

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 1

Sammlung aktueller Beiträge aus der
physikdidaktischen Forschung

ISBN 3 - 7896 - 0090 - 3

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1989

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Carl Erik Magnusson, Per Olof Zetterberg

Die permanente Suche nach dem "richtigen" physikalischen Modell

Physik ist eine experimentelle Wissenschaft. Die Ergebnisse vieler Experimente werden in wenigen Modellen zusammengefaßt, die als Gesetzmäßigkeiten in eine mathematische Form gekleidet werden. Deshalb wirken sie abstrakt und schwer verständlich. Allgemein gibt es verschiedene Modelle, um ein Phänomen zu beschreiben. Ältere Modellvorstellungen werden oft im Unterrichtssystem beibehalten, selbst wenn neuere Modelle passender sind.

Aus der Energiedebatte bekommt man Beispiele für die Kluft zwischen der Welt der Wissenschaft und Technologie und dem Verständnis in der breiten Öffentlichkeit. Physik wird oft die "Wissenschaft von der Energie" genannt. Deshalb hat das Prinzip von der Erhaltung der Energie eine fundamentale Bedeutung in der Physik. Dieses Prinzip hat den Charakter eines Axioms, das theoretisch nicht in allgemeiner Form bewiesen werden kann. Das Prinzip läßt den Schluß zu, daß Energie nicht "verschwinden" kann, und dies bedeutet, daß die Verwendung von Energie nicht bedeutet, daß man sie verbraucht. Der Begriff "Energiekrise" meint also nicht einen Mangel an Energie allgemein, sondern einen Mangel von geeigneten Formen von Energie.

Die "Energieerzeugung" bedeutet somit die Versorgung mit ausreichend Leistung und Energiedichte am richtigen Platz und zur richtigen Zeit. (Der Nobelpreisträger des Jahres 1978, Pjotr Kapitsa, verdeutlichte 1975 bei einer Rede vor sowjetischen Wissenschaftlern die Bedeutung des Konzepts "Energiedichte", bei der Wahl zwischen verschiedenen Technologien zur Bereitstellung von Energie. (Die schwedische Energiedebatte nahm von seinen Ideen kaum Notiz). Der Begriff "Energieverbrauch" beinhaltet die Übertragung einer Energie von einer hohen Dichte auf eine niedrigere. Die Energie verwandelt sich in Formen (schlußendlich Hitze) mit einer niedrigeren Qualität. In diesem Bild hängt die "Qualität der Energie" ab von der Dichte und den Transportmöglichkeiten.

Die Stufen technologischen Fortschritts in der Geschichte haben eines gemeinsam, nämlich die Konstruktion von Maschinen, die einen immer größeren Fluß von Energie pro Volumen und Zeiteinheit benötigen. Der Humanist Leonardo da Vinci analysiert in seinem "Kodex Madrid" Schrauben, Räder und andere Maschinenteile in Bezug auf ihre Fähigkeit Leistung und Bewegung zu übertragen. Aus unserer Sicht sind solche mechanischen Übersetzungen primitiv. Wenn man das von Christopher Polhem konstruierte, kilometerlange Übertragungssystem des schwedischen Falu-Bergwerks betrachtet - damals eine technische Meisterleistung - erkennt man, daß diese auch gefährlich waren.

Die Dampf-Technologie stellte eine technische Verbesserung dar. Diese wurde

für die Weltausstellung in Philadelphia 1876 von Carnot, einem weiteren berühmten Humanisten, vollendet. Als ein modernes Beispiel der technologischen Entwicklung kann man den kleinen, wassergekühlten ABB-Generator von Barsebäck (Kernkraftwerk) betrachten, der mehr als die gesamte Stadt Malmö selbst zu Zeiten der Spitzenauslastung mit ausreichend elektrischer Leistung versorgen kann.

Beim Gebrauch von Modellen kommt es nicht selten vor, daß man mehr dem Modell glaubt als der Wirklichkeit, die das Modell zu beschreiben versucht. Während der Energie-Debatte wurde behauptet, daß die Strahlungsintensität des radioaktiven Abfalls niemals Null werden kann, gemäß der Formel:

$$I(t) = I_0 \cdot \exp(-k \cdot t)$$

Aber dieses Modell ist nur richtig, wenn die Probe eine sehr große Anzahl radioaktiver Atome beinhaltet. Wenn das letzte Atom zerfallen ist, ist $I(t)$ exakt Null. Umso größer die Aktivität des Abfalls ist, umso größer ist k und umso schneller wird die Intensität reduziert.

Der unkritische Glaube an ein Modell ist der gleiche logische Fehler, wie wenn man einer Landkarte mehr glaubt, als der Realität, wenn beide nicht übereinstimmen. Eine solide experimentelle Grundlage in allen Bereichen des Physikunterrichts vermittelt ein Gefühl für die Anwendbarkeit und die Grenzen eines Modells. Ein Modell kann nur benützt werden, wenn es in Experimenten verifiziert wurde. Ein historisches Beispiel ist die Unzulänglichkeit der Newtonschen Mechanik bei hohen Geschwindigkeiten oder in den Dimensionen von Atomen oder kleiner.

Für die Atomphysik ist das Bohrsche Atommodell qualitativ eine gute Beschreibung, aber für quantitative Berechnungen muß das wellenmechanische Modell benützt werden. Dieses hat wiederum einen grundlegenden Nachteil gegenüber dem Bohr-Modell, weil es nicht konsistent ist mit den Gesetzen der fundamentalen klassischen Physik.

Bei der Behandlung des Lichts, stellen die meisten Lehrbücher aus historischen Gründen das Wellen-Modell in den Vordergrund. Bereits 1690 zeigte der Physiker Christian Huygens einige optische Phänomene, die mit dem Wellen-Modell erklärt werden können. Durch Maxwells überzeugende Beschreibung der elektromagnetischen Wellen wurde dieses Modell bis heute sehr dominant. In Schweden gibt es bei den zentral gestellten Physik Prüfungen oft eine Tendenz zu schwierigen wellenoptischen Problemen mit wenigen Anknüpfungspunkten an die Vorstellungswelt der Schüler.

Nach unserer Meinung ist das Photonen-Modell des Lichts die einfachste Möglichkeit, um alltägliche optische Phänomene zu erklären. 1900 wird oft als Geburtsjahr des Photonen-Modells gesehen, aber bereits 1704 hat Isaac Newton

ein Teilchen-Modell für Licht veröffentlicht. Ein Grund, warum Newton das Licht aus Partikeln (Korpaskeln) aufgebaut wähnte, war die geradlinige Ausbreitung, die dem Inertial Gesetz entspricht.

Das Teilchen-Modell erhielt nicht die volle experimentelle und theoretische Unterstützung bis zu den Tagen von Planck und Einstein. Um die Wärme-Strahlung eines "schwarzen Körpers" zu erklären, mußte Planck annehmen, daß die Strahlung aus Photonen der Energie $h \cdot f$ besteht. Diese quantenoptische Sicht wurde auch von Einstein bei der Erklärung des Photoelektrischen Effekts (1905) verwendet. In Abbildung 1 kann man die verschiedenen Arten von Photonen-Strahlung in verschiedenen Energie- bzw. Frequenzbereichen (Wellenlängen-Bereiche) sehen. Man beachte, daß sich die verschiedenen Strahlungsarten nur in der Photonenenergie unterscheiden.

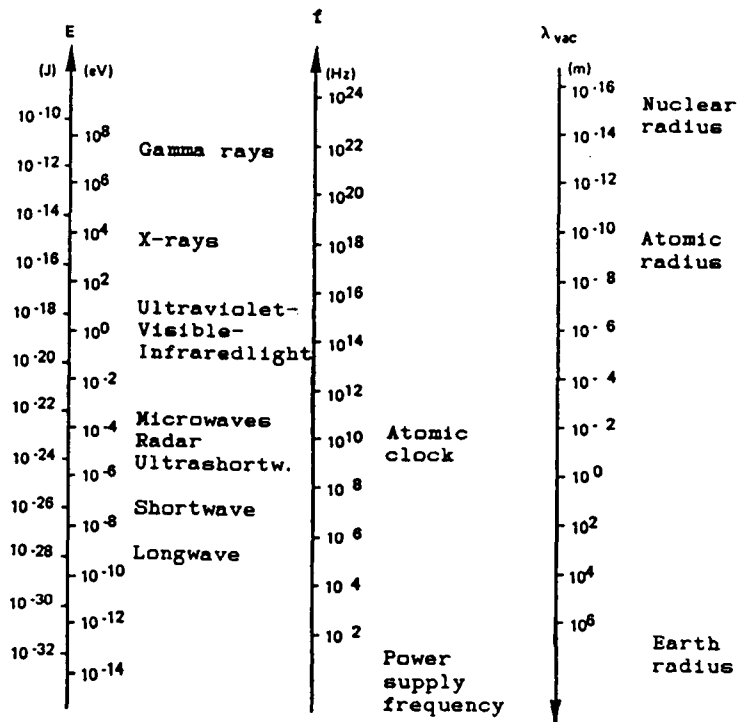


Abb. 1: Das elektromagnetische Spektrum

Umso höher die Frequenz und damit die Photonenenergie, desto überzeugender ist der Teilchencharakter. Der Wellencharakter ist am überzeugendsten bei niedrigen Frequenzen. Zwischen diesen beiden Extremen liegt der sichtbare Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums. Durch die starke Position, die das Wellen-Modell durch die Arbeiten von Huygens und Maxwell erhalten hat, scheint es, daß dieses Modell die Optik beherrscht. Viele optische Experimente können leichter mit dem Photonen-Modell erklärt werden, das nun mehr als 80 Jahre alt ist.

Ein Lichtstrahl kann als Strom von Photonen verstanden werden. Wie alle anderen bewegten Teilchen kann das Photon gemäß der de Broglie Gleichung leicht

mit einer Welle verknüpft werden; diese verknüpft den Impuls p , eine typische Größe für ein Teilchen, mit einer Wellenlänge, einer typischen Größe für eine Welle

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad .$$

Im Photonen-Modell wird die Photonen Energie W_f als eine grundlegende Charakteristik der Strahlung betrachtet.

Die Photonenenergie bestimmt die Frequenz f der erzeugten Welle. Die Frequenz als primäre Charakteristik muß unterschieden werden von der Wellenlänge, die sich mit dem Medium ändert. Der visuelle Eindruck von Licht kann als ein Resonanz Phänomen betrachtet werden; dieses hängt ab von der Frequenz bzw. der Energie der Photonen. Dann ist es verständlich, daß die Farbe eines Laserstrahls nicht wechselt, wenn dieser von Luft in Wasser wechselt, obwohl sich dabei seine Wellenlänge ändert.

Das Photonen-Modell gibt eine definierte Beschreibung nach dem Energieinhalt des Strahls: Damit ist entweder eine hohe Photonenenergie gemeint (dies ist wichtig beim Photoelektrischen Effekt) oder der gesamte Energiefluß einer Anzahl von Photonen (dies ist wichtig in der Energieerzeugung).

Die Auswertung des Planckschen Strahlungs-Gesetzes macht die Verwendung des Photonen Modells notwendig und das Gesetz ist am einfachsten in der Frequenz-Form dargestellt

$$\Phi_{1sr} = \frac{2hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{hf/(kT)} - 1} \quad (\text{W}/(\text{sr}, \text{Hz})) \quad .$$

Zum Beispiel kann man hier sofort sehen, daß der Exponent im Nenner ohne Dimension ist.

Das Wiensche Verschiebungs-Gesetz ist viel leichter auszudrücken, wenn man die Frequenz statt der Wellenlänge benützt: f_{\max} ist proportional zu T . Wenn die Strahlungskurve für einen Körper der Temperatur 3000 K ein Maximum bei ungefähr $180 \cdot 10^{12}$ Hz hat, dann liegt das Maximum für 6000 K bei $360 \cdot 10^{12}$ Hz.

Graphisch entspricht dies einer Geraden durch den Ursprung, die viel leichter zu verwenden ist, als die Hyperbel, die man bei der Darstellung mit der Wellenlänge erhält. Der Treibhauseffekt impliziert, daß die ausgesandte Strahlung mehr niederenergetische Photonen enthält, die das "Glas" nicht passieren können, als die einfallende Strahlung. Das ist eine natürliche Konsequenz des Wienschen Verschiebungs-Gesetzes, entsprechend der niedrigeren Temperatur des strahlenden Körpers.

Das menschliche Auge ist empfindlich für Licht im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 800 nm, dies entspricht grob einem Frequenzbereich von $400 \cdot 10^{12}$ Hz bis $800 \cdot 10^{12}$ Hz. (Man überprüfe dieses "Zahlenspiel"). Die Empfindlichkeit ist ziemlich niedrig außerhalb des Intervalls $400 \cdot 10^{12}$ Hz bis $700 \cdot 10^{12}$ Hz, wie man in Abbildung 2 sehen kann. Näherungsweise kann man die Sonne als "vollständigen Strahler" von ca. 6000 K (entsprechend der Planckschen Strahlungsformel) betrachten. Das große Diagramm in Abbildung 2 zeigt, daß das Intensitätsmaximum der Sonne außerhalb des Empfindlichkeitsbereiches des Auges liegt.

Es gibt Lehrbücher, die fälschlicherweise annehmen, daß die maximale Empfindlichkeit des Auges genau beim Intensitäts-Maximum der Sonne liegt, und dies als eine Anpassung des menschlichen Auges an die Umgebung interpretieren. Andererseits liegt das Intensitäts-Maximum der Sonne zentral bezüglich des optischen Fensters der Atmosphäre; damit ist das Frequenzintervall gemeint, in dem die Atmosphäre für Licht durchlässig ist.

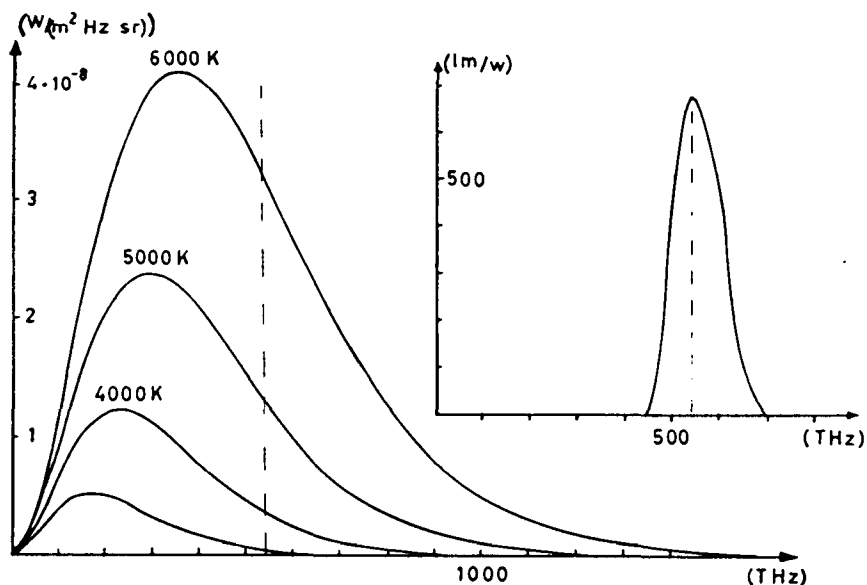


Abb.2: Das kleine Diagramm zeigt die Empfindlichkeitskurve des Auges. Das große Diagramm zeigt die Planckschen Kurven für verschiedene Temperaturen des Strahlungskörpers. Die Strahlung der Sonne entspricht ungefähr der 6000 K Kurve. Die vertikale gestrichelte Gerade zeigt die Frequenz, die dem Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges entspricht.

Die Emission und Absorption von Photonen in Atomen, die der Energiedifferenz W zwischen zwei Energieniveaus entsprechen, kann nicht klassisch mit dem Wellen-Modell des Lichtes erklärt werden. Bohr "löste" das Problem, indem er postulierte $W = h \cdot f$. Auch die Lumineszenz kann nicht im Wellen-Modell, jedoch im Teilchen-Modell erklärt werden. Ein Elektron kann in Schritten von einem hohen Energieniveau zu einem Grundzustand springen, indem es viele Photonen gemäß $W = \sum h f_i$ aussendet. Wenn das Elektron im Grundzustand durch Photonenabsorption angeregt wird, so entspricht dies $W = h f$, wobei gilt $f = \sum f_i$.

Um die stimulierte Emission und den Laser zu erklären, ist das Photonen-Modell notwendig. Es kann interessant sein, zu sehen, daß die Anwendung des Photonen-Modells auf den Laser zu Licht einer wohldefinierten Wellenlänge führt; damit sind mit Laser Licht Interferenz Effekte fast unvermeidbar.

Das Wellen-Modell und die Beschreibungen, die die Wellenlänge benutzen, sind notwendig bei der Beschreibung von Interferenz-Erscheinungen. Üblicherweise haben Gitterspektrographen einen geeigneten Aufbau, daß die Dispersion eine fast lineare Abhängigkeit zur Wellenlänge zeigt. Dies macht die Auswertung spektraler Linien sehr einfach. Bei der Benutzung eines Prismen-Spektrographen dagegen ist die Dispersion nahezu linear, wenn man die Spektrallinien in Frequenzen darstellt.

Bei der Untersuchung der Energiestruktur von Atomen im Rahmen der Spektroskopie, wird man sich früher oder später mit der Photonenenergie der Strahlung oder mit Größen beschäftigen, die proportional zur Energie, also zur Frequenz oder zur Wellenzahl sind.

Der Teilchen-Wellencharakter wurde oft als ein Paradoxon dargestellt, aber stattdessen sollte der Wellencharakter als eine von weiteren Eigenschaften des Photons angesehen werden. Eine andere Eigenschaft ist die der Gravitation. Es ist bemerkenswert, wie sich in der Geschichte der Naturwissenschaft immer wieder eine Tendenz zu einer vereinfachenden "Entweder-Oder"- Logik abzeichnet.