

Kann man Atome sehen? – Quantenphysik am Gymnasium in Form eines Leitprogramms

Hans Peter Dreyer

Quantenphysik am Gymnasium - ist das sinnvoll? Und soll dies auch gleich noch in einer anderen Unterrichtsform geschehen? – Auf diese berechtigten und weitreichenden Fragen wird hier keine Antwort gegeben. Ich möchte nur berichten, welche Ziele wir für eine kurze Unterrichtssequenz zur Quantenphysik gewählt haben, welchen Weg wir vorschlagen und was Schülerinnen und Schüler davon halten, wenn sie mit einem ETH-Leitprogramm individuell arbeiten.

In der deutschsprachigen Schweiz stehen für den Physikunterricht in den Klassen 10, 11 und 12 meist je zwei Lektionen pro Woche zur Verfügung. (Daß es in unserem föderalistischen Staatenbund 26 divergierende Systeme gibt, versteht sich von selbst. Es wird Sie auch nicht überraschen, daß die Gymnasien sich in einer Phase mit tiefgreifenden Reformen befinden.) Umfragen zeigen, daß die Mehrheit der Maturanten unsere Schulen verläßt, ohne im Physikunterricht etwas über Quanten gelernt zu haben. Für Ärztinnen, Ingenieure und Naturwissenschaftler ist das nicht schlimm: die Universität wird nachholen. Aber die zukünftigen Juristen und Philologinnen, Psychologinnen und Sozialwissenschaftler: sie werden die Welt nur vom Standpunkt der Newtonschen Physik betrachten können. Ein Blick in den Bereich, in dem das vertraute Prinzip von Ursache und Wirkung sich auflöst, gehört – scheint uns – zur Allgemeinbildung.

Angestrebte Ziele

Die Absicht des Lehrmittels ist es zu zeigen, daß im Bereich des Mikrokosmos die Newtonsche Mechanik das Verhalten der Natur nicht korrekt beschreibt. Die jungen Leute sollen erkennen, daß "der gesunde Menschenverstand" oft nicht ausreicht und daß nicht überall Anschaulichkeit verlangt werden kann. Was sie im Physikunterricht gelernt – und oft mühsam verstanden – haben, ist nicht der Weisheit letzter Schluß. Indem der Unterschied zur klassischen Physik bewußt wird, realisieren die Lernenden den Aspektcharakter der Physik, und sie erhalten ein Beispiel dafür, daß wissenschaftliche Aussagen falsifizierbar sein müssen. Zwei weitere Ziele, die auch erstrebenswert scheinen mögen, können in der kurzen Zeit nicht anvisiert werden: Das Feld der quantitativen Experimente, beispielsweise mit dem Wasserstoffspektrum, bleibt brach. Es gelingt auch nicht, eine Brücke zum Chemieunterricht zu bauen. Meist werden dort die Elektronen in den Orbitalen zu ganz neuartigen Dingen, die – aus der Sicht der Schüler/innen – mit den Partikeln der Kathodenstrahlröhren außer dem Namen nichts Gemeinsames haben. Wir haben die Quantenphysik in drei Kapitel unterteilt. In jedem taucht die charakteristische Naturkonstante h in einem neuen Zusammenhang auf: Bei Energie und Impuls der Photonen, mit der de Broglie-Wellenlänge und in der Unschärferelation. Dreimal wird die im Titel gestellte Frage etwas genauer beantwortet, indem nacheinander

das Lichtmikroskop, das Elektronenmikroskop und das Tunnelmikroskop "unter die Lupe genommen" werden. Doch die vier neuen Gleichungen, zu denen auch quantitative Übungsaufgaben gelöst werden, und die technischen Einzelheiten der Apparate, mit denen man ein Auflösungsvermögen in atomaren Dimensionen anstrebt, sind nur Mittel zum Zweck: Zentral ist der Wechsel von den klassisch sich ausschliessenden Konzepten "Welle" und "Teilchen" zum Neuen, das möglichst konsequent als "Quantenobjekt" bezeichnet wird, und das sowohl Wellen- als auch Teilchenaspekt besitzt.

Einstieg in die Quantenphysik

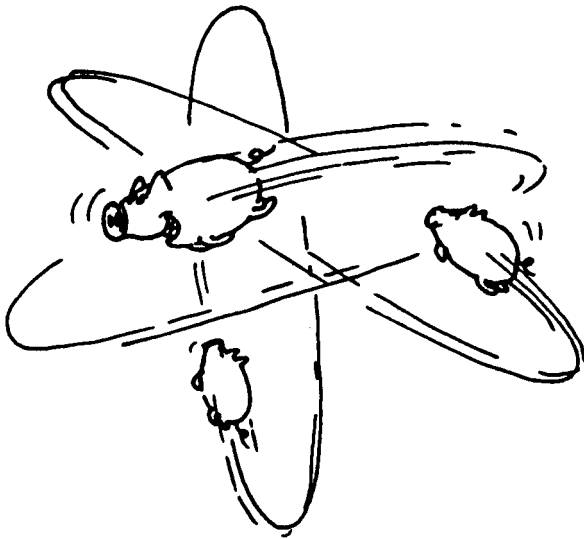
Ausgehend von der historischen Frage "Teilchen oder Welle?" wird im ersten Kapitel vorerst die Wellennatur des Lichts vertieft. Sie erlaubt es, die Grenzen des Auflösungsvermögens eines Lichtmikroskops zu eruieren. Nebenbei taucht die Wahrscheinlichkeitsverteilung auf: beim Spritzen von Farbtröpfchen durch einen Doppelspalt. Die Quantisierung von Energie und Impuls der elektromagnetischen Strahlung wird anhand des Schweifs der Kometen nahegelegt. Das verursacht keine große Erschütterung, seit die Medienschaffenden angefangen haben, überall Quantensprünge zu riechen. Meist sind Lichtquanten ohnehin schon in Biologie (Photosynthese) und Chemie (Spektroskopie) aufgetaucht. Anders im zweiten Kapitel: Jedermann ist davon überzeugt, daß Elektronen Teilchen sind. Wenn das "experimentum crucis" (Beugung von Elektronen an einer dünnen Graphitschicht) destruktive Interferenzen zum Vorschein bringt, ist man vorerst ratlos. So etwas kann man nur verstehen, wenn man bereit ist, den Elektronen eine Wellenlänge zuzuordnen! Die Tragfähigkeit von de Broglies Konzept muß nun bei anderen Objekten geprüft werden. Autos dürfen offenbar weiterhin als "gewöhnliche" Teilchen betrachtet werden, Neutronen anscheinend nicht. Doch das Auflösungsvermögen heutiger Elektronenmikroskope wird nicht durch die de Broglie-Wellenlänge begrenzt. "Ist ein Quantenobjekt eine Welle oder ein Teilchen?" Die jungen Menschen drängen auf eine eindeutige Entscheidung. – "It is like neither," antwortet jedoch Feynman. Die Synthese, die wir mit der Unschärferelation anbieten, befriedigt kritische Geister nur teilweise – und veranlaßt sie hoffentlich zu weiteren Studien. Heisenbergs Beziehung ermöglicht nicht nur die Existenz der Atome zu retten, sondern auch das Tunneln von Elektronen zu verstehen. Das moderne Raster-Tunnel-Mikroskop, das überraschende Bilder von atomaren Strukturen liefert, erweitert zum Schluß den Bereich der Dinge, die Laien verständlich sind. Denjenigen Schüler/innen, die rasch fertig sind, bietet das Leitprogramm Zusatzmaterial an. Die drei sogenannten Addita zur Quantenphysik sind äußerst unterschiedlich:

1. Ein – auch mathematisch – anspruchsvoller Versuch, bereits im Gymnasium eine Brücke von der Physik zum Atombau und der chemischen Bindung zu bauen: Daß un-

Hans Peter Dreyer, Fachdidaktik Physik, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich, e-mail: dreyer@itp.phys.ethz.ch

ser Versuch in allen Teilen geglückt ist, kann nicht behauptet werden.

2. Ein Vorschlag, unter Benützung eines populärwissenschaftlichen Buchs, etwa über die verschiedenen Interpretationen der Quantenphysik zu lernen: Was erstaunlich viele Jugendliche – oft aus esoterischen Schriften – als wissenschaftliche Gewißheit zu kennen meinen, ist ja unter den Fachleuten noch umstritten.
3. Eine Arbeitsanleitung um das Plancksche Wirkungsquantum mit einem Satz von Leuchtdioden mit erstaunlicher Genauigkeit innerhalb von rund 3 Lektionen selber zu messen.



Max Born. "Die Quanten sind doch eine Schweinerei!"

Arbeiten mit einem Leitprogramm

Wie läuft der Unterricht mit einem Leitprogramm ab? Grundsätzlich arbeiten die Schüler/innen einzeln und in individuellem Tempo mit den schriftlichen Unterlagen. Wann und wo: dieser Spielraum muß von der Lehrkraft zu Beginn eindeutig festgelegt werden. Nur mit außerordentlicher Disziplin können mehr als 12 Lernende eine ganze Lektion im Klassenzimmer ruhig und ertragreich bearbeiten. Neben der Bibliothek bieten sich auch leere Schulzimmer und Aufenthaltsräume an, das erlaubt problemlos Gespräche. Bei jüngeren Schüler/innen wird man eine strengere Präsenzkontrolle aufrechterhalten: beispielsweise zu Beginn und am Schluß der Lektion. Ältere – besonders wenn sie mit Leitprogrammen vertraut sind – schätzen eine längere Leine. Mißbrauch tritt dann nicht auf, wenn ganz klare "Deadlines" für die Kapiteltests und für die schriftliche Schlußprüfung angesetzt und eingehalten werden. Die Schülerinnen und Schüler lernen mit dem Lerntext, aus Buchabschnitten, mit Medien, bei der Durchführung der Experimente und beim Schreiben einer Zusammenfassung. Sie kontrollieren sich anhand von Übungen und Kontrollfragen selber, denn die Lösungen sind jedem Kapitel beigegeben. Die Arbeit ist so bemessen, daß in durchschnittlichen Klassen 90% der Gymnasiast/innen in der Unterrichtszeit und mit normalem Hausaufgabenanteil nach 12 Lektionen das Ziel erreicht. Für die Problemfälle muß die Lehrperson individuelle Lösungen suchen und anbieten. Regelmäßige Kontrollen ergeben sich

durch die Kapiteltests, die bei kleinen Klassen mündlich abgenommen, bei größeren aber schriftlich durchgeführt werden. Sie geben Aufschluß darüber, ob wichtige Elemente des Kapitels verstanden worden sind. Meist ist das der Fall, und die Lernenden können voranschreiten. Gelegentlich muß ein Teil nochmals bearbeitet, selten durch die Lehrkraft vollständig erklärt werden. Grundsätzlich ist es möglich, daß die Kapiteltests auch von Tutor/innen abgenommen werden, die das Material vorher durchgearbeitet haben. Allerdings müssen sie nicht nur physikalisch und pädagogisch talentiert sein; sie müssen in dieser Rolle von der Klasse akzeptiert werden und sich wohl fühlen. Schließlich ist es auch zweckmäßig, stichprobenweise bei der Durchführung der Experimente dabeizusein. Sie müssen an einem geeigneten Ort während etwa 4 Lektionen zugänglich sein. Immer wieder gibt es kleinere und größere Nachjustierungen; gelegentlich auch Reparaturen. Besonders bei den Experimenten bietet sich oft eine zwanglose Gelegenheit zu einem Gespräch, manchmal auch mit persönlichem Inhalt.

Erfahrungen in der Praxis

Wir glauben, daß wir durch diese Arbeitsweise zwei Fähigkeiten fördern, die im lehrerzentrierten Unterricht oft vernachlässigt werden: Die Schülerinnen und Schüler sind weitgehend selber für ihren Lernprozeß verantwortlich. Die in kurzen Abständen folgenden Kontrollfragen und Übungen zeigen ihnen sofort, ob Konzentration und Sorgfalt ausreichend waren. Hier können sie sich nicht hinter dem Rücken des Klassenprimus verstecken. Sie müssen auch Motivation und Ausdauer selber entwickeln: Die Lehrkraft, die sie mit einer Mischung aus Humor und Zwang, mit Medien und Tricks bei Lernlaune hält, agiert nicht. Einer der von uns befragten Schüler meinte nach den Erfahrungen mit dem ersten Leitprogramm: "Vorteil: Man muß nur soviel arbeiten, wie man will. Nachteil: Man müßte mehr arbeiten, als man will."

Die zweite Fähigkeit ist das Arbeiten mit schriftlichen Unterlagen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Sie ist für eigenständige Forschungstätigkeit an den Hochschulen unumgänglich. Oft ist sie vorher überlebenswichtig, wenn die Qualität der Anfängervorlesungen, das Betreuungsverhältnis und die Selektionshürden – mild ausgedrückt – nicht optimal sind. Dann hilft nur das Arbeiten mit einem guten Lehrbuch. Doch wird üblicherweise dem Studium von naturwissenschaftlicher Literatur an den allgemeinbildenden Schulen eine sehr geringe Bedeutung zugemessen, zumindest im Vergleich zur Lektüre von Belletristik. Mit den Leitprogrammen lernen die Schüler/innen langsam und sorgfältig zu lesen, Schwierigkeiten zu registrieren und zu beheben, und nicht auf Redundanz zu hoffen. Untersuchungen über langfristige Effekte haben wir keine. Hingegen besitzen wir von über 20 Lehrkräften und über 200 SchülerInnen teilweise detaillierte und meist positive Rückmeldungen. Kritisiert wird die Papierflut und die relativ geringe Zahl der Experimente. Uns scheint, daß die intensive Arbeit rund 70 Seiten A4 rechtfertigt. Die Anzahl Experimente muß aus verschiedenen Gründen klein gehalten werden: Verfügbarkeit an den Schulen/Kosten, Zeitaufwand, Platzbedarf...

Überwiegend wird die Arbeit mit Leitprogrammen sowohl von den Schüler/innen als auch von den Lehrpersonen positiv beurteilt: Weniger als 5% der befragten Schüler möchten dieser Unterrichtsform nicht mehr begegnen. Die meisten wün-

schen ein Leitprogramm pro Semester, also etwa 25% der Unterrichtszeit. Begrüßt werden das individuelle Tempo, das Gefühl, als erwachsene Person betrachtet zu werden, die Abwechslung im Lernstil und - als Überraschung für uns - mehr Gelegenheiten für sachbezogene, aber doch persönliche Gespräche zwischen Lernenden und Lehrenden. Bemerkenswert ist auch, daß niemand glaubte, schlechtere Zensuren zu erhalten. Vorwiegend Schüler/innen, die sonst nur knapp genügend sind, äußern den Eindruck, dank dieser Unterrichtsform eine bessere Note erreichen zu können. Einleuchtend ist unsere Erfahrung, daß das Arbeiten nach schriftlichen Unterlagen gelernt werden muß. Günstig ist eine schrittweise Einführung in lehrerunabhängiges Arbeiten und ein Start mit einem kürzeren Leitprogramm.

Zur Entstehungsweise

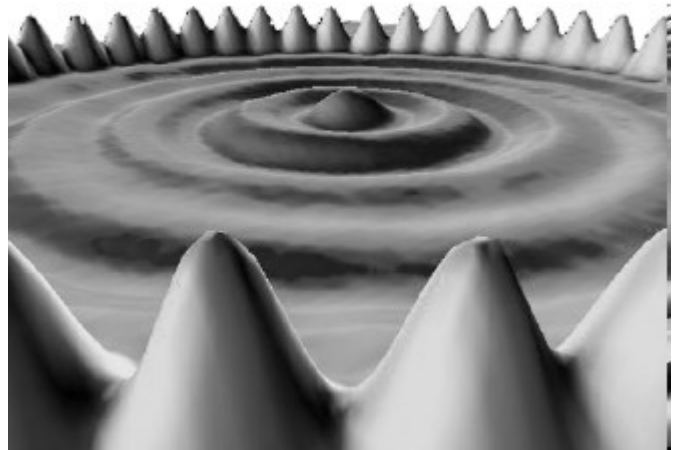
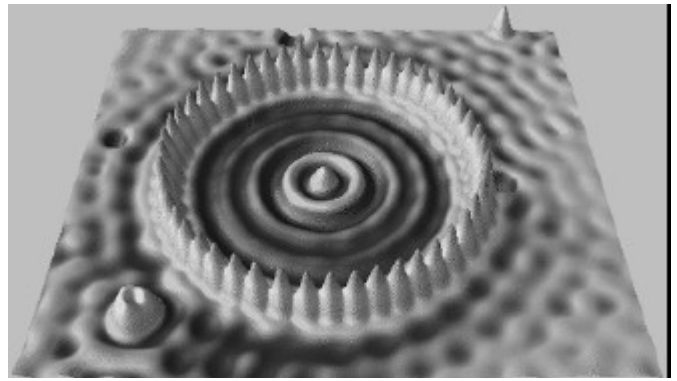
Karl Frey, Professor für allgemeine Didaktik an der ETH Zürich, hat das Projekt "Leitprogramme" lanciert und Mittel freimachen können. Fachdidaktiker, Praktikumslehrer und eine ganze Reihe von Lehrerstudent/innen schrieben die Unterlagen. Eine Reihe von Kolleg/innen an den Gymnasien erprobten sie und lieferten das unentbehrliche Feedback aus der Praxis. Die meisten Materialien haben den Erprobungs- und Korrekturzyklus mehr als dreimal durchlaufen. Die gelegentlich ermüdenden Arbeiten wären ohne ein größeres Team undenkbar. Namentlich erwähnen möchte ich hier meine Kollegen Werner Vogel und Martin Zraggen, die drei Leitprogramme für den Physikunterricht entwickelt haben. Insgesamt liegen sieben Leitprogramme zur Physik vor: "Vom Dampfkochoptop zum Turbo-Diesel" (zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik), "Treibhaus 'Erde'" (zu den Strahlungsgesetzen und zum Treibhauseffekt), "Strom aus Licht" (Photovoltaik), Radioaktivität, Überlagerung von Geschwindigkeiten, Kreisbewegung. Die Unterrichtsform läßt sich natürlich auch in anderen Disziplinen anwenden: ETH-Leitprogramme gibt es ebenfalls für Biologie, Chemie, Geographie, Mathematik und Informatik. Obwohl der Zweck dieses Artikels nicht Verkaufsförderung sondern Anregung zur Imitation ist, will ich erwähnen daß die Leitprogramme zum Selbstkostenpreis (plus Verpackung und Porto) erhältlich sind:

- in einem stabilen Plasticumschlag, einseitig, auf weißem Papier 120 g, als Kopiervorlage mit dem Recht, Klassensätze herzustellen
- mit Spiralhefter gebunden, doppelseitig auf Umweltschutzpapier, für die Bibliothek.

Interessierten Lehrkräften sende ich gerne Bestellscheine. Voraussichtlich werden die Leitprogramme zur Photovoltaik und zur Überlagerung von Bewegungen ab Herbst 1996 frei auf dem WWW als Word 5.1 für Macintosh-Dokumente unter folgender Adresse erhältlich sein:

<http://educeth.ethz.ch:8084/>

Die übrigen Leitprogramme werden vermutlich erst nach einer Überarbeitung in einigen Jahren auf dem Internet zugänglich werden.



Anmerkung der Redaktion: Die Bilder dieser Seite ergänzen nicht nur den vorstehenden Artikel, sie passen sehr gut zum Thema "100 Jahre Elektron". Sie entstanden im IBM-Labor von Almaden (USA), indem mit einem Rastertunnelmikroskop (RTM) zunächst 48 Eisenatome (siehe obige Bilder) auf einer (1,1,1)-Ebene eines Kupferkristalls im Kreis (Durchmesser 143, nm) aufgestellt wurden und anschließend die Elektrodendichte der Oberfläche in dem Käfig mit demselben RTM ausgemessen wurde. Man sieht die Analogie zur schwingenden kreisförmigen Membran. Im unteren Bild mit der Aufstellung der Atome im Rechteck erinnert die Elektronenverteilung an Chladnische Klangfiguren. Damit konnte experimentell verifiziert und computergraphisch visualisiert werden, was bisher fast jeder Student der Quantenmechanik als Lösung eines einfach lösbaren Problems berechnen mußte: Die Einsperrung von Elektronen in einem Kasten. (HK)

