



Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

Atomphysik
Kernphysik
Teilchenphysik

Unterrichtshilfen

Der Karlsruher Physikkurs

*Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II
Unterrichtshilfen*

- Elektrodynamik
- Thermodynamik
- Schwingungen, Wellen, Daten
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik**

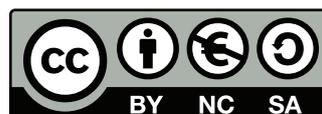
Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Auflage 2014

Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*

Abbildungen: *F. Herrmann*



Lizenziert unter Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

A

Allgemeine Bemerkungen

1. Realität, Theorie und Modell

Beim Umgang mit der Physik haben wir es mit drei Bereichen zu tun, Abb. 1:

A. Mit der realen Welt. In ihr spielen sich die Phänomene ab, die wir beschreiben wollen.

B. Mit einer Theorie. Sie besteht aus mathematischen Objekten und Beziehungen zwischen diesen Objekten. Die Theorie, einschließlich der Gegenstände aus denen sie besteht, d.h. Variablen, Operatoren und Rechenoperationen, sind Erfindungen des Menschen.

C. Mit einem Modell. Ein Modell ist auch ein System der realen Welt. Im Unterschied zu A ist uns dieses System vertraut. Die Begriffe, mit denen man es beschreibt, sind uns vertraut, und die Beziehungen zwischen den Teilen, aus denen es besteht, plausibel.

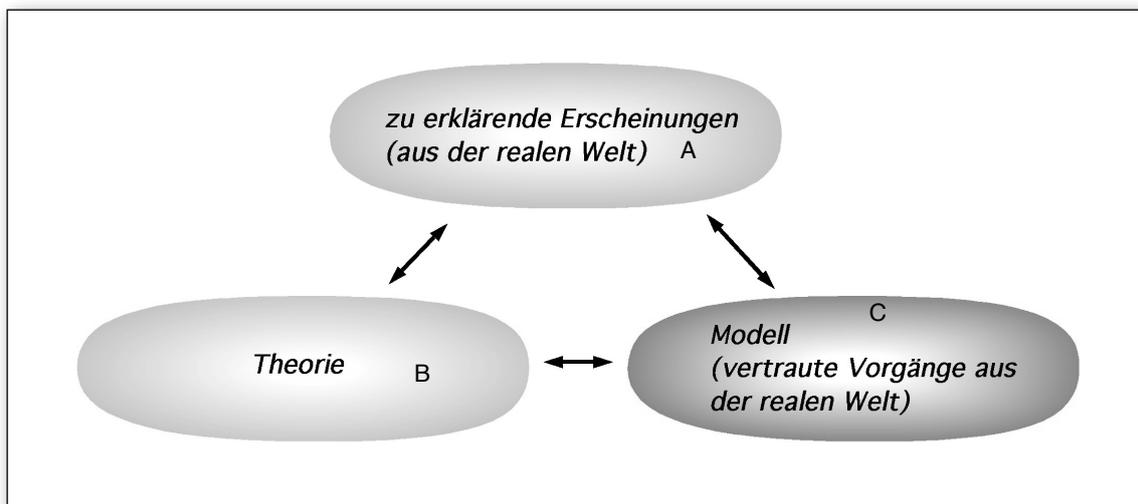


Abb. 1

Ein Phänomenbereich, den die Physik beschreibt, die zugehörige Theorie und ein dazu passendes Modell haben eine gemeinsame Struktur.

Alle drei Bereiche verbindet, dass sie eine gemeinsame Struktur haben. Elemente der Bereiche können aufeinander abgebildet werden und stehen innerhalb der Bereiche in derselben Beziehung zueinander. Es besteht also eine Homomorphie zwischen A, B und C.

Diese Gemeinsamkeit bezieht sich aber nur auf einige wenige Aspekte der betrachteten Systeme.

Eine Theorie beschreibt immer nur einen kleinen Ausschnitt des betrachteten Systems und ein Modell stimmt in den meisten Eigenschaften nicht mit dem Original überein. Wenn die Theorie den

betrachteten Phänomenbereich mit großer Genauigkeit abbildet, so ist sie eine gute Theorie. Wenn es viel Übereinstimmung zwischen dem Phänomenbereich und dem verwendeten Modell gibt, so ist das Modell ein gutes Modell. Es gibt keine richtigen und falschen Theorien, sondern nur mehr oder weniger gute, und es gibt keine richtigen und falschen Modelle, sondern nur mehr oder weniger zweckmäßige.

Die Sprache, der wir uns bedienen, wenn wir Physik lehren, gehört manchmal zum Bereich A, manchmal zu B und manchmal zu C. Was wir als „verstanden“ empfinden, beruht auf der Sprache, die sich auf C, also den Modellbereich, bezieht. Wir haben etwas, was zunächst abstrakt erscheint, verstanden, wenn wir sagen können: „Es ist so wie ...“ und es folgt die Beschreibung des Verhaltens unseres Modells. Jedes Verständnis geht auf ein „Es-ist-so-wie“ zurück.

2. Die Schwierigkeiten bei der Lehre der Quantenphysik

Mit Quantenphysik meinen wir im Folgenden die Quantentheorie und die Beschreibung der realen Welt mit Hilfe dieser Theorie. Die Schwierigkeiten, denen wir bei der Lehre begegnen, sind von zweierlei Art: Die einen sind mathematischer Art und haben mit dem Bereich B zu tun. Die anderen sind begrifflicher Art und gehören zu C.

Die mathematischen Schwierigkeiten

Zunächst ist festzustellen, dass es hier kein Problem gibt, das die Quantenphysik auszeichnet. Wir haben eine gut funktionierende Theorie, und diese ist nicht schwieriger als etwa die Maxwelltheorie, die Hamiltonmechanik oder die statistische Thermodynamik.

Ein Problem tritt nur deshalb auf, weil uns die entsprechende Mathematik in der Schule nicht zur Verfügung steht – genau so wie etwa bei der Maxwelltheorie, also der Elektrodynamik. Im Fall der Elektrodynamik fehlt uns die Vektoranalysis, im Fall der Quantenphysik fehlen uns die komplexen Zahlen und die partiellen Differenzialgleichungen. Wie auch bei der Elektrodynamik muss eine didaktische Reduktion vorgenommen werden. Eine Möglichkeit, die komplexen Zahlen zu umgehen, besteht darin, dass man den Zeigerformalismus anwendet. Wir gehen diesen Weg nicht, denn wir meinen, ~~der Zeiger-Kalkül ist von der gleichen Schwierigkeit wie die~~

komplexen Zahlen selbst.

Die begrifflichen Schwierigkeiten

Jeder kennt die begrifflichen Schwierigkeiten aus eigener Erfahrung. Man sagt oft, sie verschwänden, indem man sich daran gewöhnt. Nun kann man aber feststellen, dass auch ältere Physiker, die doch genügend Zeit hatten, sich daran zu gewöhnen, noch leidenschaftlich darüber diskutieren. Es sieht also eher aus, als hätten wir es mit Problemen zu tun, die es in der klassischen Physik nicht gibt. Hier einige der Aussagen, die uns das Gefühl geben, wir hätten die Sache nicht richtig verstanden:

- Ein Elektron ist gleichzeitig Teilchen und Welle.
- Zwei Teilchen sind prinzipiell nicht unterscheidbar.
- Ein Elektron bewegt sich um den Kern, beschreibt dabei aber keine Bahn.
- Teilchen fliegen durch einen einzigen von zwei Spalten, erzeugen aber trotzdem ein Doppelspaltinterferenzmuster.
- Der Drehimpuls von Teilchen A sei grundsätzlich unbestimmt. Wenn man aber den Drehimpuls eines 100 km entfernten Teilchens B misst, ist auch der von A bestimmt.

Die mit diesen Sätzen verbundenen Verständnisschwierigkeiten haben ausschließlich mit der Wahl des Modells zu tun, also mit unserem Bereich C.

3. Der Status Quo

Atom- und Quantenphysik als Geschichte

Es fällt auf, dass sowohl in Schul- als auch in Hochschulbüchern die Entstehungsgeschichte der Quantenphysik in vielen Details geschildert wird. Es werden zahlreiche Beiträge einzelner Forscher aufgeführt, und es werden deren Experimente geschildert, so als sei das der einzige Weg zum Verständnis. Dieser Weg war mühsam und reich an Umwegen. Ein großer Teil dieser Mühe wird nun auch den Lernenden abverlangt, und die Umwege werden nachgegangen. Dabei verliert man nur allzu leicht eine Frage aus dem Auge: Was wissen die Studierenden, oder die Schülerinnen und Schüler noch nach einem Jahr oder nach fünf Jahren? Dabei kennt doch jeder die Antwort auf die Frage: Sie erinnern sich an das Bohr'sche Atommodell, d.h. ein Modell, das nur als Etappe auf dem

Weg zum eigentlichen Lernziel gedacht war. Das Motto „Der Weg ist das Ziel“ passt hier gewiss nicht.

Also: Man verschwendet Zeit, die man so dringend für Wichtigeres brauchte.

Und wie sieht das Ergebnis eines solchen Unterrichts aus? Welche Vorstellung von Elektron, Photon und Atom haben die Schülerinnen und Schüler am Ende?

Die Vorstellung vom Elektron, vom Photon und vom Atom

Das Elektron

Man stellt es sich vor als Körper, mit folgenden Eigenschaften: Er ist klein, vielleicht punktförmig, er ist ein Individuum, d.h., man kann ihn in Raum und Zeit verfolgen. Dass man ein Elektron als Individuum begreift, erkennt man an jeder Aussage, die von der Bewegung eines Elektrons spricht. Erst ist es hier, dann wird es emittiert, dann fliegt es von der Kathode zur Anode, dabei wird es abgelenkt etc. Dabei bleibt es immer dasselbe.

Auch wenn man sagt, dass das Elektron bestimmte dieser Eigenschaften doch nicht hat, so unterstützt man doch immer wieder die Erwartung, dass es eigentlich so sei. Man wählt ein unpassendes Modell, sagt dann, dass es nicht passt, rückt aber trotzdem nicht davon ab. Das Bild bleibt in den Köpfen der Lernenden.

Das Photon

Auch das Photon stellt man sich als kleinen Körper vor, der auf wohldefinierten Bahnen herumfliegt. Dass sich ein Photon auf einer Bahn bewegt, bringt man etwa zum Ausdruck, wenn man sagt, Photonen gehen oder fliegen von der Sonne zur Erde.

Es ist interessant, dass sich kaum jemand dazu bringen lässt zu sagen, wie groß er sich das Photon vorstellt. Trotzdem kann man leicht feststellen, welche Vorstellung über seine Größe herrscht, denn in vielen Sätzen, die über Photonen ausgesprochen werden, wird klar eine obere Grenze dieser Größe unterstellt. Wenn man etwa sagt, ein Photon werde von einem Körper emittiert und dann von einem anderen absorbiert, so unterstellt man, das Photon sei kürzer als der Abstand zwischen emittierendem und absorbierendem Körper. Wenn man sagt, das Photon gehe durch eine Blendenöffnung hindurch, so unterstellt man, dass es in seiner Querausdehnung kleiner als die Öffnung ist. Man könnte sich natürlich auch vorstellen, dass es vorher und nachher breiter ist, und sich

zusammenzieht, um durch die Öffnung hindurch zu kommen. Diese Auffassung scheint aber nicht zu herrschen. Auch wenn man diese Vorstellungen nicht offen formuliert – mit der Sprache, die man auf die Photonen anwendet, werden solche Bilder hervorgerufen und gefestigt.

Das Atom

Es ist im Wesentlichen leer. Die Hülle ist sowieso leer, denn das Elektron ist punktförmig. Den Kern hielt man zunächst noch für nicht leer. Seitdem man die Quarks kennt, die man sich ja auch punktförmig vorstellt, ist aber auch der Kern leer. Die ganze Welt ist also leer. Diese Leere wird dadurch etwas relativiert, dass das Elektron, das sich, wie man sagt, um den Kern herum bewegt, keine bestimmte Bahn hat und sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit überall ein bisschen aufhält.

„Für kleine Quantenzahlen muss jedoch offenbar der Bahnbegriff sowohl im Phasenraum, wie im richtigen Raum seinen Sinn verlieren“, sagt Heisenberg [1]. Wie kann aber der Bahnbegriff seinen Sinn verlieren, ohne dass der Begriff des punktförmigen individuellen Körperchens seinen Sinn verliert?

Man spricht über die Erscheinungen so, dass die Logik, die unserer Sprache innewohnt, keine Kontrolle mehr erlaubt.

Dass das Modell nicht passt, versucht man mit mehreren anderen Wörtern und Formulierungen abzumildern. Das Teilchen wird zum *Quantenobjekt*, der Weg oder die Bahn zum *Pfad*. Diese und andere Bezeichnungen drücken eigentlich nur unsere Hilflosigkeit aus, ebenso die „Komplementarität“, der „Dualismus“ und die „Quantenmöglichkeit“.

Ein Satz wie: „Das Teilchen bewegt sich um den Kern, hat aber keine Bahn“ hat einfach keinen Sinn, wenn man mit der Sprache so umgeht, wie man mit ihr umgehen muss, wenn man sich überhaupt verständigen will.

Wir wollen also schließen, dass die Vorstellung vom Elektron und Photon als punktförmige Individuen kein gutes Modell ist, und vor allem, dass sie zu „es-ist-so-wie“-Schlüssen verleitet in Fällen, wo „es-ist-so-wie“ nicht gilt.

Zwei Auswege kommen in Frage:

1. Man wählt ein besseres Modell.
2. Man verzichtet ganz und gar auf ein Modell.

Wir wollen im Folgenden beide Möglichkeiten ansprechen.

4. Ein alternatives Modell

Wir schlagen für den Unterricht ein Modell vor, bei dem man sich das Elektron als eine im Raum verteilte Portion eines negativ geladenen Stoffes vorstellt. Dieses Modell ist so alt wie die Quantenmechanik selbst. Es stammt von Schrödinger und wurde von Madelung weiter ausgearbeitet [2]. Obwohl es mehrere Erscheinungen sehr befriedigend wiedergibt, wurde es in allgemeinen Lehrbüchern der Atomphysik in der Folge nur noch gelegentlich erwähnt, etwa in Döring [3]: „Die [...] Bohrschen Postulate ergeben sich ohne Schwierigkeiten aus bekannten physikalischen Gesetzen, wenn man nicht das Partikelmodell, sondern das Wellenmodell für die Elektronen zugrundelegt, wenn man also annimmt, daß die Elektronenmaterie kontinuierlich verteilt ist mit einer Dichte proportional zum Absolutquadrat $|\psi|^2$ einer komplexen Wellenfunktion ...“. Darüber hinaus hat das Modell nur in der speziellen Literatur zur Quantenhydrodynamik und zur Dichtefunktionaltheorie überlebt.

Wir betrachten die Schrödinger-Gleichung für ein Eielektronensystem:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\mathbf{r}) \right) \psi(\mathbf{r}, t)$$

Die Lösungen nennt man Wellenfunktionen. Wir definieren mit Hilfe der Wellenfunktion $\psi(\mathbf{r}, t)$, d.h. einer Lösung der Schrödinger-Gleichung, zwei Ausdrücke. Erstens:

$$\rho := \psi^* \psi \tag{1}$$

und zweitens:

$$\mathbf{j} := \frac{\hbar}{2mi} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) \tag{2}$$

Die Kenntnis der beiden Funktionen $\rho(\mathbf{r}, t)$ und $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ ist bei Eielektronensystemen zur Kenntnis der Wellenfunktion äquivalent. Jede Aussage, die aus der Wellenfunktion folgt, folgt auch aus $\rho(\mathbf{r}, t)$ und $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$.

Unter Verwendung der Schrödinger-Gleichung und der Ausdrücke (1) und (2) erhält man:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0. \tag{3}$$

Diese Gleichung hat die Form einer Kontinuitätsgleichung. Multipliziert man die Größen ρ und j mit der Elektronenladung e :

$$\rho_e = e \cdot \rho$$

$$j_e = e \cdot j,$$

so kann man Gleichung (3) auch schreiben:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \operatorname{div} j_e = 0 \quad (4)$$

Wenn man ρ und j mit der Elektronenmasse m multipliziert, also:

$$\rho_m = m \cdot \rho$$

$$j_m = m \cdot j,$$

so erhält man aus (3):

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div} j_m = 0 \quad (5)$$

Man kann nun Gleichung (4) als Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung und Gleichung (5) als Kontinuitätsgleichung der Masse lesen. Die Gleichungen (4) und (5) bringen die Erhaltung der elektrischen Ladung bzw. der Masse zum Ausdruck.

Diese Interpretation bedeutet, dass man sich vorstellt, die Hülle des Atoms bestehe aus einem kontinuierlich in der Umgebung des Kerns verteilten Stoff, der im Allgemeinen auch strömt. Döring [3] bezeichnet diesen gedachten Stoff als „Elektronenmaterie“. Wir wollen ihn im Schülertext etwas kürzer „Elektronium“ nennen.

Das Elektron besteht in diesem Modell aus Elektronium, so wie ein See aus Wasser oder eine Münze aus Metall.

Wir wollen untersuchen, wie sich Dichte und Stromdichte für verschiedene Lösungstypen der Schrödinger-Gleichung verhalten. Die Schrödinger-Gleichung hat spezielle Lösungen der Gestalt:

$$\psi_k(\mathbf{r}, t) = u_k(\mathbf{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t} \quad (6)$$

Die zugehörigen Zustände nennt man Eigenzustände. Die Lösungen und die entsprechenden Zustände sind durchnummeriert mit dem Index k . Zu jeder solchen Lösung gehört ein bestimmter Wert E_k der Energie, der Energie-Eigenwert. Man beachte, dass in (6) die Orts- und die Zeitabhängigkeit voneinander getrennt sind. Die

Ortsabhängigkeit steckt nur im ersten Faktor $u_k(\mathbf{r})$, die Zeitabhängigkeit nur in der Exponentialfunktion.

Nun ist auch jede Linearkombination dieser Eigenzustandslösungen eine Lösung der Schrödinger-Gleichung:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \sum_k a_k u_k(\mathbf{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t}.$$

Einen Zustand, der durch eine solche Summe beschrieben wird, nennt man Überlagerungszustand. Die Überlagerungszustände unterscheiden sich in einer wichtigen Eigenschaft von den Eigenzuständen: Für die Eigenzustände sind Dichte und Stromdichte zeit-unabhängig, für die Überlagerungszustände nicht. Wir wollen das zeigen.

Für einen Eigenzustand ergibt sich für die Dichte des Elektroniums:

$$\rho_k(\mathbf{r}, t) = u_k^*(\mathbf{r}) e^{+\frac{i}{\hbar} E_k t} \cdot u_k(\mathbf{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t} = u_k^*(\mathbf{r}) \cdot u_k(\mathbf{r})$$

Das Produkt der beiden Exponentialfunktionen ist gleich eins, die Zeitabhängigkeit verschwindet also, oder in anderen Worten: Die Dichte ist zeitlich konstant. Die Berechnung der Stromdichte ergibt ein entsprechendes Ergebnis. Auch sie ist zeitlich konstant (aber nicht unbedingt null). Man nennt daher die Eigenzustände auch stationäre Zustände.

Wir betrachten nun einen Überlagerungszustand. Wir nehmen dazu den einfachsten Fall, den man sich denken kann: die Überlagerung von nur zwei Eigenzuständen. Die Summe besteht also aus zwei Summanden:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = c_A \psi_A(\mathbf{r}, t) + c_B \psi_B(\mathbf{r}, t)$$

mit

$$\psi_A(\mathbf{r}, t) = u_A(\mathbf{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_A t} \quad \text{und} \quad \psi_B(\mathbf{r}, t) = u_B(\mathbf{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_B t}.$$

Da die Berechnung von ρ etwas umständlich ist, führen wir sie hier nicht aus, sondern geben nur das Ergebnis an. Es ist ein Ausdruck der Form

$$\rho(\mathbf{r}, t) = C_0(\mathbf{r}) + C_1(\mathbf{r}) \cos(\omega t) + C_2(\mathbf{r}) \sin(\omega t).$$

Man sieht, dass die Dichte zeitabhängig ist. Dabei ist

$$\omega = (E_A - E_B) / \hbar.$$

Man sieht außerdem: Die Dichte setzt sich zusammen aus einem

nur ortsabhängigen Term und einem Rest, der harmonisch schwingt. Auch hier gilt das Entsprechende für die Stromdichte. Diese Zustände sind also nicht-stationär.

Gegenüber dem Punkt-Teilchen-Modell hat das Stoffmodell die folgenden Vorteile:

1. Die Elektroniumverteilung entspricht der Ladungsverteilung in Atomen und Festkörpern, die man mit Streuexperimenten ermittelt. Das Stoffmodell macht daher Aussagen über etwas, was man die Gestalt von Atomen und Molekülen nennen könnte.
2. Das Stoffmodell gibt richtig wieder, dass ein Elektron in einem stationären Zustand nicht strahlt.
3. Das Stoffmodell gibt den Bahndrehimpuls und das magnetische Bahnmoment richtig wieder.
4. Das Stoffmodell sagt voraus, welche Übergänge schnell, welche langsam und welche gar nicht ablaufen (welche Übergänge erlaubt und welche verboten sind).
5. Das Stoffmodell sagt voraus, wie die Strahlung, die ein Atom oder Molekül oder eine Gitterfehlerstelle emittiert, polarisiert ist.

5. Physik ohne Modell – die neue Einsicht

Die Erscheinungen, die uns die meisten Sorgen machen, sind die, für die man kein Modell finden kann. Die Teilchen haben Eigenschaften, die sich zwar mathematisch modellieren lassen, für die wir aber kein „Es-ist-so-wie ...“ in unserer Erfahrungswelt finden. Das hat zu tun mit der Tatsache, dass physikalische Größen nicht mehr einfach durch Variablen dargestellt werden, sondern durch Operatoren oder Matrizen. Und es hat damit zu tun, dass eine Vielteilchenwellenfunktion eine Funktion in einem hochdimensionalen Raum ist, dem Konfigurationsraum. So ist die Wellenfunktion des Elektronensystems des Natriums (Ordnungszahl 11) eine Funktion in einem 33-dimensionalen „Ortsraum“. Wie können wir mit solchen Problemen im Physikunterricht der Schule umgehen?

Oft begegnet man diesen Fragen mit einem gewissen Fatalismus: Weil wir alle unsere Erfahrungen in der makroskopischen Lebenswelt machen, können wir die Phänomene der Quantenphysik grundsätzlich nicht verstehen. Es gibt also eine Grenze für unser Verständnis. Dabei entsteht nur allzu leicht der Eindruck, wir wären mit unserer Weisheit am Ende.

Wir schlagen vor, diesen Schwierigkeiten eine positive Seite abzugewinnen. Wir betrachten noch einmal Abb. 1. Die Menschen machen die Theorie, und die Menschen wählen ein Modell. Die wichtigere dieser beiden Tätigkeiten ist das Ersinnen der Theorie [4]. Modelle sind hilfreich beim Erfinden von neuen Theorien und sie erleichtern den Umgang mit der Physik. Aber im Grunde kommt man auch ohne sie aus, vor allem wenn es darum geht, die Physik anzuwenden. Die Einsicht, dass man manchmal auch ohne Modell auskommen muss, ist etwas wie das Ende eines schönen Traums, oder aber auch wie ein Erwachsenwerden. Die behagliche Physik der einfachen Modelle ist zu Ende. Diese Botschaft versuchen wir den Schülerinnen und Schülern vorsichtig zu vermitteln.

6. Physik und Aufklärung

Es gibt Themen, die Lehrende und Lernende besonders faszinieren und motivieren. Es sind Themen, die an unseren metaphysischen Grundüberzeugungen rütteln: an unserer Vorstellung von Raum und Zeit oder von Ursache und Wirkung. Anscheinend ist die Quantenphysik besonders reich an solchen Themen. Die Tatsache, dass man Ort und Impuls eines Teilchens, das man sich punktförmig vorstellt, nicht gleichzeitig angeben kann; die Verschränkung von zwei voneinander weit entfernten Teilchen; die so genannte Teleportation. Diese Erscheinungen lehren uns, dass etwas, das man für unmöglich oder für sehr unwahrscheinlich gehalten hatte, doch möglich ist. Wir versuchen nun, diese Effekte etwas zu entzaubern. Wir versuchen, die Quantenphysik so darzustellen, dass nicht der Eindruck entsteht, es geschähen Wunder. Denn nur allzu leicht wird sie sonst in die Nähe von wirklichen Wundern, d.h. sinnlosen Behauptungen, gerückt. Die Faszination, die von solchen Erscheinungen ausgeht, versuchen wir zu entlarven als eine nur allzu menschliche Neigung, das Unglaubliche oder Unwahrscheinliche wahrhaben zu wollen; eine Faszination, der viele Menschen auch dann erliegen, wenn das Wunder nicht mehr durch die Wissenschaft gestützt wird.

So stellen wir nicht diejenigen Erscheinungen in den Vordergrund, bei denen etwas möglichst Unglaubliches passiert. Verschränkung von Teilchen hat man schon im einzelnen Atom, und niemand hat damit ein Problem. Erst wenn man ein System in extreme Zustände bringt, die oft nur im Gedankenexperiment zu realisieren sind, erscheint uns die Erscheinung faszinierend, d.h. ungewohnt. Man könnte genau so gut die Thermodynamik oder die klassische

Elektrodynamik so darstellen, dass wunderbare Dinge passieren. Gibbs'sches Paradoxon, Maxwell'scher Dämon und Energieströme in statischen elektromagnetischen Feldern sind Beispiele. Man tut es nicht, und man braucht es auch in der Quantenphysik nicht zu tun. Die Physik ist auch so interessant genug.

[1] HEISENBERG, W.: Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, Bibliographisches Institut Mannheim 1958, S. 27.

[2] MADELUNG, E.: Quantentheorie in hydrodynamischer Form, Zeitschr. f. Physik 40, 322-326 (1926).

[3] DÖRING, W.: Atomphysik und Quantenmechanik, II. Die allgemeinen Gesetze, Walter de Gruyter, Berlin 1976, S. 20.

[4] FALK, G.: Physik – Zahl und Realität, Birkhäuser Verlag, Basel 1990, S. x: „Ein mathematisch-naturwissenschaftliches Bild der Welt, das logische Verbindlichkeit besitzt, kann es gar nicht geben ... Logisch verbindlich ist allein ein abstraktes Gefüge von Relationen zwischen Begriffen, die freie Erfindungen des menschlichen Geistes sind, und nicht, wie man einst glaubte, Bilder von Realitäten, die es auch ohne den menschlichen Geist gibt – so wie Lebewesen, Steine, Erde, Mond, Sonne Realitäten sind, die es ohne den menschlichen Geist gibt. Unsere Erfahrung mit der Realität schlägt sich naturwissenschaftlich-quantitativ allein in Beziehungen nieder, die zwischen erfundenen Begriffen bestehen – oder vielmehr von uns so festgelegt werden, dass sie die realen Erfahrungen wiedergeben –, nicht aber in Bildern, die wir uns von diesen Begriffen machen.“

B

**Bemerkungen zu den einzelnen
Abschnitten**

1. Modelle in der Physik

Die Quantenphysik eignet sich dazu, ein Thema im Unterricht anzusprechen, das man – vielleicht etwas zu anspruchsvoll – Erkenntnistheorie nennen könnte. Eigentlich hat man es in jedem naturwissenschaftlichen Unterricht von Anfang an mit Fragen der Erkenntnistheorie zu tun. Einen Überblick über die Möglichkeiten hierzu gibt Leisen [1].

Es ist allerdings nicht leicht, sich einen Gegenstand anzueignen und gleichzeitig darüber nachzudenken, wie man ihn sich aneignet. Nun kommt aber in der Physik der Zeitpunkt, wo es ohne Nachdenken über den Prozess des Erkennens nicht mehr geht, nämlich wenn wir es mit der Quantenphysik zu tun bekommen. Wenn man es nicht tut, bekommen die Schülerinnen und Schüler den Eindruck, die Natur stecke voller Widersprüche.

2. Photonen und Elektronen

Der Welle-Teilchen-Dualismus

Das Problem, dass bei der traditionellen Interpretation der Quantenmechanik ein „Mikroobjekt“ manchmal als Welle und manchmal als Teilchen in Erscheinung tritt, stellt sich bei uns nicht. Zur Erläuterung betrachten wir das Elektron, da es das den Physikern vertrauteste Teilchen ist. Das Gesagte gilt aber ebenso für Photonen und andere Teilchen.

Nach der Quantenmechanik äußert sich der Wellencharakter eines Elektrons am deutlichsten, wenn es sich in einem Zustand mit scharfem Impuls (und das heißt auch mit scharfer Wellenzahl) befindet. Der Ort ist dann extrem unscharf. Der Teilchencharakter äußert sich am deutlichsten, wenn das System in einem Zustand scharfen Orts und mit ganz unscharfem Impuls vorliegt.

Teilchen und Welle sind aber zwei Modellbegriffe.

Das perfekte Teilchen stellt man sich punktförmig vor. Es hat einen Ort, der durch einen einzigen Punkt im Raum festgelegt wird. (Das ist anders als bei makroskopischen Körpern. Deren Ort kann nicht durch einen Punkt festgelegt werden, da sie einen ganzen Raumbereich einnehmen.)

Die perfekte Welle dagegen stellt man sich sinusförmig und unendlich ausgedehnt vor. Damit ist ihr Impuls durch einen einzigen k -Vektor, d.h. einen einzigen Punkt im Impulsraum, festgelegt.

In einem beliebigen Zustand des Elektrons passt nun weder das eine noch das andere Modell. Und wenn mit dem Elektron auch noch ein Prozess abläuft, bei dem es seinen Zustand ändert, sodass es etwa von einem Zustand scharfen Impulses in einen Zustand scharfen Orts übergeht, so entsteht natürlich ein Problem, wenn man versucht, eines der Extremmodelle Teilchen (Punkt im Ortsraum) oder Welle (Punkt im Impulsraum) anzuwenden. Man kleidet den Konflikt in die etwas verschleiernenden Worte „Welle-Teilchen-Dualismus“ oder „Komplementarität“.

Solche Bezeichnungen suggerieren ein etwas mystisch anmutendes Prinzip. Schaut man aber die zugehörige Mathematik an, so sieht die Sache etwas einfacher aus. Die Unschärfe-Beziehung sagt, dass die Ausdehnung eines Teilchens im Ortsraum multipliziert mit der im Impulsraum eine bestimmte Mindestgröße hat. Man kann nur die eine auf Kosten der anderen verändern, nicht aber ihr Produkt. Ein Vergleich: Wir betrachten eine Wasserportion, die durch ein

Rohr strömt. Wenn das Rohr enger wird, wird die Wasserportion dünner und länger. Durchmesser und Länge der Wasserportion stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Hier würde man gewiss nicht sagen, Durchmesser und Länge befolgen ein Komplementaritätsprinzip, denn die Erscheinung hat nichts Überraschendes an sich. Dass man beim Elektron das Bedürfnis nach einer solchen Beschreibung hat, liegt nur daran, dass mit einem unpassenden Modell die Erwartung geweckt wird, ein Elektron, das einmal klein war, müsse auch klein bleiben, oder ein Elektron, das einmal einen scharfen Impuls hatte, müsse ihn auch immer haben. Bei der Wasserportion haben wir die entsprechende Erwartung nicht.

Das Problem verschwindet, wenn man von vornherein gar nicht erst die Modelle „punktförmiges Teilchen“ und „unendlich ausgedehnte Sinuswelle“ verwendet, sondern für das Teilchen eine variable Größe annimmt, nämlich den Raumbereich, der von der Zustandsfunktion eingenommen wird.

Wir benutzen das Wort „Teilchen“, egal, in was für einem Zustand sich das Elektron oder Photon befindet.

Licht als Stoff

Im Zusammenhang mit dem Licht und seinen Elementarportionen, den Photonen, wird manchmal gesagt, Licht sei eine Energieform und Photonen seien Energiequanten. Wenn man das sagt, verwechselt man eine physikalische Größe, nämlich die Energie, mit einem physikalischen System, nämlich dem elektromagnetischen Feld. Ein physikalisches System wird stets beschrieben durch einen Satz physikalischer Größen und den Beziehungen zwischen ihnen. Die Aussage, derzufolge Licht oder elektromagnetische Strahlung reine Energie ist, ist genauso unpassend wie etwa die Aussage, ein ideales Gas sei reine Energie oder Elektronen seien reine Energie. Genauso wie ein ideales Gas oder irgendein anderes System hat auch Licht außer Energie noch Impuls, Drehimpuls, Entropie und Stoffmenge, und es hat einen Druck, eine Temperatur und ein chemisches Potenzial.

Es ist wichtig, im Unterricht klarzumachen, dass Licht etwas ist, das viel Ähnlichkeit mit einem Stoff hat, ja man kann sagen, dass es ein Stoff ist. Genauso, wie die Elementarportionen des Stoffs Helium die Heliumatome sind oder die des Wassers die Wassermoleküle, so sind die Elementarportionen des „Lichtstoffs“ die Photonen. Um das

deutlich zu machen, führen wir die Photonen über photochemische Reaktionen ein. Hier soll klar werden, dass Licht als genauso ernstzunehmender Reaktionspartner auftritt wie andere, materielle Stoffe.

Dass beim Einrichten einer Reaktionsgleichung das Licht, das wir mit dem Symbol γ beschreiben, nicht auf beiden Seiten der Gleichung auftritt, so wie es die chemischen Elemente tun, darf uns nicht stören. Die Ursache hierfür ist, dass bei den Reaktionen Licht erzeugt oder vernichtet wird. Bei Kernreaktionen werden sich die Schülerinnen und Schüler ohnehin daran gewöhnen müssen, dass auf der rechten und linken Seite einer Reaktionsgleichung nicht mehr dieselben Atomzahlen stehen.

Um das Entstehen der Vorstellung zu vermeiden, Photonen seien Energiequanten, ist es wichtig, dass man in einer Reaktionsgleichung das Licht nicht durch das Symbol $h\nu$ darstellt, denn $h\nu$ ist nicht ein Stoffname, sondern ein Energiewert.

Die Größe der Photonen

Was versteht man unter der Größe eines Objekts? Die Antwort scheint einfach zu sein: den Abstand zwischen Anfang und Ende. Die Frage lässt sich noch etwas verallgemeinern: Was versteht man unter der Form eines Objekts? Die Antwort auf diese Frage lautet: die Form seiner Oberfläche. Wenn wir im Folgenden von der Größe eines Objekts sprechen, meinen wir es immer in diesem Sinn.

Welche Form hat nun ein Photon? Um die Frage zu beantworten, müssen wir wissen, wo Anfang und Ende des Photons sind bzw. wo seine Oberfläche ist. Man wird nun sagen, Anfang und Ende eines Photons lassen sich nicht angeben, und schon gar nicht eine Oberfläche. Also hat ein Photon keine Größe. Der Begriff Größe im Sinn von Ausdehnung stammt aus der Erfahrung unserer makroskopischen Welt. Er lässt sich in der Mikrophysik und besonders in der Quantenphysik nicht anwenden. Die Frage nach der Größe von Photonen ist demnach so sinnlos wie etwa die nach der Farbe eines Atomkerns.

Wenn wir uns dieser Auffassung anschließen, müssen wir allerdings auch auf eine ganze Reihe anderer Aussagen verzichten. Immer wenn man über Photonen spricht, benutzt man ein Modell. So sagt man zum Beispiel, das Photon werde von einer Lichtquelle emittiert und später von irgendeinem anderen Körper absorbiert. Das Modell, von dem hier Gebrauch gemacht wird, ist das Modell von den sich

durch den Raum bewegenden kleinen Körperchen. Wir möchten nicht dafür plädieren, auf dieses Modell zu verzichten. Wenn man es aber benutzt, so muss man dem Photon eine bestimmte Größe zugestehen.

Die Aussage, ein Photon bewege sich von einer Lichtquelle zu einem Absorber, hat nämlich nur dann einen Sinn, wenn das Photon kleiner ist als der Abstand zwischen Quelle und Absorber. Haben Quelle und Absorber einen Abstand von 10 cm, so folgt, dass das Photon kürzer als 10 cm ist. Quelle und Absorber können sich aber auch in einem Abstand von 1 mm oder 1 μm befinden. Also unterstellt man, ohne es explizit auszusprechen, dass das Photon kürzer als 1 μm ist.

In manchen Lehrbüchern kann man lesen, Elementarteilchen seien punktförmig. Diese Aussage ist sicher recht ungeschickt. Auch wenn man in einer Messung nachweisen sollte, dass der Durchmesser eines Elektrons kleiner als 10^{-30} m ist – ein Gebilde mit einem Durchmesser von 10^{-30} m ist noch längst kein Punkt. Der Punkt ist ein metaphysischer Begriff, er ist ein Produkt unseres Geistes. Dass ein Teilchen punktförmig ist, lässt sich weder verifizieren noch falsifizieren.

Hier unsere Schlussfolgerung: Auch wenn man es nicht zugibt – man kolportiert die Idee, dass die Photonen sehr klein sind. Auf jeden Fall spricht man so, dass die Schülerinnen und Schüler es glauben müssen. Denn wenn man das Modell vom fliegenden Individuum benutzt, so ist die Frage nach Form und Größe legitim. Und wenn wir sie nicht beantworten, so beantworten sie die Schülerinnen und Schüler selbst. Wir geben also die Kontrolle über den Lernprozess aus der Hand, und zwar an einer wichtigen Stelle. Wenn wir die Photonen herumfliegen lassen, müssen wir auch sagen, welche Form und Größe sie haben.

Welche Größe haben sie denn aber? Oder besser: Gestattet es das Modell, dem Photon eine Größe zuzuordnen?

Diese Frage ist für den Physiker gar nicht schwer zu beantworten. Auch wenn wir in Verlegenheit kommen, wenn wir Anfang und Ende oder die Oberfläche des Photons im Sinne makroskopischer Erfahrung angeben sollen, so können wir doch eine andere Antwort geben, die der Frage durchaus gerecht wird. Welche für das Photon charakteristische Größe mit der Dimension einer Länge liefert uns die Theorie des Photons? Sie liefert gleich zwei Kandidaten: die Wellenlänge und die Kohärenzlänge.

Die Wellenlänge können wir aber von vornherein ausschließen. Unserem Modell entsprechend ist das Photon ein in den drei Raumdimensionen ausgedehntes Gebilde. Die Wellenlänge ist aber eine eindimensionale Größe.

Die Kohärenzlänge dagegen ist ein geeignetes Maß für die Größe des Photons, oder genauer: der dreidimensionale Kohärenzbereich. Dieser hat eine eindeutige, messbare Form. Wir interpretieren also den Kohärenzbereich eines Teilchens als den Raumbereich, den das Teilchen einnimmt. Die Form des Kohärenzbereichs ist die Form des Teilchens. Wir wenden diese Festlegung später auch auf Elektronen an.

Diese Interpretation der Teilchengröße ist unter Experten durchaus üblich – wenngleich man sie auch selten so explizit ausgedrückt findet, wie wir es tun, siehe etwa [2].

Eine andere Art, dasselbe auszudrücken, ist: Die Form oder Gestalt eines Teilchens, eines Photons oder Elektrons ist gegeben durch die Unschärfebeziehung. Der Bereich der Ortsunschärfe wird interpretiert als der Raumbereich, den das Teilchen einnimmt.

Eine Konsequenz dieser Festlegung ist, dass die Größe eines Photons (oder Elektrons) vom Zustand abhängt, in dem es sich befindet.

Hier einige Beispiele für die Form von Photonen in unserem Sinn. Die Photonen von Sonnenlicht auf der Erde und bei nicht bewölktem Himmel haben eine Länge von etwa $1\ \mu\text{m}$ und eine Ausdehnung quer zur Bewegungsrichtung von etwa $40\ \mu\text{m}$. Die Photonen von Licht, das aus einem Laser kommt, sind dagegen lang und dünn: so breit wie der Laserstrahl, also etwa $1\ \text{mm}$, und so lang wie die Kohärenzlänge, also z.B. $10\ \text{cm}$. Die Photonen der elektromagnetischen Wellen, die ein Radiosender emittiert, sind noch viel größer: Sie überdecken das ganze Sendegebiet.

Die Messung der Planck-Konstante

Die Planck-Konstante betrachtet man gern als eine Konstante, die für den prinzipiellen Unterschied zwischen klassischer Physik und Quantenphysik verantwortlich ist. Nun hat ihre Entdeckung zwar zur Entwicklung der Quantenphysik wesentlich beigetragen. Die Quantisierung physikalischer Größen, d.h. die Tatsache, dass es für extensive Größen von der Natur ausgezeichnete Werte gibt, war aber schon vor der Entstehung der eigentlichen Quantenphysik bekannt. Sie ist eher mit dem Aufkommen der Atomistik, d.h. der

Entdeckung der Gesetze von den konstanten und den multiplen Proportionen, in Zusammenhang zu bringen, denn schon diese Gesetze beruhen darauf, dass eine physikalische Größe quantisiert ist: die Stoffmenge. Ihr Quantum ist gleich dem Kehrwert der Avogadro-Konstante. Zwei andere Größen, die ein universelles Quantum haben, sind die elektrische Ladung mit der Elementarladung und die Entropie mit der Boltzmann-Konstante. Man sollte die Planck-Konstante in dieser Reihe anderer Quanten sehen.

Auch ihre Messung im Unterricht ist, unserer Meinung nach, nicht wichtiger als die der Messung der Elementarladung, der Avogadro-Konstante oder der Boltzmann-Konstante. Wenn man die Zeit hat, sich mit der technisch etwas verwickelten Messung auseinanderzusetzen, so kann man es machen. Sie führt aber sicher nicht zu einem besseren Verständnis der Quantenphysik.

Die beiden Experimente, die man in der Schule hierzu gern macht, sind recht tückisch und werden manchmal falsch interpretiert.

Der photoelektrische Effekt ist insofern ein schönes Experiment, als er zeigt, dass die Spannung, bei der der Photostrom einsetzt, nicht von der Lichtintensität abhängt, wohl aber die Stromstärke. Mehr gibt der Versuch aber zunächst nicht her. Die Austrittsarbeit der Kathode kann man nicht bestimmen, solange man nicht die Kontaktspannung zwischen Anode und Kathode kennt. Diese ist aber nur schwer zu messen.

Bei der h -Bestimmung mit Hilfe von Leuchtdioden tritt ein anderes Problem auf. Sie wird oft so beschrieben, dass man eine Schwellenspannung bestimmt, bei der die Diode zu leuchten beginnt. Nun gibt es eine solche Schwellenspannung aber nicht. Man kann die scheinbare Schwelle durch geeignete Wahl der Eichung der Stromstärkeachse hin- und herschieben. Um den Wert von h zu bestimmen, muss man für zwei LEDs, die bei verschiedenen Wellenlängen emittieren, die Spannungswerte bei gleicher Stromstärke ablesen, wobei noch vorausgesetzt wird, dass die p-n-Kontaktflächen der LEDs den gleichen Flächeninhalt haben. Das Verfahren ist eigentlich für die Schule zu kompliziert, denn das notwendige Verständnis der Halbleiterdiode kann man hier nicht voraussetzen.

Man kann sich also fragen, ob eine h -Bestimmung an dieser Stelle überhaupt versucht werden sollte. Schließlich wurden die Tabellenwerte von h auch nicht mit solchen Experimenten bestimmt.

3. Die Quantentheorie

Die Zeitabhängigkeit der Wellenfunktion

Die Wellenfunktion stationärer Zustände hängt über einen Faktor $e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$ von der Zeit ab.

Da uns noch keine komplexen Zahlen zur Verfügung stehen, unterschlagen wir diese Zeitabhängigkeit und erwähnen nur die Ortsabhängigkeit der Wellenfunktion. Das Betragsquadrat der Wellenfunktion für stationäre Zustände, das wir später benutzen, ist aber tatsächlich zeitunabhängig.

Aufenthaltswahrscheinlichkeit und Antreffwahrscheinlichkeit

Da wir uns das Elektron ausgedehnt und das Elektronium im Raum verteilt vorstellen, kommen beide Begriffe bei uns nicht vor. Trotzdem einige Bemerkungen zu diesen Bezeichnungen. So sieht man besser, welchen Problemen wir durch die Einführung des Elektroniums aus dem Weg gehen.

Obwohl ein weitgehender Konsens darüber besteht, dass die Bezeichnung Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte für das Quadrat der Wellenfunktion nicht sehr glücklich ist, ist das Wort nach wie vor das in diesem Zusammenhang am meisten verwendete. Wenn man es so versteht, wie es ein normaler Umgang mit der Sprache nahelegt, so sagt es uns, dass sich das betrachtete Teilchen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an einer gegebenen Stelle aufhält, und zwar unabhängig davon, ob man eine Ortsmessung macht oder nicht. Der Wortteil „Wahrscheinlichkeit“ bringt nur unsere Unkenntnis darüber zum Ausdruck, wo sich das Teilchen befindet. Wenn man sagt, jemand halte sich wahrscheinlich gerade in seinem Büro auf, so meint man, dass er sich bestimmt an irgendeinem Ort aufhält und dass wir diesen Ort nicht kennen. Das Entsprechende ist aber mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons nicht gemeint. Man wollte nicht sagen, dass es sich bestimmt irgendwo aufhält.

Eine etwas vorsichtiger Bezeichnung ist das Wort „Antreffwahrscheinlichkeit“. Es scheint nur eine Aussage darüber zu machen, wo sich das Elektron befindet, wenn man nachsieht, wenn man also eine Ortsmessung macht, oder genauer: wo es sich befindet, nachdem der Prozess der Ortsmessung stattgefunden hat. Man trifft das Elektron mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an einer bestimmten Stelle an. Ganz glücklich ist aber diese Bezeichnung auch nicht, denn wenn jemand sagt, er habe ein Elektron irgendwo

angetroffen, so erwartet man, dass das Elektron unmittelbar vorher auch schon dort war – was aber nicht gemeint war.

Noch vorsichtiger ist daher eine andere Bezeichnung, die auch von den Vätern der Quantenphysik schon verwendet wurde: Übergangswahrscheinlichkeit. Bei einer „Ortsmessung“ macht das Elektron einen Übergang aus dem Ausgangszustand (in dem sein Ort im Allgemeinen unscharf ist) in einen Zustand mit scharfem Ort, oder genauer: in einen Zustand mit einer geringen Ortsunschärfe. Befindet sich das Teilchen nach der Messung in einem Zustand, dessen Wellenfunktion sich auf einen kleinen Raumbereich mit dem Volumen $d\tau$ beschränkt, so ist $|\psi(\mathbf{r})|^2 d\tau$ die Wahrscheinlichkeit für den Übergang in diesen Zustand. $\psi(\mathbf{r})$ ist hier die Wellenfunktion des Ausgangszustandes. Man findet das Elektron nach der Ortsmessung vorzugsweise an Stellen, wo das Betragsquadrat der Wellenfunktion vor der Messung einen großen Wert hatte. $|\psi(\mathbf{r})|^2 d\tau$ ist also die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in einen Zustand, der durch \mathbf{r} charakterisiert ist. Es ist die Übergangswahrscheinlichkeit aus dem Ausgangszustand in einen Zustand mit dem scharfen Ort \mathbf{r} . Wenn man diese Bezeichnungsweise wählt, ist man schon fast beim Elektroniummodell.

Im Elektroniummodell bezeichnet man den Vorgang gar nicht als Ortsmessung, sondern als Übergang aus einem Zustand, in dem das Elektron groß ist, in einen Zustand, in dem es klein ist. Bei dem Übergang zieht es sich auf einen kleinen Raumbereich zusammen. Wiederholt man den Vorgang sehr oft, so stellt man fest, dass sich das Elektron zu den unterschiedlichsten Stellen zusammenzieht. Die Wahrscheinlichkeit für die verschiedenen Orte, an denen sich das kleine Elektron nach dem Übergang befindet, wird durch $|\psi(\mathbf{r})|^2$ beschrieben, d.h. durch die Dichte des Elektroniums vor dem Übergang.

Reine und gemischte Zustände, Dekohärenz

Einen Bereich, der mit der Quantenmechanik zusammenhängt, behandeln wir im Unterricht nicht: den Grenzbereich zur klassischen Physik. Er wurde früher gewöhnlich so erledigt, dass man zwischen dem betrachteten quantenmechanischen System und dem klassischen Messapparat unterschied. Dabei wurde angenommen, das quantenmechanische System sei klein oder mikroskopisch, der Messapparat groß oder makroskopisch. Seit einiger Zeit werden nun die Systeme, die den Gesetzen der Quantenphysik gehorchen, immer größer und es wird immer offensichtlicher, dass die Unter-

scheidung mikroskopisch – makroskopisch die Sache nicht trifft. Der wichtige Unterschied ist vielmehr der zwischen Systemen, die sich durch eine Wellenfunktion beschreiben lassen, und solchen, für die das nicht zutrifft, oder in anderen Worten, zwischen reinen und gemischten Zuständen.

Nun ist aber der Zusammenhang zwischen quantenmechanischen und klassischen Systemen schwieriger als jede der beiden Systemklassen einzeln. Eine ähnliche Situation kennen wir aus anderen Bereichen der Physik: Die geometrische Optik ist einfach, die Wellenoptik ist auch recht einfach, der Zusammenhang zwischen beiden ist schwierig. Wie geht die geometrische Optik (bei der es keine Interferenz gibt) aus der Wellenoptik (Interferenz tritt auf) hervor? Bei der Beziehung zwischen Quantenmechanik (es gibt Interferenz) und klassischer Teilchenmechanik (es gibt keine Interferenz) ist es ähnlich. In gewisser Weise ist es auch ähnlich beim Zusammenhang zwischen statistischer und phänomenologischer Thermodynamik. Entropie und Temperatur sind in der phänomenologischen Thermodynamik einfache Größen. In der statistischen Physik sind sie etwas komplizierter, aber noch relativ verständlich. Schwierig wird es, wenn man zeigen will, dass die Begriffe aus beiden Bereichen übereinstimmen. Wir klammern all diese Fragen aus dem Schulunterricht aus.

Verschränkte Systeme

Sie sind ein beliebtes Thema, da sie zu merkwürdigen Aussagen führen, etwa: Ein „Teilchen“ A befindet sich in einem Zustand mit unscharfem, also prinzipiell unbekanntem Eigendrehimpuls. Macht man nun eine Drehimpulsmessung an einem weit entfernten „Teilchen“ B, so ist im selben Augenblick auch der Drehimpuls von A bestimmt. Dass es so ist, zeigt man gern, indem man die komprimierte Bra- und Ket-Schreibweise für quantenmechanische Zustände benutzt.

Dabei wird ein Aspekt, der für die unglaublichen Aussagen zuständig ist, etwas versteckt: die Kinematik, d.h. der Ort und die Zeit. Man sieht besser, was passiert, wenn man die Wellenfunktion in der guten alten Ortsdarstellung schreibt. Man sieht nämlich, dass man zur Beschreibung von zwei Teilchen einen sechsdimensionalen Ortsraum braucht. Dass da merkwürdige Dinge passieren, braucht einen aber nicht zu wundern. Der Versuch, die Erscheinung in unseren mit einem dreidimensionalen Raum operierenden Kopf hineinzubekommen, muss misslingen. Wir halten das Thema für die Schule nicht für geeignet.

4. Das Atom – stationäre Zustände

Das leere Atom

Das Modell der punktförmigen Elektronen hat noch eine andere Unstimmigkeit zur Folge. Wenn das Elektron punktförmig ist, so müsste die Atomhülle leer sein, und das wird tatsächlich auch manchmal betont. Wenn aber die Elektronen punktförmig sind, so ist es nur recht und billig, dass auch die anderen so genannten Elementarteilchen als punktförmig angenommen werden, also auch die Quarks und die Gluonen des Kerns. Das würde bedeuten, dass nicht nur die Atomhülle, sondern auch der Kern leer ist. Mit anderen Worten: Die ganze Welt ist leer. Die Aussage, etwas sei punktförmig, ist prinzipiell nicht falsifizierbar. Sie ist damit keine wissenschaftliche Aussage. Die Wellenfunktion enthält alles, was wir über ein Elektron in einem gegebenen Zustand überhaupt wissen können. Von einer Punktförmigkeit ist aber in der Wellenfunktion nichts zu erkennen.

Entstanden ist die Idee, dass die Atomhülle leer sei, nach den Rutherford'schen Streuexperimenten. Diese haben aber lediglich gezeigt, dass die Hülle eine im Vergleich zum Kern sehr geringe Masse hat. Wenn man auch in vielen Fällen die Masse der Hülle gegenüber der des Kern vernachlässigen kann, so trifft das Entsprechende schon nicht mehr auf die elektrische Ladung zu: Die Ladung der Hülle ist gleich der des Kern. Und umgekehrt steht es bezüglich des magnetischen Moments. Das magnetische Moment der Elektronen ist gerade um so viel größer als das des Kerns wie ihre Masse kleiner ist.

Wir sind daher etwas vorsichtiger beim Vergleich von Hülle und Kern. Statt zu sagen, die Hülle sei leerer Raum, heißt es bei uns nur, die Hülle habe eine geringe Massendichte.

5. Übergänge im Atom – nichtstationäre Zustände

Die halbklassische Beschreibung

Wir beschreiben Übergänge zwischen stationären Zuständen des Elektrons, indem wir das schwingende Elektronium als Antenne betrachten, die in Übereinstimmung mit der Elektrodynamik eine klassische elektromagnetische Welle emittiert. Das Atom wird also quantenmechanisch, die elektromagnetische Welle klassisch beschrieben. Man kann sich zwar vorstellen, dass die bei einem atomaren Übergang emittierte Welle das Photon ist. Dem Grund für die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes kommt man aber so nicht auf die Spur. Die Quantisierung ergibt sich erst, wenn auch das Feld quantenphysikalisch beschrieben wird.

Quadrupolübergänge

Quadrupolübergänge sind im Vergleich zu Dipolübergängen so schwach, dass sie in der normalen Spektroskopie keine Rolle spielen. Von Bedeutung sind sie nur bei sehr kurzen Wellenlängen, also im Röntgenbereich und bei sehr großen Hauptquantenzahlen, also bei den hochangeregten Rydbergatomen.

Auch bei der Gamma-Emission von angeregten Kernen beobachtet man Quadrupolstrahlung.

6. Atome mit mehreren Elektronen

Elektroniumdichte und Wellenfunktion

Für Einelektronensysteme, also etwa das Wasserstoffatom, ist die Elektronendichte (oder in unserer Sprache Elektroniumdichte) $\rho(r)$ gleich dem Betragsquadrat der Wellenfunktion:

$$\rho(r) = \psi^*(r) \cdot \psi(r),$$

die Stromdichte ist

$$j(r) = \frac{\hbar}{2mi} (\psi^*(r) \nabla \psi(r) - \psi(r) \nabla \psi^*(r))$$

$$r^2 \cdot \rho(r).$$

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}$$

Dichte- und Stromdichteverteilung zusammen enthalten dieselbe Information wie die Wellenfunktion $\psi(r)$. Das ist anders für Mehrelektronensysteme. Hier ist die Wellenfunktion von so vielen (vektoriellen) Ortsvariablen abhängig wie es Elektronen gibt. Elektronendichte und -stromdichte dagegen sind nach wie vor Funktionen einer einzigen Ortsvariablen. Die Wellenfunktion enthält hier mehr Information als die Elektronendichte. Manche Eigenschaften des Atoms, etwa welche Bindungen es mit anderen Atomen eingeht, sind daher aus der Elektroniumdichte nicht zu entnehmen.

Das Schalenmodell

Zur Erklärung der Eigenschaften der Atome, insbesondere der Periodizität von Atomradien und Ionisierungsenergien mit zunehmender Ordnungszahl, zieht man gern das Schalenmodell des Atoms heran. Baut man ein Mehrelektronenatom nach und nach auf, indem man schrittweise immer den Kern um ein Proton (und auch um ein oder zwei Neutronen) vergrößert und zur Hülle jeweils ein Elektron hinzufügt, so wird nach dem Schalenmodell das Atom schalenweise vergrößert. Jedes neue Elektron stellt man sich als Individuum vor, das außen an das Atom angelagert wird, und dieses Anlagern geschieht so, dass eine Schale nach der anderen gefüllt wird. Immer wenn eine Schale voll ist, erreicht die Ionisierungsenergie ein Maximum; Atome mit abgeschlossenen Schalen sind besonders stabil. Man würde erwarten, dass der Atomradius für Atome mit einer abgeschlossenen äußeren Schale ein Minimum und für Atome mit einem einzigen Elektron in der äußeren Schale ein

Maximum hat. Die Maxima beobachtet man tatsächlich, die Minima dagegen liegen an der falschen Stelle. Trotzdem ist das Modell sicher ein gutes Modell.

Gelegentlich werden Beweisstücke für die Schalen angeführt, die keine sind. Man zeigt, dass die „Antreffwahrscheinlichkeit“ eines Elektrons in bestimmten Abständen vom Kern Maxima hat. Tatsächlich ist aber die Antreffwahrscheinlichkeitsdichte eine Funktion, die vom Kern nach außen monoton abnimmt. Die Dichte ist also im Kern am größten, und von Schalen ist nicht viel zu erkennen. Man kann aber Schalen durch einen mathematischen Trick erzeugen. Statt die Dichte ρ über dem Radius r aufzutragen, also die Funktion $\rho(r)$, integriert man diese Funktion über den vollen Raumwinkel und stellt das Ergebnis über r dar. Da die Atome praktisch immer kugelsymmetrisch sind, ist dieses Ergebnis einfach das Produkt $r^2 \cdot \rho(r)$. Diese Funktion zeigt nun tatsächlich für Atome höherer Ordnungszahl einige Oszillationen. Tatsächlich vermittelt sie aber ein etwas trügerisches Bild von der Dichteverteilung.

Ununterscheidbarkeit von Teilchen

Wenn die Gesetze der Quantenstatistik hergeleitet werden, wird betont, dass Teilchen identisch und ununterscheidbar sind. Die Aussage ist nicht leicht verständlich.

Stellen wir uns zwei Elektronen vor, eins befindet sich an einem Ort r_l (links), eins am Ort r_r (rechts). Die Elektronen sind in fast jeder Hinsicht gleich: gleiche Masse, gleiche Ladung, gleicher Spin ... Aber in einem Merkmal unterscheiden sie sich doch: im Ort. Das eine befindet sich am Ort r_l , das andere am Ort r_r . Man kann sie also unterscheiden.

Tatsächlich geht es in der statistischen Physik gar nicht um die Ununterscheidbarkeit von *Teilchen*, sondern um die von *Zuständen*. Wir betrachten noch einmal die beiden Elektronen. Das eine befindet sich wieder am Ort r_l , das andere am Ort r_r . Wir bringen nun das linke Teilchen an den Ort r_r und das rechte an den Ort r_l . Der Zustand, den wir damit erhalten haben, ist von dem alten Zustand tatsächlich nicht zu unterscheiden, er ist mit dem alten Zustand identisch. In jedem Fall können wir aber die beiden Teilchen voneinander unterscheiden: das eine befindet sich links, das andere rechts.

Kann es denn aber wirklich sein, dass durch Vertauschung von zwei Teilchen derselbe Zustand entsteht? Sieht man es dem neuen Zustand nicht doch irgendwie an, dass er aus dem alten durch eine Vertauschung hervorgegangen ist? Man hätte das Problem nicht, wenn man nicht durch lange Übung in der klassischen Mechanik die Gewohnheit angenommen hätte, ein Teilchen als kleines Wesen zu betrachten, das außer durch die Werte von physikalischen Größen noch durch irgendetwas anderes charakterisiert ist, etwas das man vielleicht als seine Seele bezeichnen könnte. Diese Gewohnheit wird nun in der Quantenmechanik nicht möglichst schnell abgelegt, sondern sie wird durch die Sprache, der sich die Quantenphysik bedient, gehegt und gepflegt. Interessanterweise hat man das Problem zwar, wenn es um die Vertauschung von zwei Elektronen geht. Man hat es aber ganz und gar nicht, wenn man zwei Defektelektronen (Löcher) in einem Halbleiter gegeneinander vertauscht. Die Löcher wird man sich intuitiv nicht in demselben Sinne wie die Elektronen als Individuen vorstellen.

Im Elektroniummodell tritt dieser Konflikt auch mit Elektronen nicht auf.

8. Feste Stoffe

Das Elektronium von Feststoffen

Das Elektroniummodell lässt sich auch auf Feststoffe anwenden. Die Vorstellung, die man sich in der Fachphysik von der mikroskopischen Struktur von Feststoffen macht, entspricht diesem Modell. Elektroniumdichteverteilungen von Feststoffen werden gemessen mit Hilfe von Röntgenbeugung und mit dem Tunnelmikroskop, und sie werden theoretisch berechnet.

Wir stellen das traditionelle Bild vom punktförmigen Elektron dem Elektroniumbild gegenüber. Wir sehen dabei von der thermischen Bewegung der Atomkerne ab.

Im traditionellen Bild sieht der Festkörper so aus: Um die Atomkerne herum bewegen sich punktförmige Elektronen. Sie bewegen sich so, dass sie den ganzen Raum in der Umgebung des Kerns überstreichen. Mit größter Wahrscheinlichkeit befinden sie sich oder findet man sie in den Kernen selbst. Die Vorstellung fällt schwer, da die Elektronen, wie es heißt, keine Bahnen durchlaufen. Aus der Tatsache, dass die Elektronen punktförmig sind, folgt auch, dass der Feststoff leer ist.

Im Elektroniummodell dagegen bewegt sich nichts. Zwischen den Atomkernen befindet sich das Elektronium. Es hat in den Kernen seine höchste Dichte. Entfernt man sich von einem Kern, so nimmt die Dichte stark ab. Trotzdem ist das ganze Innere des Feststoffs von Elektronium erfüllt.

Bändermodell und Energieleiter

Wie beim Einzelatom, so sind auch beim Feststoff die Anregungen mit einer Veränderung der Elektroniumdichte verknüpft. Während aber beim Atom nur ganz bestimmte, voneinander sehr verschiedene Formen oder Dichteverteilungen angenommen werden können, gibt es beim Feststoff ganze Bereiche von Formen, die kontinuierlich ineinander überführt werden können. Entsprechend gibt es auch kontinuierliche Bereiche von Anregungsenergien. Solche Bereiche mit erlaubten Energien (und Formen) wechseln sich ab mit verbotenen Energien: Energien, die der Feststoff nicht aufnehmen kann.

Wir beschreiben einen Feststoff durch sein Energiespektrum oder seine *Energieleiter*, wie wir sagen. Auf Grund der Energieleiter

lassen sich, genauso wie beim Atom, viele wichtige Aussagen machen.

Mit den erlaubten Energien der Energieleiter sind alle Energien stationärer Zustände des Festkörpers gemeint. Wir fragen nicht danach, ob es sich bei diesen Zuständen um Einelektronenanregungen oder um kollektive Anregungen handelt. Die Energieleiter ist also nicht modell-abhängig. Sie gibt die Energien wieder, die man experimentell bestimmt.

Die Energieleiter ist eine einfachere und beschränktere Beschreibung des Feststoffs als das Bänderschema. Das Bänderschema besteht in der Auftragung der Energie über dem Ort.

Die optischen Eigenschaften von Feststoffen

Es wäre wünschenswert, im Rahmen eines Kapitels über Festkörperphysik die optischen Eigenschaften der Materie vollständig zu beschreiben: alles, was man mit den Augen wahrnimmt, wenn man auf die Oberfläche eines Körpers schaut.

Zur vollständigen Beschreibung der optischen Eigenschaften der Materie braucht man zwei Funktionen: Real- und Imaginärteil der komplexen Brechzahl. Uns steht im Rahmen unseres Kurses aber nur eine einzige Funktion zur Verfügung, und diese auch nur in der rudimentären Form der Energieleiter. Wir können daher nicht alle optischen Eigenschaften erklären. Was wir mit der Energieleiter insbesondere nicht erklären können, sind die Erscheinungen der Reflexion und der Brechung.

Viele andere Phänomene lassen sich aber gut beschreiben, und wir haben von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht. So wird erklärt, warum Metalle das sichtbare Licht absorbieren, warum die meisten Nichtmetalle durchsichtig sind, warum andere Nichtmetalle, wie etwa Cadmiumsulfid, durchsichtig und farbig sind, warum Halbleiter im Infraroten durchlässig sind, warum schwarze Stoffe schwarz und weiße Stoffe weiß sind.

Feststoffe als Lichtquellen

Genauso wie Gase können auch feste Stoffe Licht emittieren, wenn das Elektronensystem aus einem höher angeregten in einen niedriger angeregten Zustand übergeht. Das Anregen kann, wie bei Gasen, auf verschiedene Arten geschehen:

1. durch schnelle Elektronen (Beispiel: Fernsehbildröhre);
-

-
2. durch Photonen (Beispiel: Leuchtstoff an der inneren Oberfläche einer Leuchtstoffröhre);
 3. bei einer chemischen Reaktion (Beispiel: die Reaktion von Elektronen und Löchern in der p-n-Grenzschicht einer Leuchtdiode);
 4. durch Erhitzen (Beispiel: Glühen).

Wenn die Zeit zur Verfügung steht, lohnt es sich, diese verschiedenen Mechanismen zu behandeln und daran zu erinnern, dass Gase auf dieselben vier Arten zum Leuchten gebracht werden können. Wir haben uns im Schülertext auf die Behandlung des Glühens beschränkt.

Glühende Körper gehören zu unseren wichtigsten Lichtquellen: der Glühdraht einer Glühlampe oder die glühenden Kohlenstoffteilchen einer Kerzenflamme.

Diesem Thema wird gewöhnlich recht wenig Platz eingeräumt. Man erwartet von einem Abiturienten, dass er erklären kann, wie ein Laser funktioniert. Die entsprechende mikroskopische Beschreibung des Glühens dagegen wird im Unterricht meistens nicht behandelt.

Die elektrischen Eigenschaften von Feststoffen

Das am weitesten verbreitete Modell der elektrischen Leitfähigkeit in Metallen ist das Drude-Modell: Man beschränkt sich auf die Betrachtung der freien Elektronen und beschreibt diese als Gas, d.h. als herumfliegende kleine Körperchen. Das Drude-Modell ist sehr brauchbar. Überraschenderweise – kann man sagen, denn es ist schwer, sich vorzustellen, warum sich die Elektronen im Festkörper frei bewegen sollen. Einer der Nachteile des Modells ist es, dass man nicht sieht, wie es zu den Modellen passt, die man an anderer Stelle benutzt: zur Beschreibung elektrischer Erscheinungen in Halbleitern und zum Bändermodell. Da wir uns auf ein einziges Modell beschränken wollten, beschreiben wir auch die metallische Leitung im Elektroniummodell.

Ein Ladungstransport wird in diesem Modell so beschrieben: In Metallen lässt sich mit beliebig wenig Energi eine Verformung des Elektroniums erreichen, d.h. eine Abweichung der Dichteverteilung von der des Grundzustands. Eine solche Abweichung besteht aus einer Verdichtung und einer Verdünnung (immer verglichen mit der Dichteverteilung des Grundzustandes). Sowohl die Verdichtung als

auch die Verdünnung lassen sich mit Hilfe eines elektrischen Feldes durch den Festkörper hindurchschieben, und dabei wird Elektronium und damit auch elektrische Ladung transportiert.

Für den im Umgang mit Elektronen und Defektelektronen Ungeübten mag sich hier die Frage stellen, wie unsere Verdichtungen und Verdünnungen mit den bekannten Elektronen und Löchern des gewöhnlichen Bändermodells zusammenhängen.

Zunächst einige allgemeine Bemerkungen. Die Begriffe Elektron und Loch werden gebraucht, um den Transport von elektrischer Ladung zu beschreiben. Wir betrachten ein bestimmtes Band, das für den Transport zuständig ist. Man hat immer die Wahl, den Transport mit Hilfe von Löchern oder von Elektronen zu beschreiben, das Ergebnis ist dasselbe. Nun ist aber die effektive Masse der Elektronen von der Energie abhängig. Sie hat am unteren Bandrand einen anderen Wert als am oberen. Insbesondere ist die effektive Masse der Elektronen am unteren Bandrand positiv und am oberen negativ. Für die Löcher ist es umgekehrt: Ihre Masse ist am oberen Bandrand positiv und am unteren negativ.

Die Tatsache, dass die effektive Masse nicht konstant ist, macht die Beschreibung des Transportvorgangs im Allgemeinen kompliziert. Es gibt aber Situationen, in denen sie einfach wird.

Ist ein Band nur schwach mit Elektronen besetzt, so ist deren Masse positiv und im Wesentlichen konstant. Die Elektronen verhalten sich daher wie freie Elektronen. Man wird also den Elektrizitätstransport in einem solchen Band mit Elektronen beschreiben.

Eine Beschreibung mit Löchern würde zwar dasselbe Ergebnis liefern, wäre aber sehr viel komplizierter: Zum einen gibt es viel mehr Löcherzustände, deren Beitrag zum Transport berücksichtigt werden muss, zum anderen haben diese Löcher die unterschiedlichsten Massen, darunter auch negative.

Entsprechend beschreibt man den Ladungstransport in einem fast vollständig mit Elektronen besetzten Band zweckmäßigerweise mit Löchern: Diese sind weniger zahlreich als die Elektronen und sie haben eine einheitliche, positive effektive Masse.

Man sieht an diesen Betrachtungen, dass es nicht ganz korrekt ist zu sagen, über den Hall-Effekt erfahre man, ob man es mit einem Elektronen- oder einem Löcherleiter zu tun hat. Jeder Transport kann wahlweise mit Elektronen oder mit Löchern beschrieben

werden. Was uns der Hall-Effekt vielmehr sagt, ist, ob das Band stark oder schwach mit Elektronen besetzt ist.

Nun zum Elektroniummodell: Man kann den Transport elektrischer Ladung nicht nur entweder durch Elektronen oder durch Löcher beschreiben, sondern auch mit einer Mischung aus beiden. Das ist es, was wir mit unseren Verdichtungen und Verdünnungen tun. Auch so erhalten wir den korrekten Gesamtstrom durch den Festkörper.

Zur Bezeichnung der Ladungsträger in Metallen

Der Name Elektron für die beweglichen Anregungen in einem Metall legt nahe, es handele sich um dasselbe Teilchen wie ein freies Elektron. Tatsächlich unterscheidet es sich aber stark von diesem. Eigentlich wäre ein eigener Name gerechtfertigt. Wir haben davon abgesehen, einen eigenen Namen einzuführen, weil wir uns nicht zu weit von der eingebürgerten Fachsprache entfernen möchten. Wir betonen aber immer, dass wir nur die „beweglichen“ Elektronen meinen.

9. Diode und Transistor

Die Halbleiterdiode

Die Halbleiterdiode ist ein schwieriges Thema. Unsere Behandlung ist daher eher eine Beschreibung als eine Erklärung der Vorgänge in der Diode. Eine echte Erklärung der Funktionsweise ist mit den Mitteln der Elektrizitätslehre allein nicht möglich. Der Strom der Ladungsträger in der Diode wird nicht allein durch einen Gradienten des elektrischen Potentials, sondern auch noch durch einen Gradienten des chemischen Potentials bestimmt: Für den Gesamtstrom verantwortlich ist der Verlauf des elektrochemischen Potentials.

Die Funktionsweise der Halbleiterdiode wird in vielen Texten falsch erklärt. Dass die Durchlässigkeit in einer Richtung größer ist als in der anderen, hat nichts mit der Dicke der Sperrschicht zu tun.

Die Kontakte

Ein Problem sprechen wir nicht an, weil es zu weit führen würde. Eigentlich müsste es aber angesprochen werden: Was passiert an den Anschlusskontakten? Was dort abläuft, ist genau so kompliziert wie das, was am p-n-Kontakt abläuft, nur führt es nicht zu einem Gleichrichtereffekt.

Die Solarzelle

Die Solarzelle ist mit den Mitteln der Elektrizitätslehre allein, also mit Begriffen wie Leitfähigkeit, elektrisches Feld oder Potentialdifferenz nicht zu erklären. Der Antrieb für den Strom ist eine durch das Licht erzeugte chemische Potentialdifferenz. Da wir davon ausgehen müssen, dass das chemische Potential zur Erklärung nicht zur Verfügung steht, wurde der Antrieb ersatzweise über die Konzentration erklärt (von der das chemische Potential logarithmisch abhängt).

Der Transistor

Wir beschränken uns auf die Behandlung des Feldeffekttransistors. Dass manchmal dem Bipolartransistor der Vorzug gegeben wird, liegt wohl daran, dass dieser früher entwickelt wurde und dass er sich in den Anwendungen durchgesetzt hatte, bevor der Feldeffekttransistor erschien. Für uns hat der Feldeffekttransistor den Vorteil, dass er einfacher ist.

Im Gegensatz zum Bipolartransistor und zur Diode beruht die Funktionsweise des Feldeffekttransistors auf rein elektrischen Erscheinungen; sie kann mit den Mitteln der Elektrizitätslehre allein verstanden werden.

Um den elektrischen Strom von Source- zu Drainelektrode zu steuern, braucht man nur das Gate-Potenzial zu ändern, genauso, wie es bei der alten Röhrentriode reichte, das Gitterpotenzial zu ändern, um den Strom von der Kathode zur Anode zu steuern. Der Feldeffekttransistor ist sozusagen die ideale Realisierung eines Schalters, den man durch Verändern eines Potenzialwertes öffnen und schließen kann.

Wir behandeln keine Anwendungen, bei denen der Transistor im Verstärkerbereich arbeitet. Der Aufwand wäre dabei erheblich größer, da man Kennlinien diskutieren müsste. In den meisten Anwendungen, nämlich in allen Anwendungen der Digitaltechnik, werden Transistoren als Schalter eingesetzt, d.h. als binäre Bauelemente.

Zur Bezeichnung der Elektroden des Transistors

Wir haben uns nicht ohne Zögern zu folgender Bezeichnungsweise entschlossen: Die Source- und Drain-Elektrode haben keinen eigenen Namen bekommen. Im Rahmen unserer etwas vereinfachten Erklärung der Funktionsweise kann man die beiden Elektroden gar nicht unterscheiden.

10. Kernphysik

Strahlungsmessgeräte

Gewöhnlich wird im Rahmen der Kernphysik recht viel Zeit darauf verwendet, die Funktionsweise von Strahlungsmess- und -nachweisgeräten zu erklären. Wir glauben, dass dieses Thema für die Schule nicht wichtig genug ist. Die Erklärung von Strahlungsmessgeräten steht in Konkurrenz zur Behandlung unzähliger anderer Messgeräte. Wichtigere Messgeräte wären die Quarzuhr, das Thermoelement, der Infrarotsensor und andere.

Experimente mit Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Es ist üblich, im Kernphysikunterricht die Natur und die Eigenschaften verschiedener Strahlungsarten zu untersuchen: die Ladung der Teilchen und die Reichweite der Strahlung in verschiedenen Materialien.

Als Begründung mag man anführen, dass die Strahlungen Auskunft über die Natur der ablaufenden Kernreaktion geben. Sie sind auch wichtig, wenn man die biologischen Wirkungen der Strahlung verstehen will. Wir glauben, dass der wahre Grund die historische Entwicklung ist. Strahlungen waren in der Anfangszeit der Kernphysik der einzige Nachweis dafür, dass eine Kernreaktion abläuft.

Man vergesse auch nicht, dass man die meisten Reaktionsprodukte von Kernreaktionen im Unterricht ohnehin nicht nachweisen kann.

Was die Untersuchung der Reichweite der Strahlung betrifft: Es gibt zahlreiche andere „Strahlungen“, um deren Reichweite wir uns auch nicht kümmern. Wäre es nicht mindestens ebenso interessant, die Reichweite von Infrarotstrahlung, Röntgenstrahlung oder Mikrowellen zu untersuchen?

Kernmaterie

Im Karlsruher Physikkurs wird in den verschiedensten Zusammenhängen von einem bestimmten Modell Gebrauch gemacht: dem Modell des kontinuierlich verteilten Stoffs. Von elektrischen Feldern, magnetischen Feldern, von Licht, von Elektronen („Elektronium“), aber auch von den extensiven (mengenartigen) physikalischen Größen bilden wir uns eine Anschauung, indem wir uns einen Stoff vorstellen.

Es liegt nahe, bei der Materie, aus der der Atomkern besteht, genauso zu verfahren. Wir betonen dabei, dass der Stoff homogen ist, dass also im Kern Protonen und Neutronen nicht voneinander getrennt vorliegen. Es wäre nahe liegend, auch diesem Stoff einen eigenen Namen zu geben, etwa Nukleonium. Wir haben darauf verzichtet, da wir ihn im Unterricht nicht sehr oft brauchen, und den Gewinn durch Sparsamkeit bei der Einführung neuer Begriffe höher bewerten.

Bindungsenergie oder Trennenergie

Das Wort Bindungsenergie kann eine Ursache für Verständnisschwierigkeiten sein. Es suggeriert, es handele sich um die Energie, die man zum Binden der Teile eines Kerns braucht. Tatsächlich ist es aber die Energie, die beim Binden abgegeben wird. Die Bindungsenergie eines Kerns ist Energie, die der Kern nicht hat. Ist sie darum negative Energie? Um solche Fragen zu vermeiden, benutzen wir den Namen Trennenergie: die Energie, die man braucht, um die Teile eines Kern voneinander zu trennen. Bei dieser Bezeichnungsweise ist es klar, dass die Energie positiv ist.

Außerdem ist der Name in Analogie zu den Begriffen Ionisierungsenergie und Dissoziationsenergie gebildet: die Energie, die man braucht, um ein Atom zu ionisieren bzw. eine chemische Bindung zu trennen.

Die Tabelle der Trennenergien

Um vorauszusagen, ob eine Kernreaktion ablaufen kann oder nicht, oder genauer: in welche Richtung sie laufen kann, müssen die Bindungsenergien der beteiligten Kerne bekannt sein. Den Schülerinnen und Schülern muss also eine Tabelle mit den entsprechenden Werten zur Verfügung stehen. Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, eine solche Tabelle anzulegen. Man listet auf:

- die Ruhenergien der Nuklidkerne;
- die Bindungsenergien pro Nukleon;
- die Trennenergie, d.h. die Energie, die gebraucht wird, um den Kern vollständig in Protonen und Neutronen zu zerlegen.

Wir haben uns für die dritte Möglichkeit entschieden. Die erste Möglichkeit, nämlich das Arbeiten mit den Ruhenergien, wäre zwar

die begrifflich einfachste Methode. Sie hat aber den Nachteil, dass die entsprechende Tabelle Zahlen mit sehr vielen Ziffern enthalten müsste. In allen Bilanzen träten kleine Differenzen von zwei sehr großen Zahlen auf. Das Vorgehen wäre also sicher nicht sehr ökonomisch.

Von der Einführung einer Tabelle mit der „Bindungsenergie pro Nukleon“ (oder Trennenergie pro Nukleon) haben wir abgesehen, weil uns die Größe zu unanschaulich erschien. Wenn man einen Kern zerlegt, zerlegt man ihn ja sicher schrittweise, und für jedes Nukleon, das man vom Kern abtrennt, wird eine andere Trennenergie gebraucht.

Unsere Tabelle enthält daher die gesamte Trennenergie, die man einem Kern zuführen muss, um ihn vollständig in Protonen und Neutronen zu zerlegen.

Das Bestimmungswort „anti“

Mit dem Namen Antiteilchen wird eine Beziehung zum Ausdruck gebracht: Ein bestimmtes Teilchen ist das Antiteilchen zu einem anderen. Das Antiproton ist das Antiteilchen zum Proton, das Proton ist aber auch das Antiteilchen zum Antiproton. Das Wort Antiteilchen hat also eine ähnliche Bedeutung wie das Wort Partner. Einen Partner allein gibt es nicht, es gibt nur einen Partner zu irgend jemand anderem.

Das Bestimmungswort „anti“ hat aber auch eine absolute Bedeutung, nämlich wenn es vor einem Teilchennamen steht, wie im Fall des Antiprotons, des Antineutrons, des Antineutrinos ...

Baryonenzahl und Leptonenzahl

Um zu entscheiden, ob eine Kernreaktion möglich ist oder nicht, prüfen wir unter anderem, ob bei der Reaktion die Baryonenzahl und die Leptonenzahl erhalten ist. Für jede der beiden mengenartigen Größen Baryonen- und Leptonenzahl gilt ein Erhaltungssatz. Die Namen Baryonen- und Leptonenzahl legen allerdings nicht nahe, dass es sich um mengenartige Größen handelt, ja eigentlich, dass es sich überhaupt um physikalische Größen handelt. Die Namen suggerieren, es handele sich um Anzahlen: um die Anzahl der Baryonen bzw. der Leptonen. Tatsächlich haben die Größen aber für manche Teilchen negative Werte, sodass sie keine Anzahlen darstellen können.

Wir ziehen daher andere Namen vor, nämlich baryonische und leptonische Ladung. Diese Namen sind gebildet in Analogie zur elektrischen Ladung, mit der die Schüler schon hinreichend viel Erfahrung haben, sodass die Tatsache, dass die Größen auch negative Werte annehmen können, als recht natürlich erscheint.

Ein Unterschied zur elektrischen Ladung besteht darin, dass man der baryonischen und der leptonischen Ladung keine Maßeinheit gegeben hat, dass man ihre Werte stets in Vielfachen der baryonischen und leptonischen Elementarladung angibt. Um die Analogie trotzdem deutlich werden zu lassen, geben wir gelegentlich, etwa in Tabelle 10.3, die Werte der elektrischen Ladung in Vielfachen der Elementarladung an.

Antimaterie

Die so genannte Antimaterie wird manchmal etwas mystifiziert: Es wird die Erwartung geweckt, sie sei in jeder Hinsicht das Gegenteil der Materie. Insbesondere wird die Frage diskutiert, ob sie vielleicht eine negative Masse habe. Der Name Antimaterie, an dem sich leider nichts mehr ändern lässt, trägt hierzu sicher bei. Wir bestehen daher besonders darauf, dass der Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen lediglich im Vorzeichen einiger physikalischer Größen besteht. Statt des Eindrucks, dass ein Antiteilchen sozusagen die Verneinung des entsprechenden Teilchens ist, versuchen wir eine andere Vorstellung zu vermitteln: Teilchen und Antiteilchen bilden ein Pärchen von zwei Partnern, die sich in vieler Hinsicht gleichen.

Kernreaktor und Fusionsreaktor

Gewöhnlich werden diese Anlagen so dargestellt, dass der Eindruck entsteht, es handele sich um sehr eigenartige, trickreiche Methoden, bei zwei prinzipiell sehr verschiedenen Kernreaktionen Energie „freizusetzen“.

Wir versuchen dagegen, die Vorgänge in den beiden Reaktortypen als etwas sehr Ähnliches einzuführen. In beiden laufen Kernreaktionen ab, und zwar aus denselben Gründen: Weil die Ruhenergie der Edukte höher ist als die der Produkte. Die Vorgänge beider Reaktortypen sind aber sehr stark gehemmt; der Reaktionswiderstand ist so hoch, dass die Reaktionen unter normalen Umständen nicht ablaufen. Um die Reaktionsgeschwin-

digkeit zu erhöhen, bedient man sich der aus der Chemie bekannten Methoden: Im Kernreaktor benutzt man Neutronen als Katalysator, im Tokamak-Fusionsreaktor beschleunigt man die Reaktion durch Erhöhung der Temperatur. Auch die Kernfusion lässt sich katalytisch beschleunigen, etwa mit Myonen.

Die Sonne

Die Sonne ist für alles, was auf der Erde vor sich geht, so wichtig, dass man annehmen sollte, ihre Behandlung sei eines der wichtigsten Themen des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Tatsächlich wird sie aber eher etwas stiefmütterlich behandelt: manchmal nur als Beleuchtungsquelle, manchmal immerhin als Energiequelle.

Die Ursachen für eine solche Bewertung der Wichtigkeit eines Themas sind auch historischer Art. Unsere Kenntnis über die Vorgänge in der Sonne sind noch relativ jung und entstammen Arbeiten, die im Rahmen einer fortgeschrittenen Kern- und Teilchenphysik gemacht wurden. Dies hat wohl zu der Einschätzung geführt, dass die Aussagen, die man über die Sonne machen kann, schwierig sind und nur im Rahmen eines fortgeschrittenen Unterrichts vermittelt werden können. Das trifft aber nicht zu. Tatsächlich haben die Arbeiten zur Physik der Sonne zu Ergebnissen geführt, die sehr einfach sind:

- Die Dichteverteilung der Sonne ist sehr interessant und leicht zu vermitteln.
 - Der Grund dafür, dass die Sonne so heiß ist wie sie ist, ist überraschend und leicht zu erklären. Der Vergleich der Sonne mit einer Wasserstoffbombe suggeriert die falsche Vorstellung, die Sonne sei aus demselben Grund heiß, aus dem es bei einer Bombenexplosion heiß wird. Tatsächlich unterscheiden sich die Reaktionen in der Sonne in einer Hinsicht ganz extrem von denen in der Wasserstoffbombe: Sie laufen sehr langsam ab. Nur so kann man verstehen, dass die Sonne so lange existiert.
 - Oft wird suggeriert, die Funktionsweise der Sonne verstehe man erst richtig, wenn man den Bethe-Weizsäcker-Zyklus versteht. In der Chemie dagegen gibt man sich fast immer damit zufrieden, eine Nettoreaktion zu kennen. Wer weiß schon, welche Einzelreaktionen etwa bei der Verbrennung von Benzin ablaufen?
-

Kernreaktionen und chemische Reaktionen

In der Kernphysik wie in der Chemie stehen einige Fragen immer im Vordergrund. Man hat eine bestimmte Reaktion im Auge und fragt erstens, ob die Reaktion überhaupt stattfinden kann, und zweitens, wie schnell sie abläuft (falls sie ablaufen darf). Um diese Fragen zu beantworten, verfährt man in Chemie und Kernphysik ganz ähnlich. Da dies in den üblichen Darstellungen der beiden Fachgebiete oft nicht deutlich wird, wollen wir das Vorgehen in Chemie und Kernphysik gegenüberstellen.

Das Einrichten der Reaktionsgleichung

Um eine chemische Reaktionsgleichung einzurichten, müssen bestimmte Regeln befolgt werden: Die Zahlen der Atome jeder Elementsorte auf der linken und der rechten Seite der Gleichung müssen übereinstimmen. In den Worten der Physik handelt es sich darum, einen Erhaltungssatz zu befriedigen. Im Rahmen der Prozesse, auf die sich die Chemie beschränkt, gilt die Erhaltung der Atomzahlen. Dies ist kein allgemeiner Erhaltungssatz. Er gilt nur für die Chemie und wird, wohl wegen dieses Mangels an Allgemeingültigkeit, auch nicht als Erhaltungssatz formuliert.

Tatsächlich operieren wir in der Physik aber sehr oft mit beschränkt erhaltenen Größen. So nutzen wir in der Mechanik oft die Erhaltung der mechanischen Energie bei dissipationsfreien Vorgängen aus. Bei vielen thermodynamischen Vorgängen kann man die Entropie als Erhaltungsgröße betrachten, etwa bei der Betrachtung von Luftbewegungen in der Atmosphäre. Sogar von denjenigen Größen, von deren allgemeiner Erhaltung wir zunächst überzeugt waren, müssen wir gewärtig sein, dass eines Tages Prozesse gefunden werden, bei denen sie nicht erhalten sind. Ein Beispiel ist die Baryonenzahl. Sie wurde bisher überall als streng erhaltene Größe beobachtet: Es wurde noch kein Zerfall des Protons beobachtet, bei dem die Baryonenzahl nicht erhalten ist. Trotzdem ist man noch auf der Suche nach solchen Vorgängen, da sie von der Theorie zugelassen werden.

Es ist also legitim, bei chemischen Vorgängen von der Erhaltung der Atomzahlen zu sprechen.

Beim Einrichten einer chemischen Reaktionsgleichung achtet man darauf, dass ein weiterer Erhaltungssatz befriedigt wird: der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung.

Beim Einrichten einer Kernreaktionsgleichung verfährt man nun ganz ähnlich. Hier sind zwar die Atomzahlen der Elemente nicht mehr erhalten, dafür gelten aber andere Erhaltungssätze und diese gestatten uns das Einrichten der Reaktionsgleichungen. Die Erhaltungssätze der Kernphysik sind die der elektrischen Ladung, der Baryonenzahl und der Leptonenzahl (oder der elektrischen, der baryonischen und der leptonischen Ladung).

In welche Richtung kann die Reaktion laufen?

In der Chemie vergleicht man die chemischen Potentiale von Edukten und Produkten. Die Reaktion läuft von selbst vom hohen zum niedrigen Potenzial.

Bei Kernreaktionen kann man genauso verfahren. Während man aber für die Zwecke der Chemie die Nullpunkte von so vielen chemischen Potenzialen willkürlich festlegen darf wie es chemische Elemente gibt, muss man bei Kernreaktionen mit den Absolutwerten der chemischen Potentiale operieren. (Der Grund hierfür ist, dass sich die chemischen Elemente ineinander umwandeln lassen.)

Nun sind die Absolutwerte der chemischen Potentiale in guter Näherung gleich der molaren Ruhenergie der Stoffe. Und die Differenz der chemischen Potentiale bei einer Kernreaktion ist im Wesentlichen gleich der Differenz der molaren Ruhenergien der Stoffe der linken und rechten Seite einer Reaktionsgleichung. Nur bei sehr hohen Temperaturen oder hohen Drücken kommen Abweichungen zustande. Statt die Reaktionsrichtung über die chemischen Potentiale kann man sie also meist auch über die Ruhenergien berechnen.

Wir standen vor der Wahl zwischen den beiden Verfahren. Für die Benutzung der chemischen Potentiale würde sprechen, dass das Verfahren identisch mit dem in der Chemie benutzten ist. Wir haben uns trotzdem dafür entschieden, mit den Ruhenergien zu arbeiten. Das chemische Potenzial erscheint dann als natürliche Größe, wenn man die Reaktion von sehr vielen Teilchen betrachtet, was in der Chemie fast immer der Fall ist. In der Kernphysik dagegen sind die Umsatzraten meist sehr gering, und es steht der elementare Reaktionsprozess im Mittelpunkt. Die Energiebilanz zur Entscheidung über die Reaktionsrichtung heranzuziehen, ist auch deshalb nahe liegend, weil bei der Diskussion von Kernreaktionen ohnehin die Erhaltung von mengenartigen Größen eine wichtige Rolle spielt. Die Energiebilanz einer Reaktion ist also einfach eine weitere Bilanz

neben der elektrischen Ladung, der Baryonenzahl und der Leptonenzahl. Dabei geht natürlich die Einsicht verloren, dass bei einer von selbst ablaufenden Reaktion prinzipiell Entropie erzeugt wird, dass Entropieerzeugung der eigentliche Antrieb jedes von selbst ablaufenden Prozesses ist.

Die Umsatzrate

Die Umsatzrate der Chemie, gemessen etwa in mol/s, gibt an, wie ergiebig eine Reaktion abläuft. Auch für Kernreaktionen braucht man ein solches Maß. Leider hat sich hier ein anderer Begriff eingebürgert: die Aktivität. Benutzt wird die Aktivität allerdings nur zur Beschreibung eines bestimmten Reaktionstyps: der so genannten radioaktiven Zerfälle – in den Symbolen der Chemie $A \rightarrow B + C$. Als Maßeinheit wird nicht das Mol pro Sekunde, sondern das Becquerel oder die Zahl der Zerfälle pro Sekunde verwendet.

Wir ziehen es vor, auch hier das Wort Umsatzrate zu benutzen. Die Maßeinheit Becquerel erscheint dann einfach als eine kleinere Maßeinheit derselben physikalischen Größe. Dass wir für Kernreaktionen eine zweite Maßeinheit verwenden müssen, hat damit zu tun, dass die Umsatzraten häufig so klein sind, dass man mit den bekannten Bestimmungswörtern „pico“ und „femto“ nicht mehr auskommt.

In der Kernphysik verwendet man noch ein zweites Maß für die Umsatzrate einer Reaktion: die Halbwertszeit. Mit den Symbolen n für die Stoffmenge des zerfallenden Stoffes, dn/dt für die Umsatzrate und $T_{1/2}$ für die Halbwertszeit ist

$$\frac{dn}{dt} = -n \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}}.$$

Die Nuklidkarte

Es mag überraschen, dass wir die Nuklidkarte so früh einführen. Schließlich können ja die Schüler noch gar nicht wissen, wo die zahlreichen verschiedenen Nuklide vorkommen. Außerdem wird ihnen gesagt, dass die meisten Nuklide instabil sind. Wie kommt es denn, dass die Nuklide überhaupt existieren? Falls Schüler danach fragen, kann man sie auf später vertrösten mit der Bemerkung, dass sehr viele Moleküle gegen chemische Reaktionen instabil sind, und dass man sich darüber zunächst nicht wundert. Und wenn man

fragt, wie diese Moleküle entstanden sind, so heißt die Antwort: Sie wurden auf unzählige verschiedene Arten synthetisiert, und zwar zum größten Teil durch die Natur, zum kleineren Teil durch die Menschen im Labor oder in Fabriken. Einige wenige Syntheseprozesse werden im Chemieunterricht behandelt. Ähnlich ist es bei den Atomkernen. Auch die instabilen Kerne entstehen auf die verschiedensten Arten, natürlich und künstlich, und einige dieser Prozesse werden im Unterricht angesprochen.

Stabile und instabile Nuklide

Was man unter einem stabilen Nuklid versteht, ist eine Ermessensfrage. Einige der Nuklide, vor allem die leichten, können nicht zerfallen. Jede Reaktion, bei der elektrische Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl erhalten sind, führt zu Reaktionsprodukten, deren Ruhenergie höher ist als die des Ausgangskerns. Die Reaktion ist daher ohne Energiezufuhr, d.h. „von selbst“, nicht möglich. Viele andere der in den Nuklidkarten als stabil eingestuft sind in diesem Sinn aber nicht stabil. Sie zerfallen nur deshalb nicht, weil der Reaktionswiderstand sehr hoch ist. In anderen Worten, ihre Halbwertszeit ist einfach sehr groß.

11. Teilchenphysik

Fachausdrücke

Die Teilchenphysik benutzt einige Fachausdrücke, die auch in anderen Bereichen der Physik verwendet werden, dort aber eine etwas abweichende Bedeutung haben. Eine solche Erscheinung ist natürlich. Ein neues Fachgebiet generiert immer seine eigene Fachsprache, wobei die Sprachpflege gewöhnlich nicht im Vordergrund steht.

Die Schule kann hier versuchen, mäßigend einzuwirken, indem sie allzu unpassende Bezeichnungen nicht übernimmt. Bessere Wortbildungen vorzuschlagen wird sich kaum als effizient erweisen.

Streuung

In der Optik spricht man von Streuung, wenn Licht einer bestimmten Richtung von einem Gegenstand in die verschiedensten Richtungen abgelenkt wird. Licht kann also von einem Medium reflektiert, gebrochen, absorbiert oder gestreut werden.

In der Teilchenphysik bezeichnet man jede Wechselwirkung eines schnellen Teilchens mit einem ruhenden Target-Teilchen oder mit einem anderen schnellen Teilchen als Streuung.

Wechselwirkung

Dies ist ein schillernder Begriff. Die Bezeichnung Wechselwirkung ist in der klassischen Physik ein Platzhalter für die verschiedensten Prozesse. Voraussetzung ist nur, dass mindestens zwei Systeme an dem Prozess beteiligt sind. Man spricht dann von der Wechselwirkung zwischen den beiden Systemen. Im engeren Sinn wird die Bezeichnung verwendet für den Fall, dass zwei Körper Kräfte aufeinander ausüben oder, in anderen Worten, dass sie Impuls austauschen.

In der Teilchenphysik wird das Wort in einem engeren Sinn benutzt: Es bezeichnet Prozesse, an denen zwei Materie-Teilchen beteiligt sind, und die durch ein Feldteilchen vermittelt werden. In diesem Sinn gibt es vier verschiedene Arten der Wechselwirkung: die elektromagnetische, die schwache, die starke und die Gravitationswechselwirkung. Ein Ziel der Teilchenphysik ist es, eine Theorie zu finden, in der alle vier Wechselwirkungen als Spezialfälle einer einzigen Wechselwirkung erscheinen. Die Vereinigung der

elektromagnetischen mit der schwachen Wechselwirkung ist schon gelungen.

Kraft

Das Wort Kraft hat in der historischen Entwicklung der Physik die verschiedensten Bedeutungen gehabt; vor allem war es der Name verschiedener physikalischer Größen.

Diejenige Größe, für die die Bezeichnung heute am meisten gebraucht wird, ist die Größe F , d.h. die Stromstärke des Impulses. Früher nannte man auch diejenigen Größen Kraft, die wir heute Impuls und kinetische Energie nennen. Die kinetische Energie nannte man oft lebendige Kraft.

In der Thermodynamik der irreversiblen Prozesse nennt man Antriebsgrößen wie Temperatur-, elektrische Potenzial- und Konzentrationsgradienten Kräfte.

In der Elektrizitätslehre wird die Leerlaufspannung einer elektrischen Energiequelle als elektromotorische Kraft bezeichnet.

Nun wurde die Bezeichnung Kraft in jüngerer Zeit auch von der Teilchenphysik vereinnahmt. Das Wort steht hier nicht für eine physikalische Größe, sondern für eine Erscheinung oder einen Vorgang, und zwar praktisch synonym für Wechselwirkung (im Sinn der Teilchenphysik).

So sagt man, die starke Kraft sei für die Bindung zwischen Hadronen verantwortlich.

Kollisionen mit vorher Behandeltem

Die Teilchenphysik ist ein junges Teilgebiet der Physik. Wir können miterleben, wie neue Ideen, Konzepte und Modelle entstehen und wie eine Sprache entsteht, mit der man die neuen Ideen beschreibt.

Das macht das Thema spannend, aber es verursacht auch Schwierigkeiten besonderer Art. Ein Problem besteht darin, dass Themen, die Gegenstand des vorangehenden Unterrichts waren, angesichts der neuen teilchenphysikalischen Entwicklungen von vornherein anders behandelt werden sollten.

Ein Beispiel: Früher war das Vakuum leerer Raum – jetzt sagt uns die Teilchenphysik, dass der Raum ganz und gar nicht leer ist. Früher waren Felder räumliche begrenzte Gebilde. Jetzt sind sie überall, und das, was wir früher als Feld bezeichnet hatten, zeichnet

sich vom Rest nur dadurch aus, dass es sich dort in einem angeregten Zustand befindet.

Unterscheidungen, an die wir uns gewöhnt haben, verlieren ihren Sinn. Eine Neubearbeitung von größeren Bereichen der Physik tut not. Einerseits sollte sie so früh wie möglich geschehen, damit sich Ungereimtheiten nicht etablieren. Andererseits ist sie nicht möglich, solange das Gebiet noch in der Entstehung ist.

Energie und Wellenlänge

In Abschnitt 11.2 schätzen wir Wellenlängen von Strahlungen ab. Es kommt uns dabei nicht auf genaue Werte an. Die Rechnung würde sowieso nur eine obere Grenze der Auflösung liefern. Tatsächlich ist die Auflösung im Elektronenmikroskop durch Linsenfehler und nicht durch die Wellenlänge begrenzt. Außerdem beschränken wir die Berechnung auf relativistische Teilchen, denn nur diese interessieren uns im Kontext dieses Kapitels.

Der Teilchenzoo

Wir behandeln nicht die Systematik des so genannten Teilchenzoo, d.h. der vielen Baryonen und Mesonen. Sie ist im Prinzip nicht viel anders als die der chemischen Elemente oder der Nuklide. Das Prinzip kennen wir also schon; die praktische Bedeutung ist nicht groß.

Virtuelle Teilchen

Ein Teilchen sei „virtuell“ erklärt nichts, solange nicht definiert wird, was man unter dem Begriff „virtuelles Teilchen“ versteht. Es ist eine Sprechweise, die wir im Rahmen der Schulphysik kaum erklären können. Es ist besser nichts zu sagen, als etwas Unverständliches. Aussagen, die sich der logischen Kontrolle durch die Schülerinnen und Schüler entziehen, schaden dem Ansehen der Physik.

Das Photon ist schon schwierig genug. Was sollen wir, ohne die Quantenelektrodynamik heranzuziehen, zum virtuellen Photon sagen?

Wenn man sagt, Photonen oder virtuelle Photonen werden zwischen zwei wechselwirkenden Teilchen ausgetauscht: Was werden sich unsere Schülerinnen und Schüler vorstellen? Dass die Photonen zwischen den Teilchen hin- und herfliegen. Warum sagen wir es

dann nicht? Weil wir es nicht so gemeint haben. Wie haben wir es aber gemeint?

Es ist nicht so, dass die reellen Teilchen etwas Triviales und die virtuellen die exotische Ausnahme sind, die man nur mit der Quantenelektrodynamik verstehen kann.

Feldteilchen

Man mag in unseren Tabellen die Wechselwirkungsteilchen vermissen: besonders das Gluon der starken und die Vektorbosonen der schwachen Wechselwirkung. Es ist gewiss nicht schwierig zu behaupten, dass es die Teilchen gibt. Viel schwerer ist es zu erklären, was mit „es gibt sie“ gemeint ist. Die beliebten Aussagen aus den populärwissenschaftlichen Darstellungen der Teilchenphysik möchten wir in ein Schulbuch nicht aufnehmen.

Sätze wie „die Vektorbosonen sind für den Betazerfall verantwortlich“ sind eher geeignet, das Vertrauen in die logische Konsistenz physikalischer Aussagen zu untergraben.

Es ist nichts dagegen einzuwenden, dass im Unterricht etwas gesagt wird, bei dem wir den Beweis schuldig bleiben. Aber etwas absolut Unverständliches sagen ist nicht gut.

Gleiche Teilchen – verschiedene Teilchen

Im Schülertext wird gesagt, es gebe etwa hundert Hadronen, 12 Quarks und 12 Leptonen. Diese Aussagen muss man mit einer gewissen Vorsicht betrachten. Wann wird man von zwei Teilchen sagen, sie seien von derselben Art, und wann sagt man, es seien verschiedene Teilchen?

Zwei Teilchen mit derselben Masse, derselben elektrischen, baryonischen und leptonischen Ladung wird man als gleich bezeichnen.

Zwei Atome mit derselben Zahl von Protonen und Neutronen, also z.B. zwei Deuteriumatome, nennen wir gleich. Das kommt schon im Namen zum Ausdruck. Beide heißen Deuteriumatom. Dabei können sie sich noch sehr stark unterscheiden. Das eine kann sich im Grundzustand befinden, das andere in einem hochangeregten Zustand. Das eine ist also viel größer als das andere, und es hat eine andere Ruhenergie und einen anderen Drehimpuls. Die Ruhenergien der beiden Teilchen unterscheiden sich allerdings nur

wenig. Unser Gefühl sagt uns, dass die beiden Teilchen trotz der unterschiedlichen Werte einiger physikalischer Größen noch die gleichen Teilchen sind. Je weiter wir aber in die Hochenergiephysik kommen, desto weniger deutlich wird diese Unterscheidbarkeit. Die Anregungsenergien werden im Vergleich zu den Ruhenergien der Bestandteile immer größer, d.h., ein immer größerer Teil der Energie wird von dem zuständigen Wechselwirkungsfeld aufgebracht. Tatsächlich wird die Unterscheidung zwischen verschiedenen Teilchen und verschiedenen Zuständen der gleichen Teilchen auch immer unschärfer. So haben Anregungen von Baryonen und Mesonen eigene Namen bekommen, als handele es sich um neue Teilchensorten, siehe das Lambda- und das Rho-Teilchen. Es ist in der Teilchenphysik gang und gäbe zu sagen, es gebe sechs verschiedene Quarks. Die zugehörigen Antiteilchen werden nur als andere Zustände der sechs Ausgangsquarks betrachtet. Dass Quarks Farbladung tragen, könnte man auch so ausdrücken, dass man sagt, es gebe nicht zwölf, sondern 36 verschiedene Quarks. Das tut man aber nicht. Es gibt keine natürliche Grenze zwischen den beiden Betrachtungsweisen. Im Grunde haben wir das Phänomen auch schon auf anderen Ebenen der Teilchenhierarchie: Wir nennen alle Kalium-Isotope Kalium, man hätte sie aber auch unterschiedlich benennen und als verschiedene Stoffe betrachten können. Beim Wasserstoff macht man es so: Protium, Deuterium und Tritium.

Oder ähnlich: Sind festes, flüssiges und gasförmiges Wasser derselbe Stoff? Ob man es so oder so betrachtet, ist einfach eine Frage der Zweckmäßigkeit oder der Konvention.

Wir haben uns entschlossen zu sagen, es gebe 12 verschiedene Leptonen und Quarks.

[1] LEISEN, J.: Wie kommt die Erkenntnistheorie in den Physikunterricht?, MNU-Kongress Regensburg 2009.

[2] GREENBERGER, Daniel M.: Reviews of Modern Physics 55, 898 (1983).

C

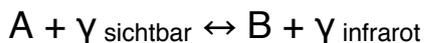
Versuche

2. Photonen und Elektronen

2.2 Photochemische Reaktionen

1. Ein Leuchtstab (Autozubehörhandel) wird im dunklen Klassenzimmer „eingeschaltet“.

2. Infrarotdetektorfolie (Elektronikzubehörhandel) wird durch Bestrahlung mit sichtbarem Licht „aufgeladen“. Sie wird dann im Dunkeln mit Infrarotlicht (etwa aus einer Fernsehapparat-Fernsteuerung) bestrahlt. Dabei erzeugt sie sichtbares Licht. Sie kann sich also in zwei Zuständen A und B befinden oder in anderen Worten: Die Stoffe A und B können sich ineinander verwandeln:



3. Photopapier reagiert mit sichtbarem Licht. Aus AgBr entsteht Br₂ und Silber. Bei langer Belichtung sieht man die Schwärzung durch das Silber ohne Entwicklung des Films.

4. Die Leuchtziffern einer Uhr oder nachleuchtendes, pulverförmiges Zinksulfid werden im Hellen mit Hilfe von Licht geladen. Im Dunkeln findet eine Reaktion statt, bei der Licht abgegeben wird.

2.3 Lichtportionen in der Zeit

1. Man macht den bekannten Versuch, bei dem eine Zinkplatte bei Beleuchtung mit ultraviolettem Licht entladen wird.

2. Ein Photomultiplier reagiert auf einzelne Photonen. Normalerweise ist ein Photomultiplier nicht Bestandteil einer Schulsammlung. Das Experiment ist aber so schön, dass man die Anschaffung nur empfehlen kann. Das billigste Modell ist ausreichend.

Wegen der hohen Empfindlichkeit darf ein Photomultiplier im Betriebszustand (d.h. bei angelegter Spannung) nur sehr geringen Lichtintensitäten ausgesetzt werden, andernfalls geht er kaputt. Es ist daher empfehlenswert, ein Netzgerät mit Überlichtschutz zu verwenden.

Um die Photonen-Pulse, wie sie im Schülertext wiedergegeben sind, zu zeigen, benutzt man eine sehr stark abgeschwächte Lichtquelle. Das Experiment findet in einem völlig verdunkelten Raum statt. Der Photomultiplier wird mit einem schwarzen Tuch abgedeckt. Das Tuch lässt immer noch zu viel Licht durch. Daher stellt man zwischen Lichtquelle und Photomultiplier noch eine mit Ruß geschwärzte Glasplatte. Die Rußschicht stellt man mit Hilfe einer brennenden Kerze her, und zwar so, dass sie keine gleichmäßige

Dicke hat. Sie hat also an verschiedenen Stellen einen unterschiedlichen Absorptionsgrad. Durch seitliches Verschieben dieses Graufilters kann man die Intensität des Lichts verändern, das auf den Photomultiplier fällt.

Der Nachweis der Spannungspulse am Ausgang des Photomultipliers geschieht mit dem Oszilloskop oder über ein Interface mit dem Computer.

2.7 Energie und Impuls von Photonen

1. Man bestimmt die Planck'sche Konstante h über den photoelektrischen Effekt.

Die Einstein'sche Gleichung lautet

$$h \cdot f = E_{\text{kin}} + E_{\text{A-Kat}} .$$

Hier ist f die Frequenz des eingestrahlten Lichts, E_{kin} die maximale kinetische Energie der emittierten Elektronen und $E_{\text{A-Kat}}$ die Austrittsenergie für Elektronen der Kathode. Der Versuch wird auf die bekannte Art gemacht, indem man eine Gegenspannung U_0 anlegt, bei der der elektrische Strom gerade null wird. Die Energie eU_0 geht linear mit der kinetischen Energie der Elektronen. Wenn man eU_0 über f aufträgt, bekommt man eine Gerade, deren Steigung gleich der Planck-Konstante ist. Der Ordinatenachsenabschnitt ist die Austrittsenergie der Anode. Der Grund dafür, dass man über die U_0 -Messung nicht die Austrittsenergie der Kathode erhält, ist, dass in U_0 noch die Kontaktspannung zwischen Kathode und Anode eingeht. Diese ist gleich der Differenz der beiden Austrittsenergien.

2. Man kann die Planck-Konstante auch mit dem Leuchtdiodenversuch aus der Sammlung bestimmen. Die Interpretation ist allerdings etwas schwierig, da sie eine recht gute Kenntnis der Vorgänge in der Halbleiterdiode voraussetzt.

Man braucht zwei LEDs, deren p-n-Übergang den gleichen Flächeninhalt hat. Man betreibt nun die Dioden bei einer beliebigen, aber bei beiden gleichen elektrischen Stromstärke, und liest die Spannungen U_1 und U_2 ab. Es gilt dann:

$$e(U_1 - U_2) = E_{g1} - E_{g2} .$$

Hier sind E_{g1} und E_{g2} die Bandabstandsenergien der Dioden. Der Bandabstand hängt mit der mittleren Energie der emittierten Photonen zusammen über:

$$E_g = h \cdot f.$$

Damit erhält man:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}$$

2.8 Elektronen

Man zeigt die Interferenz von Elektronen mit der Elektronenbeugungsröhre aus der Sammlung.

5. Übergänge im Atom – nichtstationäre Zustände

Die meisten nützlichen Versuche zur mikroskopischen Natur der Materie sind aufwändig und teuer. Man wird im Unterricht zeigen, was die Sammlung hergibt, etwa den Franck-Hertz-Versuch. Nicht spektakulär, aber sehr wichtig sind Emissionsspektren von Gasen. Schließlich ist darin die ganze Vielfalt der Atom- und Quantenphysik verschlüsselt enthalten. Wenn die Schule Mittel für eine größere Neuanschaffung hat, so ist ein modernes Spektrometer sicher nützlicher als manch anderes Gerät aus dem Lehrmittelkatalog.

Man wird auf jeden Fall Videos von atomaren Übergängen zeigen. Man findet kommentierte Videos, die für diesen Kurs hergestellt worden sind, unter:

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/Atom/Start.html>

Es gibt aber auch andere Internet-Sites mit ähnlichen Applets, etwa unter:

<http://www.falstad.com/mathphysics.html>

7. Die Spektren von Gasen

1. Das bekannte Experiment mit der Natrium-D-Linie im Absorptionsspektrum.
 2. Die Emissionsspektren verschiedener Gasentladungsröhren werden angeschaut oder aufgenommen. Die Gase werden identifiziert, indem man die beobachteten Spektren mit Spektren aus der Literatur vergleicht.
 3. Man bringt Natrium (als Kochsalz) oder Lithium in eine heiße Flamme. Die Flamme leuchtet gelb bzw. rot auf. Man zeigt, dass eine Wasserstofflampe nicht leuchtet. Man zeigt, dass eine Methanlampe (Erdgas) blau leuchtet.
-

8. Feste Stoffe

1. Man ordnet Tennisbälle oder Tischtennisbälle einmal in einem regelmäßigen „Kristallgitter“ an, und einmal bildet man einen ungeordneten Haufen.

2. Man zeigt Kristallmodelle aus der Chemiesammlung.

3. Es gibt Partyballons, die so aussehen: Ein länglicher Schlauch hat in gleichmäßigen Abständen mehrere Einschnürungen. Wir legen mehrere solche Gebilde neben- und übereinander, um den Schülern eine Idee von der räumlichen Struktur des Elektroniums in einem Kristall zu geben.

4. Zwei Spiegel werden aufgestellt, wie im Schülertext beschrieben. Man lässt alle Schüler in der beschriebenen Weise in die Spiegel hineinschauen.

5. Man reibt auf einer blanken Aluminiumoberfläche mit einem weißen Tuch und etwas weißem Scheuerpulver herum. Das Tuch wird schwarz.

6. Man schneidet ein kleines Loch in einen Karton, der innen weiß ist. Neben das Loch malt man mit einem Filzstift einen schwarzen Fleck, der dieselbe Größe hat wie das Loch. Das Loch sieht schwärzer aus als der schwarze Fleck.

7. Man zerstampft durchsichtige Gegenstände. Das entstehende Pulver ist weiß.

8. Man zeigt den Schülern ein Stück Silizium.

9. Man zeigt den Schülern Cadmiumsulfidkristalle. Man zerreibt CdS-Kristalle. Das Pulver ist kräftig gelb.

10. Man erhitzt verschiedene kleine Gegenstände mit einer Flamme gleichzeitig, sodass sie alle ungefähr dieselbe Temperatur haben. Schwarze Gegenstände glühen, weiße und durchsichtige nicht.

Die Flamme muss heiß und recht groß sein. Ein normaler Bunsenbrenner ist nicht geeignet. Man kann sich mit zwei Bunsenbrennern behelfen. Besser ist allerdings ein Brenner, wie man ihn zum Hartlöten verwendet.

Als nichtglühende Gegenstände sind geeignet: manche weißen Kieselsteine, Quarzglas, Saphir. Manche weißen oder durchsichtigen Gegenstände sind ungeeignet. Sie glühen, obwohl man es zunächst nicht erwarten würde: Kreide oder gewöhnliches Glas. Die Ursache ist, dass diese Stoffe Verunreinigungen enthalten.

Gewöhnliches Glas ist auch deshalb ungeeignet, weil es bei den erreichten Temperaturen schmilzt.

Als absorbierende Gegenstände wählt man etwa einen schwarzen Kieselstein, ein Eisenstückchen, ein Stück Kohle für die Kohlebogenlampe und ein Stück Silizium.

11. Man baut einen käuflichen Photoleiter (LDR = light dependent resistor) in einen Stromkreis ein und zeigt, dass der Widerstand bei Beleuchtung abnimmt.

9. Diode und Transistor

1. Man führt die Funktionsweise vor

- einer Gleichrichterdiode;
- einer Photodiode;
- einer Leuchtdiode;
- einer Solarzelle.

2. Alle diese vier Funktionen einer Halbleiterdiode können auch mit einem einzigen Exemplar gezeigt werden. Man benutzt eine käufliche, nicht zu kleine Leuchtdiode.

Selbstverständlich lässt sich diese Diode als Gleichrichter verwenden.

Um sie als Photodiode, d.h. als Lichtsensor zu betreiben, schließt man sie an eine Spannungsquelle in Sperrrichtung an. Ein sehr empfindliches Amperemeter zeigt, dass bei Beleuchtung ein schwacher elektrischer Strom fließt.

Als Leuchtdiode arbeitet sie ohnehin. Man schließt sie in Durchlassrichtung an. Man vergesse nicht, einen Schutzwiderstand in Reihe zu schalten.

Schließt man die Diode direkt, d.h. ohne Spannungsquelle, an ein Voltmeter (mit hohem Innenwiderstand), so beobachtet man bei Beleuchtung einen Ausschlag von etwa 1 Volt.

3. In einen Stromkreis mit einem kleinen Elektromotor oder einer Glühlampe baut man einen Leistungs-MOSFET ein (Source und Drain anschließen). Durch Verändern des elektrischen Potentials des Gate-Anschlusses kann man den Motor bzw. die Lampe ein- und ausschalten. Es genügt dabei, das Gate mit Hilfe der Finger mit dem positiven bzw. negativen Pol der Spannungsquelle zu verbinden. Das Experiment zeigt eindrucksvoll, dass über das Gate praktisch kein Strom fließt.

10. Kernphysik

Zur Kernphysik gibt es in den Schulsammlungen im Allgemeinen recht viele Experimente. Wir empfehlen aber, mit dem Einsetzen dieser Experimente eher zurückhaltend zu sein. Fast alle diese Experimente benutzen die Tatsache, dass eine sehr spezielle Klasse von Kernreaktionen sich trotz minimaler Umsatzraten auf eine bestimmte Art bemerkbar macht: Man kann einzelne Teilchen eines der Reaktionspartner als so genannte Strahlung nachweisen. Dieser Reaktionstyp bekommt dadurch im Unterricht ein Gewicht, das er unserer Meinung nach nicht verdient.

1. Man zeigt mit dem Geiger-Müller-Zählrohr, dass immer hochenergetische Teilchen in der Gegend herumfliegen. Man zeigt, dass „radioaktive Präparate“ besonders viele solcher Teilchen abstrahlen. Falls man eine ältere Uhr mit Leuchtziffern hat, kann man zeigen, dass die Leuchtziffern radioaktive Stoffe enthalten.

2. Falls man in der Sammlung ein Experiment zur Messung einer Halbwertszeit hat, führt man es durch.

11. Teilchenphysik

Steht ein Photomultiplier zur Verfügung, so kann man Myonen, die als Sekundärteilchen in der höheren Atmosphäre durch die kosmische Strahlung entstehen, über den Cerenkov-Effekt nachweisen, siehe

<http://psi.physik.kit.edu/45.php>

D

Lösungen der Aufgaben

1. Modelle in der Physik

1.1 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einem Modell

Wir möchten hier keine „Lösung“ angeben, die Verbindlichkeit beansprucht, denn die Frage ist sehr weit, und es gibt viele korrekte Antworten.

1.2 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einer Theorie

Die Gleichungen der Mechanik bilden eine Theorie, ebenso wie die der Elektrodynamik oder der Thermodynamik. Die relativistische Mechanik ist eine andere Theorie als die Newton'sche Mechanik. Die geometrische Optik ist eine Theorie, und die Wellenoptik ist eine.

Die Mengenlehre ist eine Theorie der Mathematik. Die Evolutionstheorie eine der Biologie.

2. Photonen und Elektronen

2.6 Die Größe von Photonen

Man macht ein Interferenzexperiment mit Laserlicht: Der Lichtstrahl oder Photonenstrahl wird an einem halbdurchlässigen Spiegel geteilt, und man lässt die beiden Teilstrahlen, nachdem sie verschiedene Wege durchlaufen haben, auf dieselbe Stelle eines Schirms treffen. Wenn die Lichtwege gleich lang sind, sieht man dort ein Interferenzmuster. Man macht nun den einen Lichtweg länger als den anderen, und zwar so lange, bis das Interferenzbild verschwindet. Wenn das eintritt, so ist der Wegunterschied gerade gleich der Kohärenzlänge des Lichts oder in anderen Worten, gleich der Länge der Photonen.

2.7 Energie und Impuls von Photonen

1.

$$\begin{aligned} \text{a) } E &= h \cdot f = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 0,984 \cdot 10^8 \text{ Hz} \\ &= 6,494 \cdot 10^{-26} \text{ J} \end{aligned}$$

$$p = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{E}{c} = \frac{6,494 \cdot 10^{-26} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,16 \cdot 10^{-34} \text{ Hy}$$

$$\text{b) } E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 1,32 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 4,4 \cdot 10^{-24} \text{ Hy}$$

$$\text{c) } E_{\text{SWF3}}/E_{\text{sichtbar}} = p_{\text{SWF3}}/p_{\text{sichtbar}} \approx 10^{-7}$$

$$E_{\text{Röntgen}}/E_{\text{sichtbar}} = p_{\text{Röntgen}}/p_{\text{sichtbar}} \approx 10^4$$

2. a) In den Ball fließt über den Wasserstrahl ein Strom negativen Impulses (positive Richtung nach unten). Der positive Impuls aus dem Gravitationsfeld und der negative aus dem Wasserstrahl heben sich auf.

b) In das Kügelchen fließt über den Lichtstrahl ein Strom negativen Impulses. Der positive Impuls aus dem Gravitationsfeld und der negative aus dem Lichtstrahl heben sich auf.

c) Pro Sekunde fließen über das Gravitationsfeld

$$p = 7 \cdot 10^{-11} \text{ Hy}$$

ins Kügelchen.

Ein Photon trägt (siehe Schülertext)

$$p_{\text{Ph}} = 8,25 \cdot 10^{-28} \text{ Hy.}$$

$$n = \frac{p}{p_{\text{Ph}}} = \frac{7 \cdot 10^{-11}}{8,25 \cdot 10^{-28}} \approx 10^{17}$$

Pro Sekunde müssen etwa 10^{17} Photonen auf das Kügelchen treffen. (Der genaue Wert hängt davon ab, wie das Licht am Kügelchen reflektiert und gebrochen wird.)



4. Das Atom – stationäre Zustände

4.1 Die Dichte des Elektroniums

$$\frac{12\,000\text{ km}}{50\,000} = 0,24\text{ km} = 240\text{ m}$$

4.2 Größe und Dichte der Atomhüllen

Atomradius für beide aus Abb. 4.3:

$$r = 1,6 \cdot 10^{-10}\text{ m}$$

Daraus das Volumen:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = 17 \cdot 10^{-30}\text{ m}^3$$

Die Masse des Elektrons ist

$$m = 0,9 \cdot 10^{-30}\text{ kg}$$

Damit wird die mittlere Dichte des Elektroniums im Wasserstoffatom:

$$\rho_{\text{H}} = \frac{0,9 \cdot 10^{-30}\text{ kg}}{17 \cdot 10^{-30}\text{ m}^3} = 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,05 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^3}$$

Das Bleiatom hat 82 Elektronen. Daher ist

$$\rho_{\text{Pb}} = 82 \cdot \rho_{\text{H}} = 4,3 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^3}.$$

Abschätzung der Dichte der Kernmaterie:

Ausgangsdaten:

Masse des Kerns $\approx 1000 \cdot$ Masse der Hülle

Radius des Kerns $\approx 1/50\,000 \cdot$ Radius der Hülle

Dichte der Hülle $\approx 2\text{ mg/cm}^3$.

$$\rho_{\text{Kern}} = \frac{1000 \cdot m_{\text{Hülle}}}{\frac{1}{50000^3} \cdot V_{\text{Hülle}}} = 1,25 \cdot 10^{17} \rho_{\text{Hülle}} \approx 2,5 \cdot 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Normale Materie hat eine Dichte von einigen Gramm pro Kubikzentimeter. Die Dichte der Elektronenhüllen ist also etwa 1/1000 davon, die der Kerne ist 10^{14} mal so groß.

7. Die Spektren von Gasen

7.1 Die Anregung von Atomen mit Licht

1.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 6,95 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

2. Die Ionisierungsenergie des Natriumatoms beträgt $0,8 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ (siehe Schülertext).

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,8 \cdot 10^{-18} \text{ J}} = 2,475 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 247,5 \text{ nm}$$

Es handelt sich um UV-Licht.

8. Feste Stoffe

8.2 Die Verteilung des Elektroniums in festen Stoffen

$$m/n = 58,5 \text{ g/mol}$$

$$\rho = m/V = 2,16 \text{ g/cm}^3$$

$$\frac{m/V}{m/n} = \frac{n}{V} = \frac{2,16 \text{ mol}}{58,5 \text{ cm}^3} = 0,0369 \text{ mol/cm}^3 = 36,9 \cdot 10^{-6} \text{ mol/mm}^3$$

1 mol entspricht $6,02 \cdot 10^{23}$ Teilchen

Z = Teilchenzahl

$$\frac{Z_{\text{NaCl}}}{V} = 2,2 \cdot 10^{19} \frac{\text{Moleküle}}{\text{mm}^3} = 4,4 \cdot 10^{19} \frac{\text{Atome}}{\text{mm}^3}$$

9. Diode und Transistor

9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter, Lichtquelle und Solarzelle

1. Ähnlich wie ein Sinusstrom, aber erstens fehlt eine Halbwelle und zweitens ist die andere Halbwelle etwas verformt, da der Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke nicht linear ist.

2. Der Brückengleichrichter lässt den elektrischen Strom zu jedem Zeitpunkt durch, egal, wie herum die Wechselspannung am Ausgang des Transformators gerade gepolt ist. Dabei fließt aber der elektrische Strom bei den beiden Halbwellen auf unterschiedlichen Wegen durch den Gleichrichter. Im Widerstand fließt er immer in dieselbe Richtung.

9.3 Der Transistor

Das Gate-Potenzial muss höher sein als das des Kanals.

10. Kernphysik

10.1 Der Aufbau der Atomkerne

1. $V_A = 8 \cdot V_B$

$$r_A = 2 \cdot r_B$$

2. $\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3 = 10^{17} \text{ kg/m}^3$

$$r = 5000 \text{ m}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V = 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 = 5 \cdot 10^{28} \text{ kg}$$

10.2 Elemente, Nuklide, Isotope

2. Für leichte Elemente ist das Verhältnis von Protonen- zu Neutronenzahl etwa 1, für schwere Elemente ist es kleiner als 1.

3. Es gibt etwa 286 stabile Nuklide.

4. Das schwerste stabile Nuklid ist ${}_{92}^{238}\text{U}$.

5. Die stabilen Isotope des Neons sind: ${}_{10}^{20}\text{Ne}$, ${}_{10}^{21}\text{Ne}$ und ${}_{10}^{22}\text{Ne}$.

6. Technetium (Protonenzahl 43)

7. Xenon hat 36 Isotope, davon sind 9 stabil.

10.3 Die Anregung von Kernen

1. $m_{\text{Tl}} = 350 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$

a) $E = 10^{-18} \text{ J}$

$$m_{\text{Anregung}} = \frac{E}{k} = \frac{10^{-18} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} \approx 10^{-35} \text{ kg}$$

$$\frac{m_{\text{Anregung}}}{m_{\text{Tl}}} = \frac{10^{-35}}{3,5 \cdot 10^{-25}} \approx 3 \cdot 10^{-11}$$

b) $E = 10^{-14} \text{ J}$

$$m_{\text{Anregung}} = \frac{E}{k} = \frac{10^{-14} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} \approx 10^{-31} \text{ kg}$$

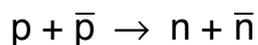
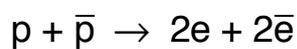
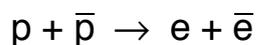
$$\frac{m_{\text{Anregung}}}{m_{\text{Tl}}} = \frac{10^{-31}}{3,5 \cdot 10^{-25}} \approx 3 \cdot 10^{-7}$$

2. Die Masse von 1 mol eines Stoffes ist von der Größenordnung 100 g. Bei der Anregung wird der Stoff um $1/10^7$ schwerer, d.h., seine Masse ändert sich um $100 \text{ g}/10^7 = 10 \text{ } \mu\text{g}$. Die Analysenwaage der Schule reagiert aber bestenfalls auf $100 \text{ } \mu\text{g}$.

10.4 Die Trennenergie

2. Beim Hinzufügen eines Neutrons zu einem Kern gewinnt man gewöhnlich Energie. Nur bei ${}^4_2\text{He}$ muss man beim Angliedern eines Neutrons Energie zuführen.

10.7 Ladungsbilanzen



10.8 Die Reaktionsrichtung

1.

	pn	p + n
$-E_T$ (pJ)	- 0,359	0
Bilanz (pJ)	- 0,359	0

	pn	2p + e + $\bar{\nu}$
Ruhenergien (pJ)	n 150,5349	n 150,5277 e 0,0819
$-E_T$ (pJ)	- 0,359	0
Bilanz (pJ)	150,1759	150,4096

	pn	2n + \bar{e} + ν
Ruhenergien (pJ)	p 150,3277	n 150,5349 \bar{e} 0,0819
$-E_T$ (pJ)	- 0,359	0
Bilanz (pJ)	149,9687	150,6168

Deuterium kann auf keine der drei vorgeschlagenen Arten zerfallen.

2.

	$p_{19}n_{21}$	$p_9n_{11} + p_{10}n_{10}$
$-E_T$ (pJ)	- 54,72	- 24,74 - 25,74
Bilanz (pJ)	- 54,72	- 50,48

	$p_{19}n_{21}$	$p_2n_2 + p_{17}n_{19}$
$-E_T$ (pJ)	-54,72	- 4,53 - 49,15
Bilanz (pJ)	- 54,72	- 53,68

	$p_{19}n_{21}$	$p_{20}n_{20} + e + \bar{\nu}$
Ruhenergien (pJ)	n 150,5349	p 150,3277 e 0,0819
$-E_T$ (pJ)	- 54,72	- 54,80
Bilanz (pJ)	95,815	95,610

	$p_{19}n_{21}$	$p_{18}n_{22} + \bar{e} + \nu$
Ruhenergien (pJ)	p 150,3277	n 150,5349 \bar{e} 0,0819
$-E_T$ (pJ)	- 54,72	- 55,08
Bilanz (pJ)	95,608	95,537

Das Kaliumisotop kann nach den beiden letzten Reaktionen zerfallen.

3.

	p_6n_8	$p_2n_4 + p_4n_4$
$-E_T$ (pJ)	- 16,87	- 4,69 - 9,05
Bilanz (pJ)	- 16,87	- 13,74

	p_6n_8	$2p_3n_4$
$-E_T$ (pJ)	- 16,87	- 2 · 6,29
Bilanz (pJ)	- 16,87	- 12,58

Keine der beiden Reaktionen kann ablaufen.

4.

	4p		$p_2n_2 + 2\bar{e} + 2\nu$	
Ruhenergien (pJ)	p	$2 \cdot 150,3277$	n	$2 \cdot 150,5349$
$-E_T$ (pJ)		0	\bar{e}	$2 \cdot 0,0819$
Bilanz (pJ)		300,655		296,700

Außer dem Heliumkern entstehen zwei Antielektronen und zwei Neutrinos. Die Energie 3,955 pJ ist übrig.

10.9 Kernstrahlung

1. a)

	$p_{29}n_{32}$		$p_{30}n_{31} + e + \bar{\nu}$	
Ruhenergien (pJ)	n	150,5349	p	150,3277
$-E_T$ (pJ)		-85,18	e	0,0819
Bilanz (pJ)		64,355		66,260

	$p_{29}n_{32}$		$p_{28}n_{33} + \bar{e} + \nu$	
Ruhenergien (pJ)	p	150,3277	n	150,5349
$-E_T$ (pJ)		-85,18	\bar{e}	0,0819
Bilanz (pJ)		65,148		64,957

	$p_{29}n_{32}$		$p_{27}n_{30} + p_2n_2$	
$-E_T$ (pJ)		-85,18		-79,83 - 4,5334
Bilanz (pJ)		-85,18		-84,36

Beim Zerfall von ${}^{61}_{29}\text{Cu}$ entsteht \bar{e} .

b)

	$p_{29}n_{37}$		$p_{30}n_{36} + e + \bar{\nu}$	
Ruhenergien (pJ)	n	150,5349	p	150,3277
$-E_T$ (pJ)		-92,33	e	0,0819
Bilanz (pJ)		58,205		57,78

	$p_{29}n_{37}$		$p_{28}n_{38} + \bar{e} + \nu$	
Ruhenergien (pJ)	p	150,3277	n	150,5349
$-E_T$ (pJ)		-92,33	\bar{e}	0,0819
Bilanz (pJ)		57,998		58,197

	$p_{29}n_{37}$	$p_{27}n_{35} + p_2n_2$
$-E_T$ (pJ)	- 92,33	- 86,63 - 4,5334
Bilanz (pJ)	- 92,33	- 91,16

Beim Zerfall von ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ entsteht e.

c) Der Zerfall, bei dem ein Elektron entsteht, kann nicht untersucht werden, da die Trennenergie von $p_{91}n_{137}$ in der Tabelle nicht aufgeführt ist.

	$p_{90}n_{138}$	$p_{89}n_{139} + \bar{e} + \nu$
Ruhenergien (pJ)	p 150,3277	n 150,5349 \bar{e} 0,0819
$-E_T$ (pJ)	- 279,27	- 279,05
Bilanz (pJ)	- 128,94	- 128,43

	$p_{90}n_{138}$	$p_{88}n_{136} + p_2n_2$
$-E_T$ (pJ)	- 279,27	- 275,62 - 4,5334
Bilanz (pJ)	- 279,27	- 280,15

Beim Zerfall von ${}^{228}_{90}\text{Th}$ entsteht ${}^4_2\text{He}_K$.

2.

	$p_{26}n_{29}e_{26}$	$p_{25}n_{30}e_{26} + \nu$
elektrische Ladung	26 - 26	25 - 25
baryonische Ladung	26 + 29	25 + 30
leptonische Ladung	26	25 + 1
Ruhenergien (pJ)	p 150,3277 e 0,0819	n 150,5349
$-E_T$ (pJ)	- 77,07	- 77,24
Bilanz (pJ)	73,39	73,29

Ein Elektron der Hülle reagiert mit einem Proton des Kerns. Das entstehende Neutron bleibt im Kern, das Neutrino fliegt weg.

3.

a) A liegt oberhalb der Reihe der stabilen Nuklide. B liegt diagonal rechts unter A.

b) C liegt unterhalb der Reihe der stabilen Nuklide. D liegt diagonal links über C.

c) E liegt auf der Nuklidkarte rechts oben. F liegt zwei Positionen unter und zwei Positionen links von E.

10.10 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

$${}_{92}^{238}\text{U}: 99,28 \%$$

$${}_{92}^{235}\text{U}: 0,72 \%$$

$$\frac{m}{n} = 238 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$n_{\text{total}} = \frac{m}{238 \text{ g/mol}} = \frac{1 \text{ kg}}{0,238 \text{ kg}} \text{ mol} = 4,2 \text{ mol}$$

$$n_{235} = 0,072 \cdot 4,2 \text{ mol} = 0,03 \text{ mol}$$

$$I_n = 5,76 \cdot 10^5 \text{ Bq} = 5,76 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{6} \cdot 10^{-23} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$
$$= 0,96 \cdot 10^{-18} \text{ mol/s}$$

Wir nennen 1 % der Menge des ${}_{92}^{235}\text{U}$ n' .

$$t = \frac{n'}{I_n} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \text{ mol}}{0,96 \cdot 10^{-18} \text{ mol/s}} = 3,125 \cdot 10^{14} \text{ s}$$

$$= 0,868 \cdot 10^{11} \text{ h} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ d} = 10^7 \text{ Jahre}$$

10.11 Die Halbwertszeit

1. 25 000
2. 6 Jahre
3. 1 Monat
- 4.

	A	B	C
0 Jahre	100%	0%	0%
2 Jahre	0%	100%	0%
1 000 000 Jahre	0%	0%	100%

5. Auch die Umsatzrate nimmt auf die Hälfte ab.

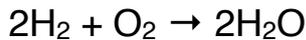
10.12 Kernreaktionen in der Sonne

1. Siehe Aufgabe 4 von Abschnitt 10.8. Bei der Bildung eines ${}^4_2\text{He}$ -Kerns ist die Energie 3,955 pJ übrig.

1 mol enthält $6,022 \cdot 10^{23}$ Kerne. Die bei der Bildung von 1 mol abgegebene Energie E_K beträgt daher:

$$E_K = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 3,955 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 2,38 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Zum Vergleich die Reaktion



Die chemische Spannung der Reaktion ist

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = 474,36 \text{ kG.}$$

Wenn 1 mol H_2 verbrennt, ist der Reaktionsumsatz $n(\text{R}) = 0,5$ mol. Damit wird die abgegebene Energie E_H :

$$E_H = [\mu(\text{A}) - \mu(\text{B})] \cdot n(\text{R}) = 474,36 \cdot 0,5 \text{ kJ} = 237 \text{ kJ}$$

Das Verhältnis der beiden Energien ist:

$$\frac{E_K}{E_H} = \frac{2,38 \cdot 10^{12} \text{ J}}{2,37 \cdot 10^5 \text{ J}} \approx 10^7$$

2. Durch einen Menschen fließt im Mittel ein Energiestrom von etwa 100 W. Fast die ganze Energie wird zur Entropieproduktion verwendet. Setzen wir für das Volumen des Menschen 100 l, so ergibt sich

$$\frac{P}{V} = 1 \frac{\text{W}}{\text{l}}.$$

Für die Sonne ist

$$\frac{P}{V} = 0,01 \frac{\text{W}}{\text{l}}.$$

1 l Mensch gibt also 100 mal so viel Energie ab wie 1 l Sonne.

10.13 Warum es im Innern der Sonne so heiß ist

Es soll nur eine grobe Abschätzung gemacht werden.

Sonne:

$$\frac{\Delta T}{r} = \frac{15 \cdot 10^6 \text{ K}}{7 \cdot 10^5 \text{ km}} \approx 20 \text{ K/km}$$

Erde:

$$\frac{\Delta T}{r} = \frac{6000 \text{ K}}{6000 \text{ km}} \approx 1 \text{ K/km}$$

Wand:

$$\frac{\Delta T}{r} = \frac{20 \text{ K}}{20 \text{ cm}} \approx 1 \text{ K/cm}$$

10.14 Das ungewöhnliche Verhalten der Sonne bei Entropiezufuhr

Die Umkehrung des Prozesses von Abb. 10.9c. Man verkleinert das Volumen stark, lässt aber nur wenig Entropie austreten.

10.15 Warum die Sonne nicht explodiert

Positive Rückkopplung:

Stromnetz:

Eine wichtige Leitung des Stromnetzes ist überlastet und fällt aus. Dadurch wird eine andere, die vorher nicht überlastet war, überlastet. Die andere Leitung fällt aus ... Das ganze Netz bricht zusammen.

Tonübertragungsanlage:

Aus dem Lautsprecher komme ein Ton. Ein Mikrofon empfängt das akustische Signal, das Signal wird verstärkt und kommt zum Lautsprecher. Der erzeugt einen lauterem Ton, ... Die Übertragung bricht zusammen.

Negative Rückkopplung:

Wasserspülung der Toilette:

Der Behälter ist zunächst leer. Es fließt Wasser hinein. Noch bevor er voll ist, wird durch den Schwimmer ein Ventil nach und nach geschlossen. Je höher der Wasserstand, desto weniger Wasser fließt zu. Wenn der Behälter voll ist, fließt gar kein Wasser mehr zu.

Zentralheizung:

Das Zimmer ist zunächst kalt. Das Thermostatventil am Heizkörper ist geöffnet. Es fließt warmes Wasser in den Heizkörper hinein. (Und es fließt etwas abgekühlt heraus.) Die Zimmertemperatur nimmt zu. Je höher die Temperatur, desto weniger Wasser lässt das Ventil durch. Ist eine bestimmte Temperatur erreicht, so sperrt das Ventil ganz.

10.16 Der Kernreaktor

1. Die Energieproduktion der Uranzerfallsreaktion ergibt sich nach dem Schülertext zu

$$\Delta E_{\text{Uran}} = 317,87 \text{ pJ} - 285,80 \text{ pJ} = 32,07 \text{ pJ}.$$

	p₅₆n₈₅		p₅₇n₈₄ + e + $\bar{\nu}$	
Ruhenergien (pJ)	n	150,5349	p	150,3277
- E_T (pJ)		- 188,09	e	0,0819
Bilanz (pJ)		- 37,555		- 38,080

ΔE Barium = 0,525 pJ.

$$\frac{\Delta E_{\text{Uran}}}{\Delta E_{\text{Barium}}} = \frac{32,07}{0,525} \approx 61$$

2.

	Ba	La	Ce	Pr
30 s	viel	wenig	sehr wenig	sehr wenig
18 min	mittel	mittel	wenig	sehr wenig
5 d	sehr wenig	wenig	viel	wenig
1 a	sehr wenig	sehr wenig	wenig	viel
