

Vorstellungen und Lernen von Physik und Chemie

Zu den Ursachen vieler Lernschwierigkeiten

Reinders Duit

Wenn Schülerinnen und Schüler in den Unterricht hineinkommen, so haben sie in der Regel bereits in vielfältigen Alltagserfahrungen tief verankerte Vorstellungen zu den Begriffen und Phänomenen und Prinzipien entwickelt, um die es im Unterricht gehen soll. Die meisten dieser Vorstellungen stimmen mit den zu lernenden wissenschaftlichen Vorstellungen nicht überein. Hier liegt eine Ursache vieler Lernschwierigkeiten. Die Alltagsvorstellungen bestimmen das Lernen, weil die Schülerinnen und Schüler das Neue nur durch die Brille des ihnen bereits Bekannten "sehen" können. Sie verstehen häufig gar nicht, was sie im Unterricht hören oder sehen und was sie im Lehrbuch lesen. Lernen von Chemie und Physik, wie Lernen überhaupt, bedeutet, Wissen auf der Basis der vorhandenen Vorstellungen aktiv aufzubauen. Der Unterricht muß also an den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler anknüpfen und ihre Eigenaktivitäten fordern und fördern. Er muß darüber hinaus für die wissenschaftliche Sicht werben, d.h. die Schüler davon überzeugen, daß diese Sicht fruchtbare neue Einsichten bietet.

Wir verstehen es, aber wir glauben es nicht

Im Heft 2/94 dieser Zeitschrift findet sich die folgende Geschichte aus Wagenscheins schon klassischem Buch *Verstehen Lehren* (Wagenschein, 1968, S. 341). Es geht um den Bericht einer Missionarin in Afrika, die sich bemüht, den ihr Anvertrauten klar zu machen, daß die Erde rund ist. Sie versucht es zunächst mit der reinen Information. Die Afrikaner überzeugt dies nicht, sie wenden z.B. ein, sie seien lange Strecken gereist, von einer Rundung der Erde hätten sie nichts gemerkt. Sie versucht, die Dinge am Globus zu erläutern. Wo ist denn bei der Erde der Fuß, wo die Erdachse, wird eingewandt. Sie greift zu weiteren Vergleichen, man solle sich doch die Erde wie einen Ballon vorstellen oder vielleicht wie eine Orange. Letztere kann man anfassen, aufmachen und essen, so das Gegenargument. Die Missionarin versucht es weiter, scheint es nach langen Bemühungen zu schaffen, ihre Zuhörer zu überzeugen. Einige Zeit später meldet sich einer der Zuhörer bei ihr und fragt: "Schwester, so ganz im Vertrauen, bitte, versteh mich recht, nur zu dir gesagt... nicht wahr, du glaubst aber doch selber nicht, daß die Erde rund ist?"

Gewiß hat diese Geschichte etwas Rührendes, sie ist auch gar nicht mehr zeitgemäß, da aus ihr der Geist einer "heilen" kolonialen Welt spricht. Aber dennoch, sie eignet sich hervorragend als Metapher für das, was sehr häufig im Physik- und Chemieunterricht geschieht. Schülerinnen und Schüler lassen so schnell nicht ab von den Vorstellungen und Überzeugungen, die sie in unseren Unterricht mitbringen. Sie verstehen

uns zunächst gar nicht, erheben Einwände, die nicht selten nur schwer einfach vom Tisch zu wischen sind, und sie "glauben" uns schließlich nicht, auch wenn sie uns verstehen. Physik und Chemie lehren kann mit einem gewissen Recht als missionarische Tätigkeit angesehen werden. Vielleicht ist dies zunächst eine ungewohnte Sicht unserer Tätigkeit, aber sie weist sehr nachdrücklich darauf hin, daß es nicht genügt, seine (also die wissenschaftliche Position) verständlich zu machen. Die Schüler müssen vielmehr auch von dieser Sicht überzeugt werden. Walter Jung hat dies pointiert so ausgedrückt, daß Physikunterricht (und dies gilt für Chemieunterricht sicher in gleicher Weise) manches mit einer psychotherapeutischen Sitzung gemein hat. In seinen Untersuchungen zu Schülervorstellungen vom Sehen finden sich viele Beispiele dafür, daß Schülerinnen und Schüler die physikalische Sicht verstehen, sie aber nicht glauben, sie nicht für wahr halten.

Schülervorstellungen vom Licht und vom Sehen

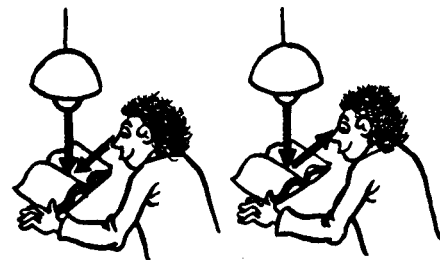


Abb. 1: Vorstellungen zum Sehen (aus Lind, 1975, S. 118)

In der Physik wird der Vorgang des Sehens wie folgt erklärt: Lichtquellen senden Licht aus, dieses fällt direkt ins Auge, dann sieht man die Lichtquelle oder es fällt auf Körper, die nicht von sich aus Licht aussenden, wird dort teilweise reflektiert, und fällt von dort ins Auge. Zwei Punkte müssen hervorgehoben werden. Erstens macht die Physik keinen grundsätzlichen Unterschied zwischen Lichtquellen und beleuchteten Körpern. Beide senden Licht aus, das unter Umständen ins Auge fällt und dann zu einem Seheindruck führt. Zweitens wird Licht in der Physik als Ausbreitungsvorgang, als eine Bewegung von "etwas" (elektromagnetische Strahlung) verstanden. Alltagsvorstellungen zu Licht und Sehen sind ganz anders (Jung, 1989; Wiesner, 1994). Für viele Schüler sind Lichtquellen und beleuchtete Körper fundamental verschieden. Während Lichtquellen etwas abgeben, das mit Licht bezeichnet wird, ist dies bei beleuchteten Körpern nicht der Fall. Diese kann man sehen, wenn man ihnen das gesunde Auge zuwendet. Das Licht liegt dann gewissermaßen als "Helligkeit" auf ihnen. Schüler scheinen also zwei unterschiedliche Vorstellungen vom Licht zu haben. Zumindest in der zuletzt genannten Vorstellung ist kein Konzept von Bewegung des Lichts enthalten, aber auch das Licht, das Lichtquellen abgeben, wird von den meisten Schülerinnen und Schülern nicht in gleicher

Prof. Dr. Reinders Duit,
IPN - Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften,
Universität Kiel, Olshausenstr. 62, D-24098 Kiel
email: duit@ipn.uni-kiel.de, Fax: 0049 431 880 1521

Weise als Ausbreitung von etwas gesehen, wie es in der Physik üblich ist. Unterricht zur Optik in den Schuljahren 5 bis 10 ist in der Regel nur in sehr eingeschränktem Maße in der Lage, die skizzierten Schülervorstellungen in Richtung auf die physikalische Vorstellung zu verändern.

Dieses Beispiel zeigt, daß Alltagsvorstellungen und wissenschaftliche Vorstellung ganz unterschiedlich sein können. Es ist sehr wichtig, sich darüber im Klaren zu sein, daß sich aus alltäglichen Seherfahrungen keine empirischen Belege für die physikalische Sichtweise ergeben. Wir haben hier also die gleiche Situation, die auftritt, wenn man "Laien" davon überzeugen will, daß die Erde rund ist. Die Ausbreitung des Lichts kann nicht ohne weiteres beobachtet werden. Dies gilt sowohl für die alltäglichen Seherfahrungen wie für die durch spezielle Experimente arrangierten Seherfahrungen im Unterricht. Anders ausgedrückt, die Ausbreitungsvorstellung ist weniger eine Sache des Beobachtens, sondern des "sich dazu Denkens". Für den Unterricht bedeutet dies, daß sich aus entsprechend arrangierten Experimenten die physikalische Vorstellung nicht quasi von selbst ergibt. Die physikalische Vorstellung muß den Schülern vielmehr mit den Experimenten zusammen als Erklärung angeboten werden. Sie müssen davon überzeugt werden, daß sich die Beobachtungen mit dieser Vorstellung konsistent deuten lassen (s. dazu Unterrichtsvorschläge von Wiesner, 1992, 1994).

Wärmevorstellungen - zur Entfaltung eines undifferenzierten Vorstellungskomplexes

"Wärme" ist ein Gebiet, das in der Chemie und in der Physik gleichermaßen wichtig ist. Wie sehen die wissenschaftlichen Vorstellungen zur Wärme aus? Zunächst einmal, ist festzuhalten, daß der Terminus Wärme (das Fachwort) keineswegs immer in gleicher Bedeutung verwendet wird. In den meisten Lehrbüchern jedenfalls findet man dieses Wort in mindestens zwei Bedeutungen. Zunächst einmal steht es für das Phänomen "Wärme", also für Wärmeerscheinungen ganz allgemein. Weiterhin wird es als die Energieform angesehen, die aufgrund von Temperaturdifferenzen zwischen zwei Systemen ausgetauscht wird. Diese Größe wird in der Regel mit Q bezeichnet und manchmal auch Wärmeenergie genannt. Diese Größe ist strikt von der Inneren Energie zu unterscheiden. Innere Energie, die Energie in einem System, ist eine Zustandsgröße, Wärme bzw. Wärmeenergie ist eine Prozeßgröße. Abbildung 2 zeigt genauer, welche Größen und Prinzipien die Basis der wissenschaftlichen Wärmevorstellung bilden. Temperatur steht für die Intensität der "Wärme" (als allgemeine Bezeichnung für das Phänomen betrachtet). Sie ist eine intensive Größe, also eine Größe, die sich beim Zusammenfügen zweier gleicher Systeme zu einem Gesamtsystem nicht ändert. Energie (innere Energie oder Wärmeenergie) steht dagegen für den mengenartigen Aspekt der "Wärme". Sie ist eine extensive Größe, also eine Größe, deren Werte sich addieren, wenn zwei Systeme zusammengefügt werden. Extensive Größen geben also Auskunft, "wieviel" von etwas vorhanden ist, intensive Größen, wie "stark", wie intensiv etwas ist. Der sogenannte "Nullte Hauptsatz der Thermodynamik" ist das Prinzip vom Temperaturausgleich, er sagt also, daß sich Temperaturunterschiede "von selbst" immer ausgleichen, der erste Hauptsatz postuliert das Prinzip von der Erhaltung der Energie. Entropie

ist ebenfalls eine extensive Größe. Das ihr korrespondierende Prinzip ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.

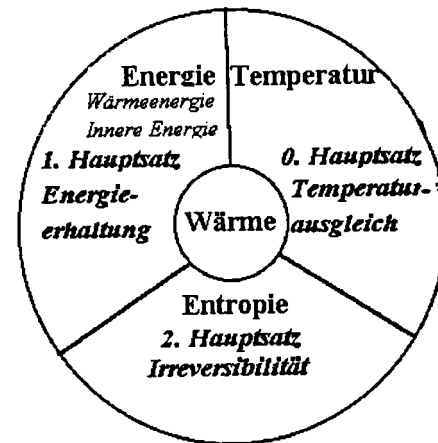


Abb. 2: Größen und Prinzipien zum Phänomen "Wärme"

Verfolgt man die historische Entwicklung der wissenschaftlichen Vorstellungen zur Wärme, wie sie in Abbildung 2 wiedergegeben sind, so erkennt man einen recht langwierigen und mühevollen Prozeß der Entfaltung einer zunächst undifferenzierten Wärmevorstellung. Gehen wir zurück ins 17. Jahrhundert, also in die Zeit, in der Thermometer in Gebrauch kamen, so erkennen wir das mühevolle Ringen der führenden Wissenschaftler dieser Zeit, zum Beispiel in der florentinischen *Accademia del Cimento*, um angemessene Vorstellungen zur "Wärme" (Wiser & Carey, 1983). Insbesondere bereitete die Trennung in die oben skizzierten intensiven und extensiven Aspekte der "Wärme" sowie die Vorstellung der thermischen Interaktion und des Prinzips vom Temperaturausgleich große Schwierigkeiten. Erst in der Mitte des 18. Jahrhunderts ist mit den Arbeiten von Joseph Black eine klare Trennung in den intensiven und extensiven Aspekt erreicht (McKie & Heatcote, 1935). Die Extensität, die Mengenartigkeit, allerdings unterstützte so nachdrücklich die Wärmestoffvorstellung, daß es rund ein weiteres Jahrhundert dauerte, bis sich die heutige kinetische Teilchenvorstellung durchgesetzt hatte und zugleich die Entfaltung zu den in Abbildung 2 genannten Aspekte erreicht war.

Schülervorstellungen zu "Wärme und Temperatur"

Untersuchungen zu Vorstellungen unserer Schüler haben gezeigt (Duit, 1986), daß Alltagsvorstellungen zur Wärme weitgehend undifferenziert sind und Aspekte enthalten, die wir aus Sicht der Wissenschaft mit den Größen Temperatur, Energie und Entropie beschreiben. Die Termini Wärme und Temperatur werden kaum differenziert, sie bedeuten für viele Schüler ganz Ähnliches, allerdings gibt es eine deutliche Tendenz, Wärme mit höherer Temperatur in Verbindung zu bringen. Eine klare Differenzierung zwischen dem intensiven Temperaturbegriff und dem extensiven energetischen Wärmeaspekt entwickelt sich auch im Unterricht der Schuljahre 5 bis 10 nicht oder nur in Ansätzen. Aus den Schwierigkeiten, die Schüler hier haben, seien einige herausgegriffen (Kesidou, 1990).

Schülervorstellungen zur thermischen Interaktion

Schülerinnen und Schüler interpretieren das Abkühlen und Erwärmen von Körpern, vor allem vor dem Unterricht über Wärme, nicht als Interaktion, wie es in der Physik üblich ist. Kühlt sich zum Beispiel ein warmer Körper, z.B. ein Glas mit heißem Wasser, ab, so werden von vielen Schülern Interaktionen mit der Umgebung, zum Beispiel mit der umgebenden Luft, nicht in Betracht gezogen. Der Körper kühlt sich ab, weil dies ein "natürlicher" Vorgang ist, der keiner weiteren Erklärung bedarf. Auch hier wird deutlich, daß die Vertrautheit mit Phänomenen und Beobachtungen von diesbezüglichen Vorgängen allein offenbar nicht zur physikalischen Sicht führt. Im Falle des Abkühlens muß den Schülern einerseits anhand von Experimenten gezeigt werden, daß sich bei einer jeder Abkühlung eines Körpers die Umgebung erwärmt. Andererseits muß für die wissenschaftliche Sicht der thermischen Interaktion gewonnen werden, d.h. es muß den Schülern im Verlaufe einer Reihe von Experimenten klar gemacht werden, daß diese Sicht zu einer konsistenteren und deshalb befriedigenderen Deutung führt als ihre bisherige Alltagssicht.

Wolle macht warm



Abb. 3: Schmilzt ein in Wolle eingewickelter Eisblock schneller als ein in Aluminiumfolien eingewickelter? (aus Duit, 1986, 30)

Es ist eine alltägliche Erfahrung, daß uns ein Pullover wärmt. Bei vielen Schülern scheint diese Erfahrung zur Vorstellung zu führen, daß die Wolle Wärme abgibt. Tiberghien (1980) berichtet zum Beispiel über ein 11 Jahre altes Mädchen, das der festen Überzeugung ist, daß ein Eisblock, der in Wolle eingewickelt ist, schneller schmilzt als ein in Aluminiumfolie eingewickelter Eisblock. Sie ist auch durch den Ausgang des Experiments nicht davon zu überzeugen, daß ihre Vorstellung falsch war. Watson und Konicek (1990) haben ein ganz ähnliches Verhalten unter 10-jährigen gefunden. Ihre Schüler waren der Überzeugung, ein Thermometer, das in einen Pullover gesteckt wird, müsse "mehr" anzeigen als eines, das die Temperatur außerhalb des Pullovers bestimmt. Auch hier hat die Schüler das unerwartete Ergebnis keineswegs davon überzeugt, daß ihre Vorstellung nicht richtig war. Sie meinten, daß das Thermometer nicht in Ordnung oder eine längere Meßzeit nötig sei. Auch die Mitteilung des Lehrers wie es "wirklich" ist, überzeugte die Schüler nicht. Erst eine längere Experimentierphase, die ihnen u.a. gestattete, das Thermometer die Nacht über im Pullover stecken zu lassen, führte Schritt für Schritt zur physikalischen Sicht.

Temperaturunterschiede gleichen sich stets aus?

Für Schüler gilt dieses Prinzip nicht in jedem Falle. Vor allem vor dem Unterricht sind viele von ihnen der Auffassung, daß Metalle eine niedrigere Temperatur haben als Plastik, weil sie sich ja kälter anfühlen. Werden unterschiedliche Materialien in einen Ofen von 60°C gelegt, dann hat, so die Auffassung vieler Schüler (Lewis, 1991), Mehl eine niedrigere Temperatur als 60°C, weil es sich nicht so sehr erwärmt, während Metall eine höhere Temperatur hat, weil es sich schneller erwärmt. Im Unterricht muß man sich also darauf einstellen, daß Temperaturengleich keine triviale, selbstverständliche Vorstellung für viele Schüler ist. Man sollte deshalb den Schülern im Unterricht Gelegenheit geben, Temperaturen verschiedener Dinge im Klassenraum zu messen, damit sie selbst feststellen, daß die Temperaturen alle gleich groß sind, wenn die Dinge nicht auf irgendeine Weise erwärmt werden. In einem Lehrbuch für die Schuljahre 5 bis 10 erklären wir (Duit, Häußler, Lauterbach, Mikelskis & Westphal, 1993) den Schülern gleich am Beginn der Wärmelehre, daß sich Gegenstände unterschiedlich warm anfühlen, weil unser Wärmesinn nicht die Temperatur der Gegenstände anzeigt, sondern wie schnell diese Wärme weiterleiten.

Die Beispiele zu Schülervorstellungen über Wärme weisen auf verschiedene wichtige Gesichtspunkte von Schülervorstellungen ganz allgemein hin. Aus der Sicht der Wissenschaften ganz einfach, ja trivial erscheinende Aspekte sind dies für Schüler keineswegs. Stehen die Erwartungen der Schüler, auf der Basis ihrer Vorstellungen, im Widerspruch zu dem tatsächlichen Ergebnis einer Beobachtung, so geben die Schüler ihre Vorstellung keineswegs bereitwillig auf. Sie machen vielmehr in der Regel zunächst einmal geltend, daß ihre Vorstellung im Prinzip schon richtig sei, aber aus diesem oder jenen Grund im vorliegenden Falle zu anderen Ergebnissen geführt hat, als zunächst erwartet.

Dieses Verhalten der Schüler ist aus der Geschichte der Wissenschaften gut bekannt. Ideen, von denen die Wissenschaftlergemeinschaft tief überzeugt ist, werden nicht einfach aufgegeben, wenn sich einige Widersprüche zu experimentellen Befunden zeigen. Max Planck hat einmal gesagt, neue Ideen setzten sich nicht dadurch durch, daß die Anhänger der alten überzeugt würden, sondern dadurch, daß diese Anhänger allmählich ausstürben. Graf Rumford, dem das königlich bayrische Arsenal unterstand, führte zum Beispiel um 1800 seine berühmten Kanonenbohrversuche durch (Schimank, 1930). Er "bohrte" mit einem stumpfen Bohrer. Er konnte nachweisen, daß er (beinahe) beliebig viel Wärme durch Reibung erbohren konnte und daß die erhaltene Wärme von der Arbeit abhing, die antreibende Pferde verrichteten. Aus heutiger Sicht steht dieses Ergebnis im eklatanten Widerspruch zur damals herrschenden Wärmestofftheorie. Derzufolge hätte Rumford nur eine bestimmte Wärmemenge aus dem Material durch das Bohren herauspressen können. Rumfords experimentelle Evidenz hat die wissenschaftliche Welt seiner Zeit nicht überzeugt. Es gelang vielmehr, durch eine Reihe von Zusatzannahmen, die zu seiner Zeit erfolgreiche und deshalb allgemein anerkannte Wärmestofftheorie mit Rumfords Experimenten in Einklang zu bringen. Es hat bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts gedauert, bis die Wärmestofftheorie abgelöst wurde - durch

viele weitere empirische Befunde und durch neue theoretische Rahmenvorstellungen.

Teilchenvorstellungen

Das Teilchenmodell spielt im Physik- und Chemieunterricht der SI eine große Rolle. Allerdings zeigen Untersuchungen, daß Schüler große Schwierigkeiten mit diesem Modell haben (s. zusammenfassend Duit, 1992). Häufig werden den Teilchen Eigenschaften der Makrowelt zugeordnet. So sind Schwefelteilchen gelb, weil ja Schwefel auch gelb ist. Teilchen sind in gleicher Weise warm, wie Gegenstände. Schüler haben offenbar große Schwierigkeiten, den "Modell-Status" des Teilchenmodells richtig zu verstehen. Sie erkennen nicht, daß in der "Welt der Teilchen" teilweise andere Gesetze gelten als in der Makrowelt. Die hier umrissenen Verständnisschwierigkeiten scheinen mit dem Unterricht über das Teilchenmodell zu tun zu haben. Denn häufig versucht man ja, den Schülern dieses Modell im Unterricht dadurch anschaulich klar zu machen, daß man ganz explizit Analogien zu Gegenständen und ihren Eigenschaften in der Makrowelt heranzieht. Die Schüler werden beispielsweise aufgefordert, sich die Teilchen wie Kugeln vorzustellen. Dieses Bemühen um Anschaulichkeit erweist sich in vielen Fällen als Trojanisches Pferd.

Neben der bereits erwähnten Tendenz vieler Schülerinnen und Schüler, Aspekte der makroskopischen Welt und der Lebenswelt auf die Welt der Teilchen zu übertragen, gibt es die folgenden Mißverständnisse:

(1) *Vermischung von Kontinuums- und Diskontinuumsvorstellungen.* Die Kontinuumsicht vom Aufbau der Materie drängt sich offenbar unseren Sinnen auf. Das Diskontinuierliche, also die Konzentration der Materie auf kleine Teilchen im ansonsten absolut leeren Raum, sowie die ständige Bewegung dieser Teilchen widersprechen - anscheinend - dem, was wir im täglichen Leben beobachten. Es gibt eine Reihe von Vermischungen von Kontinuums- und Diskontinuumsvorstellungen, wenn das Teilchenmodell erlernt werden soll. Pfundt (1981) berichtet zum Beispiel über Interviews mit Schülern zur Deutung von Stoffumbildungen. Eine Flüssigkeit wird von den Schülern in der Regel als Kontinuum gesehen. Dem daraus bei der Verdunstung bzw. Verdampfung entstehendem Gas wird dagegen durchaus eine "körnige" Struktur zugebilligt, ohne daß die Teilchen in der Flüssigkeit bereits vorgebildet sind.

(2) *Was ist zwischen den Teilchen?* Viele Schüler haben große Schwierigkeiten einzusehen, daß zwischen den Teilchen nichts ist. Im Alltag ist schließlich zwischen allen Dingen jedenfalls Luft. Wenn Luft aus Teilchen besteht, dann muß eben auch zwischen den Luftteilchen Luft sein.

(3) *Die Teilchen kommen irgendwann einmal zur Ruhe.* In der Welt der Teilchen gibt es keine Reibung, dort kommen die Teilchen nie zur Ruhe, es herrscht in dieser Welt eine ewige "innere Unruhe", wie es Wagenschein (1965, S. 225) so treffend ausdrückt. Teilchen in der realen Welt allerdings haben diese Eigenschaft nicht. Schülern fällt es deshalb schwer, die wissenschaftliche Sicht einzusehen.

Ein Unterrichtsvorschlag zum Teilchenmodell, der bei den Schülervorstellungen ansetzt

Für Unterricht zum Teilchenmodell gilt etwas ganz ähnliches wie zur oben diskutierten physikalischen Vorstellung vom Licht. Das Modell "folgt" nicht aus experimentellen Beobachtungen. Es ist primär keine Sache der Beobachtung, sondern des sich "dazu Denkens". Driver und Scott (1994) haben den folgenden Unterrichtsablauf vorgeschlagen und erprobt, der Schülerinnen und Schüler von ihren vorunterrichtlichen

Vorstellungen zum Teilchenmodell leitet. Viele ganz ähnliche Strategien haben sich auch bei anderen Themen bewährt. Der Unterricht zum Teilchenmodell hat die folgenden Stadien:

(A) Orientierung und "Hervorlocken" der Schülervorstellungen

Das erste Stadium dient dazu, die Schüler mit Phänomenen vertraut zu machen, die sich mit dem Teilchenmodell deuten lassen, wie Kompressibilität von Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern, Ausbreitung von Parfüm und die unterschiedliche Dichte von verschiedenen Materialien. Sie führen eigenständig eine große Anzahl von Experimenten durch und werden gebeten, ihre Deutungen und Vorstellungen aufzuschreiben. Zu einem Phänomen arbeitet jede Schülergruppe ein Poster aus, das ihre Vorstellungen darstellt.

(B) Zur Natur physikalischer Theorien und Modelle

Um den Schülern eine erste Vorstellung vom Modellcharakter der Teilchenvorstellung zu geben, werden einige Spiele durchgeführt. Bei einem geht es darum, die Regel zu erraten, die hinter einer Zahlenfolge steckt, bei einem anderen ("murder mystery") sollen Indizien gesammelt werden, mit denen man in einem vorgegebenen Fall einen Mörder identifizieren kann. Ihre Rolle bei der Untersuchung der Teilcheneigenschaft der Materie sollen die Schüler also analog zur Arbeit eines Detektivs sehen. Es gilt Indizien zusammenzutragen, die eine Teilchenvorstellung unterstützen.

(C) Eigenschaften von festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen

Die in (A) begonnenen Versuche werden nun systematischer angegangen. Eigenschaften der Körper werden zusammengetragen.

(D) Schüler konstruieren ihre Teilchentheorie

Hier geht es ganz explizit darum, daß die Schüler auf der Basis ihrer nunmehr umfangreichen Kenntnisse von Eigenschaften der Körper und Kennzeichen der Phänomene ihre Theorien (basierend auf den gesammelten Indizien) konstruieren.

(E) Überdenken der eigenen Theorien - auf dem Weg zur physikalischen Teilchenvorstellung

Die verschiedenen Schülertheorien werden verglichen. Der Lehrer führt die physikalische Vorstellung ein und erläutert, inwiefern sie besser zu den gesammelten Indizien paßt. Wichtig ist es an dieser Stelle, daß die Schüler über ihre Theorien nachdenken und sich eventuell bewußt werden, daß sie mit der physikalischen Teilchenvorstellung eine neue Sicht übernommen haben. Häufig wird es hier kognitive Konflikte zwischen den Schülervorstellungen und der physikalischen Vorstellung geben. Der Lehrer muß dabei sehr sorgfältig darauf achten, daß die Schüler den betreffenden Konflikt auch tatsächlich erkennen.

(F) Anwendung der physikalischen Teilchenvorstellung

Hier geht es um die Anwendung der neuen Vorstellung in bekannten (s. die in den vorangegangenen Schritten untersuchten Phänomene) und neuen Situationen. Dabei ist es in der Regel nötig, auf die vorangegangenen Stadien zurückzugehen, z.B. zu klären, wel-

cher Natur das Teilchenmodell eigentlich ist und wieso die physikalische Erklärung eine bessere Deutung gibt als die bisherige Schülertheorie.

Diese Strategie hat sich insgesamt gesehen als sehr fruchtbar erwiesen. Es hat sich in ihrer Erprobung aber auch gezeigt, wie langwierig und schwierig es in der Regel ist, die Schüler zur wissenschaftlichen Sicht zu führen. Scott (1992) berichtet über den Lernprozeß einer Schülerin. Immer wieder scheint es im Verlaufe des Unterrichts, als habe sie die wissenschaftlichen Sichtweise erworben, immer wieder aber fällt sie in neuen Situationen auf ihre alte Vorstellung zurück. Allerdings erweitert sich im Laufe der Zeit das Vertrauen auf die wissenschaftliche Sichtweise erheblich. Ganz ähnliche Tendenzen zeigen sich in vielen anderen Untersuchungen. Der Erwerb der wissenschaftlichen Sichtweise vollzieht sich in der Regel nicht in einem einzigen Schritt. Die Überzeugungsarbeit ist ein mühevoller Prozeß.

Vorstellungen im Bereich der Quantentheorie vom Aufbau der Materie

Lernschwierigkeiten, die durch vorunterrichtliche Vorstellungen bedingt sind, treten keineswegs nur im einführenden Chemie- und Physikunterricht in den Klassen 5 bis 10 auf. Es gibt sie, wo immer versucht wird, Chemie und Physik zu vermitteln, also von der Primarstufe bis hinauf zur Universität. Viele der oben skizzierten Vorstellungen, zum Beispiel zum Teilchenmodell, finden sich auch in der gymnasialen Oberstufe und in der Eingangsstufe der Universität. Hinzu kommen neue Schwierigkeiten, wenn der Aufbau der Materie quantenphysikalisch gedeutet wird.

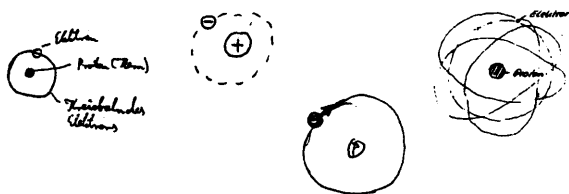


Abb. 4: Schülerzeichnungen von einem Wasserstoffatom (aus Lichtfeld, 1992, 236)

Das Bild, das sich Schüler der Schuljahre 5 bis 10 vom Atom machen, ist vom Bohrschen Modell geprägt, d.h. ein Atom besteht aus einem Kern, den Elektronen auf bestimmten Bahnen umkreisen. Dieses Bild dominiert auch auf der gymnasialen Oberstufe. Lichtfeld (1992) hat zum Beispiel Grund- und Leistungskurschüler nach ihren Vorstellungen befragt und gefunden, daß eine große Mehrheit eben dieses anschauliche Modell zeichnete. (Abb. 4) Andere Zeichnungen ließen Anklänge an die Hantel- oder Orbitalmodelle der Chemie erkennen. Warum das Atom stabil ist, warum die Elektronen auf ihren Bahnen den Kern umkreisen, wird klassisch-anschaulich, und nicht einmal klassisch-physikalisch korrekt, mit dem Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und elektrischer Anziehung gedeutet.

Die mit dem Bohrschen Modell erzielte Anschaulichkeit hat wie beim Teilchenmodell (s.o.) auch bei der Vermittlung quantenphysikalischer Sichtweisen ihren Preis. Schüler haben große Schwierigkeiten, ihre anschaulichen Vorstellungen mit den quantenphysikalischen zu vereinbaren (Lichtfeld, 1992;

Bethke, 1992). Zwar integrieren viele Schüler quantenphysikalische "Splitter" in ihre anschaulichen Vorstellungen, aber diese bleiben im Prinzip unangetastet klassisch. Große Schwierigkeiten haben die Schüler auch mit dem quantenphysikalischen Bahnmodell. Dabei stehen Fragen wie die folgenden im Mittelpunkt: Ist die Bahn, quantenphysikalisch betrachtet, verschmiert? Darf man sie sich wie etwas Verdünntes um den Kern herum vorstellen? Viele Fragen sind hier noch offen und bedürfen weiterer Klärung durch empirische Untersuchungen (s.a. zum Stand der Diskussion die Beiträge in Fischler, 1992).

Vorstellungen zu Stoffumbildungen

Im Rahmen der Vorstellungen zum Teilchenmodell sind bereits Schülervorstellungen zur Sprache gekommen, die in das engere Fachgebiet der Chemie fallen. Zur Struktur von Stoffen hat die große Mehrheit der Schülerinnen und Schüler in den Schuljahren 5 bis 10 Kontinuumsvorstellungen, in die im Verlaufe des Unterrichts einige Aspekte des Teilchenmodells eingegliedert werden. Wie erwähnt, sind viele Schüler der Auffassung, daß aus einem als Kontinuum gedachten flüssigen Stoff durch Verdunstung ein aus Teilchen aufgebautes Gas entstehen kann. Weiterhin sind viele Schüler der Meinung, daß bei ständiger Teilung eines Stoffes die makroskopischen Eigenschaften erhalten bleiben. Die kleinsten Teilchen haben also z.B. die gleiche Farbe wie der betreffende Stoff.

Stork (1994) hat aus der Literatur zu "chemischen" Schülervorstellungen (s. in Pfundt & Duit, 1994) die Vorstellungskomplexe herausgefiltert, die für das Lernen der Chemie im Anfangsunterricht wichtig sind. Zu ihnen zählen neben den bereits erwähnten Teilchenvorstellungen die folgende Vorstellungen zu stofflicher Veränderung:

(1) *Stoffliche Veränderung ist Änderung von Eigenschaften der Stoffe.* Wird Kupfer mit dem Gasbrenner an der Luft erhitzt, so bildet sich ein schwarzer Belag. Die Schüler sprechen davon, daß Kupfer schwarz geworden ist, daß also dieser Stoff seine Eigenschaften verändert hat (Pfundt, 1982a). Dies ist eine Denkweise, die im Alltag fortlaufend verwendet wird und sich dort ständig bewährt. Die moderne Chemie denkt indes anders über den gleichen Vorgang. Für sie ist die Farbänderung ein Indiz für einen neuen Stoff: Rotes Kupfer hört auf zu existieren, schwarzes Kupferoxid entsteht.

(2) *Stoffliche Veränderung als Mischung und Entmischung.* Viele Schülerinnen und Schüler deuten stoffliche Veränderung als Mischung und Entmischung von Stoffen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn aus einer Stoffprobe etwas entweicht (Pfundt, 1982a; Anderson, 1990).

(3) *Bei der Verbrennung wird der Stoff unwiederbringlich zerstört.* Beim Verbrennen von Zink entsteht ein weißer Stoff, Zinkoxid. Pfundt (1982b) forderte Schüler auf, aus diesem Stoff das ursprüngliche Zink zurückzugewinnen. Die Schüler waren der Meinung, daß dies nicht möglich ist, da doch Zink verbrannt ist. Ein Versuch zeigte nun, daß sich tatsächlich aus der "Asche" das Metall zurückgewinnen läßt. Die Schüler akzeptierten dies widerstrebend und fasziniert zugleich. Eine Schülerin folgerte schließlich: "Zink kann beim Verbrennen gar nicht verbrannt sein. Es muß irgendwie erhalten geblieben sein."

Insgesamt zeigt es sich, daß lebensweltlich tief verankerte Erfahrungen und Denkweisen von Schülerinnen und Schülern an die Deutung von Phänomenen stofflicher Veränderung herangetragen werden, mit denen der Chemieunterricht in den Schuljahren 5 bis 10 in der Regel zu tun hat. Für die Schülerinnen und Schüler sind die Deutungen der Chemie in vielen Fällen so fremd, ja bisweilen absurd, so daß schierer Unglauben resultiert, auch wenn sie die Deutungen des Lehrers als solche "verstehen" (vgl. den einleitenden Absatz in diesem Artikel). Bei Herron (1975) findet sich die folgende Äußerung eines Studenten eines College (zitiert nach Stork, 1994): "Meinen Sie, daß das Wasser verschwindet und sich in diese Gase verwandelt, die man nicht einmal sehen kann! Meinen Sie das damit, daß die Gase aus dem Wasser kommen? ... Das ist gar nicht möglich! Wasser ist überhaupt nichts wie diese Gase!" Pfundt (1975, 158) berichtet über die folgende Antwort eines siebzehnjährigen Schülers, der im dritten Jahr Chemieunterricht hatte: "Der Formel nach müßte sich aus Kohlenstoffdioxid wieder Kohlenstoff herstellen lassen. Aber in Wirklichkeit ist es natürlich unmöglich, aus einem farblosen Gas einen festen, schwarzen Stoff herauszuholen". Treffender lassen sich die Schwierigkeiten, die Schüler mit dem Lernen von Chemie haben können, wohl kaum illustrieren.

Vorstellungen bestimmen das Lernen

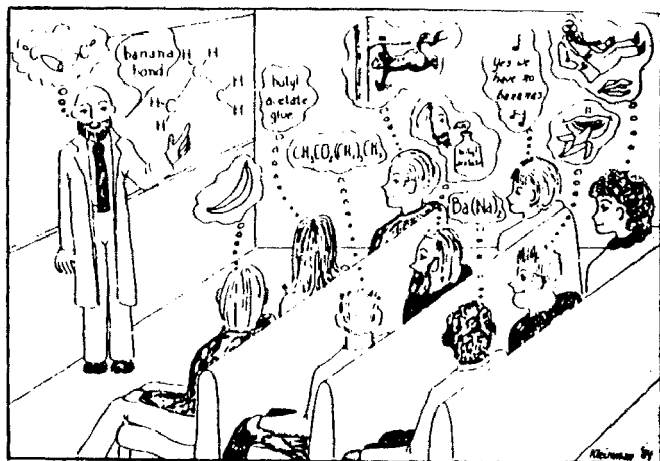


Abb. 5: Images in the classroom (aus: Kleinman u.a., 1987)

An einer Reihe von Beispielen ist in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt worden, daß Schülerinnen und Schüler Vorstellungen in den Unterricht mitbringen, die ganz anders sein können, als der Lehrer bzw. die Lehrerin sie erwartet (Abbildung 5). Sie beeinflussen das Lernen tiefgreifend, sie bilden den Interpretationsrahmen, mit dem die Schüler versuchen, vorgeführte Experimente oder vom Lehrer bzw. Lehrbuch vorgegebene Erklärungen zu verstehen. Es ist deshalb kein Wunder, daß das Verständnis der Schülerinnen und Schüler von dem, was der Lehrer erläutert hat, vom Verständnis des Lehrers zu dieser Sache sehr stark abweichen kann (Abbildung 6).

Für den Lehrer gibt es entsprechend das Problem, die Schüler zu verstehen. Er kann ja die Antworten, die Schüler geben, nur auf der Basis seiner Vorstellungen interpretieren. Wird aber versucht, die Schülerantworten aus wissenschaftlicher Sicht zu verstehen, so sind Mißverständnisse in der Regel unvermeidlich. Wir haben es also beim Lernen von Physik und Che-

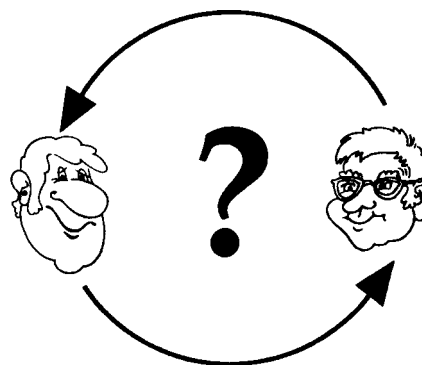


Abb. 6: Zum Verstehen des Verstehens (aus Duit, 1993, 6)

mie (wie beim Lernen ganz allgemein) mit einem Zirkel des Verstehens des Verstehens zu tun. Das, was der Lehrer sagt, bzw. an die Tafel schreibt, kann vom Schüler nur auf der Basis seiner Vorstellungen verstanden werden. Das was der Schüler antwortet, kann der Lehrer nur auf der Basis seiner Vorstellungen verstehen. Worauf es für den Lehrer ankommt, ist, die Vorstellungen der Schüler zu ergründen, um ihre Antworten zutreffend verstehen zu können.

Vorstellungen prägen auch die Beobachtungen bei Experimenten. Häufig beobachten Schüler nicht das, was aus der Sicht des Lehrers doch so eindeutig zu sehen ist, sondern das, was ihnen ihre Vorstellungen zu sehen erlauben. Etwas überspitzt ausgedrückt, sehen Schüler bei Experimenten nicht das, was "objektiv" zu sehen ist, sondern was sie sehen "wollen". Auch dies ist eine ganz alltägliche Erfahrung. Jeder Richter weiß, daß die Beobachtungen verschiedener Tatzeugen ganz erheblich voneinander abweichen können. Sie tun dies nicht unbedingt deshalb, weil die Tatzeugen Tatsachen ganz bewußt verdrehen wollen, sondern weil Interessen, Einstellungen und dergleichen dazu führen, daß tatsächlich verschiedene Aspekte wahrgenommen werden. Auch bei der Interpretation von Kunstwerken ist wohlbekannt, daß man nur sieht, was man schon "weiß", was man zu sehen gewohnt ist.

Zur prägenden Rolle von Vorstellungen zählt auch der bereits beschriebene "Widerstand", seine Vorstellungen aufzugeben, wenn sich Widersprüche zu experimentellen Beobachtungen ergeben. Physik- und Chemieunterricht sind zu einem guten Teil Überzeugungsarbeit. Es muß für die wissenschaftliche Sicht durch eine Vielzahl von theoretischen Argumenten und experimentellen Befunden geworben werden.

Konzeptwechsel und Konzeptwandel

Der Weg von den Alltagsvorstellungen (allgemeiner von den vorunterrichtlichen Vorstellungen) zu den wissenschaftlichen Vorstellungen wird heute in der Regel als Konzeptwechsel bzw. Konzeptwandel gesehen. Die große Anzahl von Untersuchungen zu Schülervorstellungen und ihrer Änderung durch Unterricht hat klar erwiesen, daß sich Vorstellungen in aller Regel nicht einfach auslöschen lassen. Ein solches Auslöschen ist meistens auch gar nicht sinnvoll. Denn viele der Vorstellungen, die Schüler in den Unterricht mitbringen, sind nicht schlicht "falsch", sondern sie haben sich bislang in Alltagssituationen bestens bewährt. Die Vorstellungen zum Licht und zum Sehen, die oben beschrieben worden sind, erlauben es un-

seren Schülern wie der überwiegenden Zahl der Erwachsenen z.B. in ihrer Umwelt gut zurecht zu kommen. Es kommt also darauf an, daß Schüler Alltagsvorgänge auch im Rahmen wissenschaftlicher Vorstellungen sehen lernen (Jung, 1986). In vielen Situationen nämlich ist es unbezweifelbar sinnvoller und weiterführender, wenn die wissenschaftliche Sicht herangezogen wird. So helfen z.B. Alltagsvorstellungen in der Regel nicht weiter, wenn es um das adäquate Einschätzen von Folgen der modernen Technik geht.

Anknüpfen - Konfrontieren - Umdeuten

Jung (1986) hat drei Möglichkeiten beschrieben, wie ein Konzeptwechsel bzw. ein Konzeptwandel eingeleitet werden kann. Erstens kann man an Aspekten der vorunterrichtlichen Vorstellungen anknüpfen, die bereits weitgehend mit den wissenschaftlichen übereinstimmen. Von dort aus werden die Schüler Schritt für Schritt zu den wissenschaftlichen geführt. Man kann hier von einem bruchlosen, kontinuierlichen Weg (in Anspielung auf Paradigmenwechsel in der Geschichte der Wissenschaften in der Terminologie von T. S. Kuhn, 1976, auch von Evolution) sprechen. Zweitens aber kann man Alltagsvorstellungen und die wissenschaftlichen Vorstellungen ganz bewußt gegeneinander setzen (zum Beispiel die oben genannten unterschiedlichen Vorstellungen zum Licht, zur Wärme, zum Teilchenmodell oder zu Stoffumbildungen). Kognitive Konflikte spielen hier eine Rolle. Dies ist ein diskontinuierlicher Weg, der manches mit Revolution im Sinne von T.S. Kuhn gemein hat. Jung hebt unter den erstgenannten, kontinuierlichen Wegen eine besondere Klasse heraus, die er "Umdeuten" nennt. Beim elektrischen Stromkreis haben z.B. viele Schüler die sehr tief sitzende Vorstellung, daß der Strom im elektrischen Gerät (z.B. in einem Lämpchen) verbraucht wird. Folgt man der Jungschen Umdeutungsstrategie, so sagt man den Schülern nicht, daß ihre Vorstellungen aus der Sicht der Physik falsch sind, sondern betont, daß sie sich im Prinzip schon etwas Richtiges denken. Es wird ja in der Tat etwas "verbraucht". Nur heißt dies in der Physik nicht Strom, sondern Energie.

Bedingungen für Konzeptwechsel bzw. Konzeptwandel

Es haben sich die drei folgenden Bedingungen als entscheidend dafür herausgestellt, ob ein Konzeptwechsel bzw. -wandel eingeleitet werden kann (Posner u.a., 1982):

- Die Schüler müssen mit den bisherigen Vorstellungen unzufrieden sein;
- die neue Vorstellung muß ihnen verständlich sein;
- sie muß von vornherein plausibel sein;
- sie muß schließlich fruchtbar sein.

In diesen Bedingungen findet sich kurz zusammengefaßt vieles, was bereits herausgearbeitet worden ist. Etwas Neues wird danach nur in Betracht gezogen, wenn das Alte nicht mehr völlig befriedigt, es kommt nicht nur auf das Verstehen, sondern auch auf das "für wahr halten" einer neuen Vorstellung an. Schließlich muß das Neue dem Schüler etwas bringen, von ihm als fruchtbar empfunden werden.

Unterricht, der sich an diesen Bedingungen orientiert, muß durch ein vertrauensvolles Klassenklima gekennzeichnet sein,

damit die Schüler überhaupt ihre Vorstellung preisgeben. Der Lehrer darf sich nicht primär als Informationsquelle und Bewertungsinstanz für die "Richtigkeit" von Wissen sehen, sondern als "Entwicklungshelfer". Von der Rolle des Lehrers als "Missionar" war oben bereits die Rede. Insgesamt gesehen kommt es darauf an, daß der Lehrer sich dessen bewußt ist, daß sich Wissen nicht einfach an den Schüler weitergeben läßt, sondern daß der Schüler sein Wissen selbst konstruieren muß. Der Lehrer kann bei diesem Prozeß Hilfen durch einfühlsame Führung geben. Für die Unterrichtsorganisation folgt aus dem vorher Gesagten, daß offenere Unterrichtsformen, wie zum Beispiel Gruppenarbeit, gewählt werden sollten. Sie geben den Schülern nämlich die Gelegenheit, ihre Sichtweisen auszutauschen und dadurch die aktive eigene Konstruktion von Wissen in Gang zu bringen.

Belange der Fächer und der Schülerinnen und Schüler in ein ausgewogenes Verhältnis bringen

Die neuen Unterrichtsansätze, die Schülervorstellungen ernsthaft berücksichtigen, müssen als - wichtiger - Teil weit umfassender Bemühungen gesehen werden, Chemie- und Physikunterricht zu entwickeln, der von den Schülerinnen und Schülern als wichtig und sie betreffend angesehen wird. Es gilt, Belange der Fächer, hier Chemie und Physik, und Belange der Schülerinnen und Schüler, vor allem ihre Interessen, Bedürfnisse und Lernfähigkeiten, in ein ausgewogenes Verhältnis zu bringen, damit das Erlernen des Fachlichen den Schülerinnen und Schülern der Anstrengung wert erscheint. Zu einem solchen am Schüler orientierten Unterricht gehören auch über das rein fachliche hinausgehende Aspekte. Es hat sich gezeigt, daß sich weder der Chemie- noch der Physikunterricht der Verantwortung entziehen kann, den Schülern die gesellschaftlichen Auswirkungen von Chemie und Physik und ihrer Anwendungen in der Technik verständlich zu machen (Lauterbach, 1992). Es gibt sehr ermutigende Beispiele für den Erfolg fächerübergreifenden Unterrichts. Es gibt auch interessante neue Ansätze, den Unterricht offener zu gestalten, durch Projektunterricht (Mie & Frey, 1989; Münzinger & Frey, 1989) und durch offenen Unterricht (Berge, 1993). Im offenen Unterricht gehen Schülerinnen und Schüler für eine gewissen Zeit weitgehend eigenen Ideen nach, d.h. sie untersuchen zum Beispiel, was ihnen interessant und wichtig erscheint. Es zeigt sich, daß die Schülerinnen und Schüler nach einer gewissen Eingewöhnungsphase in solchen offenen Lernumgebungen gut und erfolgreich zurecht kommen (Roth, 1995). Schließlich sei auch auf die Bemühungen verwiesen, den Chemie- und Physikunterricht für Mädchen interessanter zu gestalten. Auch hier gibt es inzwischen ermutigende Ergebnisse (Häußler & Hoffmann, 1990; Faißt u.a., 1994). Insgesamt gesehen gibt es also zur Zeit eine Reihe von vielversprechenden Ansätzen für am Schüler orientierten Physik- und Chemieunterricht. Die im hier vorliegenden Artikel vorgestellten Ansätze, die Schülervorstellungen ernst nehmen, können nur dann ihre volle Wirkung entfalten, wenn sie als ein Teil der weit umfassenderen Bemühungen gesehen werden.

Literatur

- Berge, O.E.(Hrsg.) (1993). *Offener Physikunterricht*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Themenheft Mai 1993.
- Bethke, T. (1992). *Schülervorstellungen zu den grundlegenden Begriffen der Atomphysik*. In Fischler, H. (Hrsg.) *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN, 215-233.
- Driver, R., Scott, P.H. (1994). *Schülerinnen und Schüler auf dem Weg zum Teilchenmodell*. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 42, März 1994, 24-31.
- Duit, R. (1986). *Wärmevorstellungen*. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 34, April 1986, 30-33.
- Duit, R. (1992). *Atomistische Vorstellungen bei Schülern*. In Fischler, H. (Hrsg.) *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN, 201-214.
- Duit, R., Häußler, P., Lauterbach, R., Mikelskis, H., Westphal, W. (1993). *Physik - Um die Welt zu Begreifen*. Ausgabe 5/6, Nordrhein-Westfalen. Bühl: Konkordia; Frankfurt/M.: Diesterweg.
- Fischler, H. (Hrsg.) (1992). *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN.
- Faißt, W., Häußler, P., Hergeröder, C., Keunecke, K.H., Klook, H., Milanowski, I., Schöffler-Wallmann, M. (1994). *Physik-Anfangsunterricht für Mädchen und Jungen*. Kiel: IPN.
- Häußler, P., Hoffmann, L. (1990). *Wie Physikunterricht auch für Mädchen interessant werden kann*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik 38, März 1990, 12-18.
- Herron, J.D. (1975). *Piaget for chemists*. Journal of Chemical Education 52, 146-150.
- Jung, W. (1986). *Alltagsvorstellungen und das Lernen von Physik und Chemie*. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 34, April 1986, 2-6.
- Jung, W. (1989). *Phänomenologisches vs physikalisches optisches Schema als Interpretationsinstrumente bei Interviews*. physica didactica 16, 4, 35-46.
- Kesidou, S. (1990). *Schülervorstellungen zur Irreversibilität*. Kiel: IPN.
- Kleinman, R.W., Griffin, H.C., Konigsberg Kerner, N. (1987). *Images in chemistry*. Journal of Chemical Education 64, 766-770.
- Kuhn, T.S. (1976). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Lauterbach, R. (Hrsg.) (1992). *Fächerübergreifender Physikunterricht. Naturwissenschaften im Unterricht Physik*. Themenheft Dezember 1992.
- Lewis, E.L. (1991, April). *The development of understanding in elementary thermodynamics*. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, Chicago.
- Lichtfeld, M. (1992). *Schülervorstellungen als Voraussetzung für das Erlernen der Quantenphysik*. In Fischler, H. (Hrsg.) *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN, 234-244.
- Lind, G. (1975). *IPN Curriculum Physik*. Unterrichtseinheiten für die Orientierungsstufe. Licht und Schatten. Stuttgart: Klett.
- McKie, D., Heathcote, N.H. (1935). *The discovery of specific and latent heats*. London: Edward Arnold & Co.
- Mie, K., Frey, K. (Hrsg.) (1989). *Physik in Projekten*. Köln: Aulis.
- Münzinger, W., Frey, K. (Hrsg.) (1989). *Chemie in Projekten*. Köln: Aulis.
- Pfundt, H. (1975). *Ursprüngliche Erklärungen der Schüler für chemische Vorgänge*. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 28, 157-162.
- Pfundt, H. (1981). *Das Atom - letztes Teilungsstück oder erster Aufbaustein?* Zu den Vorstellungen, die sich Schüler vom Aufbau der Stoffe machen. chimica didactica 7, 75-94.
- Pfundt, H. (1982a). *Vorunterrichtliche Vorstellungen von stofflicher Veränderung*. chimica didactica 8, 161-180.
- Pfundt, H. (1982b). *Ein Weg zur Atomhypothese*. chimica didactica 8, 143-156.
- Pfundt, H., Duit, R. (1994). *Bibliographie: Schülervorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht*. 4. Aufl. Kiel: IPN.
- Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., Gertzog, W.A. (1982). *Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change*. Science Education 66, 2, 211-227.
- Roth, M. (1995). *Ethnographische Studien zum offenen Experimentieren im Physikunterricht*. Unterrichtswissenschaften, Heft 2/95 (im Druck).
- Schimank, H. (1930). *Geschichte des Energieprinzips*. In: Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie, Band 20.
- Scott, P.H. (1992). *Pathways in learning science: A case study of the development of one student's ideas relating to the structure of matter*. In: Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H.: Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 203-224.
- Stork, H. (1994). *Untersuchungen individueller, von Alltagsvorstellungen beeinflusster Lernprozesse im Chemieanfangsunterricht*. Kiel: IPN; internes Arbeitspapier.
- Tiberghien, A. (1980). *Modes and conditions of learning - an example: The learning of some aspects of the concept of heat*. In Archenhold, W.F., Driver, R., Orton, A., Wood-Robinson, C.: Cognitive development research in science and mathematics. Proceedings of an international seminar. Leeds: University of Leeds, 288-309.
- Wagenschein, M. (1965). *Die pädagogische Dimension der Physik*. Braunschweig: Westermann.
- Wagenschein, M. (1968). *Verstehen Lehren*. Weinheim; Beltz.
- Watson, B., Konicek, R. (1990). *Teaching for conceptual change: confronting children's experience*. Phi Delta Kappa 71, 9, 680-685.
- Wiesner, H. (1992). *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Optik (I bis V)*. Physik in der Schule 30, 286-290, 326-331, 365-368, 410-413.
- Wiesner, H. (1994). *Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik 42, Mai 1994, 7-15.
- Wiser, M., Carey, S. (1983). *When heat and temperature were one*. In: Gentner, D., Stevens, A.L.: Mental models. Hillsdale and London: Lawrence Erlbaum, 267-297.

Prof. Dr. Reinders Duit hielt einen Vortrag zu diesem Thema anlässlich der 49. Fortbildungswoche 1995