

# Physikalische Grundlagen für das Verständnis der Chemie.

Roland Heynkes

10.9.2005, Aachen

Kaum ein anderes Fach ist bei Schülern so unbeliebt wie die Chemie, und meines Erachtens liegt die Ursache hierfür hauptsächlich in didaktischen Fehlern seitens der Lehrpläne. Dem entspricht die Qualität der Schulbücher und unter den vielen mir persönlich bekannten Lehrern waren mit einer allerdings wirklich genialen Ausnahme die Chemielehrer zumindest didaktisch die mit Abstand schlechtesten. Während Schüler gerne verstehen, was sie lernen sollen, ist der Chemie-Unterricht meistens entweder rein deskriptiv oder er geht in seinen Erklärungen über die Köpfe der Schüler hinweg. Schon von der Themenvorgabe der Lehrpläne und ihrer mangelhaften Abstimmung mit den Physiklehrplänen her ist der Chemie-Unterricht oft so angelegt, daß Schüler von ihm nur mit einem Verständnis und Vorwissen wirklich profitieren könnten, welches sie normalerweise gar nicht haben können. Dabei ist es eigentlich gar nicht so viel, was man für das Verständnis der Schulchemie wissen und verstehen muß. Es müsste den Schülern nur rechtzeitig vermittelt werden. Zu letzterem will ich mit einigen grundlegenden Erklärungen aus dem Bereich der Physik beitragen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Atome-Versteher haben es leichter.</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Es ist nur nicht ganz leicht, einer zu werden.</b>	<b>1</b>
2.1	Luftwiderstand ist für Atome und Elektronen kein Problem. . . . .	1
2.2	Atome haben auch keine Knautschzone. . . . .	2
2.3	In der Welt der winzigen Atome treten Quanteneffekte auf. . . . .	2
<b>3</b>	<b>Auch Licht ist gequantelt.</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Farben können unterschiedliche Ursachen haben.</b>	<b>5</b>
4.1	Die Farben nicht selber leuchtender Objekte. . . . .	5
4.2	Die Farben selber leuchtender Objekte. . . . .	5
<b>5</b>	<b>Die Welt der Atome kann man nicht heimlich beobachten.</b>	<b>5</b>

# 1 Atome-Versteher haben es leichter.

Anstatt die Eigenschaften und Reaktionen der chemischen Elemente und ihrer Verbindungen mühsam zu pauken und viel zu schnell wieder zu vergessen, sollte man lieber lernen, was die Eigenschaften der Atome bestimmt. Dann muß man nämlich fast nur noch wissen, wo im Periodensystem ein Element steht. Aus den Positionen im Periodensystem kann man meistens relativ leicht ablesen, ob bzw. wie Atome mit einander reagieren werden und welche Eigenschaften die Reaktionsprodukte haben werden.

## 2 Es ist nur nicht ganz leicht, einer zu werden.

Bevor Lernenden die chemischen Elemente zu vertrauten und in ihrem Verhalten vorher-sagbaren Bekannten werden, müssen die Atome an sich verstanden werden. Das ist gar nicht so leicht, weil sie kaum vorstellbar viel kleiner als unsere wahrnehmbare Umgebung sind. In der Welt der Atome treten ganz andere Effekte auf, als wir sie aus unserem Erleben gewohnt sind, als wir sie intuitiv erwarten und sogar als vermeintlich selbstverständlich voraussetzen.

### 2.1 Luftwiderstand ist für Atome und Elektronen kein Problem.

Vom Fahrrad- oder Autofahren sind wir es gewohnt und halten es intuitiv für ein Naturgesetz, daß man ständig in die Pedale treten oder wenigstens Gas geben muß, wenn man eine bestimmte Geschwindigkeit halten will. Von unserem Größenmaßstab aus betrachtet sind wir schließlich ganz dicht von unzähligen Luftmolekülen umgeben und können uns keinen Millimeter bewegen, ohne mit ihnen zu kollidieren. Dem gesunden Menschenverstand scheint daher die Feststellung der Physiker zu widersprechen, daß sich bewegende Atome oder Elektronen nicht durch eine Art Roll- oder Luftwiderstand langsam abgebremst werden. Bis in die Neuzeit hinein konnten nur wenige Menschen die schon in der Antike von Leukipp, Demokrit und Epikur als Notwendigkeit erkannte Vorstellung akzeptieren, daß sich insbesondere in Gasen zwischen den Teilchen einfach nichts als völlig leerer Raum befindet. Aber für die nur wenige zehnmillionstel Millimeter<sup>1</sup> großen Atome ist ein Millimeter eine gewaltige Entfernung und verglichen mit ihren Durchmessern sind die Abstände zwischen den Molekülen der Luft sehr groß.

Wie zuerst Sir Ernest Rutherford zwischen 1911 und 1913 mit seinem berühmten Streuungsexperiment<sup>2</sup> zeigen konnte, ist selbst innerhalb eines Atoms zumindest die Elektronenhülle ein fast leerer Raum, in dem die Elektronen nicht abgebremst werden. Andernfalls wären längst alle Elektronen in ihre Atomkerne gestürzt und es gäbe im Universum

---

<sup>1</sup>Die Atomdurchmesser liegen laut Periodensystem der VCH Verlagsgesellschaft von 1992 zwischen 0,746 (Wasserstoff) und 5,310 (Caesium) Angström, 10 Angström ergeben 1 Nanometer, 1 Nanometer =  $10^{-9}$  Meter

<sup>2</sup>Er bestrahlte eine nur rund 1000 Atomschichten dicke Goldfolie mit einem Strahl von Alphateilchen (zweifach elektrisch positiv geladene Atomkerne von Heliumatomen) und beobachtete mit Hilfe von Photoplatten, daß die Mehrheit der Alphateilchen die Metallfolie fast ungestört durchdringt (<http://www.u-helmich.de/che/09/03-atombau/atombau03.html>). Die Goldatome erwiesen sich also als keineswegs massive und undurchdringliche Teilchen, wie man das nach den fast zweieinhalb Tausend Jahre alten Vorstellungen der griechischen Naturphilosophen Anaxagoras, Leukipp, Demokrit und Epikur von unteilbaren Atomen als Grundbausteinen der Materie erwartet hätte. Als mittels Alphateilchen-Beschuß nicht teilbar und undurchdringlich erwiesen sich nur die winzigen Atomkerne, welche aufgrund ihrer positiven Ladung und ihrer großen Masse einen kleinen Teil der Alphateilchen ablenkten bzw. abprallen ließen.

keine Atome mehr. So aber betragen die Durchmesser der massiven Atomkerne größenordnungsmäßig lediglich einige Hunderttausendstel<sup>3</sup> des Durchmessers eines Atoms (beim Wasserstoff etwas weniger als ein<sup>4</sup> Fermi und für die übrigen Elemente<sup>5</sup> etwa 2-15 Fermi<sup>6</sup>). Elektronen besitzen nur rund ein Zweitausendstel der Protonenmasse und man konnte bei ihnen bisher keine Ausdehnung und Strukturierung nachweisen<sup>7</sup>. Besäße ein Atomkern einen Durchmesser von einem Millimeter, dann überträfe die Fläche eines Querschnittes durch die praktisch leere Elektronenhülle mit einem Durchmesser von rund 100 Metern deutlich die Fläche eines Fußballfeldes. Atomkerne und Elektronen bewegen sich also innerhalb eines Atoms in einem nahezu leeren Raum, in welchem sie durch Anziehungs- bzw. Abstoßungskräfte ihre Bewegungen gegenseitig beeinflussen, in dem aber keine Bewegungsenergie durch Reibung verloren geht.

In atomaren und subatomaren Größenordnungen wird daher Energie nur für positive, negative und seitliche Beschleunigungen gebraucht, nicht aber für die Aufrechterhaltung einer geradlinigen und gleichmäßigen Bewegung.

## 2.2 Atome haben auch keine Knautschzone.

Für uns sehr ungewohnt ist auch die Tatsache, daß beim Zusammenprall zweier Atome nicht wenigstens ein Teil ihrer kinetischen Energie für Verformungen verbraucht oder in Wärme umgewandelt wird. Aber Atome können mangels starrer Verbindungen nicht dauerhaft verformt werden und was wir in unserer makroskopischen Welt als Wärme empfinden, ist ja nichts als die durchschnittliche kinetische Energie der uns unmittelbar umgebenden Moleküle. Die Atome, Moleküle und Ionen selber sind aber nicht von einem noch feineren Medium umgeben, sondern von ungefähr gleich großen Teilchen. Wenn sie zusammenstoßen, dann prallen sie normalerweise von einander ab und die kinetische Energie der beteiligten Teilchen wird in vollkommen elastischen Stößen umverteilt, bleibt aber insgesamt gleich, sofern sie nicht teilweise in chemische Energie umgewandelt wird.

Wenn der Zusammenstoß von Atomen, Molekülen oder Ionen zu einer chemischen Reaktion führt, dann kann dabei die in den Bindungen steckende chemische Energie insgesamt zu- oder abnehmen. Da diese Energie ja irgendwo herkommen oder bleiben muß, ändert sich in solchen Fällen natürlich auch die kinetische Energie der beteiligten Teilchen. Sie können sich danach langsamer oder schneller bewegen. Da eine insgesamt schnellere oder langsamere Bewegung der Teilchen nichts anderes als eine Erhöhung oder Absenkung der Temperatur ist, kann man an der Temperaturänderung erkennen, ob eine chemische Reaktion die insgesamt in den chemischen Bindungen steckende Energie steigert oder senkt.

## 2.3 In der Welt der winzigen Atome treten Quanteneffekte auf.

Wenn ein Flugzeug mit gedrosseltem Schub zur Landung ansetzt, dann verliert es scheinbar vollkommen kontinuierlich und ohne jede erkennbare Sprunghaftigkeit ganz langsam an Geschwindigkeit und Höhe. Auch sonst kennen wir in unserer Welt der großen Dinge und Mengen fast nur kontinuierlich erscheinende Änderungen physikalischer Größen wie Geschwindigkeit, Höhe, Gewicht oder elektrische Ladung. Diese Alltagserfahrung macht

<sup>3</sup><http://www.einstein-online.info/de/navMeta/glossar/a/index.html>

<sup>4</sup><http://scienceworld.wolfram.com/physics/Proton.html>

<sup>5</sup>Nach der Näherungsformel Kerndurchmesser =  $2,4 \times 10^{-15}$  Meter  $\times \sqrt[3]{\text{relativeAtommasse}}$   
(<http://lexikon.astronomie.info/stichworte/Astrophysik.html#Atomkerndurchmesser>)

<sup>6</sup>1 Fermi oder Femtometer =  $10^{-15}$  Meter), Einhunderttausend Fermi ergeben 1 Angström

<sup>7</sup><http://www.joergresag.privat.t-online.de/mybkhtml/chap23.htm>

es uns so schwer verständlich, daß sich die selben physikalischen Größen in der winzigen Welt der Atome in abrupten (Quanten)Sprüngen verändern. Dabei kennen wir eigentlich Effekte der kleinen Anzahl oder Menge beispielsweise vom Würfeln oder vom Umgang mit Geld, bei dem wir gelegentlich Stückelungseffekte (Quantelungen) beobachten können.

Wenn etwas viele Tausend Euro kostet, dann kann man mit dem Preis praktisch kontinuierlich rauf oder runter gehen. Einen Preis von 1 Cent muß man aber mindestens verdoppeln, weil es zwischen einem und zwei Cent einfach nichts gibt, was man austauschen könnte. Genau so kann die positive elektrische Ladung eines Atomkernes immer nur ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung von  $1,602 \times 10^{-19}$  Coulomb<sup>8</sup> betragen, weil jedes Proton (positiv) genau wie jedes Elektron (negativ) genau diese Elementarladung besitzt. Außerdem kann sich die Energie eines Elektrons nicht kontinuierlich ein wenig erhöhen oder reduzieren, sondern die Energie eines Elektrons kann immer nur ganz bestimmte Werte annehmen. Entspricht seine Energie der kleinstmöglichen Menge, dann kann es sich nur in der ersten Elektronenschale befinden. Es kann mit dieser Energie nicht in den Kern stürzen und auch nicht in eine höhere Schale aufsteigen. Wird aber diesem Elektron eine weitere genau passende Energieeinheit zugeführt, dann kann es sich nicht mehr in der untersten Schale halten, sondern muß abrupt in die zweite Schale wechseln. Zwischen den Schalen können sich Elektronen nicht „aufhalten“, weil es bei so kleinen Mengen keine feineren Stückelungen der Energieportionen gibt.

Man darf sich allerdings Elektronen nicht als wie auf Planetenbahnen um den Atomkern kreisende Teilchen vorstellen, die aufgrund einer bestimmten kinetischen Energie nicht in den Kern stürzen. Ein kreisendes elektrisch geladenes Teilchen wäre nämlich ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld erzeugen würde, welches wiederum ein elektrisches Feld erzeugte. Würde also das Elektron des Wasserstoffs tatsächlich um dessen Proton kreisen, dann müsste es eine Strahlung aussenden und dadurch seine Energie (und Masse) einbüßen. Wasserstoff strahlt aber nicht und sein Elektron behält seine Energie. Man kann dieses Problem vermeiden, indem man Elektronen als stehende Wellen betrachtet. Dann wird weder Energie noch Masse transportiert und das Elektron kann seine Energie behalten. Stellt man sich ein Elektron als stehende Welle auf einer Kreisbahn vor, dann sind natürlich nur Bahnen möglich, deren Umfänge ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge des jeweiligen Elektrons darstellen. Daß Elektronen nur ganz bestimmte Energieniveaus annehmen können, gilt prinzipiell auch für die allgemeinere und noch weniger anschauliche Vorstellung, daß Elektronen keine Kreisbahnen, sondern teilweise ziemlich seltsam geformte Orbitale<sup>9</sup> besetzen.

Im Grunde kennen wir vom Umgang mit Geld auch das Problem, daß ein Kauf nicht zustande kommen kann, weil ein Kunde gerade nur große Geldscheine mit sich führt und der Verkäufer nicht wechseln kann. Das selbe „Problem“ haben auch Elektronen, die Energie nur in für sie genau passenden Mengen aufnehmen und abgeben können, weil sie selber nur ganzzahlige Vielfache einer kleinsten Energieeinheit besitzen können. Genau wie das Elektron selber besitzt auch Energie gleichzeitig Wellen- und Teilchencharakter, kann also nur in bestimmten Portionen übertragen werden. Generell erklären die Physiker, daß Materie und Energie nicht grundverschieden, sondern sogar in einander umwandelbar sind und aus kleinsten Einheiten bestehen, die gleichzeitig Teilchen- und Wellencharakter<sup>10</sup> besitzen. Diese kleinsten Einheiten in unserer makroskopischen Welt kontinuierlich erscheinender physikalischer Größen nennt man Quanten. Selbst die Übertragung von Kräften kann man sich als Austausch von Teilchen vorstellen, obwohl es dafür auch andere

---

<sup>8</sup><http://www.joergresag.privat.t-online.de/mybkhtml/chap23.htm>

<sup>9</sup><http://www.heynkes.de/Anna/hybridorbitale.pdf>

<sup>10</sup>Man nennt dies den Welle-Teilchen-Dualismus

Erklärungsmöglichkeiten gibt. So wird zum Beispiel die elektromagnetische Kraft durch Photonen übertragen.

### 3 Auch Licht ist gequantelt.

Natürlich ist auch jedes Photon gleichzeitig elektromagnetische Welle und Lichtteilchen, bei denen es Stückelungseffekte gibt und nicht alles beliebig variieren kann. Vor allem besitzen im leeren Raum alle Photonen die selbe Geschwindigkeit von  $2,9979 \times 10^{10}$  Zentimetern pro Sekunde. Dividiert man die Lichtgeschwindigkeit  $c$  (cm/s) durch die Wellenlänge  $\lambda$  (cm/Schwingung) eines Photons, dann erhält man die Anzahl der Wellen, die einen bestimmten Punkt binnen einer Sekunde passieren. Man nennt diesen Wert die Frequenz  $\nu$  einer Welle in Schwingungen  $S$  pro Sekunde  $s$ . Weil das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz eines Photons der Lichtgeschwindigkeit entspricht, muß mit zunehmender Wellenlänge seine Frequenz abnehmen.

$$\nu[S/s] = \frac{c[cm/s]}{\lambda[cm/S]} \iff c = \lambda \cdot \nu$$

Wenn Photonen auf Elektronen treffen, dann können sie nicht nur einen Teil ihrer Energie auf das Elektron übertragen. Ganz anders als wir es in unserer makroskopischen Welt kennen, kann ein Photon bei einem Zusammenstoß mit einem Elektron seine Energie nur entweder vollständig behalten oder vollständig abgeben und verschwinden.

Photonen können allerdings anders als die Elektronen eines Atoms nicht nur eine relativ kleine Anzahl ganz bestimmter Energiebeträge besitzen. Im Gegenteil können die Energiebeträge von Photonen praktisch stufenlos variieren, weil die Energie eines Photons von seiner Wellenlänge bzw. Frequenz abhängt, die über einen extrem großen Bereich stufenlos jeden beliebigen Wert annehmen können. Genau genommen können die Energiebeträge im Gegensatz zu den Wellenlängen der Photonen nicht wirklich jeden beliebigen Wert annehmen, weil sich der Energiebetrag  $E$  eines Photons aus der Multiplikation der Frequenz  $\nu$  mit einer Proportionalitätskonstanten, dem sogenannten Planckschen Wirkungsquantum ( $h = 6,6256 \times 10^{-27}$ ) ergibt ( $E = h \cdot \nu$ ). Da diese Konstante nicht unendlich klein ist, verursacht sie Sprünge im Spektrum der möglichen Energiezustände von Photonen. Weil das Plancksche Wirkungsquantum aber extrem klein ist, kann man diese winzigen Sprünge normalerweise getrost vernachlässigen.

Elektromagnetische Strahlung mit stufenlos über einen sehr breiten Bereich variierenden Wellenlängen strahlen Sterne aus, aber auch Glühbirnen kommen dem Ideal des schwarzen Strahlers<sup>11</sup> schon recht nahe. Insgesamt erscheint uns das Licht von Glühbirnen und der Sonne annähernd weiß und wir erkennen normalerweise nicht, daß es tatsächlich ein Gemisch unzähliger Farben bzw. Wellenlängen enthält. Das ändert sich aber, wenn wir Regenbögen sehen. In ihnen sehen wir das ganze Spektrum der sichtbaren Farben, weil Photonen mit verschiedenen Wellenlängen an den Oberflächen von Regentropfen mit etwas unterschiedlichen Winkeln reflektiert werden. Wenn gerade kein Regenbogen zur Hand ist, dann kann man zur Sichtbarmachung des Farbspektrums einer Lichtquelle auch ein Prisma benutzen.

---

<sup>11</sup>Ein idealer schwarzer Strahler schluckt jegliches auf ihn treffendes Licht. Deshalb strahlt elektromagnetische Strahlung ausschließlich aufgrund seiner eigenen Wärme ab. Dabei hängen die Größe und die spektrale Verteilung der Strahlung allein von der Temperatur des schwarzen Strahlers ab. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Strahlung zu, und ihr Maximum verschiebt sich in Richtung kürzerer Wellenlängen.

## **4 Farben können unterschiedliche Ursachen haben.**

Uns scheint die Natur sehr farbig zu sein, und das hilft uns enorm bei der Unterscheidung der verschiedenen Objekte. In Wirklichkeit empfangen allerdings unsere Augen nur unterschiedliche Spektren elektromagnetischer Wellen und reagieren auch nur auf drei sehr kleine Ausschnitte dieser meistens sehr breiten Spektren. Anstatt also die Natur wirklichkeitsgetreu abzubilden, messen die Farbrezeptoren in unseren Augen lediglich die Lichtintensitäten in den Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, die wir blau, grün und rot nennen. Die Meßergebnisse werden als Nervenimpulse zum Gehirn geleitet, wo aus der praktisch unendlich großen Anzahl möglicher Kombinationen unterschiedlicher Intensitäten dieser drei Grundfarben die uns bekannte Farbenvielfalt berechnet wird. Selbst dieses sehr selektive Herauspicken blauer, grüner und roter Farben funktioniert nur am Tag bei ausreichend hohen Lichtintensitäten. Nachts reicht hierfür die Sensitivität der Zapfen unserer Retina nicht aus und wir sehen mit den 1000-fach lichtempfindlicheren Stäbchen nur noch Hell-Dunkel-Unterschiede.

### **4.1 Die Farben nicht selber leuchtender Objekte.**

Nicht selber leuchtende Objekte sind für uns sichtbar, weil sie das Licht leuchtender Objekte nicht perfekt spiegeln oder unvollständig durchscheinen lassen. Vielmehr absorbieren (Pigmentfarben) sie einen Teil des Lichtes, oder sie zerlegen (Strukturfarben) es wie ein Prisma.

### **4.2 Die Farben selber leuchtender Objekte.**

Leuchtende Objekte können entweder selbst Energie freisetzen und diese als elektromagnetische Strahlung abstrahlen, oder sie werden durch Photonen mit genau passenden Energieinhalten angeregt und strahlen dann selbst in der zunächst aus dem Lichtspektrum heraus gefilterten Farbe. Fällt das anregende Licht gleichmäßig aus allen Richtungen auf solche Objekte, dann ist dieser Effekt nicht erkennbar, weil Lichtabsorption und Lichtemission sich genau ergänzen. Passiert aber beispielsweise das Licht eines Sterns auf dem langen Weg in unsere Augen einen Nebel, dann fehlen anschließend dem Lichtspektrum des Sterns die absorbierten Frequenzen. Denn während der größte Teil des Licht dieses Sterns seinen Weg in der ursprünglichen Richtung weiter fortsetzen kann, verteilt sich das von dem zum Leuchten gebrachten Gas emittierte Licht gleichmäßig in alle Richtungen. Deshalb leuchtet das Gas nur in dieser einen Farbe, wenn ein Beobachter den Nebel ohne direkt durch ihn hindurch gehendes Licht sieht.

## **5 Die Welt der Atome kann man nicht heimlich beobachten.**

Das normale Leben in unserer großen Welt vermittelt uns den Eindruck, man könne die Dinge durch Beobachtung erforschen, ohne sie dabei zu beeinflussen. Tatsächlich spielt es ja beispielsweise für ein in 10 Kilometern Höhe fliegendes Flugzeug überhaupt keine Rolle, ob sein Flug von niemandem, wenigen oder vielen Menschen beobachtet wird. Auf das Flugzeug hat es keinen Einfluß, ob das von seinen Oberflächen reflektierte Licht in

den Weltraum entschwindet, vom Erdboden verschluckt wird oder auf die Netzhaut eines Menschen fällt.

Je kleiner aber ein Objekt ist, umso kürzer müssen auch die Wellenlängen des Lichtes oder allgemeiner ausgedrückt der elektromagnetischen Strahlung sein, damit sie von dem Objekt reflektiert werden. Lange Radiowellen mit Wellenlängen oberhalb eines Kilometers eignen sich zum Beispiel nicht zur Darstellung eines deutlich kleineren Flugzeuges. Uns stört das nicht, solange es von der Sonne mit dem relativ kurzwelligen sichtbaren Licht beschienen wird. Nachts können wir Flugzeuge zur Beobachtung auch mit Radarwellen bestrahlen, ohne damit ihren Flug zu beeinflussen oder ihre Passagiere zu verletzen. Aber sichtbares Licht besitzt je nach Farbe Wellenlängen zwischen 4000 und 8000 Angström und ist damit um vier Größenordnungen zu langwellig, um damit Atome zu untersuchen.

Je kürzer aber die Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung werden, umso höher ist ihre Energie und umso gravierender ist ihr Einfluß auf das zu beobachtende Objekt. Die für eine Untersuchung von Atomen erforderliche Strahlung ist tödlich und zerstört oder bewegt zumindest kleine Untersuchungsobjekte. Deshalb wird beispielsweise die Flugbahn eines Elektrons durch den Versuch seiner Beobachtung massiv beeinflusst und lässt sich demnach auch nicht beobachten.