

Abbildung 1: Dichtewaage nach Westphal/Mohr

VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

---

## A03 Dichte von Festkörpern und Flüssigkeiten

---

12. August 2024

Raum ME148

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Informationen</b>	<b>4</b>
1.1 Literatur . . . . .	4
1.2 Stichworte . . . . .	4
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Definition und Messmethode der Dichte . . . . .	5
2.2 Thermische Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten . . . . .	7
<b>3 Aufgabenstellung</b>	<b>10</b>
<b>4 Versuchsaufbau</b>	<b>11</b>
<b>5 Versuchsdurchführung</b>	<b>13</b>
<b>6 Versuchsauswertung</b>	<b>16</b>
<b>7 Fehlerrechnung und Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>8 Fragen zur Selbstkontrolle</b>	<b>19</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Dichtewaage nach Westphal/Mohr . . . . .	1
2.1	2D-Projektion der lokalen Struktur von a) Wasser, b) Eis . . . . .	8
2.2	Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser. Im Inset der Dichteverlauf zwischen 0 u. 10°C mit dem Maximum bei 4°C. . . . .	9
4.1	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte von festen Körpern und Flüssigkeiten: rechts: Balkenwaage auf Stativ mit Schiebegewichten 10g und 100g sowie Federwaage mit Noniusskala N; links: Heizplatte HP mit Magnetrührern R, Thermostatgefäß (im Schnitt) mit Wasser W, Becherglas B mit Flüssigkeit F auf Drahtnetzgestell, Körper K auf Waagschale mit Tariergewicht TG, Thermometer T . . . . .	11

# 1 Informationen

## 1.1 Literatur

1. Walcher, Praktikum der Physik
2. Westphal, physikalisches Praktikum

## 1.2 Stichworte

- Dichte von Metallen und Flüssigkeiten
- thermische Ausdehnung
- Dichteanomalie des Wassers
- Gewichtskraft
- Auftrieb
- Archimedisches Prinzip

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Definition und Messmethode der Dichte

Die Dichte  $\rho$  von Materie ist definiert als das Verhältnis von ihrer Masse zu ihrem Volumen  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Die SI - Einheit der Dichte ist demnach  $\frac{kg}{m^3}$ , praktischer und am häufigsten benutzt ist jedoch die Einheit  $\frac{g}{cm^3}$ .

Die Dichte der in diesem Versuch zu untersuchenden Metalle (Aluminium, Messing, Stahl, Blei) liegt im Bereich zwischen 2,8 und 11,2  $\frac{g}{cm^3}$ , die der zu untersuchenden Flüssigkeiten Ethanol und Wasser im Bereich zwischen 0,7 und 1,0  $\frac{g}{cm^3}$ .

Die Bestimmung der Dicht  $\rho_K$  eines festen Körpers, mit geometrisch definierter Form (Würfel, Zylinder, ...) ist nach Gleichung 2.1 durch die Bestimmung seiner Masse z.B. mittels Wägung und seiner Abmaße, z.B. mittels Schieblehre oder Mikrometerschraube, recht einfach. Bei unregelmäßig geformten Körpern, die einer direkten (genauen) Volumenmessung nicht zugänglich sind, wendet man zur Bestimmung ihrer Dichte ein relatives Verfahren der Volumenmessung an. Man bestimmt zunächst die Masse  $m$  des Körpers durch seine Wägung in Luft <sup>1</sup>, wobei sein Gewicht, d.h. die zu seiner Masse mit dem Faktor  $g$  (Erdbeschleunigung) proportionale Gewichtskraft  $F$  in Luft bestimmt wird:

$$F = mg = \rho_K \cdot V \cdot g \quad (2.2)$$

Taucht man den Körper bei einer zweiten Wägung vollständig in eine Flüssigkeit bekannter Dichte  $\rho_F < \rho_K$  (warum?) ein, so erfährt er neben der Gewichtskraft  $F$  eine entgegengerichtete Auftriebskraft  $F_A$ , welche der Masse der durch den Körper verdrängten Flüssigkeit, d.h. dem Produkt aus ihrer Dichte  $\rho_F$  und dem Volumen  $V$  des Körpers entspricht (*Archimedisches Prinzip*):

$$F_A = \rho_F \cdot V \cdot g \quad (2.3)$$

---

<sup>1</sup>Statt in Luft (Dichte  $\rho_L$ ) müsste man zur genauen Bestimmung der Masse  $m$  eines Körpers sein Gewicht eigentlich im Vakuum bestimmen (warum?). Der relative Fehler ist jedoch nur von der Größenordnung  $\frac{\rho_L}{\rho_K} = 10^{-4}$  (s.u.).

Aus den Gleichungen 2.2 und 2.3 folgt:

$$\frac{F}{F_A} = \frac{\rho_K}{\rho_F} \quad (2.4)$$

Da die Auftriebskraft  $F_A$  gleich der Differenz der Gewichtskraft des Körpers in Luft und der (scheinbaren) Gewichtskraft  $F_F$  des in die Flüssigkeit eingetauchten Körpers ist, also:

$$F_A = F - F_F \quad (2.5)$$

folgt aus den Gleichungen 2.4 und 2.5:

$$\rho_K = \rho_F \cdot \frac{F}{F - F_F} \quad (2.6)$$

Im vorliegenden Versuch werden die Gewichtskräfte mit einer Balkenwaage bestimmt, bei der lediglich die dem Gewicht entsprechenden Massen angezeigt werden. Mit den Gleichungen 2.5 und 2.6 gilt entsprechend:

$$\rho_K = \rho_F \cdot \frac{m}{m - m_F} \quad (2.6a)$$

Umgekehrt kann die Dichte  $\rho_F$  einer Flüssigkeit bestimmt werden, indem man zunächst die Masse  $m$  eines Festkörpers durch seine Wägung in Luft und danach seine scheinbare Masse  $m_F$  durch Wägung des vollständig in die Flüssigkeit eingetauchten Körpers bestimmt:

$$\rho_F = \rho_K \cdot \frac{m - m_F}{m} = \frac{m - m_F}{V} \quad (2.7)$$

Ist (lediglich) das Volumen  $V$  eines geeignet dimensionierten Festkörpers und seine (für genaue Messungen nur scheinbare) Masse  $m_L$  durch Wägung in Luft bekannt, kann unter Berücksichtigung der Auftriebskraft in Luft (Dichte  $\rho_L$ ), Gl. 3, bzw. der in Luft bestimmten scheinbaren Masse  $m_L = m - \rho_L V$  die Dichte der Flüssigkeit genauer bestimmt werden

$$\rho_F = \frac{m_L - m_F}{V} + \rho_L \quad (2.8)$$

## 2.2 Thermische Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten

Die Dichte von Festkörpern und Flüssigkeiten nimmt i.Allg. mit steigender Temperatur ab, da infolge der zunehmend thermisch angeregten Schwingungen ihrer Atome bzw. Moleküle und ihrer in Flüssigkeiten diffusiven Bewegungen der mittlere Atom- bzw. Molekülabstand zunimmt.

Der *lineare thermische Ausdehnungskoeffizient*  $\alpha$  fester Körper ist durch die Temperaturabhängigkeit der relativen Änderung ihrer Länge  $L$  definiert:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (2.9)$$

Für metallische Elemente hat  $\alpha$  bei Raumtemperatur einen nahezu temperaturunabhängigen Wert im Bereich von einigen  $10^{-5} \frac{1}{K}$ . Der *kubische Ausdehnungskoeffizient*  $\beta$  des Volumens der Metalle ist entsprechend.

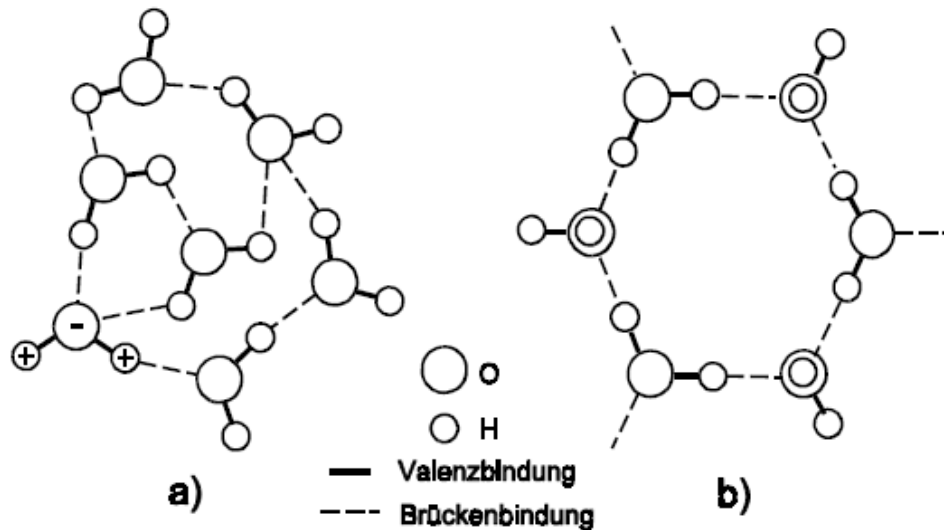
$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \cdot \frac{(L + \Delta L)^3 - L^3}{\Delta T} \approx \frac{1}{L} \cdot \frac{3\Delta L}{\Delta T} = 3\alpha \quad (2.10)$$

Die Dichte der Flüssigkeit Ethanol ( $C_2H_5OH$ ) beträgt  $\rho = 0,789 \text{ g/cm}^3$  bei  $20^\circ C$ . Die Temperaturabhängigkeit der Dichte ist die normaler Flüssigkeiten,  $\rho$  nimmt mit steigender Temperatur *linear* mit  $T$  ab. Die relative Änderung der Dichte von Ethanol ist ca.

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \approx -1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{K} \quad (2.11)$$

Bei der Abkühlung von flüssigem Ethanol nimmt mit geringer werdenden Molekülabständen die innere Reibung der Moleküle drastisch zu. Wie bei Glasschmelzen erfolgt die Erstarrung nicht „schlagartig“ bei einer festen Temperatur sondern „graduell“. Hierbei wird die lokale (ungeordnete) Anordnung der Flüssigkeitsmoleküle zunehmend eingefroren.

Wasser ( $H_2O$ ) verhält sich hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit seiner Dichte - anders als Ethanol - „anomal“. Dies liegt an der räumlich unsymmetrischen Ladungsverteilung des (elektrisch negativ geladenen) Sauerstoffions und der (positiv geladenen) Wasserstoffionen des Wassermoleküls (s. Abb. 2.1 a). Das damit verbundene elektrische „Dipolmoment“ ( $\pm$ -Ladung  $\cdot$  Abstand der Ladungsschwerpunkte) hat zur Folge, dass sich an das Sauerstoffion (kurzzeitig) Wasserstoffionen benachbarter Wassermoleküle über sogenannte „Wasserstoffbrückenbindungen“ anlagern.



**Abbildung 2.1:** 2D-Projektion der lokalen Struktur von a) Wasser, b) Eis

Eis hat unterhalb  $0^{\circ}\text{C}$  eine langreichweitig geordnete hexagonale Kristallstruktur, bei der die Sauerstoffatome von jeweils vier tetrahedrisch angeordneten Wasserstoffatomen umgeben sind (Abb. 2.1 b). Die beiden valenzgebundenen Wasserstoffatome haben einen Abstand von  $10\text{ nm}$  zum Sauerstoffatom, die beiden über die o.g. Brückenbindungen gebundenen einen Abstand von jeweils  $17\text{ nm}$ .

Wie Abb. 2.1 bereits andeutet, ist die geordnete hexagonale Struktur des Eises weniger dicht gepackt als die ungeordnete des Wassers (deshalb schwimmt Eis im Wasser). Aber auch bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes von Eis bleibt die lokale Umgebung eines Wassermoleküls eisartig. Diese Nahordnung verringert sich mit steigender Temperatur nur graduell. Daher hat Wasser ein Dichtemaximum bei  $4^{\circ}\text{C}$  und eine bis zum Siedepunkt ( $100^{\circ}\text{C}$ ) nichtlineare Temperaturabhängigkeit seiner Dichte. Abb. 2.2 zeigt die temperaturabhängige Dichte  $\rho(T)$  von Wasser im Temperaturintervall zwischen  $0$  und  $50^{\circ}\text{C}$ .



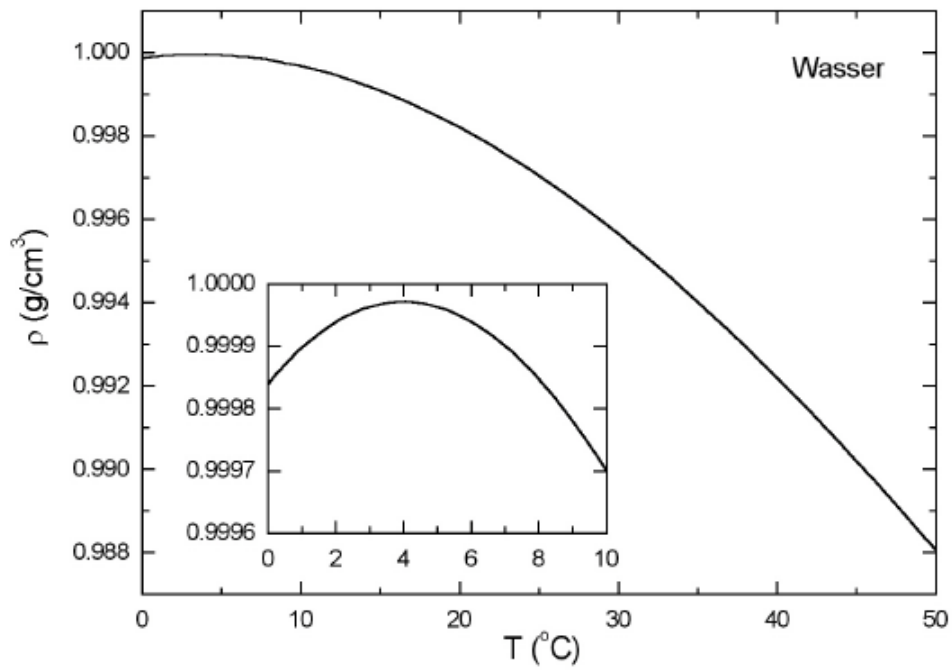
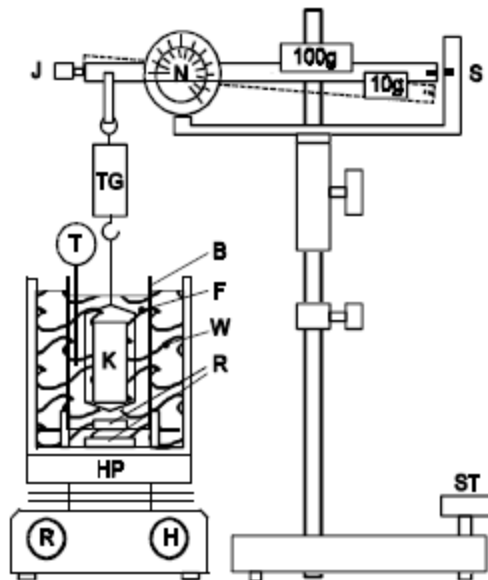


Abbildung 2.2: Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser. Im Inset der Dichteverlauf zwischen 0 u. 10°C mit dem Maximum bei 4°C.

### 3 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Dichten von regulären metallischen Probenkörpern bei Raumtemperatur durch ihre Wägung mit einer Balkenwaage und Bestimmung ihrer Abmaße mit einer Schieblehre.
2. Bestimmen Sie die Dichte aller Probenkörper bei Raumtemperatur durch ihre Wägung mit einer Balkenwaage in Luft und Wasser.
3. Bestimmen Sie mit der Balkenwaage durch Wägung eines Tauchkörpers in Luft und Wasser die Dichte von Wasser im Temperaturbereich zwischen ca. 10 und 50 °C.
4. Bestimmen Sie entsprechend durch Wägung des Tauchkörpers die Dichte von Ethanol im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 50 °C.

## 4 Versuchsaufbau



**Abbildung 4.1:** Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte von festen Körpern und Flüssigkeiten: rechts: Balkenwaage auf Stativ mit Schiebegewichten 10g und 100g sowie Federwaage mit Noniuskala N; links: Heizplatte HP mit Magnetrührern R, Thermostatgefäß (im Schnitt) mit Wasser W, Becherglas B mit Flüssigkeit F auf Drahtnetzgestell, Körper K auf Waagschale mit Tariergewicht TG, Thermometer T

Abb.4.1 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dichte verschiedener Metallkörper. Die am Stativ höhenverstellbare Balkenwaage hat einen Wägebereich bis 310 g. Das Gewicht bzw. die zu wägende Masse wird mit den Schiebegewichten 100 g und 10 g grob ausbalanciert. Mit einer am Drehpunkt des Waagebalkens montierten Federwaage (Spiralfeder) wird die Masse fein ausbalanciert, so dass die Skalenstriche S rechts an der Waage genau in gleicher Höhe gegenüberstehen. Bei sorgfältiger Einstellung unter Zuhilfenahme der Noniuskala auf der Federwaage lässt sich die zu wägende Masse auf ca. 10 mg genau bestimmen. Ein Aluminiumblech am rechten Ende des Waagebalkens (nicht gezeigt) ist von zwei kleinen am unbeweglichen Ende der Waage montierten Hufeisenmagneten umgeben. Die Anordnung stellt eine Wirbelstrombremse dar, welche bewirkt, dass das Einschwingen der Waage schnell abklingt. (Wie funktioniert eine Wirbelstrombremse? Vergl. Versuch A5, Pohlsches Drehpendel).

Ist lediglich das Tariergewicht TG an die Waage gehängt, sollte diese bei der Einstellung  $m = 0$  g im Gleichgewicht sein. Ein Justierknopf J gestattet die Feineinstellung. Gegebenfalls kann auch durch Verdrehen der Fußschraube ST am Stativ die genaue Nullstellung der Waage erfolgen.

Die Bestimmung der Dichte der Metallkörper erfolgt durch ihre Wägung in Luft und Leitungswasser bei Raumtemperatur (Thermometer T). Hierfür ist auch die (scheinbare) Masse der Waagschale in Luft und Wasser zu bestimmen. Die Wägung in Wasser sollte so erfolgen, dass die Waagschale blasenfrei ganz in das Wasser eingetaucht ist, zusätzlich ein Stück des Aufhängedrahtes (ca. 1 cm). Die Eintauchtiefe sollte bei allen Wägungen in Wasser etwa gleich sein.

Die temperaturabhängige Dichte der Flüssigkeiten Wasser und Ethanol wird ermittelt, indem die scheinbare Masse eines an das Tariergewicht angehängten Tauchkörpers in Luft ( $m_L(T_0)$ ) und in der Flüssigkeit ( $m_F(T)$ ) bestimmt wird. Das Volumen des Tauchkörpers  $V(T_0)$  wird bei Raumtemperatur  $T_0$  über seine Abmaße genau bestimmt. Der zylindrische Tauchkörper besteht aus V2A Edelstahl, der Legierung ( $\text{Fe}_{74}\text{Cr}_{18}\text{Ni}_8$ ). Ihr thermischer Ausdehnungskoeffizient ist.  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Das temperaturabhängige Volumen  $V(T)$  des Zylinders ist

$$V(T) = V(T_0) \cdot (1 + 3\alpha(T - T_0)) \quad (4.1)$$

## 5 Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Dichte des Wassers unterhalb Raumtemperatur werden im Kühlschrank für jeden Versuch ca. 1 Liter Leitungswasser (im Erlemeyerkolben) auf ca. 3°C vorgekühlt sowie das Thermostatgefäß mit Drahtgitter. Außerdem sind für jeden Versuchsaufbau je ca. 300 ml Leitungswasser und (im Erlemeyerkolben frisch abgekochtes) Reinstwasser bei Raumtemperatur bereitzustellen. Hierfür ist der Versuchsbetreuer verantwortlich.

1. Zunächst ist die Nulllage der Balkenwaage mit Tariergewicht mittels Justierknopf J (bzw St) einzustellen. Bestimmen Sie danach in Luft die Masse der Waagschale und die aller Probenkörper aus jeweils einer Wägung sowie die Abmaße der regulären Körper (Höhe  $h$  und Durchmesser  $d$  der Zylinder) aus jeweils drei Messungen mit der Schieblehre (Mittelwertbildung).
2. Stellen Sie lediglich das zunächst leere Becherglas auf die (ungeheizte) Heizplatte bei Raumtemperatur und positionieren Sie darin seitlich das Thermometer auf etwa mittlerer Höhe. Senken Sie danach durch Verschieben der Waage am Stativ die Schale mit der ersten Probe in das Glas soweit wie möglich ab und füllen Sie (blasenfrei!) lediglich soviel Leitungswasser hinein, dass die Waagschale mit Probenkörper und Bügel (bis zum Draht) ganz eingetaucht ist. Bestimmen Sie die infolge des Auftriebs verringerte Masse  $m_F(T_0)$  ( $T_0$  mit Thermometer messen!) der eingetauchten Waagschale mit je einem Probenkörper, am Schluss die der Waagschale allein. Beachten Sie, dass bei der Wägung die Waagschale mit Probenkörper frei" im Wasser hängen muss, diese also nicht das Becherglas oder Thermometer berühren darf.
3. Zunächst sind die Abmaße des zylindrischen Tauchkörpers bei Raumtemperatur  $T_0$  so genau wie möglich zu bestimmen. Bedenken Sie, dass der absolute Fehler bei der Bestimmung der Dichte von Wasser im wesentlichen vom Volumenfehler des Tauchkörpers abhängt. Sein Durchmesser  $d$  wird mit einer Mikrometerschraube dreimal an verschiedenen Stellen des Zylinders, seine Höhe  $h$  ebenfalls dreimal mit einer Mikrometerschraube (wenn vorhanden) oder mit einer (metallischen) Schieblehre gemessen. Bestimmen Sie außerdem die Abmaße der Aufhängungsöse, d.h. des halben Kreisrings, durch Messung seines größten und kleinsten Durchmessers  $d_1$  bzw.  $d_2$ . Das Volumen des in die Flüssigkeit jeweils eingetauchten (kurzen) Drahtstücks wird vernachlässigt.

Bestimmen sie darauf durch Wägung in Luft die Masse  $m_L(T_0)$  des Tauchkörpers. Danach wird dieser in das leere Glas gestellt und soviel abgekochtes Reinstwasser (Raumtemperatur) eingefüllt, bis der Körper vollständig bis zum Draht darin einge-

taucht ist. Sorgen Sie nun gegebenenfalls durch Bewegen des Glases dafür, dass sich alle noch am Körper haftenden Bläschen lösen. Diese würden die Dichtemessung durch Wägung stark verfälschen. Stellen Sie nun das Becherglas auf die Heizplatte und hängen Sie den Körper an die Waage, so dass er im Wasser des Becherglases frei hängt. Eventuell ist Reinstwasser nachzufüllen. Positionieren Sie das Thermometer mittig auf Zylinderhöhe und bestimmen Sie nun seine Masse  $m_F(T'_0)$  möglichst präzise.

Es wird zwar erwartet, dass auch Leitungswasser bei Raumtemperatur  $T'_0$  kein wesentliches anderes Messergebnis  $m_F(T'_0)$  liefert. Bei höheren Temperaturen ist jedoch die Verwendung von frisch destilliertem bzw. abgekochtem Wasser unbedingt notwendig, da mit steigender Temperatur zunehmend das im Leitungswasser vor allem gelöste  $\text{CO}_2$ -Gas in Form kleiner Bläschen entweicht, die am Tauchkörper haften und die zuverlässige Bestimmung der geringen Dichteänderung des Wassers unmöglich machen.

Ziel des nächsten Versuchsteils ist es, zunächst den Tauchkörper für die Messung der temperaturabhängigen Dichte des Wassers darin rasch auf eine Temperatur von ca.  $10^\circ\text{C}$  abzukühlen. Lassen Sie dafür den von der Waage abgehängten Tauchkörper im Becherglas und stellen Sie das vorgekühlte Thermostatgefäß mit (großem) Rührer und Drahtgitter zentrisch auf die Heizplatte. Stellen Sie nun das Becherglas mit Tauchkörper in die Mitte des Gefäßes. Positionieren Sie seitlich das Thermometer etwa mittig in der Höhe des an die Waage gehängten Tauchkörpers und positionieren Sie diesen durch Verschieben der Waage, so dass seine Unterkante sich ca. 1 cm über dem Becherglasboden befindet. Geben Sie den kleinen Rührer ins Becherglas und füllen Sie gegebenenfalls Reinstwasser nach, so dass der Tauchkörper (mit Öse) vollständig eingetaucht ist. Wiederholen Sie Ihre Wägung bei Raumtemperatur  $T'_0$ .

Füllen Sie nun das Thermostatgefäß mit dem vorgekühlten Leitungswasser, so dass der äußere und innere Wasserspiegel auf etwa gleicher Höhe liegen. Schalten Sie den Rührer auf niedrige Drehzahl (150 - 300 rpm) ein. Beobachten Sie beim Abkühlen des Wassers gegebenenfalls schon die Änderung der Masse  $m_F(T)$  des Tauchkörpers. Vor jeder Wägung muss jedoch jeweils der Rührer abgestellt werden. Ganz wesentlich für die Bestimmung der (zwischen  $10$  und  $20^\circ\text{C}$  sehr geringen) Änderung der Masse  $m_F$ , d.h. der geringen Dichteänderung des Wassers, ist eine möglichst genaue Einstellung der Waage. Verstellen Sie daher die Waage (mit Blick auf die Skala) gegebenenfalls nur um eine Noniusteilung und warten Sie jeweils ihr Einschwingen in die neue Lage ab. (1 Noniusteilung = 10 mg entspricht einem vertikalen Versatz der Skalenstriche  $S$  um ca. 1 mm).

Ist die Temperatur im Becherglas auf unterhalb  $100^\circ\text{C}$  abgesunken, wird die elektrische Heizung auf  $150^\circ\text{C}$  eingeschaltet und die Messung bei steigender Temperatur in Intervallen von ca.  $2^\circ\text{C}$  (bzw. 2 min) begonnen bzw. fortgeführt. Für Tempera-

turen oberhalb  $20^{\circ}\text{C}$  ist die Heizung auf ca.  $225^{\circ}\text{C}$  zu erhöhen. Hier genügt ein größeres Messintervall (ca.  $3^{\circ}\text{C}$  bzw. ca. 3 min). Nach Erreichen von  $50^{\circ}\text{C}$  ist die Heizung abzuschalten. Danach wird der Tauchkörper mit der Waage vorsichtig herausgehoben, ebenso das Thermometer und das Becherglas. Dann wird das Thermostatgefäß von der Heizplatte genommen, entleert und unter fließendem Wasser auf Raumtemperatur abgekühlt, ebenso der Tauchkörper.

4. Zur Bestimmung der temperaturabhängigen Dichte von Ethanol wird zunächst das Thermostatgefäß eine Weile mit kaltem Wasser auf die Heizplatte gestellt, bis auch diese in etwa auf Raumtemperatur abgekühlt ist. Danach wird es (ohne Wasser) mit Drahtnetzgestell, dem Becherglas und beiden Rührern auf die Heizplatte gestellt sowie das Thermometer positioniert. Es wird der an die Waage gehängte Tauchkörper in das Becherglas abgelassen und eine Kontrollmessung seiner Masse  $m_L(T_0)$  durchgeführt. Darauf wird Ethanol eingefüllt und die Masse  $m_F(T'_0)$  bestimmt. Anschließend ist Wasser bei Raumtemperatur in das Thermostatgefäß zu füllen und nach Einschalten der Heizung auf  $225^{\circ}\text{C}$  und der Rührer die Messung zwischen Raumtemperatur und  $50^{\circ}\text{C}$  in Intervallen von ca.  $3^{\circ}\text{C}$  durchzuführen. Bei  $50^{\circ}\text{C}$  ist die Heizung wieder abzustellen.

Nach der Messung ist analog wie bei der Messung in Wasser zu verfahren.

**Vorsicht:** Das Becherglas ist mit abgelassenem Tauchkörper herauszunehmen, da es sonst infolge der geringeren Dichte von Ethanol aufschwimmen und kippen würde. Beide Gefäße sind für die nächsten Messungen zu entleeren.

## 6 Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie aus den Messergebnissen die Massen und Volumina der regulären Probenkörper und mit Gleichung 2.1 ihre Dichten.
2. Berechnen sie aus den Wägungen aller Probenkörper in Luft und Wasser ihre Dichten mittels Gleichung 2.6a. Die Dichte von Wasser ist  $\rho_W = 0,998 \frac{g}{cm^3}$  ( $21^\circ C$ ). Werte bei anderen Temperaturen können aus Abb. 2.2 ermittelt oder den Ergebnissen der Aufgabe 3 entnommen werden. Der Auftrieb in Luft kann hier vernachlässigt werden.
3. und 4. Berechnen Sie zunächst aus den Abmaßen des Tauchkörpers sein Volumen  $V_0$  bei Raumtemperatur  $T_0$ :

$$V(T_0) = V_0 = \frac{\pi d^2 h}{4} + \frac{\pi d^2 (d_1 - d_2)}{8} \quad (6.1)$$

Danach ist mit den Gleichungen 2.8 und 4.1 aus den Ergebnissen der Wägung des Tauchkörpers in Luft und Flüssigkeit die Dichte  $\rho_F$  von Wasser und Ethanol für jede Messtemperatur  $T$  zu bestimmen.

$$\rho_F(T) = \frac{m_L - m_F}{V_0(1 + 3\alpha(T - T_0))} + \rho_L \quad (6.2)$$

Die Dichte der Luft beträgt  $\rho_L = 1,2 \frac{mg}{cm^3}$ . Sie wird als temperaturunabhängig angenommen. Zu  $\alpha$  von V2A Edelstahl s. Kapitel 4.

Tragen Sie das Ergebnis  $\rho_F(T)$  für beide Flüssigkeiten in getrennten Graphen mit jeweils optimaler Skalierung auf Millimeterpapier bzw. in einem PC-Plot auf. Für einen Vergleich mit Literaturdaten für Wasser (Quelle s.n.S.) kann das Polynom

$$\begin{aligned} \rho_{Wasser}(T) = & (0,99987 + 5,23346 \cdot 10^{-5} \frac{T}{^\circ C} - 7,41812 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{^\circ C}\right)^2 \\ & + 3,29774 \cdot 10^{-8} \left(\frac{T}{^\circ C}\right)^3) \frac{g}{cm^3} \end{aligned} \quad (6.3)$$

(im Intervall  $0 - 50^\circ C$  auf  $< 0,01 \%$  genau) benutzt werden. Für Ethanol wird

$$\rho_{Ethanol}(20^\circ C) = 0,7894 \cdot \frac{g}{cm^3}$$



angegeben. Zeichnen bzw. berechnen Sie für Ethanol eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte und bestimmen Sie durch Extrapolation der Geraden  $\rho(20^\circ\text{C})$  zum Vergleich mit dem Literaturwert.

## 7 Fehlerrechnung und Diskussion

1. Bestimmen Sie den jeweiligen relativen und absoluten Größtfehler von  $\rho$  entsprechend Gleichung 2.1 nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (s. Fehlerrechnung, Kap. 3). Vergleichen Sie das Endergebnis ( $\rho + \Delta\rho$ ) für jeden Probenkörper mit Literaturwerten.

Fehler der Wägung:  $\Delta m = \pm 2 \cdot 0,01$  g, da die Masse der Waagschale einzeln bestimmt werden muss; Fehler der Schieblehre:  $\Delta h$  bzw.  $\Delta d = \pm 0,1$  mm.

2. Bestimmen Sie den jeweiligen absoluten Größtfehler von  $\rho_K$  entsprechend Gleichung 2.6 a) nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen der ersten Aufgabe und mit der Literatur. Welche der hier angewandten Messmethoden zur Dichtebestimmung ist genauer?

Fehler der Wägung:  $\Delta m = \Delta m_F = \pm 0,02$  g;  $\rho_F$  wird als fehlerfrei angenommen.

3. und 4. Bestimmen Sie zunächst den relativen sowie absoluten Größtfehler für das Tauchkörpervolumen  $V_0$ . Da das Volumen des Zylinders viel größer als das des Kreisrings ist, kann hierbei der Fehler des Ringvolumens vernachlässigt werden.

Fehler der Mikrometerschraube:  $\Delta h$  bzw.  $\Delta d = \pm 0,01$  mm.

Bestimmen Sie darauf den absoluten Größtfehler der Dichte von Wasser und Ethanol bei Raumtemperatur gem. Gleichung 2.8 nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz.

Fehler der Wägung:  $\Delta m = \Delta m_F = \pm 0,01$  g;  $\rho_L$  wird als fehlerfrei angenommen.

Tragen Sie den Fehler als einzelnen senkrechten Fehlerbalken in den entsprechenden Graphen bei Raumtemperatur ein. Welcher Fehler der Einzelmessung trägt am meisten zum Gesamtfehler bei? Kann ein horizontaler Fehlerbalken der Messdaten (Temperaturfehler) hier vernachlässigt werden?

Vergleichen Sie die Messdaten mit den Literaturangaben und versuchen Sie, mögliche Ursachen für Abweichungen von Mess- und Literaturwerten herauszufinden. Vergleichen Sie hierbei auch mögliche Abweichungen von Mess- und Literaturwerten der Dichten von Wasser und Ethanol zusammen.

Welche (einfachen) Änderungen im Versuchsaufbau und in der Durchführung wären geeignet, die Messgenauigkeit zu erhöhen?

## 8 Fragen zur Selbstkontrolle

1. Was ist der Unterschied zwischen *Masse* und *Gewicht* eines Körpers?
2. Was ist der Unterschied zwischen *Dichte* und dem *spezifischen Gewicht* des Körpers?
3. Was versteht man unter *Auftrieb*?
4. Was besagt das *Archimedische Prinzip*?
5. Wann schwimmt, wann schwebt und wann sinkt ein Körper in einer Flüssigkeit?
6. Warum schwimmt Eis in Wasser?
7. Welches Verhalten der Dichte von Wasser wird *Dichteanomalie* genannt und warum besteht sie?
8. Warum dehnen sich feste Körper und Flüssigkeiten mit steigender Temperatur aus?
9. Wie ist der *lineare*, wie der *kubische Ausdehnungskoeffizient* von Festkörpern definiert und wie hängen sie zusammen?
10. Ein mit Steinen beladenes Boot schwimmt auf einem kleinen Teich. Ändert sich die Höhe seines Wasserspiegels, wenn die Steine aus dem Boot in den Teich geworfen werden? Wenn ja, warum?