probenvolumen beträgt $3{,}0\cdot10^{-4}\ \mathrm{cm}^3$.

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 Dichtemesswerte deren relative Abweichung zum '100%'-Wert bei 10°C, dem Angabewert (1,622454 g/cm³). Zusätzlich werden die ermittelten zwölf 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 0,32‰. Für eine erste Untersuchung der Wärmedehnung wurden die Dichtemesswerte in zwölf Temperaturniveaus zusammengefasst. Aus den Dichte- und Temperatur- Differenzenquotienten ($\Delta\varrho$, ΔT) wurden jeweilige Ausdehnungskoeffizienten κ_Δ berechnet ($\kappa_\Delta \approx {}^{-\Delta\varrho}/_{\varrho\cdot\Delta T}$). Die Maximal- und Minimumwerte in den elf κ_Δ- Berechnungen betragen:

1°C : $\kappa_\Delta = -21{,}79\cdot10^{-6}K^{-1}$ ($\alpha \sim -7{,}26$)

24°C : $\kappa_\Delta = -1{,}49\cdot10^{-6}K^{-1}$ ($\alpha \sim -0{,}50$)

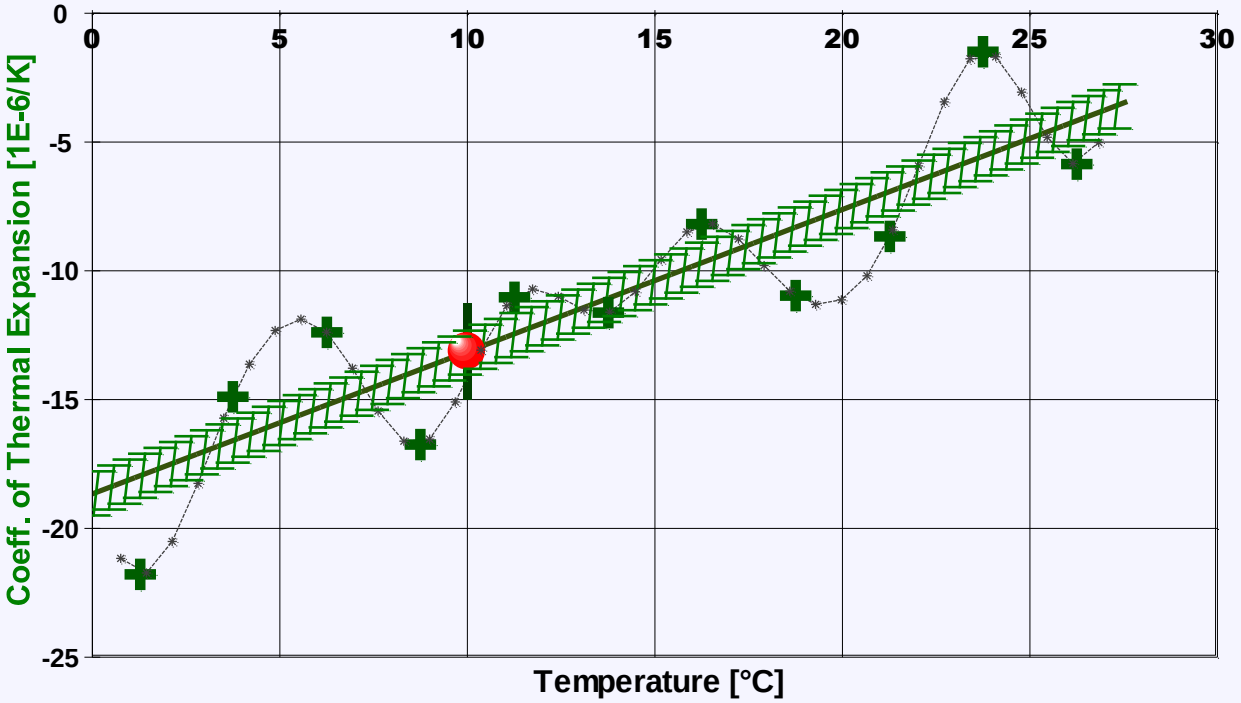
Eine Regression 4. Ordnung über die Einzelwerte erlaubt κ im Intervall als Funktion der Temperatur zu berechnen:

$$\kappa_\Delta \mid [10^{-6}\cdot K^{-1}] = f(\vartheta[°C]) = -26{,}08 + 4{,}341\cdot\vartheta - 0{,}5218\cdot\vartheta^2 + 0{,}02656\cdot\vartheta^3 - 4{,}502\cdot10^{-4}\cdot\vartheta^4 \quad \text{(Gl.3)}$$

mit $r^2 = 0{,}84$ und $\sigma_{\kappa\Delta} = 3\cdot10^{-6}\cdot K^{-1}$, $\sigma_{M\,\kappa\Delta} = 1\cdot10^{-6}\cdot K^{-1}$

Für 10°C ergibt sich κ_Δ aus der Gleichung zu $-13\cdot10^{-6}\cdot K^{-1}$. 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 κ verwendet - er wird dadurch um 0,35 Einheiten bzw. 3% kleiner 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 κ_{10} ist als kugelförmiges Symbol eingezeichnet. Im Diagramm sind durch die Kreuz-Markierungen auch die per Differenzenquotieten erhaltenen κ_Δ-Werte sowie der diskrete Werte-Verlauf in der Glättung durch Splines (Linie mit kleinen Sternmarkierungen) eingetragen [riG 3,72‰].

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

$$\boldsymbol{\kappa \mid [10^{-6}\cdot K^{-1}] = f(\vartheta[°C]) = (-30{,}26660 + 0{,}8952318\cdot\vartheta)\,/\,(1{,}622196 + 3{,}026660E\text{-}5\cdot\vartheta - 4{,}476159E\text{-}7\cdot\vartheta^2)} \quad \text{(Gl.4)}$$

Für 10°C ergeben Gleichung und Messunsicherheit den Ergebniswert $\kappa_{10} = -13{,}14 \pm 1{,}02\cdot10^{-6}/K$. Die erweiterte Messunsicherheit $U\kappa$ kann die Streuung der diskreten κ_Δ-Werte nicht darstellen (vgl. Diagramm). Der Verlauf von κ ist unzureichend stetig. Als Toleranzangabe, die die Streuung

der κ_Δ-Werte einschließt, ist die Standardabweichung von κ_Δ zur Gleichung mit **±2,5**·10^{-6}/K bzw. 19% zur jeweiligen Temperatur anzunehmen.
Bei 10 °C zeigt sich eine relative Zunahme des Koeffizienten von 4,2% pro Grad. - Der Ausdehnungskoeffizient des Probenmaterials ist hier im Vergleich zu *normalen Feststoffen* ***negativ***. Er verläuft mit der Temperatur auch noch hoch ausgeprägt zunehmend.

Um das Volumen bzw. eine Volumenänderung für die Probensubstanz bei einer bestimmten Temperatur θ im gültigen Temperaturbereich zwischen 0,0 und 28,0°C vorherzusagen, kann mit dem bei der Temperatur θ° gegebenen Volumen $V0_{\theta°}$ das Volumen $V1_\theta$ bei der Temperatur θ über das entsprechende Verhältnis der Dichten berechnet werden:

$V1_\theta = V0_{\theta°}\cdot(1{,}6222 + 3{,}0267\cdot10^{-5}\cdot\theta° - 4{,}4762\cdot10^{-7}\cdot\theta°^2) / (1{,}6222 + 3{,}0267\cdot10^{-5}\cdot\theta - 4{,}4762\cdot10^{-7}\cdot\theta^2)$ - Wird stattdessen die angegebene Bestimmungsgleichung für κ(θ) verwendet ('κ=-1/ϱ·(∂ϱ/∂T)'), gemäß V1 = V0(1+κΔT) bzw.(besser) V1 = V0·exp(κΔT), dann ist der Wert von κ für die mittlere Temperatur (θ°+θ)/2 einzusetzen. Allgemein gilt: V1 = V0·exp(∫ κ(θ)dT).

Die Dimension 10^{-6}/K für κ bedeutet eine Volumenänderung in Mikroliter pro Liter und Temperaturgrad. Falls das Probenmaterial isotrop ist, kann der lineare Ausdehnungskoeffizient (α) im angegebenen Bereich verwendet werden. Mit α = κ / 3 bedeutet α anschaulich, dass ein 1 m langer Stab pro Temperaturgrad bei 10°C seine Länge um -4,38 µm ändert; für eine Dehnung von 1 mm (0.1%) wäre rechnerisch ein ΔT von etwa -228,3 Grad erforderlich (wenn man von der Temperaturabhängigkeit von κ absieht).

• Zusammenfassung zur Messunsicherheit der Einzelwerte

Messunsicherheit der Dichte - aus der Fortpflanzung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen
nach dem Modell: $\varrho_{Probe} = (W_2\cdot\rho_a - W_1\cdot\rho_{Fl}) / (W_2 - W_1)$ (Gl.5)

i	X_i		x_i	$u(x_i)$	c_i		$c_i\cdot u(x_i)$ [g/cm³]	ν_i
1	W_1	g	63,763500	7,28·10^{-5}	-0,0159	1/cm³	-1,16·10^{-6}	∞
2	W_2	g	24,52722	6,66·10^{-5}	0,0413	1/cm³	2,75·10^{-6}	59
3	ρ_a	g/cm³	11,3·10^{-4}	1,00·10^{-6}	-0,625	---	-6,25·10^{-7}	11
4	ρ_{Fl}	g/cm³	0,9988227	3,30·10^{-6}	1,63	---	5,36·10^{-6}	∞
Y	ϱ_{Probe}	g/cm³	1,622495		$u(y)=\sqrt{(\sum(c_i\cdot u(x_i))^2)}$ =		6,17·10^{-6}	ν_{eff} > 100

Angabe der erweiterten Messunsicherheit U_ϱ aus der kombinierten Standardmessunsicherheit (u_ϱ 6,17·10^{-6} g/cm³) mit dem Erweiterungsfaktor k_{95} = 1,96. Die Werte der Probendichte liegen in der Regel mit einer angenäherten Wahrscheinlichkeit von 95% im Überdeckungsintervall ±1,2·10^{-5} g/cm³ bzw. im Bereich ±7,4 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_ic_i liefert die kombinierte Standardmessunsicherheit der Feststoffdichte (Y ϱ_{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 ν_2 fest (Anzahl - 1 = 59). 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 ρ_a steht für die Luftdichte; ihr zugehöriger Größenwert x_3 und $u_3(x)$ wurdeim Messablauf bestimmt. Das Symbol ρ_{Fl} steht für die Dichte der Messflüssigkeit. Der für ρ_{Fl} in x_4 eingesetzte Wert ist der Mittelwert der Flüssigkeitsdichteangaben, wobei $u_4(x)$ aus der Unsicherheit der Referenzgleichung stammt bzw. empirisch aus zuvor und/oder danach durchgeführten Messungen der Fluiddichte übernommen wurde. Die Zahl der effektiven Freiheitsgrade (ν_{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 ±1,6·10^{-5} g/cm³.

Messunsicherheit der Masse - gemäß der Grundgleichung:
$m_{Probe} = W_1\cdot(1 - \rho_a/\varrho_{cal}) / (1 - \rho_a/\varrho_{Probe})$ (Gl.6)

i	X_i		x_i	$u(x_i)$	c_i		$c_i\cdot u(x_i)$ [g]	ν_i
1	W_1	g	63,76350	7,28·10^{-5}	1,00	---	7,28·10^{-5}	-
2	ρ_a	g/cm³	11,3·10^{-4}	1,00·10^{-6}	31,4	cm³	3,14·10^{-5}	-
3	ϱ_{cal}	g/cm³	8,000	8·10^{-3}	1,13·10^{-3}	cm³	9,04·10^{-6}	-
4	ϱ_{Probe}	g/cm³	1,622495	6,17·10^{-6}	-0,0275	cm³	-1,70·10^{-7}	-
Y	m_{Probe}	g	63,79904		$u(y)=\sqrt{(\sum(c_i\cdot u(x_i))^2)}$ =		7,98·10^{-5}	ν_{eff} -

Angabe der erweiterten Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor k = 2. Die Masse der Probe m_{Probe} wird zu 63,79904 ±1,6·10^{-4} g bestimmt. Die relative Messunsicherheit beträgt 2,5 ppm.

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

Messunsicherheit des Volumens - über das Verhältnis: $V_{Probe} = m_{Probe} / \varrho_{Probe}$

$$u(V_{Probe}) = \sqrt{\left(u(m_{Probe}) / \varrho_{Probe})^2 + (-m_{Probe}\cdot u(\varrho_{Probe}))/\varrho_{Probe}^2\right)} = 0{,}00015\ \text{cm}^3 \quad \text{(Gl.7)}$$

Die erweiterte Messunsicherheit des Probenvolumens wird mit dem Erweiterungsfaktor k = 2 angegeben, sie beträgt 0,00030 cm³ bzw. relativ 7,6 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:

$$\kappa_{Probe} = -2\cdot(\varrho_1 - \varrho_2)/\big((\vartheta_1 - \vartheta_2)\cdot(\varrho_1+\varrho_2)\big) \quad \text{(Gl.8)}$$

i	X_i		x_i	$u(x_i)$	c_i		$c_i \cdot u(x_i)$ [K⁻¹]	ν_i
1	ϱ_1	g/cm³	1,622197	$1{,}35\cdot10^{-5}$	-0,0224	cm³/g·K	$-3{,}02\cdot10^{-7}$	-
2	ϱ_2	g/cm³	1,622690	$1{,}35\cdot10^{-5}$	0,0224	cm³/g·K	$3{,}02\cdot10^{-7}$	-
3	ϑ_1	°C	0,03	0,03	$4{,}02\cdot10^{-7}$	1/K²	$1{,}21\cdot10^{-8}$	-
4	ϑ_2	°C	27,53	0,03	$-4{,}02\cdot10^{-7}$	1/K²	$-1{,}21\cdot10^{-8}$	-
Y	κ_{Probe}	K⁻¹	$-1{,}11\cdot10^{-5}$		$u(y)=\sqrt{(\sum(c_i\cdot u(x_i))^2)}$ =		$4{,}28\cdot10^{-7}$ ν_{eff}	-

Die erweiterte Messunsicherheit (k=2) des Ausdehnungskoeffizienten $U\kappa$ beträgt $0{,}86\cdot10^{-6}$ K⁻¹ bei der Temperatur 13,78°C. Die Messunsicherheit von κ ist zwischen 0 und 28°C über die relative Messunsicherheit von 7,7% weiterzugeben.

Die Symbole ϱ_1 und ϱ_2 stehen für die Probendichtewerte die zu den Temperaturen θ_1 und θ_2 gehören.

• Zur Dichte der Messflüssigkeit

Messflüssigkeit '*Wasser*': Die Dichtedaten wurden als Funktion der Temperatur aus der Referenzdatenbank entnommen. Die Flüssigkeitsdichte $\boldsymbol{\rho}_{Fl.}$ wurde gemäß folgender Bestimmungsgleichung zur jeweiligen Temperatur ϑ berechnet:

$\boldsymbol{\rho}_{Fl.} = f(\boldsymbol{\vartheta}[°C])=(6.5592063E\text{-}05\cdot\vartheta^5 - 1.1225639E\text{-}02\cdot\vartheta^4+1.0026530\cdot\vartheta^3-90.968893\cdot\vartheta^2 + 679.48991\cdot\vartheta + 9998425.9)/1E7$ (Gl.9)

Beiträge zur Unsicherheit der Flüssigkeitsdichte $u(\rho_{Fl})$ wurden ebenfalls aus den Referenzdaten bezogen ($u(\rho_{L.Equ.})$= $2{,}89\cdot10^{-6}$ g/cm³) sowie aus der Messunsicherheit der Temperatur ($u(\rho_{L.Temp.})$= $1{,}59\cdot10^{-6}$ g/cm³) bestimmt und belaufen sich damit auf $3{,}30\cdot10^{-6}$ g/cm³. $u(\rho_{Fl})$ steuert mit einem Beitrag von 75% den größten Anteil zur Gesamtmessunsicherheit der Probendichte bei.

• Probenhandhabung und Messtechnik

Das Gewicht von Prüfkörper und Halterung (gesamt 63,7635 g) extern bestimmt. Der Auftrieb der Probe wurde unmittelbar und ohne weitere Hilfsmittel wie Behälter oder Probenträger gemessen - der Prüfkörper wurde direkt mit einer Suspension verbunden. Für die angewendete IMETER-Patentmethode (Meniskus- und Drifteliminierverfahren) wurde der Aufhängungsquerschnitt mit 0,071 mm² angegeben. Über den Niveau-Unterschied von durchweg 7 mm zwischen Bezugskraft- und Auftriebskraft-Messung ergibt sich ein Beitrag von 0,5 mm³, 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 - Beiträge zur Messunsicherheit des Probengewichts $u(W_1)$ aus dem Zustand und den Eigenschaften der Waage ⇒ Unsicherheitsbeiträge der Probenwägung mit Verteilungsfaktoren: Reproduzierbarkeit $u(W\delta_{Rep.})$=50 µg / √3, Nullpunkt der Anzeige $u(W\delta_{Zero})$=**0,10 mg** / √3, Linearität der Anzeige $u(W\delta_{Lin.})$=58 µg / √3, Justier/Kalibrierreferenz, OIML E2, $u(W\delta_{mcal.})$=24 ng / 2, Zeit seit letzter Justierung, 50 µg/Tag, $u(W\Delta_{tcal.})$=6,2 µg / √3. - und entsprechende Messunsicherheitsbeiträge bei der Auftriebswägung als Rückkopplung zu $u(W_2)$ ⇒ Unsicherheitsbeiträge der Auftriebswägung , kurz: $u(W\delta_{Rep.})$=50 µg / √3, $u(W\delta_{Zero})$=**0,10 mg** / √3, $u(W\Delta_W)$=48 µg / √60, $u(W\delta_{Lin.})$=22 µg / √3, $u(W\delta_{mcal.})$=61 ng / 2, $u(W\Delta_{Tcal})$=12 µg / √3, $u(W\Delta_{tcal.})$=6,2 µg / √3.*

***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% 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 11396, Datenbank imeterData27) auffindbar und als Referenz oder Vergleich nutzbar. Ggf. enthalten nachfolgend ausgegebene Informationen, je nach Einstellungen und Berichtsvorlage (Stil = 'standard-i2'), verschieden detaillierte Begleitinformationen, wie die Angaben zur Ausführung der Messung, den Audit-Trail und Hinweise zur Prüfmittelüberwachung.*

Programm

Data createtd during execution of the IMPro *"DichteFK_A"*, type 9/50. Measuring process performed accordingly.

Prüfmittel

Das Wägesystem (WZA224) wurde zuletzt während dieser Messung justiert.
IMETER ID23903733: Technische Daten: Auflösung des Wägesystems 0,1 mg, Messunsicherheit (Linearität) 0,2 mg, Dichte der Justiermasse ρ_{cal} 8,000 g/cm^3, Luftdichte ρ_a vgl. Tabelle unten; Schwerebeschleunigung g 9,80769 m/sec^2. Die Messauflösung der Temperaturmessung beträgt 0,01 K, die Unsicherheit 0,03 K. Akquisitions-Softwareversion IMETER 5.6.34, LizenzN° *3037-4759*, Windows 5.1- Betriebssystem auf PC Ser.N°1480456102 (H, DIE PLATTE#).

Zwei Justierungen der Wägezelle während der Messung:

1.	Zeit: 22,1	[min]	Korrektur: 0,0002	[g]
2.	Zeit: 178,1	[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 'imeterData27.cal' gesondert gespeichert).

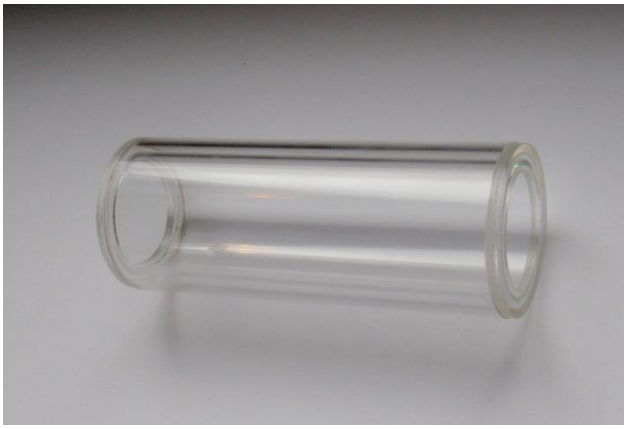
meteorologische Angaben, Luftdichte:

Time [min]	ϕ [%]	T_a [°C]	p_a [kPa]	ρ_{air} [kg/m^3]
21,2	53,4	22,2	96,630	1,1336
45,8	53,5	22,45	96,622	1,13259
66,0	53,4	22,35	96,603	1,13276
87,7	53,13	22,4	96,5978	1,1324
108,2	53,17	22,47	96,593	1,13219
131,1	53,27	22,47	96,588	1,13212
155,6	53,27	22,62	96,577	1,13133
177,1	53,25	22,54	96,562	1,13151
199,9	53,37	22,62	96,557	1,13111
222,9	53,38	22,7	96,537	1,13058
244,1	53,17	22,8	96,548	1,13014
268,8	53,2	22,8	96,531	1,12989

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 Ablesungen wurden automatisch durch das i-SIF ausgeführt.

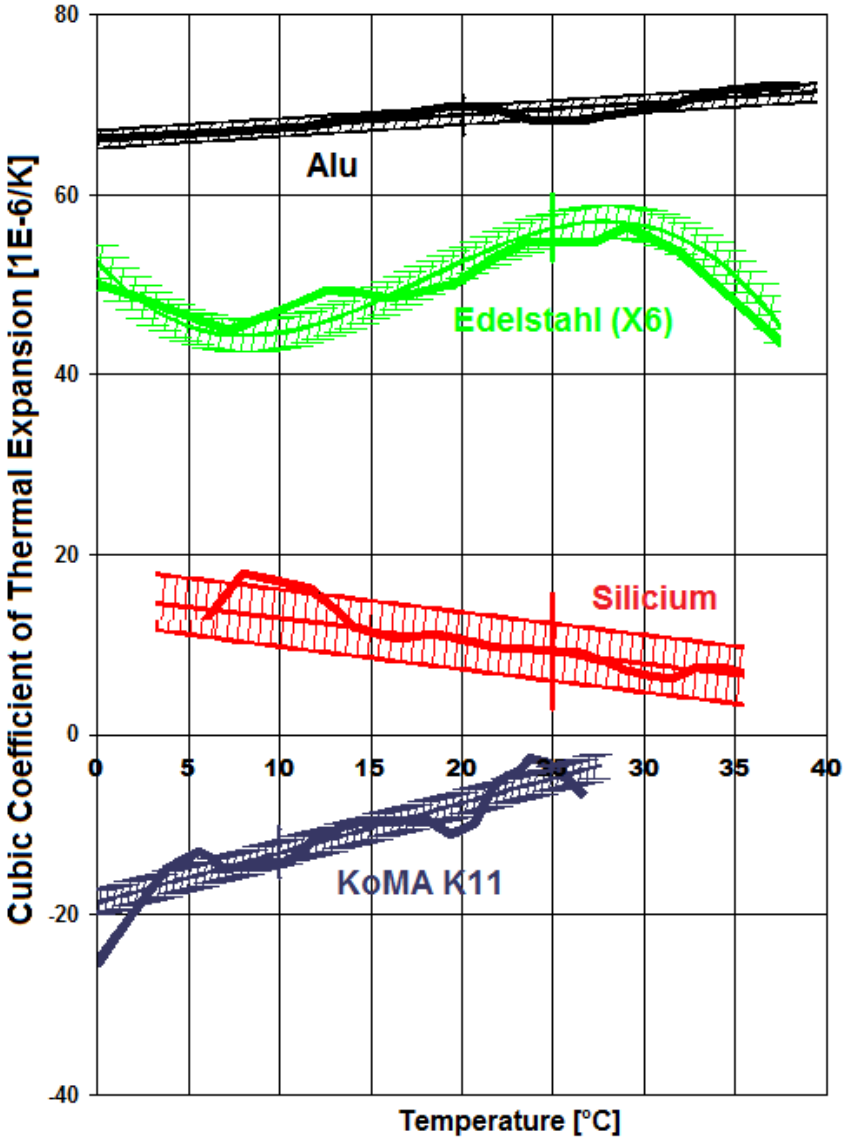
Report created by IMETER

Wie aus dem Protokoll hervorgeht, handelte es sich um einen makroskopischen Körper. Die Wärmedehnung zwischen 0 und 30°C ist tatsächlich negativ (obwohl sich natürlich Höhe und Breite des Körpers entsprechend ausdehnen). Dieses Prinzip ist allgemein verwendbar. Eine Anwendung kann darin bestehen, solche Körper als Kompensationsmittel in Verbundwerkstoffen zu verwenden. Denkt man sich hier verkleinerte Strukturen bis hin zu entsprechenden Nanotubes, z.B. in einer Sintermetallmatrix, dann kann die Wärmedehnung des Matrixmaterials durch die Kompensationskörper aufgenommen werden, so dass über den Werkstoff eine entsprechend manipulierte Wärmedehnung herzustellen ist. Die Dilatation wäre kleinräumig kompensiert. Vice versa die analoge Anpassung durch Vergrößerung der Wärmedehnung.



Der Körper - Eine kurze Besprechung zum Prinzip und zu Anwendungen findet sich in unserer Pressemitteilung.

Das Diagramm zeigt einen Vergleich zu Ausdehnungskoeffizienten.



IMETER

Messtechnik - nachhaltig zusammengefasst

Intelligenter messen.

- *Feststoff- und Flüssigkeitsdichte, Ausdehungskoeffs.*
- *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

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

Probieren Sie's einfach!