

3. Den Physikunterricht fundieren

3.1 Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion

Peter Reinhold

3.1.1 Von der Elementarisierung zur Rekonstruktion – Begriffsklärungen

In seiner „didactica magna“ stellte COMENIUS (1954) bereits 1632 die Forderung auf, dass es möglich sei, allen Menschen alles zu lehren. Jeder Sachverhalt könne so dargestellt werden, dass jeder ihn im Kern verstehen würde. Diese Aufgabe der Didaktik, die zugleich ein wesentlicher Aspekt der Fundierung von Unterricht darstellt, wird als Elementarisierung bezeichnet. Aber, es ist zu fragen, ob dies tatsächlich für jeden physikalischen Sachverhalt – beispielsweise für das Phänomen des Himmelsblaus, die Änderung der Aggregatzustände oder die Quantenphysik – in gleicher Weise möglich ist oder nur für bestimmte Sachverhalte? Wie findet man sie und wie bringt man diese Sachverhalte auf ein verständliches Anforderungsniveau? Welche Rolle spielt dabei die Struktur der Disziplin Physik und welche das Ziel des Physikunterrichts, einen Beitrag zur einer naturwissenschaftlichen Grundbildung zu leisten? Welche einzelnen Schritte führen zu einem Verständnis des jeweiligen Sachverhalts und welche Rolle spielen hierbei die Lernvoraussetzungen, die Ergebnisse der Lernprozessforschung und insbesondere die empirischen Untersuchungen zu den

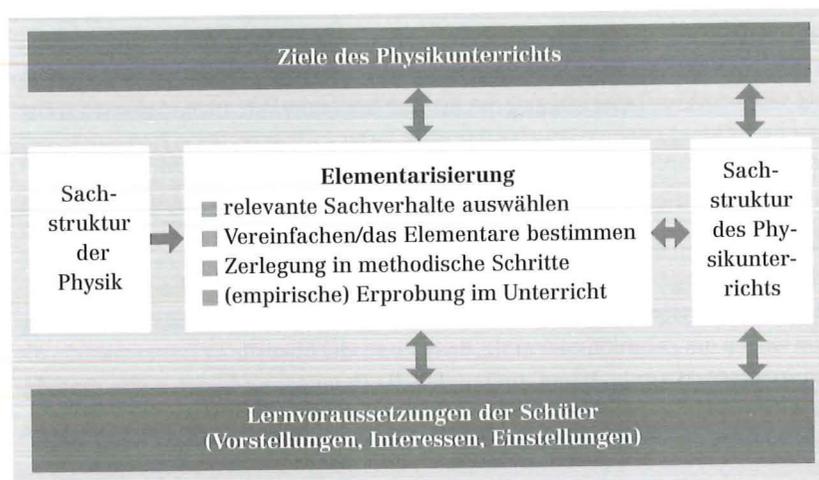


Abb. 1: Elementarisierung von Sachverhalten

Schülervorstellungen? (s. Kap. 2.1) Physikunterricht zu planen bedeutet, sich mit diesen Fragen im Vorfeld auseinander zu setzen und für eine gegebene Lerngruppe dazu Entscheidungen zu treffen. Die Fragen zeigen auch, dass die Elementarisierung eines Sachverhalts verschiedene Aspekte beinhaltet, die sich bei der Planung des Unterrichts zunächst getrennt bearbeiten lassen. Elementarisierung (Abb. 1) beinhaltet zunächst die Vereinfachung eines gegebenen Sachverhalts, indem beispielsweise seine Komplexität oder Abstraktheit reduziert wird. Sie bedeutet weiter, dabei solche Sachverhalte auszuwählen, die für die Physik und den Lernenden elementar sind, die beispielhaft und grundlegend für ein physikalisches Gebiet erscheinen und als bedeutsam für den Bildungsprozess der Lernenden begründet werden können. Als Nächstes sind unter Berücksichtigung der kognitiven Voraussetzungen methodische Schritte zu bestimmen, die in einem Lehr-/Lernprozess eine Aneignung des elementarisierten Sachverhalts ermöglichen. Schließlich ist zu prüfen, ob die gefundene Elementarisierung auch das Gewünschte leistet, sei es durch Erprobung im Unterricht oder durch entsprechende empirische Untersuchungen vor Beginn des Unterrichts.

In die Bearbeitung dieser Fragen fließen grundlegende Vorstellungen über Schule, Unterricht und Lernen ein. Die Entscheidungen hängen im Einzelnen von der Auffassung ab, was der Gegenstand von Physikunterricht sein soll, welche Ziele zu verfolgen, welche Kompetenzen zu entwickeln und welche Standards zu erreichen sind (Kap. 1.2). Sie sind gebunden an die lerntheoretischen, lernpsychologischen und durch physikdidaktische Lehr-Forschung begründeten Auffassungen von Physiklernen, die sich in den verschiedenen didaktisch-methodischen Konzeptionen des Physikunterrichts spiegeln (Kap. 1.1).

Die oben genannten Fragen lassen sich zwar zur Fundierung des Physikunterrichts getrennt voneinander bearbeiten. Sie sind im Ergebnis für eine konkrete Unterrichtsplanung jedoch nicht unabhängig voneinander. Einerseits ist nicht jeder physikalische Sachverhalt, der sich gut vereinfachen lässt (wie beispielsweise der mechanische Hebel), auch unstrittig ein sinnvoller Unterrichtsgegenstand in dem Sinne, dass daran Aspekte einer naturwissenschaftlichen Grundbildung vermittelt werden können. Andererseits gibt es gerade im Bereich der modernen Physik Inhalte wie z. B. die Ideen der Quantenphysik, deren Behandlung im Unterricht wünschenswert ist, für die es aber noch keine überzeugenden Elementarisierungen im engeren Sinne gibt und möglicherweise prinzipiell gar nicht geben kann. Darüber hinaus haben Untersuchungen zu den Schülervorstellungen und ihrer Veränderung durch Physikunterricht gezeigt, dass einige der in den Lehrplänen oder Schulbüchern zu findenden Elementarisierungen nicht das gewünschte Verständnis ermöglichen (z. B. der Begriff *Kraft* oder der Begriff *elektrische Spannung*).

Aufgrund der Komplexität der zu treffenden Entscheidungen und ihrer Abhängigkeit von individuellen und situativen Voraussetzungen gibt es für die Elementarisierung eines Sachverhalts keine „eindeutige“ oder „richtige“ Lösung. Die Bearbeitung dieser Fragen stellt einen kreativen Konstruktionsprozess dar, in dem gegebene physikalische Inhalte unter didaktischen Gesichtspunkten rekonstruiert werden. Entsprechend werden die verschiedenen Aspekte von Elementarisierung auch unter dem Begriff „didaktische Rekonstruktion“ (KATTMANN u. a. 1997) zusammengefasst.

3.1.2 Gegenstände der Elementarisierung: Inhalte des Physikunterrichts

Was Inhalt des Physikunterrichts und damit Gegenstand der Elementarisierung ist, wurde im vorangegangenen Abschnitt nicht näher erläutert. Die bisherigen Überlegungen können leicht dahingehend missverstanden werden, dass es sich bei den Gegenständen im Wesentlichen um physikalische Sachverhalte handelt, also um Erkenntnisse der Disziplin Physik. Diese Vorstellung von den zu elementarisierenden Gegenständen greift allerdings in mehrfacher Hinsicht zu kurz.

Zunächst kann Physik als Disziplin ganz verschieden aufgefasst werden: Sie kann bestimmt werden durch die Phänomene oder Gegenstände, die diese Disziplin untersucht und über die sie Erkenntnisse sammelt. So definiert der Wissenschaftssoziologe ZIMAN (1968) Physik beispielsweise als das Studium von Systemen, die sich auf mathematische Terme reduzieren lassen. Dies ist so zu verstehen, dass es sich dabei nicht um eine Abgrenzung bestimmter Systeme (z. B. belebte vs. unlebte) handelt, sondern um einen bestimmten Aspekt realer Systeme wie beispielsweise das Frequenzspektrum eines Musikstücks.

Physik kann aber auch als gesicherter Wissensbestand verstanden werden, so wie er in den Lehrbüchern für die Ausbildung von Physikern dargestellt wird. Diese Lehrbücher enthalten das Wissen der klassischen Physik (Mechanik, Akustik, Thermodynamik, Elektrodynamik, Optik, Relativitätstheorie), der modernen Physik (Quantenphysik, Atomphysik, Kernphysik, Hochenergiephysik, Physik der kondensierten Materie) und der angewandten bzw. technischen Physik (Elektrotechnik, Elektronik, Sensorik, Nanotechnologie) in Form von sachlogisch geordnetem Faktenwissen.

Die Anwendung dieses Wissens beim Lösen theoretischer oder experimenteller Problemstellungen, also methodisches Wissen, lässt sich in Lehrbüchern dagegen weniger gut darstellen. Die Entwicklung solchen methodischen Wissens ist eine Sache der Erfahrung, so dass Physik nicht nur als Wissensbestand, sondern auch als ein System bewährter Methoden aufgefasst werden kann. Zu diesen Methoden gehören Verfahren und Techniken des Experimentierens wie auch solche des Theoretisierens oder der Modellbildung (Kap. 4 und 5).

Darüber hinaus kann Physik auch als systematisierte und organisierte Forschungsaktivität verstanden werden. Physikalische Wissensbestände sind das Resultat von Forschungsprozessen, in denen in organisierten Kooperations- und Diskussionsprozessen im Labor wie durch Veröffentlichung in wissenschaftlichen Zeitschriften ein über die individuelle Erkenntnis hinausgehender Konsens und damit eine universelle Gültigkeit und Geltung der gefundenen Erkenntnisse hergestellt wird.

Schon allein der Versuch, Physikunterricht ausgehend von der Disziplin Physik zu fundieren, macht deutlich, dass bei der Auswahl der Inhalte verschiedene Aspekte zu berücksichtigen sind. So wären nicht nur die Gegenstände dieser Disziplin oder der gesicherte Wissensbestand, sondern auch die Methoden, Verfahren und Arbeitsweisen sowie der Kooperations- und Diskussionsprozess physikalischer Forschungsaktivitäten jeweils zu elementarisieren, um ein umfassendes Verständnis von Physik als Disziplin zu vermitteln.

Die Diskussion zur Legitimation (Kap. 1) zeigt allerdings, dass sich die Inhalte des Physikunterrichts nicht allein dadurch begründen lassen, dass man sich auf Physik als Wissensbestand, Methode und Denkgebäude bezieht. Vielmehr sind Überlegungen zu einer naturwissenschaftlichen Grundbildung mit einzu beziehen. Naturwissenschaftliche Grundbildung verstanden als „Literacy“ (s. dazu 1.1.2), so wie es als Konzept der PISA-Studie (BAUMERT u. a. 2001) zugrunde liegt, zielt auf ein naturwissenschaftliches Verständnis, das eine verständige und verantwortungsvolle Teilhabe an einer von Naturwissenschaft und Technik geprägten Kultur gestattet. Diese Partizipationsmöglichkeit setzt auf Seiten der Lernenden Kompetenzen in vier übergeordneten Bereichen voraus:

- „naturwissenschaftliche Begriffe und Prinzipien (Wissen bzw. Verständnis zentraler naturwissenschaftlicher Konzepte),
- naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden und Denkweisen (Verständnis naturwissenschaftlicher Prozesse, grundlegende Fertigkeiten, Denkhaltungen),
- Vorstellungen über die Besonderheiten der Naturwissenschaft (Verständnis der *nature of science*, epistemologische Vorstellungen, Wissen über die Grenzen der Naturwissenschaft),
- Vorstellungen über Beziehungen zwischen Naturwissenschaft, Technik und Gesellschaft (Verständnis des „Unternehmens Naturwissenschaft“ im sozialen, ökonomischen und ökologischen Kontext).“

Neben diesen Kompetenzen werden außerdem Einstellungen und Wertorientierungen (Relevanzeinschätzungen, „Faszination Natur und Naturwissenschaften“) als Aspekte einer naturwissenschaftlichen Grundbildung genannt. Der Bezug auf eine naturwissenschaftliche Grundbildung als Ziel des Physikunterrichts erweitert die Liste der für den Unterricht zu elementarisierenden

Gegenstände und er rückt diese Gegenstände auch in einen das Fach Physik übergreifenden Zusammenhang. So kommen Sachverhalte und Gegenstände aus der Technik (z. B. Kältemaschine, Elektromotor, Windenergieanlage) hinzu, die sich aus der physikalischen Forschung und ihren Ergebnissen entwickelt haben, die selbst wiederum Gegenstand physikalischer Forschung sind und die von ökonomischer oder ökologischer Bedeutung sind. Solche technischen Systeme, Verfahren und Prinzipien, ihre historische Entwicklung sowie Zusammenhänge zwischen Technik, Individuum und Gesellschaft sind ebenfalls bei der Fundierung von Physikunterricht zu elementarisieren.

Aus diesen bildungstheoretischen Überlegungen ergeben sich zusammen mit Ergebnissen der Interessenforschung und Ansätzen zum situierten Lernen die Themen des Physikunterrichts (z. B. „Eine Schule spart Energie“), anhand deren die elementarisierten Inhalte zu behandeln sind. Sie betten die physikalischen und technischen Inhalte in motivierende und lernförderliche Kontexte ein. Auch diese Kontexte sind an die kognitiven, affektiven und sozio-kulturellen Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler anzupassen, d. h., es sind geeignete Sachverhalte zu wählen und/oder dem Anforderungsniveau entsprechend zu elementarisieren (Kap. 3.2.).

3.1.3 Elementarisierung als Vereinfachung der Sachstruktur

Unter dem Begriff *Sachstruktur* wird in der Physikdidaktik die sachliche, unterlogischen und systematischen Gesichtspunkten gegliederte Struktur der fachlichen Inhalte verstanden. Dazu gehören einerseits die Begriffe, Theorien, Modelle und Prinzipien und andererseits die Methoden, Denk- und Arbeitsweisen sowie Vorstellungen über die Natur der Wissenschaft Physik. Zu unterscheiden ist dabei die Sachstruktur der Wissenschaft Physik von der unter didaktischen Gesichtspunkten vorgenommenen Strukturierung der elementarisierten Inhalte des Physikunterrichts. Letzteres wird im Gegensatz zur Fachsystematik auch als Lernsystematik bezeichnet.

Physikalische Theorien, Modelle und Prinzipien zeichnen sich durch eine hohe Komplexität aus. Komplex bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Theorien und Prinzipien jeweils eine Menge einzelner Elemente beinhalten, die zueinander in Beziehung stehen und zusammengenommen ein Ganzes bilden. Durch die Betrachtung des Ganzen treten die einzelnen Elemente und ihre Verknüpfung in den Hintergrund. Ein Beispiel sind die NEWTON'schen Axiome. Sie fassen die Grundannahmen zur Beschreibung von Bewegungen zusammen. Physikalische Theorien, Modelle und Prinzipien basieren auf Begriffen, die in der Regel sehr abstrakt sind. Physikalische Begriffe sind ideelle Entitäten, d. h. etwas Gedachtes, das sich auf reale Objekte, auf deren Eigenschaften, die Beziehung zwischen Objekten oder Eigenschaften von Objekten bezieht (JUNG 1979, 94 f.). Abstrakt meint, dass bei der Begriffsbildung gemeinsame Merk-

male von vielen Einzel Tatsachen zusammengefasst und hervorgehoben werden und Unterschiedliches dabei weggelassen oder vernachlässigt wird. Die Aussagen treffen damit auf eine Vielzahl von Einzelfällen zu und erreichen so einen hohen Allgemeinheitsgrad und einen großen Gültigkeitsumfang. Der Begriff *elektrische Spannung*, definiert als Linienintegral der elektrischen Feldstärke, das von einem Anfangspunkt 1 zu einem Endpunkt 2 einer Wegkurve s erstreckt wird, gilt für beliebige elektrische Felder und setzt nicht voraus, dass dabei eine elektrische Probeladung bewegt wird.

Viele physikalische Begriffe sind als Größen quantitativ gefasst, d. h., sie beinhalten einen komplexen Zusammenhang von Zahlenwert und Einheit, der sich auf ein Messverfahren bezieht. Weiter werden diese Größen in mathematisch formulierten Gesetzen zusammengefasst. So eignet sich etwa die Folge der ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7... zur Beschreibung einer (gleichmäßig) beschleunigten Bewegung, denn die in gleichen Zeitintervallen zurückgelegten Wegstrecken verhalten sich wie 1 : 3 : 5 : 7 ... Im ersten Zeitintervall wird die Wegstrecke mit einer Länge von beispielsweise 1 m, im anschließenden zweiten Zeitintervall die Strecke 3 m usw. zurückgelegt. (Das Summieren der ungeraden Zahlen führt auf die Reihe der Quadratzahlen und entsprechend auf den quadratischen Zusammenhang von Weg und Zeit bei einer beschleunigten Bewegung.) Wie alle physikalischen Gesetze hat das Weg-Zeit-Gesetz der beschleunigten Bewegung universelle Gültigkeit. Es gilt für alle gleichmäßig beschleunigten Körper, für ein Elektron in einem elektrischen Feld wie für einen von der Erde angezogenen Stein gleichermaßen (s. Kap. 6.2).

Durch die Merkmale Komplexität, Abstraktheit und Mathematisierbarkeit von physikalischen Begriffen und Prinzipien sind zugleich auch die Richtungen angedeutet, die zur Elementarisierung einer physikalischen Sachstruktur eingeschlagen werden können: Die Komplexität kann reduziert werden, indem die Einzelelemente schrittweise aufgedeckt und ihre Beziehungen untereinander und zur Ganzheit betrachtet werden. Abstraktheit lässt sich vermindern, indem wenige, konkrete Einzelfälle betrachtet werden. Dies ist dann allerdings mit einer Einschränkung des Allgemeinheitsgrades und des Gültigkeitsumfangs des jeweiligen Begriffs verbunden. Weiter kann auf eine Mathematisierung verzichtet und ein Begriff auf seine qualitativen Merkmale reduziert werden.

Für viele Gebiete der Schulphysik liegen solche Elementarisierungen vor. Zum Teil werden sie allgemein akzeptiert, zum Teil werden sie strittig diskutiert. Sie sind in den Lehrplänen und in den entsprechenden Schulbüchern dargestellt. Ihre Entwicklung erfolgte meist intuitiv aufgrund der Erfahrung der jeweiligen Lehrkraft oder des Lehrbuchautors. Auf die Problematik einer empirischen Prüfung der Akzeptanz und Wirksamkeit derartiger Elementarisierung wird im Abschnitt 3.1.6 noch näher eingegangen. An dieser Stelle sollen abschlie-

Bend einige heuristische Verfahren zur Konstruktion von Elementarisierungen unter dem Aspekt der Vereinfachung der Sachstruktur dargestellt und an Beispielen erläutert werden (Durr u. a. 1981, 59 f.).

1. Reduktion auf das Qualitative: Dass mit der Rückführung physikalischer Größen auf ihre qualitativen Merkmale eine Verringerung der Komplexität und damit eine Vereinfachung verbunden ist, wurde bereits erwähnt. Drei Beispiele:

- Die Eigenschaft eines elektrischen Leiters, den Stromfluss zu behindern, wird elektrischer Widerstand genannt.
- Die elektrische Spannung ist ein Maß dafür, wie stark jedes Elektron auf seinem Weg durch die Quelle angetrieben wird (Quellenspannung) oder wie stark es auf seinem Weg durch einen Verbraucher bei vorgegebenem Strom angetrieben werden muss (Verbraucherspannung). (MUCKENFUSS 1991).
- Für einen OHM'schen Widerstand gilt: je größer die antreibende elektrische Spannung, umso größer der angetriebene elektrische Strom.

Im zweiten Beispiel wurde gegenüber der allgemeinen Definition des Spannungsbegriffs auch der Abstraktionsgrad deutlich verringert. Er bezieht sich nicht mehr – wie im allgemeinen Fall – auf Potenzialdifferenzen in beliebigen elektrischen Feldern (s. o.), sondern auf konkrete Gegenstände, nämlich auf elektrische Stromkreise, die als Systeme zur Übertragung von Energie aufgefasst werden.

Bei der Formulierung von Gesetzmäßigkeiten wie im dritten Beispiel lassen sich komparative Begriffe („größer“, „gleich“, „mehr“), die auf eine quantitative Veränderung hinweisen, nicht vermeiden. In solchen Fällen spricht man auch von einer Reduktion auf das „Halbquantitative“. Diese Form der Vereinfachung wird sehr oft gewählt. Sie birgt allerdings die Gefahr von Missverständnissen.

Eine Je-desto-Beziehung kann leicht als eine einfache Proportionalität interpretiert werden, und zwar auch dann, wenn – wie bei einer beschleunigten Bewegung – ein quadratischer Zusammenhang vorliegt.

2. Vernachlässigung von Einflussfaktoren: Eine häufige Form, Komplexität bei der Aufstellung von Gesetzmäßigkeiten zu verringern, ist die Vernachlässigung von „Störungen“, die den untersuchten Sachverhalt nicht „wesentlich“ beeinflussen. So wird beispielsweise bei der Untersuchung einer beschleunigten Bewegung die experimentelle Anordnung so gewählt (z. B. eine Luftkissenfahrbahn), dass Reibung vernachlässigt werden kann. Aber auch Theorien oder Modelle können Vernachlässigungen enthalten. So werden in der klassischen Mechanik relativistische Effekte außer Acht gelassen oder in der Strahlenoptik werden Erscheinungen der Wellenoptik wie Beugung oder Streuung vernach-

lässigt. Beim Teilchenmodell des Festkörpers werden die Atome als Kugeln gedacht und auf festen Gitterplätzen angeordnet, wobei die thermische Bewegung vernachlässigt wird.

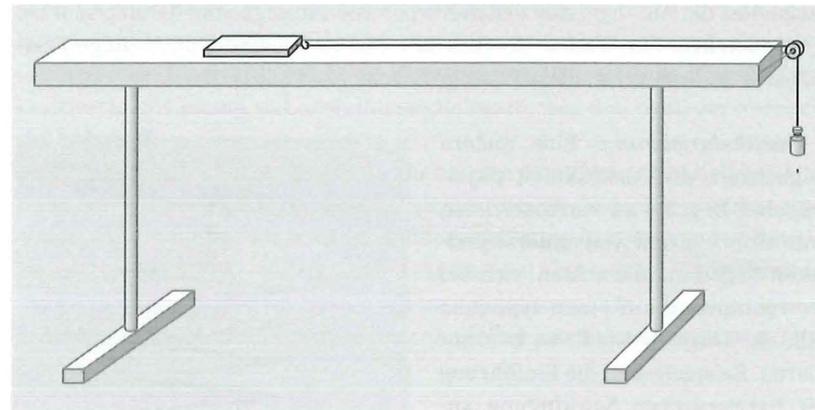


Abb. 2

3. Rückgriff auf frühere historische Entwicklungsstufen: Frühere Entwicklungsstufen von physikalischen Begriffen oder Theorien sind oft weniger komplex. Auf sie kann zur Vereinfachung zurückgegriffen werden. Ein Beispiel

ist das BOHR'sche Atommodell, das den Aufbau von Atomen analog zum Planetensystem beschreibt und dazu Postulate wie die Stabilität der Elektronenbahnen einführen muss (eine beschleunigte Ladung sendet elektromagnetische Strahlung aus, verliert dadurch Energie und würde schließlich in den Atomkern stürzen). Ein weiteres Beispiel ist die Definition der Energie als Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, die sich immer noch in einigen Schulbüchern findet. Diese Definition ist auf die Mechanik beschränkt. Ausgeklammert bleiben dabei spätere Entwicklungen des Energiebegriffs, wie sie in der Thermodynamik, bei der Energiequantelung oder dem Äquivalenzprinzip von Masse und Energie auftreten.

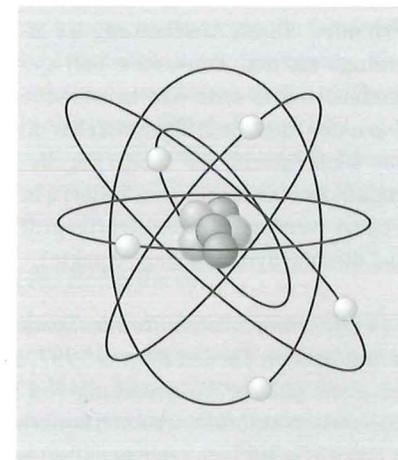


Abb. 3

4. *Generalisierung (Verallgemeinerung)*: Komplexität und Abstraktheit lassen sich auch dadurch reduzieren, dass Begriffe und Gesetzmäßigkeiten anhand nur weniger Beispiele oder Versuche verdeutlicht werden und dann ohne zusätzliche Begründung eine universelle Gültigkeit behauptet wird. Ein typisches Beispiel ist die Aussage: Alle festen Körper und Flüssigkeiten dehnen sich bei Erwärmen aus. Für Wasser (so genannte Dichte-Anomalie) oder einige Festkörper (z. B. Gummi) ist diese Aussage falsch.

5. *Partikularisierung*: Eine andere Möglichkeit, die Abstraktheit physikalischer Begriffe zu verringern, ist, statt eine Vielzahl von unterschiedlichen Fällen zu betrachten, sich bei der Einführung auf einen typischen Fall, ein Musterbeispiel, zu konzentrieren. Beispiele sind die Einführung der harmonischen Schwingung anhand des Federpendels oder die Einführung des Kraftbegriffs als Ursache von Verformungen. Auf diese Weise gelingt es zwar, den jeweiligen Begriff mit konkreten Anschauungen zu verbinden. Diese Anschauung ist allerdings an den konkreten Fall gebunden. Dabei tritt der universelle Charakter des Begriffs zunächst in den Hintergrund. Er muss gegebenenfalls in einem späteren Unterricht ergänzt werden (für den Kraftbegriff sind dies die dynamischen Aspekte).

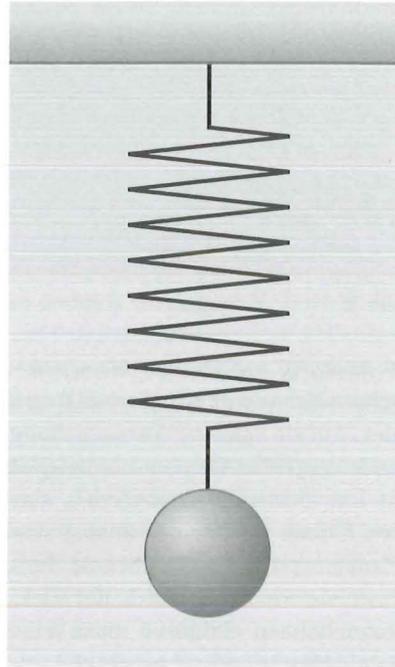


Abb. 4

6. *Überführung in bildhafte oder symbolische Darstellungen*: Aus Theorien zum multimedialen Lernen (MAYER 1997, SCHNOTZ/BANNERT 1999) ist bekannt, dass Lernende bei der Verarbeitung von sprachlichen Informationen über einen Sachverhalt automatisch auch konkrete Anschauungen zu diesem Sachverhalt in Form von Bildern oder genauer, von so genannten mentalen Modellen erzeugen. Werden ihnen entsprechende Bilder zur Anschauung zusätzlich angeboten, d. h., wird die verbale Information in eine bildhafte Darstellung überführt, so stellt dies eine Vereinfachung dar, da eine solche Darstellung die Komplexität des Sachverhalts reduziert.

Zu unterscheiden sind Bilder, die den Sachverhalt analog repräsentieren, d. h.

durch mehr oder weniger starkes Weglassen von Einzelheiten entstehen, und solche, die den Sachverhalt symbolisch darstellen. Letzteres ist der Fall, wenn ein gesetzmäßiger Zusammenhang oder die Beziehung zwischen zwei (oder mehreren) physikalischen Größen in Form eines Graphen dargestellt werden (z. B. t - s -Diagramm, p - V -Diagramm, Wechselstromkurve). Zu den analogen Repräsentationen gehören Schema- oder Schnittzeichnungen von technischen Geräten oder Einrichtungen (z. B. Elektromotor, hydraulische Presse, Kernkraftwerk). Sie bieten viel Gestaltungsspielraum, was den Grad der Vereinfachung betrifft.

Zu nennen sind in diesem Zusammenhang auch elektrische Schaltbilder. Auch wenn sie selbst komplex und abstrakt sind, so stellen sie doch gegenüber einer realen Schaltung mit ihrer meist unübersichtlichen Anordnung der Bauelemente und den verwirrenden Kabelverbindungen eine beträchtliche Vereinfachung dar. Einschränkend ist zu erwähnen, dass sowohl Schaltbilder als auch Graphen erst dann eine Vereinfachung darstellen, wenn der Umgang mit ihnen hinreichend geübt wurde.

7. *Gegenständliche Modelle und Analogien*: In vielen Schulbüchern wird auf die Möglichkeit hingewiesen, Sachverhalte, die der Anschauung nur schwer zugänglich sind, durch die Betrachtung eines den Lernenden vertrauten und analogen Sachverhalts zu vereinfachen. Das klassische Beispiel hierzu ist der Wasserkreislauf als Analogon des elektrischen Stromkreises. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass gerade für diese klassische Analogie die Lernwirksamkeit empirisch bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Eine weitere Möglichkeit, physikalische Sachverhalte zu vereinfachen, ist, die ihnen zugrunde liegenden gedanklichen Modelle nicht nur bildlich darzustellen, sondern auch gegenständlich konkret zu bauen. Beispiele hierzu sind das Funktionsschnittmodell eines Verbrennungsmotors oder Gittermodelle von Kristallen (s. zur Modellmethode Kap. 4.1).

3.1.4 Elementarisierung als Bestimmung des Elementaren

Bisher wurde die Sachstruktur der Physik unter dem Gesichtspunkt der Vereinfachung betrachtet. Es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie sich ihre Komplexität und Abstraktheit verringern lässt. Elementarisierung bedeutet allerdings mehr als die Vereinfachung eines Sachverhalts. Bei der Auswahl und Begründung der Inhalte des Physikunterrichts geht es nicht allein darum, Sachverhalte danach auszuwählen, ob sie sich angemessen vereinfachen lassen. Vielmehr sind als übergreifender Rahmen sowohl das Ziel des Physikunterrichts, zu einer naturwissenschaftlichen Grundbildung beizutragen und die hierfür erforderlichen Kompetenzen zu vermitteln, als auch die kognitiven, affektiven und soziokulturellen Voraussetzungen der Lernenden bei der Ele-

mentarisierung zu berücksichtigen. Dieser Aspekt von Elementarisierung wird als Bestimmung des Elementaren bezeichnet.

Das Elementare zu bestimmen bedeutet in diesem Zusammenhang, den Kern, das Grundlegende oder das Exemplarische insbesondere auch im Unterricht explizit herauszuarbeiten. In seinen Überlegungen zur pädagogischen Dimension der Physik hebt WAGENSCHIN hervor, dass es dabei sowohl um das Fundamentale der Sache (ihr „Fundamentum“) geht als auch um etwas, das fundamental für den Bildungsprozess der Schülerinnen und Schüler zu sein habe. Es sind also solche Sachverhalte auszuwählen, die für die Physik *und* den Lernenden elementar sind, die beispielhaft und grundlegend für ein physikalisches Gebiet erscheinen *und* als bedeutsam für den Bildungsprozess der Lernenden begründet werden können. KLAFKI (1959) bestimmt in seiner „Theorie der kategorialen Bildung“ das Elementare als ein „doppelseitig Erschließendes“. „Im Elementaren erschließt sich dem jungen Menschen ein kleinerer oder größerer Ausschnitt der Wirklichkeit. Aber zugleich erschließt sich derjenige, der elementares Wissen und Können [...] gewinnt, damit selbst die ihn umgebende dingliche und geistige Wirklichkeit“ (KLAFKI 1961, S. 128). Etwas vereinfacht ausgedrückt: Im Elementaren erschließt sich das Individuum die Welt und damit auch seine eigenen Möglichkeiten zur Erschließung von Welt. Letzteres bedeutet, dass das Individuum sich dabei bildet, also weiterentwickelt und zugleich durch die Auseinandersetzung mit dem Elementaren einen Zugang zur Welt gewinnt. In seinen späteren Arbeiten hat KLAFKI herausgearbeitet, dass – um eine umfassende Allgemeinbildung zu ermöglichen – dazu von so genannten Schlüsselproblemen (z. B. Umweltfrage, Friedensfrage) auszugehen ist (s. 1.1).

Es geht also auch um etwas Elementares für den Bildungsprozess des Individuums. Die Sachstruktur der Physik – auch eine vereinfachte – leistet dies nicht ohne weiteres. Die in ihr angeordneten physikalischen Begriffe, Theorien und Prinzipien systematisieren die umfassende Erfahrung der Wissenschaft Physik. Physikalische Definitionen wie die des Spannungsbegriffs sind handlungsleitend für Physiker während ihrer Tätigkeit beispielsweise im Labor oder bei der Darstellung ihrer Forschungsergebnisse in einer wissenschaftlichen Zeitschrift. Auf die Erfahrungen von Schülerinnen und Schülern sind sie zunächst nicht bezogen. Dazu ist Sachstruktur entsprechend zu rekonstruieren, so dass sie ein naturwissenschaftliches Verständnis der Lebens- und Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler und eine verständige und verantwortungsvolle Teilhabe an einer von Naturwissenschaft und Technik geprägten Kultur gestattet.

Die Bestimmung des Elementaren ist mit einer didaktischen Analyse der Sachstruktur der Physik verbunden. Für diese Analyse hat KLAFKI die folgenden Leitfragen aufgestellt:

Leitfragen zur didaktischen Analyse	Beispiel
I. Welchen größeren bzw. welchen allgemeinen Sinn- und Sachzusammenhang vertritt und erschließt dieser Inhalt? Welches Urphänomen oder Grundprinzip, welches Gesetz, Kriterium, Problem, welche Methode, Technik oder Haltung lässt sich in der Auseinandersetzung mit ihm „exemplarisch“ erfassen?	Das Grundprinzip der optischen Abbildung ist, dass jedem Gegenstandspunkt eindeutig ein Bildpunkt zugeordnet wird. Dieses Prinzip liegt der Bildentstehung beim Spiegel, bei der Lochkamera, bei Linsen beim menschlichen Auge oder bei technischen Geräten wie beispielsweise einer Brille, einem Fotoapparat oder einem Fernglas zugrunde.
II. Welche Bedeutung hat der betreffende Inhalt bzw. die an diesem Thema zu gewinnende Erfahrung, Erkenntnis, Fähigkeit oder Fertigkeit bereits im geistigen Leben der Kinder meiner Klasse, welche Bedeutung sollte er – vom pädagogischen Gesichtspunkt aus gesehen – haben?	Einige Kinder tragen eine Brille oder Kontaktlinsen, andere nicht. Die Behandlung des Themas ermöglicht den Schülerinnen und Schülern genauer zu verstehen, warum dies der Fall ist.
III. Worin liegt die Bedeutung des Themas für die Zukunft der Kinder?	Der sachgemäße Umgang mit Brillen ist für die Gesundheit der Kinder von Bedeutung. Physikalische und technische Kenntnisse über den Fotoapparat helfen bei der Interpretation von Warentests und liefern eine Grundlage für Kaufentscheidungen.
IV. Welches ist die Struktur des (durch die Fragen I., II. und III. in die spezifische pädagogische Sicht gerückten) Inhaltes?	Sachlogisch beinhaltet die Behandlung der Abbildung an Linsen die geradlinige Ausbreitung von Licht, die Abstraktion des Lichtstrahls und seine mathematische Repräsentation als Gerade sowie ein Verständnis von Brechung.
V. Welches sind die besonderen Fälle, Phänomene, Situationen, Versuche, in oder an denen die Struktur des jeweiligen Inhaltes den Kindern dieser Bildungsstufe, dieser Klasse interessant, fragwürdig, zugänglich, begreiflich, „anschaulich“ werden kann?	Für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I eignen sich als Ausgangspunkt der Bau einer Lochkamera und die Frage, wie man gleichzeitig die Schärfe und die Intensität der Abbildung erhöhen kann.

Elementarisierung als Bestimmung des Elementaren bedeutet also, die Sachstrukturen der Physik in einer Weise zu rekonstruieren, dass die gewählten Inhalte einen Bildungsprozess bei den jeweiligen Lernenden unterstützen.

3.1.5 Elementarisierung als Zerlegung in methodische Elemente

Diesem Aspekt von Elementarisierung liegt die Vorstellung zugrunde, dass Lernen ein aktiver und konstruktiver Prozess ist, bei dem sich die Entwicklung der kognitiven Struktur, d. h. des Vorverständnisses der Lernenden von dem zu unterrichtenden Sachverhalt schrittweise vollzieht. Auch eine angemessene Vereinfachung dieses Sachverhalts oder sein elementarer Kern werden – mitgeteilt als Information – nicht auf Anhieb verstanden. Die gewählte Elementarisierung muss in geeignete Elemente, d. h. in methodische Schritte zerlegt werden.

Wie findet man solche methodischen Elemente, durch die die Lernenden und die Sache schrittweise „zueinander finden“ oder, in Anlehnung an KLAFFKI, sich wechselseitig erschließen? Dazu müssen zwei grundsätzlich verschiedene Aspekte in Betracht gezogen werden: Auf der einen Seite eine Zerlegung in Elemente, die sich aus der logischen und systematischen Struktur der Sache ergibt, und auf der anderen Seite Schritte, die sich aus typischen Mustern in der Entwicklung und Veränderung der kognitiven Struktur der Lernenden beim Erlernen des betreffenden Sachverhalts ergeben. Der erste Aspekt lässt sich durch eine Analyse der Sachstruktur klären. Der zweite Aspekt ist jedoch ein empirisches Problem, auf das im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

Was den ersten Aspekt betrifft, so kann an die beiden vorangegangenen Abschnitte 3.1.3 und 3.1.4 angeknüpft werden. Durch die Bestimmung des Elementaren eines zu vermittelnden Sachverhalts ist das Unterrichtsziel inhaltlich bestimmt. In diesem Umfang und in dieser Tiefe soll der in Rede stehende Sachverhalt verstanden werden.

Der Weg hin zu diesem Ziel führt über Schritte, die durch eine Aktualisierung des Vorverständnisses und der bereits vorhandenen Erfahrungen und die schrittweise Zunahme von Komplexität und Abstraktheit gekennzeichnet sind. Dies ist beispielsweise durch passend gewählte Musterbeispiele, die zunächst qualitativ, dann halbquantitativ und schließlich quantitativ untersucht werden, oder durch die Anlehnung an die ideengeschichtliche Entwicklung des Gebiets möglich.

Zur Verdeutlichung sei ein Beispiel von WAGENSCHNEIN (1980, 119 f.) angeführt, in dem er als das Elementare des Lichts seine „periodische Struktur“ behandelt. WAGENSCHNEIN stellt das Beispiel in den Zusammenhang seines genetischen Lehrens, in dem es um die schrittweise Genese, das Werden physikalischer Begriffe und Theorien ausgehend von den Phänomenen geht.

1. Der Beobachter schaut mit zugekniffenem Auge durch schmale Blätter-schlitz in die tief stehende Sonne und erkennt farbige Streifen und Strahlen, die sich bewegen (da die Blätter und auch der Beobachter nicht völlig ruhig stehen).

2. Im Labor wird eine fest stehende Kerzenflamme vor einem schwarzen Hintergrund betrachtet. Das gleiche Muster ist zu erkennen. (Das Muster ist also nicht eine Sache der Sonne, sondern des Lichts.)
3. Die Kerze wird nicht durch die Wimpern, sondern durch einen von zwei Fingern gebildeten Spalt betrachtet. Das Muster vereinfacht sich. Es ist ein Lichtband zu sehen, das in eng nebeneinander gereihte Flämmchen zerfällt.
4. Die Finger werden durch zwei Rasierklingen ersetzt. (Das Licht „ist zu periodischen Phänomenen fähig“ (ebd., S. 126), der Spalt bestimmt die Form des Musters. Hätte der Spalt die Form eines Männchens, würde man nicht Spektrallinien, sondern Spektralmännchen sehen.)

Im Beispiel nimmt die Abstraktion schrittweise zu. Sie und auch die Komplexität ließe sich noch erhöhen, wenn man im nächsten Schritt zum FRESNEL'schen Spiegelversuch übergeht und für monochromatisches Licht die Wellenlänge bestimmt. Welche Schritte gewählt werden, hängt von den Voraussetzungen der Lernenden (z. B. Alter, Schulform, Schulstufe) ab.

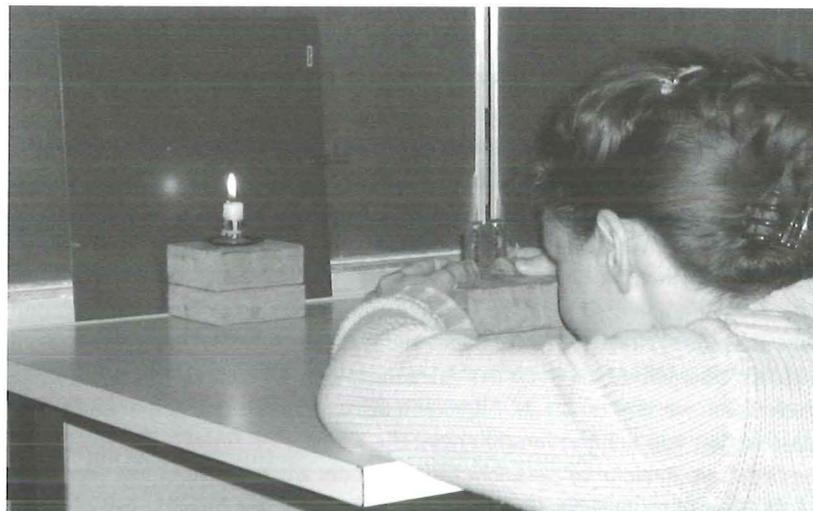


Abb. 5

3.1.6 Elementarisierung als didaktische Rekonstruktion

Elementarisierung im Rahmen des Modells der didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN u. a. 1998) erweitert die bisher genannten Aspekte der Elementarisierung um empirische Lehr-/Lernforschung und ihre Ergebnisse. Für die Entwicklung einer Lehr-/Lernstruktur werden die didaktische Analyse, die Bildungsziele in Unterrichtsthemen transformiert, die Vereinfachung der Sachstruktur, die Bestimmung des Elementaren und der methodischen Elemente

verbunden mit den Vorstellungen, Einstellungen und Interessen von Lernenden sowie deren Veränderung und Veränderbarkeit. Diese Verbindung geschieht auf mehreren Ebenen.

Die Untersuchungen zu den Schülervorstellungen (Kap. 2.1), ihren Einstellungen und Interessen liefern realistische Ausgangspunkte für die Elementarisierung eines Sachverhalts. Sie beschreiben, wie Schülerinnen und Schüler einer bestimmten Alterstufe den Erfahrungsbereich, an dem der Lehr-/Lernprozess anknüpfen soll, inhaltlich verstehen und begrifflich strukturieren. Weiter enthalten diese Untersuchungen auch Hinweise, ob und in welcher Weise an diese Erfahrungen angeknüpft werden kann. So stehen für Schülerinnen und Schüler bei der Betrachtung von Bewegungen die Ursachen, also dynamische Aspekte im Vordergrund. Sollen beispielsweise kinematische Größen wie die Beschleunigung eingeführt werden und dabei an die Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler angeknüpft werden, so sind zu Beginn zumindest qualitativ auch die Ursachen einer Änderung des Bewegungszustands, also Kräfte oder, elementarer, die Wechselwirkung des betrachteten Körpers mit anderen Körpern mit einzubeziehen.

Bei der Untersuchung von Schülervorstellungen stellt sich die Frage, anhand welcher Kategorien diese Vorstellungen beschrieben werden. Nimmt man als Bezugspunkt die Begriffe und Theorien der Sachstruktur, dann liefert dies (nur) die Aussage, dass Schülerinnen und Schüler beispielsweise den Kraftbegriff nicht oder nur teilweise verstehen. Wählt man dagegen die in einer Elementarisierung rekonstruierten grundlegenden Ideen – für den Kraftbegriff: Wechselwirkung – als Ausgangspunkt, so kann sowohl die Schülervorstellung (Kraft wird als Ursache bzw. Eigenschaft von Körpern, nicht als Wechselwirkung gesehen; eine Person auf einem Skateboard, die eine andere zieht, hat Kraft und zieht die andere zu sich heran; dass sie sich dabei auch selbst bewegt, wird von Schülern übersehen) als auch der Ausgangspunkt für den Lehr-/Lernprozess beschrieben werden (s. 2.1.3). Allgemein eignen sich als Bezugspunkt zur Rekonstruktion von Schülervorstellungen die Kategorien *Objekt*, *Eigenschaften von Objekten*, *Beziehung zwischen Objekten* oder *Eigenschaften von Objekten*, auf die sich physikalische Begriffe und Theorien in der Realität beziehen (s. 3.1.2).

Aus der Lernprozessforschung ergeben sich Muster und typische Schrittfolgen beim Erlernen von Begriffen und Theorien der physikalischen Sachstruktur. Der Lernweg wird hierbei als eine Serie aufeinander folgender kognitiver Zustände beschrieben. Jeder Zustand wird durch ein Begriffsnetz dargestellt, das die qualitative und auch quantitative Verknüpfung der Begriffe des jeweils betrachteten Ausschnitts der Sachstruktur enthält. (Für die Kinematik: Ort, Zeit, Bewegung, Durchschnittsgeschwindigkeit, Momentangeschwindigkeit, Beschleunigung.)

Der Lernprozess ist dann die Entwicklung und Veränderung dieser kognitiven Zustände durch Integration neuer Verknüpfungen zwischen den Elementen des Netzes und Differenzierung bereits vorhandener. Für einige Bereiche der Physik hat die Lernprozessforschung eine derartige Beschreibung von Lernwegen vorgelegt. Sie liefern eine empirische Grundlage für die Konstruktion von methodischen Elementen (s. 3.1.4) im Rahmen von Elementarisierungen. Hierzu ein Beispiel aus dem Anfangsunterricht zum elektrischen Strom (NIEDERER/GOLDBERG 1995):

- **Anfangsvorstellung:** Alltags-Strom-Konzept (Strom wird als eine Substanz gesehen, die ähnlich wie Treibstoff Energie enthält und nicht wie Wasser Energie transportiert. Aus dieser Kernaussage ergibt sich z. B., dass sich Strom von der Batterie zum Verbraucher bewegt und nicht umgekehrt oder dass Strom im Verbraucher verbraucht wird.)
- **Erste Zwischenvorstellung:** Positiver und negativer Strom (Positive und negative Ladungen kommen durch zwei verschiedene Verbindungen von der Batterie (plus, minus) zur Lampe. Durch ihr Zusammentreffen erzeugen sie Licht in der Lampe.)
- **Zweite Zwischenvorstellung:** Elektronenstrom (Protonen sind in Ruhe; Elektronen bewegen sich in einer kreisförmigen Bewegung von der Batterie hin zur Lampe in dem einen Draht hin und zurück in dem anderen. Die Bewegung der Elektronen bewirkt ein Schwingen der Atome im Glühfaden und erzeugt dadurch Wärme und Licht. Die Bewegung wird durch Elektronenüberschuss sowie durch abstoßende und anziehende Kräfte von der Batterie angetrieben.)
- **Dritte Zwischenvorstellung:** Strom mit Elektronendruck (Elektronen bewegen sich von hohem Druck zu niedrigem Druck. Am negativen Pol der Batterie herrscht hoher Druck, in oder nach der Lampe haben wir Normaldruck und am positiven Ende der Batterie herrscht niedriger Druck. Druck kann aufgebaut werden oder entweichen.)

3.1.7 Kriterien zur Beurteilung von Elementarisierungen

Abschließend sollen die Überlegungen der vorangegangenen Abschnitte in drei Kriterien zur Beurteilung von Elementarisierungen zusammengefasst werden. Die Kriterien gehen zurück auf JUNG (1972; zit. nach DUIT u. a. 1981).

- a) **Fachliche Relevanz:** Es erscheint im Grunde selbstverständlich, dass im Rahmen von Elementarisierungen vorgenommene Vereinfachungen fachlich angemessen sein müssen. Dass sie – streng genommen – fachlich nicht immer *richtig* sein können, liegt daran, dass sie fachliche Differenzierungen weglassen oder zumindest vernachlässigen, um die Komplexität und Abstraktheit der Sachstruktur zu reduzieren. Im Einzelfall ist die Entscheidung über die fachliche Relevanz eine Ermessenssache und zudem altersabhängig.

- b) *Angemessenheit für die kognitive Struktur der Lernenden*: Dieses Kriterium ist das wichtigste und in seiner Anwendung zugleich auch das schwierigste. Es setzt nicht nur Kenntnisse und Erfahrungen über Schülervorstellungen als Ausgangspunkt von Elementarisierungen voraus, sondern auch Vorstellungen über die kognitive Entwicklung dieser Vorstellungen in Lehr-/Lernprozessen. Dieses Kriterium bezieht sich auf Elementarisierung als didaktische Rekonstruktion und eine Entscheidung darüber, ob es erfüllt ist, lässt sich letztendlich nur aufgrund von empirischen Untersuchungen treffen.
- c) *Entwicklungsfähigkeit*: Im Laufe des Physikunterrichts wird ein Inhalt mehrfach behandelt. Oft erfolgt ein erster Zugang in der Jahrgangsstufe 5/6. Er wird im Laufe der Sekundarstufe I noch einmal aufgegriffen und in der Sekundarstufe II vertieft. Dies muss bei der Elementarisierung berücksichtigt werden. Sie muss nicht nur fachlich relevant und angemessen für die kognitive Struktur der Lernenden zum jeweiligen Zeitpunkt sein, sondern auch später wieder aufgegriffen werden können. Dazu muss eine einmal gewählte Elementarisierung entwicklungsfähig sein. An sie sollte auf einer höheren Entwicklungsstufe möglichst bruchlos, d. h. ohne Umlernen, angeknüpft werden können, um im Rahmen eines Spiralcurriculums kumulatives Lernen zu ermöglichen.

3.2 Kontextorientierung und Alltagsbezug

Rainer Müller

3.2.1 Die „synthetische Wirklichkeit“ im Physikunterricht

Im Zusammenhang mit TIMSS und PISA wird immer wieder ein Problem des deutschen Physikunterrichts angesprochen: Schülerinnen und Schüler können zwar einigermaßen gut immer wieder geübte Routineaufgaben lösen, jedoch die Anwendung des Gelernten in offeneren Aufgabenstellungen, die sich auf Kontexte außerhalb des Unterrichts beziehen, gelingt meist nicht. Schülerinnen und Schüler schaffen es offenbar nicht, flexibel in Alltagskontexten einsetzbares Wissen zu erwerben.

Wenn man „typischen“ Physikunterricht mit unbefangenen Augen betrachtet, muss einen das eigentlich nicht wundern. Leicht erkennt man einen Sachverhalt, den man als die „synthetische Wirklichkeit“ bezeichnen kann. Damit ist gemeint, dass sich der Unterricht seine eigene Realität schafft, die von der Lebenswelt weitgehend abgekoppelt ist und daher zu nicht übertragbarem, „trägem“ Wissen führt. Man kann die synthetische Wirklichkeit im Physikunterricht an folgenden Symptomen erkennen:

1. *Im Physikunterricht sieht man Dinge, die man sonst nirgendwo sieht.*
Kraftmesser, Massestücke, Netzwürfel, Demonstrationsspulen, Verstärker, Stativmaterial. Die Liste könnte man noch lange fortsetzen. Blättert man die Kataloge der Lehrmittelfirmen durch, findet man praktisch kein Gerät, das an irgendeinen Gegenstand außerhalb des Physikunterrichts erinnert. In Schüleraugen sehen die vielen „Kästen“ alle gleich aus und die „Spezialteile“ für einzelne Versuche merkwürdig bis befremdlich.
2. *Im Physikunterricht verwendet man Wörter, die man sonst nirgendwo benötigt.*
Beispiele für Wörter, denen ein Mensch in einem durchschnittlichen Leben ausschließlich im Physikunterricht begegnet, sind: Reuterlampe, Wellrad, Hangabtriebskraft, Normalkraft, Konduktorkugel. Auch diese Liste könnte man noch weiter fortsetzen. Dazu kommen Wörter, die man zwar kennt, die aber in der Physik eine andere oder im Vergleich zum Alltag sehr spezielle Bedeutung haben: Kraft, Energie, Leistung, Arbeit, Wärme, Ladung, Trägheit (s. 6.1).
3. *Im Physikunterricht tut man Dinge, die man sonst nirgendwo tut.*
Man schaut auf eine Kugel, die an einem Faden hängt, und zählt, wie oft sie hin- und herschwingt. Oder man notiert Zeigerausschläge in Tabellen. Daneben lernt man Gesetze (z. B. Trägheitsgesetz), die dem gesunden Menschenverstand und den eigenen Vorstellungen eklatant zu widersprechen scheinen.

An Belegen der geschilderten Art zeigt sich die synthetische Wirklichkeit: Die Begriffe und Inhalte des Physikunterrichtes werden in einem reinen Schulkontext erlebt. Inhaltlich hat die Schulwirklichkeit mit „der Welt draußen“ kaum etwas zu tun. Für Schülerinnen und Schüler ist es schwer, Verbindungen mit bekannten Begriffen, Erfahrungen und Vorstellungen herzustellen, „Anschauung“ zu gewinnen.

Das Geschehen lässt sich gut mit dem von WITTGENSTEIN stammenden Begriff des *Sprachspiels* erfassen. Ein Sprachspiel ist ein „in sich geschlossenes System der Verständigung“, dessen Regeln die Beteiligten durch den Gebrauch erlernen. Aussagen besitzen nur innerhalb des Sprachspiels Bedeutung, sie sind nicht nach außen übertragbar: „Die Grenzen meiner Sprache sind die Grenzen meiner Welt“ (s. dazu Kap. 6.1).

Die Vermutung, dass im Physikunterricht ein Sprachspiel in einer sehr engen Welt stattfindet, wird durch etliche Befunde gestützt: Man weiß, dass Schülerinnen und Schüler ihren Vorstellungen widersprechende Aussagen der Physik oft zwar für den Unterricht akzeptieren (sie halten sich an die Regeln des Sprachspiels), aber sie glauben nicht an ihre Gültigkeit im wirklichen Leben. Außerhalb des Klassenraums wird das Sprachspiel nicht mehr gespielt.