

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

lenz Zahl 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 \mathbf{p} , den Drehimpuls \mathbf{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.

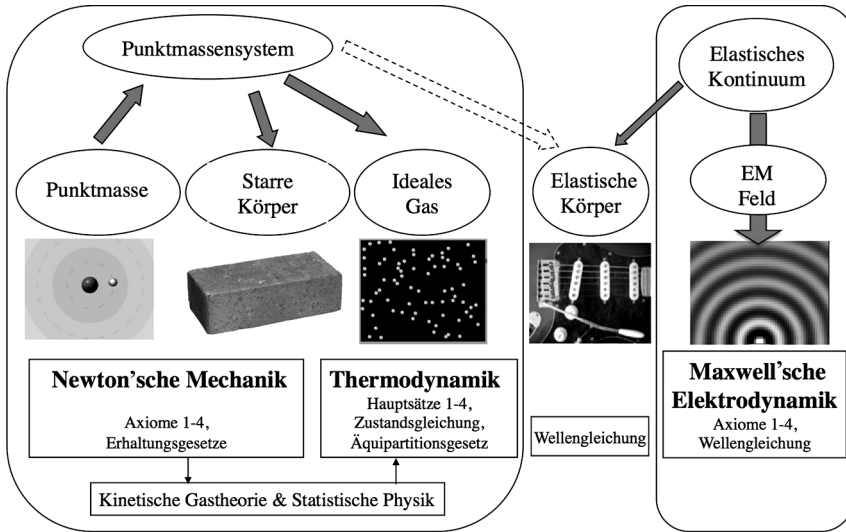


Abb. 1.1 Modelle und Axiome der klassischen Physik.

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

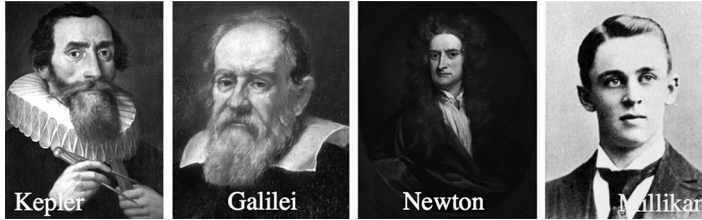


Abb. 1.2 Wissenschaftler, die zum Punktmassenkonzept der Körper in der Physik maßgebend beigetragen haben. (Quelle: Die Bilder sind aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen.)

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.

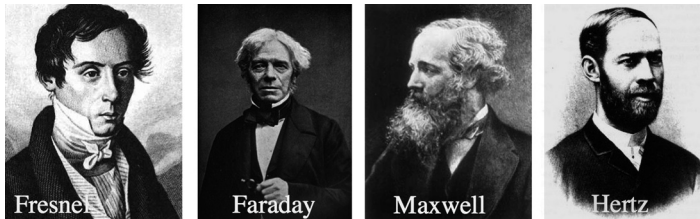


Abb. 1.4 Wissenschaftler, die zum Konzept der elektromagnetischen Welle maßgebend beigetragen haben. (Quelle: Die Bilder sind aus der gemeinfreien Bildsammlung von <http://de.wikipedia.org> genommen.)

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

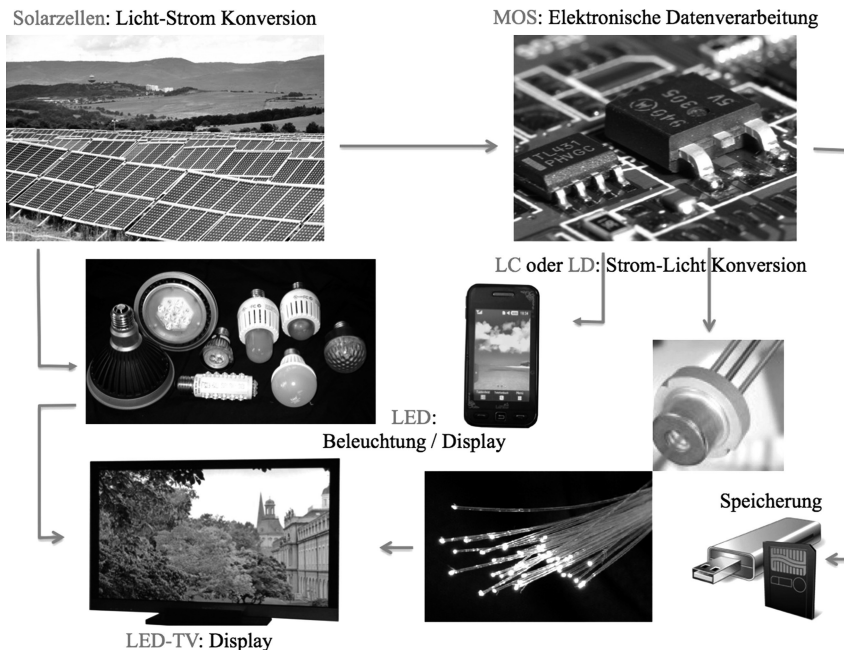


Abb. 1.6 Hardware-Elemente der Informatiktechnologie. Farbbild online. (Quellen: **Solaranlage:** Petr Kratochvil, <http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=3061&picture=solar-power-plant>, **IC:** Magnus Manske, http://de.wikipedia.org/wiki/Integrierter_Schaltkreis#mediaviewer/Datei:Chips_3_bg_102602.jpg, **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

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



Abb. 1.7 Entwicklungsstufen der Beleuchtungstechnik von der Glühlampe durch die Entladungslampen bis zu den LED-Lampen. Farbbild online.

Angenommen, dass diese Wärme fast vollständig den Draht (und kaum die Gasfüllung) heizt, erhöht sich die Temperatur des Drahtes mit Gesamtmasse M und Wärmekapazität c um:

$$\Delta T = \frac{Q}{cM} \quad (1.7)$$

Aus Erfahrung wissen wir, dass erwärmte Körper Energie in Form von elektromagnetischen Wellen aller Frequenzen ausstrahlen. Wie wir später sehen werden, führt das Gleichverteilungsgesetz der klassischen Physik zu einer mit Wellenlänge λ nach $1/\lambda^4$ abfallenden Energieverteilung in der Strahlung (gestrichelte Linie in Abb. 1.8). Dagegen zeigen die Messungen eine asymmetrische Kurve, mit einem temperaturabhängigen Maximum. Die Wellenlänge des Maximums bestimmt die Farbe, die sich mit steigender Temperatur vom Rot nach Blau verschiebt (durchgezogene Linien in Abb. 1.8). Diese Erfahrung ist sogar im Alltagsleben bekannt und dient als Grundlage für die kontaktlose Temperaturmessung (Pyrometer). Die gemessene Energieverteilung kann aber innerhalb der klassischen Physik nicht erklärt werden!

Das Verständnis dieses Strahlungsgesetzes war aber sehr wichtig, da aus Abb. 1.8 folgt, dass um die Farbe des Drahtes in den sichtbaren Bereich zu schieben, eine Temperatur von $\sim 6000^\circ\text{C}$ nötig wäre, was offensichtlich weit über der Schmelztemperatur aller Metalle liegt.²⁾ Die hochschmelzenden Metalle, wie z. B. Wolfram, können bis etwa 3000 K geheizt werden, und dabei fällt nur $\sim 5\%$

2) Diese Temperatur herrscht auf der Sonnenoberfläche, und deswegen entwickelten sich unsere Sichtorgane so, dass sie genau diesen Wellenlängenbereich ausnutzen können.

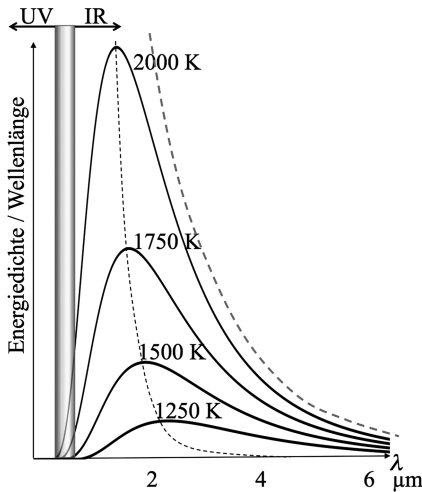


Abb. 1.8 Spektrale Energieverteilung der Strahlung eines erwärmten Körpers. Die schwarzen Kurven stellen (etwas idealisierte) Messwerte bei verschiedenen Temperaturen

dar, und die rote gestrichelte Linie entspricht der Vorhersage der klassischen Physik bei einer Temperatur von 2000 K. [Farbbild online](#).

der ausgestrahlten Energie in den sichtbaren Bereich. Der Rest erwärmt nur die Umgebung.

1.5.2 Die Entladungslampe

Die Entladungslampe als nächste Stufe in der Entwicklung der Beleuchtungstechnik ist deutlich komplizierter. Nehmen wir eine gewöhnliche Leuchtstofflampe, wie in Abb. 1.9 dargestellt.³⁾

Solche Lampen sind eigentlich Entladungsröhren mit zwei Elektroden. Die Spannung zwischen den erwärmten Wolfram-Elektroden induziert Elektronenaustritt, und die Elektronen werden beschleunigt. Leichte Atome der Gasfüllung werden durch Kollision mit den Elektronen ionisiert, was zu einer Elektronen-

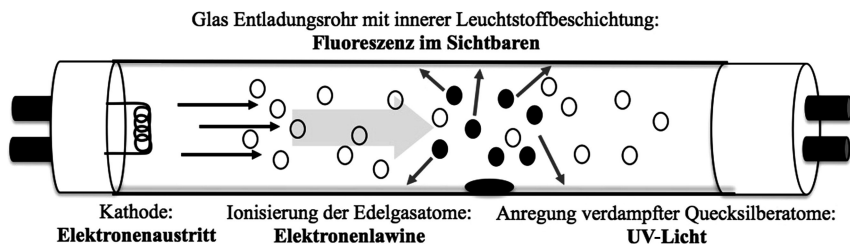


Abb. 1.9 Schematische Darstellung einer Leuchtstofflampe.

3) Die sog. Energiesparlampen funktionieren mit demselben Prinzip.

lawine führt. Die Joule'sche Wärme, produziert durch den Elektronenstrom, verdampft die Quecksilberfüllung, und die Quecksilberatome werden durch Elektronenstöße energetisch angeregt. Bei Rückkehr dieser Atome in den Grundzustand wird die Energie als UV-Strahlung abgegeben. Die UV-Strahlung regt den Leuchtstoff (im Fachjargon „Phosphor“, obwohl heutzutage P-haltige Substanzen schon kaum mehr verwendet werden) auf der inneren Wand des Rohres an. Bei Rückkehr in den Grundzustand „phosphoresziert“ der Leuchtstoff, gibt also „weiße“ Strahlung ab. Ohne Quecksilber ist es sehr schwierig, eine UV-Strahlung zu erzeugen, die durch den Leuchtstoff in weißes Licht konvertiert werden kann. Leichte Atome, wie Neon, Xenon oder Natrium strahlen nur eine sichtbare Frequenz ab.⁴⁾

Das ist wahrhaftig ein kompliziertes System mit viel höheren Herstellungskosten und mehr Defektmöglichkeiten als die Glühlampe, aber doch mit einer etwa 10-mal längeren durchschnittlichen Lebensdauer und ca. 5-mal größere Lichtleistung im Sichtbaren (50–100 lm/W). Allerdings ist auch die Umweltbelastung viel höher und die Spektralverteilung schlecht an die Sichtorgane angepasst. Eine Optimierung der Entladungslampen wäre sehr wichtig, also sollten die verschiedenen physikalischen Prozesse verstanden werden. Dabei stößt man aber gleich auf eine Reihe von Erscheinungen, welche den Rahmen der klassischen Physik sprengen. Als Erstes: Die zum Elektronenaustritt nötige Spannung ist viel kleiner als aufgrund der Bindungsenergie des Elektrons im Metall (d. h. aufgrund der Austrittsarbeit) zu erwarten wäre. Im Hintergrund steht der sog. Tunneleffekt: Elektronen können auf der anderen Seite einer Potenzialwand erscheinen, ohne sie „überspringen“ zu müssen.

Die Tatsache, dass gegebene Atome nur wenige, diskrete Frequenzen, dagegen der Leuchtstoff weißes Licht (alle Frequenzen) ausstrahlt, kann auch nicht aufgrund der klassischen Physik verstanden werden. Wie wir sehen werden, hängt all das mit der Wellennatur der Elektronen zusammen, die mit dem Punktmaszenkonzept der klassischen Physik nicht vereinbar ist.

1.5.3

Leucht- und Laserdioden

Leucht- und Laserdioden (Abb. 1.10) sind die Bauelemente, die für Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung in Handys oder Fernsteuerungsgeräten, aber auch bei Konversion des elektrischen Stromes für optische Datenübertragung angewandt werden. Leuchtdioden (LED) konnten für eine lange Zeit nur eine Farbe im Sichtbaren ausstrahlen, allerdings mit einer Lichtleistung (30–50 lm/W) und einer Lebensdauer vergleichbar mit Entladungslampen. Die Entwicklung von blauen und UV-LEDs (am Ende des 20. Jahrhunderts), deren Strahlung in weißes Licht konvertiert werden kann, und die billige Massenproduktion werden dazu führen, dass die LEDs auch die Entladungslampen für Beleuchtung aus dem Markt verdrängen.⁵⁾

4) Mit diesen Gasen gefüllten Entladungslampen sind die Farbröhre.

5) Bei Autos hat dieser Prozess bereits begonnen.

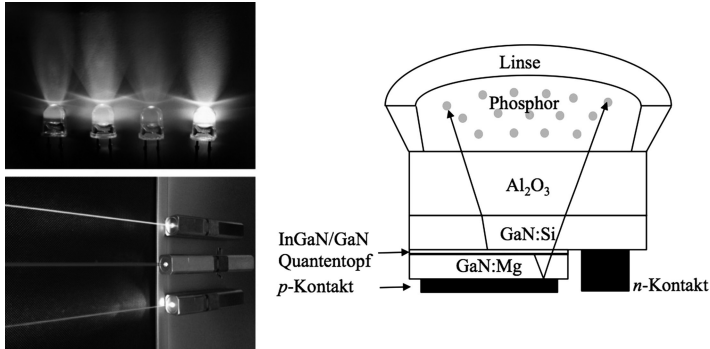


Abb. 1.10 Leucht- und Laserdioden und schematischer (nicht maßgerechter) Aufbau einer weißen LED. Farbbild online. (Quellen: Das LED-Bild mit freundlicher Genehmigung von Fraunhofer IAF. Die Laserdioden sind von Bành Gia Kit, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lasers.jpeg>.)

Während die Glühlampen vor und die Entladungslampen parallel mit der Erarbeitung der modernen Physik erfunden wurden, und ihre Entwicklung zur letzteren beigetragen hat, sind die LEDs aus der Anwendung der modernen Physik geboren. Obwohl in der heutigen Elektrotechnik semiklassische Modelle für die Beschreibung der in der Elektronik verwendeten Halbleiterdioden und Transistoren benutzt werden (z. B. mit der Annahme von Material zu Material oder manchmal sogar durch die durch Spannung änderbare Elektronenmasse), die Optimierung dieser Bauelemente und die Entwicklung von funktionierenden Leucht- und Laserdioden (aber auch von den, für die Solarzellen unbedingt nötigen, durchsichtigen Elektroden) sind ohne das Verständnis der modernen Physik nicht möglich.

1.6

Physikbedarf der Elektrotechnik heute und morgen

Die ersten Computer der Welt (wie die legendäre ENIAC) wurden aus auf Entladungsröhren basierten Schaltkreisen gebaut, aber das ist heute nur noch Geschichte. Die Grundlage der elektronischen Datenverarbeitung ist die Festkörper- (oder Halbleiter-) Elektronik. Der Wettbewerb zwischen Entladungsröhren und LEDs für Bildpunktbeleuchtung in Fernseher und Displays sowie bei Raumbeleuchtung ist zwar noch nicht abgeschlossen, aber der Sieg der Festkörperelektronik scheint auch in diesen Gebieten allein aus ökonomischen Gründen sehr wahrscheinlich. Wenn man noch die Entwicklung der Lithiumbatterien (mit Festkörperelektrolyt) betrachtet, wird klar, dass für einen wesentlichen Teil der heutigen Elektrotechnik die auf der Quantenmechanik basierte Festkörper- (oder Halbleiter-) Physik relevant ist. Die physikalischen Grundlagen der Halbleiterelektronik werden im geplanten Folgebuch: „Essenzielle Halbleiterphysik für Elektrotechniker“ erläutert. Die dazu nötige Quantenmechanik ist der Gegenstand dieses Buches.

Der Grund, warum die Quantenmechanik für Elektrotechniker wichtig ist, geht aber über die Notwendigkeit in der Halbleiterelektronik hinaus. Die Quantenmechanik hat unsere Auffassung über den Zustand der Teilchen grundsätzlich verändert. Wie wir sehen werden, ist weder das Konzept der bis zur Absurdität lokalisierten Punktmasse noch jenes der (unendlichen) harmonischen Welle für Mikroteilchen haltbar. Unsere Grundkonzepte über die Wirklichkeit müssten deutlich erweitert werden. Die Quantenmechanik bedeutet ein höheres Niveau im Verständnis der Welt und gehört zum Weltbild derjenigen, die ein B.Sc. Diplom im wissenschaftlich-technischen Bereich besitzen wollen.

Allerdings führen neue Konzepte zu neuen Anwendungen (wie das Paradox von Schrödingers Katze zum Quantum Computing oder die masselosen relativistischen Elektronen von Dirac zur ultraschnellen Graphen-Elektronik), die ohne Quantenmechanik nicht einmal näherungsweise betrachtet werden können, von sinnvoller Systemintegration solcher Bauelemente ganz zu schweigen. Die Milliarden, die für Erforschung und Entwicklung der Nanotechnologie seit Anfang des 21. Jahrhunderts ausgegeben wurden, werden bald Früchte bringen und auch das Berufsleben der Elektrotechniker in der nahen Zukunft wesentlich verändern. Elektrotechniker sind hauptsächlich daran interessiert, Bauelemente in effektive und automatisierte Systeme zu integrieren. Es scheint offensichtlich zu sein, dass eine grundlegende Kenntnis und ein Verständnis der Bauelemente für den erfolgreichen Systementwurf unentbehrlich ist.⁶⁾ Bisher konnten jedoch die Elektrotechniker dabei auch ohne das Verständnis der Quantenmechanik mehr oder weniger auskommen. Bei zukünftigen Bauelementen, in denen die Schaltung durch einzelne Elektronen (mit Ausnutzung der Welleneigenschaften) passiert, dürfte das nicht mehr der Fall sein, ebenso wenig wie die Handhabung von Quanteninformationstechnik und Quantenverschlüsselung, wo Information z. B. in den magnetischen Eigenschaften einzelner Elektronen durch Licht eingeschrieben wird. Die Physik dieser zukünftigen Bauelemente (wie auch z. B. Quantentransport⁷⁾) geht selbstverständlich über den Rahmen dieses Buches, welches für Begleitung einer B.Sc. Lehrveranstaltung gedacht ist, hinaus. Hier wird das Verständnis der Grundkonzepte angestrebt, die in heutigen Anwendungen, wie z. B. in *Quantentopf-Leuchtdioden, Kaskadenlasern oder Flash-Speichern* eine große Rolle spielen. Selbstverständlich benötigt dieses Verständnis auch gewisse Grundlagen aus der klassischen Physik und der Mathematik. Die nötigen Kenntnisse sind in Anhängen A und B zusammengefasst.

Im Folgenden werden erst Versuche dargestellt, um die bei der Glühlampe und bei der Entladungslampe auftretenden Fragen innerhalb der klassischen Physik zu beantworten. Wie in Kapitel 2–4 gezeigt, könnte eine erste überraschende, allerdings keineswegs allgemeine und widerspruchsfreie Erklärung (was immerhin

6) Ein ernüchterndes Beispiel: In Leistungselektronik könnten Siliciumkarbid-basierte Bauelemente etwa 30 % des Energieverbrauches einsparen. Dafür müssten aber die Systeme neu und zu diesen Bauelementen angepasst entworfen werden. Wenn diese Bauelemente einfach als Ersatz für die Silicium-Bauelemente in Standardsystemen benutzt werden, sind sie einfach zu teuer in der Anwendung.

7) http://www.amazon.de/dp/0521631459/ref=rdr_ext_tmb.

zur Entdeckung des Laserprinzips führte) aufgrund des sog. Dualitätsprinzips gegeben werden. Sowohl die elektromagnetische Strahlung als auch die Elementarteilchen können unter Umständen punktmassenartige aber auch Welleneigenschaften zeigen. Das war der erste Schritt auf dem Weg zur Erweiterung unserer Konzepte über den Zustand der Materie (Kapitel 5) und über die in der klassischen Physik definierten messbaren Größen. In den Kapitel 6–8 wird die mathematische Konstruktion erläutert, mit welcher der Zustand eines Teilchens bzw. der Erwartungswert und die Streuung der messbaren physikalischen Eigenschaften sich vorhersagen lässt.⁸⁾ Im Kapitel 9 und 10 werden zwei Beispiele für die Benutzung dieses Verfahrens gezeigt, die z. B. in den *Leuchtdioden, Kaskadenlasern und Zener-Dioden* Anwendung fanden bzw. die *Kathodenemission in Entladungslampen, das Rastertunnelmikroskop, die Leckströme in integrierten Schaltkreisen und eventuell den elektrischen Durchbruch von Isolatoren erklären*. Letztendlich werden in den Kapitel 11 und 12 die Folgen der Quantenmechanik für die chemischen Eigenschaften der Atome und für Systeme mit wechselwirkenden Elektronen erläutert. *Diese dienen zur direkten Begründung der Halbleiterphysik, wo solche Elektronensysteme im Feld der Atomkerne des Kristalls betrachtet werden, leiten aber gleichzeitig die Grundlagen für die Quanteninformationstechnik ein.*



Noch einmal in Kürze

- Die klassische Physik kennt zwei Formen der Materie: die in Teilchen aufteilbare Körper und das elektromagnetische Feld in dem sich Wellen ausbreiten können. Die Teilchen werden idealisiert als Punktmassen (geometrische Punkte mit Masse), das elektromagnetische Feld als ideales Kontinuum betrachtet.
- Man nimmt an, dass die Bahn und Geschwindigkeit der Punktmasse prinzipiell genau bestimmt werden können. Die durch Messung definierten dynamischen Größen der Punktmasse (Impuls, Drehimpuls, Energie) sind mithilfe der Masse so eindeutig definiert.
- Das elektromagnetische Feld wird prinzipiell als unendlich betrachtet, und die in diesem Feld sich ausbreitende Wellen sind durch Kreisfrequenz und Wellenzahl charakterisiert. Die von letzteren bestimmten Phasengeschwindigkeiten und die Amplitude geben die Energie der Welle an.
- Die klassischen Konzepte der Punktmasse und der Welle erlauben quantitative Vorhersage über der Bewegung der Körper und der elektromagnetischen Wellen, versagen aber bei der Beschreibung der Wechselwirkung der beiden, wie z. B. bei der Umwandlung von Elektronenströmen in Lichtströ-

8) In der klassischen Mechanik wird der Punktmassenzustand als gegeben betrachtet, und die potenzielle Energie bestimmt durch Gl. (1.1) die Bahn. In der Quantenmechanik wird der Zustand durch eine Funktion ψ angegeben, die sich mithilfe der potenziellen Energie aus der Schrödinger-Gleichung, $\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi}{\partial t} = (T + V)\psi$ bestimmt werden kann (T ist die potenzielle Energie).

me. Die Hardware der Informationstechnologie, insbesondere der Nanotechnologie, benötigt neue Konzepte.

Formelsammlung

- Elektrische Stromstärke der Elektronen mit Ladung e , Konzentration (Raumdichte) n , Geschwindigkeit v , durch eine Fläche A : $I = envA$
- Geschwindigkeit erlangt durch Elektronen (mit Masse m) über eine Strecke l unter der Wirkung einer Spannung U , bei einer mittleren Stoßzeit τ : $v = e\tau(U/l)/m$
- Ohm'sches Gesetz: $I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \rho \frac{A}{l} \Rightarrow \frac{1}{\rho} \equiv \sigma \equiv \frac{e^2 n \tau}{m}$
- Newton'sche Bewegungsgleichung einer Punktmasse m im konservativen Kraftfeld mit potenzieller Energie V : $m\ddot{x}(t) = -\frac{dV(x,t)}{dx}$
- Wellengleichung in einem Medium mit Phasengeschwindigkeit v_f für die lokale Änderung der Größe ψ : $\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} = v_f^2 \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2}$

1.7

Wissen testen



Übungsaufgabe 1.1 Welche kinematischen und dynamischen Größen können eine Punktmasse charakterisieren?

Übungsaufgabe 1.2 Wie werden kanonisch konjugierte Koordinaten (q) und dynamische Größen (p) zueinander geordnet?

Übungsaufgabe 1.3 Was ist die Grundannahme in der Erklärung des Ohm'schen Gesetzes?

Übungsaufgabe 1.4 Zeigen Sie, dass eine harmonische Welle die Wellengleichung erfüllt!

Übungsaufgabe 1.5 Was ist die Dispersionsrelation des Lichtes im Vakuum, d. h. des elektromagnetischen Feldes? Sind Phasen- und Gruppengeschwindigkeit in diesem Fall gleich?

Übungsaufgabe 1.6 Was behauptet das Gleichverteilungsgesetz von Boltzmann (Äquipartition)?

