

## Ein Zugang zur Quantenphysik über die Zustände eines physikalischen Systems

Nach dem Beispiel von Richard P. Feynman ist dies ein Versuch, einen Zugang zur Quantenphysik zu geben. Dies geschieht hier nicht durch die Verwendung der Wellenfunktionen und der Schrödinger-Gleichung, sondern über die Grundzustände eines physikalischen Systems.

- 1) Dieser Ansatz erfordert nicht viel Mathematik und könnte daher für Schüler mit wenig Physik- und Mathematikausbildung zugänglich sein. Es bedarf keiner Unterrichtseinheiten über Schwingungen und Wellen.
- 2) Durch die Verwendung weniger grundlegender Informationen ermöglicht dieser Ansatz den Zugang zu einem breiten Feld in Kernphysik, Atomphysik, Molekülphysik und Chemie. Es könnte auch Teil einer Einführung in die Chemie sein.
- 3) Dieser Ansatz kann zu einer Behandlung bestimmter Aspekte der Wellenmechanik und der Wissenschaftstheorie hinführen.
- 4) Die wichtigsten Informationen sind im Normaldruck angegeben, zusätzliche Gedanken sind *kursiv* gedruckt.

### Energieniveaus

Viele physikalische Systeme können nur wenige Werte für die Energie haben, die so genannten Energieniveaus. Energie wird von diesen Systemen als sichtbares oder unsichtbares Licht (Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- oder Gammastrahlung) empfangen (absorbiert) oder ausgesendet (emittiert).

Die Frequenz dieses Lichts, das die Farbe des Lichts bestimmt, hängt von der Energiedifferenz zwischen den Energieniveaus vor und nach dem Prozess ab. Für die emittierte oder absorbierte Energie  $E$  wird die Frequenz  $\nu$  des Lichts (für sichtbares Licht bestimmt die Frequenz seine Farbe) durch die Formel  $E = h \cdot \nu$  bestimmt.

*h ist hier eine Konstante, die zu Ehren des deutschen Physikers Max Planck, der sie entdeckt hat, als Planck-sches Wirkungsquantum bezeichnet wird.  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$*   
Energie wird daher als kleine Pakete, genannt Quant, Plural Quanten, aufgenommen oder ausgesandt. Licht besteht aus Teilchen, die Photonen genannt werden.

### Zustände eines Elektrons in einem Atom

Materie besteht aus Atomen. Jedes Atom besteht aus einem schweren Kern in seinem Zentrum und aus Elektronen. Das Wasserstoffatom ist das einfachste Atom, es hat nur 1 Elektron. Dieses Elektron kann nur in vergleichsweise wenigen Zuständen (Orbitale genannt) sein. In anderen Atomen gibt es ähnliche Zustände für die Elektronen.

Ein Elektron, das nicht in einem Atom oder Molekül gebunden ist, kann jede beliebige Energie haben.

Die möglichen Zustände eines einzelnen Elektrons im Wasserstoff-Atom werden

durch 4 Zahlen, seine Quantenzahlen, bezeichnet. Die zweite dieser Zahlen ist als Buchstabe geschrieben:  $s=1$ ,  $p=2$ ,  $d=3$ ,  $f=4$ , ..... Für ein Elektron kann die vierte Quantenzahl  $\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$  sein, wir schreiben einfach  $+$  oder  $-$ . Ein Elektron könnte sich also im Zustand  $4p3^-$  befinden, d.h. seine Quantenzahlen sind 4, 2, 3,  $-1/2$ . Alle Atome haben die gleichen möglichen Zustände für ein einzelnes Atom.

### Basiszustände

Jeder Zustand eines Elektrons in einem Atom kann als lineare Kombination seiner Basiszustände dargestellt werden. Ein Zustand eines Elektrons kann daher durch die Zahlen beschrieben werden, die für jeden Basiszustand die Wahrscheinlichkeit angeben, dass das Elektron diesen Zustand einnimmt. Diese Nummern werden daher als Besetzungszahlen bezeichnet.

Wenn wir den genauen Zustand eines Elektrons nicht kennen, sondern nur wissen, dass es sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% im Zustand  $1s1^+$  befindet, mit einer Wahrscheinlichkeit von 0% im Zustand  $1s1^-$ , einer Wahrscheinlichkeit von 30% im Zustand  $2s1^+$ , und mit einer Wahrscheinlichkeit von 20% im Zustand  $2p2^+$ . Die Besetzungszahlen dieser Zustände sind daher 0,50; 0,00; 0,30; 0,20.

Wenn wir den Ort eines Teilchens im Raum beschreiben, benötigen wir in der Regel 3 Zahlen, zum Beispiel geografische Länge, geografische Breite und die Höhe über dem Meeresspiegel. Eine andere Möglichkeit ist: Sie wählen einen Punkt im Raum und messen, wie viele Meter sich Ihr Objekt rechts von diesem Punkt, hinter diesem Punkt und über diesem Punkt befindet. Sie können einen anderen Punkt mit anderen Richtungen wählen, um die Abstände zu messen. Für den neuen Ausgangspunkt und die neuen Richtungen ("ein neues Koordinatensystem") müssen Sie die neuen Entfernungen (Koordinaten genannt) Ihres Objekts messen oder berechnen. Ebenso müssen Sie, wenn Sie verschiedene Basiszustände Ihres Systems wählen, die Besetzungszahlen für diese neuen Zustände berechnen.

### Pauli-Prinzip

Keine Elektronen im gleichen System können sich im gleichen Zustand befinden.

Das bedeutet, dass die Elektronen in einem Atom die Zustände mit der geringstmöglichen Energie besetzen. Ein Wasserstoffatom (Symbol H) hat nur 1 Elektron, daher ist dieses Elektron im Zustand  $1s1^+$  oder  $1s1^-$ . Helium (Symbol He) hat 2 Elektronen, sie belegen also  $1s1^+$  und  $1s1^-$ . Ein Lithiumatom (Symbol Li) hat 3 Elektronen und nimmt die Zustände  $1s1^+$ ,  $1s1^-$  und  $2s1^+$  oder  $2s1^-$  ein. Die 6 Elektronen eines Kohlenstoffatoms (Symbol C) belegen die Zustände  $1s1^+$ ,  $1s1^-$ ,  $2s1^+$ ,  $2s1^-$ ,  $2p1^+$ ,  $2p2^+$ . Diese Zustände der Elektronen bestimmen die chemischen Eigenschaften dieser Atome.

Wenn man einem Atom Energie zuführt, werden Elektronen Zustände mit einer höheren Energie besetzen. und man hat ein angeregtes Atom. Diese überschüssige

Energie kann abgegeben werden, indem beispielsweise ein Photon mit der entsprechenden Energiemenge ausgesandt wird.

*Elektronen haben die Eigenschaft, dass eine ihrer Quantenzahlen, der Spin, die Werte  $\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$  annehmen kann. Partikel mit dieser Eigenschaft werden als Fermionen bezeichnet. Keine 2 Fermionen können sich im gleichen Zustand befinden.*

### **Boltzmann-Faktor**

Wenn ein System warm ist, bewegen sich seine Teilchen und stoßen einander und tauschen dabei Energie aus. Viele Teilchen gewinnen dadurch nur eine geringe Menge an Energie, aber nur wenige Teilchen erhalten viel.

*Besteht das System aus  $N$  Teilchen und hat die Kelvin-Temperatur  $T$ , dann ist die Anzahl der Teilchen, die eine Energie von mindestens  $E$  haben, wie folgt.  $N \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$*

*Es wird eine ausreichende Temperatur benötigt, um Bindungen zwischen den Atomen zu lösen, so dass sie keine festen Stellen haben, wie es in einer Flüssigkeit der Fall ist, oder dass sie sogar eine Flüssigkeit zum Umherfliegen verlassen können, wie es in einem Gas der Fall ist. Hohe Temperaturen zerstören Moleküle.*

### **Bosonen**

Lichtteilchen (Photonen) befinden sich gerne im gleichen Zustand; je mehr Photonen sich in einem Zustand befinden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein neues Photon im gleichen Zustand befindet.

*Wenn Atome Photonen aussenden können und sich 100 Photonen bereits in einem bestimmten Zustand befinden, dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein anderes Atom ein Photon in den gleichen Zustand aussenden wird, 101 mal höher als die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Atom das gleiche Photon aussenden kann, wenn kein anderes Photon in diesem Zustand ist.*

*Wenn viele angeregte Atome bereit sind, ein Photon mit einer bestimmten Energie auszusenden, verdoppelt ein Photon mit dieser Energie die Wahrscheinlichkeit, dass mehr solcher Photonen ausgesandt werden. Je mehr Photonen mit der gleichen Energie diese angeregten Atome passieren, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass andere folgen. Daher erhält man eine Lawine von Photonen mit der gleichen Energie und der gleichen Richtung. Dieser Effekt wird mit Licht in einem LASER (light amplification by stimulated emission of radiation = Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission) und mit Mikrowellen in einem MASER (microwave amplification....) genutzt.*

*In sehr kalten Metallen können Elektronen in bestimmten Metallen Elektronenpaare bilden. Diese Elektronenpaare haben zusammen den Spin 1, 0 oder -1. Teilchen mit einem ganzzahligen Spin als 0, 1, 2, 3, 4,.... werden Bosonen genannt. Wie die Photo-*

nen haben sie eine starke Tendenz, in den gleichen Zustand zu gelangen und dort zu bleiben. Wenn viele Elektronenpaare mit gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung strömen, bewirken sie, dass jedes Elektronenpaar, das durch einen Stoß aus dieser Strömung herausgeschleudert wird, sofort in den Hauptstrom zurückkehrt. Daher findet kein Verlust von Elektronenpaaren in der Strömung statt und damit kein Energieverlust, und der Strom fließt für immer. Dieser Effekt wird als Supraleitung bezeichnet.

Heliumatome sind auch Bosonen. Wenn die Temperatur niedrig genug ist, kommen sie auch in einen gemeinsamen Zustand und fließen ohne Energieverlust. Dieser Effekt wird als Suprafluidität bezeichnet.

### **Energie beim Austausch von Elektronen**

Wenn 2 Atome ein Elektron zwischen Zuständen mit der gleichen Energie  $E$  austauschen, kann dieser Austausch eine Bindung zwischen diesen Atomen erzeugen.

Dieser Austausch erzeugt 2 neue Basiszustände für das Elektron: Der Zustand 1) im Atom 1 und Zustand 2) im Atom 2, beide mit der Energie  $E$ , werden durch die kombinierten Zustände  $1) + 2)$  und  $1) - 2)$  ersetzt. Diese neuen Zustände haben die Energien  $E+A$  und  $E-A$ . Die Energie  $E-A$  bedeutet, dass man die zusätzliche Energie  $A$  investieren muss, um diese Atome zu trennen, sie sind also aneinander gebunden.

Diese so genannte kovalente Bindung ist der Mechanismus, der für die Bindung zwischen den Atomen Molekülen wie  $H_2O$  oder  $CO_2$  verantwortlich ist. Normalerweise wird diese kovalente Bindung zwischen 2 Atomen durch ein Elektronenpaar verursacht, d.h. ein Elektron an jedem Atom, und diese Elektronen tauschen ihre Plätze. In schematischen Zeichnungen von Molekülen wird jede Bindung durch ein Elektronenpaar durch eine kurze Linie zwischen den Atomen symbolisiert, wie zum Beispiel  $H-H$ . Es gibt Bindungen, die aus 2 Elektronenpaaren bestehen, wie bei  $O=C=O$ .

Wenn in einem Molekül Elektronen zwischen zwei verschiedenen möglichen Elektronenkonfigurationen dieses Moleküls ausgetauscht werden können und beide Elektronenkonfigurationen für sich die Energie  $E$  haben, erzeugt dieser Austausch erneut zwei neue Basiszustände mit den Energien  $E+A$  und  $E-A$  und damit eine erhöhte Stabilität der Verbindung. Im Benzolmolekül  $C_6H_6$  gibt es 2 Möglichkeiten für die Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen. Da die Elektronen zwischen diesen beiden Zuständen ausgetauscht werden können, ist der sechseckige Ring dieser Kohlenstoffatome sehr stabil.

In einem Atomkern, der aus Protonen und meist Neutronen besteht, tauschen diese Teilchen andere Teilchen, die so genannten Pionen, aus. Dadurch bleibt der Atomkern trotz der sehr starken gegenseitigen Abstoßung der positiv geladenen Protonen zusammen.

Heute wird sogar die elektrische Kraft zwischen zwei elektrischen Ladungen als ein

Austausch von Photonen zwischen diesen Ladungen angesehen.

In einem Metall können Elektronen zwischen vielen, vielen Atomen springen. Das bedeutet, dass sich in einem Metall ein Energieniveau in eine große Anzahl von Energieniveaus aufteilt, die nahe beieinander liegen, ein sogenanntes Band. Die unteren Bänder, die sogenannten "Valenzbänder", sind vollständig mit Elektronen gefüllt. In Bändern, die nicht oder nur teilweise gefüllt sind ("Leitungsbänder"), können Elektronen leicht in einen anderen Zustand gelangen. Deshalb können sie sich im Metall fast so leicht bewegen wie Atome in einem Gas.

Wenn ein einzelnes Elektron ein volles Band verlässt, befindet sich ein Loch im vollen Band. Ein benachbartes Elektron kann sich in dieses Loch bewegen und öffnet damit ein anderes Loch an seiner früheren Stelle. Dieses Loch wirkt wie ein Teilchen mit einer positiven elektrischen Ladung.

### Wahrscheinlichkeiten

Wenn ein Atom Energie aufnimmt, sendet dieses Atom diese Energie oft spontan wieder aus. Es ist jedoch unmöglich, den genauen Zeitpunkt vorherzusagen, zu dem dies geschehen wird, wir können nur eine Wahrscheinlichkeit angeben.

Nehmen wir zum Beispiel 100 radioaktive Atome, von denen 50% innerhalb von 5 Minuten zerfallen. Nach 5 Minuten mehr werden wir nur die Hälfte von 50 Atomen haben, nämlich 25 Atome, und nach weiteren 5 Minuten die Hälfte von 25, also etwa 12 Atome, und so weiter. Dies geschieht beim Zerfall radioaktiver Atome oder bei der Ausstrahlung von Licht.

Die Anzahl  $N$  der zum Zeitpunkt  $t$  vorhandenen Teilchen wird durch die Exponentialfunktion beschrieben:  $N(t) = N(t=0) \cdot e^{-s \cdot t}$ .

Auch für die Absorption eines Stroms von Licht oder Teilchen in der Materie nimmt die Intensität  $I$  mit dem Weg  $x$  ab, der in der Materie zurückgelegt wird:

$$I(x) = I(x=0) \cdot e^{-k \cdot x}$$

Dieser Effekt ist in Wolken leicht zu sehen: Dünne Wolken sind hell, dicke Wolken sind dunkel.

Wenn Licht ausgesandt wird, wird es genau an 1 Punkt und nur in 1 Augenblick absorbiert. Aber die Quantenphysik kann nur die Wahrscheinlichkeit vorhersagen, dass es an dieser Stelle passiert. Diese Wahrscheinlichkeit kann berechnet werden, als ob sich das Licht irgendwie wie eine Welle ausbreitet. Der gleiche Effekt gilt auch für Teilchen, wie z. B. Elektronen. Es gibt keine Gegenstände in unserer Alltagserfahrung, die sich gleichzeitig wie Wellen und Teilchen verhalten.

Dies hat mehrere Konsequenzen:

- 1) Es gibt Interferenzeffekte, die dazu führen können, dass Orte mit hoher und niedriger Wahrscheinlichkeit eng beieinander liegen.
- 2) Gebundene Teilchen haben vergleichsweise wenige mögliche Zustände.

3) Für das Wasserstoffatom können diese Wahrscheinlichkeiten für alle Basiszustände berechnet werden. Es kann für jeden der Zustände gesehen werden, wo sich in diesem Zustand ein Elektron befindet.

4) Wenn ein Elektron an ein Atom gebunden ist, ist es auf einen bestimmten Bereich um das Atom herum beschränkt. Die Welleneigenschaften erlauben jedoch, dass das Elektron mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit außerhalb dieses Bereiches auftreten kann. Wenn zwei solcher Bereiche nahe genug beieinander sind, bedeutet dies, dass sich das Elektron von einem Bereich in den anderen bewegen kann. Dieser Effekt wird als Tunneleffekt bezeichnet, da ein Tunnel den Verkehr ohne Auf- und Abstieg zwischen 2 Regionen ermöglicht, die durch einen Bergrücken getrennt sind.

5) Der gesunde Menschenverstand, der auf unserer täglichen Erfahrung basiert, reicht nicht aus, um alles zu verstehen.

**Literatur:**

Houghton, John T.: The physics of atmospheres. Cambridge 1977.

Unsöld, Albrecht und Baschek, Bodo: Der neue Kosmos. Eine Einführung in die Astronomie und Astrophysik. Berlin, Heidelberg: 1999<sup>6</sup>

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B. und Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics. Mainly Mechanics, Radiation and Heat. Reading (Massachusetts), Menlo Park (California), London, Sydney, Manila 1963.

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B. und Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics. Quantum Mechanics. Reading (Massachusetts), Menlo Park (California), London, Sydney, Manila 1963.

\*\*\* Übersetzt mit [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (kostenlose Version) \*\*\*

© Dr. Reiner Hennig, email: [henniglumsum@yahoo.com](mailto:henniglumsum@yahoo.com)