

Fachdidaktik interkulturell: Physik

H. Joachim Schlichting Universität Essen

*Ihr karrt in ewig gleicher Spur
und narrt euch vor, dies sei Kultur.*

Christian Morgenstern

*Wenn eine Gans sich einen Gott erdichtet,
dann muß er schnattern*

Michel de Montaigne

Interkulturelles Lernen im engeren Sinne spielt meines Wissens in der Physikdidaktik kaum eine Rolle. Die Lernenden bekommen im Gegenteil gewissermaßen als Metaleson vermittelt, daß Physik *kulturunabhängig* sei. In Afrika, China, Südamerika usw. würde dieselbe Physik betrieben wie in Europa und den USA. Die in dieser Ansicht enthaltenen Mißverständnisse und Probleme sollen hier nur angedeutet werden. Hervorheben möchte ich einen Aspekt, der normalerweise nicht mit interkulturellem Lernen in Verbindung gebracht wird, meines Erachtens jedoch ganz ähnlich strukturiert ist und beim Lernen von Physik eine bislang unterschätzte Rolle spielt: Die perspektivische Differenz zwischen Physik und anderen Bereichen des kulturellen Lebens. Dieser Problemkreis hat allenfalls im sogenannten *two cultures gap* eine gewisse Aufmerksamkeit erfahren, ohne daß jedoch Konsequenzen für das Lernen (u.a. von Physik) untersucht worden wären. Dieser Mangel dient mir als Motiv und Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen.

Blickfang: Thales und die thrakische Magd

*Ein Astrolog' fiel in den Brunnen einst
Da sagten sie zu ihm: „Du armes Wesen,
siehst nicht, was dir zu Füßen ist, und meinst,
du könntest droben hoch am Himmel lesen!*

Jean de La Fontaine

Als Thales von Milet beim Betrachten der Sterne in eine Grube fiel, - mal ist von einem Brunnen, mal von einer Mistgrube die Rede - mußte er bekanntlich auch noch den Spott der thrakischen Magd über sich ergehen lassen. Ihrer lebensweltlichen Überzeugung entsprechend, war es abwegig, in die Ferne zu schweifen und das Naheliegende zu übersehen. Offenbar hat weder das Mißgeschick des Meisters noch der Spott darüber seiner Größe etwas anhaben können. Was gilt schon die Kritik einer Magd, die zudem aus dem kulturell rückständigen Thrakien stammte? Dennoch ist diese Fabel nicht zum Verstummen zu bringen, macht sie doch auf eindrucksvolle Weise auf Differenzen zwischen unterschiedlichen Sehweisen aufmerksam, denen verschiedene sozio- kulturelle, visuell- begriffliche u.a. Hintergründe entsprechen: Während die thrakische Magd das lebensweltliche Denken, den Common Sense verkörpert, das zu gefühlsbestimmten, unmittelbarem, aus subjektiven Motiven folgenden Tun führt, steht der griechische Gelehrte für das auf abstandnehmender Beobachtung, Trennung von Subjekt und Objekt, auf Unparteilichkeit und Leidenschaftslosigkeit beruhende Handeln.

Um deutlich zu machen, daß Thales trotz seines Mißgeschicks nicht zu jener Spezies abgehobener Denker gehört, die sich mit folgenloser und abwegiger geistiger Spekulation abgeben, gibt es bereits von Aristoteles eine Gegenanekdote: "Man beschimpfte Thales wegen seiner Armut, die zeige, wie unnütz die Philosophie sei. Da sah Thales, so erzählt man, aufgrund seiner Astronomie eine reiche Ölernte voraus, und noch im Winter, als er gerade ein wenig Geld hatte, sichert er sich durch eine Anzahlung die gesamten Ölpresen in Milet und Chios; er konnte sie billig mieten, da niemand ihn überbot. Als die Zeit kam, war plötzlich eine starke Nachfrage da; da vermietete er sie nach seinen Bedingungen weiter, verdiente viel Geld und bewies, daß Philosophen leicht reich sein können, falls sie wollen, aber daß dies nicht ihr Ziel ist" (Aristoteles).

Damit wird neben der Differenz zwischen Philosophie und Lebenswelt eine weitere Differenz ins Spiel gebracht: die Differenz zwischen spekulativem philosophischem und prognostischem (natur-) wissenschaftlichem Denken. Die Astronomie wird hier auf überlegene Weise praktisch, indem sie in diesem Fall das Wetter vorherzusagen vermag, was weder auf der Grundlage lebensweltlichen noch philosophischen Denkens

möglich erscheint. Beide Differenzen sind bis heute virulent und sorgen für vielfältige Auseinandersetzungen und Probleme: Zum einen werden das lebensweltliche und das wissenschaftliche Denken, zum anderen das geisteswissenschaftliche hermeneutische und das naturwissenschaftliche empirisch analytische Denken einander gegenübergestellt. Im letzteren Fall ist nach einem Ausdruck von C. P. Snow von der Kluft zwischen den *beiden Kulturen* die Rede (Snow 1967). Sowohl die Versuche, jeweils die eigene Sehweise als der anderen überlegen zu erweisen, als auch die Bemühungen, die Differenzen zwischen beiden Sehweisen einzuebren bzw. als nur scheinbar darzustellen, lassen eine Art Monokultur des Denkens und Handelns erkennen, das davon ausgeht, der "Wahrheit" sei auf eine und nur eine Weise beizukommen, die Vielfalt der Welt sei auf genau ein Prinzip zurückzuführen. Die Wurzeln solchen Vereinheitlichungsbemühungen gehen bis in die Ursprünge des westlichen Denkens zurück und müssen auch heute noch als ein mächtiger Antrieb der naturwissenschaftlichen, insbesondere der physikalischen Forschung angesehen werden.

Das sich in der Aussage der thrakischen Magd andeutende Problem kann aus heutiger Sicht folgendermaßen auf den Punkt gebracht werden: *"Die Angehörigen eines Kulturkreises erzeugen, durch ihren Modus des Erkennens, die Kultur, die ihren Modus des Erkennens erzeugt. Die Kultur generiert das Bewußtsein, das die Kultur regeneriert. Das Bewußtsein ist von vielen sozio-kulturellen Bedingungen abhängig, und es konditioniert wiederum diese Bedingungen* (Morin 1991: 83). Das Sehen und das darauf beruhende Erkenntnisvermögen ist in mehrfacher Hinsicht mit der Struktur der Kultur verknüpft. Das heißt: Die Kultur differenziert sich weiter zu speziellen Sehweisen aus, die unterschiedlichen sozialen, historischen, ethnischen, weltanschaulichen u.a. Vorerfahrungen und Bedingungen Rechnung tragen, und deren Differenzen auch innerhalb eines Kulturkreises Verständigungs-, Verständnis- und Anschauungsbemühungen sowie damit zusammenhängende Probleme hervorrufen. Die Bedeutung der unterschiedlichen Sehweisen innerhalb und außerhalb der Physik soll im folgenden im Hinblick auf Probleme des Lehrens und Lernens von Physik skizziert werden.

Wahrnehmung muß gelernt werden (Kant)

*Jede Philosophie bezieht ihre Farbe
von der geheimen Lichtquelle eines Vorstellungshintergrundes,
der niemals ausdrücklich in ihren Gedankenketten auftaucht.*

Alfred N. Whitehead

Wir gehen davon aus, daß das Sehen nicht nur davon abhängt, worauf man blickt, sondern auch davon, worauf zu sehen uns unsere visuell - begriffliche und - ich möchte hinzufügen - gesellschaftliche Erfahrung ge-



Bild 1: Bedeutungsvolle Strukturen sind nicht immer leicht zu gewinnen. Häufig erlaubt erst der Kontext eine eindeutige Bedeutungszuweisung (siehe Bild 11).

lehrt hat (Kuhn 1973) Daher steht nicht nur der betrachtete Gegenstand, die Welt bzw. Teile derselben, in Frage, sondern das Sehen und die Voraussetzungen des Sehen selbst sind „unter die Lupe zu nehmen“. Die Lupe, das Mikroskop, das Fernrohr trennen Beobachter und Gegenstand noch deutlicher als das menschliche Auge. Die Trennung, die Entfernung, ist typisch für das distanzierte, abstandnehmende wissenschaftliche Sehen. In dem Maße, wie die optischen Sehprothesen von komplexen nichtoptischen Nachfolgern wie etwa das Radioteleskop einerseits und das Elektronensynchrotron andererseits verdrängt werden, verschiebt sich der Horizont des Sehens immer weiter in makroskopische und mikroskopische Tiefen, so daß weder von einem Sehen noch von Gegenständen im ursprünglichen Verständnis die Rede sein kann: Zwischen Beobachter und Gegenstand rückt die Theorie,

auf deren Grundlage das Gerät beruht, das uns den Blick ermöglicht, indem sie den wahrgenommenen Gegenstand überhaupt erst konstituiert oder - im Falle des physikalischen Laien - den Blick versperrt ¹.

Wissenschaftler sind sich heute darüber einig, daß uns das Sehen nicht gegeben ist, sondern wie eine Sprache erlernt werden muß. Das beginnt mit der Fähigkeit, aus dem visuellen Chaos der Sinneseindrücke, die aus der Belichtung unsere Netzhaut hervorgehen, bedeutungsvolle Strukturen zu gewinnen (Bild 1). Bei-

¹ Als Physiker beziehe ich mich vor allem auf Probleme der Physik. Viele Aussagen dürften jedoch mutatis mutandis auch auf die naturwissenschaftlichen Nachbarwissenschaften übertragbar sein

spielsweise weiß man, daß blind geborene Menschen, die in späteren Lebensjahren durch operative Eingriffe im physiologischen Sinne das Sehvermögen erhalten, mit fast unüberwindbaren Schwierigkeiten zu ringen haben, um schließlich im üblichen Verständnis des Wortes sehen zu können (Gregory et al. 1969).

Ein anderes Problem besteht darin, daß der durch ein Objekt hervorgerufene Sinneseindruck nicht immer in eindeutiger Weise interpretiert werden kann:

- Die an der Fensterscheibe krabbelnde Fliege muß von dem unter dem gleichen Sehwinkel durch das Fenster wahrgenommenen Raubvogel unterschieden werden können.
- Ein wie Superman fliegender Mensch wird von den meisten Menschen nur in dem Bewußtsein akzeptiert, daß man einen Film sieht.

Im einen wie im anderen Fall zeigt sich, daß bedeutungsvolles Sehen nur unter Einbeziehung des Kontexts im engeren und weiteren Sinne erfolgen kann.

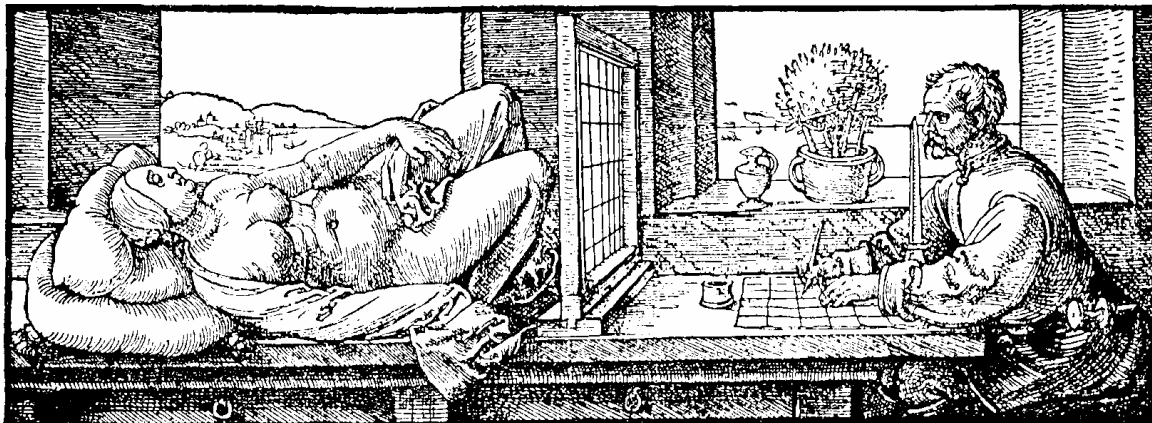


Bild 3: Zeichner mit dem liegenden Weib von Albrecht Dürer: Die nicht nur den Intellekt ansprechende vielgestaltete, farbenprächige und pralle Realität wird aus der Perspektive des unbeteiligten, objektiven Blicks mit Hilfe von Apparaten reduziert auf das Meßbare und Berechenbare.

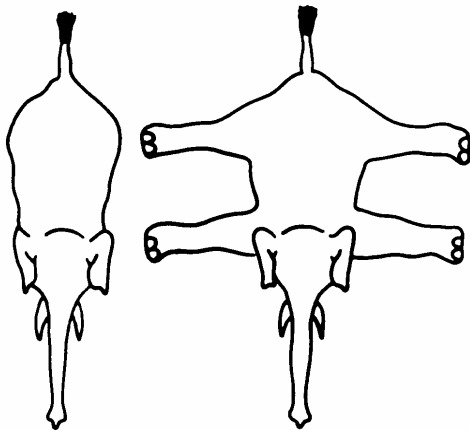


Bild 2: Der aufgeschnittene Elefant erschien Afrikanern vertrauter als die perspektivische Darstellung.

Zum Kontext gehört auch der kulturelle Hintergrund bzw. das Weltbild des Sehenden. Während wir im Lichte des neuzeitlich wissenschaftlichen Weltbildes des zentralperspektivischen Sehens (Bild 3) Fotografien als objektive, sehweise-unabhängige Abbilder der Realität ansehen, berichten Ethnologen davon, daß Menschen aus anderen Kulturkreisen Schwierigkeiten damit haben, diese Perspektive einzunehmen. Einer wissenschaftlichen Untersuchung zufolge (Deregowsky 1974) neigen beispielsweise Afrikaner dazu, die Abbildung eines Elefanten als realistischer anzusehen, wenn man alles sieht (Aufrißskizze rechts in Bild 2), als wenn aufgrund der perspektivischen Darstellung von oben gesehen, Teile des Elefanten verdeckt sind (links in Bild 2). Bevor Kinder in das perspektivische Sehen hineinsozialisiert worden sind, neigen sie dazu, ein aufgeklapptes Haus mit sichtbarer Vorder- und Rückseite als realistischer ansehen (Bild 4), als ein perspektivisch gezeichnetes, bei dem andere Ansichten zwangsläufig verdeckt werden.

Selbst am Wechsel von Stilen in der Malerei kann festgestellt werden, daß "jede Phase der westlichen Zivilisation ihre eigene 'Perspektive' (hat)..., in der sich eine bestimmte Weltanschauung spiegelt"(Panofsky 1964: S. 99ff). Kulturelle und zivilisationsbedingte Einflüsse auf die Perspektive bzw. Sehweise können so weit gehen, daß man beispielsweise eine bestimmte Landschaft so sieht, wie sie von einem Maler gemalt wurde. So erlebt Theodor Adorno eine Allee von Platanen "ein wenig wie gemalte Träume von Henri Rousseau" (Adorno 1967: S. 131)

Da das Sehen eng mit der Erschließung der äußeren Welt verbunden ist, beschränkt sich die Perspektivenabhängigkeit nicht auf den visuellen Bereich, sondern gilt ganz allgemein für die Wahrnehmung und Erfahrung

der Welt. Man muß davon ausgehen, daß es zusätzlich zu den verschiedenen kulturellen Zugängen zur Welt mehrere Perspektiven gibt, in denen sich die Menschen die Welt deuten, aneignen und ihre Erfahrungen



Bild 4: Zeichnung eines Vorschulkindes.

strukturieren. Zu diesen sogenannten "symbolischen Formen" unter denen sich uns die Welt erschließt, gehören für Cassirer vor allem die Sprache, die Kunst, die Wissenschaft, die Religion aber auch die Technik, der Staat und seine in das Leben der Menschen eingreifenden Untergliederungen. Symbolische Formen sind für ihn menschliche Kulturleistungen oder Kulturbereiche, die von den jeweiligen Wirklichkeitsauffassungen und Verstehensweisen des Menschen geprägt sind. Symbolisch nennt er diese Formen deshalb, weil für ihn eine Wirklichkeit jenseits menschlicher Wahrnehmungen und Deutungen nicht denkbar ist. Demnach gehen für ihn Symbol und Gegenstand ineinander über², so daß der Mensch gewissermaßen im Zentrum seiner eigenen Wirklichkeitsauffassung steht (Cassirer 1975).

Die kulturelle Prägung der Wahrnehmung, in einer modernen Gesellschaft ist jedoch alles andere als eindeutig. Je nach sozialer, ethnischer, religiöser Herkunft bilden sich verschiedene Horizonte des Sehens, verschiedenen Sehweisen heraus. Diese fungieren demnach als apriori der Wahrnehmung, was ihnen eine gewisse Stabilität und Dauerhaftigkeit verleiht mit der Konsequenz, daß verschiedene disjunkte Sehweisen aufeinander bezogen werden und miteinander in Konflikt geraten

Physikalische Perspektiven

Vor dem Hintergrund dieser Einsichten ist es erstaunlich, daß die Physik in der Regel als eine von subjektiven, menschlichen und kulturellen Einflüssen freie Wissenschaft dargestellt wird, die die Welt objektiv, so wie sie an und für sich ist, beschreibt. Diese Ansicht erhält leider immer wieder Nahrung von namhaften Wissenschaftlern, wie etwa jüngst von Stephen Weinberg, der mit der normativen Kraft eines Nobelpreises im Rücken nur der Physik grenzenlose Erkenntnismöglichkeiten zubilligt, da diese frei von historischen, philosophischen oder - wie er es zusammenfassend nennt - "kulturellen" Einflüssen sei. "Unsere Behauptungen über die Naturgesetze stehen in einem 1:1-Verhältnis zu Aspekten der objektiven Realität" (Weinberg 1998).

Wird dieser Ansicht nicht bereits durch die Tatsache widersprochen, daß die Physik eine Geschichte hat, in der die jeweils für objektiv gehaltene Realität oft drastischen Veränderungen unterliegt? Wird nicht mit Aussagen wie „Newton konnte noch nicht wissen...“ oder „Galilei irrte sich...“ zum Ausdruck gebracht, daß die ansonsten als Heroen verehrten Physiker fehlbar, die ewigen Wahrheiten doch von menschlichen Sehweisen abhängen? Muß eine solche historische Perspektive nicht zu der Einsicht führen, daß auch die heute für letzte Wahrheiten gehaltenen Erkenntnisse in der Zukunft ebenfalls überwunden werden könnten? Solche Fragen werden selten gestellt, und deshalb fällt es kaum auf, daß die Physik ein Produkt des abendländischen Denkens ist, das – sieht man mal von Madame Curie ab - von Männern gemacht wurde. Diese kulturelle Einseitigkeit und eurozentristische Beschränkung täuschen über die zahlreichen Einflüsse aus verschiedenen Kulturkreisen hinweg und leugnen damit den multikulturellen Ursprung des Unternehmens Naturwissenschaften, so wie wir es heute kennen. Interkulturelle Probleme werden in der deutschsprachigen Physikdidaktik meines Wissens nach kaum thematisiert, wenn man einmal von pauschalen Hinweisen auf die kulturelle, historische und menschliche Dimension der Physik absieht. Im englischen Sprachraum beginnt sich jedoch ein Bewußtsein dafür zu entwickeln (siehe dazu die Beiträge von Reid 1993, Reiss 1993, Cross et al. 1993).

Um das Problembewußtsein für die Bedeutung Interkulturalität beim Lernen von Physik zu wecken, beschränken wir uns im folgenden schwerpunktmäßig auf die m.E. das Lernen von Physik in sehr starkem Maße bestimmende Differenz zwischen physikalischer und lebensweltlicher Sehweise. Dabei soll skizziert und mit Beispielen aus dem Unterricht untermauert werden, daß die physikalische Sehweise ihrerseits in historische gewachsene Sehweisen zerfällt und mit einer ebenfalls nicht einheitlichen zunehmend multikulturell geprägten Lebenswelt konfrontiert wird.

² Diese Auffassung ist insbesondere für die moderne Physik von Bedeutung: Was sind Atom, Elektronen, Pulsare? Handelt es sich bei solchen Entitäten, die sich nur im Rahmen einer Sehweise, bzw. Theorie konstituieren um Modelle oder reale Objekte?

Klassische Physik: Wie im Himmel so auf Erden

*Man muß schon ein Newton sein, um zu bemerken,
daß der Mond fällt, wenn jeder sieht, daß er nicht fällt.*

Paul Valéry

Physikalische Sehweise heißt für die Schulphysik zunächst einmal Sehweise der klassischen Physik, und diese verdankt sie vor allem dem Blick zum Himmel. Indem Kopernikus die Sonne zum bevorzugten Beobachterstandpunkt macht, legt er ganz andere Folgerungen aus den - in Grenzen - selben astronomischen Beobachtungen nahe, als sie aus der Sicht der Erde gezogen wurden. Hier offenbart sich die Abhängigkeit der Beobachtungen von der Sehweise bis ins Buchstäbliche ihrer etymologischen Bedeutung. So gesehen besteht das eigentliche Verdienst eines Kopernikus, aber auch eines Darwin, nicht so sehr in der Entdeckung einer wahren Theorie, sondern eines fruchtbaren neuen Aspekts (Wittgenstein 1973: 475).

Die Fruchtbarkeit zeigt sich darin, daß sich aus der kopernikanischen Perspektive die verschlungenen planetarischen Erscheinungen für denjenigen entwirren, der diese Perspektive zumindest imaginativ einzunehmen in der Lage ist (Bild 5). Perspektivische Transpositionen funktionieren nicht nur in einer Richtung: Die klassische Mechanik kann als der Versuch angesehen werden, die Prinzipien des kopernikanischen Systems auf irdische Gegebenheiten zu übertragen. Das mag einer der Gründe dafür sein, daß sich auch auf der Erde wie im Himmel der physikalische Blick vor allem auf getrennte, starre und unveränderliche Objekte richtet, die durch einen luftleeren Raum voneinander geschieden sind und sich darin reibungsfrei bewegen.

Desgleichen wird die Auffassung der Zeit als eine Abfolge von universalen Augenblicken, derart daß Wechselwirkungen zwischen den Objekten in einer eindeutigen Ordnung ablaufen können, durch die Betrachtung der planetarischen Vorgänge nahegelegt. Indem man auf diese Weise Prinzipien übernimmt, die auf der Erde so nicht anzutreffen sind, gelangt man auch hier zu einem eindeutigen, gerichteten kausalen Geschehen, das durch die Art der physikalischen Gesetze festgelegt ist, nach denen die Wechselwirkungen erfolgen.

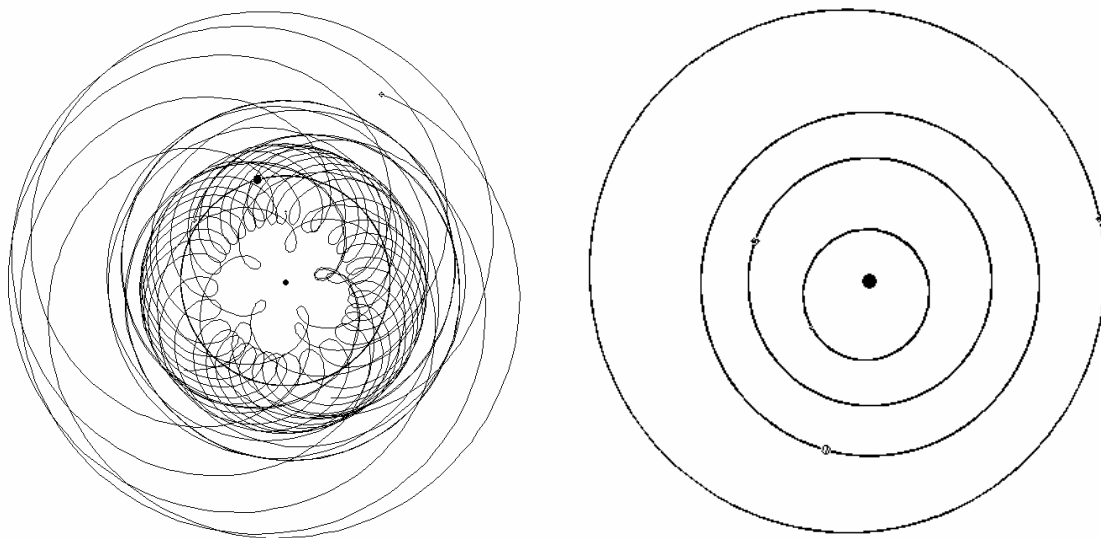


Bild 5: Beide Bilder enthalten physikalisch gesehen dieselbe Information, die graphische Darstellung der Planetenbahnen von Merkur, Venus, Erde und Mars a) als wirres Knäuel von der Erde und b) als fast kreisförmige Ringe von der Sonne aus gesehen.

Entscheidend für die Transposition ist also nicht das tatsächliche Vorhandensein himmlischen Verhältnisse auf der Erde, sondern zunächst nur die Überzeugung, daß diese Bedingungen im Prinzip hergestellt werden können. So konnte Galilei den Trägheitssatz als gültig ansehen, ohne daß er ein Vakuum vorweisen mußte. Erst seinem Nachfolger Torricelli gelang es, so etwas wie einen luftverdünnten Raum herzustellen.

Die Berechenbarkeit und Vorhersagbarkeit irdischer Vorgänge muß so gesehen mit einem völlig geänderten Empirieverständnis erkaufte werden. Es geht nicht mehr um eine durch direkte Beobachtung festgestellte Übereinstimmung der "in Ruhe gelassenen" Natur mit einer Vorstellung (Theorie), sondern darum, die Natur durch gezielte Eingriffe (Experimente) dazu zu bringen, sich der Theorie entsprechend zu verhalten. Nicht das Gegebene, sondern das Konstruierte bzw. Geschaffene ist Gegenstand der Physik, denn nur Geschaffene

nes läßt sich (experimentell) kontrollieren³. Daher betrifft eine Vorhersage im physikalischen Sinne nicht das Verhalten der Natur an und für sich, sondern die in ihren Bedingungen unter Kontrolle gebrachte Natur.

Um das Verhalten der so präparierten und in handlichen naturwissenschaftlichen Systemen untergebrachten Natur vorhersagen zu können, erfaßt man die Art und Weise (Dynamik), wie sich die Systeme unter idealen (himmlischen) Bedingungen (z.B. luftleerer Raum) verhalten. Änderungen des Verhaltens eines Systems, insbesondere Änderungen des Bewegungszustandes sind gleichbedeutend mit der Frage nach der Ursache.

Newton gelingt es, in Form von Differentialgleichungen die Ursache- Wirkungskette von Vorgängen in eine mathematische Form zu gießen (Schlichting 1993a). Hat man die Dynamik eines Systems durch eine solche Bewegungsgleichung erfaßt, so muß man nur noch das Verhalten des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt, beispielsweise dem gegenwärtigen, kennen, um den Bewegungszustand (Orte und Geschwindigkeiten) zu einem beliebigen anderen Zeitpunkt in Vergangenheit oder Zukunft exakt vorhersagen zu können.

Die Differentialgleichungen können als die mathematische Sprache angesehen werden, in der sich der Determinismus ausdrückt: Sie geben der Zeit Gestalt, die Ewigkeit im gegenwärtigen Augenblick zu besitzen (Ekeland 1989: S.36): "Die Herrschaft über den Augenblick ist die Herrschaft über das Leben" (Marie v. Ebner- Eschenbach). Das newtonsche Universum liegt gewissermaßen offen vor uns, das Zukünftige ist im Gegenwärtigen bereits enthalten. Oder, wie Leibniz es ausdrückt: "Le present est gros de l'avenir, le futur se pouvait lire dans le passé, l'éloigné est exprimé dans le prochain" (Leibniz 1961: 6:604).⁴

Neue Perspektiven: Relativitätstheorie und Quantenmechanik

Im Sinne unseres Themas kann das Ergebnis der kopernikanischen Revolution in der Überwindung der beschränkten irdischen Sehweise angesehen werden, die zu einem größeren Überblick und damit zu allgemeineren Aussagen führt. Dahinter steckt die Überzeugung, daß wissenschaftliche Erkenntnisse nicht von der speziellen - in diesem Fall - irdischen Perspektive abhängen dürften. Sofern es in der Relativitätstheorie und Quantentheorie um den Versuch geht, die Beschränkungen einer bestimmten Sehweise zu überwinden und die wissenschaftlichen Erkenntnisse gewissermaßen sehweisenunabhängig zu formulieren, verdanken auch sie sich einer kopernikanischen Revolution mit teilweise völlig neuen, aus der alten Perspektive nicht nachzuvollziehenden Konsequenzen.

Relativitätstheorie - es gibt keine bevorzugte Perspektive

*Relativität - Anordnung der Variablen - nach dem Beobachter.
Das Absolute ist das, was sich nach beliebiger Umwandlung identisch wiederfindet.*

Paul Valéry

Ebenso wie Kopernikus die Auszeichnung der Erde als Beobachtungsbasis in Frage stellt und damit die Überwindung der ptolemäischen Sehweise einleitet, empfindet es Einstein als willkürliche Einschränkung, daß nichtbeschleunigte Systeme eine Sonderstellung einnehmen und es eine absolute Bewegung relativ zu einem unsichtbaren und - vor allem - nicht nachweisbaren Medium, dem Äther, geben sollte.

Mehr noch als Galilei ist er auf Gedankenexperimente angewiesen, um die Notwendigkeit einer neuen Sehweise zu begründen. So weist er darauf hin, daß einem mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Beobachter das Licht als eine nicht von der Stelle kommende, stehende Welle erscheinen muß. Sich nicht fortpflanzendes Licht steht aber einerseits im Widerspruch zur äußerst erfolgreichen Elektrodynamik Maxwells. Einstein ist die universelle Gültigkeit physikalischer Gesetze und die damit bedingte Überwindung eines ausgezeichneten "Beobachters" wichtiger als die Unveränderlichkeit der Phänomene. Deshalb unterstellt er (in der speziellen Relativitätstheorie), daß die Gesetze nicht davon abhängen, ob man sich im Zustand der Ruhe oder der (gleichförmigen) Bewegung befindet. Außerdem geht er davon aus, daß die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum konstant ist unabhängig davon, ob sich die Lichtquelle in Ruhe oder in Bewegung befindet.

³ Diese Auffassung ist nicht unwidersprochen geblieben. Beispielsweise hat sich Goethe dagegen vehement gewehrt. Vor dem Hintergrund seiner naturwissenschaftlichen Arbeiten gewinnen die Eigenheiten der newtonschen Physik Profil.

⁴ Daher kann der Determinismus bereits als eine Konzeption der "Raum- Zeit" angesehen werden (siehe unten), "in der das Antezedenz und das Konsequenz gleichsam simultane Teile eines Ganzen sind. Die Zeit ist in jedem Kausationsdenken eine echte Dimension des Raums" (Valéry 1988: S. 202).

Um die Unveränderlichkeit der Gesetze zu erhalten, muß er jedoch in Kauf nehmen, daß die vertrauten Größen wie Zeit, Masse und Länge relativ werden, d.h. vom Bezugssystem abhängen, aus dem heraus sie gemessen werden: Indem für verschiedene Beobachter Raum und Zeit anders erfahren werden, verlieren diese aus klassischer Sicht absoluten Konzepte ihre Eigenständigkeit und Bedeutung. Nur in der Vereinigung der drei Raumkoordinaten mit der Zeit als vierte Koordinate ergibt sich eine als Raumzeit bezeichnete neue Invariante, die für alle Beobachter dieselbe ist⁵.

Die Relativitätstheorie kann somit als konsequente Fortsetzung des durch die kopernikanische Wende eingeleiteten Bemühens um größere Einheit in der Physik angesehen werden. Indem Kopernikus die Erde zu einem Planeten "macht" und damit aus dem Mittelpunkt der Erde "entfernt", wird erstmalig in der Geschichte der Physik ein Standpunkt außerhalb der Erde eingenommen und damit eine Änderung des Blickwinkels

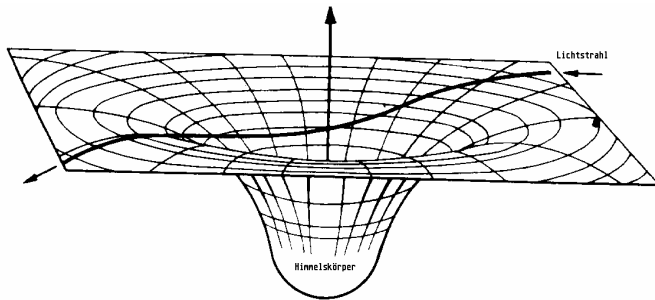


Bild 6: Nach Einstein kann man sich die Raumzeit wie eine elastische Folie vorstellen, die durch die Massen verformt werden.

herbeigeführt. Aus diesem Blickwinkel erscheint die Erde selbst als physikalischer Gegenstand und unterliegt denselben Gesetzen wie etwa ein hochgeworfener Stein: "Von der Welt sprechen heißt, einen Gegenstand annehmen, der sich in die Hand nehmen läßt" (Paul Valéry). Die durch die Relativitätstheorie bedingte Verallgemeinerung besteht darin, daß phänomenologisch verschiedene Phänomene durch dieselben Gesetze beschrieben werden. Hier wie dort muß die Aufgabe unmittelbarer Anschauungen als Preis gezahlt werden.

In der allgemeinen Relativitätstheorie setzt Einstein den in der speziellen Relativitätstheorie begonnenen Weg fort, indem er die Bewegungsgleichungen auch gegenüber beschleunigten Bewegungen invariant macht. Auf diese Weise können Vorgänge nicht nur aus der Sicht beliebiger Bezugssysteme, sondern darüber hinaus auch für beliebige Bewegungsarten mit denselben physikalischen Gesetzen beschrieben werden. Außerdem erfährt infolge der Verallgemeinerung die bereits in der klassischen Physik unterstellte Äquivalenz von schwerer und träger Masse eine theoretische Rechtfertigung.

Der newtonsche Kraftbegriff ist seit seiner Einführung immer wieder als ein mysteriöses Konzept kritisiert worden, weil die auf physikalisch völlig unverständliche Weise über große Entfernungen wirkt (Fernwirkung). Im Rahmen der Relativitätstheorie wird sie zu einer naheliegenden Eigenschaft der Raumzeit. Nach Einstein kann man sich die Raumzeit wie eine elastische Folie vorzustellen, die an den Stellen eingedrückt wird, an denen sich Massen befinden, und durch diese Deformationen die Gravitationsphänomene hervorbringt (Abb. 6). Daher kann die Raumzeit nicht mehr als leerer Behälter angesehen werden, in dem sich die Massen in absoluter zeitlicher Ordnung bewegen, sondern als ein durch die Massen strukturiertes und daher nicht unabhängig von ihnen zu denkendes Gebilde.

Während aus klassischer Sicht das Geschehen der Welt ganz ähnlich wie bei der Betrachtung des nächtlichen Himmels als Film vor einem Beobachter abläuft, der mit diesem Geschehen nichts zu tun hat, wird im Rahmen der Relativitätstheorie die Welt zu einer Art Feld, in dem die Vorstellung unabhängig voneinander agierender Gegenstände aufgegeben werden muß. Damit wird aber die Existenz einer objektiven, unabhängig vom menschlichen Beobachter existierenden Welt, d.h. die eindeutige Trennung der Welt in Subjekt und Objekt und folglich die endgültige Erkennbarkeit der Welt in Frage gestellt.

⁵ In der Lehre wird die newtonsche üblicherweise als Grenzfall der modernen Schweisen (z.B. der Relativitätstheorie) dargestellt. Darin kommt das der physikalischen Monokultur verpflichtete Bemühen zum Ausdruck, Differenzen einzu-ebenen und eine Kontinuität der Entwicklung der Physik zu suggerieren, das allerdings durch die damit einhergehende stillschweigende Umwertung von Begriffen, Konzepten und Anschauungen Lügen gestraft wird und das Verstehen eher verhindert als befördert.

Quantenmechanik - Unschärfe als physikalisches Prinzip

*Wir hatten diese Unschärfe schon seit Jahrtausenden nötig.
In seiner Erwartung machten unsere starre Logik und unsere grobschlächtigen Begriffe
den Eindruck, als spielte man mit Boxhandschuhen Klavier.*

Michel Serres

Obwohl sich der Objektbereich und die Fragestellungen der Quantenmechanik sowohl von der klassischen Physik als auch von der Relativitätstheorie grundlegend unterscheiden, gibt es Gemeinsamkeiten. Zum einen erweist sich der in den Mikrokosmos gerichtete Blick gewissermaßen als Blick in den Himmel: Allenthalben sieht man winzige Planetensysteme. Zum anderen erfährt die im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie angesprochene Problematik bei der Trennung der Welt in Beobachter und Beobachtungsgegenstand eine weitere Verschärfung, wenn auch aus ganz anderen Gründen.

Darüber hinaus wird das bereits in der klassischen Physik angelegte Problem der Diskrepanz zwischen klassischen Teilchen und Wellen virulent. Während die diskreten in Raum und Zeit lokalisierbaren Teilchen auf bestimmten Bahnen fortschreiten, breiten sich die elektromagnetischen Wellen aus der - ebenfalls klassischen - Sicht der Elektrodynamik in Raum und Zeit ähnlich wie der Schall in der Luft aus. Sie sind daher nicht lokalisierbar und können Interferenzphänomene hervorbringen.

Obwohl sich in dieser Diskrepanz bereits die Unmöglichkeit einer einheitlichen Darstellung raum- zeitlicher Phänomene zeigt, kommt es erst mit der Entdeckung des fotoelektrischen Effektes zum Eklat, der sich schließlich in einer konzeptuellen Revolution entlädt: Indem man das Licht nicht nur als Wellenerscheinung, sondern (in bestimmten Situationen) auch als Strom von Teilchen kennenlernt, gerät die klassische Grenze zwischen Ding und Bewegung ins Wanken. Wir haben den aus klassischer Sicht paradoxen Gedanken eines Dings zu akzeptieren, das ebenfalls ein Un- Ding sein kann.

Sieht man jedoch von der darin enthaltenen Auflösung der klassischen Dingvorstellung ab, so nimmt sich die Tatsache, daß hier ein physikalisches Phänomen je nach der konkreten experimentellen Situation mal so und mal so erscheint, mal an ein Teilchen, mal an eine Welle erinnert, gar nicht mehr so paradox aus. Unsere Alltagserfahrung hält zahlreiche Beispiele für diesen Sachverhalt bereit. Durch Einbeziehung des jeweiligen Blickwinkels, der Perspektive, gelingt es uns, diesen Unterschied einzusehen. Sollte sich nicht auch der Welle- Teilchen- Dualismus durch eine Einbeziehung der jeweiligen Beobachterperspektive auf ähnliche Weise entschärfen lassen?

Auf die Quantenmechanik bezogen heißt das konkret, daß die Messung von Impuls und Ort in unterschiedlichen experimentellen Situationen erfolgt und daher verschiedene Perspektiven betrifft, so daß diese Größen sich nicht aus einer Perspektive, d.h. gleichzeitig beliebig genau feststellen lassen: Je schärfer die eine Größe gemessen wird, desto unschärfer erscheint die andere. Wie Werner Heisenberg in seiner berühmten Unschärferelation zum Ausdruck bringt, kann das Produkt der Unschärfen von Ort und Impuls nicht genauer erfaßt werden, als durch die universelle Konstante des Planckschen Wirkungsquantums angegeben wird⁶.

Wenn man sich vor Augen führt, was es physikalisch bedeutet, einen Gegenstand zu "sehen" bzw. zu registrieren, so erscheint dieser Sachverhalt gar nicht so mysteriös: Ein Gegenstand wird mit Licht bestrahlt und wirft dieses in charakteristischer Weise verändert zurück. Unsere Augen nehmen das so veränderte Licht auf und lassen daraus zusammen mit dem Gehirn ein Bild eines an einem bestimmten Ort befindlichen ruhenden oder bewegten Gegenstandes entstehen.

Bei den Mikroobjekten der Quantenwelt ist es im Prinzip nicht anders. Der Ort und der Bewegungszustand eines Teilchens, z.B. eines Elektrons, kann (mit entsprechenden Apparaten) nur dadurch festgestellt werden, daß man es mit Licht von passender Wellenlänge bestrahlt, und das durch den Gegenstand verändert zurückgeworfene Licht interpretiert. Im Unterschied zu einem klassischen Gegenstand, der von dem auftreffenden und reflektierten Licht so gut wie gar nichts "merkt", wird ein quantenmechanischer Gegenstand durch den Beschuß mit Teilchen von vergleichbarer "Größe" zwangsläufig beeinflusst: Zu dem Zeitpunkt, da man das zurückgeworfene Licht als Ausdruck einer bestimmten Bahn des Teilchens registriert, verfolgt dieses schon nicht mehr dieselbe Bahn, weil sein Impuls durch das auftreffende Licht geändert wurde.

Benutzt man Licht von geringerer Energie (niedrigerer Frequenz), so wird das Teilchen zwar weniger stark von seiner Bahn abgelenkt, aber das zurückgestrahlte Licht wird auch weniger scharf lokalisiert, wodurch die

⁶ So gesehen ist die Unschärferelation ein mathematischer Ausdruck für die Grenzen, innerhalb derer ein Teilchen lokalisierbar ist

Ortsbestimmung ungenauer wird. Mit anderen Worten: Je genauer man den Ort eines Teilchens kennt, desto ungenauer kennt man seinen Impuls und umgekehrt⁷.

So unzulänglich unsere in der makroskopischen Welt geprägten Anschauung im Bereich der Mikrophysik auch sein mag, eine durch Beobachtung eines Gegenstandes erfolgende Einflußnahme auf den Gegenstand kann auch hier zuweilen merkbare Ausmaße annehmen: Der Blick (eines Beobachters) kann eine Person zum Erröten bringen, so daß der anschließende Blick dieselbe Person in einem anderen Zustand vorfindet. Die klassische Subjekt- Objekt- Trennung kann aus der verallgemeinerten quantenmechanischen Perspektive als Grenzprinzip erkannt werden, das um so mehr gerechtfertigt erscheint, je kleiner der Einfluß der Beobachtung auf den Gegenstand ist⁸.

Da physikalische Erkenntnis nicht durch passives Beobachten der Natur zustande kommt, sondern das Ergebnis theoriegeleiteter, aktiver Eingriffe in die Natur darstellt, hat die quantenmechanische Perspektive unmittelbaren Einfluß auf unsere Vorstellungen von der Realität. Man muß sich beispielsweise fragen, ob man weiterhin - wie gewohnt - davon ausgehen kann, daß ein Gegenstand einen bestimmten Wert hatte, bevor er gemessen wurde. Das heißt aber, sich zu fragen, ob es überhaupt sinnvoll ist, etwas als real anzusehen, das niemals wahrgenommen (gemessen) werden kann. Für Heisenberg ist "das, was wir beobachten, nicht die Natur selbst..., sondern Natur, die unserer Art der Fragestellung ausgesetzt ist" (Heisenberg 1977: 40). Er schlägt daher vor, daß man die klassische Auffassung einer objektiven Realität als Ding an sich ersetzen sollte durch die Wahrscheinlichkeit oder Tendenz zu existieren.

Physik und Lebenswelt

Die obigen Ausführungen sollten deutlich machen, daß die physikalische Sehweise selbst wieder in sich nach verschiedenen Perspektiven strukturiert ist. Wenn wir dennoch von der physikalischen Sehweise sprechen, kann dies nur in Bezug auf einige allgemeine Merkmale erfolgen, die allen neuzeitlich physikalischen Paradigmata gemeinsam sind, und vor dem Hintergrund außerphysikalischer Sehweisen Kontur gewinnen. Der hier eingenommene Blickwinkel ist der von Lernenden, die - wenn man so sagen darf - mit der lebensweltlichen Sehweise, dem Common Sense ausgestattet in die "Welt der Physik" einzutreten und mit ihr vertraut zu werden versuchen.

Wie bereits oben angedeutet wurde, ist auch diese Sehweise alles andere als einheitlich. Je nach dem kulturellen, ethnischen und sozialen Umfeld differenziert sich die Lebenswelt in verschiedenen Perspektiven. Die Lehrenden müssen daher insbesondere bei kulturell inhomogenen Lerngruppen auch dann Probleme gewärtigen, wenn ihnen die prinzipielle Differenz zwischen Physik und Lebenswelt bewußt ist.

Dazu ein Beispiel aus einer Klasse mit einer erst kürzlich eingewanderte rußlanddeutschen Schülerin. Es ging im Unterricht um die Deutung des Phänomens, daß ein mit kühler Limonade gefülltes Glas von außen beschlägt. Ein „Nebel“ aus kleinsten Flüssigkeitsteilchen bedeckt das Glas von außen bis zur Füllhöhe mit Flüssigkeit. Die Schülerin vermutete, daß die Flüssigkeit durch die Gefäßwand hindurchgesickert sei, was beim Lehrer und bei den Mitschülerinnen und –schülern unisono Heiterkeit auslöste. Der Lehrer, der von dieser Begebenheit berichtete, war davon überzeugt, daß die Schülerin sich einen Spaß machen wollte, obwohl er andererseits aus dem Verhalten der Schülerin schließen mußte, daß sie „den Unsinn“ ernste meinte. Unsinn? Kann es nicht sein, daß die sicherlich aus ländlichen Verhältnissen kommende Schülerin und durch das Phänomen an ein übliches Verfahren zur Kühlung von Butter und Käse dachte? Unter einfachen nichtindustriellen Bedingungen können nämlich Lebensmittel dadurch kühl gehalten werden, daß sie in ein Tongefäß mit Wasser getan werden, durch dessen Wände das Wasser langsam hindurchsickert und auf der Oberfläche verdunstet. Die dazu nötige Energie wird dem Wasser und damit den Lebensmitteln entzogen, was zu einer Abkühlung führt. Leider ist der Lehrer dem vermeintlichen Unsinn nicht nachgegangen, weil der auf derartige in anderen lebensweltlichen Erfahrungen wurzelnde Vorstellungen nicht kommen konnte. Wenn meine Vermutung der passiven Kühlung stimmt, hätte eine klärende Diskussion sogar zu einer Bereicherung des Unterrichts führen und die betroffene Schülerin nicht zurücksetzen, sondern bestärken können.

Dieses Beispiel soll einerseits zeigen, daß die lebensweltlichen Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler vor allem durch kulturelle Differenzen, verschieden sein und bei fehlender Sensibilität seitens der Lehrenden zu ernsthaften Lernschwierigkeiten führen können.

⁷ Die Unschärfe ist demnach nicht bloß durch die begrenzte Genauigkeit der Meßgeräte bedingt, sondern auf grundsätzliche Weise mit dem Meßprozeß selbst verknüpft. Sie ist gewissermaßen Ausdruck der Unmöglichkeit, ein System anders "wahrzunehmen" bzw. zu messen, als mit ihm in Wechselwirkung zu treten.

⁸ : Auch hier erkennt man unschwer die kopernikanische Verallgemeinerung, die aber im konkreten Fall die Situation sogar verkomplizieren kann.

Dieser Problematik überlagert ist eine weitere, der wir im folgenden größere Aufmerksamkeit schenken wollen. Nicht nur die Differenzen in den Lebenswelten der Schülerinnen und Schüler erschweren das Verständnis für physikalische Zusammenhänge. Die Differenz zwischen physikalischer und lebensweltlicher Sehweise verdient eine besondere Betrachtung. Sie kommt dadurch zustande, daß im Rahmen der Physik die Welt so beschrieben wird, wie wir sie nicht erfahren (Weizsäcker 1966: S. 107). Oder mit den Worten Martin Wagenscheins: Die Physik ist eine "Wissenschaft, die zu Ergebnissen führt, die... aller ursprünglichen Welt-erfahrung widersprechen" (Wagenschein 1988: 292) Albert Einstein hat diese Differenz in einem ausdrucksstarken Bild zu fassen versucht, in dem er darauf hinweist, daß eine Beethovensymphonie physikalisch nichts anderes als eine Luftdruckkurve ist. M.a.W.: Die physikalische Erfahrung entsteht in der Regel geradezu im Kontrast zur Alltagserfahrung (Redeker 1982, Giel 1968), und die Differenz zwischen beiden Sehweisen kann grundsätzlich nicht eingeebnet werden. Daß diese These zuweilen vor allem von Physikern bestritten wird, kann auch als Bestätigung gesehen werden.

Nehmen wir als Beispiel den freien Fall. Die physikalische Aussage, daß alle Gegenstände gleich schnell fallen, ist aus der Sicht der neuzeitlichen Physik trivial. Daraus folgt jedoch nicht, daß es sich dabei auch für die Schülerinnen und Schüler um einen einfach nachzuvollziehenden Sachverhalt handelt. Physikalische Einfachheit wird nämlich nicht selten mit stillschweigenden Voraussetzungen erkauft, die aus lebensweltlicher Sicht nur schwer einzusehen sind. Ich stelle mir die Schülerinnen und Schüler vor, wie sie angesichts dieser Aussage vor ihrem geistigen Auge ein Blatt langsam vom Baum zum Boden torkeln, einen Dachziegel auf dem Pflaster aufprallen und Löwenzahnsamen vom Wind weggetragen sehen. Beim besten Willen können sie solche Vorstellungen nicht verhindern, auch wenn sie zehnmal darauf hingewiesen werden, die Aussage gelte streng genommen nur bei Vernachlässigung des Luftwiderstands.

Die Schwierigkeit liegt weniger in der intellektuellen Anforderung, den luftleeren Raum als einen abstrakten Raum mit bestimmten Eigenschaften zu denken. Sie müssen sich zuweilen mit sehr anspruchsvollen theoretischen Konstrukten auseinandersetzen. Man denke etwa an rein mathematische Konstruktionen, aber auch an literarische Fiktionen und künstlerische Visionen. Problematisch wird die Sache durch den Anspruch der Physik, daß damit Aussagen über die Wirklichkeit gemacht würden. Dadurch kommt implizit oder gar explizit die eigene Lebenswelt ins Spiel. Hier prallen Reales und Gedachtes, sicher Gewußtes und vage Vermutetes unversöhnlich aufeinander. Insbesondere muß aus der Sicht der Schülerinnen und Schüler befremden, daß die mit der physikalischen Beschreibung einhergehende Unterstellung, im luftleeren Raum, in dem kein Leben existieren kann, dem man sich allenfalls mit technischem Aufwand (Vakuumpumpe) oder im lebensfeindlichen Weltraum anzunähern vermag, gehe es gewissermaßen realer zu als in der luftgefüllten Welt, in der wir leben: "Der Sternenhimmel ist zum Lehrbuch für die Technik dessen geworden, was natürlicherweise auf der Erde nicht gefunden werden kann" (Blumenberg 1981: 784) Vielleicht ist der skeptische Blick der Lernenden, dem sich Physiklehrerinnen und -lehrer in solchen Situationen ausgesetzt sehen, nichts anderes als der Blick der thrakischen Magd auf den in höheren Sphären schwebenden und dabei strauchelnden Thales. Der etwas hilflose Hinweis der Lehrerin oder des Lehrers, im Grunde sei doch alles sehr naheliegend (sic!) und einfach ist allenfalls dazu angetan, das Wahrnehmungsproblem noch zu verschärfen. Den Lernenden bleibt dann als Ursache ihrer Verständnislosigkeit nur noch die eigene Unzulänglichkeit, was leicht der Beginn von Desinteresse und schließlich Ablehnung des Faches sein kann.

Wissenschaftliche Revolutionen als Wechsel von Sehweisen

Nicht erst unsere "dummen" Schülerinnen und Schüler haben Schwierigkeiten mit der Differenz zwischen verschiedenen Sehweisen. Wie weiter oben dargestellt, legt die Geschichte der Physik besonders in den Phasen ihrer Umbrüche ein beredtes Zeugnis von Verständigungsproblemen zwischen den Anhängern verschiedener Sehweisen ab. Ein berühmtes Beispiel ist die viel zitierte Auseinandersetzung zwischen Galilei und der Kirche. Diese Angelegenheit wird normalerweise so dargestellt, daß die Kirche, aus welchen Gründen auch immer, neue Erkenntnisse, insbesondere solche, die in Widerspruch zum kirchlichen Weltbild erschienen, zu unterdrücken versuchte. Das mag in der Tat ein Motiv gewesen sein. Wichtiger scheint mir, daß die in der aristotelischen Sehweise befangenen Kirchenvertreter Galileis Ansichten nicht unbedingt wider besseres Wissen ablehnten, sondern die Dinge gar nicht so sehen konnten, wie Galilei sie sah (Schlichting 1994). Auch die häufig in Lehrbüchern zu lesende, die Überlegenheit des heutigen Wissensstandes zum Ausdruck bringende Aussage: Früher wußte man noch nicht..., verkennet die Entwicklung der Wissenschaft als eine Folge von konzeptuellen Wechseln bzw. Änderungen der Sehweise (Kuhn 1973).

Galilei ließ bekanntlich die Anhänger der kopernikanischen Physik durch das Fernrohr blicken, das er auf den Jupiter gerichtet hatte. Zu "sehen" war der Riesenplanet mit einigen seiner bis dahin unbekannten Monde. Doch was sah jemand, der nie zuvor einen Blick durch ein solches beidseitig verglastes Rohr getan hatte? Günstigstenfalls konnte er einige helle Punkte erkennen, von denen einer etwas größer war als die anderen. Was aber hatten diese im Rohr auftauchenden Punkte mit dem am Himmel umlaufenden Planeten zu tun? Konnten diese Punkte für jemanden, der die Funktionsweise des Fernrohres nicht kannte, eine andere Qualität haben als vom Rohr produzierte Punkte oder optische Täuschungen? Jedenfalls mußten alle anderen Deutungen der weißen Flecken im Rohr naheliegender erscheinen, als ausgerechnet Himmelskörper darin zu se-

hen. Mehr noch: Kann man jemanden der vom Sichtbarkeitspostulat⁹ der Naturbeobachtung überzeugt ist, übelnehmen, wenn er die Behauptung, der Blick durch ein profanes Rohr mit verglasten Öffnungen offenbare dem menschlichen Blick entzogene Dinge, als äußerste Zumutung empfindet? Muß ein aufrichtiger Mensch, dem die Wahrhaftigkeit in der Naturforschung heilig ist, nicht geradezu den Blick durch das Fernrohr verweigern? Die Geschichte der Auseinandersetzungen Galileis mit der Kirche ist geeignet, auf eindrucksvolle Weise deutlich zu machen, daß Wahrnehmung "keine widerspiegelnde *Repräsentation*, sondern *aktive Inszenierung*" bedeutet (Varela 1992: 205): In gewisser Weise sieht man nur das, was man weiß. Und das gilt nicht zuletzt auch im Physikunterricht. In vielen Fällen befinden sich die Lernenden in derselben Situation wie die Kirchenvertreter zur Zeit Galileis. So sehr sie sich auch bemühen mögen zu sehen, was die Lehrerin oder der Lehrer sieht, es gelingt ihnen nicht:

"Entschuldige! Wieso siehst du das nicht? Bist du denn blind?"

Und er will und will es nicht sehen, was Sie sehen, und wo, wie Sie es sehen. Er aber sieht es, wie er es sieht, für ihn sind Sie blind" (Pirandello 1986:92).

Diese Passage von Luigi Pirandello könnte auch auf den Physikunterricht bezogen werden.

Dazu ein Beispiel aus der Unterrichtspraxis¹⁰, bei dem es darum ging, die Fließvorstellung des elektrischen Stromes zu entwickeln. Um zu klären, wieso Wirkungen an entfernten Stellen im Stromkreis instantan auftreten, sollte nahegelegt werden, daß, wie bei einem gefüllten Wasserschlauch, der Strom sich sozusagen auf Kommando in Bewegung setzt. Dazu sollte das gleichmäßige Erglühen eines Drahtes nach Einschalten des Stroms als Beleg dienen. Vor Durchführung des Versuchs wurden die Schülerinnen und Schüler gefragt, welchen Versuchsausgang sie erwarteten. Es wurden i.w. drei Meinungen vertreten:

- Eine Gruppe meinte, daß der Draht je nach der Stromrichtung vom linken oder rechten Ende ausgehend erglühen würde.

- Eine zweite Gruppe sagte voraus, daß der Draht in der Mitte beginnend nach den beiden Enden erglühen würde. Sie stellte sich vor, zwei Ströme würden von beiden Polen kommend in der Mitte aufeinanderprallen, und der sich infolge des Zusammenpralls nach den Enden ausbreitende Rückstau würde das Glühen hervorrufen.

- Eine dritte Gruppe erwartete das "richtige" Ergebnis des gleichmäßigen Erglühens.

Nach - aus der Sicht des Lehrers - erfolgreicher Durchführung des Experiments mußte dieser erstaunt zur Kenntnis nehmen, daß der Versuchsausgang die beiden "abtrünnigen" Gruppen offenbar nicht eines besseren belehrt hatte. Fast alle sahen das, was sie zu sehen erwarteten, auch wenn sie so genau hinsahen, wie es ihnen möglich erschien.

Die Tatsache, daß man auf dasselbe Phänomen blicken, aber je nach seinem jeweiligen Erwartungshorizont etwas anderes sehen kann, ist nicht so erstaunlich wie die Lehrenden zuweilen vermuten. Der oben beschriebene Blick durch das Fernrohr ist ein eindruckliches Beispiel dafür, daß dies nicht nur bei Schülerinnen und Schüler anzutreffen ist.

Physik macht selbst Altbekanntes zu einer neuen Realität

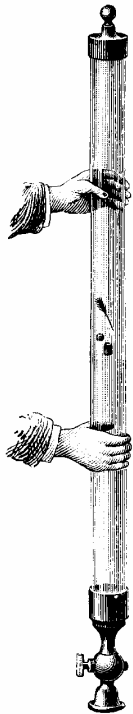
Neben der Schwierigkeit, eine Welt der Idealgestalten als Bezugssystem für die Vorgänge in unserer realen Welt, himmlische Vorgänge als Maß für die irdischen zu akzeptieren, bereitet den Lernenden eine weitere Besonderheit der physikalischen Sehweise Probleme. Statt vorurteilsloser Beobachtung erleben sie aktives Eingreifen. Heißt vorurteilsloses, objektives Herangehen an die Natur nicht, daß jede Manipulation, jeder konstruktive Eingriff ausgeschlossen werden muß? Eine äußere Einflußnahme wird als Mogelei empfunden, insbesondere, wenn der damit verbundene technische Aufwand dominiert. Dann erleben sie, daß die Wirklichkeit der Physik nach Maßgabe einer wie auch immer vorgefaßten Meinung (Theorie) konstruiert wird (Experiment).

Dieses Problem soll an einem Beispiel illustriert werden: In einer sehr gut vorbereiteten Lehrprobe hatte der Unterrichtende eine Vakuumapparatur besorgt, um zu demonstrieren, daß im luftleeren Raum einer evakuierten Glasröhre Körper unterschiedlicher Masse gleich schnell fallen. Die Schülerinnen und Schüler konnten zunächst den aufwendigen Vorgang miterleben, durch den die Röhre unter glucksenden und zischenden Geräuschen leergepumpt wurde, um dann an dem auch - oder besser: vor allem - für den eingeweihten Betrachter faszinierenden Schauspiel teilzuhaben, bei dem die Flaumfeder und die Papierschnitzel genauso schnell die Röhre hinunterfallen wie das Stück Holz und das Stück Blei (Bild 7).

⁹ Dem Sichtbarkeitspostulat entsprechend wurde bis zur Zeit der zunehmenden Verbreitung des Fernrohres und des Mikroskops nur den mit den Augen wahrgenommenen Gegenständen eine physische Realität beigemessen. Da das Atom selbst mit optischen Hilfsmitteln nicht sichtbar gemacht werden kann, zweifelte Ernst Mach zu Beginn unseres Jahrhunderts dessen Existenz an. Seine Frage: "Ham's ans gehn?" ließ erkennen, daß er ein "nichtoptisches" Sichtbarkeitspostulat vertrat.

¹⁰ Dieses und die folgenden Unterrichtsbeispiele stammen aus Unterrichtsprotokollen, die ich im Rahmen der unterrichtspraktischen Ausbildung von Studenten gesammelt habe oder aus selbst erteiltem Unterricht an allgemeinbildenden Schulen.

Merkwürdigerweise erschienen einige Schülerinnen und Schüler weniger beeindruckt, als man aufgrund des nicht alltäglichen Vorgangs hätte erwarten dürfen. Durch Nachfragen des Lehrers brachte eine Schülerin das unterschwellige Unbehagen auf den Punkt. Warum - so sinngemäß ihre Äußerung - sollte sie sich darüber wundern. Daß man mit Hilfe von Technik alles erreichen könne, sei doch klar. Man hätte ebenso gut die Gegenstände mit der Hand herunterdrücken können (sie machte eine entsprechende Handbewegung), dann wären sie auch alle gemeinsam unten angekommen.



Aus der lebensweltlichen Perspektive der Schülerinnen und Schüler besagt das Experiment mit der evakuierten Röhre nur, daß man verschiedene Körper zwingen bzw. dazu bringen kann, gleich schnell zu fallen. Das empfinden sie nicht als besonders bemerkenswert. Das Experiment erscheint ihnen zwar im Sinne der Auflockerung des Unterrichts interessant. Es verfehlt aber die intendierte Wirkung zu beweisen, daß alle Körper "in Wirklichkeit" gleich schnell fallen. Eine "luftleere" Wirklichkeit ist aber nicht die Wirklichkeit, sondern etwas Hergestelltes, Konstruiertes (siehe oben).

Den Schülerinnen und Schülern muß klar werden: Physikalische Ordnungen bzw. Gesetze werden weder in der Welt vorgefunden noch von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern spontan gesetzt. Sie sind vielmehr das Ergebnis der Herstellung von Ordnung: Die Forschenden legen sich aufgrund theoretischer Ideen, allgemein akzeptierter Normen und einer ausgefeilten experimentellen Praxis die Sachverhalte so zu recht, daß sie am verständlichsten, einfachsten, überschaubarsten und plausibelsten erscheinen. Dabei fließen stillschweigende Voraussetzungen (implizites Wissen) (Polanyi 1985), Vorurteile, ästhetische und andere Anschauungen ein und reflektieren implizit das herrschende physikalische Paradigma, auch wenn es durch eben diese Ordnungsbemühungen überwunden werden kann (Kuhn 1973).

Dadurch daß die physikalischen Ordnungen wenigstens im Prinzip materiell realisierbar sein müssen, erscheinen - anders als in der den Lernenden vertrauten lebensweltlichen Praxis - physikalisches Erkennen und Technik untrennbar ineinander verwoben. Die Lernenden müssen erfahren, daß im Rahmen der Physik Erkennen zur (experimentellen) Kunst wird (Feyerabend 1994).

Diese Kunst kennen alle Physiklehrerinnen und -lehrer, die vielfach unter erheblichem zeitlichen Aufwand und großem Geschick am Nachmittag des Vortages ein Experiment aufbauen und das dann vielleicht - zur Schadenfreude der Schülerinnen und Schüler - dennoch „mißlingt“. Was heißt hier mißlingen? Wenn man nach der weit verbreiteten Auffassung geht, wonach ein Experiment "nur eine Frage an die Natur darstellt, (und) die Natur stets so zeigt, wie sie ist" (Bergmann/ Schäfer 1990: viii), kann es insofern nicht mißlingen, als der Ausgang für oder gegen die Theorie spricht, sie bestätigt oder widerlegt: "Fällt das Experiment anders aus, als wir uns vorher gedacht haben, dann müssen wir unsere Vorstellungen ändern und dem Ergebnis des Experimentes anpassen...oder durch eine ganz andere ersetzen" (Kuhn 1975). Wir wissen, daß die Praxis anders ist. Wenn ein Experiment die Theorie bzw. die Vorstellungen, die im Unterricht über einen Sachverhalt entwickelt worden sind, durch ein geeignetes Experiment nicht bestätigt werden, dann erleben die Schülerinnen und Schüler den Lehrer oder die Lehrerin nicht nach einer neuen Theorie, sondern nach Ausreden suchen. "Die hohe Luftfeuchtigkeit ist schuld", war in meiner eigenen Schulzeit das geflügelte Wort angesichts eines mißlungenen physikalischen Experiments. Genau das macht den Vorgang in den Augen der Schülerinnen und Schüler so unglaublich und konterkariert die intendierte Zielsetzung. Wenn man schon die Metapher der Frage an die Natur bemüht, so müßte deutlich gemacht werden, daß das Experiment "von einer mathematischen Theorie geleitet ist, die eine Frage stellt und fähig ist, die Antwort zu deuten" (Weizsäcker 1966: 107). Im übrigen gilt Goethes Wort: "Eine falsche Lehre läßt sich nicht widerlegen, denn sie ruht ja auf der Überzeugung, daß das Falsche wahr sei. Aber das Gegenteil kann, darf und muß man wiederholt aussprechen".

Die Lernenden sollten angesichts des Aufbaus eines Experiments erkennen, wie genau man bereits wissen muß, was man durch das Experiment zeigen will, und welcher Aufwand mit der Durchführung verbunden ist. Statt die Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler auf die Auswertung der Beobachtungen zu beschränken, was meist darauf hinausläuft, eine Proportionalität oder quadratische Abhängigkeit zu ermitteln, sollte man sie häufiger bei der Planung und Durchführung des Experiments beteiligen. Ganz abgesehen davon, daß sie dann für ein Mißlingen mitverantwortlich sind, erfahren sie so aus eigener Anschauung, inwiefern physikalische Erkenntnisse im wahrsten Sinne des Wortes erarbeitet werden müssen. Ihnen wird außerdem klar, daß nicht nur die Technik von den physikalischen Erkenntnissen abhängt, sondern auch umgekehrt die physikalische Erkenntnis von den technischen Möglichkeiten bestimmt ist und ihren Gegenstandsbereich und ihre Mittel von der Technik zugewiesen bekommt. Wichtig ist, daß die Eingriffe des Menschen nicht nur nicht im Sinne einer idealistischen Weltauffassung verschleiert oder als störend angesehen, sondern als konstitutiv für das physikalische Erkennen erfahren werden. Dies kann als Ausgangspunkt für die Erfahrung der Ler-

nenden dienen, daß sich Physik nicht auf etwas von einer gegebenen unveränderlichen Seinsordnung Vorgegebenes bezieht, sondern ein "menschliches Geschäft" darstellt mit allen seinen positiven und negativen Folgen, wie sie sich in der fortschreitenden Technisierung der Welt offenbaren.

Diese Ansicht läßt das naive Verständnis der Wirklichkeit natürlich nicht unberührt. Ist real, was man sieht oder was sich konstruieren läßt, oder beides? Ohne diesen Punkt hier weiter zu vertiefen, dürfte nach den obigen Ausführungen eines klar geworden sein: Die Wirklichkeit, wie sie sich aus physikalischer Sicht darstellt, ist nicht die Wirklichkeit oder die Natur an und für sich, "sondern das Resultat einer Interaktion oder eines Austausches zwischen zwei recht ungleichen Partnern, winzigen Männern und Frauen auf der einen Seite und einem majestätischen Gebilde auf der anderen" (Feyerabend 1994).

Verstehen setzt voraus, zwischen Sehweisen wechseln zu können.

*Die größere Wahrheit liegt im Plural
Wieseltier*

Solange man die Dinge rein lebensweltlich betrachtet, erscheint alles Gesehene immer schon benannt und in einem Sinne begriffen. Deshalb kann der Common Sense seinen ersten Empirismus nicht verlassen und sich nicht weiterentwickeln. Er „hat immer mehr Antworten als Fragen...(Er) hat eine Antwort auf alles“ (Bachelard 1993: 57f). Keine dieser lebensweltlichen Anschauungen kann eine Technik anleiten. Außer in manchen Klassenräumen unserer Schulen ist es daher unmöglich, von rein lebensweltlichen Betrachtungen zu physikalischen Konzepten aufzusteigen, so als trügen die Dinge ihre physikalische Struktur gewissermaßen ablesbar an sich und würden sich einem jeden von selbst offenbaren, wenn er nur genau genug hinsähe. Jemand, der gut fangen kann, nimmt deshalb nicht schon eine physikalische Position ein, derart, daß er - wenn auch unbewußt - die Bewegungsgleichung des fliegenden Balls integriert. Auch die häufig zu lesende Darstellung, die Natur würde sich nach den Gesetzen der Physik verhalten, stellt die Dinge auf den Kopf. Erst unser physikalischer Blick macht aus natürlichen Phänomenen physikalische Vorgänge und projiziert dies vom erfindenden Menschen auf die Natur und macht den Menschen zum bloßen Entdecker von in der Natur verdeckt daliegenden Naturgesetzen.

Physik ist daher nicht bloß eine besonders elaborierte Form des Common Sense. Keiner, der die Welt nur genau genug beobachtet, gelangt dadurch zu einer physikalischen Sehweise. Das gilt auch für die Unterrichtspraxis. Deshalb sollte die Selbsttätigkeit der Schülerinnen und Schüler nicht dadurch in Anspruch genommen werden, auf der Grundlage ihres lebensweltlichen Vorverständnisses physikalische Zusammenhänge und Gesetze aufzufinden. Ein derartiger Versuch der Einebnung der Differenz zwischen Physik und Common Sense gelingt nur scheinbar, weil die Lehrenden aus ihrer physikalischen Sicht der Dinge die Unterrichtsaktivitäten bestimmen. Es besteht die Gefahr, daß bei den Lernenden, die nicht wissen, "wohin die Reise geht", das Gefühl eines umfassenden Unverständnisses und schließlich die Ablehnung der Physik hervorgerufen wird.

Um ihnen die physikalische Sehweise als solche nahezubringen und die Bereitschaft hervorzurufen, sich darauf einzulassen, sollte im Physikunterricht nicht suggeriert oder sogar ausdrücklich behauptet werden, die Dinge seien so (physikalisch) und nicht anders zu sehen, sondern sie sollten ermuntert werden, sich zunächst vorläufig auf den physikalischen Blick einzulassen: "Sieh es so an! - und das kann nun verschiedenerlei Vorzeichen und Folgen haben" (Wittgenstein 1984: 159).

Um den Dingen physikalisch, d.h. aus einer den Lernenden unvertrauten Perspektive nachzugehen, müssen sie zumindest für die Zeitdauer der Erarbeitung eines physikalischen Ergebnisses diese Sehweise fraglos anerkennen und den unhinterfragten und bis dahin unhinterfragbaren lebensweltlichen Rahmen, den Common Sense suspendieren. Das kann nur allmählich gelingen, es muß eingeübt werden (Schlichting 1993b) und kann auch nicht unabhängig von den Inhalten und Themen gesehen werden.

Den Lernenden muß auf diese Weise klarwerden, daß die Physik geradezu im Kontrast zum Common Sense entsteht, und die Differenz zwischen beiden Sehweisen grundsätzlich nicht eingezogen werden kann. Wesentlich ist aber auch die Erkenntnis, daß die lebensweltliche Perspektive beim verständnisvollen Erlernen von Physik nicht überflüssig wird. Im Gegenteil, erst im Blick auf den Common Sense kontrolliert sich das physikalische Erkennen, erst in der Alltagssprache kann über Physik als einer besonderen Weise der Erkenntnisgewinnung gesprochen werden (Wagenschein 1973: 75ff, Heisenberg 1978: 194f).

Die naiverweise als eng vorausgesetzten Beziehungen zwischen Common Sense und Physik, die Kontinuität beim Übergang vom Common Sense zur physikalischen Praxis wird durch eine Art Kontinuität der Bilder und Wörter vorgetäuscht, die hier und dort zur Anwendung kommen. Die lebensweltlichen Vorstellungen von - sagen wir - Kraft, Geschwindigkeit, Masse, Wärme... erweisen sich merkwürdig resistent gegen Bemühungen des Unterrichts, im Sinne der Physik modifiziert zu werden. Die Wahrnehmung von Sonnentälern (Bild 8) unter Laubbäumen (Schlichting 1984), von geschleuderten oder geworfenen Gegenständen, des eigenen Schwitzens angesichts körperlicher Anstrengungen bleiben zunächst selbstverständliche Äußerungen der vertrauten Lebenswelt. Das heißt: Die Sonnentäler werden nicht ohne weiteres als Lochkameraabilder der Sonne, der geschleuderte Gegenstand nicht als träge oder beschleunigt, das Schwitzen nicht als Ausdruck von Energieumwandlungen angesehen. Ja, oft reagieren die Lernenden mit Interesselosigkeit, wenn sie sich mit bekannten und selbstverständlichen Sachverhalten abgeben sollen. So äußern sich in der Praxis stehende Lehrerinnen und Lehrer immer wieder skeptisch über den Erfolg, im Unterricht Alltagsgegenstände zu behandeln.



Bild 8: Wie Bierdeckel verstreut beobachtet man unter dem Blätterdach von Bäumen Lochkameraaufnahmen der Sonne, Sonnentäler.

Erst wenn sich die Schülerinnen und Schüler darauf einlassen, die vertrauten Konzepte und Bilder bewußt in die Perspektive der physikalischen Theorien (physikalische Sehweise) zu versetzen, kann als selbstverständlich angesehenes (oder bloß auswendig gelerntes) Wissen plötzlich umschlagen und einen neuen bislang nicht erfahrenen Aspekt hervorbringen. Es kommt zur Eröffnung eines neuen Horizontes. Darin ist aber wiederum eine Voraussetzung dafür zu sehen, daß Physik als interessant und spannend empfunden werden kann: "Wenn wir nicht einfach wiedererkennen, werden wir zu ausdrücklicher und selbstreflektierter Wahrnehmung veranlaßt. Schlagartig verwandelt sich Altbekanntes zum Unvertrauten, wird Realität in gesteigerter Weise sichtbar. Staunend öffnen wir die Augen, sind an jenen Auslösepunkt der Einsicht gelangt" (Böhm 1992) an dem der Wunsch "zu verstehen" immer wieder beginnt.

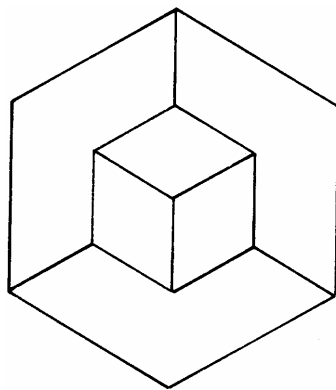


Bild 9: Es ist unmöglich beide räumlichen Sehweisen dieses Ge-
an, daß der hochgeworfene Stein nicht wieder herunterfallen könnte, und plötzlich denkt man, daß er oben bleiben könnte" (Valéry 1988: 50).

Eine typische lebensweltliche Selbstverständlichkeit ist die lebensweltlich geklärte Anordnung der Welt in "Oben" und "Unten", sowie die damit verbundene Erfahrung des Fallens, Aufsteigens, Werfens usw. Sie wird physikalisch in Form des Konzeptes der Schwerkraft aufgebrochen und damit hinterfragbar. Gerade an diesem Beispiel kann man immer wieder beobachten, daß die Lernenden nicht selten in die Situation geraten, nicht mehr zu wissen, was sie sehen. Der Mond wird zum "geworfenen" Steinbrocken, der auf die Erde fällt, sie aber nur deshalb nicht erreicht, weil seine "Wurfbahn" aufgrund der gegebenen Bedingungen konzentrisch zur Erdkugel ist. Auf diese Weise wird "das Problem der Schöpfung etwas merkwürdig Intermittierendes. Plötzlich wird das 'Natürliche', das Gewohnheitsmäßige als fremd wahrgenommen. Man dachte bisher nicht daran,

Hier zeigt sich, daß physikalisches Verstehen keine konkret definierbare und arrangierbare Angelegenheit ist, sondern ein vielschichtiges, schwer faßbares Phänomen, das bei der Wahrnehmung von Wirklichkeit eine wesentliche Rolle spielt. Es ist darauf angewiesen, einen in Frage stehenden physikalischen Sachverhalt immer wieder aus verschiedenen Perspektiven in den Blick zu nehmen. Ohne einen Wechsel der Sehweise können die "auf der Straße liegenden" (Bild 8) Selbstverständlichkeiten der Lebenswelt nicht als Problem gesehen werden, weil sie zum blinden Fleck der lebensweltlichen Optik gehören und mit dem Beobachtungspunkt zusammenfallen.

Für das Verstehen von Physik sind also stets mehrere Sehweisen und das heißt vor allem der Wechsel zwischen ihnen von Bedeutung. Denn sie können nicht alle auf einmal eingenommen werden (Bild 9): "Es gibt kein Auge, das gleichzeitig das Gesicht und das Profil eines Menschen zu sehen vermag, in einem" (Valéry

1988: 409). Ein wesentliches Ziel des Unterrichts besteht daher darin, die Sehweisenabhängigkeit des Erkennens bewußt zu machen. Auch in dieser Hinsicht muß im Physikunterricht viel mehr über Physik gesprochen werden.

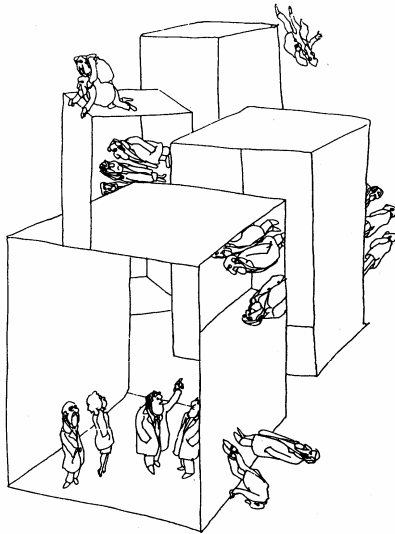


Bild 10: Es gibt nicht nur eine Sehweise.

Sollte man nicht angesichts dieses didaktischen Dilemmas die Flucht nach vorn ergreifen und demonstrieren, daß es in der Physik gar nicht um die Beschreibung der Welt an sich geht, sondern der Welt, wie sie sich im Lichte spezieller Methoden und Fragen darstellt. Sollte man von den Schülerinnen und Schülern nicht eher die Bereitschaft dafür erwarten können, die für sie zunächst unverständlich erscheinenden Aussagen der Physik zu akzeptieren, wenn sie erkennen, daß dies nur Ausdruck der besonderen Perspektive bzw. Sehweise ist, aus der die Welt betrachtet wird? Jedenfalls gilt nach den heute akzeptierten wissenschaftlichen Überzeugungen, daß die Frage, inwiefern Beobachtungen und Beschreibungen zu einem sinnvollen System gefügt werden können, weitgehend durch die Perspektive der Betrachter bestimmt ist.

Bei allen Differenzen zwischen den Sehweisen lebensweltlich und physikalisch handelnder Menschen sollte nicht übersehen werden, daß es sich um verschiedene Aspekte bzw. Ausprägungen desselben kulturellen Umfeldes handelt, das aber in seiner

Genese seinerseits nicht einheitlich ist, sondern sich verschiedenen kulturellen Einflüssen verdankt. Auf unser konkretes Thema bezogen heißt das, daß das lebensweltliche Denken ebenso wie das physikalische Ergebnis eines multikulturellen Zivilisationsprozesses sind. Die westliche Kultur ist so gesehen keine „Monokultur“. Vielmehr gehören kulturelle Differenzen, das Denken in Perspektiven, in Alternativen zu ihren wesentlichen Merkmalen. Eine Sensibilisierung der Schülerinnen und Schüler für diese Art von Multikulturalität könnte helfen, dazu beizutragen, daß die kulturelle, ethnische usw. Pluralisierung der modernen Industriegesellschaft nicht zum Problem wird, sondern als eine weitere Herausforderung des Denkens im Plural angesehen werden kann.

Literatur

- Adorno, Th. W.: Ohne Leitbild. Parva Aesthetica. Suhrkamp 1967
Aristoteles: Politik A 11; 1259 a 9-18 (deutsch v. B. Snell)
Bachelard, G.: Epistemologie. Frankfurt: Fischer 1993
Bergmann, L., Schäfer, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Berlin: de Gruyter 1990
Blumenberg, H.: Die Genesis der kopernikanischen Welt. Frankfurt: Suhrkamp 1981
Böhm, G.: Sehen. Hermeneutische Reflexionen. Intern. Zeitschrift für Philosophie 1 (1992), S. 54
Cassirer, Ernst: Philosophie der symbolischen Formen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1977
Cross, Alan/Pearce, Gillian: Core Subject: Science. In: Pumfrey, P.D./Verma, G.K. (Ed.): Cultural Diversity and the Curriculum. Volume 3. The Foundation Subjects and Religious Education in Primary Schools. London: The Falmer Press 1993
Deregowsky, J.: Pictorial Perception and Culture. In: Image, Object, and Illusion. San Francisco: Freeman 1974
Ekeland, I.: Das Vorhersehbare und das Unvorhersehbare. Berlin: Ullstein 1989
Feyerabend, P.: Natur als Werk der Kunst. Fiktiver Vortrag über die wachsende Bedeutung der Ästhetik. Lettre International 40 (1994), S. 25
Giel, K.: Operationelles Denken und sprachliches Verstehen. Z.f.Päd. 7. Beiheft 1968: 111- 124
Gregory, R.L./ Wallace, J.G.: Recovery from Early Blindness: A Case Study. In: Tibbets, P. (Hrsg.): Perception. New York: Quadrangle/ New York Times Book 1969
Hampe: Neue Hefte für Philosophie 32/33, 45ff (1992)
Heisenberg, W.: Physik und Philosophie. Berlin: Ullstein 1977
Kuhn, Thomas S.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt: Suhrkamp 1973

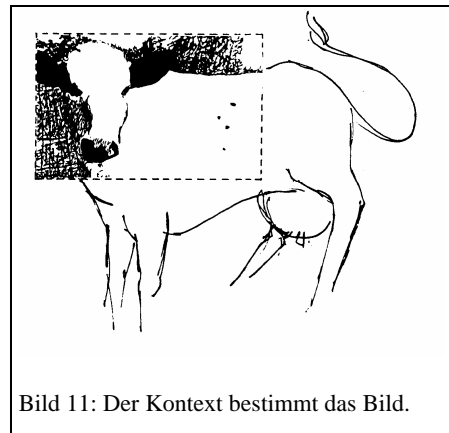


Bild 11: Der Kontext bestimmt das Bild.

- Kuhn, Wilfried: Physik, Bd.I. Braunschweig: Westermann 1975
- Leibniz, G.W.: Principes de la Nature et de la Grace, fondées en raison. In: Gerhardt, C.J. (Hrsg.): Die philosophischen Schriften von Gottfried Wilhelm Leibniz. Hildesheim 1961
- Morin, E.: Kultur - Erkenntnis. In: Watzlawick, P.; Krieg, P. (Hrsg.): Das Auge des Betrachters. München: Piper 1991
- Panofsky, E.: Die Perspektive als symbolische Form. In: Hessling, B.: Die Perspektive als 'symbolische Form'. Berlin 1964
- Pirandello, Luigi: Einer, keiner, hunderttausend. Mindelheim: Sachon 1986
- Polanyi, M.: Implizites Wissen. Frankfurt: Suhrkamp 1985
- Redeker, B.: Zur Sache des Lernens. Am Beispiel des Physiklernens. Braunschweig: Westermann 1982
- Reid, David: Science In: King, Anna S./Reiss, Michael J. (Ed.): In: Pumfrey, P.D./Verma, G.K. (Ed.): Cultural Diversity and the Curriculum. Volume 1. The Foundation Subjects and Religious Education in Secondary Schools. London: The Falmer Press 1993
- Reiss, Michael J.: Science. In: King, Anna S./Reiss, Michael J. (Ed.): The Multicultural Dimension of the National Curriculum. London: The Falmer Press 1993
- Schlichting, H. J.: Naturwissenschaft zwischen Zufall und Notwendigkeit. Praxis der Naturwissenschaften Physik 42/1 (1993a) S. 35
- Schlichting, H. J.: Üben als Einüben. Praxis der Naturwissenschaften- Physik. Praxis der Naturwissenschaften 42/1 (1993b) S. 11
- Schlichting, H. J.: Galilei und der physikalische Blick. Physik in der Schule 32/4 (1994a) S. 154
- Schlichting, H. J.: Sonnentaler- Abbilder der Sonne. Praxis der Naturwissenschaften- Physik 43/4, (1994b) S. 19
- Schlichting, H.J.: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts. Physik in der Schule 34/9,283-288 und 34/10 (1996) S. 339- 342.
- Snow, Charles, Percy: Die zwei Kulturen. Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz. Stuttgart 1967.
- Valéry, P.: Cahiers/Hefte. Frankfurt: Fischer 1988
- Wagenschein: Naturphänomene sehen und verstehen. Stuttgart: Klett 1988
- Wagenschein, M.: Naturwissenschaftliche Bildung und Sprachverlust. In: Sprache- Brücke und Hindernis. München: Piper 1973
- Weinberg, Stephen, z.n. Grünkorn; Gertrud: Auf zum Ziegenkampf. Forum Humanwissenschaften in Frankfurter Rundschau, 07.01.97, Nr. 5: 10
- Weizsäcker, C.F.v.: Zur Tragweite der Wissenschaft. Stuttgart: Hirzel 1966
- Wittgenstein, L.: Bemerkungen über Farben. Über Gewißheit. Zettel. Vermischte Bemerkungen. Frankfurt: Suhrkamp 1973
- Wittgenstein, L.: Bemerkungen über die Philosophie der Psychologie. Frankfurt: Suhrkamp 1984