

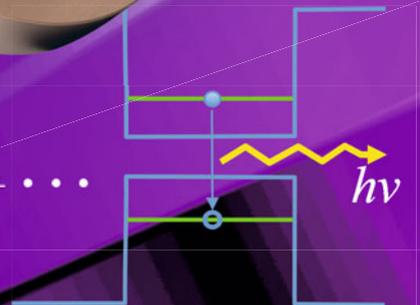


Peter Deák

Essenzielle Quantenmechanik

für Elektrotechniker und Informatiker

$$E_n = \frac{h^2}{8mL^2} (n + 1)^2; n = 0, 1, \dots$$



WILEY-VCH

Peter Deák

**Essenzielle
Quantenmechanik**

***Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel
zu diesem Thema***

Kuypers, F.

Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler

Band 1: Mechanik und Thermodynamik, 3. Auflage

2012

Print ISBN: 978-3-527-41135-1; auch in digitalen Formaten verfügbar

Kuypers, F.

Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler

Band 2: Elektrizität, Optik und Wellen, 3. Auflage

2012

Print ISBN: 978-3-527-41144-3; auch in digitalen Formaten verfügbar

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.

Halliday Physik

Bachelor-Edition, 2. Auflage

2013

Print ISBN: 978-3-527-41181-8; auch in digitalen Formaten verfügbar

Pohl, M.

Physik für alle

2014

Print ISBN: 978-3-527-41235-8; auch in digitalen Formaten verfügbar

Peter Deák

Essenzielle Quantenmechanik

für Elektrotechniker und Informatiker

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor**Peter Deák**

Bremen Center
for Computational Materials Science
Universität Bremen
Am Fallturm 1
28359 Bremen
Deutschland

© Erhan Ergin/Fotolia.com für die in der
Randspalte verwendeten Symbole

Alle Bücher von Wiley-VCH 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.

© 2016 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
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.

Umschlaggestaltung Blue Sea Design, Simone Benjamin, McLeese Lake, Canada

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Deutschland

Print ISBN 978-3-527-41322-5

ePDF ISBN 978-3-527-68386-4

ePub ISBN 978-3-527-68385-7

Mobi ISBN 978-3-527-41323-2

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Für meine Kinder und Enkelkinder

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XI*

- 1 Einführung. Die klassische Physik und die Physik der Informationstechnologie** *1*
- 1.1 Der Zustand der Materie in der klassischen Physik *1*
- 1.2 Axiome in der klassischen Physik *2*
- 1.3 Stand und Wirkung der klassischen Physik bis zum Ende des 19. Jahrhunderts *4*
- 1.4 Physikalischer Hintergrund der High-Tech-Ära *7*
- 1.5 Entwicklung der Physik im Spiegel der Beleuchtungstechnik *8*
- 1.5.1 Die Glühlampe *8*
- 1.5.2 Die Entladungslampe *10*
- 1.5.3 Leucht- und Laserdioden *11*
- 1.6 Physikbedarf der Elektrotechnik heute und morgen *12*
- 1.7 Wissen testen *15*

- 2 Wärmestrahlung: Physik der Glühbirne und des Pyrometers** *17*
- 2.1 Wärmestrahlung geheizter Körper *17*
- 2.2 Energieverteilung des elektromagnetischen Feldes in einem Metallkasten bei Temperatur T *19*
- 2.3 Bestimmung der Durchschnittsenergie pro Freiheitsgrad *20*
- 2.4 Praktische Anwendungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes *22*
- 2.5 Bedeutung des Planck'schen Strahlungsgesetzes für die Physik *24*
- 2.6 Wissen testen *27*

- 3 Photonen. Die Physik des Lasers** *29*
- 3.1 Der fotoelektrische Effekt *29*
- 3.2 Praktische Anwendungen des Fotoeffekts *31*
- 3.3 Der Compton-Effekt *32*
- 3.4 Die Einstein'sche Photonhypothese *33*
- 3.5 Planck'sches Strahlungsgesetz und die Photonen *34*

- 3.6 Der Laser 36
- 3.7 Wissen testen 40

- 4 Elektronen. Die Physik der Entladungslampe 41**
 - 4.1 Die Entladungslampe 41
 - 4.2 Frank-Hertz-Experiment 42
 - 4.3 Modelle des Wasserstoffatoms 44
 - 4.4 Praktische Folgen der Energiequantelung für die Entladungslampe 48
 - 4.5 Die de Broglie-Hypothese 51
 - 4.6 Das Davisson-Germer-Experiment 52
 - 4.7 Teilchen-Welle-Dualismus des Elektrons 53
 - 4.8 Wissen testen 55

- 5 Das Teilchenkonzept der Quantenmechanik 57**
 - 5.1 Teilchen und Wellen in der klassischen Physik 57
 - 5.2 Doppelspaltexperiment mit einem einzigen Elektron 60
 - 5.3 Die Born-Jordan-Interpretation der Elektronenwelle 61
 - 5.4 Die Heisenberg'sche Unschärferelation 61
 - 5.5 Das Teilchenkonzept der Quantenmechanik 62
 - 5.6 Die Skalenabhängigkeit der Physik 64
 - 5.7 In Richtung einer neuen Physik 65
 - 5.8 Wellennatur der Elektronen in der Elektrotechnik 66
 - 5.9 Darstellung der Elektronenwelle 67
 - 5.10 Wissen testen 68

- 6 Die quantenmechanische Messung. Postulate 1–3 71**
 - 6.1 Die Zustandsfunktion 72
 - 6.2 Mathematische Begriffe bezüglich der Zustandsfunktionen 73
 - 6.3 Die messbaren Größen der Quantenmechanik 74
 - 6.4 Mathematische Begriffe bezüglich der Operatoren 75
 - 6.5 Die Messung in der Quantenmechanik 76
 - 6.6 Wissen testen 82

- 7 Quantenmechanische Operatoren. Postulate 4–5. Übergang zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik 83**
 - 7.1 Heisenberg'sche Vertauschungsrelationen 83
 - 7.2 Die Schrödinger'sche Operatorwahl 84
 - 7.3 Der Vektoroperator des Drehimpulses 85
 - 7.4 Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung 87
 - 7.5 Zeitentwicklung der physikalischen Größen 88
 - 7.6 Das Ehrenfest-Theorem 90
 - 7.7 Wissen testen 92

- 8 Quantenmechanische Zustände 93**
- 8.1 Ortseigenzustände 94
- 8.2 Impulseigenzustände 96
- 8.3 Stationäre Zustände 97
- 8.4 Freie Bewegung 99
- 8.5 Gebundene Zustände 101
- 8.6 Wissen testen 105

- 9 Der Potenzialtopf: Grundlage moderner Leuchtdioden 107**
- 9.1 Quantentopf LEDs 107
- 9.2 Energieeigenwerte im Quantentopf 109
- 9.3 Anwendung in LED und Detektoren 113
- 9.4 Stationäre Elektronenzustände im Potenzialtopf 114
- 9.5 Unendlicher Potenzialtopf 115
- 9.6 Der unendliche Quantentopf und das klassische Punktmassenkonzept 117
- 9.7 Wissen testen 119

- 10 Der Tunneleffekt und seine elektrotechnische Bedeutung 121**
- 10.1 Das Rastertunnelmikroskop 121
- 10.2 Elektron an der Potenzialwand 122
- 10.3 Feldemission, Leckströme, Durchschlagsfeldstärke. Flash-Speicher 127
- 10.4 Resonanztunneln. Quantum-FET, Kaskadenlaser 130
- 10.5 Wissen testen 135

- 11 Das Wasserstoffatom. Quantenzahlen. Elektronenspin 137**
- 11.1 Eigenzustände von L_z 138
- 11.2 Eigenzustände von L_2 139
- 11.3 Energieeigenzustände des Elektrons im Wasserstoffatom 142
- 11.4 Drehimpuls der Elektronen. Der Spin 147
- 11.5 Wissen testen 151

- 12 Quantenmechanik für Mehrteilchensysteme. Chemische Eigenschaften der Atome. Quanteninformationstechnik 153**
- 12.1 Mehrteilchensysteme. Chemische Eigenschaften der Atome. Quanteninformationstechnik. 153
- 12.2 Das Pauli-Prinzip 154
- 12.3 Näherung unabhängiger Elektronen (Ein-Teilchen-Näherung) 156
- 12.4 Atome mit mehreren Elektronen 159
- 12.5 Chemische Eigenschaften der Atome 160
- 12.6 Periodensystem der Elemente 161
- 12.7 Bedeutung der Superpositionszustände für die Zukunft der Elektronik 163
- 12.8 Wissen testen 167

Anhang A Formelsammlung aus der Newton'schen Mechanik 169

- A.1 Grundbegriffe 169
 - A.1.1 Punktmasse 169
 - A.1.2 Bezugssystem 169
 - A.1.3 Bahn 169
 - A.1.4 Kinematik 170
- A.2 Newton'sche Axiome der klassischen Mechanik 171
- A.3 Erhaltungsgesetze der dynamischen Größen 171
- A.4 Beispiele: Dynamik des Teilchens unter verschiedenen Krafttypen 172
 - A.4.1 Elektronen im homogenen Kraftfeld 172
 - A.4.2 Harmonische Schwingung 173
- A.5 Wellen im elastischen Medium 173
- A.6 Wellenoptik 175
 - A.6.1 Beugung am Doppelspalt 176
 - A.6.2 Röntgenbeugung am Kristallgitter 176
- A.7 Energieverteilung unter vielen Teilchen im Gleichgewicht 177
- A.8 Kanonisch konjugierte Größen 178
- A.9 Spezielle Relativitätstheorie 179

Anhang B Mathematische Formelsammlung 181

- B.1 Zahlen 181
- B.2 Differenzial- und Integralrechnung 182
- B.3 Operatoren 184
- B.4 Differenzialgleichungen 185
- B.5 Vektoren und Matrizen 185

Anhang C Notationsverzeichnis 187

Richtig gelöst 193

Mehr zum Thema 201

Quellennachweis 203

Stichwortverzeichnis 207

Vorwort

Dieses Buch entstand erst als Skript zu der Lehrveranstaltung „Physik II für Elektrotechniker“ im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik an der Universität Bremen, und verkörpert 25 Jahre Erfahrung mit Quantenmechanik-Unterricht in diesen Fachrichtungen.¹⁾ Der Lehrstoff wird (im Anschluss an eine Vorlesung über klassische Physik im vorangehenden Semester) in zwei Semesterwochenstunden vorgelesen und begründet das Wahlfach Halbleiterphysik im Master-Studium.

Die Quantenmechanik ist die Mechanik der Mikroteilchen, von denen wir keine direkte, durch unsere Sinnesorgane erfassbare Erfahrung und daher auch kein „vorstellbares Bild“ haben. Wie Richard Feynman es formulierte, Mikroteilchen wie das Elektron sind keine (sichtbaren oder anfassbaren) Gegenstände, sondern Konzepte, die nur mathematisch formuliert werden können. Entsprechend kann die Quantenmechanik nur mathematisch aufgebaut und interpretiert werden, was im Grundstudium für Elektrotechniker und Informatiker auf den ersten Blick ziemlich schwer verdaubar und etwas unpraktisch erscheinen mag. Andererseits hat aber die Informationstechnologie eine zentrale Bedeutung in diesen beiden Berufsbranchen eingenommen, sodass die Physik zum Verständnis der Hardware-Bauelemente für elektronische Datenverarbeitung bzw. zur Hin- und Rückverwandlung elektronischer und optischer Information (bei Datenspeicherung, Datentransfer und visueller Darstellung) unabdingbar geworden ist. Man mag einwenden, dass Elektrotechniker hauptsächlich am Entwurf von Systemen aus solchen Bauelementen und Informatiker an Systemintegration und Algorithmen interessiert sind; optimale Effizienz in diesen Bestrebungen kann jedoch nur dann erreicht werden, wenn man mindestens ein konzeptionelles Verständnis über den Funktionsmechanismus dieser Bauelemente besitzt. Darüber hinaus hat die Quantenmechanik unsere Auffassung über die Realität deutlich erweitert und ermöglicht ein wesentlich tieferes Verständnis unserer Welt, sodass sie zum Weltbild von allen, die einen B.Sc.-Abschluss im wissenschaftlich-technischen Bereich erlangen möchten, einfach dazugehört.

1) Die ersten 15 Jahre davon an der Technischen Universität Budapest, den Fußspuren von Karoly Simonyi folgend, und – in Kooperation mit der Universität Karlsruhe – auch deutschsprachig.

Der Unterricht der Elektrotechniker und Informatiker tut sich trotzdem schwer mit der Quantenmechanik, und zwar aus zwei Gründen. Einerseits kommen Festkörperelektronik und optischer Datenaustausch heutzutage noch mit semi-klassischen Modellen auch ganz gut zurecht, weswegen das erlangte quantenmechanische Wissen, außer der Fachrichtung Mikroelektronik, in den späteren Lehrveranstaltungen der Elektrotechnik und Informatik jetzt noch wenig Anwendung findet. Das wird sich aber in naher Zukunft gewiss ändern! Die Grenzen der Weiterentwicklung traditioneller Hardware sind inzwischen in absehbare Nähe gerückt. Die aus der Nanotechnologie entstehenden neuen Bauelemente (in denen die Schaltung durch einzelne Elektronen und mit Ausnutzung des Tunneleffekts passiert) und die schon bald zur Realität werdende Quanteninformationstechnik (von Quantencomputer bis Quantenverschlüsselung) basieren auf Erscheinungen, die ohne das konzeptionelle Verständnis der Quantenmechanik nicht mehr nachvollzogen werden können. Studierende, die in den kommenden Jahren einen Abschluss in Elektrotechnik bzw. Informatik erwerben, werden in ihrer späteren Karriere mit Sicherheit durch den Paradigmenwechsel zu den quantenweltbasierten Technologien herausgefordert.

Das zweite Problem beim Quantenmechanik-Unterricht der Elektrotechniker und Informatiker stellt der Mangel an geeigneten Lehrbüchern dar. Die Physikbücher für Ingenieure versuchen ohne höhere Mathematik auszukommen, und können deshalb nicht über das historisch wichtige aber konzeptionell und in Einzelheiten falsche Bohr-Modell hinauskommen. Die Lehrbücher für Physiker sind dagegen alle sehr mathematikintensiv, und für Elektrotechniker und Informatiker anwendungsfremd und viel zu abstrakt. Das vorliegende Buch versucht deswegen einen Mittelweg zwischen abstrakter Mathematik und Ingenieur Anwendung einzuschlagen. Es werden einerseits die Axiome und die Grundkonzepte der Quantenmechanik in der nötigen, jedoch in der möglichst einfachsten mathematischen Formulierung angegeben. Dabei werden aber nur solche Werkzeuge der höheren Mathematik benutzt, die während des Elektrotechnik-/Informatikstudiums sowieso gelehrt und gelernt werden müssen,²⁾ und werden dann für einfache Fälle konkretisiert. Sowohl die nötigen mathematischen Kenntnisse als auch die klassischen physikalischen Grundlagen wurden, für erleichtertes Nachschlagen, in zwei Anhängen zusammengefasst. (Es wird auch stark empfohlen, vorerst diese Anhänge durchzuarbeiten!) Ingenieure ziehen meistens den mathematischen Herleitungen die direkt anwendbaren Formeln vor. Da aber die innere Logik der mathematisch formulierten Quantenmechanik gerade in den Herleitungen selbst steckt, werden die wichtigsten in diesem Buch angegeben – allerdings nur als Fußnoten. Die zwei Ausnahmen bilden die Kapitel 9 und 10. Die entsprechenden Herleitungen bestehen jedoch aus elementaren Schritten, die dann auch zu praktisch anwendbaren Formeln und zum vertieften Verständnis konkreter Beispiele führen. Zusätzlich, wohl wissend, dass die meisten in der Zielgruppe dieses Buches nicht vorwiegend ma-

2) Komplexe Zahlen, Ableitung und Integral, Funktionsentwicklung, einfache Differenzialgleichungen.

thematisch gesinnt sind, wird stark auf die Benutzung von Multimedia gesetzt: Die zahlreichen Bilder werden durch aus dem Internet abrufbare kurze Laufbildaufnahmen (Videoclips) und interaktive Simulationen (Applets) ergänzt. Da quantenmechanische Anwendungen oft ein numerisches Rechenverfahren benötigen, helfen die Applets besonders bei der Ermittlung der wichtigen Trends die Last der umfangreichen mathematischer Behandlung von den Schultern der Studierenden zu nehmen, und durch die Applets werden auch gleichzeitig die Ergebnisse grafisch visualisiert. Dieses Buch wurde gezielt für Elektrotechniker und Informatiker geschrieben und zeigt die Verflechtung zwischen der Entwicklung der Quantenmechanik und der Hardware der Beleuchtungstechnik, der Festkörperelektronik und der Quanteninformationstechnologie. Es wird versucht, die überraschenden Behauptungen der Quantenmechanik anhand direkter Anwendungen zu demonstrieren. Selbstverständlich benötigt die funktionstüchtige Beschreibung der meisten Bauelemente auch weitere Kenntnisse in der Halbleiterphysik,³⁾ aber die wichtigsten physikalischen Grundprinzipien der Licht- und Laserdioden, der Foto- und Solarzellen sowie der physikalische Hintergrund der Elektronemission aus Metallen oder des elektrischen Durchschlags in Isolatoren werden in diesem Buch ausreichend erklärt. Das Ziel ist jedoch nicht nur die Erklärung der Funktionsmechanismen von Produkten marktreifer Technologien, sondern viel mehr auch die Vorbereitung für die Zukunft. Deswegen wird auch die Quantenmechanik der Mehrteilchensysteme gestreift, um mindestens einen Blick auf die Grundideen der aufkommenden Quanteninformationstechnologie (durch Skizzierung der aussichtsreichsten Qubit-Kandidaten für Quantum Computing) werfen zu können.

Zuletzt muss noch erwähnt werden, dass die Quantenmechanik viele philosophische bzw. erkenntnistheoretische Fragen aufgeworfen hat. In diesem Buch wurden diese soweit wie möglich unter den Teppich gefegt, und eine – mit philosophischem Fachwort – eher positivistische Darstellung gewählt. Da das Buch für Ingenieure geschrieben wurde, sollte die praktisch nützliche Vorhersage Vorrang vor der philosophischen Interpretation haben. Außerdem ist es vielleicht sowieso besser, zuerst ein auf konkrete Ingenieurprobleme anwendbares Gesamtbild zu malen, das später eventuell noch verfeinert werden muss, als sich gleich bei der ersten Vermittlung der Quantenmechanik in Interpretationswidersprüche zu verwickeln.

Ich möchte mich für die Hilfe von Dipl. Chem., PhD Phys. Markus Rullich und von Herrn Mario Alfredo Gollub bei der sprachlichen, und von PhD Phys. Michael Lorke und PhD. Phys. Bálint Aradi bei der fachlichen Korrektur des Manuskriptes bedanken.

Bremen, im Sommer 2015

Peter Deák

3) Solche Kenntnisse werden nach Hoffnung des Autors in einem ähnlichen geplanten Folgebuch „Essenzielle Halbleiterphysik für Elektrotechniker“ zusammengefasst.

**Farbige Abbildungen und Links zu
weiterführenden Materialien:**



Einführung. Die klassische Physik und die Physik der Informationstechnologie

1

In diesem Kapitel ...

wird das Bild erläutert, was die klassische Physik über den Zustand der Materie geschaffen hat. Das daraus stammende Verständnis hat die erste industrielle Revolution ausgelöst, allerdings ist es nicht in der Lage alle in der heutigen Informationsgesellschaft benutzten Technologien zu erklären. Hier wird anhand der Entwicklung der Beleuchtungstechnologie erklärt, warum die Physik weiterentwickelt werden musste.

1.1

Der Zustand der Materie in der klassischen Physik

Die Aufgabe der Physik ist die Beschreibung der Bewegungen und Zustände der Materie mittels mathematischer Zusammenhänge, die quantitative Vorhersagen aufgrund bekannter Anfangsbedingungen ermöglichen. Die mathematischen Zusammenhänge werden für vereinfachte, idealisierte Modellsysteme aufgestellt. Die klassische Physik betrachtet zwei unterschiedliche Formen der Materie: die diskreten Körper und das kontinuierliche elektromagnetische Feld, die durch ihre träge Masse m , bzw. Energie E charakterisiert werden. Die Einstein'sche spezielle Relativitätstheorie hat gezeigt, dass die beiden Formen ineinander umgewandelt werden können. Zum Beispiel bei der Kernspaltung oder Fusion wird ein Teil der Anfangsmasse in elektromagnetische Strahlung – im ganzen Spektralbereich von thermischer bis Röntgenstrahlung – umgewandelt, während bei Abbremsung eines elektromagnetischen Strahls z. B. Elektron-Positron-Paare erzeugt werden können. Bei den Umwandlungen gilt immer $E = mc^2$. Für die zwei Materialformen werden in der klassischen Physik jedoch sehr unterschiedliche, idealisierte Modelle benutzt. Das für das elektromagnetische Feld angewandte Modell ist das ideal-elastische Kontinuum, in dem sich Wellen ausbreiten können. Die Energie wird durch solche elektromagnetischen Wellen transportiert (Strahlung). Die charakteristischen Größen der Welle sind die (Kreis-)Frequenz ω und die Wel-

Tab. 1.1 Die Elementarteilchen.

<i>Elementarteilchen</i>	1. Generation	2. Generation	3. Generation
Quark	Up (u)	Charm (C)	Top (t)
	Down (d)	Strange (S)	Bottom (b)
Leptonen	Elektron (e)	Myon (μ)	Tau (τ)
	e -Neutrino	μ -Neutrino	τ -Neutrino

lenzahl k , und deren Zusammenhang ist die von dem Medium bestimmte Dispersionsrelation $\omega = \omega(k)$, welche die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit der Wellen vorschreibt. Die Energie der Welle hängt von der Phasengeschwindigkeit und der Amplitude ab (s. Anhang A.5 und A.6).

Im Gegensatz zum kontinuierlichen elektromagnetischen Feld lassen sich die Körper in kleinere Teile zerlegen, bis auf die in Tab. 1.1 gezeigten Elementarteilchen.¹⁾ Diese Aufteilbarkeit der Körper führte die klassische Physik zu dem idealisierten Konzept der Punktmasse – ein geometrischer Punkt (ohne Ausmaß) mit Masse m – was als Modell für die Elementarteilchen diente (Punktmassenmodell des Teilchenzustandes). Man hat auch gefunden, dass der Schwerpunkt eines aus vielen Punktmassen bestehenden Körpers sich als eine Punktmasse (mit der ganzen Masse des Körpers) bewegt, als wirkten alle äußeren Kräfte auf den Schwerpunkt. Wenn man sich nicht für die relativen Bewegungen der Teilchen interessiert, kann man sogar einen ausgedehnten Körper durch eine Punktmasse ersetzen, deren Ort im Raum ganz genau (als ein geometrischer Punkt) als Funktion der Zeit bestimmt werden kann. Ebenfalls kann die Geschwindigkeit des Schwerpunktes mit absoluter Präzision angegeben werden. Die Bahn und die Geschwindigkeit der Punktmasse definieren mithilfe der Masse die dynamischen Größen des Körpers: den Impuls \boldsymbol{p} , den Drehimpuls \boldsymbol{L} und die Energie E (s. Anhang A.3). Die punktmassenähnlichen Elementarteilchen und die sich im Kontinuum verbreitenden elektromagnetischen Wellen sind die Modelle, welche die klassische Physik für die zwei möglichen Zustände der Materie benutzt.

1.2

Axiome in der klassischen Physik (s. Abb. 1.1)

Die Grundlage für die Beschreibung der Bewegung von wechselwirkenden Punktmassen sind die *Newton'schen Axiome*, die erlauben, Bewegungsgleichungen für jede Punktmasse aufzuschreiben (s. Anhang A.2). Das Gleichungssystem ist aller-

1) Quarks bauen die Bestandteile der Atomkerne, d. h. die Protonen und Neutronen auf, und Atomkerne und Elektronen sind die kleinsten Teilchen sowohl der Atome und Moleküle in Gasen und Flüssigkeiten, wie auch der Festkörper.

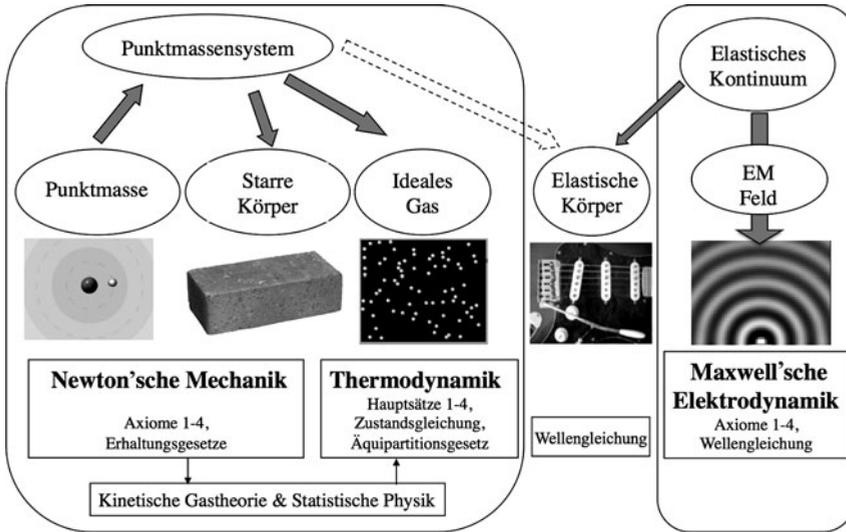


Abb. 1.1 Modelle und Axiome der klassischen Physik.

dings nur bei *geringer Teilchenzahl* oder unter Annahme der durch starke Wechselwirkungen bestimmten, festen Abstände (*starrer Körper*) lösbar.

Bei *großer Teilchenzahl* und vernachlässigbaren Wechselwirkungen (wie in einem Gas) kann das *ideale Gasmodell* (nicht wechselwirkende Punktmassen) angewandt werden, dessen Zustand durch makroskopische, sog. thermodynamische Zustandsgrößen angegeben wird. Die Änderungen dieser Größen werden aufgrund der axiomatisierten, sog. *thermodynamische Hauptsätze* und der *Zustandsgleichung* beschrieben. Allerdings können die thermodynamischen Zustandsgrößen auf Durchschnittswerte der Newton'schen dynamischen Größen zurückgeführt werden, und sowohl die Hauptsätze wie die Zustandsgleichung sind mithilfe der kinetischen Gastheorie und der statistischen Physik aus den Newton'schen Axiomen herleitbar.

Das Verhalten der Ladungen im elektromagnetischen Feld kann aufgrund der *Maxwell'schen Axiome* betrachtet werden (s. Gl. (A.25)). Fern von den Teilchen führen diese zu einer Wellengleichung, deren Lösung die elektromagnetischen Wellen sind. Die Ausbreitung der lokalen Änderung in der elektrischen Feldstärke z. B. kann mit einer Wellenfunktion $E(\mathbf{r}, t)$ angegeben werden. Die Wellenfront der elektromagnetischen Welle wird durch die benachbarten Punkte im Raum definiert, in denen die Feldstärke E in derselben Schwingungsphase ist. Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen sekundären Elementarwelle, und die Interferenz zwischen dieser führen zu den bekannten Brechungs- und Beugungserscheinungen (s. Anhang A.6).

Elastisch oder plastisch deformierbare Körper (Festkörper bzw. Flüssigkeiten) haben viele, stark wechselwirkende Teilchen und weder das Modell des Punktmassensystems noch das ideale Gasmodell kann praktisch angewandt werden. In

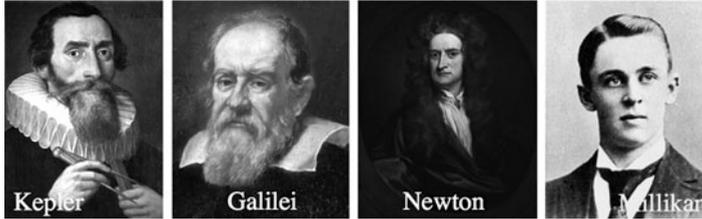


Abb. 1.2 Wissenschaftler, die zum Punktmassenkonzept der Körper in der Physik maßgebend beigetragen haben. (Quelle: Die Bilder sind aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen.)

einem Modell mit *kontinuierlicher Massenverteilung* können die Newton'schen Bewegungsgleichungen für Volumenelemente aufgeschrieben werden. Bei *elastischen Körpern* führen sie zu einer Wellengleichung. Die sich als Lösung ergebenden mechanischen Wellen beschreiben die Ausbreitung der lokalen Bewegungen, ähnlich wie beim elektromagnetischen Feld. Die Ähnlichkeit zwischen mechanischen und elektromagnetischen Wellen führte zu der Behauptung dass das elektromagnetische Feld selbst als *elastisches Medium* betrachtet werden kann.

1.3

Stand und Wirkung der klassischen Physik bis zum Ende des 19. Jahrhunderts

Die (klassische) Physik besteht aus zwei relativ unabhängigen Teilen: *Mechanik* (und die dazu durch der statistische Physik verknüpfte *Thermodynamik*) und die *Elektrodynamik* (samt *Optik*).

- a) Das Konzept der **Mechanik** für den Zustand der Materialteilchen ist die Punktmasse, wofür im konservativen Feld, mit der potenziellen Energie $V(x, t)$ die Newton'sche Bewegungsgleichung

$$m\ddot{x}(t) = -\frac{dV(x, t)}{dx} \quad (1.1)$$

gilt. Historisch gesehen (s. Abb. 1.2) basiert die Mechanik (unter anderem) auf

- der mathematischen Formulierung der beobachteten Regelmäßigkeiten in der Bewegung der Himmelskörper (z. B. von *J. Kepler*),
- der mathematischen Formulierung der experimentell ermittelten Zusammenhänge in der Bewegung von Körpern auf der Erde (z. B. von *G. Galilei*),
- der Aufstellung von Axiomen, aus denen die beobachteten und experimentell ermittelten Zusammenhänge herleitbar sind (von *I. Newton*).

Das Teilchenkonzept für die Materie wurde (viel später) auch durch elektrotechnische Experimente bestätigt (z. B. von *E. Millikan*, der gezeigt hat, dass

die Ladung eines Öltröpfchens, welches im Feld eines Kondensators schwebt, nur um einer Elementarladung, also mit der Ladung des Elektrons, erhöht werden kann).

Die Anwendung der Prinzipien und Gesetze der Mechanik und Thermodynamik führte zu der Erfindung und dem optimierten Bau von Strukturen und Maschinen im 19. Jahrhundert (s. Abb. 1.3).

- b) Die Wellentheorie des Lichtes innerhalb der **Elektrodynamik** basiert auf Energietransfer im elektromagnetischen Feld durch Wellen, wofür die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2} = v_f^2 \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

gilt (wobei $\psi(x, t)$ – im dreidimensionalen Fall – des elektrische oder Magnetfeld und v_f die Phasengeschwindigkeit ist). Historisch gesehen (s. Abb. 1.4) wurde diese Theorie auf

- der mathematischen Formulierung der beobachteten Regelmäßigkeiten in der Bewegung des Lichtes (z. B. von *A.J. Fresnel*),
- der mathematischen Formulierung der experimentell ermittelten Zusammenhänge des Elektromagnetismus (z. B. von *M. Faraday*),
- der Aufstellung von Axiomen, aus denen die beobachteten und experimentell ermittelten Zusammenhänge herleitbar sind (*J.C. Maxwell*),

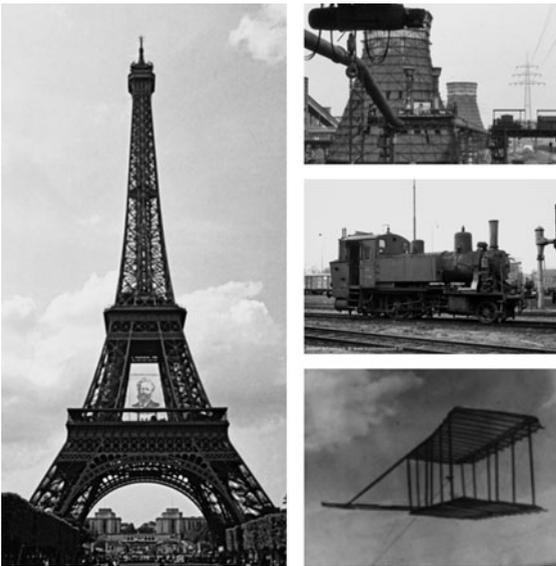


Abb. 1.3 Anwendungen der Mechanik und Thermodynamik im 19. Jahrhundert. (Quellen: Mit herzlichem Dank für das Kraftwerkbild von Daniel Hinze, www.dubtown.de, und für das Bild der alten Lokomotive von Herbert

Schambach <http://www.bundesbahnzeit.de>. Das Bild des Flugzeugs ist aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen. Das Bild des Eiffelturms ist eigene Aufnahme.)

aufgebaut. Das Konzept der elektromagnetischen Welle wurde (viel später) in Experimenten bestätigt (z. B. von *H. Hertz*, der gezeigt hat, dass man Radiowellen anregen und detektieren kann), die als Grundlage der heutigen Nachrichtentechnik dienen.

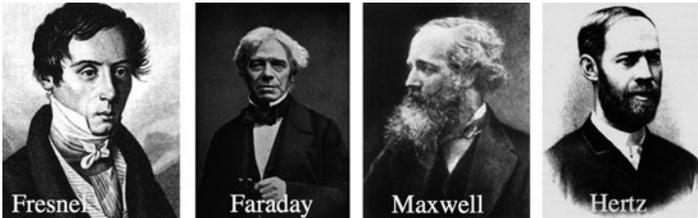


Abb. 1.4 Wissenschaftler, die zum Konzept der elektromagnetischen Welle maßgebend beigetragen haben. (Quelle: Die Bilder sind aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen.)

Die Anwendung der Prinzipien und Gesetze der Elektrodynamik und Optik führte im 19. Jahrhundert zu der Erfindung der elektrischen Beleuchtung, den ersten Formen der elektrischen Datenübertragung und zum „exotischen“ Strahlen (Abb. 1.5).



Abb. 1.5 Anwendungen der Elektrodynamik und Optik im 19. Jahrhundert. (Quellen: Das Bild der Glühlampe ist von H. Ellgard, <https://americanhistory.si.edu> und das des

Telefons von E. Etzold, <http://de.wikipedia.org>. Das Bild der Röntgenaufnahme und des Radios ist aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen.)

1.4

Physikalischer Hintergrund der High-Tech-Ära

Am Ende des 19. Jahrhunderts wurde die klassische Physik als fast abgeschlossenen betrachtet, trotz einiger ungelöster Probleme. Es stellte sich aber heraus, dass letztere nur durch eine revolutionäre Erweiterung der physikalischen Konzepte überwunden werden konnten. Die Erfindungen die aus dieser Revolution hervorkamen, haben die moderne High-Tech-Ära eingeführt.

Wenn man heute über *Informationsgesellschaft* redet, ist der Austausch von elektrisch verarbeiteter Information durch schnelle optische (elektromagnetische) Kanäle gemeint. Die für Elektrotechniker heute interessanten Bauelemente sind deshalb, wie in Abb. 1.6 dargestellt, die Solarzellen als Energiequelle, Halbleiterelektronik für EDV und Datenspeicherung, optoelektronische Elemente zur Erzeugung von Licht (oder elektromagnetische Strahlung im Allgemeinen) sowie

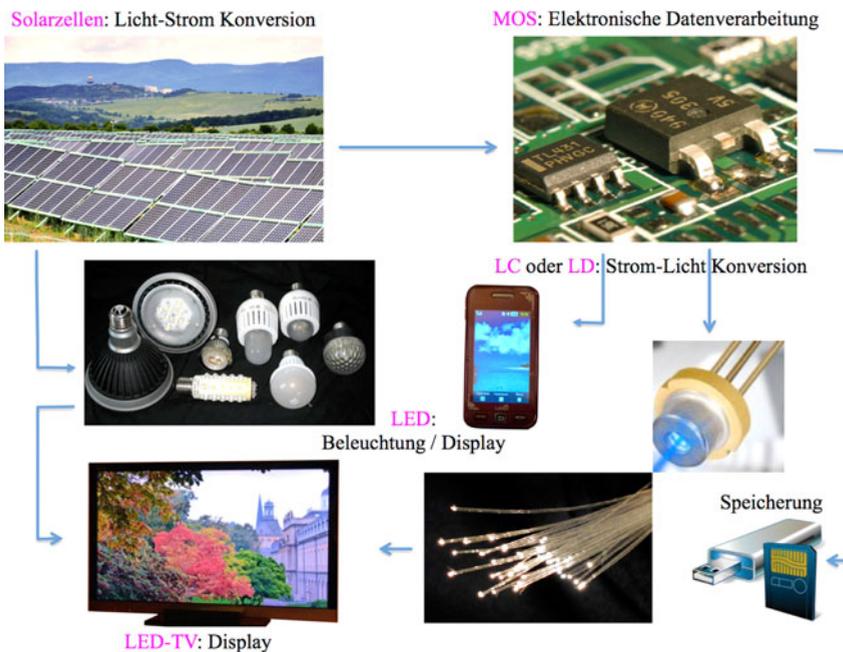


Abb. 1.6 Hardware-Elemente der Informatiktechnologie. Farbbild online. (Quellen: **Solaranlage:** Petr Kratochvil, <http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=3061&picture=solar-power-plant>, **IC:** Magnus Manske, http://de.wikipedia.org/wiki/Integrierter_Schaltkreis#mediaviewer/Datei:Chips_3_bg_102602.jpg, **Blaue Laserdiode (LD):** mit freundlicher Genehmigung von Visible Diode Lasers LLC, A Florida Corporation,

<http://www.visiblelaserdiodes.com/product/445nm-blue-laser-diodes/#>, **Glasfaser:** <http://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaserkabel#mediaviewer/Datei:Fibreoptic.jpg>, **LED-Lampen:** Geoffrey Landis, http://en.wikipedia.org/wiki/LED_lamp#mediaviewer/File:LED_bulbs.jpg, **Smartphone und LED-Display:** eigene Aufnahmen, **SD-Speicher:** Icons-land, <http://individual.icons-land.com/icon/2089-usb-flash-card-card-reader-card-icon>.)

Displays. Bei letzteren wird heutzutage immer öfter jeder Bildpunkt beleuchtet, und die Lichterzeugungskonzepte folgen denjenigen, die bei Raumbeleuchtung benutzt werden.

Die Entwicklung dieser Elemente hat einerseits die Grenzen der klassischen Physik aufgezeigt, andererseits wurden sie nur durch die Weiterentwicklung der Physik ermöglicht.

1.5

Entwicklung der Physik im Spiegel der Beleuchtungstechnik

Die Wechselwirkung der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung kann man bei der Entwicklung der Beleuchtungstechnologien am besten verfolgen: von der Glühlampe über Entladungsröhren bis hin zu lichtemittierenden Dioden (LED). Wie im Folgenden kurz gezeigt, bedeutete jeder Schritt in der Entwicklung auch ein neues Kapitel in der Geschichte der Physik (Abb. 1.7).

1.5.1

Die Glühlampe

Die Glühlampe hat ein ganz einfaches Prinzip: Strom heizt Draht, Draht strahlt, Gasfüllung in der Birne hält den Draht stabil und die Birne klar. Ihre Vorteile sind das einfache System, niedrige Herstellungskosten und niedrige Umweltbelastung und eine gute, natürliche Spektralverteilung. Dagegen steht ein großer Nachteil: Die äußerst niedrige Effizienz ($< 20 \text{ lm/W}$), was zu ihrer Abschaffung führte. Es ist aufschlussreich zusammenzufassen, was wir über die Physik der Glühlampe wissen. Der elektrische Strom wird durch den Draht mit Querschnitt A von punktmassenähnlichen Elektronen der Masse m mit Geschwindigkeit v getragen:

$$I = envA \quad (1.3)$$

wobei e die Elementarladung, d. h. die elektrische Ladung der Elektronen, und n ihre Konzentration (Zahl/Volumen) ist. Eine Gleichspannung U in einem Draht der Länge l verursacht eine konstante Geschwindigkeit

$$v = e\tau \frac{U/l}{m} \quad (1.4)$$

da die Elektronen durchschnittlich nach einer Zeit τ gestreut werden. Diese Stöße gleichen einem Reibungsprozess, in dem Wärme produziert wird. Aus Gln. (1.3) und (1.4) folgt das Ohm'sche Gesetz (s. Abschnitt A.4.1)

$$I = \frac{e^2 n \tau A}{m l} U = \frac{1}{R} U \quad (1.5)$$

und die mikroskopische Definition des Widerstands R . Die Joule'sche Wärme, erzeugt in der Zeit t am Widerstand R , ist

$$Q = I^2 R t = U I t \quad (1.6)$$