Klassische Mechanik I

Kinematik und Dynamik der Punktteilchen
Relativität

Klassische Mechanik I

Kinematik und Dynamik der Punktteilchen Relativität

von

Walter Greiner

9., aktualisierte Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 55644

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner
Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)
Goethe-Universität Frankfurt am Main

9. Auflage 2022

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5565-1

Alle Abbildungen wurden nach Entwürfen des Autors vom Verlag erstellt.

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09212 Limbach-Oberfrohna
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Druck: Totem, 88–100 Inowrocław (Polen)

Theoretische Physik

von Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner

Seit vielen Jahren zählen die Bände der Reihe *Theoretische Physik* zu den weltweit geschätzten und wegweisenden Lehrbüchern, mit denen Generationen von Studierenden ihre Physikausbildung erfolgreich gestaltet haben. Damit führt Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner die Tradition der klassischen Buchreihen von Sommerfeld, von Planck und von Landau und Lifschitz fort, einen zusammenhängenden Blick auf das große Wissenschaftsfeld der Physik zu geben. Englische, französische, japanische und chinesische Ausgaben untermauern die Bedeutung des Werkes *Theoretische Physik*.

Auf über 7 000 Seiten lehrt Walter Greiner, der Herausgeber und Hauptautor, Physik mit einem eigenständigen, didaktisch geschickten Konzept: Vermittlung der theoretischen Grundlagen und deren Anwendung anhand vieler ausführlicher Beispiele und Aufgaben mit ausgearbeiteten Lösungen – insbesondere auch zu aktuellen Themen. Denn nichts ist für den Studierenden von größerer Bedeutung, als im Detail zu erleben, wie die theoretischen Konzepte und Werkzeuge auf konkrete Probleme angewandt werden, die für den arbeitenden Physiker von Interesse sind. Walter Greiner begleitet seine Ausführungen mit einer sorgfältigen Entwicklung der benötigten mathematischen Methoden. Biografische und geschichtliche Notizen schlagen die Brücke zu den Wegbereitern der modernen Physik.

So entstand ein lebendiges Konzept von integrierten Lehr- und Übungsbüchern. Pragmatisch orientiert, aber ohne Abstriche an der theoretischen Grundlegung des Stoffes, gelingt es Walter Greiner, den Lernenden einen schnellen Zugang zum theoretisch-physikalischen Denken zu ebnen und sie für die physikalische Wissenschaft zu begeistern.

Mit dem Band *Klassische Mechanik I: Kinematik und Dynamik der Punktteilchen – Relativität* (vormals *Mechanik I*) beginnt der Einstieg in die Welt der *Theoretischen Physik*.

Vorwort

Eine zeitgemäße und moderne Universitäts-Ausbildung in Physik sollte möglichst von Anfang an die Theoretische Physik als einen der Grundpfeiler dieser Wissenschaft berücksichtigen. Diese Überlegung führte dazu, dass Studierenden der Physik und Mathematik an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main die Kurse zur Theoretischen Physik ab dem ersten Semester angeboten werden. Die vorliegende *Klassische Mechanik I* ist aus Vorlesungen hervorgegangen, die sich in vielen Jahren – seit 1965 – als Teil dieses Studienprogramms bewährt haben. Sie behandeln als Einstieg in die Theoretische Physik die Newtonsche Mechanik und deren Erweiterung zur Einsteinschen Speziellen Relativitätstheorie.

Ich habe versucht, die Darstellung des Stoffes so interessant und verständlich wie möglich zu gestalten. Der Text wird daher mit vielen Beispielen und Übungen ergänzt, die bis ins Detail ausgearbeitet sind. Damit soll das Buch für interessierte Leserinnen und Leser auch zum Selbststudium geeignet sein.

Der Einstieg in die Theoretische Physik im ersten Semster bedingt, dass dabei großes Gewicht auf die Behandlung elementarer mathematischer Verfahren aus der Vektoralgebra und -analysis sowie der Theorie der linearen Differenzialgleichungen gelegt werden muss. So gesehen ist die *Klassische Mechanik I* auch ein Vorkurs zur Theoretischen Physik.

Die Newtonsche Mechanik wird ausgehend von den Newtonschen Axiomen behandelt. Fragen der Statik und Dynamik werden untersucht, und mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz eröffnet sich ein weites Feld astronomischer Phänomene, die mit den erarbeiteten Methoden behandelt werden können. So lassen sich die Bewegungen der Planeten im Sonnensystem oder von Raumsonden auf ihrem Weg durch das Sonnensystem genau berechnen. Viele ausgearbeitete Beispiele und Aufgaben behandeln diese Themen. Dabei lässt sich bereits mit recht elementaren Voraussetzungen ein Bogen zu spannenden Problemen der aktuellen Forschung schlagen, zum Beispiel zur Suche nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems.

Den kurzen Abriss über unser Sonnensystem, mit dem die Darstellung der Newtonschen Gravitationstheorie traditionell abgerundet wird, habe ich zu einem längeren Kapitel über die Stellung unserer Erde im Universum erweitert. Hier werden aktuelle Themen der Forschung vorgestellt, wie die Erforschung des Sonnensystems, die Suche nach extrasolaren Planeten, die Dynamik von Galaxien und das Problem der Dunklen Materie und schließlich das Urknall-Modell zur Entstehung und Entwicklung des Universums. Diese spannenden Themen sollen Neugierde wecken auf die vielen aufregenden Fragen der gegenwärtigen Forschung, zu denen

– aufbauend auf empirischem Wissen – mit den Methoden der Theoretischen Physik Antworten gefunden werden können. Die Bestimmung der Masse des im Jahr 2005 entdeckten Planeten Eris zeigt, dass hierbei auch elementare Verfahren, die in diesem Buch ausführlich behandelt werden, gewinnbringend zum Einsatz kommen.

Eine Vielzahl von Experimenten führte gegen Ende des 19. Jahrhunderts zu der verblüffenden Einsicht, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes vollkommen unabhängig davon ist, ob sich die Lichtquelle oder der Beobachter relativ zueinander bewegen. Dies ließ sich im Rahmen der Newtonschen Mechanik nicht verstehen und führte Albert Einstein zur Speziellen Relativitätstheorie, die die Newtonsche Theorie erweitert und als Spezialfall umfasst. Ausgehend von einer Diskussion des Versuchs von Michelson und Morley entwickeln wir die Spezielle Relativitätstheorie und gelangen über den Formalismus von Minkowski zur relativistischen Mechanik. Wieder runden viele Beispiele, etwa zum Aussehen schnell bewegter Körper und Anwendungen aus der Hochenergie-Physik, die Darstellung ab.

Ich hoffe, ja ich bin überzeugt, damit Interesse für die vielfältigen und teilweise neuen Aspekte zu wecken, die selbst ein so klassisches Gebiet wie die Mechanik noch immer bereit hält. Die Studierenden sollen die Theoretische Physik als eine aufregende und spannende Wissenschaft erleben, bei der noch viel zu entdecken bleibt.

Walter Greiner

Die Mitarbeiter

An den bisherigen Auflagen haben im Laufe der Jahre viele ehemalige Studierende, Doktoranden und Assistenten mitgearbeitet:

8. Auflage (2008)

Dr. Stefan Scherer

7. Auflage (2003)

Dipl.-Phys. Kristof Balasz, Dipl.-Phys. Stefan Scherer

6. Auflage (1992)

Dipl.-Phys. J. Augustin, Dipl.-Phys. Ch. Best, A. Bischoff, A. Dumitru [1], Dipl.-Phys. B. Ehrnsperger, Dipl.-Phys. O. Graf, Dipl.-Phys. K. Griepenkerl, Dipl.-Phys. A. von Keitz, Dr. G. Peilert, Dipl.-Phys. M. Vidović

sowie

Frau A. Steidl

5. Auflage (1989)

Dipl.-Phys. Carsten Greiner [2], Dr. Martin Greiner [3], Dipl.-Phys. R. Heuer, Dr. G. Plunien, Dr. M. Rufa

4. Auflage (1984)

Carsten Greiner [2], Dr. M. Seiwert

3. Auflage (1980)

Dipl.-Phys. M. Seiwert, Carsten Greiner [2], Martin Greiner [3]

sowie

Frau B. Utschig

---

[1] später Professor an der Goethe-Universität Frankfurt am Main

[2] später Professor an der Goethe-Universität Frankfurt am Main

[3] später Professor an der Aarhus University

2. Auflage (1976)

Frau R. Lasarzig, Frau B. Utschig, G. Terlecki [1]

1. Auflage (1974)

Dr. B. Fricke [2]

mit

H. Betz [3], W. Betz, G. Binnig [4], M. Bundschuh, C. von Charzewski, J. von Czarnecki, R. Fickler, H. R. Fiedler, E. Hoffmann, L. Kohaupt [5], N. Krug, P. Kurowski, B. Moreth, R. Mörschel, B. Müller [6], J. Rafelski [7], J. Reinhardt, H. Schaller, H. J. Scheefer, M. Soffel [8], K. E. Stiebing, E. Stämmler, H. Störmer [9], J. Wagner, R. Zimmermann

sowie

Frau M. Knolle, Frau R. Lasarzig, G. Terlecki, Frau B. Utschig

---

[1] später Professor an der Fachhochschule Kaiserslautern

[2] später Professor an der Universität Kassel

[3] Wir gedenken besonders Frau Helga Rafelski, geborene Betz, die in Tucson/Arizon im Alter von 50 Jahren allzu früh an Leukämie verstorben ist.

[4] Gerd Binnig erhielt 1986 für die Entwicklung des Raster-Tunnel-Mikroskopes zusammen mit H. Rohrer und E. Ruska den Nobelpreis für Physik. Er ist später IBM-Fellow am IBM-Forschungslabor Rüschlikon/Schweiz und Professor an der Universität in München.

[5] später Professor an der Technischen Fachhochschule Berlin

[6] später Professor an der Duke University, Durham, North Carolina, USA, dort Dean of the Faculty

[7] später Professor an der University of Arizona, Tucson, Arizona, USA

[8] später Professor an der Technischen Universität Dresden

[9] später Professor an der Columbia University, New York, USA. Er erhielt 1998 den Nobelpreis für Physik gemeinsam mit Daniel C. Tsuifür die Entdeckung des gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekts.

Inhaltsverzeichnis

Aufgaben und Beispiele

Historische Notizen

I Vektorrechnung

1 Einführung und Grunddefinitionen

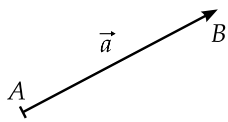
Physikalische Größen, die durch Angabe eines Zahlenwertes vollständig bestimmt sind, nennt man

Skalare (z. B. Masse, Temperatur, Energie, Wellenlänge).

Größen, zu deren vollständiger Beschreibung neben dem Zahlenwert, dem Betrag, noch die Angabe ihrer Richtung erforderlich ist, nennt man

Vektoren (z. B. Kraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Drehmoment).

Ein Vektor lässt sich geometrisch durch eine gerichtete Strecke darstellen, d. h. durch eine Strecke, der man eine Richtung zuordnet, sodass z. B. gilt: A sei der Anfangspunkt und B sei der Endpunkt des Vektors $\vec{a}$ (vgl. Figur).



Vektor $\vec{a}$ zeigt von A nach B.

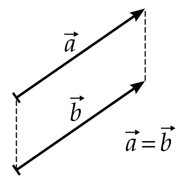
Der *Betrag* des Vektors ist dann durch die Länge der Strecke AB gegeben. Symbolisch beschreibt man einen Vektor häufig durch einen lateinischen Buchstaben, den man zur Verdeutlichung des Vektorcharakters mit einem kleinen Pfeil versieht. Weitere mögliche Darstellungen sind die Benutzung deutscher Buchstaben oder Herausheben durch Fettdruck.

Den Betrag eines Vektors $\vec{a}$ schreibt man als: $|\vec{a}| = a$.

Definition: Zwei Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$ heißen genau dann *gleich*, wenn

1. $|\vec{a}| = |\vec{b}|$,
2. $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{b}$ (gleichgerichtet parallel)

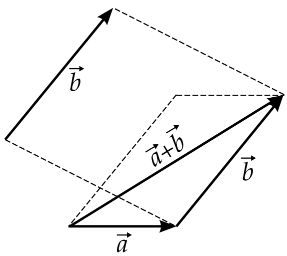
sind. Dann schreiben wir $\vec{a} = \vec{b}$.



Die Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$ sind gleich.

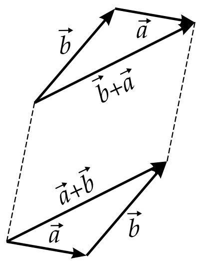
Das heißt: Alle gleichlangen und gleichgerichteten Strecken sind gleichberechtigte Darstellungen desselben Vektors. Man sieht also bei einem Vektor von seiner speziellen Lage im Raum ab.

Ein zum Vektor $\vec{a}$ *entgegengesetzt gleicher* Vektor ist $-\vec{a}$. Entgegengesetzt gleiche Vektoren sind längengleich ($|\vec{a}| = |-\vec{a}|$) und liegen auf parallelen Geraden, haben aber entgegengesetzte Richtungen; sie sind somit antiparallel ($\vec{a} \uparrow\downarrow -\vec{a}$). Ist also etwa $\vec{a} = \overrightarrow{AB}$, so ist $-\vec{a} = \overrightarrow{BA}$.



Addition der Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$.

Addition: Sollen zwei Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$ addiert werden, so bringt man durch Parallelverschiebung den Anfangspunkt des einen Vektors mit dem Endpunkt des anderen zur Deckung. Die Summe $\vec{a} + \vec{b}$, auch *Resultierende* genannt, entspricht dann der Strecke vom Anfangspunkt des ersten Vektors zum Endpunkt des zweiten. Man kann diese Summe auch als Diagonale des von $\vec{a}$ und $\vec{b}$ gebildeten Parallelogramms finden (vgl. Figur).



Verdeutlichung der Kommutativität der Vektoraddition.

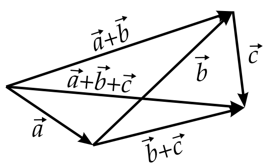
Rechenregeln: Es gelten

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a} \qquad \text{(Kommutativgesetz)}$$

und

$$(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c}) \qquad \text{(Assoziativgesetz),}$$

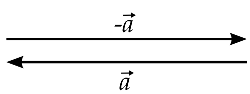
wie man sofort einsieht (vgl. Figuren).



Verdeutlichung der Assoziativität der Vektoraddition.

Subtraktion: Die Differenz zweier Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$ ist definiert als:

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$



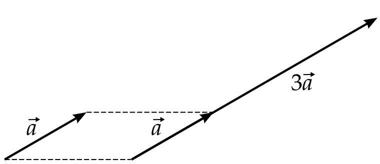
Der Nullvektor.

Nullvektor: Die Vektordifferenz $\vec{a} - \vec{a}$ bezeichnet man als Nullvektor:

$$\vec{a} - \vec{a} = \vec{0} \quad \text{oder} \quad \vec{a} - \vec{a} = 0.$$

Der Nullvektor hat den Betrag 0; er ist richtungslos.

Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar: Unter dem Produkt $p\vec{a}$ eines Vektors $\vec{a}$ mit einem Skalar p, wobei p eine reelle Zahl ist, versteht man einen Vektor, der die gleiche Richtung besitzt wie $\vec{a}$ und dessen Betrag $|\,p\vec{a}\,| = |\,p\,| \cdot |\,\vec{a}\,|$ ist.



Die Multiplikation eines Vektors $\vec{a}$ mit einem Skalar p (in diesem Falle ist $p = 3$).

Rechenregeln:

$$q(p\vec{a}) \quad = p(q\vec{a}) = qp\vec{a}, \quad \text{(wobei } p \text{ und } q \text{ reell)}$$

$$(p + q)\vec{a} = p\vec{a} + q\vec{a},$$

$$p(\vec{a} + \vec{b}) = p\vec{a} + p\vec{b}.$$

Diese Regeln sind sofort einzusehen und bedürfen keiner weiteren Erläuterung.