

A Mechanik

1. Einführung

1.1 Einleitung

Die Physik beschäftigt sich mit der Natur und versucht ihre Gesetze zu enträtseln. Sie hat die Aufgabe, Eigenschaften und Aufbau der Materie und die Wechselwirkungen der Grundbausteine zu verstehen und daraus alle natürlichen Phänomene und Beobachtungen der unbelebten (und teilweise auch belebten) Natur abzuleiten. Die Physik ist daher die grundlegendste aller Naturwissenschaften. Sie hat starke Verbindungen zu den anderen Naturwissenschaften und den Ingenieurwissenschaften.

Die Physik stellt den anderen Wissenschaften aber nicht nur grundlegende theoretische Erkenntnisse zur Verfügung; sie entwickelt auch Methoden und Arbeitsgeräte, die auf fast allen Gebieten der angewandten und reinen Forschung benutzt werden. erinnert sei hier nur an die Geräte in der Medizin (vom Röntgengerät bis zum Computertomographen) oder an die Archäologie (Luftbildaufnahmen im nicht-sichtbaren Bereich und Altersbestimmungen mit der Radio-Carbon-Methode).

Der physikalische Fortschritt vollzieht sich durch eine *wechselseitige Befruchtung von Theorie und Experiment*. Am Anfang stehen in der Regel Beobachtungen und Messungen der Experimentalphysiker. Der theoretische Physiker schlägt daraufhin ein *Modell* vor, das auf *Axiomen (Postulaten)* beruht, die nicht bewiesen, also nicht mathematisch aus anderen Gesetzen abgeleitet werden können, sondern nur von der Erfahrung ausgehen (*Induktive Methode*). Wenn das Modell die bereits bekannten experimentellen Befunde richtig beschreibt, werden weitere, evtl. noch nicht bekannte Vorhersagen mathematisch aus dem Modell hergeleitet und experimentell überprüft (*Deduktive Methode*). Unter Umständen muss man das Modell dann modifizieren oder erweitern oder bestimmte Gültigkeitsgrenzen stecken; evtl. ist das Modell auch völlig zu verwerfen.

Die gegenseitige Verknüpfung von Theorie und Experiment ist für den ungeheuren Fortschritt der modernen Wissenschaft verantwortlich. Die erst zu Beginn der Neuzeit von Galileo Galilei eingeführte 'Experimentelle Naturwissenschaft' verlangt die Überprüfung jeder neuen Theorie an der Wirklichkeit, am Experiment. Neben der Forderung nach der inneren Widerspruchsfreiheit und dem Wunsch, dass die Modelle und Gesetze möglichst

einfach und ‘schön’ aussehen sollen, ist die Übereinstimmung mit der Realität das entscheidende Kriterium, das über Annahme oder Ablehnung einer Theorie entscheidet.

Mehr als jeder andere Wissenschaftler arbeitet der Physiker quantitativ, also mit Zahlen und Gleichungen. Man kann durchaus sagen, dass der Physiker eine Beobachtung oder eine Information erst dann richtig verstanden hat, wenn er sie in eine Gleichung gefasst hat. *Die Mathematik ist die Sprache der Physik*; ohne sie sind physikalische Theorien nur sehr unvollständig zu beschreiben.

1.2 Messung und Maßeinheit

Physikalische Erkenntnisse und Zusammenhänge werden durch *physikalische Größen* dargestellt. Darunter versteht man messbare Eigenschaften physikalischer Objekte, Zustände oder Vorgänge wie z. B.

Die Länge eines Stabes	$\Leftrightarrow$	Objekt
Die Stärke eines elektrischen Feldes	$\Leftrightarrow$	Zustand
Die Dauer einer Schwingung	$\Leftrightarrow$	Vorgang

In der Mechanik gibt es drei unabhängige Grundgrößen: Länge, Zeit, Masse. Alle anderen Größen der Mechanik werden aus diesen drei fundamentalen Größen abgeleitet. Z. B.

$$\text{Geschwindigkeit} = \text{Länge} / \text{Zeit}$$

$$\text{Beschleunigung} = \text{Geschwindigkeit} / \text{Zeit}$$

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$$

Neben den drei Grundgrößen der Mechanik gibt es vier weitere unabhängige Grundgrößen, die in den anderen Gebieten der Physik gebraucht werden:

- *In der Elektrizitätslehre wird eine weitere unabhängige Grundgröße benötigt: Die Ladung mit der Einheit ‘Coulomb’.*
- *In der Thermodynamik sind die Temperatur mit der Einheit ‘Kelvin’ oder ‘Grad Celsius’ und die Stoffmenge mit der Einheit ‘Mol’ zwei weitere Grundgrößen.*
- *In der Optik kommt schließlich die Lichtstärke mit der Einheit ‘Candela’ hinzu. Da die Lichtstärke in meinen zwei Büchern nicht vorkommt, gehe ich auf die Einheit Candela nicht weiter ein.*

*Nur für die Grundgrößen müssen Einheiten – sog. **Basiseinheiten** – festgelegt werden.* Die Einheiten der abgeleiteten Größen erhält man dann mit den Definitionsgleichungen dieser (abgeleiteten) Größen.

Die Einheit, in der eine physikalische Größe ausgedrückt wird, muss oft gewechselt werden. Dabei *multiplizieren wir die ursprüngliche Größe mit einem Umrechnungsfaktor, der ein Quotient aus zwei Maßeinheiten ist und den Wert eins hat.* Ich nenne zwei Beispiele:

$$5,5 \text{ min} = 5,5 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 330 \text{ s} \qquad 1,2 \text{ PS} = 1,2 \text{ PS} \cdot \frac{735 \text{ W}}{1 \text{ PS}} = 882 \text{ W}$$

Die Basiseinheiten sind international festgelegte, reproduzierbare Größen. Vor dem 20sten Jahrhundert wurden die Basiseinheiten nie durch Naturkonstanten festgelegt. Vielmehr wurden sie definiert durch einen Prototyp (wie der Pariser Platin-Iridium-Zylinder und das Pariser Urkilogramm), durch natürliche Größen (wie die mittlere Dauer eines Tages oder die Länge eines Meridians auf der Erde) oder aber durch Mess- oder Zählvorschriften.

Im Jahre 1900 hatte Max Planck die Idee, alle Basiseinheiten mit Hilfe sog. „definierender Naturkonstanten“ festzulegen. Er sah nach eigenen Worten "... die Möglichkeit, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche ihre Bedeutung für *alle Zeiten und für alle Kulturen* behalten: auch für außerirdische und außermenschliche." Die Idee wurde erst 120 Jahre später vollständig umgesetzt.

Seit dem 20.Mai.2020 werden die sieben Basiseinheiten

Sekunde, Meter, Kilogramm	(für die Mechanik)
Mol, Kelvin	(für die Thermodynamik)
Coulomb	(für die Elektrizität)
Candela	(für die Optik)

mit Hilfe von sieben Naturkonstanten definiert. Diese Naturkonstanten haben seit dem 20.Mai.2020 folgende **exakte, international festgelegte, zukünftig unveränderliche Werte**:

$\Delta f_{\text{Cs}} = 9,192\,631\,770 \cdot 10^9 \text{ Hz}$	(siehe Abschn. 1.3)
$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	(siehe Abschn. 1.4)
$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$	(siehe Abschn. 1.5)
$N_{\text{A}} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	(siehe Abschn. 11.1)
$k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	(siehe Abschn. 11.2)
$e_0 = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	(siehe Abschn. 17.1)
$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$	(wird nicht behandelt)

Die Basiseinheiten sind an diese Naturkonstanten fest gekoppelt und hängen nicht von Materialeigenschaften ab. Die sieben genannten Naturkonstanten haben fortan exakt vereinbarte Werte und *keine Unsicherheiten*.

Die internationalen, für alle Zeiten unverändert gültigen Vereinbarungen für die drei mechanischen Basiseinheiten Sekunde, Meter und Kilogramm werden in den folgenden Abschn. 1.3 bis 1.5 beschrieben. Die drei weiteren Basiseinheiten Mol, Kelvin und Coulomb (bzw. Ampere) werden in den Abschn. 11.1, 11.2 und 17.1 eingeführt. Die Konstante K_{cd} und die Basiseinheit Candela für die Optik kommen in meinen zwei Büchern nicht vor.

1.3 Die Einheit Sekunde

Bis 1956 war die Sekunde der 86.400ste Teil eines mittleren Tages ($3600 \cdot 24 = 86.400$). Da die Dauer eines Tages aufgrund der Meeresströmungen, der Winde, der Bewegungen im Erdinneren, ... schwankt und wegen der Gezeitenkräfte im Laufe der Zeit sogar zunimmt¹, ist diese Festlegung nicht genau. 1956 wurde die Sekunde als der 31.556.925,9747ste Teil des tropischen Jahres definiert.

1967 definierte man international die Basiseinheit Sekunde *für alle Zeiten* mit Cäsium-Atomuhren.

Der Strahlung, die beim Übergang zwischen den zwei Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von ^{133}Cs auftritt, hat man **exakt** und für alle Zeiten die damals gemessene Frequenz zugeteilt

$$\Delta f_{\text{Cs}} = 9,192\,631\,770 \cdot 10^9 \text{ Hz} \quad (1.3-1)$$

Diese Frequenz ist laut Definition eine unveränderliche Naturkonstante und definiert die Basiseinheit Sekunde für alle Zeiten: Die Sekunde ist die Dauer von $9,192\,631\,770 \cdot 10^9$ Schwingungsperioden T_{Cs} der genannten Cäsiumstrahlung

$$1\text{s} = 9,192\,631\,770 \cdot 10^9 \cdot 10^9 T_{\text{Cs}} = \frac{9,192\,631\,770 \cdot 10^9}{\Delta f_{\text{Cs}}} \quad (1.3-2)$$

Sollte man in zukünftigen Messungen des Cäsium-Spektrums winzige Verschiebungen feststellen, so wird man nicht $T_{\text{Cs}} = 1/\Delta f_{\text{Cs}}$ ändern (wie man es vor 1967 gemacht hat), sondern die Länge einer Sekunde wird so abgewandelt, dass die Gl. (1.3–2) weiterhin gilt.

1.4 Die Einheit Meter

Längenmaße wurden früher in erster Linie an Körpermaße angepasst. Die Elle und das Fuß wurden bereits von den alten Ägyptern eingeführt und entsprachen der Länge des Unterarmes und der Länge des Fußes des Pharaos. Die Griechen führten zusätzlich das Stadion, die Römer die Meile ein. Im Mittelalter hatten die meisten Herzogtümer ihre eigenen Längenmaße, die sich erheblich voneinander unterschieden und oft an der Außenmauer des Rathauses oder der Kirche dargestellt wurden. 1101 führte König Heinrich I. in England den Abstand von seiner Nasenspitze bis zum Daumen seines ausgestreckten Armes als 1 Yard und die Breite seines Daumens als 1 Zoll oder ein Inch ein. Zoll wird heute noch in den USA, Kanada und England verwendet mit $1\text{in} = 2,54\text{cm}$. Die Größe von Bildschirmen wird üblicherweise in Zoll angegeben.

1791 verordnete die Pariser Nationalversammlung die Einführung einer universellen Längeneinheit. Danach ist ein Meter der zehnmillionste Teil der Entfernung vom Nordpol zum Äquator entlang des Meridians, der durch Paris verläuft. (Der Vorschlag, die Länge $l = T^2 g / (2\pi)^2$ eines Sekundenpendels ($T = 1\text{s}$) als Längeneinheit zu definieren, wurde u. a. deshalb verworfen, weil die Gravitationskonstante g an verschiedenen Orten verschieden groß ist.) 1799 wurde ein Urmeter aus Platin hergestellt und 1889 durch einen Platin-Iridium-Stab ersetzt, der bei 0°C einen Meter lang sein sollte. Kopien wurden weltweit an Eichinstitute versandt. Mit

¹ In 50.000 Jahren nimmt die Tagesdauer wegen der reibenden Gezeitenkräfte etwa um 1 s zu.

fortschreitender Messtechnik wurden aber die Nachteile des Urmeters immer deutlicher: Ein Gegenstand kann – z. B. durch Ausgasen oder Reinigungen – Atome verlieren und bei Messungen beschädigt werden. Zudem können Messungen nur am Ort des Urmeters oder einer Kopie stattfinden.

Zu Beginn des 20sten Jahrhunderts schlug Albert A. Michelson vor, eine universell verfügbare und unveränderliche Längeneinheit mit einer Wellenlänge von Licht einzuführen. 1960 wurde das Meter über die Wellenlänge des Lichts eines Kryptonlasers definiert. Natürlich wurde auch diese neue Einheit so gewählt, dass sie im Rahmen der Messgenauigkeit mit der alten Einheit, dem Urmeter übereinstimmte. Das Urmeter selbst ist seit 1960 nur noch von historischem Interesse.

1983 erfolgte die endgültige Festlegung des Meters, die sich künftig nicht mehr ändern soll. Der Meter wurde an die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit und an die Sekunde angelehnt:

1 m ist die Strecke, die das Licht im Vakuum in $1/299.792.458$ Sekunden zurücklegt. Daran soll sich künftig nichts mehr ändern.

Zugleich wurde die Lichtgeschwindigkeit exakt und für alle Zeiten festgelegt:²

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.4-1)$$

Früher wurden zuerst die Basiseinheiten definiert und erst danach die Naturkonstanten gemessen. So wurden beispielsweise zuerst die Basiseinheiten Sekunde und Meter definiert. Damit war auch die abgeleitete Einheit Meter/Sekunde bestimmt. Anschließend wurde die Lichtgeschwindigkeit gemessen. Bei späteren Abweichungen in den Messungen der Lichtgeschwindigkeit wurde die Lichtgeschwindigkeit geändert und nicht die Einheit.

Die neuen Vereinbarungen (die letzten im Jahre 2020) *drehen diese alten Reihenfolgen um: Seit dem Jahr 1983 wird die Längeneinheit 1 m durch die fixierte Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ exakt definiert.* Bei kleinsten, zukünftigen Abweichungen in den Messungen von c wird man diese bis ans Ende aller Tage festgelegte Lichtgeschwindigkeit nicht ändern, sondern die Längeneinheit selber ein wenig verschieben, so die Lichtgeschwindigkeit weiterhin den in Gl. (1.4–1) festgelegten Wert beibehält.

Ein Beispiel: Wenn man in Zukunft aufgrund genauerer Messungen feststellen sollte, dass das Licht in einer Sekunde etwas weiter kommt als 299792458 m, so wird man nicht die Zahl $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ erhöhen (wie man es vor 1983 getan hätte), sondern die Längeneinheit 1 Meter wird etwas vergrößert, so dass die Lichtgeschwindigkeit weiterhin den exakten Wert $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ beibehält.

² Natürlich hätte man der „neuen“ Lichtgeschwindigkeit im Jahre 1983 den einfacheren Wert $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ oder sogar $1,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ zuweisen können. In diesem Fall würden sich die Einheiten Newton, Joule, Watt, Pascal, Volt, ... und damit auch die meisten Materialkonstanten ändern. Zur Vermeidung unzähliger Umrechnungen wurde der Lichtgeschwindigkeit der damals aktuelle Wert gegeben; denn dieser Wert hatte keine Änderungen der Längen sowie der Material- und Naturkonstanten zur Folge. In der Praxis bemerkte Niemand die neue, verbindliche Festlegung der Lichtgeschwindigkeit.

1.5 Die Einheit Kilogramm

1790 beschloss die französische Nationalversammlung, dass ein Gramm die Masse von 1cm^3 reinem Wasser bei 4°C sein soll. 1889 wurde ein korrosionsbeständiger Platin-Iridium-Zylinder hergestellt und seitdem in einem Tresor bei Paris unter drei Glocken aus Panzerglas aufbewahrt. Dieser Zylinder definiert das Urkilogramm. 80 Kopien wurden im Laufe der Zeit weltweit an Institute verteilt. Leider zeigten regelmäßige Überprüfungen, dass der Pariser Zylinder in 100 Jahren um etwa $50\mu\text{g}$ leichter wurde als die vielen Kopien.³ Die Ursache ist bis heute unbekannt.

Daher wurde beschlossen, das Kilogramm (und die drei anderen Basiseinheiten Kelvin, Mol sowie Ampere bzw. Coulomb) mit Naturkonstanten neu zu definieren. Die Änderungen traten am 20.Mai.2020 in Kraft. Bis dahin war das Kilogramm die letzte der sieben Basiseinheiten, die noch ein natürliches Objekt als Bezugsgröße hatte.

Die neue, unveränderliche Definition koppelt die Masseneinheit Kilogramm an die Definitionen von Sekunde und Meter und an den ebenfalls *fixierten*, also *unveränderlich festgelegten Wert des Planckschen Wirkungsquantums*

$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s} \quad (1.5-1)$$

Das Plancksche Wirkungsquantum ist die zentrale Naturkonstante in der Quantentheorie. Da sie nur kurz in Abschn. „16.3 Wärmestrahlung“ vorkommt, will ich hier nicht weiter ausholen.

³ Laut Definition konnte sich der Zahlenwert der Masse des Platin-Iridium-Zylinders eigentlich nicht ändern. Denn der Pariser Zylinder hatte laut Festlegung immer die Masse $m=1\text{kg}$, auch wenn er in der Realität Atome verliert. Egal, was mit ihm passiert, der Zylinder hat laut Definition immer die Masse 1kg .