

Zählen, Messen Wiegen: Eingangsversuch im Physikalischen Grundpraktikum

Dieser Versuch bereitet auf das Physikalische Grundpraktikum an der Technischen Universität Braunschweig vor. Die SI-Basiseinheiten und die Grundlagen der Fehlerrechnung im Praktikum werden in diesem Versuch vorgestellt. Fünf einzelne Experimente dienen dazu, sich mit Messgeräten und Arbeitsabläufen im Praktikum vertraut zu machen, um auf das Physikalische Grundpraktikum bestmöglich vorbereitet zu sein.

Vorkenntnisse¹

Système International d'Unités (SI) – Meter – Kilogramm – Sekunde – Ampere – Mol – Candela – Messunsicherheiten – Einheit und Dimension – Fehlerbetrachtungen und -berechnungen – fotometrische Größen – Digitalmultimeter – Strom-Spannungs-Kennlinien – mathematisches und physikalisches Pendel – Feder- und Gewichtskraft – Schaltungen von Widerständen

Literatur

Das neue Internationale Einheitensystem (SI), PTB-Infoblatt, 2020.
P. Blüm, Einführung zur Fehlerrechnung im Praktikum, 2002.

Physikalische Grundlagen

Zur Erstellung eines Einheitensystems wie des SI-Systems ist es notwendig, ein Größensystem und einen Satz von Gleichungen zur Definition der Beziehungen zwischen den Größen zu erstellen, da die Gleichungen, die die Größen verknüpfen, auch die Einheiten verknüpfen. Es ist zweckmäßig, einige wenige Basiseinheiten festzulegen und alle anderen Einheiten anschließend von diesen Basiseinheiten abzuleiten.

Zunächst ist es sinnvoll, den Wert einer Größe durch einen Zahlenwert und die Einheit auszudrücken. Dabei gilt: die physikalische Größe U wird durch ihren Zahlenwert $\{U\}$ und durch ihre Einheit $[U]$ angegeben.

$$U = \{U\} \cdot [U] \tag{1}$$

Eckige Klammern um ein Formelzeichen bedeuten „Einheit von ...“, z.B. $[U] = 1 \text{ V}$. Eckige Klammern um eine Einheit sind falsch! Geschweifte Klammern um ein Formelzeichen bedeuten

¹Für das Kolloquium müssen Sie auf die physikalischen Hintergründe dieser Stichwörter vorbereitet sein.

„Zahlenwert von...“, z.B. $\{U\} = 220$, gelesen als: „Der Zahlenwert der Spannung ist gleich 220“. Per Konvention wird zwischen dem Zahlenwert und der Einheit einer physikalischen Größe stets Abstand gelassen, z.B. ein Leerzeichen. Ausnahmen bilden nur Grad $^{\circ}$ sowie Minute $'$ und Sekunde $''$.

Die SI-Basiseinheiten

Das SI (französisch: *Système International d'Unités*, Internationales Einheitensystem) wurde 1960 von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht erstellt und definiert. In Tabelle 1 sind die Basisgrößen, Basiseinheiten mit ihren definierenden Konstanten (Stand: 20. Mai 2019) sowie die einzelnen Dimensionen des SI gezeigt.

Formelzeichen	Basisgröße	Basiseinheit	Dimension	def. Konstante
m	Länge	Meter	L	c
kg	Masse	Kilogramm	M	h
s	Zeit	Sekunde	T	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$
A	Elektrische Stromstärke	Ampere	I	e
K	Thermodynamische Temperatur	Kelvin	θ	k
mol	Stoffmenge	Mol	N	N_A
cd	Lichtstärke	Candela	J	K_{cd}

Tabelle 1: Die sieben SI-Basiseinheiten zusammen mit ihren definierenden Konstanten.

Physikalische Größen sind per Konvention in einem System von Dimensionen organisiert. Die Dimension einer physikalischen Größe gibt deren Zusammenhang mit der Basisgröße an. Sie werden durch einen einzigen Großbuchstaben in aufrechter Schrift angegeben. Eine Dimensionsanalyse ist insbesondere hilfreich, wenn das Ergebnis einer Rechnung überprüft werden soll; stimmt die Dimension des Ergebnisses nicht, ist auch der Zahlenwert des Ergebnisses fehlerhaft. Generell gilt für die Dimension einer Größe Q

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \theta^{\varepsilon} N^{\zeta} J^{\eta}. \quad (2)$$

Beispielsweise hat die Geschwindigkeit die Dimension $L^1 T^{-1}$. Für die Einheit von Q gilt dann

$$[Q] = 1 \text{ m}^{\alpha} \text{ kg}^{\beta} \text{ s}^{\gamma} \text{ A}^{\delta} \text{ K}^{\varepsilon} \text{ mol}^{\zeta} \text{ cd}^{\eta}. \quad (3)$$



Abb. 1: Schematische Darstellung der sieben SI-Basiseinheiten und ihrer definierenden Konstanten. Bildquelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Sind die Dimensionsexponenten einer Größe alle Null, handelt es sich um eine dimensionslose Größe. Dies ist bei relativen Größen der Fall, die das Verhältnis zweier Größen gleicher Art definieren. Auch Größen, die eine Anzahl bzw. Menge angeben, haben die Dimension Eins. Von Bedeutung sind auch die kohärenten Einheiten. Bei ihnen haben die Zahlenwertgleichungen genau dieselbe Form wie die entsprechenden Größengleichungen, d.h. man benötigt keine Umrechnungsfaktoren zwischen den Einheiten. Zur Vereinfachung werden für bestimmte abgeleitete kohärente Einheiten besondere Namen verwendet, z.B. Joule: $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$.

Auf der 26. Generalkonferenz für Maße und Gewichte (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) vom 16. November 2018 wurde eine grundlegende Revision des Internationalen Einheitensystems beschlossen. Seit dem 20. Mai 2019 beziehen sich alle SI-Einheiten auf die Werte sieben ausgewählter Naturkonstanten: die Planck-Konstante h , die Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsium-Isotops ^{133}Cs , die Elementarladung e , die Boltzmann-Konstante k , die Avogadro-Konstante N_A , die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} (s. Tabelle 1).

Einheit der Länge (Meter)

Ursprünglich sollte die Längeneinheit über den zehnmillionsten Teil eines Viertels des Erdmeridians definiert werden. Bis 1960 wurde das Meter dann durch den internationale Platin-Iridium-Prototypen, hinterlegt in Paris, realisiert. Ab dann beruhte die Definition auf der Wellenlänge der Krypton-86-Strahlung. Dazu maß man die optische Wegdifferenz durch Zählen der Interferenzringe dieser Strahlung an einem Interferometer. 1983 wurde diese Definition durch die heute noch gültige abgelöst, die auf der Naturkonstanten der Vakuumlichtgeschwindigkeit c beruht (Neuformulierung von 2019):

m Der Meter ist die SI-Einheit der Länge. Er ist definiert, indem für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c der Zahlenwert 299792458 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit m/s, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$ definiert ist.

Das Meter ist also die Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299792458$ Sekunden durchläuft. Realisiert wird diese Einheit beispielsweise über sogenannte Laserwellenlängennormale. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig verfügt über einige besonders stabile Laser im roten, grünen und infraroten Spektralbereich, die als Laserwellenlängennormale dienen. Deren Wellenlängen schwanken weniger als ein Billionstel der Wellenlänge. Die Stabilität wird z.B. durch einen Vergleich mit atomaren Absorptionslinien gewährleistet. Dabei durchläuft ein Laserstrahl eine Ansammlung von Atomen, Molekülen oder Ionen. Diese absorbieren im Emissionsbereich des Lasers, sodass bei geeigneter Laserfrequenz eine Absorptionslinie beobachtet werden kann. Sollte der Laser noch nicht im idealen Bereich emittieren, wird ein Fehlersignal ausgegeben, welches durch Nachstimmen über einen Regelkreis reguliert wird. Natürlich sind dabei schmale Absorptionslinien mit hohem Gütefaktor notwendig, um den Laser über den Regelkreis möglichst ideal zu stabilisieren.

Einheit der Masse (Kilogramm)

Das Kilogramm ist die SI-Einheit der Masse. Es wird definiert durch die die Planck-Konstante h :

kg Das Kilogramm ist die SI-Einheit der Masse. Es ist definiert, indem für die Planck-Konstante h der Zahlenwert $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Js, die gleich $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ ist, wobei der Meter und die Sekunde mittels c und $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$ definiert sind.

Vor der Revision des Internationalen Einheitensystems im Mai 2019 war das Kilogramm die einzige Basiseinheit, die noch über einen internationalen Prototypen definiert war. Sie beruhte bis zu diesem Zeitpunkt auf einem Platin-Iridium-Prototypen, der sich im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (IBMG) in Sèvres bei Paris befand. Die Darstellung des Kilogramms über das Planck'sche Wirkungsquantum war der Weg zu einem quantenmechanischen Kilogramm. Für die Bestimmung der Planck-Konstante mit bestmöglicher Genauigkeit wurden zwei unterschiedliche Messprinzipien verfolgt. Eines ist die Watt-Waage, eine Stromwaage, bei der eine Gewichtskraft durch eine elektromagnetische Kraft ausgeglichen wird. Für ein anderes Messprinzip wurden hochreine Einkristall-Kugeln verwendet, die zu 99,999% aus dem Siliziumisotop ^{28}Si bestehen und deren Abweichung von einer perfekten Kugelform kleiner als ein nm ist. Ziel ist es, einen so reinen Einkristall herzustellen, dass mit einer geeigneten Messtechnik auf die Anzahl der Atome in der gesamten Kugel geschlossen werden kann.

Einheit der Zeit (Sekunde)

Die ursprüngliche Definition der Basisgröße Zeit geht auf 1/86400 des mittleren Sonnentages zurück. Dies bedeutet an einem festen Ort die Zeit von einem Sonnenhöchststand zum nächsten am folgenden Tag, gemittelt über das Jahr. Wegen Unregelmäßigkeiten der Erdrotation durch Gezeitenreibung bzw. Masseverlagerungen im Erdinnern ist diese Definition höchst ungenau, weshalb man sich 1967 auf Folgende einigte (Neuformulierung von 2019):

- s Die Sekunde ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9192631770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Hz, die gleich s^{-1} ist.

Die Sekunde ist somit unabhängig von allen anderen Einheiten. Die erste auf einem Übergang des Cäsium-Isotops ^{133}Cs beruhende Atomuhr wurde 1955 am National Physical Laboratory in Großbritannien gebaut. Die besten Cäsium-Atomuhren erreichen heute Genauigkeiten, die einer Abweichung von einer Sekunde in 180 Millionen Jahren entsprechen. Verbesserte Uhren, deren Frequenzen im optischen Bereich liegen, befinden sich gerade in der Entwicklung. Erreicht wurden bereits Genauigkeiten, die Abweichungen von einer Sekunde in 30 Milliarden Jahren entsprechen.

Einheit der elektrischen Stromstärke (Ampere)

Die Einheit der elektrischen Stromstärke Ampere ist nach André-Marie Ampère benannt. Das Ampere war seit 1948 bis zur Revision des SI-Einheitensystems über die elektromagnetische Kraftwirkung zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern definiert. Seit dem 20. Mai 2019 ist das Ampere über die Naturkonstante der Elementarladung e definiert:

- A Das Ampere ist die SI-Einheit der elektrischen Stromstärke. Es ist definiert, indem für die Elementarladung e der Zahlenwert $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit C, die gleich A·s ist, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$ definiert ist.

Das Ampere entspricht also dem Stromfluss von $1/(1,602176634 \cdot 10^{-19})$ Elementarladungen (Elektronen) pro Sekunde. Diese Neudefinition bietet auch die Möglichkeit, die elektrische Stromstärke bzw. das Ampere direkt zu realisieren, indem man die Anzahl der Elektronen zählt, die einen Leiterquerschnitt pro Sekunde passieren. Eine entsprechende praktische Umsetzung kann mittels Einzelelektronenpumpen ermöglicht werden, welche elektrische Ströme durch getakteten, kontrollierten Transport einzelner Elektronen erzeugen. Einzelelektronenpumpen sind Gegenstand aktueller Forschung.

Bereits seit 1990 wurden alle elektrischen Spannungs- und Widerstandskalibrierungen auf die elektrischen Quantennormale für die elektrische Spannung (Josephson-Effekt, Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$) und für den elektrischen Widerstand (Quanten-Hall-Effekt, von-Klitzing-Konstante $R_K = h/e^2$) bezogen, da die zugrundeliegenden quantenelektrischen Effekte eine hohe Reproduzierbarkeit und Präzision haben. Durch die SI-Revision werden K_J und R_K nun von definierten Werten für die Elementarladung e und die Planck-Konstante h abgeleitet werden. Damit ist die Realisierung des Ohm und des Volt innerhalb des SI möglich. Über das Ohmsche Gesetz sind zudem elektrische Stromstärke, Spannung und Widerstand mit einander verknüpft. Somit kann auch das Ampere über die oben genannten quantenelektrischen Effekte indirekt realisiert werden.

Einheit der thermodynamischen Temperatur (Kelvin)

Als intensive thermodynamische Zustandsgröße ist die Temperatur nicht additiv: Führt man zwei Systeme der Temperatur T zusammen, kann man nicht die Temperatur $2 \cdot T$ realisieren. Daher hat die Temperatur eine gewisse Sonderstellung unter den SI-Einheiten. Das Kelvin ist seit der Revision des SI-Einheitensystems über die Boltzmann-Konstante definiert:

K Das Kelvin ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es ist definiert, indem für die Boltzmann-Konstante k der Zahlenwert $1,380649 \cdot 10^{-23}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit J K^{-1} , die gleich $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels h , c und $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$ definiert sind.

Das Kelvin entspricht demnach einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie (kT) um $1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J}$ einhergeht. Bereits in den 1990er-Jahren konnte die Boltzmann-Konstante k mithilfe des akustischen Gasthermometers mit einer relativen Unsicherheit von 1,8 ppm (parts per million) bestimmt werden. Eine hierzu unabhängige Methode ist die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie, welche die PTB seit vielen Jahren einsetzt und mit der 2017 eine relative Unsicherheit von 1,9 ppm erreicht werden konnte. Vor Mai 2019 wurde das Kelvin über den 273,16ten Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser definiert, welcher auf 273,16 K festgelegt wurde.

Einheit der Stoffmenge (Mol)

Das Mol ist über die Avogadro-Konstante definiert:

mol Das Mol ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau $6,02214076 \cdot 10^{23}$ Einzelteilchen. Diese Zahl entspricht dem für die Avogadro-Konstante N_A geltenden festen Zahlenwert, ausgedrückt in der Einheit mol^{-1} , und wird als Avogadro-Zahl bezeichnet.

Die Stoffmenge n eines Systems ist ein Maß für eine Zahl spezifizierter Einzelteilchen. Bei einem Einzelteilchen kann es sich um ein Atom, ein Molekül, ein Ion, ein Elektron, ein anderes Teilchen oder eine Gruppe solcher Teilchen mit genau angegebener Zusammensetzung handeln.

Auch wenn die Avogadro-Konstante in der vor Mai 2019 gültigen Definition noch nicht erwähnt wurde, war sie auch zuvor schon mit der Einheit Mol verknüpft: Die Avogadro-Konstante entspricht der Anzahl von Teilchen, die in 12 g des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.

Einheit der Lichtstärke (Candela)

Endgültig aufgenommen in das SI wurde die Basiseinheit Candela (cd) im Jahr 1948. Allerdings bezog sich die damalige Definition auf die Leuchtdichte eines Schwarzen Körpers bei der Temperatur von erstarrtem Platin. Seit der SI-Revision wird die Candela wie folgt definiert:

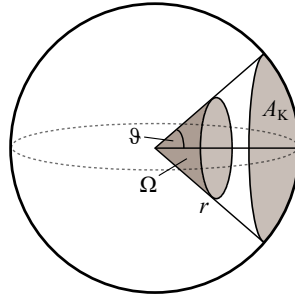


Abb. 2: Der Raumwinkel Ω ist definiert als das Verhältnis der Kugelkappe A_K zum Quadrat des Radius r . Eingezeichnet ist zudem der (halbe) Öffnungswinkel ϑ .

cd Die Candela ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung. Sie ist definiert, indem für das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} der monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz der Zahlenwert 683 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit lm W^{-1} , die gleich cd sr W^{-1} oder $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels h , c und $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$ definiert sind.

Die in der Definition enthaltene Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz entspricht einer Wellenlänge von ca. 555 nm und liegt damit im Bereich grünen Lichts. Vorteilhaft für das Verständnis der Basis-einheit Candela und ihrer Verknüpfung mit anderen photometrischen Größen wie dem Lichtstrom ϕ und der Beleuchtungsstärke E ist die Betrachtung des Raumwinkels Ω , der in Abb. 2 dargestellt ist. Die Einheit des Raumwinkels heißt Steradian (sr).

Berechnet wird der Raumwinkel, also das Verhältnis der Fläche einer Kugelkappe A_K zum Quadrat des Radius r , durch zweifache Integration über den Öffnungswinkel ϑ und über den Vollwinkel φ :

$$\Omega = \frac{A_K}{r^2} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\vartheta \leq \pi} \sin \vartheta d\vartheta = 2\pi(1 - \cos \vartheta) \quad (4)$$

Der volle Raumwinkel ist gerade 4π sr ($A_K = 4\pi r^2$). Die Lichtstärke I gibt die Dichte des Lichtstroms im Raumwinkel an und ist richtungsabhängig. Das Lumen, die Einheit des Lichtstroms ϕ , wird gebildet als Produkt der Einheiten für Lichtstärke und Raumwinkel. Für die Einheit gilt: $[\phi] = 1 \text{ cd sr} = 1 \text{ lm}$. Ein Lumen entspricht dem Lichtstrom, den eine Punktlichtquelle mit der Lichtstärke 1 cd gleichmäßig in alle Richtungen in den Raumwinkel 1 sr aussendet, also

$$\phi = I \cdot \Omega. \quad (5)$$

Als weitere wichtige photometrische Größe erweist sich die (planare) Beleuchtungsstärke E , deren Einheit das Lux ist: $[E] = 1 \text{ lm m}^{-2} = 1 \text{ lx}$. Sie gibt die Dichte des Lichtstroms auf eine ebene Fläche A an mit

$$E = \frac{\partial \phi}{\partial A}. \quad (6)$$

Die Beleuchtungsstärke für eine punktförmige Lichtquelle nimmt quadratisch mit der Entfernung von der Lichtquelle ab, es gilt

$$E = \frac{\partial \phi}{\partial A} = \frac{I \cdot \partial \Omega}{\partial A} = I \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (7)$$

Realisiert wird die Candela über eine Lichtquelle als Referenznormal. Die Rückführung kann entweder zur Temperatur oder zur Strahlungsleistung geschehen, wobei letzteres heutzutage

im Allgemeinen eingesetzt wird. Die Messung der Strahlungsleistung mithilfe eines Empfängers besteht aus einem Photometer, dessen spektrale Empfindlichkeit im Vergleich zu einem Kryo-Radiometer bestimmt wird. Die Verwendung eines Kryo-Radiometers impliziert, dass die Strahlungsleistung direkt in Watt angegeben werden kann, da dieses Messsystem die Erwärmung eines Hohlraumes wechselweise durch Absorption eines Laserstrahls oder durch elektrische Heizleistung kompensiert. Es werden viele Wellenlängen durchgemessen und damit wird beispielsweise ein besonders aufgebauter SI-Empfänger kalibriert. Anstatt eines Hohlraumstrahlers kann ebenso gut eine Glühlampe verwendet werden, deren Strahlungsfunktion weitgehend einem Schwarzen Strahler mit einer Temperatur T gleicht. Beleuchtet diese Lampe ein Photometer, das sich im Abstand d zur Lampe befindet, dann kann die Beleuchtungsstärke und der Photostrom berechnet bzw. gemessen werden. Mit Hilfe des photometrischen Abstandsgesetzes $I(t) = E(t) \cdot d^2 / \Omega_0$ kann daraus die Lichtstärke der Lampe berechnet werden.

In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt werden einmal jährlich rund 20 besonders stabile Glühlampen als Referenznormale und weitere Photometer und Lampen als Arbeitsnormale kalibriert. Damit lässt sich die Lichtstärke mit einer relativen Messunsicherheit von 0,20% darstellen.

Messung und Messgeräte

Messgeräte werden zur Bestimmung physikalischer Größen eingesetzt. Einige Messgeräte kommen in einem physikalischen Praktikum oder Labor häufig zum Einsatz. Zwei Beispiele – das Digitalmultimeter zur Messung elektrischer Größen und der Messschieber zur Messung von Längen – werden im Folgenden kurz vorgestellt. Sie werden auch im Eingangsversuch verwendet.

Digitalmultimeter

Zur Messung elektrischer Stromstärken, Spannungen und Widerstände (je nach Gerät auch Kapazitäten und Frequenzen) werden oft digitale Multimeter eingesetzt, mit deren Hilfe viele physikalische Größen gemessen werden können. Ein Multimeter wie in Abb. 3 hat vier Buchsen, die für Bananenstecker geeignet sind. Die COM-Buchse (für „common“) muss bei allen Messungen verwendet werden. Misst man eine Spannung oder einen Widerstand, wird der zweite Bananenstecker in die HzVΩ-Buchse rechts von der COM-Buchse gesteckt. Bei Stromstärken im A-Bereich bis 20 A wird der Bananenstecker in die linke 20 A-Buchse gesteckt, bei deutlich kleineren Stromstärken in die μmA -Buchse. Welche Messgröße (und ggf. auch in welchem Messbereich) gemessen wird, wird über das Einstellrad in der Mitte des Multimeters eingestellt.

Grundsätzlich gilt: Der Messbereich wird von oben nach unten geregelt. Bei einer unbekannten, nicht-einschätzbaren Stromstärke beginnt man also mit der 20 A-Buchse und stellt den Messbereich mit dem Einstellrad (Mitte) dementsprechend groß ein. Stellt sich heraus, dass der Messbereich zu groß gewählt ist, schaltet man auf den nächst kleineren und wechselt bei ausgeschaltetem Gerät gegebenenfalls auf die μmA -Buchse. Dies gilt auch für alle anderen zu messenden Größen: von oben nach unten an die Größe des Messwerts herangetasten, da sonst die Sicherung des Gerätes durchbrennen kann.



Abb. 3: Digitales Multimeter

Wechselstrom wird mit **AC** („Alternating Current“) bezeichnet, Gleichstrom mit **DC** („Direct Current“). Vergewissern Sie sich also vor einer Messung, ob eine Wechsel- oder Gleichstromquelle angeschlossen ist. Mit Hilfe des blauen Knopfes kann bei diesem Multimeter zwischen DC (–) und AC (~) gewechselt werden.

Messschieber

Der Messschieber ist ein häufig eingesetztes Längenmessgerät mit einer Genauigkeit bis in den Zehntelmillimeter-Bereich. Die Innenmessschenkel dienen der Messung von Innenmaßen, die Außenmessschenkel der von Außenmaßen. Mit dem Feststellrädchen kann die Skala zum Ablesen fixiert werden. Die Tiefenmessschiene dient dazu, schwer erreichbare Längen zu messen, z.B. Bohrungen. Die Skala ist in mm und zusätzlich in inch eingeteilt. Abgelesen wird mit Hilfe der Noniusskala: Die Lage der Nullmarkierung gibt die mm an. Der Teilstrich der Noniusskala, der mit dem der mm-Skala übereinstimmt, gibt die Nachkommastelle auf 0,05 mm genau an (dies gilt für den in Abb. 4 gezeigten Messschieber).

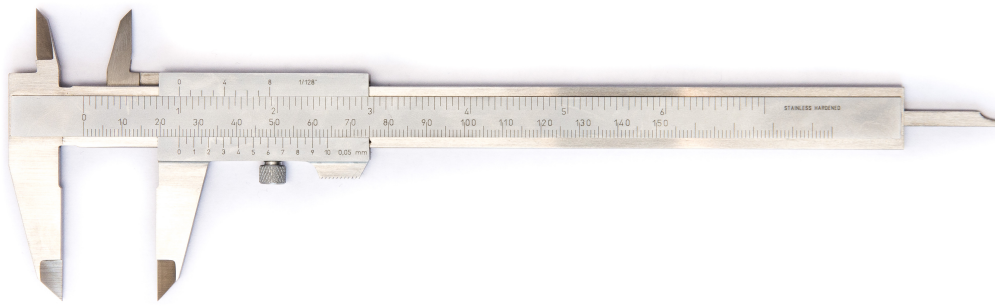


Abb. 4: Messschieber

Messunsicherheiten

Jede Messung – auch wenn sie mit größter Sorgfalt durchgeführt wird – unterliegt Messunsicherheiten. Um mit Hilfe einer durchgeführten Messung eine physikalische Gesetzmäßigkeit oder ein theoretisches Modell überprüfen zu können, muss die Qualität und die Aussagekraft des Messergebnisses bekannt sein. Um dies zu untersuchen, führt man eine sogenannte Fehleranalyse durch. „Fehler“ bedeutet hierbei nicht, dass das Messergebnis falsch ist, sondern drückt aus, dass der Messwert um den wahren (unbekannten) Wert streut. Der wahre Wert liegt dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb des durch die Messunsicherheit definierten Bereichs. Ein Messergebnis ist nur zusammen mit einer angegebenen Messunsicherheit vollständig. Bei der Betrachtung von Messunsicherheiten unterscheidet man zwischen systematischen und statistischen (zufälligen) Fehlern.

Systematische Fehler

Systematische Fehler sind für das Messverfahren charakteristisch und sind bedingt durch die Messanordnung oder den Messvorgang. Bei identischen Messbedingungen zeigen sie sich immer um den gleichen Betrag in die gleiche Richtung. Es ist nicht möglich, sie durch mehrfaches Wiederholen einer Messung zu vermeiden. Ist die Ursache für einen systematischen Fehler bekannt, kann dieser in einigen Fällen jedoch rechnerisch korrigiert werden. Für ein physikalisches

Praktikum sind meist Ungenauigkeiten der Messgeräte bzw. des Messverfahrens die Hauptquellen systematischer Fehler. Abweichungen der (äußeren) Messbedingungen durch beispielsweise Temperatur- oder Druckschwankungen können auch eine Quelle systematischer Fehler sein, spielen oft jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt:

- Ungenauigkeiten der Messgeräte, z.B.
 - eine Stoppuhr geht zu schnell / langsam
 - die Skala eines Maßbands ist nicht linear eingeteilt
 - ein Messgerät ist falsch justiert
 - Nullpunktfehler einer Anzeige (beispielsweise eines analogen Manometers)
 - Drift eines Messgeräts
- Ungenauigkeiten im Messvorgang, z.B.
 - ein (systematischer) Beobachtungsfehler eines Experimentierenden wie ein Parallaxe-
fehler beim schrägen Ablesen von einer Zeigerskala
 - ...
- Beeinflussung der Messung durch die verwendeten Messgeräte
 - bei einer Messung in einer elektrischen Schaltung können die Innenwiderstände der
Messgeräte das Messergebnis beeinflussen (häufig geben Hersteller daher die Größe
des Innenwiderstands eines Messgeräts an)
- äußere Einflüsse während der Messung

Um eine Quelle eines systematischen Fehlers ausschließen zu können, müssen die Messbedingungen gezielt geändert werden, z.B. durch Verwendung eines anderen Messgeräts. Der Einfluss der Quelle eines systematischen Messfehlers kann – wenn erkannt – in der Regel auf ein Minimum reduziert werden.

Bei Messgeräten wird die maximal erlaubte Abweichung $\Delta x_{\text{syst.}}$ einer Anzeige in der Regel durch Herstellerangaben bzw. Herstellungsnormen festgelegt, die in den Anleitungen am Versuchsplatz ausliegen oder gegebenenfalls im Internet zu finden sind. Eine quantitative Abschätzung liefert:

$$\frac{\Delta x_{\text{syst.}}}{x} = \frac{1 \text{ Skalenteil der Skala}}{\text{Skala bei Vollausschlag}} \quad (8)$$

Dabei entspricht x dem gemessenen Wert. Bei Stoppuhren kann folgende Abschätzung vorgenommen werden:

$$\Delta x_{\text{syst.}} = \text{kleinster Skalenwert} + 0,005 \cdot \text{Messwert} \quad (9)$$

Bei Temperaturmessungen mit Flüssigkeitsthermometern geht man davon aus, dass der Gerätefehler etwa einen Strichabstand beträgt. Für Längenmessungen mit dem Lineal, einem Stahlmaßstab oder dem Messschieber gilt für den systematischen Fehler $\Delta x_{\text{syst.}}$:

$$\Delta x_{\text{syst.}} = a + b \cdot l \quad (10)$$

l ist dabei die zu messende Strecke. Für die Konstanten a und b gelten je nach Längenmesser die in Tabelle 2 aufgeführten Werte.

Instrument	Holzlineal	Stahlmaßstab	Messschieber
a	0,5 mm	0,05 mm	0,05 mm
b	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}

Tabelle 2: Systematische Messunsicherheiten bei der Längenmessung

Statistische Fehler

Messwiederholungen, selbst wenn sie unter identischen Bedingungen durchgeführt werden, führen nicht immer zu demselben Messwert, sondern es treten Abweichungen auf. Sind diese Abweichungen unterschiedlich in Betrag und Richtung, so bezeichnet man sie als statistische Fehler. Sie sind insofern „zufällig“ als dass man ihre Ursachen nicht im Einzelnen verfolgen kann. Die Größe eines statistischen Fehlers kann in der Regel durch viele Wiederholungsmessungen reduziert werden. Im Folgenden sind einige Beispiele für Quellen statistischer Fehler aufgeführt:

- (zufällige) Ungenauigkeiten im Messvorgang, z.B.
 - Einfluss der Reaktionszeit des Experimentierenden, beispielsweise beim Bedienen einer Stoppuhr
 - unterschiedliche Verwendung eines Messgeräts von zwei Experimentierenden
- Messung einer statistischen Messgröße (z.B. beim radioaktiven Zerfall)
- (zufällig auftretende) äußere Einflüsse während der Messung

Wiederholungsmessungen können hier dazu dienen, die systematische Messunsicherheit zu bestimmen (s. Kapitel „Direkt messbare Größen“).

Grobe Fehler

Grobe Fehler, die sich beispielsweise aus Missverständnissen, Fehlüberlegungen, bei fehlerhafter Bedienung eines Messgeräts oder aus falscher Protokollierung der Messdaten oder auch aus Programmierfehlern in Auswertprogrammen ergeben, werden nicht als Messunsicherheiten betrachtet. Die Messungen und/oder Auswertungen sind in diesem Fall falsch und müssen wiederholt werden. Das Vorhandensein grober Fehler erkennt man nur durch kritisches Überprüfen und Kontrollieren der Ergebnisse. Vermeiden kann man sie durch sorgfältiges Experimentieren und Auswerten.

Fehlerberechnung

Direkt messbare Größen

Misst man eine Größe direkt, z.B. die Länge des Fadens eines Pendels oder die Zeit, die dieses Pendel für einen Schwingungsvorgang benötigt, wird man die Messung mehrfach durchführen, um am Ende ein genaues Ergebnis zu erzielen. Man zieht also eine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit und die einzelnen Messwerte x_i streuen um den wahren Wert x_w der zu messenden physikalischen Größe, die grundsätzlich unbekannt bleibt. Kann man annehmen, dass die Messwerte statistisch streuen, so ist der beste Wert, den man (bei normalverteilten Messwerten) angeben kann, der Mittelwert $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (11)$$

wobei n die Anzahl der Messungen ist. Außer den Streufehlern muss ebenso der systematische Fehler mit angegeben werden, es ergibt sich also für die Gesamtunsicherheit bzw. den Gesamtfehler Δx :

$$\Delta x = \Delta x_{\text{syst.}} + \Delta x_{\text{streu}} \quad (12)$$

Das Ergebnis einer Messung wird dann wie folgt angegeben:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (13)$$

Δx wird dabei als der absolute Fehler von x bezeichnet. Der wahren Wert x_w der gemessenen physikalischen Größe ist unbekannt, man erwartet ihn mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in dem Konfidenzintervall $[\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x]$. Außerdem kann die Angabe des relativen Fehlers $\frac{\Delta x}{\bar{x}}$ sinnvoll sein.

Das Endergebnis kann auch mit dem relativen statt dem absoluten Fehler angegeben werden:

$$x = \bar{x} \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (14)$$

Ein Maß für die Unsicherheit der Einzelmessung ist die Standardabweichung $\overline{\delta x}$, die den mittleren quadratischen Fehler der Einzelmessung angibt.

$$\overline{\delta x} = s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

Hiermit lässt sich also ein Maß für die Streuung der Messwerte um den Mittelwert $\bar{x}$ angeben. Als Streufehler Δx_{streu} für die Unsicherheit des Näherungswertes $\bar{x}$ dient die Standardabweichung des Mittelwertes $\overline{\delta \bar{x}}$, die den mittleren Fehler des Mittelwertes angibt:

$$\overline{\delta \bar{x}} = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

Falls es nicht sinnvoll oder möglich ist, den Mittelwert der Messwerte einer zu bestimmenden physikalischen Größe anzugeben bzw. zu bestimmen, muss der zufällige Fehler abgeschätzt werden. Eine Möglichkeit ist, die Anzeige von mehreren Experimentierenden ablesen bzw. die Justierung von den einzelnen Versuchsteilnehmern wiederholen zu lassen. So reduziert man zufällige Ables- oder Einstellungsfehler.

Nicht direkt messbare Größen

Oftmals wird die zu bestimmende physikalische Größe nicht direkt gemessen, sondern ist eine Funktion von direkt messbaren Größen $x_0, y_0 \dots$:

$$F = f(x_0, y_0 \dots) \quad (17)$$

Der Mittelwert $\overline{F}$ der nicht direkt gemessenen Größe F ergibt sich durch das Einsetzen der Mittelwerte der direkt messbaren Größen in Gleichung (17):

$$\overline{F} = f(\bar{x}, \bar{y} \dots) \quad (18)$$

Für die Fehlerfortpflanzung in der Einzelmessung gilt die folgende Beziehung:

$$\overline{\delta f(x, y \dots)} = \left. \frac{\partial f(x, y \dots)}{\partial x} \right|_{x_0, y_0 \dots} \overline{\delta x} + \left. \frac{\partial f(x, y \dots)}{\partial y} \right|_{x_0, y_0 \dots} \overline{\delta y} + \dots \quad (19)$$

Die Fehlerfortpflanzung der Mittelwertfehler berechnet sich mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\overline{\delta f(x_0, y_0 \dots)} = \sqrt{\left(\left. \frac{\partial f(x, y \dots)}{\partial x} \right|_{x_0, y_0 \dots} \overline{\delta x} \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial f(x, y \dots)}{\partial y} \right|_{x_0, y_0 \dots} \overline{\delta y} \right)^2 + \dots} \quad (20)$$

Dazu folgendes Beispiel zur experimentellen Bestimmung einer Geschwindigkeit:

Bsp. Über eine direkte Längenmessung und eine direkte Zeitmessung wird eine mittlere Geschwindigkeit als $\bar{v} = \frac{\bar{s}}{\bar{t}} = \frac{100,0 \text{ cm}}{3,37 \text{ s}} = 0,297 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ berechnet. Die Messwerte $\bar{s}$ und $\bar{t}$ sind dabei jeweils aus Mittelung mehrerer Messungen entstanden. Die zugehörigen Messunsicherheiten sind $\delta \bar{s} = 0,1 \text{ cm}$ und $\delta \bar{t} = 0,05 \text{ s}$. Da $\bar{v}$ über die fehlerbehafteten Größen $\bar{s}$ und $\bar{t}$ berechnet wurde, pflanzt sich der Fehler gemäß des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes fort und es gilt

$$\overline{\delta v(s, t)} = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial s} \cdot \delta \bar{s} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \cdot \delta \bar{t} \right)^2} \quad (21)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{t}} \cdot \delta \bar{s} \right)^2 + \left(-\frac{s}{\bar{t}^2} \cdot \delta \bar{t} \right)^2} \quad (22)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{3,37 \text{ s}} \cdot 0,001 \text{ m} \right)^2 + \left(-\frac{1,000 \text{ m}}{(3,37 \text{ s})^2} \cdot 0,05 \text{ s} \right)^2} \quad (23)$$

$$= 0,005 \text{ m/s} \quad (24)$$

Die experimentell ermittelte Geschwindigkeit ist also $\bar{v} = (0,297 \pm 0,005) \text{ m/s}$.

Signifikante Stellen und Runden eines Messergebnisses

Stellen des Zahlenwerts eines Messergebnisses (Messwert und Messunsicherheit) werden signifikante Stellen genannt, wenn diese aussagekräftig sind. Allgemein sind signifikante Stellen einer Zahl alle angegebenen Stellen bis auf führende Nullen. Die Zahl 656 hat drei signifikante Stellen, die Zahl $6,5 \times 10^6$ hat zwei und die Zahl 0,1234 hat vier signifikante Stellen. Alle Stellen links der ersten von einer Null verschiedenen Stelle sind nicht signifikant. Die Zahl 0,000009006 hat also vier signifikante Stellen. Alle Stellen rechts von der letzten nicht mit einer Null besetzten Stelle sind ebenfalls signifikant, wenn die Zahl ein Komma aufweist. Die Zahl 250,0 hat also vier signifikante Stellen, die Zahl 0,0030050 hat fünf.

Für die Angabe eines Messergebnisses (Endergebnis) im Protokoll zum Versuch gilt folgendes:

- Eine Messunsicherheit wird auf eine signifikante Stelle gerundet – Ausnahmen bilden die Fälle, in denen die erste von Null verschiedene Stelle eine 1 oder 2 ist. In diesem Fall wird die Messunsicherheit auf die folgende Stelle gerundet. Messunsicherheiten werden stets aufgerundet.
- Die letzte signifikante Stelle eines angegebenen, zugehörigen Messwerts sollte dann dieselbe Größenordnung besitzen wie die zugehörige Messunsicherheit.

Bsp. Noch einmal zurück zu dem Beispiel von oben: Über eine direkte Längenmessung und eine direkte Zeitmessung wurde dort eine mittlere Geschwindigkeit als $\bar{v} = \frac{\bar{s}}{\bar{t}} = \frac{1,000 \text{ m}}{3,37 \text{ s}}$ berechnet. Nach Eingabe der Rechnung „1,000/3,37“ in den Taschenrechner zeigte dieser

das Ergebnis „0,296735905“ an. Da der fortgepflanzte Messfehler von $\bar{v}$ – nach Runden auf eine signifikante Stelle – in diesem Fall 0,005 m/s beträgt, wird das Ergebnis für $\bar{v}$ auf die dritte Nachkommastelle gerundet. Über die folgenden Nachkommastellen, kann in diesem Experiment keine Aussage getroffen werden. Dafür müsste man entweder die Strecke und/oder die Zeit in einem Experiment mit geringerer Messunsicherheit messen. Das Messergebnis lautet für dieses Beispiel also wie oben angegeben: $\bar{v} = (0,297 \pm 0,005) \text{ m/s}$.

Versuchsdurchführung

Dieser Versuch ist in fünf Teilversuche gegliedert, die sich an den SI-Einheiten der Länge, der Masse, der Zeit, der elektrischen Stromstärke sowie der Lichtstärke orientieren. Ziel des Versuchs ist es, das Messen verschiedener physikalischer Größen kennen zu lernen sowie die Messergebnisse geeignet auszuwerten, zu dokumentieren und zu beurteilen. Überlegen Sie sich bereits während der Versuchsdurchführung, wo bei den Versuchen Quellen möglicher Messfehler liegen könnten. Notieren Sie sich zudem Informationen zu den Messgeräten, um systematische Fehler abschätzen zu können.

1. Messung verschiedener Längen

Bestimmen Sie die Ausmaße der Quader, der Hohlzylinder sowie der Kugel mit Schaft mit dem Messschieber in allen drei Raumrichtungen. Gehen Sie dabei so vor, dass Sie auf eine genügend große Stichprobe zurückgreifen können, um den statistischen Fehler sinnvoll abschätzen zu können. Ermitteln Sie weiterhin die Außen- und Innendurchmesser sowie die Länge der Hohlzylinder. Wählen Sie wieder einen geeigneten Stichprobenumfang.

Bestimmen Sie die Volumina der Körper.

Nehmen Sie die vermessenen Quader und die Kugel mit Schaft mit zu Versuchsteil „2. Messung verschiedener Massen“, um im Anschluss an die Massenbestimmung die Dichte der Körper zu bestimmen.

2. Messung verschiedener Massen

In diesem Versuchsteil sollen die Massen der bereits bei der Längenmessung verwendeten Quader sowie der Kugel mit Schaft bestimmt werden. Dazu stehen zwei Federn unterschiedlicher Federkonstante, eine Messskala sowie eine Waagschale zur Verfügung, aus denen nacheinander zwei Federwaagen hergestellt werden sollen. Da das Eigengewicht der Waagschale sehr gering ist, ist eine Vorbelastung durch ein geeignetes zusätzliches Gewicht zu berücksichtigen. Eine der beiden Waagen dient der Massenbestimmung der großen Quader, die andere derjenigen des kleinen Quaders und der Kugel mit Schaft.

Beide Waagen müssen zu Beginn des Teilversuchs mit Gewichten bekannter Masse kalibriert werden. Diese liegen am Versuchsplatz aus. Bestimmen Sie für die Kalibrierung der jeweiligen Federwaage die Auslenkung Δx in Abhängigkeit von der belastenden Masse m für eine geeignet gewählte Anzahl bekannter Massen. Die Masse der Quader sowie der Kugel mit Schaft können nach Auswertung der Kalibrierdaten somit über die Auslenkung der Feder Δx bestimmt werden. Bestimmen Sie die Massen der Quader und der Kugel mit Schaft zusätzlich mit Hilfe einer Waage und diskutieren Sie ggf. auftretende Abweichungen in der Massenbestimmung.

Bestimmen Sie nun mit Hilfe der Ergebnisse der Längenmessung die Dichten der Quader und der Kugel mit Schaft und schließen Sie damit auf die Materialien der Körper, indem Sie die experimentell bestimmten Werte der Dichte mit Literaturwerten vergleichen. Geben Sie die Literaturwerte (mit Quelle) in der Auswertung an.

3. Messung der Zeit

Dieser Versuch thematisiert die SI-Einheit Sekunde und besteht aus zwei Telexperimenten. Im ersten Telexperiment in ein Tischpendel der Gegenstand der Messung. An einem Kugellager

ist ein Kunststofffaden und an diesem eine Edelstahlkugel befestigt. Bestimmen Sie die Periodendauer dieses Pendels mit einer Stoppuhr. Achten Sie auch hier auf eine ausreichend große Stichprobenmenge. Führen Sie die Messungen bei verschiedenen Auslenkungswinkeln ($\leq 45^\circ$) durch. Zeigen Sie, dass bei kleinen Auslenkungen der Auslenkungswinkel irrelevant ist. Die Masse der Pendelkugel beträgt $(285,0 \pm 0,1) \text{ g}$.

Welche Länge hat der Faden des Pendels? Bestimmen Sie diese Größe aus der Periodendauer bzw. der Frequenz der Pendelschwingungen. Messen Sie zudem mit einem Maßband nach. Was stellen Sie an Ihren Ergebnissen fest?

Der Aufbau zum zweiten Teil dieses Versuches befindet sich im Flur vor der Werkstatt des Instituts für Physik der Kondensierten Materie. Es handelt sich um ein Pendel mit einer weitaus längeren Schnur. Für diesen Teilversuch steht eine Lichtschranke zur Verfügung, mit der die Periodendauer einer Schwingung gemessen werden kann. Notieren Sie die Periodendauer jeder Schwingung über einen Zeitraum von vier Minuten und wiederholen Sie die Messung mindestens dreimal.

Wie lang ist der Faden? Wie hoch sind die Flure im Erdgeschoss des Physikzentrums?

4. Messung der elektrischen Stromstärke

Dieser Teil des Eingangsversuchs beschäftigt sich mit der SI-Basiseinheit Ampere. Verschiedene Widerstände sollen mit Hilfe einfacher Schaltkreise und anhand ihres Ring-Codes bestimmt werden. Zur Verfügung stehen dazu eine Spannungsquelle, zwei Digitalmultimeter sowie ein Steckbrett von PHYWE, auf dem Stromkreise mit einem Widerstand geschaltet werden können. Bestimmen Sie mindestens zwei Widerstände sowohl mit der Schaltung als auch über den Farbcode mit Hilfe der ausliegenden Widerstandsuhr. Die Widerstände liegen alle in der Größenordnung bis maximal $200 \text{ k}\Omega$. Achten Sie daher zum Schutz der Messgeräte auf eine geeignete Wahl des Strom- und Spannungsbereichs.

Nehmen Sie außerdem eine Strom-Spannungs-Kennlinie eines von Ihnen gewählten Widerstands auf. Weiterhin soll die Strom-Spannungs-Kennlinie von mindestens einer Glühlampe (6 V und 24 V) aufgenommen und ebenfalls geeignet dargestellt und ausgewertet werden. Die angegebenen Spannungswerte der Glühlampen sollten hierbei nicht überschritten werden.

Wie unterscheiden sich die Strom-Spannungs-Kennlinien des Widerstand und der Glühlampe(n)? Wie lassen sich diese Unterschiede erklären?

5. Messung der Lichtstärke

Dieser Versuch ist in zwei Teilerperimente gegliedert. Zunächst werden die Lichtstärken von mindestens drei verschiedenen Lampen mit der Lichtstärke einer Kerze verglichen. Die Lichtstärke der Kerze wird dafür willkürlich auf eine Kerzeneinheit, 1 KE, festgelegt. Mit Hilfe dieser Einheit sollen die Lichtstärken der Lampen miteinander verglichen werden. Als Anordnung dient ein sogenanntes Fettfleckfotometer. *Bei diesem Versuch arbeiten Sie mit einer brennenden Kerze! Bitte denken Sie daran, die Kerze am Ende des Versuchs auszupusten. Vermeiden Sie zudem Zugluft während der Messung.*

Im zweiten Teil des Experimentes werden die Beleuchtungsstärken der drei Lampen und der Kerze mit einem Luxmeter bestimmt. Gleichzeitig müssen die Entfernungen der Leuchtmittel vom Messgerät bestimmt werden, um auf die Lichtstärke in Candela schließen zu können.

Bauen Sie zunächst das **Fettfleckfotometer** auf: Präparieren Sie dazu ein DIN-A4-Blatt Papier mit einem ca. 2 €-Stück großen Fettfleck. Spannen Sie es in den Spannrahmen ein und achten Sie darauf, dass der Fleck auf Höhe der Kerzenflamme und der Lampe ist. Entzünden Sie die Kerze mit dem im Versuchsraum ausliegenden Stabfeuerzeug. *Achtung! Verbrennungsgefahr!* Verschieben Sie die Glühlampe nun so lang auf der optischen Bank, bis der Fettfleck auf dem Papier nicht mehr sichtbar ist, und notieren Sie die Entfernungen der Kerze und der Lampe vom Schirm. Da das fettige Papier das Licht schlecht reflektiert und daher viel Licht transmittiert, erscheint der Fettfleck zunächst dunkler oder heller als das umgebende, nicht fettige Papier. Wenn der Fleck genau so hell erscheint wie das den Fleck umgebende Papier, sind beide Lichtstärken etwa gleich groß. Dies zu erkennen, kann anfänglich schwierig sein. Man sollte sich einen festen Bezugspunkt am Rand des Fettflecks wählen, mit dem verglichen wird. Außerdem ist es sinnvoll, sich langsam an die Stelle heranzutasten, an der der Fleck und das umgebende Papier gleich hell erscheinen. Die Messung ist mehrfach hintereinander von beiden Gruppenmitgliedern durchzuführen, da hier subjektive Unterschiede in der Wahrnehmung der Helligkeiten auftreten können. *Führen Sie diesen Versuch für drei von Ihnen ausgewählten Lampen durch.* Über die Beziehung

$$\frac{I_0}{r_0^2} = \frac{I}{r^2} \quad (25)$$

können die Lichtstärke der Lampen I relativ zur Lichtstärke der Kerze I_0 bestimmt werden. Damit können auch die vier Lampen (40-W-Glüh-, Halogen-, Energiespar- und LED-Lampe) miteinander verglichen werden. Bei der Verwendung der LED-Lampe kann es zu Problemen mit der Einstellung des Fettfleckfotometers kommen, da das Spektrum der Lampe und das der Kerze sehr unterschiedlich sind. Eine Helligkeitsunterscheidung kann für das menschliche Auge in diesem Fall schwierig sein, da beide Lichtfarben schlecht miteinander verglichen werden können. Führen Sie daher die Messung mehrfach hintereinander durch, wobei alle Gruppenmitglieder die Messung durchführen sollten.

Im zweiten Teil des Versuches werden die Beleuchtungsstärken der Kerze und der Glühlampen quantitativ mit dem Luxmeter bestimmt. Geben Sie die willkürliche Einheit 1 KE in Candela an und ermitteln Sie ebenso die Lichtstärken der im ersten Versuchsteil mit dem Fleckfettfotometer untersuchten Leuchten. Beide Größen werden mit der Beziehung in Gleichung (25) ineinander umgerechnet. Dazu ist es sinnvoll, die Messung mit dem Luxmeter unter verschiedenen Abständen von der Lichtquelle mehrfach zu wiederholen. Gerade die Bestimmung der Beleuchtungsstärke der Kerze muss mehrfach wiederholt werden (zu empfehlen sind 5–10 Wiederholungen), da sie durch das leichte Flackern variiert und gemittelt werden muss.

Diskutieren und Vergleichen Sie die Ergebnisse der zwei Versuchsteile!