



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **TA**

Aktualisiert: am 8. Oktober 2025

Thermische Ausdehnung (Nebenfach)

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	1
2 Allgemeine Grundlagen	2
2.1 Definition des Ausdehnungskoeffizienten	2
2.2 Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten: Grüneisen-Beziehung	2
3 Experimente	3
3.1 Volumenausdehnung einer Flüssigkeit	3
3.2 Längenausdehnung eines Festkörpers	3
4 Bestimmung des mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten	4
5 Deutung der Wärmeausdehnung von Festkörpern	4
6 Durchführung	5
6.1 Längenausdehnungskoeffizient	5
6.2 Volumenausdehnungskoeffizient	5

1 Aufgabenstellung

- Bestimmen Sie den *mittleren Längenausdehnungskoeffizienten* ($\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$) eines Metallstabes im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 60 °C mit Hilfe des *Hebelverfahrens*.
- Bestimmen Sie den *mittleren Volumenausdehnungskoeffizienten* ($\bar{\gamma} \pm \Delta\bar{\gamma}$) einer Flüssigkeit im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 60 °C mit Hilfe des *Dilatometers*.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Definition des Ausdehnungskoeffizienten

Temperaturänderungen führen bei Festkörpern und Flüssigkeiten zur Änderung des Volumens V . Zur Beschreibung dieses Phänomens bedient man sich des materialspezifischen und temperaturabhängigen *Volumenausdehnungskoeffizienten* γ :

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

Für kleine Temperaturbereiche erhält man in guter Näherung eine lineare Proportionalität zwischen relativer Volumenänderung $\Delta V/V_0$ und der Temperaturänderung ΔT :

$$\bar{\gamma} = \frac{\Delta V/V_0}{\Delta T} \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \quad \text{und} \quad \Delta T = T - T_0. \quad (2)$$

Hierbei ist $\bar{\gamma}$ der *mittlere* Volumenausdehnungskoeffizient.

Bei Festkörpern wird die Angabe des *Längenausdehnungskoeffizienten* α bevorzugt:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p \quad (3)$$

Für isotrope Stoffe gilt $\gamma = 3\alpha$. Mit Hilfe der relativen Längenänderung $\Delta L/L_0$ findet man analog den *mittleren* Längenausdehnungskoeffizienten:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta T} \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}. \quad (4)$$

2.2 Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten: Grüneisen-Beziehung

Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist eine stark temperaturabhängige Größe. Abbildung 1 zeigt am Beispiel von Kupfer einen typischen Temperaturverlauf.

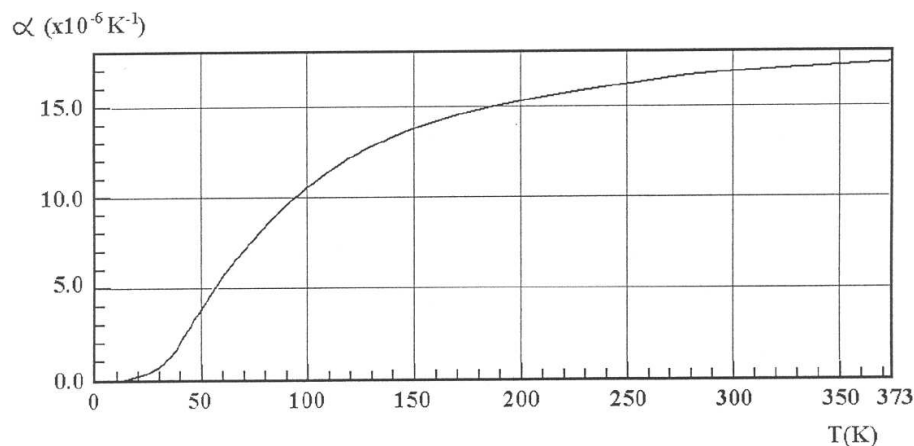


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer

Die *Grüneisen-Beziehung* gibt eine Orientierung für das Temperaturverhalten:

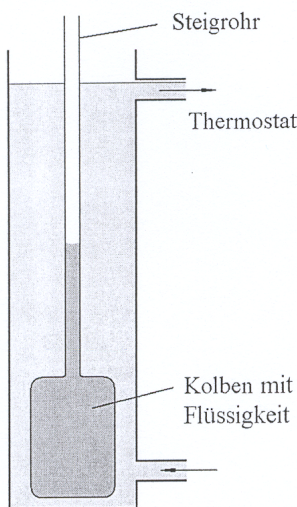
$$\Gamma = \frac{\gamma}{\kappa_T \cdot c_V \cdot \rho} \approx \text{konstant} . \quad (5)$$

Da die isotherme *Kompressibilität* κ_T und die Dichte ρ nur schwach temperaturabhängig sind, folgt γ im wesentlichen dem Verlauf der spezifischen Wärmekapazität $c_V(T)$. Die Angabe eines konstanten Ausdehnungskoeffizienten ist demzufolge nur für sehr kleine Temperaturintervalle gerechtfertigt. Bei den im Versuch zu ermittelnden Koeffizienten $\bar{\gamma}$ bzw. $\bar{\alpha}$ handelt es sich um Mittelwerte über das entsprechende Temperaturgebiet.

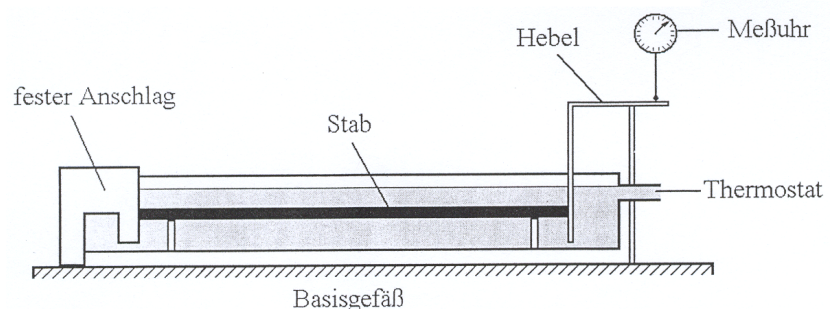
3 Experimente

3.1 Volumenausdehnung einer Flüssigkeit

Für diese Messung wird ein *Dilatometer* verwendet. Ein mit einem Steigrohr versehener Glaskolben (Leermasse des Kolbens m_K) enthält die zu untersuchende Flüssigkeit (Abb. 2a). Durch Wägung des gefüllten Kolbens und unter Einbeziehung der bekannten Dichte der Flüssigkeit wird deren Volumen V_0 bei der Starttemperatur T_0 ermittelt. In einem Wasserbad, dessen Temperatur mittels eines Thermostaten geregelt werden kann, werden Glasgefäß und Flüssigkeit gemeinsam erwärmt und die Volumenänderung als Funktion der Temperatur ermittelt. In einem Diagramm sind die Meßwerte der relativen Volumenänderung $\Delta V/V_0$ über der Temperaturdifferenz ΔT darzustellen.



(a) Volumenausdehnungskoeffizienten einer Flüssigkeit



(b) Längenausdehnungskoeffizienten eines Festkörpers

Abbildung 2: Schematische Versuchsanordnungen zur Messung

3.2 Längenausdehnung eines Festkörpers

Ein Stab (Länge L_0 bei T_0) wird so in eine Messzelle eingebracht, dass eines seiner Enden über einen Hebel mit einem empfindlichen Längenmessgerät (Messuhr) kontaktiert wird (Abb. 2b). Unter Verwendung eines Thermostaten kann die Temperatur T des Stabes verändert werden und die Längenänderung ΔL aufgezeichnet werden. In einem Diagramm

sind die Messwerte der relativen Längenänderung $\Delta L/L_0$ über der Temperaturdifferenz ΔT darzustellen.

4 Bestimmung des mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Während beim Hebelverfahren die Temperatur des Basisgefäßes während der gesamten Messdauer nahezu konstant bleibt, muß beim *Dilatometer* die Ausdehnung des Glaskolbens (Ausdehnungskoeffizient α_K) bei der Auswertung berücksichtigt werden (Formel herleiten!)

$$\gamma = \frac{V - V_0}{V_0 \cdot (T - T_0)} + 3\alpha_K \cdot \frac{V}{V_0} \quad (6)$$

Ausgehend von den zur Berechnung von $\bar{\gamma}$ bzw. $\bar{\alpha}$ benutzten Formeln (2) bzw. (4) ist der Fehler des Ausdehnungskoeffizienten aus den Fehlern der Einzelmessungen abzuschätzen.

5 Deutung der Wärmeausdehnung von Festkörpern

Die atomaren Bausteine eines Körpers sind durch eine anziehende Kraft aneinander gebunden. Eine zweite, abstoßende Kraft sorgt für einen endlichen Abstand benachbarter Teilchen untereinander. Der Gleichgewichtsabstand r_0 liegt dort, wo die Summe dieser beiden Kräfte verschwindet. Für $T = 0$ würden sich die Teilchen in diesem Abstand voneinander in Ruhe befinden. Wären beide entgegengesetzt wirkenden Kräfte harmonisch, so würde sich in dem daraus resultierenden symmetrischen (parabolischen) Bindungspotential W_{harm} (Abb. 3) auch bei Temperaturerhöhung keine Vergrößerung des Gleichgewichtsabstandes der Teilchen ergeben.

Erst durch die Einführung eines asymmetrischen (anharmonischen) Potentials W_{anharm} (Abb. 3), welches sich durch die Berücksichtigung der wesentlich längeren Reichweite der anziehenden im Vergleich zur abstoßenden Kraftkomponente ergibt, nimmt mit wachsender Teilchenenergie ($W_0 < W_1 < W_2$) der mittlere Teilchenabstand zu. Dieser Effekt wird als thermische oder Wärmeausdehnung bezeichnet. Das von Grüneisen entwickelte Modell der thermischen Ausdehnung basiert auf den Vorstellungen von Debye, der für die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität das Schwingungsverhalten der Gitterbausteine durch *harmonische Oszillatoren* beschreibt. Durch Einführung kleiner Anharmonizitäten lässt sich die Ausdehnung durch den in Gleichung (5) gegebenen Ausdruck erfassen. Diese wird für viele Materialien experimentell durch einen konstanten Grüneisenparameter Γ bestätigt. Auf Grund der stärkeren Bindung der Atome im Festkörper im Vergleich zur Flüssigkeit liegt der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeiten um rund eine Größenordnung über dem der Festkörper.

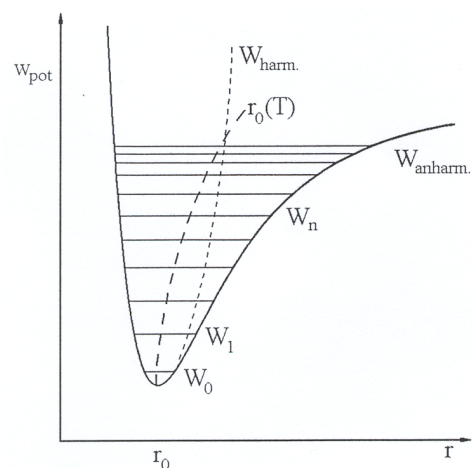


Abbildung 3: Wechselwirkungspotential zwischen zwei Atomen eines Kristallgitters
 r_0 = mittlerer Atomabstand

6 Durchführung

6.1 Längenausdehnungskoeffizient

1. Messen Sie die Ausgangslänge l_0 des Stabes bei Raumtemperatur T_0 .
2. Bringen Sie den Stab in der Versuchsanordnung in ein Wasserbad, dessen Temperatur mittels Thermostat variiert werden kann. Ein Stabende *liegt* an einem festen Anschlag *an*. Die thermische Längenänderung des Stabes wird von seinem anderen Ende über einen Hebel (Hebelverhältnis 1 : 5) auf eine Messuhr (Genauigkeitsklasse II; Messbereich 0 . . . 10 mm) übertragen.
3. Wählen Sie eine *geeignete* Bezugstemperatur T_1 , bei der Sie die Nullstellung der Messuhr festlegen.
4. Messen Sie die Längenänderung des Metallstabes bis 60 °C in *sechs* Schritten.
5. Stellen Sie die *relativen* Längenänderungen $\Delta l/l_0$ über der Temperaturdifferenz ΔT grafisch auf Millimeterpapier dar.

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l(T) - l(T_1)}{l_0} \quad \text{und} \quad \Delta T = T - T_1$$

6. Ermitteln Sie aus dem Zusammenhang $\Delta l/l_0 = f(\Delta T)$ mittels Geradenausgleich den mittleren Anstieg der Messkurve und damit den mittleren Längenausdehnungskoeffizienten:

$$\bar{\alpha} = \frac{l(T_2) - l(T_1)}{l(T_1)} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}.$$

Hierbei gilt in guter Näherung $l(T_1) \approx l(T_0) = l_0$, falls T_1 geeignet gewählt wurde (warum?).

7. Ermitteln Sie aus dem minimalen und dem maximalen Anstieg die Unsicherheit $\Delta \bar{\alpha}$.

6.2 Volumenausdehnungskoeffizient

Nr.	Flüssigkeit	$\rho_{\text{Fl}} / \text{g cm}^{-3}$	m_{K} / g
1	Ameisensäure	1.238	41.030
2	Paraffinöl	0.826	45.279
3	Lüvakol	0.869	42.210
4	Iso-(2-Propanol)	0.781	40.720
5	Olivenöl	0.910	56.00

Tabelle 1: Dichte ρ_{Fl} von Flüssigkeiten bei 25 °C; Kolbenleermasse m_{K}

1. Bestimmen Sie die Gesamtmasse m der Messanordnung als Summe der Masse des leeren Kolbens m_{K} und der Masse der zu untersuchenden Flüssigkeit m_{Fl} . Erhalten Sie daraus das Volumen V_0 der Flüssigkeit. Die dazu nötigen Werte entnehmen Sie Tabelle 1.

2. Platzieren Sie den Glaskolben etwa 20 mm über den Boden des Gefäßes mit dem Wasserbad, dessen Temperatur über ein Thermostat geregelt werden kann.
3. Wählen Sie eine *geeignete* Bezugstemperatur T_1 .
4. Nehmen Sie *sechs* Messwerte der relativen Volumenausdehnung $\Delta V/V_0$ bei der Erwärmung bis 60 °C auf, indem Sie die Änderung direkt an der Skala am Steigrohr ablesen. Nutzen Sie während der Erwärmung der Thermostatflüssigkeit den Magnetprüher im Glaskolben.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V(T) - V(T_1)}{V_0}$$

Wurde T_1 geeignet gewählt, gilt wiederum in guter Näherung $V(T_1) \approx V_0$ (warum?).

5. Korrigieren Sie die relative Volumenänderung hinsichtlich der thermischen Ausdehnung des Glaskolbens, sodass Sie die effektive relative Volumenänderung der Flüssigkeit erhalten:

$$\left. \frac{\Delta V}{V_0} \right|_{\text{eff}} = 3\alpha_K \Delta T + \frac{\Delta V}{V_0} (1 + 3\alpha_K \Delta T) \quad \text{mit} \quad \alpha_{\text{Glas}} = 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

6. Stellen Sie die effektive relative Volumenänderung $\Delta V/V_0|_{\text{eff}}$ über der Temperaturänderung ΔT grafisch auf Millimeterpapier dar.
7. Ermitteln Sie aus dem Zusammenhang $\Delta V/V_0|_{\text{eff}} = f(\Delta T)$ mittels Geradenausgleich den mittleren Anstieg der Messkurve und damit den Volumenausdehnungskoeffizienten:

$$\bar{\gamma} = \left. \frac{V(T_2) - V(T_1)}{V(T_1)} \right|_{\text{eff}} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}.$$

8. Ermitteln Sie aus dem minimalen und dem maximalen Anstieg die Unsicherheit $\Delta \bar{\gamma}$.

Fragen

1. Verschaffen Sie sich theoretische Vorstellungen zum Verständnis der thermischen Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten.
2. Wie kann die thermische Ausdehnung mathematisch beschrieben werden? (relative Volumen- und Längenänderung, Volumen- und Längenausdehnungskoeffizienten, Beziehungen zwischen diesen Größen)
3. Diskutieren Sie die in der Anleitung beschriebenen Verfahren: Vor- und Nachteile, Fehlerquellen, Herleitung der zur Auswertung benötigten Formeln.
4. Nennen Sie Beispiele für technische Relevanz des Effektes der thermischen Ausdehnung als nützliche bzw. störende Größe.

Literatur

1. C. Kittel: *Einführung in die Festkörperphysik*, Oldenbourg-Verlag, München, Wien 2006
2. A. Recknagel: *Physik: Schwingungen, Wellen, Wärmelehre*, Technik-Verlag, Berlin 1990
3. E. Grimsehl: *Lehrbuch der Physik, Band 4: Struktur der Materie*, Teubner-Verlag, Leipzig 1990
4. L. Bergmann, C. Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1: Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Verlag de Gruyter, Berlin 1954
5. F. X. Eder: *Moderne Messmethoden der Physik, Band 2: Thermodynamik*, Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960
6. W. H. Westphal: *Physikalisches Praktikum*, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1974
7. W. Ilberg (Hrsg.), M. Krötzsch (Hrsg.) et al.: *Physikalisches Praktikum für Anfänger*, Teubner-Verlag, Leipzig 1994