

Planeten, Wolken oder schwarze Kisten?

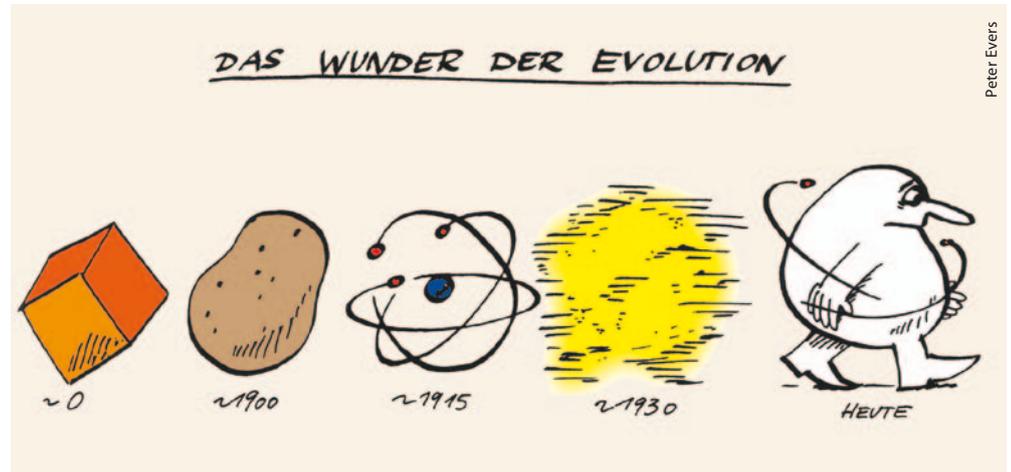
Wie können wir Atome in der Schule didaktisch sinnvoll beschreiben?

Florian Karsten, Tobias Koch, Franz Kranzinger und Matthias Theis

Bahnenmodelle gehören zu den einprägsamsten Atomvorstellungen und dominierten lange Zeit den Unterricht über die Struktur der Materie. Angesichts der immensen Diskrepanz zu aktuellen Atommodellen verlangen die Bildungspläne inzwischen die Behandlung zeitgemäßer Vorstellungen in der Schule. Wie kann es gelingen, im Unterricht ein Atommodell zu vermitteln, das altersgemäß ist und trotzdem kein Hindernis auf dem Weg zur Quantenphysik darstellt?

Wenn in einer Sintflut alle wissenschaftlichen Erkenntnisse zerstört würden und nur ein Satz an die nächste Generation von Lebewesen weitergereicht werden könnte, welche Aussage würde die größte Information in den wenigsten Worten erhalten? Ich bin davon überzeugt, dass dies die Atomhypothese wäre“, meinte Richard Feynman. Das Atomkonzept der Materie und die Atommodelle gehören unbestritten zu den großen Meilensteinen des naturwissenschaftlichen Weltbilds. Allerdings ist es schwierig, Schülerinnen und Schüler an die modernen physikalischen Atomvorstellungen heranzuführen.

Außerhalb des Physikunterrichts – z. B. im Fernsehen oder in populärwissenschaftlichen Artikeln – sind Atome relativ einheitlich dargestellt: Kleine farbige Kügelchen bewegen sich um einen Kern und kreisen oft planetenähnlich auf festen Bahnen. Dieses Modell ist zwar sehr einprägsam (Abb. 1), gibt aber 100 Jahre alte physikalische Vorstellungen wieder. Ein zeitgemäßer Physikunterricht darf bei diesem Modell nicht aufhören. Lehrerinnen und Lehrern, die in der Sekundarstufe I Physik unterrichten, stellt sich daher die Frage: Was ist ein



Peter Evers

zeitgemäßes Atommodell, das sich als Einstieg in der Sekundarstufe I eignet und dennoch den Weg zu den Modellen der Sekundarstufe II und der Hochschule bereitet?

In dieser Hinsicht haben sich auch die curricularen Vorgaben gewandelt: In den Physik-Bildungsplänen der 70er-Jahre galt das Bohrsche Atommodell als Quasi-Standard für die Sekundarstufe II. Inzwischen verlangen die Bildungspläne jedoch ein aktuelles, quantenphysikalisches Atommodell. Frühere Modelle spielen höchstens im historischen Kontext und unter Betonung ihrer Grenzen eine Rolle. In Baden-Württemberg z. B. sind sie vollständig aus dem Physik-Bildungsplan verschwunden – zugunsten einer „zeitgemäßen Atomvorstellung“ (Sek I) bzw. einer „quantenphysikalischen Modellvorstellung“ (Sek II). Mit diesen Veränderungen geht eine Diskussion geeigneter didaktischer Reduktionen für Atommodelle einher, die für die Sekundarstufe II noch nicht abgeschlossen ist und für die Sekundarstufe I gerade erst begonnen hat.

Eine gute didaktische Reduktion physikalischer Erkenntnisse und Modelle sollte zumindest zwei Anforderungen erfüllen:

- Die Schülerinnen und Schüler müssen in der Lage sein, die didaktische Reduktion zu verstehen und in ihr vorhandenes Wissen zu integrieren.
- Sie sollte so formuliert sein, dass sie ohne Brüche zu den nachfolgenden Klassenstufen passt, damit sie nicht in späteren Jahren zu einem Lernhindernis wird.

Speziell bei der Wahl eines Atommodells gibt es weitere Aspekte zu bedenken. So besteht ein Problem der Didaktik darin, dass Lehrer im Physikunterricht allzu leichtfertig zwischen der Makro- und Mikroebene hin und her springen. Dies kann die Lernenden dazu verleiten, Eigenschaften makroskopischer Körper auf atomare Bestandteile zu übertragen. Diese haben dann beispielsweise eine bestimmte Form, Farbe oder Temperatur [1]. Wie problematisch das Teilchenmodell im Physikunterricht ist, haben verschiedene Untersuchungen gezeigt. Als Beispiel sei die Frage genannt, was sich zwischen Luftteilchen befindet. Ein Großteil der befragten Mittelstufenschüler meint, es sei Luft, Sauerstoff oder Dampf. Nur ein kleiner Teil antwortet korrekt, dass keine Materie dazwischen ist. Der Kieler Physikdidaktiker Reinders Duit stellt in

Florian Karsten, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Stuttgart und Immanuel-Kant-Gymnasium Leinfelden-Echterdingen, Dr. Tobias Koch, Dillmann-Gymnasium Stuttgart, Prof. Franz Kranzinger, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Stuttgart und Immanuel-Kant-Gymnasium Leinfelden-Echterdingen, Dr. Matthias Theis, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Stuttgart und Friedrich-Schiller-Gymnasium Fellbach

seinen Untersuchungen fest, dass Schülerinnen und Schüler in der Sekundarstufe I nur in bescheidenem Maße über ihre vorunterrichtlichen Vorstellungen hinaus gelangen und große Schwierigkeiten haben, Phänomene reflektiert mit dem Teilchenbild zu erklären [2].

Die für einen kompetenten Umgang mit Teilchenmodellen notwendige Abstraktionsebene erreichen Schüler erst am Ende der Sekundarstufe I. Doch ein Teil von ihnen belegt das Fach Physik in der Oberstufe nicht mehr und verlässt das Gymnasium demnach mit der Physikbildung der Klasse 10. Daher ist es notwendig, ein zeitgemäßes Atommodell spätestens am Ende der Sekundarstufe I zu unterrichten, damit es ein Bestandteil der Allgemeinbildung sein kann. Der spätere Physikunterricht erreicht nur noch einen Teil der Abiturientinnen und Abiturienten. Dieses Problem macht die Suche nach einem „Atommodell für alle“ besonders spannend.

Vorstellungen über den Aufbau der Atome begegnen den Schülerinnen und Schülern nicht nur als bedeutende Errungenschaft des physikalischen Weltbildes, sondern auch, wenn sie dazu dienen, bestimmte Phänomene zu erklären. Wir müssen also auch klären, was die Atomvorstellung leisten soll und wozu sie verwendet wird. In der Sekundarstufe I stellt sich diese Frage eher im Chemieunterricht.

So verlangt der aktuelle Physik-Bildungsplan in Baden-Württemberg bis zur Klasse 10 keine Erklärungen der behandelten Phänomene durch ein Teilchenmodell – eine Konsequenz der angesprochenen Schwierigkeiten. Der Chemieunterricht der Mittelstufe benötigt dagegen ein Atommodell, das als Basis zur Erklärung der kovalenten Bindung und der besonderen Stabilität der Edelgaskonfiguration dient. Dahinter steckt eine für Schülerinnen und Schüler sehr abstrakte Vorstellung, die sich auf Anregungszustände der Elektronen im Energieraum (und nicht im Ortsraum) bezieht. Gerade an dieser anspruchsvollen Schnittstelle können unterschiedliche Modelle, die in Chemie und Physik unreflektiert nebeneinander stehen, den Lernenden Schwierigkeiten bereiten.

Die Grenzen der Anschaulichkeit

Mögliche Lernhindernisse durch die Verwendung verschiedener Modelle hängen letztlich damit zusammen, dass sie an einem bestimmten Punkt immer an ihre Grenzen stoßen: Modelle sind lediglich eine vereinfachte Vorstellung und müssen nur an den Stellen passen, auf die es jeweils ankommt. Verschiedene Konzepte, etwa das Strahlen- oder Wellenmodell des Lichts, sind daher nicht richtig oder

falsch, sondern nur gut geeignet für eine Problemstellung oder eben nicht. So könnte dem Chemielehrer je nach Frage ein einfaches räumliches Schalenmodell oder gar ein Planetenmodell genügen, wohingegen sich der Physiklehrer bemüht, auf den Begriff der Elektronenbahnen zu verzichten. Die Folge ist, dass viele Schülerinnen und Schüler lieber beim Modell der Bahnen und Schalen bleiben [1]. Hier sind didaktische Sorgfalt und fächerübergreifende Absprache geboten, um die Lernenden nicht durch parallele Verwendung „unverträglicher“ Modelle zu verwirren und sie zudem altersgemäß an den Umgang mit Modellen und deren Grenzen zu gewöhnen.

Anders als für die meisten Schülerinnen und Schüler ist es für Physikerinnen und Physiker kein Problem, routiniert zwischen verschiedenen Modellen hin und her zu springen und je nach Frage das hilfreichste auszuwählen. Die erfolgreiche Wahl setzt dabei neben einem Fundus verschiedener Modelle auch die Kenntnis ihrer jeweiligen Grenzen voraus. Gerade bei den unanschaulichen Atommodellen ist es hilfreich, die Schüler der Mittelstufe nicht zu überfordern und zunächst nur ein einziges Modell zu behandeln, das sich später möglichst konfliktfrei ausbauen lässt.

Jedes ansprechende didaktische Konzept in der klassischen Physik ist um Anschaulichkeit bemüht. Dieses Streben gilt es aber bei der Planung des Unterrichts in der Quanten- und Atomphysik zu hinterfragen. Wie sinnvoll kann eine anschauliche didaktische Reduktion in der Quanten- und Atomphysik sein, wenn doch tragfähige Modelle hier schon aus prinzipiellen Gründen unanschaulich sein *müssen*? Ein Ziel des Unterrichts sollte daher darin bestehen, den Schülern zu vermitteln, dass unsere Alltagsvorstellungen in der Quantenwelt versagen.

Wie sollen Lehrerinnen und Lehrer mit dieser intrinsischen Unanschaulichkeit umgehen? Verzichteten sie komplett auf ein anschauliches Bild, besteht die Gefahr,

A. Harrison et al., Science Education 80 (5), 509 (1996)

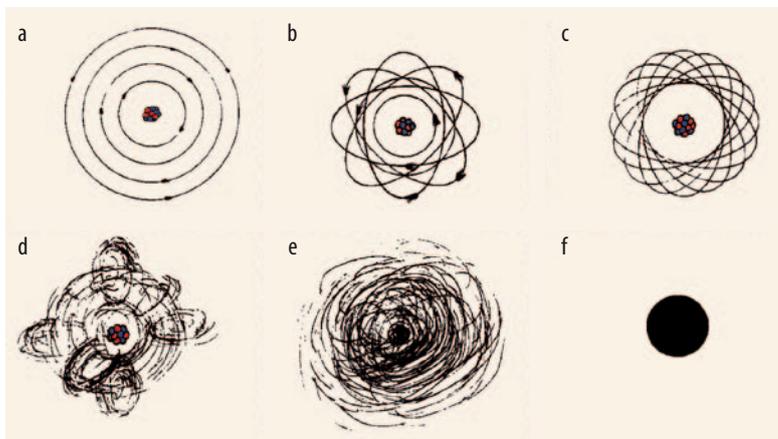
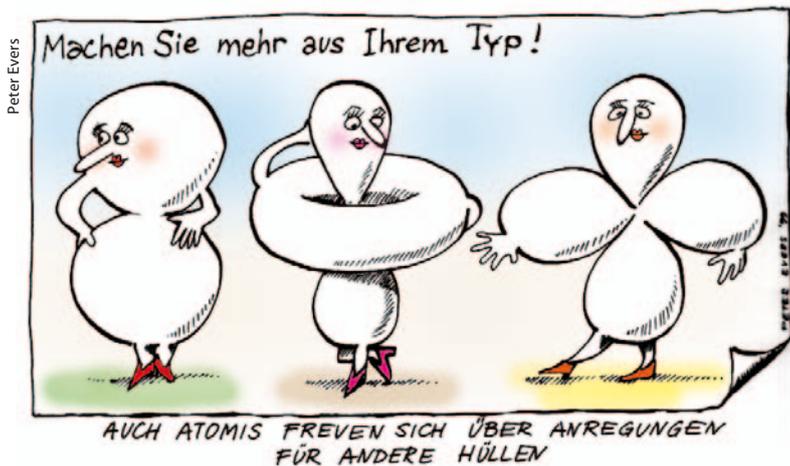


Abb. 1 Schüler der Klassenstufen 8 bis 10 wurden in einer australischen Studie gefragt, welche der sechs Zeichnungen ihrer Atomvorstellung am nächsten käme: 10 Prozent der Schüler bevorzugten das Modell „Sonnensystem“ (a),

46 Prozent das Modell „Bahnen“ (b), 15 Prozent das Modell „Multiple Bahnen“ (c), 6 Prozent das Modell „Orbitale“ (d), 17 Prozent das Modell „Elektronenwolke“ (e) und 6 Prozent das Modell „Ball“ (f).



dass sich Schüler eigene Bilder zu rechtlegen, die sich später zu einem Lernhindernis entwickeln können. Probleme durch hinderliche Bilder lassen sich auf zwei Wegen umgehen: Entweder bietet die Lehrkraft eine Anschauung an, die möglichst wenige Schwierigkeiten aufwirft (z. B. das Bild einer „Wolke“, um das Quantenobjekt Elektron zu beschreiben), oder sie vermeidet konsequent jegliche Veranschaulichung und beschreibt das Atom als eine „Black Box“ mit gewissen Eigenschaften. In beiden Fällen müssen sich die Schülerinnen und Schüler der Grenzen der Modelle stets so bewusst werden, dass sie mit angebotenen oder selbst gewählten Veranschaulichungen kritisch umgehen: Jedes Bild, jede Zeichnung, jeder Vergleich mit Alltagsvorstellungen verleitet sie zu falschen Folgerungen und kann die bizarre Quantenwelt nicht beschreiben.

Welche Möglichkeiten bestehen also, um in der Sekundarstufe I eine zeitgemäße Atomvorstellung zu unterrichten, die die genannten didaktischen Herausforderungen so weit wie möglich berücksichtigt? Im Folgenden stellen wir zwei Modelle vor, die eine mögliche Antwort auf diese Frage geben sollen: das Elektronium-Modell [3] und ein Black-Box-Modell.

Wolkige Atome...

Aus Sicht der Hochschule ist zur Elektronenhülle mit dem Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte alles gesagt. In der

Mittelstufe ist ein solches Begriffsungetüm dagegen ein unüberwindbares Lernhindernis. Die grundlegende Idee und didaktische Reduktion des Elektronium-Modells besteht gerade darin, die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte in „Elektronium“ umzubeneden. Das Elektronium ist ein mengenartiger Stoff, der den Kern ähnlich wie eine Wolke umgibt, dessen Dichte nach außen hin abnimmt und der negative Ladung trägt. Dieses Modell knüpft an die tragfähige Kontinuumsvorstellung an, die sich bereits im vorausgegangenen Unterricht an vielen Stellen bewährt hat. Anhand dieses Modells lassen sich die grundlegenden Eigenschaften von Atomen qualitativ erklären:¹⁾ Der Versuch, Teile des Elektroniums vom Atomkern zu entfernen, führt immer zu Vielfachen einer elementaren Portion des Elektroniums. Diese Elementarportion heißt Elektron, hat eine gewisse Masse, negative Ladung und ist ein kleiner Dauermagnet. Die Elementarportion zieht sich in Abwesenheit eines Kerns plötzlich auf einen Punkt zusammen. Fügt man Protonen und Elektronen hinzu, entstehen neue Atomsorten mit geringfügig veränderter „Größe“ und steigender Elektroniumsdichte.

Eine Verformung des Elektroniums benötigt – ähnlich wie beim Luftballon – Energie. Manche dieser Verformungen sind allerdings stabil (Abb. 2). Hat eine Anregung, z. B. durch Photonenbeschuss, die „richtige“ Energieportion, so kann das Atom einige Zeit in diesem angeregten Zustand verharren und

danach die Energieportion wieder abgeben. Zusammen mit dem Photonenmodell (als Elementarportion des Lichts) lassen sich damit charakteristische Spektren, Leuchtstoffröhren oder das Leuchten von Flammen erklären.

Das Elektronium-Modell knüpft an die verbreitete Alltagsvorstellung eines kontinuierlichen Stoffs an und erreicht damit eine gewisse Anschaulichkeit der komplexen Quantenphysik der Atome. Gleichzeitig kann es zumindest teilweise den Ausgang einzelner Experimente qualitativ vorhersagen.

...oder schwarze Kiste

Das Black-Box-Modell nimmt sich der Problematik falscher Bilder dadurch an, dass es bewusst vermeidet, die unanschauliche Quantenphysik der Atome anschaulich zu machen. Das Atom ist demnach eine Black Box, in die ein Experimentator zwar nicht hineinschauen, die er aber auf verschiedene Weise erkunden kann. Auf eine gezielt gestellte „Frage“, wie das Beleuchten mit Licht einer bestimmten Wellenlänge, reagiert die Black Box mit einer bestimmten „Antwort“, beispielsweise mit der Absorption des Lichts. Auf der Basis verschiedener

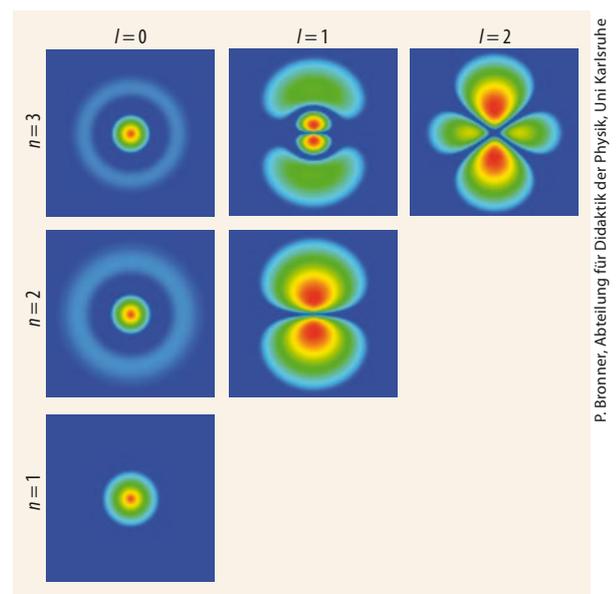


Abb. 2 Die Bilder des Wasserstoffatoms im Elektronium-Modell gleichen denen im quantenphysikalischen Bild: Im Grundzustand verteilt sich das Elektronium kugelsymmetrisch um den Kern. In höheren Zuständen kann das Elektronium in bestimmten Verformungen „einrasten“.

1) Ein möglicher Unterrichtsengang mit dem Elektronium-Modell ist in [4] dokumentiert.

2) Hierzu bieten sich Experimente mit selbst gebauten oder von Lehrmittelfirmen bezogenen Black Boxes an, deren Innenleben von außen untersucht und dann modellhaft beschrieben wird.

Experimente entwickelt man so nach und nach ein Modell für die Black Box – ohne jemals wirklich hineinzuschauen.

Das Black-Box-Modell reduziert die Physik des Atoms auf die experimentell gefestigten Eigenschaften, die das Atom charakterisieren. Da es nicht versucht, durch eine anschauliche Vorstellung eine vermeintliche Erklärung zu liefern, müssen Lehrende und Lernende „in den sauren Apfel beißen“, ganz ohne anschauliche Bilder auszukommen. Das bedeutet auch, dass Messergebnisse (wie die eines Rastertunnelmikroskops) oder grafische Darstellungen von Lösungen der Schrödinger-Gleichung die einzigen bildlichen Darstellungen im Unterricht bleiben. Diese Abstraktheit ist eine neue Herausforderung für den Unterricht und setzt voraus, dass der Physiklehrer im Vorfeld das Wesen von Modellen gründlich mit den Schülerinnen und Schülern erarbeitet hat.²⁾

Im Extremfall wäre es hierbei möglich, ganz darauf zu verzichten, das Innere eines Atoms zu beschreiben, und lediglich zu klären, welche teilweise verbreiteten Vorstellungen – wie Farbe, Oberfläche oder Elektronenbahnen – bei Atomen nicht haltbar sind. Ein solches Vorgehen dürfte in der Regel angesichts der bildlichen Atomvorstellungen, die den Schülern außerhalb des Physikunterrichts begegnen, nicht durchzuhalten sein. Daher färbt sich die Black Box je nach Verlauf des Unterrichts und der von den Schülerinnen und Schülern mitgebrachten Vorstellungen ein Stück weit „grau“ – zumindest insofern, dass sie lernen, zwischen Atomkern und -hülle zu

unterscheiden. Eine Vorstellung, in welcher Form die Hülle aus Elektronen besteht, bietet das Black-Box-Modell aber bewusst nicht an.

Trotz seiner intrinsischen Unanschaulichkeit hat dieses Modell einige Vorteile:

- Das konsequente Verweigern eines Modells rückt das von Schülerinnen und Schülern kaum wahrgenommene Thema „Modelle in der Physik“ in den Fokus und zeigt die fundamentalen Grenzen von Modellen auf.
- Da die Black Box keine Anschauung bietet, gibt es auch keine falschen Folgerungen.
- Das offensichtliche Fehlen eines anschaulichen Modells in diesem Teilgebiet der Physik unterstreicht die „Unverständlichkeit“ der Atom- und Quantenphysik – es existiert keine Analogie zu der uns vertrauten klassischen Welt.

Zudem ist das Erforschen der Black Box „Atom“ ein gutes Beispiel für die naturwissenschaftliche Arbeitsweise und lässt den schwierigen Weg der Urväter der Atomphysik erahnen, die eben auch mit ihrem klassischen Weltbild brechen mussten.

Kein Königsweg

Beide Modelle haben – genau wie das leider immer noch verbreitete Bahnenmodell – Stärken und Schwächen (Tab.). Eines haben alle drei gemeinsam: Sie erklären nicht die besondere Stabilität der Edelgaskonfiguration, sodass Schülerinnen und Schüler diese Tatsache als experimentellen Befund hinnehmen müssen. Danach vertragen sich die Erklärungen im

Chemieunterricht zu den verschiedenen Bindungsarten mit allen drei Atommodellen. Im Unterschied zum Bahnenkonzept haben die beiden vorgestellten Modelle jedoch einen entscheidenden Vorteil: Sie ermöglichen den Übergang von der Sekundarstufe I zur Oberstufe bzw. Hochschule ohne verwirrenden Konzeptwechsel.

Eine spannende Aufgabe

Jedes schulische Modell zur Beschreibung von Atomen muss mit der fundamentalen Diskrepanz zwischen den Eigenschaften der Quantenphysik und unseren Alltagsvorstellungen umgehen. Bezogen auf die quantenphysikalische Welt der Atome kann sich eine gewonnene Anschaulichkeit auch nachteilig auswirken. Was man den Schülerinnen und Schülern in Klasse 10 beim Heranführen an eine aktuelle Atomvorstellung zumuten kann, ist in der Breite noch nicht ausreichend untersucht. Daher wünschen wir uns mehr Lehrerinnen und Lehrer, die verschiedene Konzepte im Unterricht ausprobieren, sowie Fachdidaktikerinnen und Fachdidaktiker, die diesen Unterricht wissenschaftlich analysieren und vergleichen.

Literatur

- [1] H. Fischler und M. Lichtfeldt, Unterricht Physik 8 (41) (1997)
- [2] R. Duit, Teilchen- und Atomvorstellungen. In H. Fischler (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule, IPN, Kiel (1992)
- [3] F. Herrmann (Hrsg.), Der Karlsruher Physikkurs: Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe I Teil 3, Aulis-Verlag (2007); Informationen auch unter www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de
- [4] P. Bronner, Zeitgemäße Atomvorstellung, www.lehrer-online.de/atomvorstellung.php

Verschiedene Atommodelle für den Mittelstufenunterricht im Vergleich			
	Bahnenmodell (vereinfachtes „Bohr-Modell“)	Elektronium	Black Box
Vermeidet das Modell, Eigenschaften aus Makro- und Mikroebene zu vermischen?	–	0	+
Vermeidet das Modell falsche Teilchenvorstellungen?	–	++	+
Anschaulichkeit des Modells	++	+	--
Tragfähigkeit (Wie schnell sind die Grenzen des Modells erreicht?)	--	+	++
Ist ein bruchloser Übergang zu den Modellen der Kursstufe/Universität möglich?	–	+	+
Wird die Unanschaulichkeit der Quantenphysik deutlich?	–	+	++