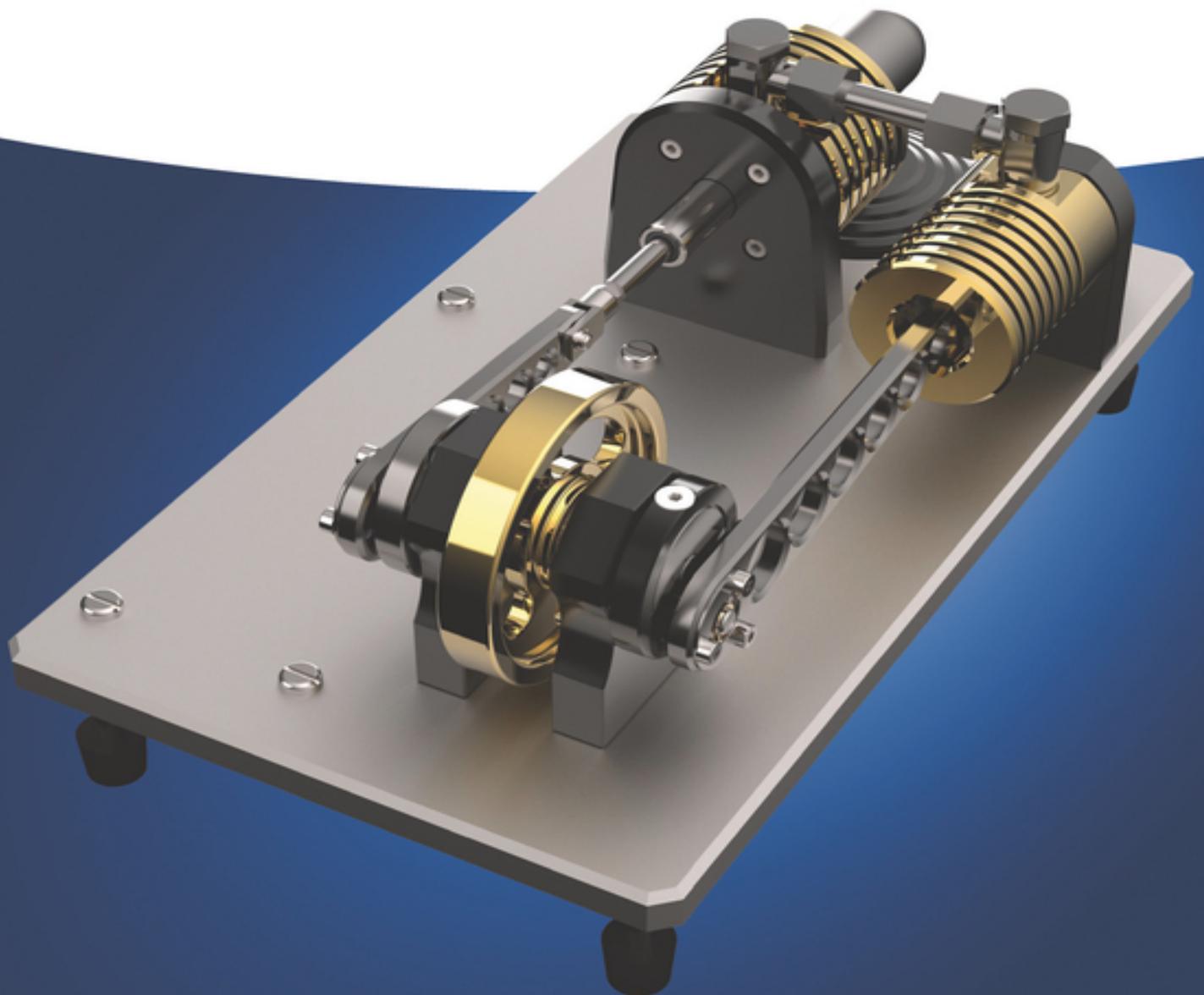


Friedhelm Kuypers

Physik in den Ingenieur- und Naturwissenschaften

Band 1: Mechanik und Thermodynamik

Vierte Auflage



Inhaltsverzeichnis

[Abdeckung](#)

[Titelblatt](#)

[Copyright-Seite](#)

[Vorwort](#)

[A Mechanik](#)

[1 Einführung](#)

[1.1 Einleitung](#)

[1.2 Messung und Maßeinheit](#)

[1.3 Die Einheit Sekunde](#)

[1.4 Die Einheit Meter](#)

[1.5 Die Einheit Kilogramm](#)

[2 Kinematik der Massenpunkte](#)

[2.1 Idealisierungen](#)

[2.2 Geschwindigkeit](#)

[2.3 Einführung in die Integralrechnung](#)

[2.4 Beschleunigung](#)

[2.5 Kreisbewegung](#)

[2.6 Noch einmal in Kürze](#)

[2.7 Aufgaben](#)

[3 Die Newtonschen Axiome und Kräfte](#)

[3.1 Das erste Newtonsche Axiom](#)

[3.2 Das zweite und dritte Newtonsche Axiom](#)

[3.3 Lösung einfacher Bewegungsgleichungen](#)

[3.4 Reibungskräfte](#)

[3.5 Noch einmal in Kürze](#)

3.6 Aufgaben

4 Arbeit, Leistung und Energie

4.1 Arbeit

4.2 Leistung

4.3 Energie

4.4 Erneuerbare Energien *

4.5 Noch einmal in Kürze

4.6 Aufgaben

5 Impulssatz und Drehimpulssatz

5.1 Impulssatz

5.2 Drehimpulssatz für Massenpunkte

5.3 Noch einmal in Kürze

5.4 Aufgaben

6 Bewegungen starrer Körper

6.1 Schwerpunktsatz

6.2 Trägheitsmomente

6.3 Drehungen um raumfeste Achsen

6.4 Ebene Bewegungen starrer Körper

6.5 Kinetische Energie ebener Bewegungen

6.6 Unwuchtkräfte *

6.7 Noch einmal in Kürze

6.8 Aufgaben

7 Lineare Schwingungen

7.1 Freie Schwingungen

7.2 Erzwungene Schwingungen

7.3 Mechanische und elektrische Schwingungen *

7.4 Gekoppelte Pendel

[7.5 Noch einmal in Kürze](#)

[7.6 Aufgaben](#)

8 Strömungslehre

[8.1 Grundlagen](#)

[8.2 Die Bernoulli-Gleichung](#)

[8.3 Laminare Strömungen](#)

[8.4 Turbulenzbildung und Reynolds-Zahl](#)

[8.5 Strömungswiderstand umströmter Körper](#)

[8.6 Modelltechnik *](#)

[8.7 Windkraftanlagen *](#)

[8.8 Noch einmal in Kürze](#)

[8.9 Aufgaben](#)

B Thermodynamik

9 Einführung in die Thermodynamik

10 Temperatur

[10.1 Definition der Temperaturskala](#)

[10.2 Thermische Ausdehnung](#)

[10.3 Temperaturmessung](#)

[10.4 Noch einmal in Kürze](#)

[10.5 Aufgaben](#)

11 Ideale Gasgleichung

[11.1 Die Basiseinheit Mol](#)

[11.2 Aufstellung der idealen Gasgleichung](#)

[11.3 Noch einmal in Kürze](#)

[11.4 Aufgaben](#)

12 Kinetische Gastheorie

[12.1 Definition des idealen Gases](#)

[12.2 Grundgleichung der kinetischen Gastheorie](#)

[12.3 Die Einheit Kelvin](#)

[12.4 Geschwindigkeitsverteilung](#)

[12.5 Noch einmal in Kürze](#)

[12.6 Aufgaben](#)

13 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

[13.1 Wärme](#)

[13.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik](#)

[13.3 Wärmeübergang](#)

[13.4 Volumenänderungsarbeit](#)

[13.5 Gleichverteilungssatz und Wärmekapazität](#)

[13.6 Adiabatische Zustandsänderungen](#)

[13.7 Noch einmal in Kürze](#)

[13.8 Aufgaben](#)

14 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

[14.1 Formulierungen von Clausius und Kelvin](#)

[14.2 Reversible und irreversible Prozesse](#)

[14.3 Wirkungsgrad reversibler und irreversibler Prozesse](#)

[14.4 Der Carnot-Prozess](#)

[14.5 Entropie *](#)

[14.6 Dritter Hauptsatz der Thermodynamik](#)

[14.7 Noch einmal in Kürze](#)

[14.8 Aufgaben](#)

15 Phasenumwandlungen

[15.1 Umwandlungswärmen und -temperaturen](#)

[15.2 Verdampfung und Kondensation](#)

[15.3 p,T-Diagramme](#)

[15.4 Zustandsgleichung realer Gase *](#)

[15.5 Verflüssigung von Gasen *](#)

[15.6 Kältemaschinen](#)

[15.7 Noch einmal in Kürze](#)

[15.8 Aufgaben](#)

16 Wärmeübertragung

[16.1 Wärmeleitung](#)

[16.2 Konvektion](#)

[16.3 Wärmestrahlung](#)

[16.4 Strahlungsaustausch *](#)

[16.5 Noch einmal in Kürze](#)

[16.6 Aufgaben](#)

Lösungen

[Lösungen: 2 Kinematik der Massenpunkte](#)

[Lösungen: 3 Die Newtonschen Axiome und Kräfte](#)

[Lösungen: 4 Arbeit, Energie und Leistung](#)

[Lösungen: 5 Impuls- und Drehimpulssatz](#)

[Lösungen: 6 Starrer Körper](#)

[Lösungen: 7 Lineare Schwingungen](#)

[Lösungen: 8 Strömungslehre](#)

[Lösungen: 10 Temperatur](#)

[Lösungen: 11 Ideale Gasgleichung](#)

[Lösungen: 12 Kinetische Gastheorie](#)

[Lösungen: 13 Erster Hauptsatz](#)

[Lösungen: 14 Zweiter Hauptsatz](#)

[Lösungen: 15 Phasenumwandlungen](#)

[Lösungen: 16 Wärmeübertragung](#)

Stichwortverzeichnis

Periodensystem

Physik in den Ingenieur- und Naturwissenschaften

Band 1: Mechanik und Thermodynamik

Friedhelm Kuypers

4. Auflage



Autor

Prof. Dr. Friedhelm Kuypers

Hedwig-Dransfeld-Weg 14

93055 Regensburg Deutschland

Friedhelm.kuypers@oth-regensburg.de

Titelbild

Heißluft Stirlingmotor; istock / the-lightwriter

4. Auflage

Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2023 Ernst & Sohn GmbH, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-41398-0

ePDF ISBN 978-3-527-82964-4

ePub ISBN 978-3-527-82965-1

Umschlaggestaltung SCHULZ Grafik-Design, Fußgönheim

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck und Bindung

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Vorwort

Dieses Buch ist der erste Band eines zweibändigen Werkes der Physik und beschäftigt sich mit Mechanik und Thermodynamik. Der zweite Band enthält die Elektrizität, Optik und Wellenlehre. Für das Verständnis werden nur elementare Grundkenntnisse der Differential- und Integralrechnung vorausgesetzt.

Das Buch wurde geschrieben sowohl für Studierende der Naturwissenschaften Physik, Chemie, Mathematik als auch für Studierende mehrerer Ingenieurwissenschaften wie Elektrotechnik, Maschinenbau, ...

Die **vierte Auflage** wurde gründlich und **vollständig überarbeitet**. Die Zahl der Aufgaben mit Lösungen wurde erhöht und Fehler wurden korrigiert. Vor allem der Abschn. „[4.4](#) Erneuerbare Energien“ wurde auf den neuesten Stand gebracht. Neu ist ein zehnteiliger, einführender Abschn. über die Entropie.

Abschn., deren Überschrift mit einem Stern * markiert sind, können beim ersten Lesen übergangen werden.

Das Buch unterscheidet sich in den inhaltlichen Schwerpunkten und vor allem im didaktischen Konzept von anderen Büchern. Ich zähle die Besonderheiten, die mir wichtig sind, kurz auf:

- **119 Beispiele und 207 Aufgaben mit Lösungen:** Beispiele und Aufgaben haben eine *ganz zentrale Bedeutung* in der Lehre: Sie ermöglichen ein besseres, vertieftes Verständnis und zeigen, wie sich die *Theorie umsetzen und auf die Praxis anwenden* lässt. Daher habe ich die Beispiele und Lösungen der Aufgaben mit gleicher Sorgfalt und gleicher Ausführlichkeit

ausgearbeitet wie den Haupttext. In vielen Aufgaben werden parallel mehrere, alternative Lösungen vorgestellt.

Bei der Auswahl waren drei Kriterien maßgebend:

1: Entscheidend ist: *Beispiele und Aufgaben müssen die Theorie verdeutlichen und veranschaulichen. Sie sollen die Studierenden in die Lage versetzen, Probleme in der beruflichen Praxis mit den erlernten Methoden zu lösen.*

2: Am liebsten lösen Studierende *Aufgaben aus dem Alltagsleben und aus der industriellen Praxis.* Warum können Sportler auf dem Mond zehnmal höher springen als auf der Erde? Was ist eine Resonanzkatastrophe? Wie regelt der Körper die Blutzufuhr? Warum bildet sich beim Öffnen einer Bierflasche Nebel über der Flüssigkeit? Wie groß sind die maximalen Wirkungsgrade von Windrädern, Verbrennungsmotoren und Wärmepumpen?

3: Die meisten Beispiele und Aufgaben sind ehemalige Klausuraufgaben.

- **Stoffbeschränkung:** Grundsätzlich meide ich allzu schwierige Inhalte und behandle bewusst nur den Stoff, den die Studierenden in den ersten beiden Semestern *verstehen* und daher auch *in Klausuren bearbeiten* können. Themen, die zu schwierig für Klausuren sind, meide ich konsequent.
- **Kontrolle und Veranschaulichung:** Nicht selten übernehmen Studierende Rechnungen und Ergebnisse ungeprüft und kritiklos. Aber jeder sollte sich angewöhnen – vor allem auch in der beruflichen Praxis –, Resultate immer zu überprüfen und kritisch zu hinterfragen. In diesem Buch werden Lösungen

regelmäßig kontrolliert und zugleich veranschaulicht, indem sie auf bereits bekannte *Spezialfälle* angewendet, Einheiten angeschaut, *Abhängigkeiten von Parametern und Anfangsbedingungen* untersucht und Zahlen eingesetzt werden.

- **Hinweise auf typische Fehler:** Fehler, die in Übungen und Klausuren immer wieder gemacht werden, Fallen und häufige Missverständnisse werden ausdrücklich genannt. So kann der Leser nicht nur aus den eigenen Fehlern, sondern auch *aus den „klassischen“ Fehlern anderer Studenten lernen*.
- **Erneuerbare Energien:** Auf zehn Seiten werden wichtige Daten und der momentane Stand der erneuerbaren Energieproduktion besprochen. In den Unterkapiteln 8.8 und 15.6 werden Windkraftanlagen und Wärmepumpen ausführlich behandelt und ihre maximalen Wirkungsgrade berechnet.
- **Zusammenfassung:** Am Ende jedes Kapitels werden die wichtigsten Gleichungen, Sätze und Aussagen nochmals in Kürze zusammengefasst.

Abschließend möchte ich allen danken, die beim Schreiben dieses Buches geholfen haben. Prof. Dr. B. Braun hat mir eine ausführliche Liste mit Fehlern und Verbesserungsvorschlägen geschickt und war gerne bereit, fachliche Fragen zu diskutieren. Zudem haben wir hilfreiche Gespräche über Verbesserungsmöglichkeiten des Physikunterrichts geführt. Danken möchte ich auch Prof. Dr. A. Deutz für die Besprechung vieler physikalischer und didaktischer Probleme. Sein Interesse und seine ständige Bereitschaft, mit mir über Fragen und „Rätsel“ der Physik zu diskutieren, haben mir sehr beim Schreiben dieses Buches geholfen.

Allen Lesern, die durch Anregungen, Bemerkungen oder auch durch Fragen zur Verbesserung des Buches beitragen, bin ich auch weiterhin sehr dankbar. Meine E-MailAdresse lautet:

friedhelm.kuypers@oth-regensburg.de

Regensburg, im August 2022

Friedhelm Kuypers

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. Erinnerung 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

bekanntes experimentelles 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	→	Objekt
Die Stärke eines elektrischen Feldes	→	Zustand

Die Dauer einer Schwingung

→ 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.

Geschwindigkeit = Länge/Zeit

Beschleunigung = Geschwindigkeit/Zeit

Kraft = Masse·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 Quotienten aus zwei Maßeinheiten ist und *den Wert eins hat*. Ich nenne zwei Beispiele:

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

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 Messoder 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**:

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

$$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{siehe Abschn. 1.4})$$

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s} \quad (\text{siehe Abschn. 1.5})$$

$$N_{\text{A}} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (\text{siehe Abschn. 11.1})$$

$$k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (\text{siehe Abschn. 11.2})$$

$$e_0 = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{siehe Abschn. 17.1})$$

$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W} \quad (\text{wird nicht behandelt})$$

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 CäsiumAtomuhren.

Der Strahlung, die beim Übergang zwischen den zwei Hyperfeinstruktur-niveaus 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 $9,192631770 \cdot 10^9$ Schwingungsperioden T_{Cs} der genannten Cäsiumstrahlung

$$1\text{s} = 9,192631770 \cdot 10^9 \cdot 10^9 T_{\text{Cs}} = \frac{9,192631770 \cdot 10^9}{\Delta f_{\text{Cs}}} \quad (1.3-2)$$

Sollte man in zukünftigen Messungen des Cäsium-Spektrums winzige Verschiebungen feststellen, so wird man nicht $T_{Cs} = 1/\Delta f_{Cs}$ 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-Iridiumstab ersetzt, der bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ einen Meter lang sein sollte. Kopien wurden weltweit an Eichinstitute versandt. Mit

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:

1m 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 1m durch die fixierte Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ 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 $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ 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 $2,99792458 \cdot 10^8$ ms⁻¹ beibehält.

1.5 Die Einheit Kilogramm

1790 beschloss die französische Nationalversammlung, dass ein Gramm die Masse von 1cm³ 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 50µg 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 2019 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.

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

² Natürlich hätte man der „neuen“ Lichtgeschwindigkeit im Jahre 1983 den einfacheren Wert $3,0 \cdot 10^8$ m/s oder sogar $1,0 \cdot 10^8$ 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.

[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.

2

Kinematik der Massenpunkte

Die Kinematik ist die Lehre von den Bewegungen der Körper (Griechisch: Kinema = Bewegung). Die physikalischen Ursachen der Bewegungen, d.h. die Kräfte werden nicht untersucht. Die Kinematik ist eine mathematische Disziplin und berechnet den Zusammenhang zwischen Bahnkurven, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.

Ruhe und Bewegung sind relative Begriffe. Für einen im Zug reisenden Beobachter ist eine neben ihm sitzende Person in Ruhe, für einen draußen am Bahnsteig stehenden Beobachter hingegen ist diese Person in Bewegung. Deshalb haben die Begriffe 'Ruhe' und 'Bewegung' nur dann einen eindeutigen Sinn, wenn das Bezugssystem angegeben wird, auf das sie sich beziehen. *Wenn nichts anderes vereinbart wird, dann wird in der Physik und in der Technik meistens ein mit der Erde verbundenes Bezugssystem zugrunde gelegt.*

2.1 Idealisierungen

Bei der Berechnung von Bewegungen ist es oft zulässig und sinnvoll, von der Ausdehnung des Körpers abzusehen und den Körper als *Punktmasse* - auch *Massenpunkt genannt* - zu idealisieren. Dies hat den Vorteil, dass

- der Körper sich nicht drehen kann.
- alle auf den Körper einwirkenden Kräfte in einem Punkt angreifen.

Obwohl es in Wirklichkeit keine Massenpunkte gibt, ist die Näherung verschwindender Ausdehnung in der Theorie oft zweckmäßig und erlaubt, wenn die Bahnabmessung wesentlich größer ist als die Ausdehnung des Körpers (siehe z. B. die Bewegungen der Planeten im Sonnensystem). Darüber hinaus werden wir in Abschn. [6.1](#) sehen, dass sich *Punktmassen wie die Schwerpunkte ausgedehnter Körper bewegen*. Danach stimmen die für Massenpunkte berechneten Bewegungen mit den Schwerpunktbewegungen ausgedehnter Körper überein, falls die Massen und die Summe aller Kräfte in beiden Fällen gleich groß sind.

Ganz allgemein werden Idealisierungen, die die Wirklichkeit nicht exakt beschreiben, sondern bestimmte Eigenschaften und Sachverhalte bewusst und gezielt außer acht lassen, sehr häufig in der Physik mit großem Erfolg vorgenommen. Die Vernachlässigung unerwünschter Nebeneffekte und die Konzentration auf das Wesentliche sind so typisch für die Arbeitsweise des Physikers, dass wir kurz über Zulässigkeit und Nutzen von Idealisierungen bzw. Vernachlässigungen sprechen müssen.

- *Die Zulässigkeit von Idealisierungen hängt von dem untersuchten Objekt und der Aufgabenstellung ab.*
Dazu drei Beispiele:

- 1) Bei einer fallenden Stahlkugel kann die Luftreibung vernachlässigt werden, bei einer fallenden Feder nicht.
- 2) Bei der Berechnung der Planetenbahnen können die Planeten als punktförmig angesehen werden, in der Wetterkunde nicht.
- 3) Im Maschinenbau dürfen die Corioliskräfte der Erdrotation vernachlässigt werden, in der

Wetterkunde aber spielen sie eine ganz entscheidende Rolle.

In jedem einzelnen Fall ist zu entscheiden, ob die vorgesehenen Idealisierungen zu tolerierbaren Ungenauigkeiten führen oder nicht.

- Eine *exakte* Beschreibung der Vorgänge in Natur und Technik ist in keinem Fall möglich. Deshalb müssen Randeffekte außer acht gelassen und dafür kleine – evtl. sogar vernachlässigbare – Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden. Viele Vernachlässigungen sind sehr gebräuchlich und weit verbreitet. Kein Maschinenbauer käme auf die Idee, relativistische Massenänderungen zu berücksichtigen. Auch Reibungskräfte werden oft nicht beachtet.

Zulässige Idealisierungen sind sinnvoll, wenn man dadurch den Rechenoder Arbeitsaufwand gering halten oder den Blick auf das Wesentliche richten kann.

*Es kommt nicht darauf an, ob Idealisierungen auch in der Wirklichkeit realisiert werden können. Seit Galileo Galilei arbeitet die Wissenschaft oft mit *fiktiven Modellen*, die wenig Bezug zur Wirklichkeit haben, aber *leicht überschaubar sind und sich auf das Wesentliche, auf die zu untersuchende Frage konzentrieren.**

Wir nehmen im Folgenden an, dass die betrachteten Körper punktförmig sind. Ihre zeitabhängige Position wird durch den sog. Ortsvektor $\mathbf{r}(t)$ beschrieben, *der vom Ursprung des Koordinatensystems zum Ort der Punktmasse reicht.*

2.2 Geschwindigkeit

Wir definieren die Geschwindigkeit und betrachten zuerst den einfachsten Fall, die *gleichförmige Bewegung*. Eine geradlinige Bewegung heißt **gleichförmig**, wenn der

Quotient aus zurück gelegter Strecke Δx und benötigter Zeit Δt für alle Δt gleich groß ist. Der konstante Quotient $\Delta x/\Delta t$ wird **Geschwindigkeit** v der gleichförmigen Bewegung genannt:

$$v := \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{für gleichförmige Bewegungen} \quad (2.2-1)$$

Die Einheit der Geschwindigkeit ist nach dieser Gl. m/s. Häufig wird auch die Einheit km/h verwendet. Zwischen diesen beiden Einheiten gibt es die Umrechnung

$$3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.2-2)$$

Wenn eine gleichförmige Bewegung zur Zeit $t = 0$ im Punkt $x(0) =: x_0$ beginnt, so gilt

$$v = \frac{x(t) - x(0)}{t - 0} = \frac{x(t) - x_0}{t} \quad (2.2-3)$$

$\Rightarrow \quad x(t) = x_0 + vt$ nur für gleichförmige Bewegungen mit $v = \text{const}$

Das Orts-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung ist eine Gerade (siehe [Abb. 2.2-1](#)) mit der Steigung v .

Als nächstes betrachten wir geradlinige, *ungleichförmige Bewegungen*. Jetzt werden in gleich großen Zeitintervallen nicht mehr gleich große Strecken zurückgelegt, so dass das Orts-Zeit-Diagramm in [Abb. 2.2-2](#) eine gekrümmte Kurve ist. Man nennt den Quotienten

$$v_m := \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.2-4)$$

mittlere Geschwindigkeit oder Durchschnittsgeschwindigkeit in dem Intervall $[t_1, t_2]$.

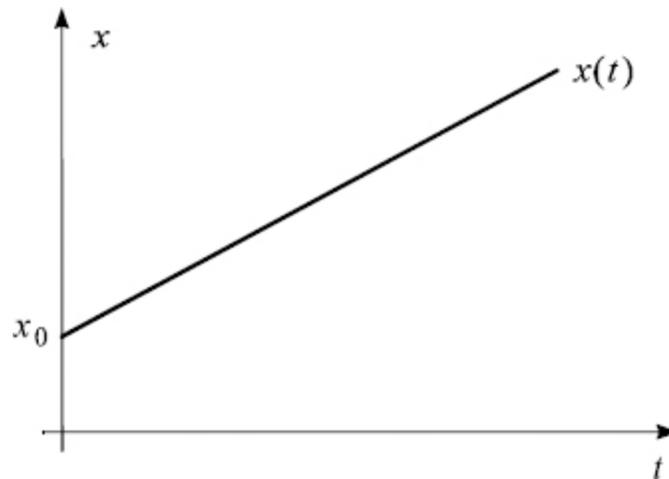


Abb. 2.2-1 Orts-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung

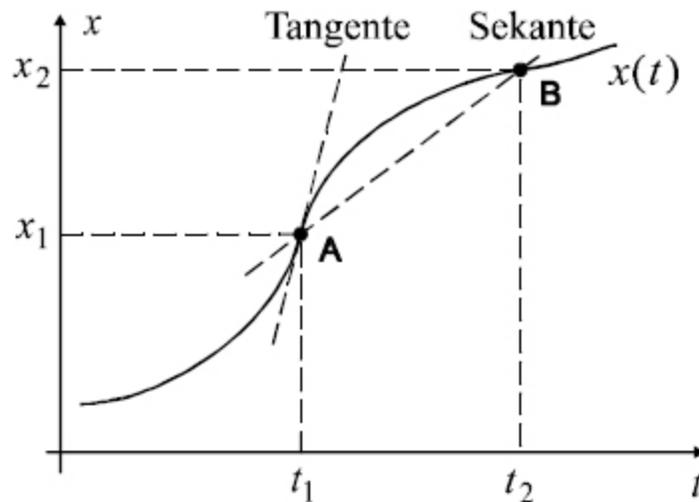


Abb. 2.2-2 Für $t_2 \rightarrow t_1$ geht die Steigung der Sekante über in die Steigung der Tangente. Die Steigung der Tangente ist laut Definition die momentane Geschwindigkeit $v(t_1)$.

In Physik und Technik und beim Autofahren interessiert man sich aber gewöhnlich nicht für die mittlere, sondern für die momentane Geschwindigkeit $v(t)$. Vor der Einführung der Radartechnik wurden momentane Geschwindigkeiten im Verkehr mit zwei Lichtschranken ermittelt. Lichtschranken messen – genau genommen – die mittlere Geschwindigkeit v_m . Wenn aber der Abstand der