

HEINZ MUCKENFUSS

Experimentieren und Versuche machen

Erkenntnistheoretische Aspekte der Sachbegegnung im naturwissenschaftlichen Unterricht

1. Zur Absicht dieses Beitrages

Die gesteigerte Aufmerksamkeit, die der naturwissenschaftlichen Bildung seit einigen Jahren zuteil wird, zeitigte im gesamten Bildungssystem Vorschläge und auch Vorschriften, die zu einer Verbesserung naturwissenschaftlicher Bildung führen sollen. Davon sind z. B. der Stellenwert und der pädagogische Umgang mit physikalischen Inhalten in der Grundschule betroffen. Ebenso wurde in vielen Bundesländern der Unterricht in den Schuljahren 5 und 6 neu strukturiert oder, soweit es physikalische und chemische Inhalte betrifft, in manchen Bundesländern überhaupt erst eingerichtet. In diesen Jahrgangsstufen wird der Unterricht oft von Lehrkräften erteilt, die sich von ihrer Ausbildung her nicht hinreichend auf die Aufgabe vorbereitet fühlen, im Unterricht physikalische Sachverhalte experimentell zu erschließen. Das dämpft das Engagement, das für eine Verbesserung der naturwissenschaftlichen Bildung bei den Lehrkräften vorausgesetzt werden muss.

Auch der spätere naturwissenschaftliche Fachunterricht leidet in den Fächern Physik und Chemie unter dem vorherrschenden Eindruck, dass der organisatorische Aufwand, die Anforderungen an technische Handlungskompetenz und Erfahrung, und darüber hinaus die Einbindung der Experimente in abstrakte fachliche Zusammenhänge ein „Spezialistentum“ erfordern, dem sich viele Betroffene weder gewachsen noch zugeneigt fühlen. Die Folgen zeigen sich u. A. im Mangel an Fachlehrkräften und an der wenig ausgeprägten Neigung, naturwissenschaftlichen Unterricht in den Fächern Physik und Chemie fachfremd zu erteilen.

Nun will ich hier nicht eine objektiv vorhandene hohe Komplexität der Anforderungen leugnen, die naturwissenschaftlicher Unterricht an Lehrende und Lernende stellt. Diskussionsbedürftig ist aber die Ursache des verbreiteten Bildes von den so genannten harten Naturwissenschaften (Physik und Chemie). Etwas zugespitzt besagt es, dass sie sich überwiegend und vorrangig mit abstrakten und scheinbar deshalb auch lebensfernen wissenschaftlichen Zusammenhängen befassen, die erst in einer apparativ zugerichteten Natur sichtbar werden. Das Experiment erscheint in dieser Perspektive als kunstvoll gefertigter Schlüssel, dessen Nutzung dem geschulten und geschickten Experimentator die Geheimnisse der Natur in Form von Gesetzen und Kausalzusammenhängen erschließt. Experimentieren erhält dadurch die Aura der Kunst eines Inquisitors, mit der ansonsten verborgene Mechanismen des Naturgeschehens ans Licht gezerrt werden¹.

Dieses Vorurteil ist keineswegs aus der Luft gegriffen. Vielmehr wurzelt es tief in der historischen Legitimation der naturwissenschaftlichen Methode, die mit epochal wechselndem Gewicht auch eine Grundlage des naturwissenschaftlichen Unterrichts darstellt. Es gilt also, lang tradierte Rechtfertigungsgründe für den methodischen Anspruch an naturwissenschaftliches Experimentieren im Unterricht zu hinterfragen und pädagogisch neu zu bewerten und zu gewichten, um Ansätze für Veränderungen zu finden, die das Experimentieren stärker mit Lust und weniger mit Last verbinden.

Fachlich und pädagogisch unterschiedliche Zielsetzungen des Experimentierens müssen sich in der didaktischen Verortung und Gestaltung des Experiments spiegeln, damit sie zum Tragen kommen. Dass für die Auswahl und Gewichtung der Aspekte und Ziele die vorgefundene Erfahrung der Lernenden in besonderem Maße ins Gewicht fällt, ist im Grundsatz unumstritten. Mit welchem Ziel experimentiert wird, welche Inhalte experimentell aufgegriffen werden und wie die Versuche material und prozessual zu gestalten sind, sollte deshalb stark von der Altersstufe abhängig sein.

¹ Die Metaphorik der Inquisitionsprozesse diente Francis Bacon bereits zu Beginn des 17. Jahrhunderts zur Beschreibung der induktiv-experimentellen Methode, die er für die Gewinnung naturwissenschaftlicher Erkenntnis empfahl. Auch Kants berühmtes Bild eines Richters, der die Natur mit Hilfe des Experiments zwingt zu antworten (s. S. 6), stammt aus diesem metaphorischen Zusammenhang (s. dazu [1], Abschnitt 2.1.2.1, S. 103 ff).

Dies bedeutet konkret, dass es eigentlich nicht sein kann, dass im Sachunterricht der Grundschule die gleichen Experimente mit den gleichen Mitteln und analogen Zielsetzungen gemacht werden, wie in den Naturwissenschaften der Schuljahre 5 und 6 und möglicherweise ein weiteres Mal im Fachunterricht der höheren Klassen der Sekundarstufe I. Genau dies aber ist im Zuge der aktuellen Innovationsbemühungen immer häufiger zu beobachten – im Beispiel: Bereits Grundschüler bauen elektrische Anlagen zusammen und lernen sie mit Fachbegriffen zu beschreiben, die sich auf abstrakte Modellvorstellungen beziehen („Stromkreis“, „Leitfähigkeit“, „Spannung“). Das Thema wiederholt sich lehrplangemäß im 6. Schuljahr. Trotzdem können Fachlehrer im Elektrizitätslehreunterricht der 8. Klasse nicht auf die Wiederholung derselben Experimente verzichten. Ihre Schülerschaft kommt gewöhnlich aus verschiedenen Schulen, in denen das Thema jeweils mit unterschiedlicher Zielsetzung, auf verschiedenen Anspruchsniveaus oder vielleicht auch gar nicht unterrichtet wurde. Denn eine bewusste und offengelegte didaktische Konstruktion im Sinne spiralförmiger Curricula liegt den Wiederholungen nicht zugrunde. Ein Diskurs zwischen den Lehrplankommissionen der Grundschule und denjenigen der weiterführenden Schularten ist i. d. Regel nicht institutionalisiert. Es ist deshalb auch nicht außergewöhnlich, dass die Fachlehrer der weiterführenden Schularten über keine differenzierte Kenntnis der Lernvoraussetzungen aus dem Sachunterricht der Grundschule verfügen.

Abstimmungen und Absprachen sind aber nötig um kumulatives Lernen zu unterstützen. Schon Grundschüler hantieren mit Solarzelle und angeschlossenen Solarmotor und lernen, die Vorgänge mit Begriffen wie „Sonnenenergie“, „elektrische Energie“, „Energieumwandlung“ usw. zu beschreiben. Grundschüler beobachten nicht nur Verdunstungsvorgänge oder den „Wasserkreislauf“, sie lernen auch, ihn mit Hilfe von Teilchenvorstellungen zu erklären. Im Tafelbild werden Luft und Wasserdampf mit wahrnehmungsfremden „Pünktchen“ dargestellt, als wäre dies den experimentellen Befunden abzurufen. In Baden-Württemberg und vielen anderen Bundesländern ist das alles ohne Einschränkung lehrplangerecht. Auf Arbeitsblättern und in den Schulheften der Grundschüler fallen rezeptartig anmutende Methodenschritte für die Durchführung naturwissenschaftlicher Experimente auf: „Frage“ → „Vermutung“ → „Beobachtung“ → „Ergebnis“ o. Ä. Gibt es – diese Fragen drängen sich auf – eine prinzipielle oder in der Sache liegende Grenze für den Transfer von Standardinhalten und -verfahren der Sekundarstufe 1 in die Grundschule? Bedarf dieser gegebenenfalls eines explizierten didaktischen Bezugs zum Curriculum in den Klassen 5 und 6 und zum nachfolgenden Fachunterricht und welche Kriterien könnten für die Abstimmung des gesamten Schulcurriculums aus fachdidaktischer Sicht von Bedeutung sein?

Ich möchte im Folgenden versuchen, Anhaltspunkte für eine Differenzierung der Formen und Funktionen der Sachbegegnung im naturwissenschaftlichen Unterricht darzustellen, die es erlauben, naturwissenschaftliche Experimente im engeren Sinne von „Versuchen“ und anderen handlungsorientierten Tätigkeiten didaktisch zu unterscheiden und zu bewerten. Es wird sich zeigen, dass die pädagogische Relevanz der verschiedenen Formen unstrittig ist, dass aber der jeweilige didaktische Ort im Hinblick auf Lernvoraussetzungen und Unterrichtsziele wohl bedacht sein sollte. Im Zuge dieser Überlegungen ergeben sich dann auch Argumente für eine didaktisch begründbare Stufung verschiedener Arten der Sachbegegnung.

Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen liegt auf dem Bemühen, die didaktische Relevanz erkenntnistheoretischer Bedingungen der Naturwissenschaft zu beleuchten. Was in diesem Rahmen nicht beabsichtigt ist und geleistet werden kann, ist eine umfassende kritische Würdigung der Vielfalt an methodischen Formen unterrichtlichen Experimentierens und der damit jeweils verbundenen pädagogischen Ziele und Hoffnungen. Wie z. B. das Einüben von Fertigkeiten, das Sozialverhalten oder die Motivation und das Interesse durch die experimentelle Tätigkeit gezielt gefördert werden kann, ist trotz aller Wichtigkeit nicht das Ziel der folgenden Ausführungen. Manche diesbezüglichen Aspekte werden aber am Rande direkt oder „zwischen den Zeilen“ angesprochen.

Das „physikalische Experiment“ hat im naturwissenschaftlichen Unterricht eine zentrale Stellung erhalten. Vor Fehlinterpretationen seiner Funktionen im Erkenntnis- und Lernprozess wurde es dadurch leider nicht bewahrt². In diesem Beitrag beschränken sich die Betrachtungen auf die physikalische Perspektive. Insbesondere für den Bereich der Biologie wären weitere Überlegungen und Unterscheidungen nötig, die hier aber aus Raumgründen ausgeklammert bleiben³.

² s. dazu [1], Kapitel 3.2 und 4.5

³ Beim Umgang mit Lebewesen stehen schon aus ethischen Gründen andere Kriterien im Vordergrund als bei den Gegenständen aus der Physik und Chemie. Eine genaue Analyse würde sehr tiefgreifende Unterschiede zwischen Biologie und Physik zu Tage fördern, die zumindest teilweise die unterschiedliche Beliebtheit dieser Fächer erklären. Beide Fächer pflegen gegensätzliche

2. Experiment und Erkenntnisgewinn

Nach verbreiteter Auffassung ist der Erkenntnisgewinn durch das Experiment nicht nur in der Naturwissenschaft selbst sondern auch im Physikunterricht als Methode von großer Bedeutung. Selbstverständlich oder gar logisch ist dies allerdings nicht. Denn dass die Lernenden im 45-Minuten-Takt des schulischen Unterrichts auf dem (idealisierten) Erkenntnisweg der Naturwissenschaften zu jenen naturwissenschaftlichen Einsichten gelangen, die in der Wissenschaftsgeschichte normalerweise über viele Jahre umstritten waren, bevor sie Geltung beanspruchen konnten, erscheint doch ziemlich zweifelhaft. Es bedarf daher einer genaueren Begründung, ob, in welchem Umfang und mit welchem Anspruch das Experiment im engeren Sinne⁴ auch im pädagogischen Prozess von Bedeutung sein soll.

Schon innerhalb des Forschungsprozesses ist die Frage nicht trivial, in welchen Situationen das Experiment weiter hilft und wo es entbehrlich ist. An einem Beispiel Galileis soll dies verdeutlicht werden. Es ist dem „Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische“ entnommen ([2], S. 152–155):

Die beiden Diskutanten – SALVIATI vertritt Galileis Meinung und SIMPLICIO ist ein „Aristoteliker“ – erörtern die Frage, ob die Erddrehung bemerkbar sein müsste oder nicht. Nach der überlieferten Meinung sollte ein Stein, der von einem Turm fallen gelassen wird, westlich des Lotpunktes auftreffen, falls die Erde sich gemäß dem kopernikanischen System dreht. Das Problem findet ein Analogon in einem nach Osten fahrenden Schiff, von dessen Mast ein Stein auf das Deck fällt. SALVIATI kritisiert SIMPLICIO, dass er ebenso wie alle bisherigen Autoren die herkömmliche Meinung übernommen hat, ohne sie experimentell zu überprüfen. Außerdem behauptet SALVIATI, dass sich alle Wissenschaftler bisher geirrt hätten, denn der Stein falle immer lotrecht, unabhängig davon ob das Schiff sich bewegt oder nicht. SIMPLICIO ist von dieser Meinung verwirrt:

SIMPLICIO: „Wenn ihr mich nicht auf den Weg des Versuchs verwiesen hättet, so würde nach meiner Meinung unser Hin- und Widerreden so bald noch kein Ende nehmen. Denn mir scheint diese Frage für menschliche Spekulation so unzugänglich, dass hier niemand sich erkuhnen kann, etwas zu glauben oder zu vermuten.“

SALVIATI: „Und doch erkuhne ich mich das zu tun.“

SIMPLICIO: „Ihr hättet also nicht nur nicht hundertmal, sondern auch nicht einmal die Probe darauf gemacht und seid doch des Erfolges ohne weiteres sicher? ...“

SALVIATI: „Ich bin auch ohne Versuch gewiss, dass das Ergebnis so ausfällt, wie ich euch sage, denn es muss so ausfallen ...“

Im weiteren Diskussionsverlauf überzeugt SALVIATI SIMPLICIO durch logische Schlussfolgerungen, die vom Trägheitsgesetz und dem Prinzip der ungestörten Überlagerung von Bewegungen ausgehen, dass der Stein unabhängig von einer gleichförmigen Schiffsbewegung immer lotrecht vom Mast falle. Entsprechend werde ein frei fallender Körper von der Erddrehung nicht beeinflusst⁵.

Woher aber stammt die Sicherheit, mit der Galilei daran glaubte, auf eine experimentelle Bestätigung seiner Vorhersage verzichten zu können, obwohl er SIMPLICIO im gleichen Zusammenhang darauf hingewiesen hatte, dass ein solcher Verzicht die Gefahr Jahrhunderte lang überlebender Irrtümer zur Folge haben kann? Welche Voraussetzungen entscheiden darüber, woran Naturwissenschaftler glauben?

Offenbar hat sich die Denkfigur, die Galilei in SALVIATIS Argumentation plausibel darstellt, bereits in vielen anderen Zusammenhängen bestens bewährt. Das Trägheitsgesetz liegt z. B. Galileis experimentellen Arbeiten zum Pendel, zum freien Fall und zur schiefen Ebene zugrunde. Da er mit seiner Hilfe alle möglichen realen Bewegungsvorgänge hinreichend genau erklären konnte, um unvermeidlich auftretende Abweichungen von den idealen Verhältnissen auf „Störfaktoren“ (z. B. Luftwiderstand, Reibung) zurückführen zu können, wurde die Hypothese von der Gültigkeit des Trägheitsprinzips für Galilei zur Gewissheit. Sie be-

Aspekte des Menschenbildes. In Biologie geht es um Empathie mit allem Lebenden, um das Eingebundensein des Menschen in die Natur. Das physikalische Verhältnis zur Natur ist ein anderes. In der Naturbeherrschung tritt der Mensch der Natur „gegenüber“. Das Absehen von individueller Betroffenheit ist Teil der Erkenntnisstrategie.

⁴ Gemeint ist damit die paradigmatische Form, in der das physikalische Experiment für den Erkenntnisgewinn in der Wissenschaft eine Schlüsselrolle spielt. Sie wird weiter unten durch ein Zitat von Kant näher beschrieben (s. S. 6).

⁵ Interessanterweise irrt sich ja in diesem Fall auch Galilei. Zwar erfährt der Stein nicht die von den Aristotelikern erwartete Westablenkung, jedoch eilt er der Erdoberfläche nach Osten voraus, weil er an der Mastspitze eine größere Umfangsgeschwindigkeit als die der Bodenfläche hat.

durfte keiner weiteren experimentellen Bestätigung mehr. Mit der Idee des Trägheitsprinzips hatte Galilei allerdings zuvor jahrzehntelang gerungen. Er wusste daher aus eigener Erfahrung um die psychischen Widerstände, die es zu überwinden galt, wenn man die diametral entgegengesetzte, überlieferte Auffassung von Aristoteles substituieren wollte. Ihr gemäß ist die Bewegung auf Kräfte zurückzuführen, deren Wegfall auch das Ende der Bewegung bedeutet. Die aristotelische Deutung der Bewegungen war eben nicht nur durch historische Überlieferung fest im Denken verankert. Scheinbar wird sie ja – auch für unsere Schülerinnen und Schüler – in alltäglichen Vorgängen vielfach bestätigt. Galilei setzt in seinen auf italienisch verfassten Schriften seine ganze Argumentationskunst und viel didaktisches Geschick ein, um seine Leser an zahlreichen ausführlich dargelegten Beispielen von der Gültigkeit des Trägheitsgesetzes zu überzeugen. Er weiß natürlich, dass Ideen nur als gedankliche Idealgestalten bei der Interpretation realer Verhältnisse helfen, und nicht abschließend durch ein einzelnes Experiment als „empirische Tatsachen“ beweisbar sind, auch nicht durch hundertfache Wiederholung. Deshalb konnte Galilei auf die experimentelle Bestätigung des vorhergesagten Auftreffpunktes eines Steines, der vom Mast eines bewegten Schiffes fällt, verzichten.

Es gibt eine Vielzahl von historischen Beispielen, in denen trotz fehlender experimenteller Bestätigung nicht an der Gültigkeit von Hypothesen gezweifelt wurde. Die für die Naturwissenschaft tragenden oder konstitutiven Hypothesen beziehen sich auf eine abstrakte Klasse von Vorgängen und damit auf eine unbegrenzte Anzahl einzelner empirischer Fälle oder Phänomenbereiche. Hat sich die Hypothese in vielen empirischen Zusammenhängen bewährt, verlassen sich Wissenschaft und Technik darauf, dass sie dies auch in bisher unbestätigten Fällen tut. Hierfür sei ein weiteres historisches Beispiel aus dem Bereich der Bewegungslehre angeführt:

Newton erläutert 1687 warum Planeten um ein Zentralgestirn kreisen mit Hilfe der in Abb. 1 wiedergegebenen Zeichnung⁶. Sie stellt die Erde dar, auf der von einem „sehr hohen Berg“ aus ein Stein horizontal geworfen wird. Bei niedrigen Geschwindigkeiten beschreibt der Stein Wurfparabeln.

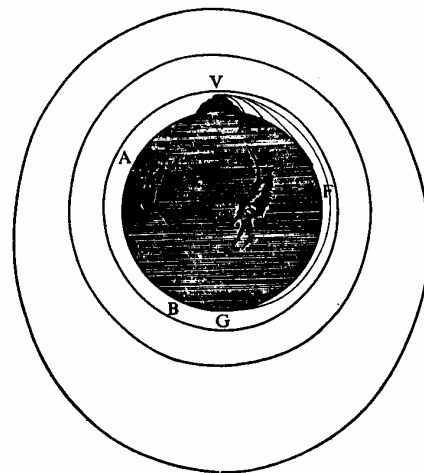


Abb. 1: Newtons Erläuterung zum Zustandekommen der Planetenbewegung, die im hergestellten Bezug zur Erdumkreisung auch als Vorhersage der Möglichkeit künstlicher Erdsatelliten aufgefasst werden kann.

Bei passender höherer Geschwindigkeit umrundet er die Erde und kehrt von hinten zur Abwurfstelle zurück. Newton weist darauf hin, dass man sich die Luft *als ganz fortgenommen oder wenigstens ihren Widerstand als nicht vorhanden denken* soll. Er betont dadurch, dass er eine Hypothese entwickelt und kein real durchführbares Experiment beschreibt. Trotzdem schreibt er dieser Idee die „Gewissheit eines Beweises“ zu, weil sie aus seinem anderweitig dargelegten Gravitationsgesetz und den Gesetzen zum Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung abgeleitet ist. Zu Newtons Zeit war es immer noch mutig, eine Analogie zwischen sublunaren Vorgängen und dem (himmlischen) Planetenraum herzustellen. Dass hier wie da die gleichen Gesetze gelten sollen, war wohl für die meisten Menschen noch unvorstellbar. Akzeptiert man aber diesen Gedanken, dann kann Newtons Darstellung auch als Vorhersage der Möglichkeit gedeutet werden, künstliche Satelliten um die Erde kreisen zu lassen. Im Jahr 1957 wäre weder der Sputnik in eine Erdumlaufbahn geschossen worden, noch gäbe es Wettersatelliten usw., wenn nicht der Glaube an die Naturangemessenheit der newtonschen Idee über Jahrhunderte auch ohne direkte experimentelle Bestätigung unerschüttert geblieben wäre. Dreihundert Jahre später sorgt sich die Menschheit um den Schrott, den die massenhafte technische Umsetzung dieser Idee im Orbit hinterlassen hat.

So wie die Gültigkeit einer bewährten Hypothese nicht schon deshalb in Zweifel gezogen wird, weil sie im Einzelfall nicht experimentell geprüft werden kann, lassen sich andererseits Hypothesen auch nicht durch einzelne Experimente widerlegen oder gar aus den Köpfen verbannen. Für das Scheitern eines Experiments werden nämlich regelmäßig solange wie möglich „Störvariablen“ verantwortlich gemacht. Michael Faraday

⁶ NEWTON, Isaak: *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687). Die Abbildung ist [3], S. 401 entnommen.

stellte z. B. 1822 – bald nach der Entdeckung des Elektromagnetismus durch Christian Oersted – die Hypothese auf, dass sich mit Magneten elektrische Vorgänge erzeugen lassen (Induktionsgesetz). Jahrelang erntete er bei dem Versuch, dies experimentell zu verifizieren, nur Misserfolge. Aber neun Jahre später gelang ihm der experimentelle Nachweis mit einer aus heutiger Sicht sehr einfachen Versuchsanordnung (Abb. 2). Auch für das Festhalten an Ideen trotz experimenteller Misserfolge gibt es eine Fülle von Beispielen in der Wissenschaftsgeschichte.

Abb. 2: Prinzip von Faradays experimenteller Bestätigung des Induktionsgesetzes. Nähert oder entfernt man den Magneten der eisenbestückten Spule links, bewegt sich eine Kompassnadel in der zweiten Spule rechts.



Die grundlegenden physikalischen Ideen werden also weder aus einzelnen Phänomenen und Versuchen „hergeleitet“, noch wird ihre Naturangemessenheit zwangsläufig in Zweifel gezogen, wenn die experimentelle Bestätigung scheitert oder aus anderen Gründen fehlt.

Für den Physikunterricht erscheint in diesem Licht das Zelebrieren eines angeblichen Standardweges zu physikalischer Erkenntnis nach dem Schema „Problemfrage“ → „Vermutung“ → „Versuchsplanung“ → „Experiment“ → „Beobachtung“ → „Schlussfolgerungen“ nicht als der Weisheit letzter Schluss. Seine hohe Wertschätzung verdankt das hypothesengeleitete Experiment andererseits zu Recht dem Erfolg, mit dem die neuzeitliche Naturwissenschaft seit der Renaissance die Welt verändert. Hypothesen, z. B. in Form mathematischer Idealgestalten, gelten als naturwissenschaftlich, wenn sie sich prinzipiell empirisch bewähren. Eine Form dieser Bewährung sind zweifellos die nach Maßgabe der Hypothese geplanten Experimente, eine andere ist z. B. der Vergleich hypothesenbasierter Vorhersagen mit tatsächlichen Abläufen in der Natur.⁷

Die didaktische Reduzierung des naturwissenschaftlichen Erkenntnisweges auf ein zum Zeittakt schulischen Unterrichts passendes Schema für das Experiment wurzelt in einer verkürzenden Rezeption der einprägsamen metaphorischen Erläuterung Immanuel Kants zum naturwissenschaftlichen Erkenntnisweg. Kant knüpft dabei explizit an Francis Bacon an, der bereits 150 Jahre vorher erfolgreich dargestellt hat, dass sich Wissenschaft nicht auf Naturbeschreibung beschränken darf. Bacon betonte, dass sich der Fortschritt danach bemisst, ob es gelingt die Natur zu beherrschen und sie zum Wohle der gesamten Menschheit zu verändern. Für einen so gearteten Fortschritt der Wissenschaft war es nicht mehr ausreichend, die Welt nach den Kriterien zu ordnen, die uns in der sinnlichen Erfahrung und im überlieferten Wissen gegeben sind: *Denn eine planlose und sich selbst überlassene Erfahrung ist, wie bereits erwähnt, ein bloßes Umhertappen im Dunklen, das die Menschen eher verdimmt als belehrt. Wenn aber die Erfahrung eindeutig und stetig nach einer sicheren Regel voranschreitet, lässt sich besseres für die Wissenschaften erhoffen* (Bacon in [4], S. 110). Die „sichere Regel“ und die Frage, in welcher Beziehung sie zur Erfahrung steht, umfasst das „Design“ des physikalischen Forschungsprozesses. Eineinhalb Jahrhunderte später fasst Kant die experimentelle Methode der Naturwissenschaft in der berühmten Metapher einer Gerichtsverhandlung zusammen (Vorrede zur 2. Auflage der „Kritik der reinen Vernunft“):

„... [Allen Naturforschern ging] ein Licht auf. Sie begriffen, dass die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt, dass sie mit Prinzipien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorgehen und die Natur nötigen müsse, auf ihre Fragen zu antworten, nicht aber sich von ihr allein gleichsam am Leitbände gängeln lassen müsse; denn sonst hängen zufällige, nach keinem vorher entworfenen Plane gemachte Beobachtungen gar nicht in einem notwendigen Gesetze zusammen, welches doch die Vernunft sucht und bedarf. Die Vernunft muss mit ihren Prinzipien, nach denen allein übereinkommende Erscheinungen für Gesetze gelten können, in einer Hand, und mit dem Experiment, das sie nach jenen ausdachte, in der anderen, an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, aber nicht in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötigt, auf die Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt. Und so hat sogar Physik die so vorteilhafte Revolution ihrer Denkart lediglich dem Einfalle zu verdanken, demjenigen, was die Vernunft selbst in die

⁷ So fand z. B. Newtons o. g. Hypothese zur Entstehung der Planetenbahnen eine gefeierte Bestätigung in der von Edmund Halley 1682 für das Jahr 1758 vorhergesagten Wiederkehr des nach ihm benannten Kometen.

Natur hineinlegt, gemäß, dasjenige in ihr zu suchen (nicht ihr anzudichten), was sie von dieser lernen muss, und wovon sie für sich selbst nichts wissen würde. Hierdurch ist die Naturwissenschaft allererst in den sicheren Gang einer Wissenschaft gebracht worden, da sie so viele Jahrhunderte durch nichts weiter als ein bloßes Herumtappen gewesen war“ ([5], S. 25) ⁸.

Kant ging es im Rahmen der „Vorrede“ nicht um eine alle Aspekte berücksichtigende Darstellung der „vorteilhaften Revolution der Denkungsart“, sondern um deren griffige und knappe Beschreibung. Das Bild der Natur vor Gericht erscheint didaktisch überzeugend und findet daher bei den Lehrplanautoren für das Fach Physik regelmäßig Anklang. In abermalig starker Verkürzung des von Kant verwendeten Bildes verzichtet kaum ein Lehrplan auf den Hinweis, dass das Experiment als „Frage an die Natur“ darzustellen und entsprechend in den Unterricht einzubauen sei. Im konkreten Vollzug dieser Forderung werden die Schüler und Schülerinnen dann zwar nicht von der Natur am Gängelband geführt, wohl aber vom ausgeklügelten Belehrungsapparat. Denn der „vorher entworfene Plan“ für die Befragung der Natur steckt in den Konstruktionsmerkmalen des speziellen Lehrgerätes und in der sorgfältigen Vorbereitung des Versuches durch die Lehrkraft. An der Entwicklung dieses Planes sind die Lernenden meist nur scheinbar beteiligt. „Demonstrationsversuche“ dieser Art „demonstrieren“ im Wortsinne, was die Wissenschaftsentwicklung hervorgebracht hat, also die gewordene Physik, nicht aber die Mühen ihrer Genese. Selbstverständlich haben diese Versuche ihre Berechtigung im Unterricht. Sie dürfen aber nicht mit dem Anspruch verknüpft werden, dabei werde hypothesengeleitetes Experimentieren eingeübt.

Für das hier weiterhin zur Debatte stehende Problem einer nach pädagogischem Ziel, didaktischer Funktion und (altersabhängigen) Lernvoraussetzungen differenzierenden Gestaltung des Experimentalunterrichts reicht die bisherige erkenntnistheoretische Betrachtung noch nicht aus. Besonders das Problemfeld, in welchem Verhältnis die kumulierte Alltagserfahrung zum physikalischen Denken steht, inwieweit sie den Zugang zur naturwissenschaftlichen Ideenwelt überhaupt erst ermöglicht, oder ob sie das Verstehen der Naturwissenschaften eher blockiert, bedarf weiterer Klärung. „Alltagsvorstellungen“ bzw. „Präkonzepte“ einschließlich der darauf bezogenen Sprachspiele und Handlungsschemata scheinen ja gerade beim naturwissenschaftlichen Lernen eine bedeutende Rolle zu spielen. Die didaktischen Schwierigkeiten gleichen durchaus jenen, auf die Galilei im aristotelisch geprägten Denken seiner Mitmenschen stieß. Seine Schriften zeigen, wie ungemein produktiv er die Denkvoraussetzungen seiner Adressaten nutzte, um ihnen neuartige Denkmöglichkeiten zu eröffnen. Wie bei Galilei geht es auch im heutigen Unterricht darum, mitgebrachte erfahrungsgebundene Anschauungen zu überwinden und das Bild von der Natur in einer Ordnung darzustellen, die sich vielfach nicht mit dem „common sense“ deckt.

3. Zum Verhältnis von Erscheinungswelt und physikalischer Ideenwelt

Kant spricht bei der Charakterisierung der naturwissenschaftlichen Methode von einer „Revolution der Denkart“. Dies verweist auf einen Bruch mit dem herkömmlichen Denken. Naturwissenschaft verlangt den Menschen ein Umdenken, eine Neukonzeption ihrer Weltsicht ab. Alltäglicher, gewissermaßen „natürlicher Erkenntniszuwachs“ entsteht auf andere Weise. Dies ist didaktisch von größter Relevanz, denn damit hängt z. B. zusammen, dass Physik als Unterrichtsfach als schwierig und lebensfern empfunden wird. Wir wissen aus der Forschung, dass „Alltagsvorstellungen“ oder „Präkonzepte“ unseren Lehrabsichten oft entgegenstehen. Aber didaktisch werden die Probleme auch mit der spannendsten Gestaltung experimenteller Tätigkeit nicht zu lösen sein, solange wir das mitgebrachte Denken über Sachen als „Fehlvorstellungen“ (misconceptions) einordnen. Diese negative Deutung alltäglicher Denkmuster wird dem Verhältnis zwischen wahrnehmungsgebundener Deutung der Erfahrungswelt und den auf naturwissenschaftlichen Ideen beruhenden Erklärungen nicht gerecht.

Georg Christoph Lichtenberg hat auf den Bruch des naturwissenschaftlichen Denkens mit der Alltagserfahrung mit dem Satz hingewiesen:

Bei den Sonnenuhren steht der Schatten still und die Uhren drehen sich. (Abb. 3) ⁹.

⁸ Diktion und Wortwahl („bloßes Herumtappen“) erinnern nicht zufällig an Francis Bacon (1561–1626). Kant zitiert ihn explizit als Urheber dieses Bildes. Bacon selbst war als Generalstaatsanwalt am Hofe von James I. mit den Methoden der Gerichte in den Hexenprozessen eng vertraut.

⁹ Die Aussage findet sich in Lichtenbergs „Sudelbüchern“ [6], Nr. 1572



Abb. 3: Zur Veranschaulichung Lichtenbergs Hinweis, dass bei den Sonnenuhren der Zeiger still steht, aber das Ziffernblatt sich dreht

Es ist der alltagsfremde kopernikanische Blick auf unser Sonnensystem, der unser wahrnehmungsgeladenes Verständnis von Ruhe und Bewegung durcheinander wirbelt.

Galilei sagt in Bezug auf die kopernikanische Ansicht zur Erddrehung:

Ich kann nicht genug die Geistesgröße derer bewundern, die sich ihr angeschlossen und sie für wahr gehalten, die durch die Lebendigkeit ihres Geistes den eigenen Sinnen Gewalt angethan derart, dass sie, was die Vernunft gebot, über den offenbarsten gegenteiligen Sinnenschein zu stellen vermochten“ ([2], S. 342).

Nicht die sinnlich wahrgenommene Welterfahrung erschließt uns das naturwissenschaftliche Weltbild, sondern die vernunftgeleitete kreative Idee, die oftmals fordert, gegen den Sinnenschein anzudenken.

Allerdings: Man kann die Zeit auf der Sonnenuhr auch ablesen, wenn man von Kopernikus nichts weiß und davon ausgeht, dass der Schattenzeiger sich dreht. Alltagsvorstellungen sind oft plausibler als die naturwissenschaftlichen und meistens durchaus „brauchbar“.

Galilei tat seinen großen Schritt, indem er wagte, die Welt so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren“ ([7], S. 107). Mit diesem Satz beschreibt C. F. v. Weizsäcker den entscheidenden Schritt für den Beginn der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Sie ist eben nicht durch „genaue Beobachtung“, „sorgfältiges Experimentieren“ o. ä. empiristische Anstrengungen zu gewinnen. Dies, scheint mir, wird didaktisch zu wenig beachtet. Diese Behauptung betrifft keineswegs nur die „großen Ideen“ wie die kopernikanische Wende, die Relativitätstheorie oder Quantenphysik. Der „physikalische Blick“ (Redeker in [8]) steht schon bei ganz elementaren Inhalten oft in einem krassen Widerspruch zum Alltagsverständnis. In der Tabelle sind einige Beispiele dazu aufgeführt (Abb. 4 – 7).

Einige Beispiele zu erfahrungsfremden Deutungen in der Physik¹⁰

Abb. 4: Die Skizze zeigt eine der ersten überlieferten Vorstellungen vom Sehvorgang. Die Pythagoräer verglichen das Auge mit Händen, die die Umgebung abtasten. Sehstrahlen, die vom Auge ausgehen, sind die „Tastorgane“. Dass Sehen ein aktiver Vorgang ist, spiegelt sich auch in der Alltagssprache wider. Wir „schauen genau hin“, werfen „einen Blick zum Fenster hinaus“, jemand „hat einen stechenden Blick“ usw. Nichts in unserer Sprache unterstützt die physikalische Deutung des Sehvorgangs als „Empfangen von Licht“.



¹⁰ Weitere Beispiele und detailliertere Ausführungen dazu sind in [9] dargestellt.

Abb. 5: Schatten nehmen wir als „Dinge“ wahr, als etwas positiv Vorhandenes. In unserer Sprache zeigt sich dies durch Formulierungen wie „Schatten werden geworfen“, man „setzt sich in den Schatten“, „Schatten fallen auf den Boden“ usw. Schatten als „Fehlen von Licht“, manifestiert sich nicht in der Sprache, weil es nicht der unmittelbaren Wahrnehmung entspricht. Gleiches gilt für die Dunkelheit: sie „bricht herein“, „es herrscht ein undurchdringliches Dunkel“, „vor der Dunkelheit hat man Angst“ usw. Licht und Dunkelheit nehmen wir als polare Entitäten wahr. Dass Dunkelheit mehr ist als Fehlen von Licht, gehört für die meisten Menschen schlicht zu den existenziellen Wahrheiten, denen die empirische Korrektheit einer physikalischen Aussage nichts anhaben kann.



Abb. 6: Frost beschert uns schöne Kristalle, die Kälte kriecht uns in die Knochen. Auch hier sind Wahrnehmung und Sprache an den Polaritäten Wärme und Kälte orientiert. Physikalisch steht das im Widerspruch zur thermodynamischen Definition der Temperatur und dem Verständnis von Wärme als Summe der Teilchenenergien. Dass physikalisch alle Temperaturen „im Positiven“ auf einer bei „0 Kelvin“ und nach oben offenen Skala liegen, dafür gibt es keine phänomenologische Evidenz.

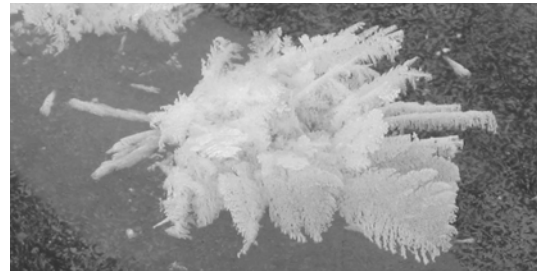
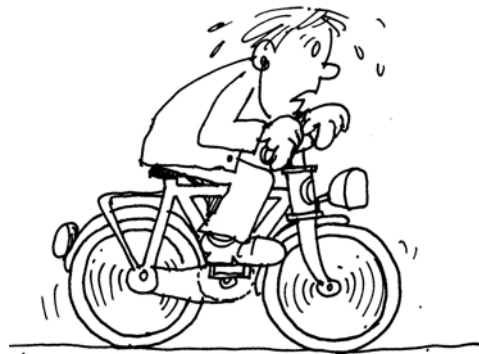


Abb. 7: Nach unserer Wahrnehmung sind Ruhe und Bewegung gegensätzliche Zustände. Physikalisch ist „Ruhe“ der Nullpunkt auf einer Geschwindigkeitskala, dessen Lage vom Bezugssystem abhängt. Und konstante Geschwindigkeiten sind immer das Ergebnis eines kräftefreien Zustandes. Als Radfahrer vermisst man diese Kräftefreiheit schmerzlich.



Das hypothesengeleitete Experiment entspringt den Ideen und ist nicht deren Ursache. Woher aber stammen dann die Ideen? Albert Einstein beantwortet diese Frage prägnant:

Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition“ ([10], S. 109).

Es ist von großer didaktischer Bedeutung, dass kein logischer Weg aus der Erfahrungswelt in die Physik führt. Die fehlende Zwangsläufigkeit physikalischen Erkennens aufgrund der Befassung mit den Phänomenen erzeugt nichtsdestoweniger die Notwendigkeit, die Formen der Sachbegegnung möglichst produktiv zu gestalten. Wenn nämlich die Logik nicht hilft, wird die Förderung von Kreativität umso wichtiger.

4. Folgerungen für das Experimentieren – Stufen der Sachbegegnung ¹¹

Der Umstand, dass die Erkenntnis nicht unmittelbar Einzelerfahrungen oder Versuchen entspringt, wertet die Erfahrungsbasis nicht ab sondern auf! Zum Verständnis dieser Behauptung muss der Zusammenhang zwischen der Welt der Phänomene – der Erfahrungswelt, die unsere Wahrnehmung bestimmt und unser Denken affiziert – und der Ideenwelt der Physik beachtet werden. In Letztere einzudringen verlangt ja – wie gezeigt wurde – nicht selten, gegen *den offenbarsten gegenteiligen Sinnenschein* (Galilei, s.o.) anzudenken. In Abb. 8 sind die Verhältnisse nochmals schematisch dargestellt.

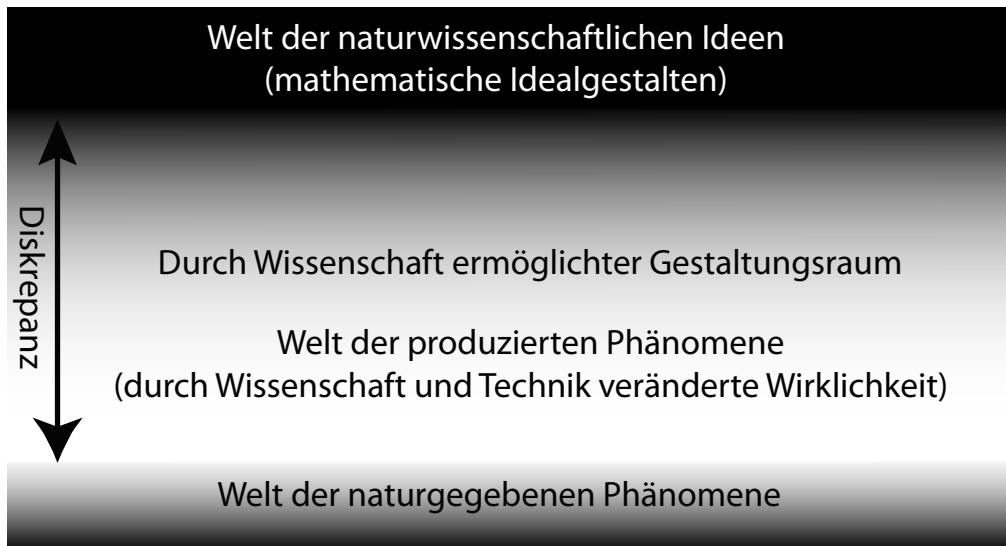


Abb. 8: Schematische Darstellung des Verhältnisses von Erscheinungswelt und Ideenwelt.

Auch wenn die Grenzen zwischen den verschiedenen Denk- und Erfahrungsräumen (s. Abb. 8) nicht scharf sind, so bietet ihre prinzipielle Unterscheidung doch wichtige didaktische Anhaltspunkte. Unten in der Grafik ist die „Welt der naturgegebenen Phänomene“ dargestellt, im Sinne des Erfahrungsraumes, der sich uns sinnhaft erschließt und der mit der wahrnehmungsorientierten und über Jahrhunderte gewachsenen Alltagssprache umfassend verknüpft ist – der also auch keiner „Fachsprache“ bedarf um kommunizierbar zu sein!

Die dargestellte Diskrepanz zwischen diesem Bereich und der Ideenwelt stellt zugleich den Gestaltungsraum dar, der erst durch die Naturwissenschaften erschließbar ist. Denn eben weil die in der Alltagswelt vorgefundenen Verhältnisse den Idealgestalten nicht entsprechen, eröffnen sich Möglichkeiten, das Vorgefundene in Richtung der Ideenwelt zu verändern. Alle naturwissenschaftsbasierten Hervorbringungen der Technik gehören in diesem Sinne zur „Welt der produzierten Phänomene“, vom Fahrraddynamo über den Fotoapparat bis zum Wettersatelliten. Jede vom Menschen gezielt bewirkte Veränderung der vorgefundenen Natur ist eine Folge von Vorstellungen davon, nach welchen Gesetzen und Regeln solche Veränderungen realisierbar sind. Die Grenzen des Machbaren sind Bestandteil dieser Denkfiguren, die man auch als Naturgesetze bezeichnet ¹².

Die Ideen selbst setzen *die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition* (Einstein) voraus, verdanken sich also einem kreativen Prozess, der die Verwurzelung in der Erfahrungswelt zur Bedingung hat – oder einfacher ausgedrückt: Ohne intensiven Kontakt mit der sinnhaft gegebenen Welt der Phänomene kann naturwissenschaftliches Verstehen gar nicht erst entstehen.

Versuche im Sachunterricht der Grundschule:

¹¹ Im Blickfeld dieses Abschnittes liegt die *physikalische* Bildung (s. Fußnote 3).

¹² Naturgesetze liegen demnach nicht unabhängig vom Menschen in der Natur vor, sondern sind das, *was die Vernunft selbst in die Natur hineinlegt* (Kant, s. Zitat S. 6).

Weil naturwissenschaftliches Denken Vertrautheit mit der Welt der Phänomene voraussetzt, ist die Forderung zutiefst berechtigt, mit den Naturwissenschaften im Bildungsprozess so früh wie möglich zu beginnen. Nur muss dieser Beginn beim Fundament, dem lebensweltlichen Erfahrungsraum und nicht beim Dach, nämlich der Ideenwelt ansetzen. Damit ist z. B. *prinzipiell* vorgegeben, worin die Bildungsaufgabe der Grundschule besteht, aber auch, wo ihr Grenzen gesetzt sein sollten¹³. Es geht um Einwurzelung in die Erfahrung. Da die Erfahrungswelt mit der Alltagssprache kommunizierbar ist, erübrigen sich zusätzliche Fachbegriffe oder fachsprachliche Ausdrucksformen auf dieser Bildungsstufe. Wahrnehmungsgebundene Erklärungen sind auch dann zulässig, wenn sie mit so genannten „Fehlvorstellungen“ verknüpft sind, weil sie zum Nährboden kreativer Ideenproduktion gehören. Die Ideenwelt kann überdies nur adäquat verstanden werden, wenn auch der Weg beleuchtet wird, auf dem sie entstehen konnte¹⁴. Das im naiven Umgang mit den Dingen entstehende Vorverständnis liegt auf diesem Weg. Es schafft erst die Voraussetzungen dafür, sich in einem kreativen Akt über die ursprüngliche Erfahrungsgebundenheit zu erheben, oder doch zumindest diesen Schritt in seiner Besonderheit lernend nachvollziehen zu können.

Demgegenüber werden Begriffe und Deutungen aus der Welt der naturwissenschaftlichen Ideen missverstanden, wenn ihr besonderer Status mangels ausreichender Primärerfahrung und fehlendem Vorverständnis nicht eingesehen werden kann. Begriffe wie Energie und Energieumwandlung, Leitfähigkeit und Stromkreis stammen aus der Ideenwelt der Naturwissenschaften und transportieren spezifische Deutungen, die den Phänomenen nicht im unbefangenen Umgang abzugewinnen sind. Werden sie schon in der Grundschule mit der Absicht gepflegt, konstitutiv für die Akkumulation naturwissenschaftlichen Wissens zu wirken, dann entsteht ein positivistisches Missverständnis. Energie, beispielsweise, wird dann missverstanden als Bezeichnung für „Dinge“ die zur Gegenstandswelt gehören. Die Alltagserfahrung lehrt uns (nur), dass die Sonne Licht und Wärme spendet und dadurch das Leben ermöglicht. Dass die Sonne *Energie* liefert, ist der Betrachtung oder Analyse der Phänomene allein nicht abzurufen. Licht und Wärme als Energieformen zu bezeichnen, dahinter stehen Gedankenkonstruktionen, die in der Wissenschaft erst seit 150 Jahren und nach langem Ringen für plausibel gehalten werden. Historisch gesehen entstand das Energiekonzept, nachdem man mit den Phänomenen der verschiedenen Teilbereiche der Naturwissenschaft vertraut war und sich erste Zusammenhänge zwischen ihnen quantifizieren ließen. Das Bedürfnis nach einer Gedankenkonstruktion, die das Gemeinsame hinter den ganz unterschiedlichen Phänomenen erfasst, setzt die Bekanntheit dieser Phänomene in großer Breite voraus. Das bedeutet, dass sich die Grundschule primär mit der erfahrungsgebundenen Erschließung der Welt der Phänomene zu befassen hat, damit eine Grundlage und darüber hinaus auch ein allmählich wachsendes Bedürfnis entsteht, die Erscheinungen mit abstrakten Theorien zu verknüpfen.

Ich will diese didaktische Forderung noch einem mit Beispiel für phänomenorientierte Sachbegegnung erläutern:

Man kann Drittklässler in einfachen Versuchen beobachten lassen, wie Wasser verdunstet und wie es sich an kalten Flächen niederschlägt. Bedingungen für Verdampfung und Kondensation können experimentell transparent gemacht werden, auch weil der Bezug zu vielen Alltagserfahrungen herstellbar ist. *Wohin verschwindet das Wasser, wenn es verdunstet? Woher kommt das Wasser am beschlagenen Spiegel?* Solche Fragen sind sinnvoll und tauchen erfahrungsgemäß auch auf, wenn bereits Erhaltungsvorstellungen vorhanden sind, die sich aufgrund des Umganges mit den Dingen gebildet haben. Liegen diese Erhaltungsvorstellungen nicht vor, blickt man in kein zweifelndes Gesicht, wenn man den Kindern erzählt, dass aus Wasser Luft oder aus Luft Wasser entstehen kann – wohlgermerkt richtige Luft, die zum Atmen und Verbrennen taugt, nicht einfach ein zusätzliches Gas, das sich mit Luft vermischt. Wurde die Einsicht in die Erhaltung einer Stoffmenge schon zuvor in einem langen Prozess und an vielen unterschiedlichen Beispielen gefestigt, dann – und nur dann – lässt sich aus den Phänomenen die Vorstellung vom Wasserkreislauf plausibel herleiten¹⁵.

¹³ Die erheblichen Komplikationen, die bei dieser Grenzziehung auftreten können, werden zu Gunsten der Komplexitätsreduktion hier zurückgestellt. (Z. B. was gehört zur „Welt der Phänomene“ und was nicht? Oder: Wie geht man mit Sprachspielen um, die aus der Fachsprache in die Alltagssprache eingesickert sind, ohne die adäquaten Vorstellungen transportieren zu können – man denke z. B. an das Energiekonzept oder den Strombegriff?)

¹⁴ Dies sollte der oben wiedergegebenen Ausschnitt aus Galileis Dialog exemplarisch verdeutlichen.

¹⁵ Von Jean Piaget wissen wir, dass elementare Erhaltungsvorstellungen im Zuge der Entwicklung als Folge des tätigen Umganges mit den Dingen entstehen. Dem Unterricht fällt die Aufgabe zu, sich deren Stabilität zu vergewissern, aber auch für die Grenzen zu sensibilisieren (z. B. thermisch oder chemisch verursachte Volumenänderungen). Es werden später im Physik- und Chemieunterricht immer wieder Phänomene auftauchen, die Zweifel an der Erhaltungsvorstellung von der Materie wecken können, z. B.

Keinem Fragebedürfnis und keiner Erfahrung entspricht dagegen auf dieser Altersstufe die Deutung solcher Vorgänge im Teilchenmodell. Die verbreitete symbolische Darstellung von Gasen und Flüssigkeiten als Ensemble von „Pünktchen“ und die Rede von „kleinsten Teilchen“ gehört nicht zu dem, was sich die Kinder als verlässliches Wissen erschließen können. Verlassen können sie sich in diesem Fall nur auf die autoritätsgestützte Mitteilung der Lehrkraft oder des Schulbuches. Erklärt man auf dieser Stufe das Verdunsten mit dem Übergang „kleinster Teilchen“ aus der Flüssigkeit in ein Gas, vertieft dies nicht das Naturverstehen. Alle Beobachtungen lassen sich ohne diese Bilder beschreiben. Die „kleinsten Teilchen“ werden fast zwangsläufig als winzige Wassertröpfchen missverstanden – und manchmal sogar als solche bezeichnet – obwohl ihnen die phänomenologischen Eigenschaften des Wassers nicht mehr anhaften. Sie sind weder flüssig noch gasförmig, weder „wasserklar“ noch farbig usw. Erst recht ist auf dieser Stufe die Vorstellung einer regellosen Teilchenbewegung experimentell unzugänglich. Für die aus der kinetischen Gastheorie stammenden Bilder gibt es in einem phänomenorientierten Unterricht der Grundschule noch keine von der Lernerfahrung her begründbare Rechtfertigung.

Verbindet man auf diesem frühen Erfahrungsniveau die autonom zu gewinnenden Einsichten mit autoritätsgestützten Mitteilungen aus der Ideenwelt der Naturwissenschaften, nach denen zu fragen die kindliche Erfahrungswelt noch keine Veranlassung bietet, widerspricht dies der wichtigsten Bildungsaufgabe der Naturwissenschaften, nämlich der Entwicklung einer aufgeklärten, autonomen und kritikfähigen Persönlichkeit zu dienen. *Sapere aude*, den Mut stärken, den eigenen Verstand zu nutzen, statt „in selbstverschuldeter Unmündigkeit“¹⁶ zu verzagen [11], ist vermutlich heutzutage wichtiger denn je. Primärerfahrung, die sich auf die gedankliche Verarbeitung naturgegebener Verhältnisse stützt, wurde in den zurückliegenden Jahrzehnten zunehmend massiver durch die Konfrontation mit „virtuellen Welten“ verdrängt. Nicht nur, dass diese aus den Bildschirmen in die Köpfe strömen. Menschengemachte, im Detail undurchschaubar gewordene, komplexe Gegenständlichkeit dominiert das gesamte Erfahrungsfeld, in dem sich Kinder heutzutage bewegen. Selbst das mit Sicherheitssiegel bewehrte Klettergerüst auf dem Kinderspielplatz setzt andere Signale, es fördert und filtert Erfahrungen anders als die Obstbäume, an denen ich meine Kletterfähigkeiten entwickeln musste. Was in dem von Menschen zugerichteten Erfahrungsraum verloren geht, ist die Transparenz der Prozesse und der vielen Entscheidungen, die ihn so und nicht anders haben werden lassen. Damit wird es immer schwieriger zu durchschauen, wie sichere Erkenntnis und verlässliches Wissen entstehen.

Unter virtuellen Bedingungen ist (fast) alles möglich. Das Denkbare ist darin nicht mehr prinzipiell vom Machbaren unterschieden und unterscheidbar. Ein Bewusstsein von den Grenzen der Machbarkeit entsteht nur im Vollzug des Selbermachens. Im „Machen lassen“ liegt deshalb die Hauptaufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts der Grundschule. Das ist natürlich nicht mit „Laissez faire“ zu verwechseln. Vielmehr geht es um die didaktische gesteuerte Förderung der Handlungs- und Deutungsfähigkeit in Erfahrungsfeldern, die für die Lernenden vollständig transparent sind. Bauen, umbauen, nachbilden, aber auch dekonstruieren, zerlegen, analysieren einfacher technischer Gegenstände u. Ä. sind die vorherrschenden Formen der Sachbegegnung auf dieser Stufe. Für die Bewältigung dieser Aufgabe bedarf es einer hohen Sensibilität für die Fähigkeiten, Bedürfnisse und den sachbezogenen Entwicklungsstand der Kinder, eine Aufgabe also, die Grundschullehrkräfte nicht zu scheuen brauchen.

Experimentieren in den unteren Klassen der Sekundarstufe 1:

Auch der naturwissenschaftliche Unterricht der Jahrgangsstufe 5/6 und wohl überwiegend auch noch in 7 sollte sich schwerpunktmäßig in der Welt der Phänomene abspielen. Während aber die inhaltliche Struktur des Fachunterrichts der Sekundarstufe 1 im Sachunterricht der Grundschule weitgehend unberücksichtigt bleiben kann, sollten jetzt die Erfahrungsfelder gezielt unter dem Gesichtspunkt ausgewählt und vertieft werden, in welcher Weise durch sie naturwissenschaftliche Fachkompetenzen zu fundieren sind, deren volle Entfaltung die Aufgabe der nachfolgenden Klassenstufen ist, und welchen Beitrag sie für das Verstehen der

bei Verbrennungsvorgängen. (Ist nach dem Verbrennen wirklich noch alles „da“? Diese Einsicht wird z. B. nicht gefördert, wenn man davon spricht, dass beim Verbrennen „Sauerstoff verbraucht“ werde und dies womöglich sogar noch scheinbar mit einem Versuch – schwimmende Kerze unterm Glas – „bewiesen“ wird).

¹⁶ Weil der naturwissenschaftliche Unterricht sich nicht mehr mit der gleichen Selbstverständlichkeit wie vor 50 Jahren auf die Idee der Aufklärung stützt, sei hier die berühmte Definition von Kant wiedergegeben [11]: *Aufklärung ist der Ausgang des Menschen aus seiner selbst verschuldeten Unmündigkeit. Unmündigkeit ist das Unvermögen, sich seines Verstandes ohne Leitung eines anderen zu bedienen. Selbstverschuldet ist diese Unmündigkeit, wenn die Ursache derselben nicht am Mangel des Verstandes, sondern der Entschliebung und des Muthes liegt, sich seiner ohne Leitung eines anderen zu bedienen. Sapere aude! Habe Muth dich deines eigenen Verstandes zu bedienen! ist also der Wahlspruch der Aufklärung.*

Naturwissenschaften zu leisten vermögen. Vor allem zwei miteinander verknüpfte Ziele treten jetzt hinzu, nämlich zum einen die Anbahnung des quantifizierenden Arbeitens durch Vergleichen und Messen, und zum anderen die behutsame Einführung in die Besonderheiten der naturwissenschaftlichen Denkwelt. Der Zusammenhang dieser beiden Aspekte besteht bei physikalischen Phänomenen zwangsläufig, weil die physikalischen Gesetze letztlich als mathematische formulierte Ideen dargestellt werden. Die mathematischen Strukturen sind in fachsprachlichen Beschreibungen, Definitionen und Begriffen bereits angelegt, auch wenn diese noch nicht in der formalen Gestalt mathematischer Ausdrücke fixiert zu werden brauchen.

Didaktisch ist allerdings umstritten, ob die unteren Klassenstufen der Sekundarstufe 1 die Einführung in die Ideenwelt der Physik bereits reflexiv, also im Sinne des Verstehens einer naturwissenschaftlichen Methode erfolgen soll. Wenn man aber im Zusammenhang mit experimentellen Tätigkeiten darauf verzichtet, den erkenntnistheoretischen Status dieses Tuns ins Blickfeld zu rücken, dann ist das positivistische Missverstehen der Naturwissenschaften kaum zu vermeiden und später auch schwer zu korrigieren (vergl. z. B. [1], Abschnitt 3.2.2). Ich will an einigen Beispielen verdeutlichen, wie Aspekte der Theoriebildung reflexiv bereits in den unteren Klassen der Sekundarstufe 1 thematisiert werden können.

Die Grundlagen der Thermodynamik gehören sicherlich zu den unverzichtbaren naturwissenschaftlichen Kenntnissen. Deshalb sollte das Erfahrungsfeld der elementaren Wärmelehre einer der Gegenstände dieser Klassenstufen sein. Dazu gehören die Aggregatzustände und ihre Änderungen, die Phänomene der thermischen Ausdehnung einschließlich der Anomalien des Wassers und deren Bedeutung für die Umwelt. Die Prozesse der Wärmeausbreitung, werden experimentell dargestellt und auch der Umgang mit Wärmequellen und Thermometern unterschiedlicher Bauart sollten in dieser Altersstufe intensiv eingeübt werden. In diesem Zusammenhang werden dann z. B. auch Messwerte zu Temperaturänderungen protokolliert und grafisch dargestellt. Die Erwärmung von Wasser bis zum Siedepunkt gehört in der Regel zu den ersten Versuchen, bei denen das Verfahren vermittelt wird, über empirisch gewonnene Wertepaare zu einem Diagramm zu gelangen, das wesentliche Naturgesetzmäßigkeiten erkennen lässt. Didaktisch ist es von Anfang an wichtig, wie bei solchen grundlegenden Methoden das Verhältnis zwischen den Messwerten und dem Messergebnis artikuliert wird.

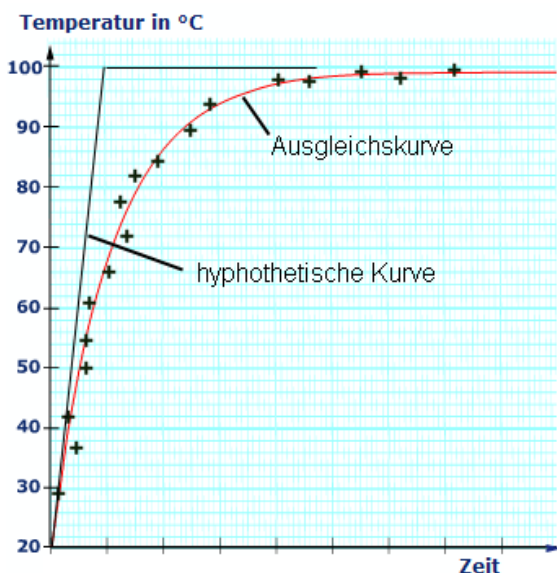


Abb. 9: Messwerte und idealisierte Temperaturkurven für die Erwärmung von Wasser. (Die Skalierung der Zeitachse ist stark der Wassermasse und der Heizquelle abhängig.)

Im vorliegenden Fall erhält man üblicherweise Messpunkte in der in Abb. 9 dargestellten Art. Die eingezeichnete Ausgleichskurve ist bereits „Glaubenssache“. Sorgfältiges Experimentieren führt zu verbesserter Näherung, aber nie exakt zum idealisierten Verlauf – schon allein aufgrund der Endlichkeit der Wertepaare. Aber die Annäherung der Messwerte an eine „geglättete“ Kurve, die wir als Idee dem Datenmaterial hinzufügen, ist zunächst gut genug, um die Idee für vernünftig zu halten; denn Abweichungen lassen sich aus den empirischen Randbedingungen erklären. Bei der Diskussion der Gründe für die Abweichungen stößt man hier aber auf die Frage, warum es überhaupt zu einer gekrümmten Linie kommt.

Je heißer das Wasser ist, desto schneller entweicht Wärme aus dem Messgefäß in die Umgebung. Diese Annahme lässt sich mit zusätzlichen Beobachtungen an Wasserbädern mit unterschiedlicher Temperatur aber

gleicher Wassermasse bestätigen. Bei idealer Isolierung des Gefäßes, so folgt aus dieser Überlegung, müsste die Temperatur linear ansteigen bis zum Siedepunkt und sich dann nicht mehr verändern („hypothetische Kurve“ in Abb. 9). Auch hier lässt sich zeigen, dass die Hypothese „naturangemessen“ ist, denn bei gut isolierendem Thermogefäß kann man sich dem gesetzten Idealfall recht gut annähern.

In dieser knappen Schilderung des Weges vom Messwert zum Gesetz können 12- oder 13jährige durchaus bereits zentrale Aspekte naturwissenschaftlicher Erkenntnisstrategie erkennen. Die Naturwissenschaft vergleicht das reale Naturgeschehen mit einer Idee, wie es im Idealfall ablaufen *könnte*. Unsere Vorstellungen von den herrschenden Gesetzmäßigkeiten sind gut brauchbar, wenn sich empirisch gegebene Abweichungen als Störfaktoren identifizieren lassen. Die Störfaktoren verweisen auf „Stellschrauben“, mit denen sich die Realität den Idealgestalten besser anpassen lässt.

Die Diskrepanz zwischen Messwerten und hinzugedachter Gesetzmäßigkeit darf also nicht negativ bewertet werden. Nur durch sie lernen wir die Bedingungen kennen, die prinzipiell für den Unterschied zwischen Idee und Wirklichkeit sorgen. Die Physik beschreibt eben die Welt nicht so, wie wir sie vorfinden, sondern wie wir sie uns *denken* können. Die Idealvorstellung wird zum Maßstab und eröffnet das Potenzial zur Veränderung – im konkreten Beispiel lernen wir u. A., was eine gute Thermoskanne bestenfalls bewirken kann und soll.

Das Beispiel zeigt bereits den hypothetischen Status der naturwissenschaftlichen Ideen. Auf den linearen Anstieg der hypothetischen Kurve mit dem abrupten Ende des Temperaturanstiegs im Siedepunkt (Abb. 9) führen uns die Messergebnisse nicht zwangsläufig hin. Diese Hypothese entsteht erst durch ein Nachdenken, das die Beobachtung der Phänomene und konkreten Messwerte transzendiert. Die Entwicklung dieser Vorstellung vom Temperaturverlauf darf in dieser Altersstufe deshalb kaum als autonome Leistung von den Kindern erwartet werden. Sie bedarf des „sokratischen Gesprächs“, einer hermeneutischen Annäherung an den Kerngedanken. Haben die Kinder nicht an einem, sondern im Zuge des Unterrichts an zunehmend mehr Beispielen erfahren, dass es zwar wichtig ist, sorgfältig zu experimentieren, zu beobachten und zu messen, dass aber die zu gewinnenden Erkenntnisse darüber hinaus von kreativen Ideen abhängen, dann wächst nach meiner Erfahrung ihr Mut, eigene Ideen in die Waagschale zu werfen, sie also im Sinne von prinzipiell prüf- baren Hypothesen zu artikulieren. Dazu noch zwei Beispiele aus der Wärmelehre:

Bei der Beobachtung der Ausdehnung verschiedener Flüssigkeiten – es wurde mit unterschiedlichen Experimenten in mehreren Stationen gearbeitet – versuchte eine Gruppe, sich die Volumenzunahme bei Temperaturerhöhung etwa so zu erklären: *„Die Wärme treibt's auseinander, weil die braucht ja auch Platz.“* *„Aber dann müsste es bei Öl und Wasser gleich stark steigen, wenn das gleich warm ist.“* Man merkte der Gruppe an, dass sie die Fragestellung ernsthaft beschäftigte, aber offenbar resignierten die Kinder, weil sie keine Möglichkeit sahen, wie über ihre Spekulationen entschieden werden könnte. Es war auch nicht Ziel dieser Unterrichtseinheit, eine Modellvorstellung zur thermischen Ausdehnung zu entwickeln¹⁷, vielmehr sollten die Ausdehnungsphänomene nur beobachtet und beschrieben werden. Weil sich aber hier genuin naturwissenschaftliches Denken anbahnte, wurde im anschließenden Klassengespräch die Fragestellung der Gruppe aufgegriffen. Wenn Wärme ein Stoff ist, der Platz braucht, wiegt sie dann auch etwas? Es wurde nachgeprüft, ob die Flüssigkeit, nachdem sie sich durch Erwärmen ausgedehnt hat, auch schwerer geworden ist. Eine Gewichtszunahme konnte aber nicht nachgewiesen werden. *„Die Wärme wiegt nichts! – Das ist wie Luft, die wiegt auch nichts!“*¹⁸ Der Lehrer teilte den Schülern mit, dass sie hier auf ein bedeutendes Problem gestoßen sind, mit dem sich Generationen von Wissenschaftlern im 18. und 19. Jahrhundert herum schlugen. Er schildert Rumfords Versuch, mit dem er 1789 mit einem Bohrgerät für Kanonenrohre einen Messingklotz bearbeitete und dabei gezeigt hat, dass Wärme beliebig lange und in beliebiger Menge produziert werden kann, ohne dass messbare Gewichtsänderungen auftraten. Es gingen noch Jahrzehnte vorüber, bis sich die Frage entschieden hatte, ob Wärme ein (unwägbarer) Stoff oder etwas ganz anderes ist. *„Wir werden im nächsten Schuljahr die Antwort auf diese Frage finden und ihr werdet überrascht sein!“*, beendet der Lehrer das Gespräch.

¹⁷ Die „spontane“ Teilchenbewegung im Sinne der kinetischen Theorie ist in unseren Curricula erst im Zusammenhang mit der Einführung des Energiebegriffs vorgesehen, weil die „Natur der Wärme“ im Kontext der vereinheitlichenden Idee des Energiekonzeptes fast zwangsläufig Fragehorizont der Kinder tritt. Erst im Zusammenhang mit der Frage, wie sich denn die thermische Energie (Wärme) in einem Körper manifestiert, gewinnen die Bilder der kinetischen Wärmetheorie an Plausibilität.

¹⁸ *„Jetzt haben wir den Salat“*, murmelten damals die Studenten, die den Unterricht beobachteten. Sie fürchteten, mit den vielfältigen Aspekten und Ideen der Kinder didaktisch nicht angemessen umgehen zu können.

Die betroffene Schülergruppe war stolz, ein wichtiges Problem erkannt und formuliert zu haben. Dass es nicht sofort gelöst wurde, konnten sie akzeptieren, denn der Lehrer hatte ihnen erklärt, dass sie die Zusammenhänge leicht verstehen werden, wenn sie zuvor noch weitere Erfahrungen sammeln. Er hatte ihr Vertrauen, weil sie schon oft erfahren hatten, dass er ihre Gedanken, Fragen und Vorschläge ernst nimmt und sie zu gegebener Zeit aufgreift. So wurde z. B. die Behauptung, dass Luft nichts wiege, – abweichend vom Stoffverteilungsplan – bereits in der Folgestunde widerlegt.

Es ist sicherlich kein Zufall, dass gute Ideen in dieser Klasse keine Seltenheit waren. *„Wie könnte man denn herausfinden, ob ein Pullover ‚wärmt‘, dass er also eine Wärmequelle ist, oder ob er lediglich ‚warm hält‘, also ein Isolator ist?“* Das zu überlegen, war eine Hausaufgabe in einer der Folgestunden. Unter mehreren interessanten Vorschlägen war auch das überzeugende Experiment, das sich eine Schülerin ausgedacht hatte: In zwei leere Tassen wird jeweils ein Eiswürfel gelegt. Einer davon wird in Wolle verpackt. Wäre Wolle eine Wärmequelle, dann müsste der eingepackte Eiswürfel schneller schmelzen als der andere. Das Ergebnis war schnell gefunden und eindeutig.

Hypothesengeleitetes Experimentieren ist also durchaus schon auf dieser Stufe möglich, aber es sollte nicht in einem schematisierten Ablauf verpackt werden. Sinnvolle Hypothesen (dazu gehört natürlich durchaus auch die geschilderte Vermutung eines Schülers, dass Luft nichts wiegt!) können als spontane Einfälle auftreten, nicht selten dann, wenn man gar nicht mit ihnen rechnet. In jedem Fall stellen sie eine Herausforderung an das didaktische Geschick der Lehrkraft und an ihre pädagogische Sensibilität dar. Denn die Entscheidung, welche Äußerung man in welcher Weise aufgreift, muss oft situationsgerecht blitzschnell getroffen werden und sie beeinflusst nicht nur den Verlauf des weiteren Unterrichts, sondern entscheidet auch über Er- oder Entmutigung der Schülerinnen und Schüler, beeinflusst deren Selbstwertgefühl und Motivation, bestimmt das Diskussionsklima usw. Die tatsächlich vorhandenen Grenzen der experimentellen Überprüfbarkeit oder Realisierbarkeit von Schülervorschlägen fallen dagegen aus pädagogischer Sicht eher weniger ins Gewicht. Wenn sich „Vermutung“, „Versuchsplanung“, „Beobachtung“ und „Ergebnis“ dagegen immer nur in den Schranken dessen bewegen dürfen, was vorbereitet auf den Experimentierwagen steht oder den Karteikarten vervollkommener Gerätesätze zu entnehmen ist, dann kann hypothesengeleitetes Experimentieren auch zum langweiligen Ritual degenerieren.

An einem weiteren Beispiel aus dem 6. oder 7. Schuljahr wird deutlich, dass sich das methodologische Bewusstsein beim Interpretieren von Experimenten durch weitere Aspekte, und Variationen schon auf dieser frühen Altersstufe schärfen lässt. Das Beispiel stellt einen Ausschnitt aus dem Unterricht zur Beschreibung von Bewegungen und der Hinführung zum Geschwindigkeitsbegriff dar. Eine ganz authentische Darstellung würde allerdings unangemessen viel Raum beanspruchen, weshalb ich die Unterrichtssituation hier stark verdichtet darstelle.

Die Lokomotiven zweier Spielzeugeisenbahnen bewegen sich jeweils auf einem Schienenoval. Im einen Fall handelt es sich um eine „Gartenbahn“ mit einer großen Spurweite (45 mm), im anderen um ein sehr viel kleineres Modell (Spurweite 9 mm). Das Schienenoval der kleinen Lokomotive ist auf eine Hartschaumplatte gesteckt, die das Fahrgeräusch sehr verstärkt. Der Versuch ist in der Mitte eines Sitzkreises aufgebaut. Die Trafos sind so voreingestellt, dass die Geschwindigkeit der kleinen Lokomotive so groß ist, dass sie sich gerade noch in der Spur hält. Die große Lokomotive fährt mit geringfügig größerer Geschwindigkeit als die kleine (Abb. 10).

„Wow! – die rast aber!“ ist ein typische Reaktion nach dem Einschalten der Trafos. Gemeint ist die kleine Lok, die einen Höllenlärm macht und bei der man ständig befürchtet, dass sie aus der Kurve fliegt. Dagegen dreht die große Lok gemächlich ihre Runden. Die Frage, „welche Lok fährt denn schneller?“ stößt zunächst auf wenig Verständnis. Zu offensichtlich scheint der Unterschied – bis eben einige nachdenklichere Kinder sagen: „Aber die Große fährt auch auf einem größeren Kreis.“ Wie könnte man die Vermutung

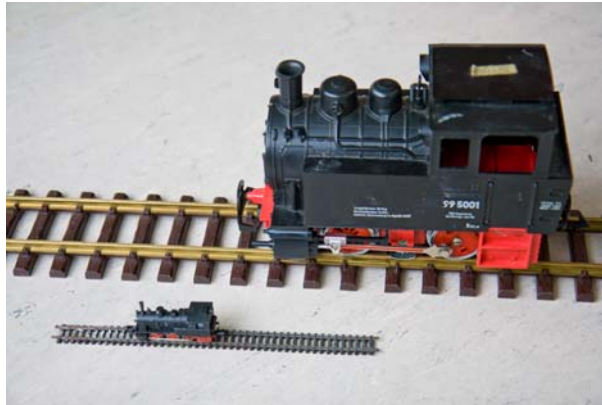


Abb. 10: Zum Größenverhältnis zweier Spielzeuglokomotiven, deren Geschwindigkeiten verglichen werden sollen.

prüfen, dass die kleine Lok schneller fährt? Die unterschiedlichen Vorschläge sollten möglichst alle aufgegriffen, geprüft und bewertet werden.

Die Kinder wollen z. B. die beiden Schienenovale ineinander stellen und schauen, „welche zuerst einmal herum gefahren ist“. Der Vergleich der Umdrehungszeiten (Winkelgeschwindigkeit) stößt aber auf Widerspruch, weil einige Schüler von vorneherein die unterschiedlichen Streckenlängen ins Kalkül ziehen. „Wir müssen messen, wie weit die Lokomotiven in einer Sekunde fahren“ wird schließlich ebenso vorgeschlagen, wie die Rundenzeit ins Verhältnis zur Rundenlänge zu setzen: „Wir müssen messen, wie groß eine Runde ist und wie lang sie dafür brauchen.“

Die Kinder bestimmen mit einer Schnur die Umfänge der Schienenovale zu 1,6 m und 4,8 m. Als korrespondierende Rundenzeiten werden 3,2 s und 9 s gemessen. In Gruppen oder Partnerarbeit wird versucht, aus den Messwerten ein aussagekräftiges Ergebnis zu gewinnen. Die Berechnungen verschiedener Gruppen liefern zwei unterschiedliche aber jeweils richtige Aussagen: „Die kleine Lok braucht 2 Sekunden für einen Meter und die große nur 1,8 Sekunden“ und: „Die kleine Lok fährt 50 Zentimeter weit in einer Sekunde, die große 53 cm“.

Wir diskutieren darüber, wie wir in Zukunft die Geschwindigkeit am besten berechnen, nach der ersten oder nach der zweiten Art? Beides ist möglich und richtig, aber bei der Angabe wie viel Zentimeter (Meter, Kilometer) pro Sekunde (Minute Stunde) zurückgelegt werden, wächst der Zahlenwert mit der Geschwindigkeit. Das ist zweckmäßiger, weil die Werte ohne weiteres Nachdenken das gesuchte Ergebnis erkennen lassen. Wenn der Zahlenwert – wie bei der ersten Berechnungsart – umso kleiner ist, je schneller sich der Körper bewegt, stimmt das nicht mit unserem (Vor-)verständnis von „Geschwindigkeit“ überein. Dieser Wert wäre dann eher als „Langsamkeit“ zu bezeichnen. Wir erkennen daran das Prinzip, Gesetze und Definitionen so einfach wie möglich und gemäß unserem Vorverständnis der verwendeten Begriffe zu formulieren.

Das Ergebnis, dass die langsam erscheinende große Lokomotive schneller sein soll als die rasende kleine, akzeptieren aber nicht alle Kinder: „Das ist ungerecht! – Die große Lok ist viel größer und deshalb im Verhältnis langsamer!“ Was wäre denn ein „gerechtes“ Maß? Die Kinder kommen auf die Idee zu vergleichen, welche der beiden Lokomotiven weniger Zeit braucht, um ihre eigenen Körperlänge zurück zu legen. Das soll dann die Schnellere sein. Das halten sie zunächst für „gerecht“! Es gibt ja durchaus Situationen, in denen solche Gesichtspunkte sinnvoll sind, z. B. werden deshalb bei den Laufwettbewerben der Bundesjugendspiele Altersklassen gebildet. Aber in jeder Altersstufe gibt es große und kleine Kinder. Jedem müsste also sein eigenes Geschwindigkeitsmaß zugeordnet werden, wenn es „gerecht“ zugehen sollte ...

Was wäre die Folge, wenn wir bei Geschwindigkeitsvergleichen immer die Körperlängen berücksichtigen müssten? Dann dürfte z. B. bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung ein großes Auto schneller fahren als ein kleines. „Das wäre dann auch wieder nicht gerecht!“, meinen einige Schüler. „Die armen Leute mit den kleinen Autos müssten höhere Strafen bezahlen als die Reichen!“ Wir sehen, Gerechtigkeit ist eine Frage der besonderen Situation, des Einzelfalles. Physik will aber Gesetze und Begriffe formulieren, die für unendlich

viele Einzelfälle gelten. Von den Besonderheiten der Einzelfälle muss dazu abgesehen werden. „Gerechtigkeit“ kann daher kein Kriterium für die Physik sein. Aber gerade weil die Gesetze unabhängig vom Einzelfall, also „objektiv“ gelten, können sie auch wieder Grundlage für gerechte Bewertungen sein: Das Bußgeld ist bei gleicher Geschwindigkeitsüberschreitung gleich hoch, egal wie groß und teuer das Fahrzeug oder wie reich sein Besitzer war. Ob das dann wirklich gerecht ist, ist keine naturwissenschaftliche Frage mehr.

Nun ist (mindestens) eine Doppelstunde verstrichen und die Gleichung $v = \frac{s}{t}$ steht immer noch nicht an der Tafel. Sie ist auf dieser Ebene der Sachbegegnung auch nicht erforderlich und würde sogar die Gefahr der Verwirrung hervorrufen. Denn die Formel verleitet zum vorschnellen algorithmischen Gebrauch. Es wird nicht mehr darüber nachgedacht, durch welche Rechnung oder welche Überlegung man herausfindet, wie schnell sich ein Fahrzeug, ein Mensch, ein Gegenstand bewegt. Die Formel ersetzt sie die ihr zugrunde liegenden Überlegungen und verliert dadurch ihre Wurzeln. Die Folge ist bekannt: Formelzeichen werden vertauscht, Einheiten falsch eingesetzt u. A.

Vorerst verzichten wir daher auf weitere Formalisierungen und nutzen das gewonnene Verständnis dazu, Geschwindigkeitsphänomene aus dem Alltag messend und rechnend zu erfassen. Es ergeben sich dabei durchaus interessante Vergleiche und kleine „Forschungsaufgaben“: Was heißt eigentlich „Schneckentempo“? Wird es auch von einer Ameise erreicht? Wie schnell fliegt ein Vogel? Wer hat den „schärfsten Schuss“ beim Elfmeter? Wie schnell fließt das Wasser im Bach? – Es würde zu weit führen, hier von den kreativen Beispielen und Lösungen zu berichten, auf die Kinder bei solchen experimentellen Erkundungen und Beobachtungen kommen – entsprechend offene Aufgabenstellungen vorausgesetzt. Die erforderlichen Berechnungen erscheinen jeweils als Hilfsmittel, um das herauszufinden, was die Kinder auch wissen wollen und werden deshalb auch nicht als störend oder abschreckend wahrgenommen.

Das Thema „Geschwindigkeit“ wird später – z. B. im 8. Schuljahr – erneut aufgegriffen, wenn es um das Verstehen des Definitionsverfahrens für Quotientengrößen geht (s.u.). In den unteren zwei oder drei Klassen der Sekundarstufe 1 sollte man die Freude an der Befassung mit den Phänomenen nicht durch viele Fachbegriffe oder mit formalisierten Darstellungen und Vorgehensweisen ersticken. Vieles kann im Qualitativen bleiben, z. B. Phänomene aus der Optik, dem Magnetismus, der Elektrostatik u. Ä. Mit den hier gewählten Beispielen wollte ich betonen, dass quantitative Verfahren eine zunehmend größere Bedeutung erhalten. Maß und Zahl gehören nicht nur zur Grundlage naturwissenschaftlichen Arbeitens, sie sind darüber hinaus ein Kulturmerkmal. „Unwägbarkeit“ und „Unberechenbares“ führen zur Verunsicherung. Verlässlichkeit gründet in allen Lebensbereichen auch auf Messbarkeit und Berechenbarkeit. Möglichst vielfältige Erfahrungen in diesem Feld sollte der Unterricht bereitstellen, *bevor* quantitative Strategien und Verfahren systematisiert sowie Darstellungen und Berechnungen formalisiert werden. Als geistiges Rüstzeug für das naturwissenschaftliche Denken müssen in den folgenden Jahrgangsstufen dann allerdings verstärkt tragfähige abstrakte Strukturen entwickelt werden.

Experimentieren als Mittel der Theoriebildung:

Die Welt der Phänomene affiziert uns umfassend. Sie weckt Bedürfnisse, Wünsche und Wollen. Sie bildet das unverzichtbare Substrat, ohne das überhaupt keine Ideenwelten entstehen könnten, weder naturwissenschaftliche noch künstlerische noch literarische. Daher bleibt die unmittelbare Erfahrungswelt auch Ausgangspunkt für die Arbeit in den höheren Klassen der Sekundarstufe 1. Ihre Deutungskraft verdanken die Naturwissenschaften aber der Allgemeingültigkeit ihrer Aussagen. Diese entsteht im Absehen vom Einzelfall und damit auch im Ausklammern der Besonderheiten, die den konkret gegebenen Phänomenen anhaften. Naturwissenschaftliches Denken ist daher nicht vom Abstrahieren zu trennen. Ein abstraktes System von Begriffen, Sätzen und Aussagen bildet das tragende Gerüst der Naturwissenschaft. Naturwissenschaftlicher Unterricht kann darauf nicht verzichten, solange er sich so nennen will und den Aufbau naturwissenschaftlicher Kompetenzen anstrebt.

Aus diesem Grund verändert sich im fortgeschrittenen Fachunterricht der Status der Phänomene. Sie bleiben zwar Ausgangspunkt *und* Ziel der Deutungsinteressen der Lernenden. Die Generierung eines allgemein gültigen Aussagesystems führt aber sukzessive über die lebensweltliche Erfahrung hinaus in den Raum der

Abstracta. Die einzelnen Phänomene oder Phänomenbereiche erhalten dadurch exemplarischen Charakter im Sinne von lebensweltlichen Relevanzbereichen, die naturwissenschaftlicher Deutung zugänglich sind¹⁹.

Das Ziel, über den Einzelfall hinausreichende allgemein gültige Begriffe, Aussagen und Gesetze zu gewinnen, wirkt sich natürlich auch auf die Gestaltung der Experimente aus. Es ist z. B. kein Zufall, dass der „Experimentierwagen“ einer Lehrmittelfirma (Abb. 11), mit dem Bewegungsabläufe sehr präzise, – also ideengerecht – dargestellt werden können, von allen affektiven Momenten befreit ist, denen die Lokomotiven (Abb. 10) ihre Attraktivität verdanken.

Der Wagen ist z. B. dafür optimiert, gleichförmig geradlinige Bewegungen darzustellen, die in kürzester Zeit zur Geschwindigkeitsdefinition ($v = \frac{s}{t}$) führen.



Abb. 11: Der „Experimentierwagen“ spiegelt den abstrakten Charakter der mit ihm darstellbaren Gesetze wider.

Diese scheinbare „Effizienz“ standardisierten Geräts wird um den Preis der pädagogischen Gefahr erkaufte, dass der Bezug zur Welt der Phänomene, der Zusammenhang mit dem Erlebnishaften nicht mehr evident ist. Der damit verbundene Motivationsverlust kann dann Stück für Stück dazu beitragen, dass Physik als lebensfern, abstrakt und schwierig empfunden und entsprechend unbeliebt wird.

Die große Herausforderung im Unterricht besteht also darin, naturwissenschaftliche und somit abstrakte Kompetenzen aufzubauen, ohne den Bezug zur Welt der Phänomene zu verlieren. Das bedeutet, dass die Herkunft des abstrakten Wissens aus konkreten lebensweltlichen Fragestellungen erkennbar bleiben muss, und dass es in möglichst vielen Anwendungen konkret werden kann. Erst das Wechselspiel zwischen Abstrahieren und Konkretisieren verwandelt den Gegensatz „abstrakt – konkret“ in ein komplementäres Verhältnis. Auf das hier betrachtete Beispiel aus der Bewegungslehre bezogen, führen diese Erwägungen zur Schlussfolgerung, dass weder auf die Lokomotive (oder ein vergleichbar attraktives Pendant aus der Welt der Lernenden) noch auf den perfektionierten Apparat aus der Lehrmittelsammlung verzichtet werden kann.

Um im Unterricht zur Geschwindigkeitsdefinition zu gelangen, greifen wir die oben geschilderten Erfahrungen mit den Lokomotiven und den Berechnungen aus den Alltagsbeispielen wieder auf. Einige Unterrichtsschritte seien skizziert:

Worin unterscheiden sich schnelle und langsame Bewegungen? – Die große Lokomotive fährt möglichst gleichförmig auf einer 5 – 7 m langen Schienenstrecke, einmal schnell, einmal langsam. Wie lässt sich der Unterschied darstellen? Im (stark gelenkten) Unterrichtsgespräch entsteht ein Plan, der dann realisiert wird: Ein Papierstreifen („Kassenrolle“) wird neben der Bahn ausgelegt. Die Schläge eines Metronoms setzen den Zeittakt, in dem die Position der Lok auf dem Papierstreifen markiert wird. Wir schneiden den Streifen an den entstandenen Messmarken durch, so dass die Strecken, die in gleichen Zeitabschnitten zurückgelegt wurden, durch Streifenabschnitte repräsentiert werden. Es ist natürlich wichtig, dass die Schülerinnen und Schüler den Grund für die einzelnen Schritte einsehen.

Die Papierstreifen werden an die Tafel geheftet. Es entstehen sowohl Zeit-Weg- als auch Zeit-Geschwindigkeitsdiagramme als visualisierte Interpretationen des Bewegungsablaufs.

Aufgrund verschiedener Einflüsse erhalten wir aber weder eine saubere Ursprungsgerade für $s \sim t$ noch eine Parallele zur Zeitachse für $v = \text{const.}$ Vielmehr führt die Verbindung der Papierstreifenenden zu Zick-Zack-Linien. Wie könnte der ideale Bewegungsablauf aussehen? Lässt er sich realisieren? Das Prinzip ist ja aus den vorangegangenen Schuljahren bekannt. Die linearen Verläufe sind Idealisierungen, die wir im Experiment nur näherungsweise erreichen. Wie gut lässt sich das mit der Lokomotive machen? Man müsste alles Mögliche verbessern, am Schluss wären weder die Lok noch die Schienen so wie sie sind. Jetzt wird das fertige Lehrgerät, der „Experimentierwagen“, mit angebautem „Tinten-Tropf-Schreiber“ vorgeführt. Die

¹⁹ Die übergeordneten Bildungsziele – hier die angestrebte Vermittlung systematischer Kenntnisse – sind oft nicht identisch mit den individuellen Zielen der Lernenden. Beide können aber durch die sinnvolle Auswahl von Kontexten erreicht werden.

Kinder sind beeindruckt, wie gut die damit flugs produzierten Messergebnisse zum Idealverlauf passen. Sie verstehen auch, warum der Wagen keine spektakuläre Karosserie hat. Er soll hervorragende Messwerte liefern und ist nicht dafür gemacht, Spaß beim Spielen zu bereiten.

Der proportionale Zusammenhang zwischen Weg und Zeit ($s \sim t$) zeigt sich in der mit dem Experimentierwagen gewonnenen Messreihe als konstantes Verhältnis der Wertepaare oder im Diagramm als Ursprungsgerade. Dies korrespondiert mit einer konstanten Geschwindigkeit. Deshalb ist der Quotient Weg : Zeit als Maß für die Geschwindigkeit geeignet und dient zu deren Definition.

Die physikalische Größe „Geschwindigkeit“ und das Definitionsverfahren beruhen auf dem idealisierten empirischen Zusammenhang zweier anderer Größen bzw. auf deren direkten Proportionalität. Innerhalb des abstrakten Systems der Physik stellt dieses Verfahren eine bedeutende Klasse dar, nämlich die der Quotientengrößen. Die allermeisten für die Sekundarstufe 1 relevanten physikalischen Größen, soweit sie nicht als Grundgrößen eingeführt werden, sind solche Quotientengrößen (Dichte, Druck, Widerstand, Leistung, Stromstärke, Spannung, Beschleunigung u. A.) oder können zumindest als solche definiert werden. Sie können deshalb strukturell gleichartig wie die Geschwindigkeit eingeführt werden, nämlich ausgehend von einem experimentell darstellbaren direkt proportionalen Zusammenhang zwischen zwei anderen Größen. Nach dem dritten oder vierten Beispiel ist dann den meisten Schülerinnen und Schülern klar, dass sie ein grundlegendes abstraktes Verfahren gelernt haben, das sich sehr oft anwenden lässt und auch außerhalb der Physik ständig präsent ist, seien es Preisangaben, Bevölkerungsdichte, Kraftstoffverbrauch usw. Auf einer abstrakten Ebene werden demnach Dinge untereinander vergleichbar – hier die Struktur der Begriffsinhalte von Quotientengrößen –, zwischen denen phänomenologisch kein Zusammenhang besteht. Wir gewinnen durch die abstrakte Systematik neue Möglichkeiten, uns in einer komplexen Welt zurecht zu finden.

Didaktisch lohnt es sich also, die methodischen Wege zu abstrakten Strukturen transparent zu machen, in dem man sie nicht nur geht, sondern auch reflexiv bearbeitet. Ein Verharren bei den Phänomenen wäre ebenso ein Verlust an Chancen sich zurecht zu finden, wie eine undurchschaute formale Einübung des Umgangs mit physikalischen Formeln.

Es bleibt hier noch anzumerken, dass hypothesengeleitetes Experimentieren, also jene traditionell so stark hervorgehobene Kunstfigur aus der naturwissenschaftlichen Forschung, hier nicht zufällig bei den Ausführungen zu den unteren Klassenstufen der Sekundarstufe 1 exemplifiziert wurde. Beim Nachdenken über Zusammenhänge innerhalb der Welt der Phänomene ist die Wahrscheinlichkeit für kreative Ideen hoch, wenn erst einmal eine gewisse Vertrautheit mit den Erscheinungen durch experimentell fundierte Tätigkeiten hergestellt wurde. In der Regel handelt es sich dabei allerdings nicht um Hypothesen mit der paradigmatischen Qualität, deretwegen das Verfahren wissenschaftstheoretisch von so großem Interesse ist. Jene historisch so bedeutenden Hypothesen leiteten den Paradigmenwechsel zur neuzeitlichen Naturwissenschaft ein: Trägheitsgesetz, Gravitationsgesetz, Lichtausbreitung, kinetische Wärmetheorie, um einige dieser Ideen exemplarisch hervorzuheben. Gerade sie fallen ja ausnahmslos unter die oben erläuterte Diskrepanz zwischen physikalischen Deutungen und Alltagsdenken. Selbstverständlich sind diese Ideen unverzichtbarer Gegenstand des Unterrichts. Man wird sich um inhaltliches Nachvollziehen bemühen, die damit verknüpften historischen Leistungen hervorheben und möglichst auch die in Lehrgeräten – z. B. Gravitationswaage – aufwändig verfügbar gemachten Experimente reproduzieren. Aber dabei geht es um die anschauliche und attraktive Vermittlung der Theorie und nicht um authentisches hypothesengeleitetes Experimentieren. Dies dürfte auch für die meisten anderen Experimente gelten, die der Erarbeitung systematischen Wissens gelten, z. B. für die geschilderten und sich zum Zwecke der Einübung wiederholenden Verfahren für die Definition von Quotientengrößen. (Dass zwei Größen zueinander proportional sind, kann zwar formal auch als Hypothese fungieren, faktisch handelt es sich eher um die trivialste aller möglichen Vermutungen!) Mit den hier vorgenommenen Zuordnungen sind keinerlei Wertzuschreibungen in dem Sinne verbunden, dass beispielsweise die experimentelle Bearbeitung von Naturphänomenen wichtiger wäre als die Theorievermittlung mit standardisiertem Lehrmaterial. Es muss nur immer mitvermittelt und mitgelernt werden, was man mit welchem Ziel macht und warum man es auf diese und keine andere Weise tut. Dem Verstehen der Naturwissenschaften ist damit mehr gedient als mit dem „Segeln unter falscher Flagge“.

Literatur

- [1] Muckenfuß, Heinz (1995). Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts. Berlin: Cornelsen
- [2] Galilei, Galileo (1891). Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische. (Aus dem Italienischen übersetzt und herausgegeben von Emil Strauß.) Leipzig
- [3] Samburski, Shmuel (1978). Der Weg der Physik. 2500 Jahre physikalischen Denkens. Texte von Anaximander bis Pauli. München: dtv
- [4] Bacon, Francis (1962). Das Neue Organon (Novum Organon,1620). Herausgegeben von Manfred Buhr. Berlin: Akademie-Verlag
- [5] Kant, Immanuel (1990). Kritik der reinen Vernunft (2. Aufl. 1787). (Werkausgabe in 12 Bänden, hrsg. von Wilhelm Weischedel; Band 3.) Frankfurt: Suhrkamp
- [6] Lichtenberg, Georg Christoph (1971). Schriften und Briefe. Zweiter Band, Sudelbücher II. Hrsg. von Wolfgang Promis. München, Wien Carl Hanser
- [7] v. Weizsäcker, C. F. (1964). Die Tragweite der Wissenschaft. Erster Band. Schöpfung und Weltentstehung. Die Geschichte zweier Begriffe. Stuttgart: Klett
- [8] Redeker, Bruno (1985). Die Vorstruktur des Verstehens und das Lehren von Physik. In: Meyer-Drawe, Käte/Redeker, Bruno: Der Physikalische Blick. Ein Grundproblem des Lernens und Lehrens von Physik. Bad Salzdetfurth: Franzbecker)
- [9] Muckenfuß, Heinz (1996). Grundpositionen Wagenscheins – kritisch hinterfragt. In: Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht. 49, Heft 8, S. 455–462
- [10] Einstein, Albert (1955). Mein Weltbild. Frankfurt a. M.: Ullstein
- [11] Kant, Immanuel (1784). Beantwortung der Frage: Was ist Aufklärung? Berlinische Monatsschrift