

Die Kunst der Untersuchung

Essays zu einem erscheinungsorientierten
Physikunterricht

Habilitationsschrift zur Erlangung des akademischen
Grades Doctor rerum naturalium habilitatus (Dr. rer. nat.
habil.) in der Wissenschaftsdisziplin Physikdidaktik

Eingereicht durch

Florian Theilmann

Geboren am 29.5.1967 in Nürnberg

Potsdam, Januar 2011

Online veröffentlicht auf dem
Publikationsserver der Universität Potsdam:
URL <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2011/5614/>
URN <urn:nbn:de:kobv:517-opus-56145>
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus-56145>

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit versammelt zwei einleitende Kapitel und zehn Essays, die sich als kritisch-konstruktive Beiträge zu einem “erlebenden Verstehen” (Buck) von Physik lesen lassen. Die traditionelle Anlage von Schulphysik zielt auf eine systematische Darstellung naturwissenschaftlichen Wissens, das dann an ausgewählten Beispielen angewendet wird: Schulexperimente beweisen die Aussagen der Systematik (oder machen sie wenigstens plausibel), ausgewählte Phänomene werden erklärt. In einem solchen Rahmen besteht jedoch leicht die Gefahr, den Bezug zur Lebenswirklichkeit oder den Interessen der Schüler zu verlieren. Diese Problematik ist seit mindestens 90 Jahren bekannt, didaktische Antworten – untersuchendes Lernen, Kontextualisierung, Schülerexperimente etc. – adressieren allerdings eher Symptome als Ursachen. Naturwissenschaft wird dadurch spannend, dass sie ein spezifisch investigatives Weltverhältnis stiftet: man müsste gleichsam nicht Wissen, sondern “Fragen lernen” (und natürlich auch, wie Antworten gefunden werden...). Doch wie kann dergleichen auf dem Niveau von Schulphysik aussehen, was für einen theoretischen Rahmen kann es hier geben?

In den gesammelten Arbeiten wird einigen dieser Spuren nachgegangen: Der Ab-sage an das zu modellhafte Denken in der phänomenologischen Optik, der Abgrenzung formal-mathematischen Denkens gegen wirklichkeitsnähere Formen naturwissenschaftlicher Denkbewegungen und Evidenz, dem Potential alternativer Interpretationen von “Physikunterricht”, der Frage nach dem “Verstehen” u. a. Dabei werden nicht nur Bezüge zum modernen bildungstheoretischen Paradigma der *Kompetenz* sichtbar, sondern es wird auch versucht, eine ganze Reihe konkrete (schul-) physikalische Beispiele dafür zu geben, was passiert, wenn nicht schon gewusste Antworten Thema werden, sondern “Expeditionen”, die sich der physischen Welt widmen: Die Schlüsselbegriffe des Fachs, die Methoden der Datenerhebung und Interpretation, die Such- und Denkbewegungen kommen dabei auf eine Weise zur Sprache, die sich nicht auf die Fachsystematik abstützen möchte, sondern diese motivieren, konturieren und verständlich machen will.

Abstract

This book is a collection of two introductory chapters and ten essays that address questions concerning “experiential learning” in physics. Traditionally, physics education has been trying to convey a systematic picture of salient scientific knowledge, which would then be applied to selected experiments and phenomena. However, within such a framework, students’ real life experiences and interests can hardly be related to. This problem is well known, but typical solutions within science education address merely the methods and conditions of learning, thereby treating symptoms

and missing the underlying problem. For our discussion we have chosen a different point of departure: The fascination of science arises from its investigative nature, which allows us to relate to our world in novel ways. Accordingly, we should teach how to inquire nature, rather than giving canonical answers. What would be the practical consequences of such an approach, and what would the theoretical framework look like?

These collected essays investigate a number of approaches toward this issue: phenomenological optics and its rejection of kinematic pictures, the distinction between mathematical reasoning and scientific evidence, the potential of non-conventional interpretations of science teaching, the meaning of “understanding” etc. This discussion merges into the current discourse about competence, while illustrating a kind of physics teaching that encourages “expeditions” into the realm of physics. Here, the key concepts, methods of investigation, and ways of reasoning are not simply based on the established edifice of physics, but rather serve to motivate, clarify, and elucidate its structures and practices.

Inhaltsverzeichnis

1. Ein Rundgang im didaktischen Umfeld	9
Erkenntnistheoretischer Dissens: Modellfreie Optik	11
Goethes naturwissenschaftliche Methode und die Frage nach den synthetischen Urteilen	11
Die Goetheanistische Tradition	12
Weiterentwicklungen: Anschauliche Zugänge zur Optik, Lichtwege und erscheinungsorientierte Physik	14
Kompetenzorientierung und die deutschen Bildungsstandards	17
Kompetenzen in der Schulrealität: PISA 2000	18
Weichenstellungen: Die Klieme-Expertise und die deutschen Bildungs- standards	22
Kompetenzstrukturmodellierung und die aktuelle empirische Lehr- Lern-Forschung	27
“Verstehen von Physik” als Thema: Wege und Zugänge	30
Historisch, genetisch und exemplarisch ausgerichtete Zugänge zur Physik	31
Wovon handelt Naturwissenschaft? Und wozu wird sie gelernt? . . .	35
Die Modellmethode	39
Schülervorstellungen und Konstruktivismus	41
Phänomenographie und <i>Awareness</i>	44
Das Wissen des Lehrers: Lee Shulmans Wissentypologisierungen. . .	46
2. Schulphysik als Expedition? Eine Lesehilfe	49
Eine Ordnung des didaktischen Diskurses	51
Die Chimäre Schulphysik und das grundlegende Paradox des Unterrichtens	53
Zwei Häretiker: Goethe und Wagenschein auf der Suche nach anderen Formen von Evidenz	54
Zauberwort Exploration	56
Kurzbeschreibungen der Arbeiten	58
Bildungstheoretische Arbeiten	58
Physikalische Arbeiten	61

1. Essays zum Verstehen von Physik	63
3. Experimentieren zwischen Entertainment und affirmativer Praxis	65
Physik (nicht) verstehen	65
Stereotypen und Begriffe?	66
Mathematik statt Erfahrungswissenschaft	67
Naive Physik?	69
Neue alte Wege	69
4. Der Gedanke im Kontext – Zur Charakteristik einer erscheinungsorientierten Physik	71
“Modellfrei”: Frei von was?	72
Spiegelgesetz und Spiegelraum	73
Explorative Gedankenbewegungen	78
Erkenntnissicherheit und Erkenntnisziele	79
5. Integrierendes Verstehen – Über die mögliche, explizite Rolle von Intuition für das Physik-Verstehen	83
Zwei Arten der gedanklichen Untersuchung	83
Zweierlei Blick durchs Prisma	86
Synopsis: Dispersion	93
Szenenwechsel: Naturerkenntnis als psychologisches Problem	95
Folgen und Folgerungen	97
Das Miteinander von analytischer und integrierender Gedankenführung im Spiegel von <i>Nature of Science</i> , PCK (Shulman) und curricularen Setzungen	99
6. Physikalisches Verstehen als fachbezogene Kompetenz	101
Hybride Erklärungsstrategien von Schülern	101
Erklären: Zurückführen auf Modelle	103
Verstehen vs. Erklären	104
Verstehen als eigenständige Kompetenz	106
Ein eingeschobenes Beispiel: Halbschatten	108
Integrierendes Denken im Angesicht der Erscheinung	110
Exploratives Interesse	111
Wie wird Verstehen empirisch?	113

7. Die Kunst der naturwissenschaftlichen Untersuchung – eine konstruktive Kritik des Verstehensbegriffs bei Wagenschein	115
Antike Wissens- bzw. Erkenntnistypologie und die Unterscheidung zwischen Denk- und Erfahrungswissen	115
Der erste Exkurs: Menons Paradoxon	116
Der zweite Exkurs: Grundverschiedene Arten von Rätsel	117
Aristotelische Ethik und die dianoetischen Tugenden	118
Wissenstypologie – Denk- vs. Erfahrungswissen	121
Physik als Erfahrungswissenschaft vs. Physik als Lehrgebäude	122
Im Physikpraktikum: Erfahrungen an der schiefen Ebene	123
Denk- und Erfahrungswissen in der Physik	125
Individuelle und authentische Lernwege zur Erfahrungswissenschaft Physik	127
Ein individueller lernpsychologischer Rahmen: Erfahrungsumkreise und referentielle Aspekte	128
Was heißt “Verstehen” im Kontext von Denk- und Erfahrungswissen?	129
“Verstehendes Wissen”: Ein Kompetenzstrukturmodell für Erfahrungswissen?	130
Primat der Methodik vs. “Kunst der Untersuchung”	132
Ausblick auf eine erfahrungswissenschaftliche Naturwissenschaftsdidaktik	133

II. Expeditionen in die Physik **139**

8. Wie kinematisch ist die Lichtgeschwindigkeit?	141
Auf der Lichttrennbahn	142
Licht geht auf die Reise...	143
Was sieht man durch die Linse?	147
Der Aufbau im Spiegelraum	150
Ein optisches Getriebe	154
Die dynamische Situation	156
Wer oder was bewegt sich mit c ?	157
9. Der Blick ins Becken – perspektivische Effekte und Bildverzerrungen in einfachen Situationen mit optisch dichten Medien	161
“Brechung” vs. “Hebung”	161
Elementare Beobachtungen: Sichtverbindung auf Umwegen	163
Vertiefung: Perspektivische Vergrößerung durch Brechung	165
Ergänzung: Ein genauerer Blick auf die realen Modalitäten des Einblicks .	168
Komplexe Probleme: Die Hebungskonchoide	170

Schlussbetrachtung	175
10. Pingpong im Nebenzimmer – Energie und Kinematik springender Bälle	177
Der Vorgang in der Zeit	177
Ballgeschichten	179
Interpretation – und weitere Experimente	182
Zusammenfassung und Ausblick	185
11. Die phänomenalen physikalischen, chemischen und biologischen Erfahrungsgrundlagen eines Begriffs von Energie als Bilanzierungsgröße	189
Anknüpfung an Klaus Schelers Energiedidaktik	189
Energie, Arbeiten und Leisten in der Lebenserfahrung	190
Erfahrungen am eigenen Leib	192
Energie, arbeiten und leisten – eine erste Ordnung der Gesichtspunkte	194
Ist ‘Energie’ eine Art ‘Stoff’?	196
Auch der Stoffwechsel gehört zum Umfeld der Energie	198
Energie, arbeiten und leisten – eine prozessuale Ordnung der Phänomene	199
Die Herkunft und die Hinkunft der Energie	200
Zusammenfassung: Gemeinsames und Verschiedenes in den Räumen ‘Energie’ und ‘Stoff’	203
12. Lichtspuren im Wasser – Ein Experiment zum Verhältnis von Brechung und Hebung	207
Hebung und Brechung	207
Ein optisches Puzzle	210
Der erweiterte Versuchsaufbau – Spiegelungen	211
Quantitative Diskussion	213
Schluss	214
Literatur	217
Literatur	217

1. Ein Rundgang im didaktischen Umfeld

Physikdidaktik ist *vielfältig*: Sie handelt davon, wie, mit welchen Mitteln, wann und welche Physik zu lehren und zu lernen ist, aber auch davon, welche Ziele damit verfolgt werden bzw. erreichbar sind oder mit welchen Methoden das festzustellen ist. Entsprechend vielfältig sind die Beiträge, Positionen, Methoden und Agenden. Physikdidaktik ist aber darüber hinaus auch *uneinheitlich*, wenigstens zwei Kulturen prallen aufeinander und konkurrieren: Die "Leitwissenschaft Physik" und die jeweiligen Leitbilder des Lehrens und Lernens, also genuine Naturwissenschaft einerseits und Erziehungswissenschaft bzw. Lernpsychologie andererseits. Ein drittes Spannungsfeld ergibt sich in der Differenz von akademischem Diskurs und der konkreten Schulpraxis: Welche Inhalte und Intentionen, die ersteren bewegen, erreichen konkrete Lehr-Lern-Situationen? Oder umgekehrt: welche Fragen und Sorgen der Praxis werden Thema des akademischen Diskurses?

Sprechend sind dabei die sehr unterschiedlichen Metaphern, mit denen Physikdidaktik beschrieben wird, die zu ganz unterschiedlichen Ausrichtungen der Physikdidaktik führen. So taucht bei Wagenschein und in der goetheanistischen Tradition immer wieder das Bild der *Lehrkunst* auf, das Themen wie die Suche nach dem "Richtigen, Guten und Schönen", nach ästhetischen Dimensionen, nach Gültigkeit "hier und jetzt" einschließt. Willer (2003) greift für seinen Umriss der Fachdidaktik das auf E. Spranger bzw. G. Kerschensteiner zurückgehende Bild des *Pädagogen als Arzt* auf und vergleicht folgerichtig Didaktik mit Medizin, gibt einen Ausblick auf die damit nötige Suche nach systematisch-methodischer Diagnose und Behandlung von suboptimalen Lernvorgängen, nach dem "*treatment*", dessen Ideal die empirisch nachzuweisende Wirksamkeit ist. Aus dem Munde von Horst Schecker habe ich das Votum gehört, Didaktik sei (im Sinne der Schaffung einer "bewährten Praxis" der Unterrichtsmethoden) analog zur *Ingenieurwissenschaft* zu entwickeln, ein "handwerklichen Ansatz" nach Werkzeugen und Anleitungen, nach solide funktionierenden Strategien, Lehrmitteln und Sachstrukturen. Aber auch ein "erkenntnistheoretischer Ansatz" ist eine legitime Teilperspektive auf die Didaktik, die Formulierung von Möglichkeitsbedingungen, Modalitäten und Grenzen des Lernens werden zum Thema...

Aufgabe dieses einleitenden Kapitels ist es, in diesem Umfeld didaktischen Hintergrund und Kontext der ab Seite 65 vorgelegten Essays darzustellen. Das Anliegen dieser Essays ist die Beschreibung eines Zugangs zur Schulphysik, der deutlich Un-

tersuchungscharakter trägt, also Konzepte, Einsichten und Argumentationsformen “an der Sache” und dabei möglichst “erscheinungsorientiert” entwickelt. Welche Motive dem zugrunde liegen, wird dann ab Seite 49 geschildert werden. Ausgeführt werden diese Gedanken in zwei Teilen, ab Seite 65 in bildungstheoretischen Überlegungen, ab Seite 141 in curricularen Beispielen. In dem folgenden Abschnitt wird es unter hauptsächlich erkenntnistheoretischer Perspektive um die phänomenologische Tradition der Curriculumentwicklung im Umfeld der Waldorfschulbewegung und um andere, verwandte Arten phänomenologisch-physikalischer Unterrichtskonzepte gehen. Weitere Bezüge ergeben sich durch bildungstheoretische Perspektiven und die Fragen rund um den aktuell zentralen didaktischen Begriff der *Kompetenz*. Der dritte Abschnitt erkundet verschiedene aktuelle Arten davon, Physiklehren und -lernen zu motivieren und wissenschaftlich zu behandeln.

Erkenntnistheoretischer Dissens: Modellfreie Optik

Naturwissenschaft hat in der Moderne eine gesellschaftlich normative Funktion: Naturwissenschaftliches Erkennen ist *exemplarisch* (oder geradezu synonym) für die jeweils konsensfähige Auffassung von Rationalität. Es liegt in der Natur der Sache, dass die jeweilige Konsens-Rationalität weniger differenziert und vielseitig ist als die Naturwissenschaft selbst – die normative Funktion ist eben eine kritisch-ausschließende, gegen “Aberglauben” oder “Ideologie”, gegen bloße Tradition oder Sentiment, gegen Homöopathie, Kreationismus, vermutete “Blauäugigkeit”, (falschen) Idealismus etc.¹ Zwei Motive sind dabei konstituierend: Empirie und Deduktion. Erstere steht für die Verpflichtung von Naturwissenschaft gegenüber der erfahrbaren Wirklichkeit, zweitere für die Verpflichtung gegenüber Exaktheit und logischer Konsistenz des Erkennens. Beide Motive klingen bereits bei Galileis kinematischen Arbeiten an und prägen bis heute das naturwissenschaftliche Denken: gesucht sind Theorien, die konsistente Repräsentationssysteme sind, innerhalb derer die relevanten empirischen Tatsachen ableitbar – und damit “erklärbar” werden. Dieses Programm ist mit größtem Erfolg etwa in der Himmelsmechanik und seit Ende des 19. Jahrhunderts in der Theorie der Materie durchgeführt worden.

Goethes naturwissenschaftliche Methode und die Frage nach den synthetischen Urteilen

Vor diesem Hintergrund führen Arten naturwissenschaftlichen Erkennens abseits des skizzierten *mainstreams* eine tendenziell gefährdete Existenz. Zwar ist etwa das Interesse für die Vielfalt der Einzelfälle, wie sie in naturkundlichen Sammlungen zu bewundern ist, durch die Empirie-Prämisse gedeckt, jenseits von Taxonomie und Entdeckerfreuden aber erst dann wissenschaftlich, wenn es einen zugrundeliegenden Theorierahmen gibt, der dem Einzelfall seinen Platz anweist. Dies geschieht im landläufigen Verständnis von Naturwissenschaft durch analytisch-deduktives Argumentieren. Damit ist auch eine Operationalisierung von “Erklären” gegeben: Ein Sachverhalt ist (typisch naturwissenschaftlich bzw. naturwissenschaftlich korrekt) erklärt, wenn er aus einem paradigmatischen Modell dieser Naturwissenschaft abgeleitet wird. Das Modell (oder die Modellfindung) selbst sind dabei nicht ableit- oder beweisbar – ein Modell kann durch ein Gegenbeispiel widerlegt, durch Beispiele aber nur plausibel oder wahrscheinlich gemacht werden.

Ein prominenter Dissident dieser naturwissenschaftlichen Methodik ist Goethe (Bortoft, 1996; Böhme & Schiemann, 1997). Die philosophische Tiefe seiner wissenschaftstheoretischen Überlegungen ist dabei wenig bekannt bzw. wird sie un-

¹Vgl. etwa (Dawkins, 1976; Ditfurth, 1976; Popper, 1992).

terschätzt. Goethe war nicht nur ein intimer Kenner sowohl der klassischen – insbesondere aristotelischen – und grundlegenden modernen Wissenschaftslehre, er setzte sich auch intensiv mit den damals aktuellsten Protagonisten Kant und Herder auseinander. Er erlebte nicht nur das Unbefriedigende am epistemischen Status der Modelle, sondern bemühte sich um eine exakt-systematische Methode, die naturwissenschaftliche Theoriebildung durch synthetische Urteile erlaubt. Am Ende eines solchen Prozesses stehen dann Konstrukte wie der *Typus* (“Urpflanze”) der Biologie oder die *Grundtatsache* (“Urphänomen”) in der Physik, die individuellen Evidenzcharakter haben, aber keinen “Erklärungswert” – und einen solchen auch nicht haben sollen, vgl. S. 54 ff., Kapitel 5 oder für moderne Interpretationen auch (Basfeld, 1997, 1998; Leneweit, 2008).

Der spätere Begründer der Anthroposophie und der Waldorfpädagogik, Rudolf Steiner, war ab 1884 auf Empfehlung des Wiener Germanisten Karl Julius Schröer mit der Herausgabe von Goethes naturwissenschaftlichen Schriften für die damals in der Entstehung begriffenen “Weimarer-” (oder “Sophien-”) Ausgabe betraut (Steiner, 1987). Sein tiefer Respekt für die naturwissenschaftlichen und methodischen Leistungen Goethes brachte ihn nicht nur zur Namensgebung “Goetheanum” für den bekannten Dornacher Saalbau, sondern auch dazu, bei vielerlei Gelegenheiten ein Wiederaufgreifen oder Weiterentwickeln von “goetheanistischen” Forschungsansätzen einzufordern und anzuregen – insbesondere auch vor den Lehrern der ersten Waldorfschule in Stuttgart.

Die Goetheanistische Tradition

Auf dieser Linie gibt es im Umfeld von Anthroposophie und Waldorfschulbewegung eine lebendige, meist von bildenden Künstlern getragene Tradition der Auseinandersetzung mit Goethes Farbenlehre – vgl. etwa (Lobek, 1954; Ott, 1965; Proskauer, 2003; Martin, 1979; Kühl, 2000; Nussbaumer, 2008). Steiners methodische Anregungen begründeten aber auch eine eigene, bis heute lebendige Schule phänomenologischer Naturwissenschaft (Schad, 1982 – 1985; Schieren, 1998; Suchantke, 2002; Bockemühl, 1996 – 2004). Ein im didaktischen Kontext relevantes, direktes Ergebnis dieser Anregungen ist die Darstellung einer “Schulmechanik” von Hermann von Baravalle (Baravalle, 1985). Baravalles Zugang ist dabei eine breite Darstellung mechanischer Apparate, deren Bewegungsformen in einer an die Aristotelische Einteilung der Bewegung angelehnten Kategorisierung geordnet werden.² Exemplarisch

²Dieser Ansatz ist nicht unproblematisch: Der Schwerpunkt einer solchen “Mechanik als reiner Phänomenologie” liegt auf kinematischen Überlegungen bzw. Vorstellungsübungen – Steiner unterscheidet aber in seinem Vortrag vom 23.12.1919 vor dem Lehrerkollegium der Stuttgarter Waldorfschule gerade scharf zwischen solchen mathematiknahen Gedankenformen und der “eigentlichen Mechanik”, vgl. auch das Kapitel “Mechanik anders greifen” in (Theilmann, 2006a)

für die erste Zeit nach dem zweiten Weltkrieg seien die Arbeiten von Frits Julius und Hermann Bauer erwähnt (Julius, 1982; Bauer, 1966, 1976, 2004, 2005). Julius führt uns mit einer bezaubernden Unbekümmertheit durch eine Vielzahl oft staunenswerter Erfahrungssituationen und problematisiert dabei ebenso tiefsinnig wie überraschend scheinbare Selbstverständlichkeiten³ – wieviele Schatten wirft ein Gegenstand in Gegenwart einer Kerze und eines Spiegels, welche geometrischen Bedingungen müssen erfüllt sein (und sind es oft nicht!), damit ein hinter Wolken hervorbrechender “Sonnenstrahl” gerade aussieht etc. Bauers Interessenkreis beschränkt sich nicht auf Physik, sondern erstreckt sich auch auf Mathematik und Astronomie. Seine Arbeiten greifen konkrete Anregungen Steiners auf und entwickeln diese auf hohem mathematisch-handwerklichen Niveau weiter. Über das rein Inhaltliche hinaus kann man den wegweisenden Charakter dieser Beiträge vielleicht dadurch beschreiben, dass beide Wege gezeigt haben, Naturwissenschaft im pädagogischen Umfeld auf selbstbewusste Art anders anzugehen – Frits Julius durch einen phänomennahen Stil seiner Überlegungen, Hermann Bauer durch den Mut, unkonventionellen Anregungen Steiners wirklich zu folgen.

Einen eigenständigen Zweig goetheanistischer Arbeiten bilden die Arbeiten zu Optik und Farbenlehre des norwegischen Physikers Torger Holtsmark. Angeregt durch die Arbeit an Goethes Farbenlehre im Kreis um André Bjerke (Bjerke, 1961) publizierte Holtsmark eine Reihe von Arbeiten, die im Kern um Konzeption und Deutung des Newtonschen *experimentum crucis* kreisen bzw. Farbwahrnehmung im Umfeld dispersiver Medien oder komplementärer Muster untersuchen (Holtsmark, 1969, 1970; Holtsmark & Valberg, 1971). Er schlägt bereits eine *komplementäre Variante* des Newton’schen Experimentes vor, das der spektralen “Unzerlegbarkeit” der subtraktiven Grundfarben, die als Spektrum eines schmalen Stegs entstehen, unter zu Newtons Anordnung komplementären Bedingungen entsprechen würde – eingebettet in eine auf “Schattenstrahlen” basierenden, komplementären Optik, wie sie Goethe polemisierend den Lichtstrahlen Newtons entgegensetzt (Müller, 2007; Rang & Müller, 2009). Inzwischen liegen mehrere unabhängige Varianten dieses komplementären Experimentes und ein Unterrichtsvorschlag dazu vor, vgl. (Nussbaumer, 2008; Rang & Grebe-Ellis, 2009; Rang, 2009; Sällström, 2010; Rang, 2010).

Die in den 80er Jahren beginnenden Zusammenarbeit von Manfred von Mackensen und Georg Maier markiert eine Art “zweiter Phase” phänomenologischen Physikunterrichtens. Maier verfolgte einen lobenden Hinweis Steiners auf die Arbeiten von George Berkeley zur Optik (Berkeley, 1975), die eine neue Spur wiesen: Vor dem Hintergrund des radikalen subjektiven Idealismus Berkeleys öffnete sich ein Weg, wie Optik systematisch betrieben werden könnte, ohne dabei in die üblichen geometrisch-mechanistischen Vorstellungen, insbesondere räumliche Transportvor-

³Ein Motiv, das uns auch bei seinen Landsmann Marcel Minnaert begegnet (Minnaert, 1999).

gänge vorauszusetzen (für eine ausführliche Darstellung dazu vgl. (Grebe-Ellis, 2005) bzw. (Grebe-Ellis, 2006a)). In der Folge entstand eine *Optik der Bilder* (Maier, 1993b), in der die klassischen Probleme der Schuloptik – Schattenlehre, Photometrie, Perspektive, Reflexion und Brechung, Abbildungsoptik – ohne Zuhilfenahme von Lichtstrahlen oder Wellenvorstellungen behandelt wurden. Für diesen Zugang zur Optik wurden konkrete Lehrvorschläge und eine Art Leitcurriculum formuliert (Buck & Mackensen, 2006; Mackensen, 1982; Mackensen & Ohlendorf, 1998) und eine Reihe spezieller Lehrmittel (wassergefüllte, großformatige Demonstrationsprismen, ein verstellbarer großformatige Hohl-Wölbspiegel (Maier, 2004b) u. a.) entwickelt. Von Mackensen prägte für dieses Programm den Ausdruck *modellfreie Optik* (Mackensen & Ohlendorf, 1998). Ein wesentliches Element stellte dabei von Anfang an ein hohes Methodenbewusstsein dar, so dass neben den eigentlich optischen Inhalten auch etwa die hierarchische Ordnung der verwendeten Denkbewegungen oder Momente von Komplementarität in den Blick genommen wurden (Maier, 1988, 1993a) – ein Moment, das diesen Zugang zur Optik für viele Menschen, darunter auch den Autor selbst, attraktiv gemacht hat.

Weiterentwicklungen: Anschauliche Zugänge zur Optik, Lichtwege und erscheinungsorientierte Physik

Die liebevolle Zuwendung an Phänomene und die im Umfeld der Optik der Bilder entstandene hohe Kultur des Experimentierens hat immer wieder auch Physiker und Physikdidaktiker berührt. Durch persönliche Erfahrungen einzelner im Umfeld von Waldorfschulen angeregt, entstanden eine Reihe von Beiträgen, Materialien und Artikel für Schulbücher, die Motive einer Optik der Bilder aufgreifen, insbesondere bei den Themen “Hebung”/Refraktion und “Spiegelraum”/Reflexion – vgl. etwa (Erb & Schön, 1996; Duit, Häußler, Mikelskis & Westphal, 1995a), typische Physiklehrerbücher für die Mittelstufe aus dem Hause Cornelsen – etwa (Backhaus & Schön, 2001, S. 73 ff.) – oder die multimediale Lernumgebung phenOpt (*PhenOpt Lernsoftware*, 1995; Mikelskis, Seifert(-Mikelskis) & Roesler, 1999), aber auch beim Thema “Farbe”, vgl. (Mikelskis, 1988, 2006a). Im Vergleich zur modellfreien Optik tritt hier die philosophisch-erkenntnistheoretische Perspektive auf die Optik (in der der physikalische Inhalt paradigmatisch dafür wird, dem Schüler ein Erlebnis von exakter und autonomer Welterkenntnis zu vermitteln) zurück. Stattdessen wird oft die “eingebundene Perspektive” (v. Mackensen) mit den selbst gesehenen Ansichten eher als Einstieg oder Motivation für eine dann folgende Behandlung der Situation mit konventioneller Strahlen oder Wellenoptik verwendet. Dass dabei dennoch eine echte inhaltliche Bereicherung erzielt wird, vielfältige Angebote für eigenständige und alltagsnahe Beobachtungen der Lerner entstehen (Schön, 1994) und auch attrakti-

ve und fordernde Vertiefungen und Aufgaben möglich sind, zeigt der Vergleich mit Schulbüchern, die für die Optik auf derartige Elemente verzichten (so die aktuellen Bücher aus dem Duden-Verlag).

Eine hochinteressante Weiterentwicklung dieser verschiedenen Spuren stellen die Arbeiten von Roger Erb, Lutz-Helmut Schön und anderen in den 1990er Jahren dar, die Beleuchtungs- oder Abbildungssituationen statt mit den konventionellen Lichtmodellen anhand von *Lichtwegen* behandeln, die dem Fermat'schen Prinzip folgen (Erb, 1992) bzw. einem "phasensensitiven Auswahl- oder Superpositionsprozess" unterliegen. Ein solcher Zugang zur Optik entwickelt die Behandlung der Brechung bei Maier (Maier, 1993b) anhand der Ideen Feynmans (Feynman, 2002) weiter und hat verschiedene konzeptionelle Vorteile bzw. Auszeichnungsmerkmale, etwa:

- Die Formalisierung ist *deskriptiv*, also streng als quantitative Beschreibung physikalisch relevanter Parameter interpretierbar, und vermeidet so den "mythischen Charakter" (Wiesing, 2009) typischer Modellvorstellungen,
- die Formalisierung ist im Abstraktionsniveau an den Lerner anpassbar (Weber & Schön, 2000; Erb & Schön, 1996; Erb, 1995),
- die Formalisierung erlaubt eine *einheitliche Behandlung* von Problemen der Reflexion, Brechung, Abbildungsoptik, Beugung und der Interferenz (Erb, 1994, 1999),
- ein "Denken in Lichtwegen" ist anschlussfähig an Quantenmechanik (Werner, 2000) oder die Verwendung von Extremalprinzipien in anderen Gebieten der Physik (Guderian & Schön, 2004).

Konkrete Lehrerfahrungen mit modellfreier Optik und Zeigeroptik belegen die Gangbarkeit und auch die Attraktivität eines solchen Zugangs, eine breite Akzeptanz dieses vielversprechenden Curriculumkonzeptes steht aber noch aus.

Auch die modellfreie Optik im engeren Sinn hat sich weiterentwickelt. Zur Jahrtausendwende entstanden im Umfeld der in Hessen vorgenommenen Umstellung auf Zentralabitur verschiedene Arbeiten zur Optik, die zeigen konnten, dass sich auch aus der modellfreien Konzeption heraus interessante und anspruchsvolle Unterrichtskonzepte für die letzten Jahre der Sekundarstufe II und entsprechende Abituraufgaben gewinnen lassen (Grebe-Ellis, Sommer & Vogt, 2002). Die damit ebenfalls angezeigte kritische methodische Auseinandersetzung wurde in den folgenden Jahren vor allem von Johannes Grebe-Ellis, Wilfried Sommer und dem Autor selbst vertieft – vgl. (Grebe-Ellis, 2006b, 2005; Sommer, 2005; Theilmann, 2006a) und die Kapitel 4 und 5. Zugleich wurden neue und/oder anspruchsvollere optische Problemkreise wie "Beugung" (Sommer, Grebe-Ellis & Vogt, 2004; Sommer, 2005; Sommer

& Meinzer, 2009), “Polarisation” (Grebe-Ellis, 2001, 2005) und “Lichtgeschwindigkeit” (Theilmann & Maier, 2004; Theilmann, 2006b) “bildoptisch” erschlossen, sowie ein Mechanikcurriculum vorgelegt, das einen zur Bildoptik methodisch analogen Versuch darstellt, Mechanik im Unterricht zu behandeln (Theilmann, 2006a). Eine Standortbestimmung dieser Bemühungen zwischen der philosophisch ausgerichteten Phänomenologie, goetheanistischer Tradition, und wissenschaftstheoretischen bzw. didaktischen Gesichtspunkten lieferte im Jahre 2005 die Tagung *open eyes 2005* in Berlin (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006). Aufgrund der Missverständlichkeit des Begriffes “modellfrei” wird dieser Begriff in der hier referierten moderneren Literatur oft durch “phänomenologisch”, “bildoptisch” oder “erscheinungsorientiert” paraphrasiert. Die Texte des zweiten Teils (S. 141 ff.) verstehen sich als Beispiele für ercheinungsorientierte Darstellungen zur Physik.

Kompetenzorientierung und die deutschen Bildungsstandards

Kompetenz ist ein Schlüsselbegriff für jede Auseinandersetzung mit der aktuellen Physikdidaktik. Um die aktuelle Rolle von Kompetenz im didaktischen Diskurs verständlich zu machen, wird die Geschichte der Entwicklung zum Schlüsselbegriff in drei Episoden erzählt. Die erste dieser Episoden reicht 40 Jahre in die Vergangenheit: Anfang 1973 veröffentlichte das Journal *American Psychologist* die Ausarbeitung eines Vortrags, den David McClelland zwei Jahre zuvor gehalten hatte (McClelland, 1973). McClelland argumentiert dort dafür, dass sich der reale Erfolg eines Probanden in praktisch-konkreten, kontextualisierten Problemaufgaben („dem Leben“) im Allgemeinen nicht durch Eignungstest erheben lässt, die Konstrukte wie „Allgemeinwissen“ und „Intelligenz“ messen. Er skizziert stattdessen ein neues Konstrukt, für das er den Begriff *Kompetenz* als Name einführt und das er durch Merkmale einer Testkultur für Kompetenz beschreibt:

1. Sorgfältige Analyse der jeweils relevanten *Performanz* im Hinblick darauf, aus welchen Komponenten sie sich zusammensetzt – Testaufgaben sollen bezüglich dieser Komponenten valide sein.
2. Eignungstests sollen nicht stabile „Fähigkeiten“ messen, sondern *Lernzuwachs* bzw. *-fähigkeit* in den Bereichen widerspiegeln, die sie beurteilen.
3. Was gute Testleistungen ausmacht, sollte transparent, also explizit und öffentlich bekannt sein – es ist ggf. ein Vorteil für alle Seiten, wenn eben gerade die gesuchten Eigenschaften (oder hilfreiche andere) trainiert werden und vermindert umgekehrt das Risiko von Fehleinschätzungen und Artefakten.
4. Selbst vermeintlich einfache Berufsaufgaben oder Lebenssituationen sind so komplex und vielschichtig, dass es im Allgemeinen nicht ausreichen wird, sich für eine Kompetenzbewertung auf die Beurteilung spezieller Fähigkeiten zu beschränken – eine solche Bewertung sollte auch sinnvolle allgemeine Fähigkeiten (wie Schreib-/Lese- oder Rechenfähigkeiten) und sinnvolle Gruppen aus anderen Lebensbereichen, etwa Persönlichkeitsmerkmalen, einschließen. McClelland nennt als Beispiele Kommunikationsfähigkeit, Geduld (*response delay*), die Fähigkeit, sich angemessene Ziele zu setzen, oder Persönlichkeitsentwicklung.
5. Konkrete Aufgaben oder Lebenssituationen sind eher selten so strukturiert, dass eine ausgeprägte „Fragesituation“ entsteht, die eine dezidierte „Antwort“ fordert – Tests sollen daher nicht nur Antwortcharakter haben, sondern auch

“Wirksamkeit” widerspiegeln, also was Probanden “von sich aus” tun oder initiieren, welche Gewohnheiten oder Vorlieben etc. sie haben usw.

6. Um Kompetenz nicht durch aufgeblähte Kataloge hochspezifischer, jeweils kaum signifikanter Fähigkeiten messen zu müssen, ist es wünschenswert, abstraktere Merkmale des Selbstbildes, des Weltverhältnisses oder des Problemlösens usw. zu identifizieren und zu erfassen, die mit ganzen Gruppen speziellerer Merkmale korrelieren.

McClelland begründete mit diesen Überlegungen maßgeblich ein neues Paradigma mit – Kompetenzorientierung ist, wie wir gleich sehen werden, in der modernen Bildungstheorie ein zentrales bildungspolitisches und didaktisches Leitbild: Auf “Kompetenz” zu schauen heißt, den “Lerner” (den Probanden, Bewerber,...) und seine Möglichkeiten

- angemessen ganzheitlich,
- in Zusammenhang mit einem konkreten, auf Lebenswirklichkeit bezogenen Aufgabenkanon und
- als initiativ und in Entwicklung begriffen zu erfassen.

Sein Ansatz ist aber nicht eine inhaltliche Spezifikation von “Kompetenz”, sondern pragmatisch – zuletzt ist es die Testkultur, die darüber entscheidet, was als Kompetenz gilt. Eine Reihe der von ihm genannten *caveats* hat dabei offensichtlich auch für den Physikunterricht Relevanz, wenn man das Grundproblem ernst nimmt, das McClelland adressiert: Die Kriterien, mit denen wir auf Schulebene “Physik-Können” beschreiben, sind in Gefahr, eben nicht Physik-Können, sondern stattdessen die Cleverness bei typisch schulischen Leistungserhebungen, Anpassbarkeit, Adaptionfähigkeit an die üblichen unphysikalischen Rechenaufgaben usw. zu messen. Anders gesagt: Wie sieht es mit dem “Können” von Physik aus, wenn nicht die Maßstäbe angelegt werden, die aus der Tradition eines “Spiels Schulphysik” abgeleitet werden, sondern aus anderen, womöglich “lebensnäheren” Lesarten von Naturwissenschaft?

Kompetenzen in der Schulrealität: PISA 2000

Ende des letzten Jahrtausends beschlossen die in der OECD organisierten Regierungen ein *Programme for International Student Assessment*, kurz PISA, das im Jahr 2000 mit einer internationalen Vergleichsstudie begann, die seitdem im Turnus von drei Jahren wiederholt wird (PISA, 2001). Ziel dieses Programms ist es zunächst, den beteiligten Regierungen “auf periodischer Grundlage Prozess- und Ertragsindikatoren zur Verfügung zu stellen, die für politisch-administrative Entscheidungen

zur Verbesserung der nationalen Bildungssysteme brauchbar sind” (Baumert, Stanat & Demmrich, 2001). Diese Indikatoren sollen sich auf die Bereiche Lesekompetenz (*Reading Literacy*), mathematische Grundbildung (*Mathematical Literacy*), naturwissenschaftliche Grundbildung (*Scientific Literacy*) und fächerübergreifende Kompetenzen (*Cross-Curricular Competencies*) beziehen. Letztere adressieren dabei selbstreguliertes Lernen und Vertrautheit mit Computern. Als Besonderheiten des PISA-Konzeptes im Hinblick auf die Konzeption und Auswertung als Schulvergleichsstudie sind hier hervorzuheben,

- dass die Testaufgaben konsequent auf Anwendbarkeit oder Anschlussfähigkeit der in Frage stehenden Kompetenzen in “authentischen Lebenssituationen” abstellen und
- dass das Indikatorenprofil nicht statisch, sondern entwicklungs offen verstanden wird.

Anders als bei TIMMS (1995) einige Jahre vorher wurde mit PISA 2000 nicht versucht, curriculare Validität auf internationalem Niveau zu erreichen, sondern man setzte “entschieden” auf die “Erfassung von Basiskompetenzen in variierenden Anwendungssituationen” (Baumert et al., 2001, S. 19). Es wird also nicht auf internationaler Ebene eine jeweils national verwurzelte Vielfalt gespiegelt, sondern *eine* spezifische Lesart von Bildung implementiert, zu der sich nationale Bildungspolitik ins Verhältnis setzen muss – wir werden unten gleich darauf zurückkommen. In dieser Entscheidung (und ihrer konkreten Ausgestaltung) liegt ein explizites Bekenntnis zu einem didaktischen und bildungstheoretischen Konzeptionsrahmen, der sich nicht an den nationalen Gegebenheiten, sondern am angelsächsischen Leitbild der *literacy* orientiert. *Literacy* ist dabei nicht die Elementarstufe des “mühsamen Buchstabierens”, der Alphabetisierung, sondern die Vertrautheit mit Inhalten und Kulturtechniken, die gesellschaftliche und inhaltliche Partizipation auf inhaltlich mehr oder weniger klar umrissenen, verschieden komplexen Stufen ermöglicht.

Die für unser hier verfolgtes Projekt zentrale Frage nach der bei PISA zugrundegelegten Lesart von naturwissenschaftlicher Grundbildung wird in diesem Sinne beantwortet: Neben Kommunikations- und Lernfähigkeit werden paradigmatische Inhalte und Methoden einbezogen, die stellvertretend für das als erstrebenswert gedachte (wissenschaftlich-rationale) Weltverhältnis sein sollen – wir hatten diesen weltanschaulichen Punkt bei der Einleitung zum Abschnitt über modellfreie Optik schon berührt. Eine solche konsequente Verortung von Bildung hin auf Modi und Horizonte des “Weltverstehens” steht dabei in der Tradition der Curriculumwürfe der *American Association for the Advancement of Science* (AAAS, 1989), der amerikanischen *National Science Foundation* (NSF, 1970) oder des amerikanischen

National Council of Teachers of Mathematics (NCTM, 1998). Es geht um Orientierungswissen, das für grundlegender gehalten wird als konkrete Themen und selbst als einzelne Fächer, vgl. auch den Abschnitt über die *Nature of Science*, S. 35 ff. So wurden bereits bei PISA 2000 erste Schritte hin zu einer Erfassung von Problemlöse-, Kommunikations- und Kooperationsfähigkeiten unternommen.

Die konkrete Ausgestaltung von naturwissenschaftlicher Grundbildung im Rahmen von PISA unterscheidet verschiedene Bereiche bzw. Dimensionen:

Naturwissenschaftliche Konzepte – Wissen bzw. Verständnis kanonischer Konzepte, die für ein Verständnis von Naturvorgängen etc. für nötig gehalten werden, etwa "Wärmeleitfähigkeit", "Kraft", "Geschwindigkeit", "Impuls" (analog "Zelle", "Genpool", "Kontinentalverschiebung"...). Auswahlkriterium war hier neben anderem die angenommene Relevanz für das tägliche Leben und die Anschlussfähigkeit für nachfolgendes Lernen.

Wissenschaftliche Prozesse – Verständnis typischer Denk- und Arbeitsweisen, wobei nicht Datenerhebung selbst thematisiert wird, sondern etwa die Beurteilung von bereits vorliegenden Daten, das Ziehen begründeter Schlüsse oder das Erkennen von Gültigkeitsbedingungen bzw. -grenzen solcher Schlüsse. Hier kommen Aufgaben in Betracht, die es erforderlich machen zu bestimmen oder zu erkennen, was verglichen werden muss, welche Variablen kontrolliert oder verändert werden müssen, welche zusätzlichen Informationen benötigt werden usw., um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen.

Naturwissenschaftliche Anwendungssituationen – diese stammen aus einem breiten Spektrum zwischen unmittelbarem Lebensumfeld bis zu *global issues*, etwa Klimawandel. Schwerpunkte bilden die bereits in (OECD, 1999) formulierten Themenfelder "Leben und Gesundheit", "Erde um Umwelt" bzw. "Naturwissenschaften und Technologien".

Die genannten US-amerikanischen Leitbilder nennen für eine auf Partizipation ausgerichtete naturwissenschaftliche Kompetenz darüber hinaus noch zwei weitere Kompetenzbereiche, nämlich das Vorhandensein von Vorstellungen über die Besonderheit der Naturwissenschaften (*nature of science*) und von Vorstellungen über die Beziehungen zwischen Naturwissenschaft, Technik und Gesellschaft bzw. Umwelt, vgl. Tabelle 6.5 in (Science Education Standards, o.J.) bzw. (AAAS, 1989; Prenzel, Rost, Senkbeil, Häußler & Klopp, 2001a; Duit, Häußler & Prenzel, 2001). Beide Bereiche finden sich auch als Anforderungsbereiche in PISA. Die auf politischer Ebene gegebene Lesart von *scientific literacy* (OECD, 1999), nämlich

"Naturwissenschaftliche Grundbildung (*scientific literacy*) ist die Fähigkeit, naturwissenschaftliches Wissen anzuwenden, naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen und aus Belegen Schlussfolgerungen zu ziehen,

Kompetenzstufe I (nominell)

Schlussfolgerungen auf der Basis von Alltagswissen ziehen

Kompetenzstufe II (funktional, naturwissenschaftliches Alltagswissen)

Schlussfolgerungen unter Verweis auf Daten oder naturwissenschaftliche Information ziehen oder bewerten

Kompetenzstufe III (funktional, naturwissenschaftliches Wissen)

Beim Ziehen oder Bewerten von Schlussfolgerungen zwischen relevanten und irrelevanten Daten unterscheiden oder Argumentationsketten auswählen

Kompetenzstufe IV (konzeptuell und prozedural)

Daten systematisch auf Aussagen über mögliche Schlussfolgerungen beziehen und eine Argumentationskette entwickeln

Kompetenzstufe V (konzeptuell und prozedural, Modelle)

Daten als Evidenz benutzen, um alternative Gesichtspunkte oder unterschiedliche Perspektiven zu beurteilen

Tabelle 1.1.: Die fünf Kompetenzstufen von PISA 2000 am Beispiel “Umgang mit Evidenz”

um Entscheidungen zu verstehen und zutreffen, welche die natürliche Welt und die durch menschliches Handeln an ihr vorgenommenen Veränderungen betreffen”,

fügt sich nahtlos in einen solchen theoretischen Rahmen ein.

Aus den genannten “Dimensionen” oder Aspekten einer so aufgefassten naturwissenschaftlicher Grundbildung wurden folgende vier Kompetenzklassen oder -bereiche abgeleitet: “Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte”, “Umgehen mit Evidenz”, “Verständnis der Besonderheiten naturwissenschaftlicher Untersuchungen” und “Kommunizieren naturwissenschaftlicher Beschreibungen oder Argumente”. Die für eine genauere Beschreibung der Schülerleistungen nötige Kompetenzstufung ergibt sich vor diesem Hintergrund aus einem iterativen Prozess, in dem ausgehend von Annahmen über deren Besonderheiten zunächst theoretisch begründete Fähigkeitsanforderungen formuliert wurden, die dann mit den tatsächlichen Item-Kennwerten abgeglichen wurden – um dann das Item-Format oder die Anforderungen ggf. so nachzubessern, dass eine theoretisch und empirisch konsistente Stufung entsteht. Auf diese Weise ergeben sich fünf Kompetenzstufen, die Nomenklatur orientiert sich dabei an Bybees Bezeichnungen (Bybee, 1997), wobei die funktionale und konzeptuelle Ebene jeweils weiter aufgeschlüsselt wird (Tabelle 1.1 zeigt ein Beispiel).

PISA erscheint bei allen Fragezeichen bezüglich Aussagekraft und Interpretationen und aller berechtigten Kritik gegenüber Durchführung und Konzeption dennoch unter vielen Gesichtspunkten als ein ambitionierter und professioneller Versuch, "Kompetenzorientierung" sinnvoll auf die Evaluation von Schulleistungen anzuwenden. Die Anlage der Studie betont auf mehrere Arten Motive, die wir oben als paradigmatisch für "Kompetenz" im Sinne McClellands festgehalten hatten: es soll um eine vielseitige, handlungsrelevante und situationsbezogene Disposition gehen. Auch finden sich McClellands Anforderungen an eine Testkultur für Kompetenz weitgehend implementiert: Das Kompetenzmodell von PISA ist transparent bezüglich seiner Komponenten und der inhaltlichen Ausgestaltung, es gibt einen großen Anteil offener bzw. lebensnah-realistischer Item-Formate, es werden allgemeinere lern- und verständnisrelevante kognitive Fähigkeiten berücksichtigt und es wird im Kompetenzmodell durchaus versucht, integrative Kompetenzen zu formulieren und zu validieren. Darüber hinaus war PISA paradigmatisch dafür, wie die Anforderungsprofile an Lerner, aber auch an Lernumgebungen bildungstheoretisch zu denken sind, und hat dafür gesorgt, dass sich naturwissenschaftliche Fächer nicht mehr nur durch einen Kanon fachlicher Inhalte definieren dürfen, sondern sich mit Kontextorientierung und typisch naturwissenschaftlichen Denk- und Argumentationsformen regelrecht neue inhaltliche Horizonte erschließen – wir werden unten noch genauer darauf eingehen. Die Perspektive auf "physikalische Expeditionen" lässt sich hier zwanglos verankern.

Weichenstellungen: Die Klieme-Expertise und die deutschen Bildungsstandards

Bekanntlich hat das von der deutschen Öffentlichkeit als katastrophal wahrgenommene unterdurchschnittliche Abschneiden der deutschen Probanden bei PISA 2000 ("PISA-Schock"⁴) ein spürbares bildungspolitisches Reformmoment erzeugt: Qualitätsentwicklung und -sicherung rutschten auf der politischen Agenda mit Nachdruck nach oben. Am 18. Februar 2003 wurde in Berlin eine im Auftrag der damaligen Bundesregierung erstellte "Expertise" präsentiert, die zu diesem Zweck Vorschläge "zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards" formulierte (Klieme et al., 2003). Die Expertise konstatiert in der Analyse der Ausgangslage ein *window of opportunity* für einschneidende Reformen, aber auch, dass nicht das durchschnittliche (schlechte) Abschneiden der deutschen Schüler selbst das Problem sei, sondern die ebenfalls offenbar gewordenen strukturellen Mängel (etwa ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle bei den Schulleistungen innerhalb Deutschlands) des schulischen *status*

⁴Ein solcher Blick auf die Schule hat dabei Tradition, vgl. auch die vielbeachtete "deutsche Bildungskatastrophe" (Picht, 1965)

quo – parallel zur internationalen Vergleichsstudie war mit vielfach höherer Probandenzahl die nationale Vergleichsstudie PISA-E durchgeführt worden.

Es liegt dabei vollkommen in der Logik der damaligen Situation, dass eine Notwendigkeit von Bildungsstandards und die Wende von der Input- zur Output-Steuerung des Bildungssystems – also weg von der Vorgabe von Inhalten hin zur Vorgabe dessen, was als Unterrichtsergebnis „*gekonnt*“ werden soll – als gegeben angenommen werden durfte: Maßstab und Ziel von Unterricht war eben die Kompetitivität deutscher Schüler bei PISA. Die Output-Orientierung heißt in diesem Kontext, dass es eine einforderbare Verantwortlichkeit für das Gelingen von Ausbildung in diesem Sinne gibt. Die Expertise fasst PISA 2000 so zusammen (Klieme et al., 2003, S. 13):

- Die Ziele der Lehrpläne werden häufig nicht erreicht (so verfehlen mindestens ein Viertel der Schüler Mindestanforderungen in Mathematik oder Lesefähigkeit).
- Die Leistungen der deutschen Schüler variieren stärker als in jedem anderen OECD-Land. Kurz gesagt: Während die guten Schüler wirklich auch auf internationalem Niveau gut sind, sind die schlechten schlechter als in anderen Vergleichsstaaten – ein möglicher Hinweis darauf, dass Mindeststandards sinnvoll wären!
- Die Leistungen und die Benotung variiert stark von Bundesland zu Bundesland – aus der Perspektive des Gleichheitsgebotes ein Problem. . .
- Besonders gut haben Staaten abgeschnitten, die systematische schulische Qualitätssicherung betreiben.

Die Expertise versteht sich vor diesem Hintergrund als der Versuch, Vorschläge für die politisch gewollte Einführung von Bildungsstandards zu machen: die ins Auge gefassten Bildungsstandards formulieren verbindliche, fachspezifische und dabei differenzierte und realistische Kompetenzen, die vermittelt werden sollen. Und es ist dabei klar, dass diese Vorschläge (i) die normativen gesellschaftlichen (und pädagogischen) Zielstellungen, (ii) den didaktisch-psychologischen Kenntnisstand zum Aufbau von Kompetenzen und (iii) Konzepte und Verfahren der Evaluation – also eine prinzipielle *Prüfbarkeit* – integrieren sollen.

Die Expertise reflektiert durchaus auch die Variation der Lesarten von (Bildungs-)Standards im internationalen Vergleich. So sind „Standards“ in britischer Lesart nicht zu erfüllende Normen, sondern das durchschnittliche Leistungsniveau der Schulen – eine Lesart, die auch in die Vorbereitungen zu PISA präsent ist (OECD, 1991). Dennoch hat sich letztlich auch international weitgehend eine *normbezogene* Lesart des Begriffs durchgesetzt. Die Expertise identifiziert drei Leitfragen, anhand derer die verschiedenen Varianten kategorisiert werden können:

1. Beziehen sich die Standards (wie bisher beschrieben) auf die Lernergebnisse oder auf die Lernbedingungen und -prozesse (“*opportunity-to-learn-standards*”)?
2. Auf welcher Abstraktionsebene werden Standards formuliert? Hier lassen sich etwa allgemeine Bildungsziele, bereichs- bzw. domänenspezifische Kompetenzen, Lernziele (“*content standards*”) oder eben “*performance standards*” unterscheiden.
3. Wird ein Basalniveau spezifiziert (“Mindeststandards”), ein idealer Erwartungshorizont (“Maximalstandards”) oder das durchschnittliche Erwartungsniveau (“Regelstandards”)?

Die Expertise empfiehlt explizit ergebnisbezogene (und somit auch operationalisierbare) Standards, die bereichsspezifischen Kompetenzen in Form von Anforderungsstufen (aufbauend auf ein Mindestniveau) spezifizieren. Solche Standards haben zwei Funktionen: Sie orientieren inhaltlich einerseits Lernende und Eltern, aber auch innerhalb der Lehrerprofessionalisierung und bei der Qualitätsentwicklung. Sie sind zugleich der Rahmen für die Feststellung und Bewertung von Lernergebnissen und haben also außerdem eine Rückmeldefunktion. Für die Schulentwicklung setzt die Expertise auf *Schulprogramme*, die selbstverantwortlich und auf Schulebene die Erfüllung der Standards (als Teil der jeweiligen Schulkultur) erfüllen.

Innerhalb der föderalen Struktur der deutschen Bildungslandschaft stellten die “Einheitlichen Prüfungsanforderungen” für das Abitur (EPA, 1989/2004) bereits seit den 1970er Jahren und analog die “Standards” für den mittleren Schulabschluss seit 1995 *performance standards* dar. Die ständige Konferenz der Kultusministerien (KMK) beschloss bereits 1997 – also drei bis vier Jahre vor PISA –, diese Standards für den mittleren Schulabschluss weiterzuentwickeln bzw. auf Hauptschulabschluss und Grundschulabgänger auszudehnen. Das Ergebnis dieses Prozesses wurde Ende 2004 verabschiedet (KMK, 2004b). Im Fach Physik werden dabei vier Kompetenzbereiche und drei Anforderungsbereiche unterschieden, die für die einzelnen Kompetenzbereiche jeweils spezifisch ausgestaltet sind (Tabelle 1.2). Das Fachwissen wird dabei (wie auch in Biologie und Chemie) als durch bestimmte *Basiskonzepte* “Materie”, “Wechselwirkung”, “System” und “Energie” strukturiert, und, so wird gesagt, sie

“begünstigen kumulatives, kontextbezogenes Lernen. Sie systematisieren und strukturieren Inhalte so dass der Erwerb eines grundlegenden, vernetzten Wissens erleichtert wird. Die inhaltliche Dimension umfasst übergreifende, inhaltlich begründete Prinzipien und Erkenntnis leitende Ideen, mit denen Phänomene physikalisch beschrieben und geordnet werden.”

Fachwissen

Wissen wiedergeben:

Fakten und einfache Sachverhalte reproduzieren

Wissen anwenden:

Physikalisches Wissen in einfachen Kontexten anwenden, einfache Sachverhalte identifizieren und nutzen, Analogien benennen.

Wissen transferieren und verknüpfen:

Wissen auf teilweise unbekannte Kontexte anwenden, geeignete Sachverhalte auswählen.

Erkenntnisgewinnung

Fachmethoden beschreiben:

Physikalische Arbeitsweisen, insbesondere experimentelle, nachvollziehen bzw. beschreiben.

Fachmethoden nutzen:

Strategien zur Lösung von Aufgaben nutzen, einfache Experimente planen und durchführen, Wissen nach Anleitung erschließen.

Fachmethoden problembezogen auswählen und anwenden:

Unterschiedliche Fachmethoden, auch einfaches Experimentieren und Mathematisieren, kombinieren und zielgerichtet auswählen und einsetzen, Wissen selbstständig erwerben.

Kommunikation

Mit vorgegebenen Darstellungsformen arbeiten:

Einfache Sachverhalte in Wort und Schrift oder einer anderen Form unter Anleitung darstellen, sachbezogene Fragen stellen.

Geeignete Darstellungsformen nutzen:

Sachverhalte fachsprachlich und strukturiert darstellen, auf Beiträge anderer sachgerecht eingehen, Aussagen sachlich begründen.

Darstellungsformen selbstständig auswählen und nutzen:

Darstellungsformen sach- und adressatengerecht auswählen und reflektieren, auf angemessenem Niveau begrenzte Themen diskutieren.

Bewertung

Vorgegebene Bewertungen nachvollziehen:

Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse benennen, einfache, auch technische Kontexte aus physikalischer Sicht erläutern.

Vorgegebene Bewertungen beurteilen und kommentieren:

Den Aspektcharakter physikalischer Betrachtungen aufzeigen, zwischen physikalischen und anderen Komponenten einer Bewertung unterscheiden.

Eigene Bewertungen vornehmen:

Die Bedeutung physikalischer Kenntnisse beurteilen, physikalische Erkenntnisse als Basis für die Bewertung eines Sachverhalts nutzen, Phänomene in einen physikalischen Kontext einordnen.

Tabelle 1.2.: Die Kompetenzbereiche der deutschen Bildungsstandards mit den jeweiligen Anforderungsbereichen.

PISA

Verstehen naturwissenschaftlicher Konzepte

“Im Blickpunkt steht weniger, inwieweit Schülerinnen und Schüler über Kenntnisse verfügen oder Faktenwissen reproduzieren können.[...] Die Testaufgaben [...] verlangen [...] vor allem, dass sie [die SuS] Beziehungen herstellen, Phänomene oder Ereignisse erklären und Vorhersagen über Veränderungen treffen.”

Verständnis der Besonderheit naturwissenschaftlicher Untersuchungen

“... umfasst die Fähigkeit, Fragestellungen zu erkennen, die naturwissenschaftlich untersucht werden können, und das Wissen über die Anforderungen an solche Untersuchungen. Weitere Aspekte betreffen das identifizieren von Daten, die benötigt werden, um eine Behauptung oder Erklärung zu überprüfen.”

Umgehen mit Evidenz

“... bezieht sich auf die Fähigkeit, naturwissenschaftliche Daten und Befunde als Belege für Behauptungen oder Schlussfolgerungen zu verwenden.”

Kommunizieren naturwissenschaftlicher Beschreibungen und Argumente

“... umfasst die Fähigkeit, anderen Personen Beschreibungen, Argumente oder Erklärungen mit naturwissenschaftlichem Gehalt verständlich und zutreffend mitzuteilen. Hierzu zählt unter anderem [...], eine Argumentation zu entwickeln, die für eine bestimmte Zielgruppe klar und angemessen formuliert ist.”

KMK-Bildungsstandards

Fachwissen

“Physikalische Phänomene, Begriffe, Prinzipien, Fakten, Gesetzmäßigkeiten kennen und Basiskonzepten zuordnen.”

Erkenntnisgewinnung

“Experimentelle und andere Untersuchungsmethoden sowie Modelle nutzen”

Bewertung

“Physikalische Sachverhalte in verschiedenen Kontexten erkennen und bewerten.”

Kommunikation

“Informationen sach- und fachbezogen erschließen und austauschen.”

Tabelle 1.3.: Beschreibungen der Kompetenzbereiche bei PISA und in den deutschen Bildungsstandards im Vergleich

Die KMK folgte in der Konzeption der Standards weitgehend der Klieme-Expertise: So besteht ein starker Bezug zum Konzept der *scientific literacy* und die Präambel nimmt explizit auf die *opportunity-to-learn*-Standards der NCTM Bezug, es werden aber *performance-standards* definiert, die Mindestanforderungen vorgeben, aber auch das ganze Leistungsspektrum darüber beschreiben. Die in US-amerikanischer Lesart so prominente "Kultur-bezogene" und gesellschaftsrelevante Rolle von Naturwissenschaft und die Auseinandersetzung mit ihrem besonderen Charakter tritt ebenso in den Hintergrund wie die Einbeziehung interdisziplinären Wissens, sozialer oder personaler Kompetenzen etc.

Im direkten Vergleich zwischen der Konzeption des PISA-Tests und den Bildungsstandards (Tabelle 1.3, S. 26) erscheinen die Kompetenzbereiche letzter zum Teil verengt oder weniger spezifisch naturwissenschaftlich:

- Im Bereich Fachwissen dominieren in den Bildungsstandards reproduzierende Anforderungen, PISA stellt eher auf konzeptionelles Verständnis ab,
- im Bereich Erkenntnisgewinnung der Bildungsstandards geht es um die "Nutzung" von Experimenten und Modellierung, PISA betont eher das angemessene "Problematisieren",
- im Bereich Bewertung der Bildungsstandards klingt eine "gesellschaftliche Bewertung" an, die in PISA nicht verankert ist ("Umgehen mit Evidenz").

Daneben taucht ein recht grundsätzlicher Problemkreis auf: Die Standards formulieren inhaltlich, was (etwa in Hinblick auf PISA-Studien) von den Schülern gekonnt werden müsste. Damit ein solches Ziel erreicht wird und diese Formulierungen nicht bloße Absichtserklärungen bleiben, muss zum einen möglich sein, auf Schulebene und im Schulalltag Prüfungen zu konstruieren, die gegenüber den geforderten Kompetenzen valide sind (oder Prüfungsstrategien zur Verfügung stehen, die Analoges leisten – die von der KMK mitgelieferten Beispielaufgaben überzeugen jedenfalls in dieser Hinsicht keineswegs), es müsste darüber hinaus schulintern und gegenüber der Schulaufsicht transparent werden, was die Schüler tatsächlich können (Schulevaluation bzw. -monitoring), und es bedarf einer Kultur der Unterrichts- bzw. Schulentwicklung mit dazugehöriger Infrastruktur bzw. Ressourcen.

Kompetenzstrukturmodellierung und die aktuelle empirische Lehr-Lern-Forschung

Dieser Problemkreis begründet somit eine der zentralen Forschungsfragen der aktuellen Fachdidaktik: Wie sieht eine empirisch validierbare (und auf Schulebene erfassbare), an den Bildungsstandards orientierte Kompetenzstruktur aus, wie wird

empirisch erhebbare Kompetenzerwerb abgebildet? Keine Modellierung der Kompetenzstruktur kommt ohne Grundannahmen dazu aus, worin die Sachstruktur besteht und wie auf kognitiver Ebene Kompetenzerwerb aussieht bzw. wie dieser strukturiert ist. Die Bildungsstandards rekurren mehr oder weniger auf Bybees Konzept der naturwissenschaftlichen Grundbildung, der *scientific literacy* (Bybee, 1997).

Eine empirische Bestätigung für diese spezielle Strukturierung steht dennoch aus, unter anderem auch deshalb, weil kein hinreichend zuverlässiges Verfahren bekannt ist, faktische Aufgabenschwierigkeit und normativ gesetzte Kompetenzstufen einander zuzuordnen – dies ist gewissermaßen das Grundproblem des aktuellen Diskurses um Kompetenzmodellierung und Kompetenzentwicklung. Ein Gutteil der aktuellen Forschungsbemühungen (Schecker & Parchmann, 2006; Theyßen, Schmidt, Einhaus & Schecker, 2006; Schmidt, 2008; Schreiber, Theyßen & Schecker, 2009) zielt darauf auf einen Prozess analog zur Abbildung realer Leistungsspektren von Schülern auf die normativ gegebene Kompetenzstufen bei PISA (Prenzel, Rost, Senkbeil, Häußler & Klopp, 2001b). Ein weiterer Schwerpunkt ist die Ausdifferenzierung von einzelnen Kompetenzen bzw. Kompetenzaspekten (Hammann, 2004; Kulgemeyer & Schecker, 2009a, 2009b) der Standards. Im Jahr 2012 soll das Institut für Qualitätssicherung im Bildungswesen, IQB, eine erste bundesweite Bestandsaufnahme des Entwicklungsstandes der Kompetenzen deutscher Schüler vornehmen.

Eine grundlegend andere Strategie, das Grundproblem der Kompetenzmodellierung zu lösen, ist, die Kompetenzstufen kriterienbezogen zu definieren, so dass sich die Aufgabenschwierigkeit *a priori* angeben lässt. Eine solche Konstruktion erfordert dann aber Annahmen darüber, wie der individuelle Lernprozess strukturiert ist. Von Bedeutung ist hier insbesondere der durch die Forschergruppe Naturwissenschaftlicher Unterricht rund um Hans E. Fischer und Elke Sumfleth (Uni Essen-Duisburg) verfolgte Weg, die Sachstruktur von Schulphysik und Schulchemie zu systematisieren und etwa Kompetenzstufen im Bereich Fachwissen als Komplexitätsstufen der behandelten Probleme zu definieren (Neumann, Kauertz, Lau, Notarp & Fischer, 2007). Dieser Ansatz ist eingebettet in ein umfassendes Programm der Schul- und Unterrichtsevaluation sowie der Schaffung einer kohärenten curricularen Struktur, die als Wissensstruktur das Material für eine Testkonstruktion – durchaus auch auf der Ebene von Schule bzw. konkretem Unterricht – darstellt (H. Fischer, Glemnitz, Kauertz & Sumfleth, 2006; Sumfleth, Fischer, Glemnitz & Kauertz, 2006). Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass sich ein solches Programm durchaus als konsequente Entwicklung aus dem oben geschilderten “Problemkreis Bildungsstandards” legitimieren lässt, auch wenn damit das ursprüngliche Ziel einer *individuellen, vielfältigen und lebensweltlich ausgerichteten Kompetenzorientierung* möglicherweise aus dem Blick kommt.

Die Kompetenzstrukturmodelle des “Bybee-Typs”, aber auch die eher strukturtheoretisch orientierten Ansätze der Essener Gruppe stellen dabei das Problem in

Hinblick auf einen zugrundeliegenden Korpus von zu vermittelndem, deklarativem (und in gewissem Umfang auch prozeduralem) Wissen. Diese Position deckt das reproduzierend-funktionale Spektrum von fachspezifischen Fähigkeiten ab, hat allerdings Schwierigkeiten, konzeptuelle und prozedurale Fähigkeiten zu integrieren. Weiterführende Fragen wie “Wie sehen Verstehens- und Transferprozesse im Kompetenzbereich Fachwissen aus?” oder “Welche lerntheoretischen Ansätze beschreiben hier dem Kompetenzerwerb?” sind innerhalb der fachdidaktischen Debatte zum Kompetenzbegriff bislang nur anfänglich und eher diskursiv bewegt worden (Rehm, 2006) – vgl. auch Kapitel 6.

Umfangreiches und spannendes empirisches Material gerade zur Frage der konzeptuellen und prozeduralen Fähigkeiten ist um die und nach der Jahrtausendwende von Gunther Lind, Peter Reinhold und Gunnar Friege erarbeitet worden (Friege & Lind, 2003; Reinhold, Lind & Friege, 1999; Friege, 2000). Die Idee war dabei, für einen begrenzten Bereich der Schulphysik die Problemlösefähigkeit anhand der Leistung bei komplexen schriftlichen Rechenaufgaben zu bestimmen und zu anderen Formen des Wissens, etwa rein deklarativem Wissen (v. a. Wiedergabe von Formeln), aber auch der Struktur von *concept maps* bzw. dem Vorhandensein von Problemlöseschemata in Beziehung zu setzen. Diese Arbeiten zeigen vielfältige Korrelationen zwischen der Problemlösefähigkeit mit deklarativem Wissen (auch zwischen verschiedenen Gebieten der Physik!) und dem Vorhandensein von Lösungsschemata. Solche Zusammenhänge lassen sich vor dem Hintergrund des zum Erfolg jeweils notwendigen vernetzten Fachwissens plausibel deuten. Schwieriger scheint dagegen die Beziehung zwischen der durch Begriffslandkarten erfassten Struktur des Wissens und der Problemlösefähigkeit.

Einen guten Überblick über den aktuellen Stand dieses Themengebietes gab die Schwerpunkttagung vom 12. bis zum 14.2.2009 in Basel. Im Bericht (Labudde et al., 2009) kommen aktuelle Forschungsprojekte ebenso zur Darstellung wie die Discrepanzen zwischen einer bildungspolitisch orientierten Tendenz, der Vermessung und Modellierung von Lernerkompetenzen und einer an der Schulpraxis orientierten Ausrichtung auf Interventionsstudien.

“Verstehen von Physik” als Thema: Wege und Zugänge

Lehren und Lernen von Physik im institutionellen Rahmen von Schule ist ein Thema, das sich erst seit gut 100 Jahren stellt und damit bedeutend jünger als die Fachwissenschaft selbst – die allerdings in diesen 100 Jahren selbst eine spektakuläre Entwicklung gemacht hat. Man kann sich zudem klarmachen, wie die Praxis des Lehrens und Lernens vor dieser Zeit ausgesehen hat: neben einer den privilegierten Schichten vorbehaltenen Privatlehr-Kultur⁵ und den kirchlich bzw. administrativ-militärisch ausgerichteten höheren Schulen, an denen sich die Naturwissenschaften neben dem kulturwissenschaftlich-humanistischen Kanon nur zögerlich etablierten⁶, bestand der Stoff gewöhnlicher Schulen weitgehend aus dem Vermitteln von Schreiben, Lesen und Rechnen und Religionsunterricht. Höhere *Bildung* war im 19. Jahrhundert (wie bereits bei den Römern) weitgehend eine Sache der Literaturkenntnis. Und auch Naturwissenschaft hat zur Zeit Goethes noch starke Traditionen des Beschreibens und der Exegese.

Mit der enormen gesellschaftlichen Bedeutung der Naturwissenschaften, die ihnen im Zuge der technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung über das 19. Jahrhundert hinweg zuwuchs, begründete sich auch eine zentrale Rolle als Bildungsgegenstand. Die Sprengkraft der Naturwissenschaften gegenüber dem traditionellen Paradigma von Bildung lag dabei im dezidiert “anti-autoritären” Charakter des naturwissenschaftlichen Diskurses: *Wahrheit* konnte nicht mehr durch Tradition oder Hierarchie begründet werden, sondern *nur* durch Einsicht und Nachvollzug universeller Gesetzmäßigkeiten. Die traditionellen Bildungsmodelle, die stark personalisierte Beziehung zu einem Meister, das Memorieren und Kommentieren, die Beschränkung auf einen engen Kanon von Inhalten – all das ist in Frage gestellt. Was stattdessen in den Vordergrund tritt, ist das jeweils zeitgenössische Verständnis davon, wie Lehren und Lernen *überhaupt* funktionieren. Von einem “jeweiligen Verständnis” ist zu sprechen, weil sich auch dieses Verständnis im selben Zeitraum dieser letzten 100 Jahre mehrfach grundlegend gewandelt hat. Folgende Motive sind dabei prominent:

- Ein behaviouristisch geprägtes Verständnis von Lernen als *Verhaltensände-*

⁵Die Begegnung mit engagierten Studenten der Naturwissenschaften, die als Privatlehrer auftraten, hat deren Schüler immer wieder ausgesprochen inspiriert, vgl. die Memoiren von Vladimir Nabokov – der nicht nur Literat, sondern auch ein bedeutender Schmetterlingsforscher gewesen ist (Nabokov, 1999).

⁶Der Primaner Werner Heisenberg verbrachte seine Zeit als republikanischer Milizionär nach eigenem Bekunden mit der Lektüre von Plato (Heisenberg, 2002), Freeman Dyson musste noch in den 1930er Jahren für seine Aufnahme am Winchster College vor allem sehr profunde Kenntnisse in Latein und Altgriechisch nachweisen. . .

rung, die durch Stimuli der Umgebung (also etwa "Strafe" oder "Instruktion") und eventuelle interne Parameter) gesteuert wird,

- ein informationstheoretisch geprägtes Verständnis von Lernen als adaptivem Phänomen *kognitiver Strukturen*,
- ein psychologisch geprägtes Verständnis von Lernen als individueller, *konstruktiver Prozess* der Erweiterung bzw. Ausgestaltung von Persönlichkeit und Weltzugang.

Vergleichsweise geringen Einfluss auf die konventionelle Konzeption von Lehren und Lernen hat die Tradition der Gestaltpsychologie. Insofern der Zugriff auf "sinnhafte Ganzheiten" oder Verständnis als "strukturiertes Gesamtbild von etwas" in Betracht kommen, liegen hier aber mögliche Bezüge (vgl. Kapitel 5 und den untenstehenden Abschnitt über Phänomenographie und *awareness*).

Physiklehren und -lernen lassen sich also nur unter zweierlei Voraussetzungen in den Blick nehmen: Es muss ein bestimmtes, mehr oder weniger deutliches Bild von Physik geben, aber andererseits auch eine Vorstellung davon, wie das Nachvollziehen dieses Bildes aussehen sollte bzw. welche Ziele damit verfolgt werden. In diesem Abschnitt sollen wesentliche Arten dargestellt werden, innerhalb der Fachdidaktik diese Voraussetzungen zu konkretisieren: Die historische bzw. genetisch-exemplarische Blickrichtung, den Ansatz, Physik als Kulturtechnik zu begreifen, die Modellmethode, konstruktivistische Ansätze, Phänomenographie und die Typologisierung von Wissen.

Historisch, genetisch und exemplarisch ausgerichtete Zugänge zur Physik

Die Geschichte der Physik ist ein spannender Teil der Geschichte der westlichen Kultur, eng verknüpft mit herausragenden, allgemein bekannten Persönlichkeiten wie Galilei oder Einstein, oder mit technologischen Entwicklungen wie Dampf- oder Atomkraft, die das Gesicht unserer Zivilisation tief geprägt haben. Dieser Umstand legt nahe, Geschichte der Physik als Inhalt auch im Rahmen des naturwissenschaftlichen Unterrichtes ernst zu nehmen. Zwei Annahme lassen einen solchen Zugang attraktiv erscheinen:

- Im historischen Kontext interessieren sich Lerner für Physik, die sich im konventionellem Kontext nicht für Physik (oder Naturwissenschaft überhaupt) interessieren – der historisch-motivierende Zugang.

- Das Nachzeichnen von Entwicklungslinien der Konzeptualisierung unter historischen Gesichtspunkten kann ein Weg sein, auch das individuelle Verständnis von Lernern über kritische Punkte hinweg zu führen – der historisch-genetische Zugang.

Die erste Annahme lässt sich durch zusätzliche Interessenanreize begründen, die durch den Einbezug von Biographien (Identifikationspotenzial u. ä.) bzw. Geschichte ergeben. Die zweite Annahme nimmt das Potenzial für persönliche Konzeptwechsel in den Blick, die sich ergeben, wenn der jeweilige Inhalt nicht *statisch* dargestellt wird, sondern als *Entwicklungsgeschehen* (mit)vollzogen wird. In beiden Fällen ergibt sich Gelegenheit für die Anwendung methodischer Formen, die sonst im Physikunterricht eher selten vertreten sind, etwa der Blick auf historische Quellen und *narrative* Momente im Unterricht (Kasper, 2007b). Ein weiteres mögliches Motiv, die Bedeutung von Wissenschaftsgeschichte für das Lernen über die spezielle “Natur der Naturwissenschaften” (*nature of science*) wird erst im folgenden Abschnitt unten berührt werden.

Dieser genetische Blick auf Physik-Lernen erscheint bereits im 19. Jahrhundert bei Pädagogen wie Herbart, in dessen Denken Motive wie der notwendige individuelle Nachvollzug der gesamtgesellschaftlichen Hauptentwicklungsstufen eine wichtige Rolle spielt – ein Motiv, das in der bildungstheoretischen Diskussion bis in 20. Jahrhundert nachgeklungen hat. Um die Jahrhundertwende widerspricht John Dewey einer solchen Haltung (Dewey, 1902): Wesentlich ist für ihn, dass der Antagonismus von individuellen und gesellschaftlichen Interessen und Bedürfnissen nicht auf Kosten des Kindes ausgetragen werden darf, sondern der junge Mensch über eigene Erfahrungen (“*learning by doing*”) zu authentischen Bildungsmomenten kommt. Wenn heute auf “genetischen Unterricht” Bezug genommen wird, wird dabei vor allem die Stimme von Martin Wagenschein hörbar: Wagenschein unternimmt es, den geschilderten Gegensatz zwischen Vermittlung fachlich-unpersönlichen “Rahmenwissens” und individuellen und erfahrungsbasierten Lernwegen zu lösen, indem genetisches Unterrichten zusammen mit zwei weiteren programmatischen Forderungen gedacht wird: dem “sokratischen” Gespräch und dem exemplarischen⁷ Unterrichtsansatz.

Insofern ein genetischer Ansatz in der didaktischen Diskussion als *methodische Variante* verstanden wird, wird er gerne auf ein “Vorgehen in kleinen Schritten” reduziert (Bleichroth et al., 1999, S. 306). Wagenschein selbst stellt das Konzept eines “genetischen Lehrens” dem eines “darstellenden Lehrens” gegenüber (Wagenschein, 1968), und betont ein ganz anderes Merkmal: anders als beim darstellenden Vorgehen wird das Sachproblem, das die Fachwissenschaft löst, und die Methoden und Denkfiguren, die zu dieser speziellen Lösung führen, nicht vorausgesetzt, sondern zusammen mit den Lernern “ent-deckt”. Methodisch gibt Wagenschein dafür eine

⁷Lat. *ex-emplum* ist “das aus einer Menge gleichartiger Dinge Gegriffene”.

Reihe klassischer Anregungen, etwa den, das Problematisieren durch einen Moment der “Exposition” (an ein Sich-Wundern oder Staunen) zu beginnen, die “Wirklichkeit”, also sein Vorhandensein oder seine Wiederauffindbarkeit im wirklichen Leben der Lerner, des Gegenstands zu bewahren, oder eine emotionale und motivationale Verbindung zum Lerngegenstand zu fördern. Wagenschein denkt das “Werden”, das in “genetisch” anklingt, konsequent als ein gemeinsames Werden der Darstellung der Sache und der Bildung (des Verständnisses, der Persönlichkeit, des Horizontes usw.) des Lerners – die “*formatio*”. Es geht dabei nicht nur um ein Vermeiden zu großer Darstellungsschritte, sondern mehr noch um einen konsequenten Perspektivwechsel weg vom Fachhorizont (mit allen Überschaumöglichkeiten) hin zum Erkenntnishorizont des Lerners. Der Sache nach ergibt sich dabei – ähnlich wie bei der historischen Fallstudie – als Unterrichtsformat eine Art Lehr- oder Studiengang. Die Forderung, dass in so einem Rahmen auch die Art der Gesprächsführung besonderer Aufmerksamkeit bedarf, ergibt sich ebenfalls aus der Sache: die Rolle des Lehrers ist mehr eine fragend-leitende als eine instruierende. Wagenschein prägte für diesen Aspekt des genetischen Lehrens und Lernens das Bild der “sokratischen” Gesprächsführung.⁸ Ein solches Gespräch ist folgendermaßen zu charakterisieren (J. Leisen zitiert nach (Mikelskis, 2007)):

- Jeder Teilnehmer äußert nur seinen eigenen Überlegungen, die Meinungen von Autoritäten gelten nicht als Argument.
- Das Thema wird vom Konkreten ausgehend und allmählich abstrahierend untersucht.
- Die wirkliche Verständigung zwischen den Teilnehmern in der Sache hat Priorität vor dem schnellen Finden von “Ergebnissen”.
- Es wird Schritt für Schritt vorgegangen unter Beteiligung aller Teilnehmer.
- Zu den im Gesprächsverlauf aufgestellten Behauptungen, Vermutungen und Fragen soll jeweils das Für und Wider begründet und geprüft werden.
- Die Teilnehmer bemühen sich um Urteile, denen alle zustimmen können.

Exemplarisches Unterrichten, also die Idee, *ein* bestimmtes Thema mehr oder weniger gründlich und ausführlich *stellvertretend* für ein Themengebiet durchzunehmen, ergänzt ein solches Vorgehen, indem es einerseits die thematische Kohärenz

⁸Es ist eine Frage, wie ernst diese Bezeichnung genommen werden will: Sokrates’ Motto “*Ich weiß, dass ich nicht weiß*” wird auch für Wagenschein kaum ein glücklicher Ausgangspunkt fürs Unterrichten gewesen sein. Was aber sicher anklingt, ist die Methode des leitenden Fragens und der genuinen Einsicht, die jeweils der Bewusstseinstufe des Gegenübers entspricht.

des genetischen Lehrgangs betont, andererseits den geschilderten Perspektivwechsel problemorientiert implementiert. Die Idee war nach dem zweiten Weltkrieg ursprünglich wohl aus der Forderung nach einer Verschlankung des Stoffumfangs in den Curricula der Oberstufe erwachsen – am “Tübinger Gespräch” zur Reform der Bildungspolitik beteiligten sich 1951 neben Wagenschein auch Eduard Spranger, Carl Friedrich von Weizsäcker, Walter Gerlach und andere (Wagenschein, 1951):

“Es hatten sich etwa 50 Hochschullehrer und Lehrer von Höheren Schulen, öffentlichen wie privaten, versammelt. Das Thema: die zwei Gefahren, die heute am ernstesten Schule wie Hochschule bedrohen: *Stoffüberschüttung* und *Prüfungsunwesen* [Hervorhebung M. W.]”

Die dabei verabschiedete Resolution betonte neben der Gefahr eines “Erstickens” der Oberstufe in Stofffülle, dass ein wirkliches Evidenzmoment – die Begegnung mit “ursprünglichen Phänomenen der geistigen Welt” – gerade am Einzelnen erlebt und durch die Anhäufung von bloßem Stoff verhindert wird. Diese *Opposition* von exemplarischem (Hermann Heimpel) und enzyklopädischem Lernen ist in der Folge durchaus breiter diskutiert worden (Scheuerl, 1958; Klafki, 1959). Wagenschein vertritt (Wagenschein, 1999a) für die Physik ein Konzept, das, aufbauend auf einem in der Mittelstufe zu verankerndem Gesamtbild der Physik, an einzelnen Themen “exemplarische Tiefenbohrungen” vornimmt, bei denen am jeweiligen Thema zugleich das Ganze des Fachs erfahrbar wird. Er verliert dabei eine Systematik der Physik keineswegs aus den Augen (Wagenschein, 1953): es ist gerade Merkmal eines exemplarischen Stoffs, dass die Auseinandersetzung mit ihm auch auf den großen Zusammenhang innerhalb des Fachs verweist (der dadurch für den Lerner erst erleb- und nachvollziehbar wird).

Als Beispiel moderner Vertreter dieser didaktischen Richtung sei zunächst Walter Köhnlein genannt (Köhnlein, 1982, 1998), der Wagenscheins Anliegen im Grunde genommen referiert und im Hinblick auf modernere didaktische Fragestellungen interpretiert bzw. für eine ungebrochene Aktualität der Wagenscheinschen Ideen eintritt. Auch der Erziehungswissenschaftler Horst Rumpf kreist in vielen seiner Texte um Wagenscheinsche Motive, vgl. etwa (Rumpf, 2004, 2006). Eine spannende kritische Auseinandersetzung mit Wagenscheins Ansatz führt Bruno Redeker, der den Finger auf die inkonsistenten erkenntnistheoretischen Voraussetzungen Wagenscheins legt und zwar nicht die Gangbarkeit der von Wagenschein beschrittenen pädagogischen Wege bestreitet, aber deren *Ungebrochenheit* oder Selbstverständlichkeit (Redeker, 1995):

“Unsere Kinder sind so wenig wie der ‘Indianerknabe’ ‘auf dem Weg zur Physik’, noch berechtigt irgend etwas zu der Hoffnung, das lebensweltliche Wissen etwa um die Bedingung eines jeden Geschehens durch

ein ganzes Geflecht von Ursachen [...] 'lichte' sich auf ganz natürliche Weise zum Denken von Kausalitäten im Sinne neuzeitlicher Physik. Ein ernstes Bemühen dagegen, in 'Kontinuität' aus dem 'volkstümlichen' oder 'ursprünglichen Denken' heraus zum 'Verstehen' der Physik zu führen, macht, sofern das Bemühen um Kontinuität erfolgreich ist, ein Verstehen der Physik geradezu unmöglich."

An dieser Stelle setzt auch Beate Nölle für den Mathematikunterricht an (Nölle, 1986, 2007), wenn sie das Motiv des "Aufweises" (Wyss, Bühler, Liechti & Perrin, 1995) – als einer für das Verstehen notwendigen Ergänzung zum "Beweis" – in das Wagenscheinsche Ideengebäude integriert: Wie beginnt die fachlich-systematische Behandlung eines noch alltäglich-lebensweltlichen Problems?

Über seine konkreten inhaltlichen und methodischen Standpunkte und Anregungen hinaus liegt die Bedeutung Wagenscheins auch in der *Art* seines pädagogischen Denkens: dass "Verstehen" (und nicht etwa "Können" oder "Wissen") der Ausgangspunkt fruchtbaren didaktischen Denkens sein kann, hat er nicht nur überzeugend vertreten, sondern auch *vorgelebt*. Er hat damit die Didaktiker-Generation, die ihm begegnet ist, aber auch deren Schüler bis heute inspiriert, vgl. (Buck & Rehm, 2003; Buck, 2002; Buck & Mackensen, 2006; Rehm & Murmann, 2007). Seine Lehrgänge und das Konzept genetisch-exemplarischen Lehrens haben eine große Nähe zum Format der "physikalischen Expedition", wie es hier und in (Theilmann, 2006a) vertreten wird, doch gibt es auch entscheidende Differenzen – Wagenschein hat als Pädagoge "genuin phänomenologisch reagiert" (Horst Rumpf), aber nicht als Naturwissenschaftler.

Wovon handelt Naturwissenschaft? Und wozu wird sie gelernt?

Naturwissenschaft ist seit mindestens 200 Jahren sozio-ökonomisch und spätestens seit der Digitalisierung auch kulturell der (oder einer der) "Schlüssel zur Moderne". Sie bestimmt dabei nicht nur allgemein den Horizont des Wissens und der Machbarkeit, sondern es werden auch Rationalität und Mündigkeit des Einzelnen abgeleitet. Diese kulturelle Sonderstellung führte in den letzten 50 Jahren dazu, dass auch die *Nature of Science*, die "Natur der Naturwissenschaften" selbst ein legitimes bis wichtiges Thema innerhalb des naturwissenschaftlichen Unterrichts geworden ist. Dabei spielen vor dem geschilderten Hintergrund Inhalte aus wissenschaftsphilosophischem, -soziologischem, -historischem Umfeld und allgemein psychologische Gesichtspunkte eine Rolle: McComas und Olson (1998) identifiziert mehrere Dutzende "Einsichten, Aussagen und Annahmen", die in verschiedenen bildungspolitischen Rahmen zum Konstrukt *Nature of Science* beitragen, etwa "*Scientific knowled-*

ge is tentative”, *“Science relies on empirical evidence*”, *“Scientist require replicability*” oder *“Scientist must be open to new ideas*”. Höttecke (2007) betont die Vorläufigkeit einer Eingrenzung des Themas und gibt eine umfangreiche Liste möglicher Aspekte, darunter

- Modell- bzw. kritische Hypothesenbildung,
- der Umgang mit (bzw. die Herstellung von) empirischer Evidenz, Experimentieren und Schlussfolgern,
- Motive und Ziele der Naturwissenschaften und Elemente der Wissenschaftstheorie,
- Relativität naturwissenschaftlichen Wissens oder
- die Kultur (kritischer) Zusammenarbeit der Erkenntnissuchenden.

Neben der Auseinandersetzung mit *Scientific Inquiry* in diesem Zusammenhang gab es in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts einen didaktischen Diskurs um die sozio-ökonomische Rolle von Naturwissenschaft. Eine dritte, unabhängige Linie ist die erkenntnistheoretisch motivierte Fundamentalkritik am Konzept einer *Naturwissenschaft*, die von einer ganz anderen Seite her an phänomenologische Motive anschließt. Dieser Abschnitt soll diese drei Aspekte kurz darstellen.

Es ist im Grunde genommen konsequent, wenn vor diesem Hintergrund die *“Unternehmung Naturwissenschaft”* nicht mehr als konkreter Satz von Inhalten gedacht wird, sondern als spezifischer Prozess des Welterklärens und -deutens. So fordert der Standard A der *National Standards for Science Education* der US-amerikanischen *National Academy of Sciences* (Science Education Standards, o.J.) im ersten Satz *“Teachers of science plan an inquiry-based science program for their students.”*. Standard D formuliert

TEACHING STANDARD D: Teachers of science design and manage learning environments that provide students with the time, space, and resources needed for learning science. In doing this, teachers

- *Structure the time available so that students are able to engage in extended investigations.*
- *Create a setting for student work that is flexible and supportive of science inquiry.*
- *[...]*

Die Autoren sehen darin einen Rahmen, der “ein Schritt über ‘Wissenschaft als Prozess’ (bzw. die Vermittlung wissenschaftlicher Methoden wie Beobachten, Schlussfolgern oder Experimentieren) hinaus” geht (Science Education Standards, o.J., Kapitel 6). Sie haben den (oder einen) “Prozess der Wissenschaft” im Blick, in dem sich wissenschaftliche Methoden und Wissen zu einer Praxis naturwissenschaftlichen und kritischen Denkens verbinden. Die Nähe, aber auch der Gegensatz zum genetisch-exemplarischen Zugang zu Physik ist dabei unübersehbar: Einzelne Untersuchungen stehen stellvertretend für Naturwissenschaft (und Wissenschaftlichkeit), aber es wird nicht mehr versucht, die Gegenstände der Naturwissenschaft mit dem Lerner aus einer für gegeben angenommenen Nachvollziehbarkeit abzuleiten, sondern der Lerner wird auf einen bestimmten, eben keineswegs selbstverständlichen Arbeits- und Denkstil “eingeschworen”. Dieser Stil, die *Scientific Inquiry*, wird selbst zum Thema, an konkreten Fragestellungen geübt oder studiert und zum Maßstab für die Gültigkeit von Aussagen. Zugleich haben sich die Struktur, die Rahmenbedingungen und die Praxis des Unterrichts neu auszurichten: Der Lehrer bekommt mehr und mehr die Rolle eines Mediators in einem geführten Prozess. Und ebenfalls besteht eine offensichtliche Nähe zum Format der “physikalischen Expeditionen”, so wie sie hier beschrieben werden. Naturwissenschaft wird als *Prozess* verhandelt, der charakteristische experimentelle und theoretische Praktiken einschließt. Substantielle Unterschiede ergeben sich im Verhältnis zu den adressierten Formen von Evidenz und im angestrebten Verhältnis zur Natur – Weiterführendes dazu im Folgenden, aber auch im Abschnitt “Zauberwort Exploration” ab Seite 56.

Die Bestimmung davon, was Naturwissenschaft ist, ist dabei selbstverständlich kein Selbstzweck: Sie ist die Vorstufe für Technologie und damit Mit- oder Vorbereiter für gesellschaftliche Bedingungen und Wertschöpfung. Wenn man es nicht als selbstverständlich nehmen will, dass dieselbe technokratische Gesinnung, die eine Welt voller existenzieller ökologischer und ökonomischer Sorgen geschaffen hat, uns diese Sorgen auch wiederum löst, entstehen andere, weniger konformistische Sichtweisen: Wie funktioniert kritische, naturwissenschaftliche Urteilsbildung, wie sehen naturwissenschaftlich begründete Entscheidungen aus, wie wird Naturwissenschaft ethisch, ja sogar: muss Naturwissenschaft so sein, wie sie ist? Die konservative Art, darauf zu antworten, folgt der Linie Wolfgang Klafki (Klafki, 1996), dass Allgemeinbildung durchaus beinhaltet, sich mit den Zeitfragen auseinanderzusetzen, und das natürlich auch für den Physikunterricht gilt (Mikelskis, 2006b). Unter die “epochaltypischen” Problemstellungen zählt Klafki dabei auch die Frage der Verantwortbarkeit und Kontrollierbarkeit wissenschaftlich-technologischer Entwicklungen im Hinblick auf die ökologischen Folgen. Im Klima wachsender ökologischer Sensibilität der 80er und 90er Jahre des letzten Jahrhunderts spielten auf dieser Linie *umweltpolitische* Themen innerhalb der Curricula und in der fachdidaktischen Diskussion eine wichtige Rolle, vgl. die wegweisenden Arbeiten des IPN (Mikelskis, 1977a,

1977b, 1980; Duit, Häußler, Mikelskis & Westphal, 1995b; Marquardt-Mau, Mayer & Mikelskis, 1993). Neben der heute fest in Curricula und Materialien verankerten Auseinandersetzung mit Fragen rund um Themen wie "Energie" oder "Kerntechnik" bietet auch der Themenkreis *Climate Change* einen naheliegenden und spannenden Fundus hochgradig gesellschaftsrelevanter physikalischer Fragen – die didaktische Aufarbeitung hat auch bereits begonnen (Klimawandel vor Gericht, 2009).

Grundsätzlicher stellt sich die Frage nach der Beziehung von Physik bzw. Naturwissenschaft und Umwelt, wenn die deduktiv-quantitative Art des Naturerkennens selbst als Problem gesehen wird, etwa weil sie ihren Gegenstand immer schon als abstrahiert und auf utilitaristische Gesichtspunkte reduziert in den Blick nimmt. Messner, Rumpf und Buck (1997a) unterscheiden etwa fünf verschiedene Typen des Naturwissens, nämlich neben den offensichtlichen Kategorien des lebenspraktischen Umgangswissens ("Alltagswissen"), des systematischen Wissens moderner Naturwissenschaft und des verstehenden Wissens im Sinne Wagenscheins, also das Wissen darum, wie sich das systematische Wissen aus dem Alltagswissen ableiten lässt, zwei weitere Typen: das mimetisch-symbolische Wissen (als "fühlendes Wissen" darum, wie man als Mensch Teil des Kosmos ist) und das physiognomisch-portraithafte Wissen um Charakteristika und Kontexte des Gegenstands, die nicht durch Reduktion auf Modelle oder Schemata gewonnen werden, sondern sich evident, als "phänomenologische Profil" aus der ganzheitlichen Auseinandersetzung ergeben – beispielhaft ist dies z. B. am Thema "Wasser" ausgearbeitet worden (Soentgen, 1994; Schwenk, 1997). Diese verschiedenen Wissensformen entsprechen verschiedenen Arten des Naturzugangs und so unterscheidet Dahlmann etwa "antipathisches" und "sympathisches" Naturverstehen oder argumentiert gegen eine vereinseitigte Lesart von Kausalität (Dahlmann, 1998, 1999). Solche Überlegungen schließen zwar an die typisch didaktische Auseinandersetzung mit Alltagsvorstellungen, Interessen etc., führen aber weg von der impliziten Voraussetzung, dass die naturwissenschaftliche Perspektive letztlich eben doch der verbindlich-gültige Verständnisrahmen für Natur ist. "Verstehen" wird nicht mehr aus einem für gültig gehaltenem Diskurs abgeleitet, sondern entsteht im eigenverantwortlichen Ausgleich und Abwägen der verschiedenen Perspektiven.

Wenn Naturwissenschaft aber konsequent als spezielle *Praxis* gedacht wird, die mit Alltagspraktiken oder anderen speziellen Kulturpraktiken konkurrieren muss, entsteht Bedarf für eine Klärung der Frage, wie sich diese spezielle Praxis begründen und entwickeln lässt. Zwei Beispiele seien genannt: So entwickelt Peter Janich den Standpunkt "Erkennen als Handeln" konsequent als Dekonstruktion der Ansicht, Naturerkenntnis sei natürlich (Janich, 1992). Der Ausgangspunkt von Naturwissenschaft ist Technologie des Messens und Wiegens, das synthetische Moment sind *Handlungsziele*. Für die Physik skizziert er eine *Protophysik* (Janich, 1997), die Raum, Zeit und Materie praktisch erschließt. Für Jens Soentgen stellt sich das Problem der

Praxis nicht daraufhin, wie Mess-Praktiken zirkelfrei zu wissenschaftsmethodisch relevanten Inhalten führen, sondern er betont die Differenz von Praxis und abstraktem Grundkonzept: Beispielsweise *Stoff* ist eben in *keiner* (oder kaum einer) lebensrelevanten Praxis das, was aus chemischen Elementen besteht. Seine Buchreihe der "Stoffgeschichten" entwickelt folglich ein *Periodensystem des Alltags* aus Exkursionen in ebendiese lebensrelevanten Praktiken, und so wird beispielsweise das "Element Staub" beleuchtet, indem Techniker, Hygieniker, Restauratoren oder Psychologen zu Wort kommen (Soentgen & Völtzke, 2006). Für das im vorliegenden Buch verfolgte Projekt einer Schulphysik mit Exkursionscharakter ist damit ein Rahmen gesteckt, der Freiraum bietet, Naturwissenschaft eben als "gelebte Erkenntnispraxis" zu nehmen – was auch immer der epistemische Status der naturwissenschaftlichen Fachsystematik ist, die Praxis der naturwissenschaftlichen Untersuchung bestimmt nicht nur Grenzen und Gültigkeit ersterer, sondern auch Wert und Zweck derselben.

Die Modellmethode

Modellbildung ist seit dem 19. Jahrhundert eine zentrale Diskurstechnik der modernen Physik: Theoriebildung erfolgt nicht mehr unter dem Anspruch, absolute Wahrheiten zu verfolgen, sondern mit dem Ziel, eine funktionierende Weltbeschreibung zu schaffen. So formulierte Maxwell seine elektromagnetische Theorie anhand von Analogien zur Mechanik elastischer Medien – und diese Theorie wurde Anfang des 20. Jahrhunderts Ausgangspunkt für die spezielle Relativitätstheorie, die gerade die aufgrund experimenteller Befunde unhaltbar gewordene Annahme eines Trägermediums für elektromagnetische Erscheinungen (und die damit selbstverständlich verbundene Vorstellung absoluter Raum- und Zeitskalen) überwunden hat, vgl. Kapitel 8. Moderne physikalische Theoriebildung ist in Hinsicht auf die verwendeten Formalismen, das erkenntnistheoretische Umfeld, die Existenz konkurrierender Modelle und die Wechselwirkung mit der experimentellen Physik eine wahrhaft komplexe Aufgabe. Welche Bedeutung kann oder soll sie für Physikunterricht haben? Es ist an dieser Stelle ein Erreignis der Entwicklung des Themenfeldes *Nature of Science*, dass Bewusstsein dafür da ist, wie der Verzicht auf den Anspruch, wissenschaftliche Erkenntnisse spiegeln verbindlich *die* (oder eine) Wahrheit wieder, zugleich eine Offenheit für vorläufige oder konkurrierende *Deutungen* von Phänomenen impliziert. Wenn diese Besonderheit naturwissenschaftlichen Denkens Lehrgegenstand sein soll, kann das zwar im Prinzip geschehen, ohne dass Modellbildung ebenfalls zum Thema wird. Auf der anderen Seite ist die geschichtliche Entwicklung der Physik in bestimmten Bereichen zugleich eine Entwicklung von Modellvorstellungen – etwa in der Kosmologie oder auf dem Gebiet der Struktur der Materie –, und diese wiederum auf spannende Weise mit herausragenden Persönlichkeiten verknüpft, so dass eine genetische Perspektive durchaus Folgen von Modellvorstellungen (oder

konkurrierende Modellvorstellungen, vgl. die optischen Arbeiten von Newton und Huygens) in den Blick nehmen kann.

Aus der Warte historischer oder auf "Natur der Naturwissenschaften" ausgerichteteter Zugänge zur Physik gibt es also durchaus Argumente für eine Behandlung der physikalischen Modellbildung in der Schule. Allerdings gibt es auch Bedenken: So verweist Kircher (1995) auf die grundlegend verschiedenen Erkenntnisvoraussetzungen für Forscher und Laien und verneinen – offensichtlich begründet – im Grunde die traditionelle These, der Physikunterricht könne im Grunde der physikalischen Methode folgen. Ausgangspunkt für Schulphysik ist dann nicht ein Nachvollzug der Fachwissenschaft gewissermaßen "im Kleinen", sondern eine Orientierung an normativ zu setzenden Lernzielen und deren methodischen Implikationen. Modellbildung kann aus dieser Warte also nur *explizit* legitimiert werden – als ein Unterrichtsinhalt, dem bestimmte Werte zugeschrieben werden. Neben den bereits genannten Argumenten kommen hier etwa der kreative Charakter der Hypothesenbildung, die Überwindung naiv-realistischer Vorstellungen und die Anregung zur Erfindung oder Durchführung von Experimenten als Ziele in Betracht.

Im konkreten Unterricht trifft die wissenschaftliche Vorläufigkeit modellhaften Denkens dann eher selten auf ein gut ausgeprägtes Bewusstsein ebendieser Tatsache beim Lerner – insbesondere dann, wenn eine *Erklärung* von Phänomenen erwartet wird, ist die Modellierung schnell die *Beschreibung der Sache selbst*. Typische Brennpunkte solcher Verwechslungen sind der Atombegriff, mikroskopisch-atomistische Vorstellungen von elektrischem Strom oder die konkurrierenden Vorstellungen von Licht als Welle bzw. Teilchen: im fachlichen Kontext werden modellhafte Beschreibungen der Natur nicht als defizitäre Bilder genommen, deren Funktion die Beschreibung ganz bestimmter Aspekte des Phänomens ist, sondern als durchaus naiv-realistische zu nehmende Schilderung der Welt: Atome oder Elektronen sind kleine, wimmelnde Bälle. . . Empirische Untersuchungen zeigen dabei dies bzw. den Fall der unreflektierten Vermengung verschiedener Modellvorstellungen ("Hybridmodelle") eher als den Normalfall (Mikelskis-Seifert, 2002b; Horn, 2007).

Der Anspruch, durch systematisches Arbeiten mit *Beschreibungen* solche zutiefst unphysikalischen Vorstellungen zu vermeiden, gehörte dabei von Anfang an zu den Zielen modellfreier Naturzugänge, vgl. den Abschnitt auf Seite 11 ff. Die Modellmethode macht das dabei implizierte Methodenbewusstsein explizit, indem eine zusätzliche, *metakonzeptuelle* Ebene des Diskurses eingeführt wird (Abb. 1.1). Beim Lernen wird nicht nur das (idealtypischerweise sich als durch "zyklischen Wechsel" von verbesserter Beschreibung und genauerer Beobachtung fortentwickelnde) Wechselspiel zwischen Beschreibung bzw. Modellwelt einerseits und Experimenten bzw. Erfahrungswelt andererseits thematisiert, sondern auch ein Metastandpunkt, von dem aus der jeweils erreichte Stand des Verständnisses selbst kritisiert (oder kritisierbar) wird.

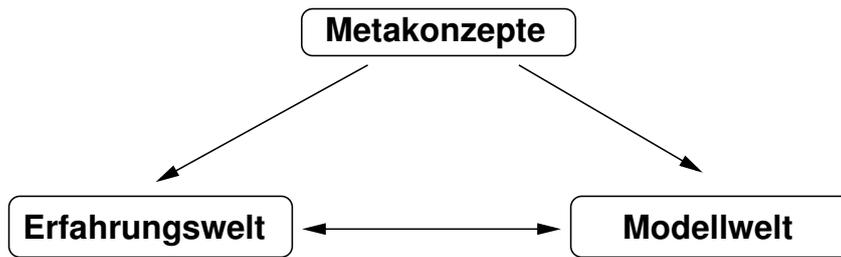


Abbildung 1.1.: Schema zur metakonzeptuellen Ebene des Lerndiskurses beim “Lernen über Modelle”.

Im konkreten Unterricht haben die Erfahrungen gezeigt, dass für erfolgreiches Lernen über Modelle zunächst sehr sorgfältig darauf geachtet werden muss, die vorhandenen Alltagsvorstellungen der Lerner zu integrieren. Darüber hinaus kann nicht erwartet werden, die geschilderte Verschiebung der Erwartungen der Lerner an die Realität physikalischer Erklärungen durch einmaliges Thematisieren zu erreichen – die Metakonzeptualisierung muss über Jahre hinweg geübt und durch entsprechendes Methodenbewusstsein seitens der Lehrpersonen begleitet werden (Mikelskis-Seifert, 2006a). Der konkrete Unterrichtsgang zeichnet sich entsprechend durch hierarchisierte Zielsetzungen aus, die ausgehend vom metakonzeptuellen Rahmen konkretes Experimentieren und Modellieren implementieren:

- Wissen über die relevanten physikalischen Problemstellungen und wesentlichen Modellbildungen, Wissen über die epistemologischen Anforderungen an das Arbeiten mit Modellen (*“modellübergreifendes Wissen”*),
- Wissen über die Gültigkeitsbereiche wesentlicher Modelle (*“Wissen zum Erklärungswert der Modelle”*),
- Wissen über funktionale Details konkreter Modelle (*“modellspezifisches Wissen”*).

Solche Unterrichtsziele sind heute fester Bestandteil moderner Curricula, vgl. etwa (RLP Physik Brandenburg, 2008).

Schülervorstellungen und Konstruktivismus

Die Neurowissenschaften haben in den letzten 100 Jahren eine “klassische” Beschreibung der Sehwahrnehmung formuliert, in der die physiologischen Elemente – Zäpfchen und Stäbchen, deren Vernetzung auf der Retina, komplexe Relaisstationen des seitlichen Kniehöckers (*corpus geniculatum laterale*) im Zwischenhirn bis hin zur

Abbildung auf den und der Vernetzung im visuellen Cortex – Stationen einer Informationsverarbeitungslinie sind, die zunehmend komplexere Strukturen in einem konvergenten Prozess *konstruieren*. Dieses Bild der Genese von Wahrnehmungsinhalten, bei dem aus “Rohdaten” zunächst (vereinzelte) Strukturelemente entstehen, die dann algorithmisch zu bedeutungsvollen Strukturen wie “Gegenständen” verarbeitet werden, ist zugleich ein naheliegendes und attraktives Vorbild für das Funktionieren von Lernen: Wenn wir schon aktiv am Zustandekommen von Wahrnehmungsinhalten beteiligt sind, müssen sich dann nicht auch höhere Erkenntnis, sprich: Lernvorgänge so oder so ähnlich organisieren? Der Gedanke bzw. die Problemstellung ist dabei nicht ausgesprochen modern: er findet sich als *homo-mensura*-Satz (“Der Mensch ist das Maß aller Dinge, der Seienden, dass sie sind, der Nicht-Seienden, dass sie nicht sind”) bereits bei den Vorsokratikern oder als “Meno’s Paradoxon” im idealistischen Gedankengut Platons (vgl. Kapitel 7).

Ehe genauer untersucht wird, welche Implikationen mit einer solchen Vorstellung verbunden sind, sei zunächst festgestellt, dass damit noch nichts über den ontologischen Status von “Welt” entschieden ist: ob eine verlässliche reale Welt existiert, ob ihr Charakter eher realistisch, empiristisch, idealistisch, dualistisch usw. erfasst wird, ist nicht präjudiziert. Die Frage ist aber, wie Wissen von dieser Welt zustande kommt. Wenn sich unser Weltinhalt im Wesentlichen aus dem ergibt, was wir selbst konstruieren, ist nicht klar, wie Veränderung dieses Weltinhalts – also *Lernen und Erkenntnis* – gedacht werden muss. Damit ist aber ein erstes konstituierendes Element schon impliziert: das *Vorverständnis* hinsichtlich der in Frage stehenden Sache beim Lerner bzw. Erkenntnissuchenden. Ein zweites Element ergibt sich, wenn realisiert wird, dass Lernen oder Erkenntnis im Allgemeinen nicht aus der Implementierung neuer “Konzepte” bestehen wird, sondern aus der Anpassung, Erweiterung und Ergänzung der bereits vorhandenen, also aus *Konzeptwechsel*. Typische Erfahrungen als Lerner und Lehrer verweisen uns dabei allerdings darauf, dass eine solche “Verschiebung (oder Entwicklung) des Verständnisses” nicht nur mit u. U. erheblichem Einsatz auf allen Seiten verbunden sind (der in etwa monoton mit dem “Abstand” von Ausgangspunkt und Ziel zunimmt) und dass solche Veränderungen nicht ohne weiteres nachhaltig sind. Mit anderen Worten: Lernen und Erkenntnis (und damit z. B. auch Verständigung...) werden kaum als linearer Prozess funktionieren, sondern müssen als *zyklischer Vorgang* angelegt werden. Schematisch führt dies zum Bild des *hermeneutischen Zirkels* (Abb. 1.2), der für einen “Konzeptwechsel” u. U. mehrfach durchlaufen werden muss. Daraus folgt ein spezifisches Bild der Lehr-Lern-Situation, das nicht nur die inhaltliche Dimension berücksichtigt, sondern auch emotionale und volitionale:

- Lernen heißt *Konzeptwechsel* (und nicht “Erwerb neuen Wissens”),
- Unterricht heißt, solche (u. U. multiplen) Konzeptwechsel unterstützen,

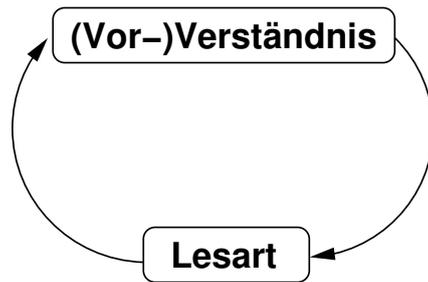


Abbildung 1.2.: Der “hermeneutische Zirkel”: Bestehendes Verständnis prägt die Art, Welt zu interpretieren, die resultierende Lesart des Erlebten wiederum das Vorverständnis, das der Welt entgegengetragen wird.

- Schüler brauchen dazu die entsprechende (aktiv-eigenverantwortliche) *Lernhaltung*,
- Lehren heißt nicht (nur) “Wissen mitteilen”, sondern braucht *Überzeugen*

Das aus Sicht der Fachsystematik im Grunde problematische jeweilige Vorverständnis der Schüler wird – politisch korrekt und wertfrei – oft als “Schülervorstellung” angesprochen. Die Erforschung von und die unterrichtsinterne Auseinandersetzung mit Schülervorstellungen ist ein wichtige fachdidaktische Disziplin. Aus konstruktivistischer Sicht ergeben sich klare unterrichtsmethodische Folgerungen, die oft als “Anknüpfen – Konfrontieren – Umdeuten” zusammengefasst werden, etwa:

- *Vertrautmachen* mit den Phänomenen
- *Bewusstmachen* der Schülervorstellungen
- *Einführen* in die physikalische Sicht
- *Anwenden* der neuen Sichtweise
- Rückblick auf den *Lernprozess*

Insbesondere wird also verlangt, dass der Lerner sich den Stand seiner eigenen Konzeptualisierung klar macht und letztlich immer mehr aktiv Verantwortung für die Entwicklung derselben übernimmt. Ersteres ist, ähnlich wie in der Modellmethode, ein metakognitives Element – die fraglose Selbstverständlichkeit des “Denkens über etwas” wird durchbrochen, der Lerner identifiziert sich immer weniger mit dem bloßen Inhalt seines Verständnisses, sondern immer mehr mit dem Akt des Verstehens-Wollens.

Eine konstruktivistische Sichtweise auf die Aneignung von Wissen oder Verständnis adressiert also zunächst die Notwendigkeit, das Lehrangebot mehr oder weniger systematisch auf die Möglichkeiten des Lernalers, dieses auch anzunehmen, zuzuschneiden. Unter einem genuin *fachdidaktischen* Blickwinkel entsteht hier aber zugleich Klärungsbedarf bezüglich der Frage, welches Angebot denn gemacht werden soll. Anders gesagt: Bereits die für Unterricht nötige *Elementarisierung* des fachlichen Inhalts sollte von vornherein die Disponiertheit der Lernaler im Blick haben, um daraus die Sachstruktur des Unterrichts und die entsprechenden methodischen Entscheidungen zu *rekonstruieren*. Diese ursprünglich auf der Ebene der Curriculumentwicklung gestellte Forderung (Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek, 2005) gilt natürlich analog auf der Ebene konkreter Unterrichtsvorbereitung (Duit, 2004b). Kattmann fasst diese Situation schematisch als "fachdidaktisches Triplett" zusammen, indem der Prozess der didaktischen Strukturierung von aufeinander bezogener fachlicher Klärung bzw. dem Erfassen der Schülerperspektiven ausgeht, aber die Strukturierung auch wiederum auf die Ausgangsprozesse zurückwirkt.

Der Topos der "Konstruktion" ist dabei nicht unproblematisch. Evoziert wird eine Art arbeitsteiliger Vorgang, dessen Beteiligten ebenso wenig offensichtlich sind wie der Planer – wie entsteht dabei Sinn, wie gewichten sich physiologische und psychologische Anteile? Schlagend ist auch der Einwand von Jung (1997), dass "konstruieren" ein abstrakt-undifferenzierter Ausdruck für einen Satz von im Grunde genommen recht konkreten, hochdifferenzierten Tätigkeiten und Erlebnissen (etwa "zuhören", "betrachten" usw.) steht und mit dieser fehlenden Unterscheidungsmöglichkeit auch eine konzeptionelle Differenzierung etwa von "Spracherwerb" beim Kleinkind und beim Erwachsenen regelrecht verbaut ist. Zuletzt bleibt der "Bestimmungsraum" dessen, was gelernt werden soll, vollkommen äußerlich und damit zwar einem objektiv-abgelösten Diskurs zugänglich, das pädagogische Handeln wird aber nur symptomgeleitet oder rezepthaft geführt: Unterrichtsinhalte werden aus (für gegeben genommenen) Fachinhalten abgeleitet, indem die ebenfalls objektive Differenz zum Stand des Verständnisses beim Lernaler festgestellt und adressiert wird. Oder anders gesagt: Bei allem Bemühen um die Nöte und Perspektiven des Lernalers geht es der (re)konstruktivistischen Position doch um eine effiziente Technik dafür, bestimmte, normativ gesetzte Inhalte möglichst nachhaltig an Stelle beim Lernaler vorhandener Inhalte zu setzen. Dabei bestehen aus kognitionspsychologischer Sicht zudem gute Gründe, dass es für einen effektiven und nachhaltigen Ersetzungsprozess nötig ist, diesen eng anzuleiten (Kirschner, Sweller & Clark, 2006).

Phänomenographie und Awareness

Lydia Murmann weist darauf hin, dass die damit implizierte konsequente Trennung von erkennendem Subjekt und äußerlicher Welt für den didaktischen Konstruktivi-

vismus konstitutiv ist. Die “Vorstellungen” des Lernalers sind aus dieser Perspektive ebenfalls äußerliche Tatsachen, die wiederum abgelöst vom Lerner ver- und behandelbar sind – ein aus modernerer Sicht erkenntnistheoretisch höchst problematischer Standpunkt (Murmman, 2006). Eva Gläser verneint vor diesem Hintergrund die Frage, ob sich der didaktische Konstruktivismus sinnvoll aus dem psychologischen Konstruktivismus ableiten lässt. Der Rückgriff auf letzteren erscheint so gesehen lediglich als identitätsstiftendes Moment einer Position, der es um die *technische* Notwendigkeit einer lernerzentrierten Didaktik geht (Gläser, 2002). Peter Buck kontrastiert das Paradigma der Konstruktion mit dem der *Konstitution* (Buck, Rehm, Lutz-Schön & Theilmann, 2010), innerhalb dessen grundlegende Veränderungen (wie etwa der morphologische Übergang von Raupe zum Schmetterling) konsequent als dem Subjekt angehörig gedacht werden können. Ein etablierter erkenntnistheoretischer und fachdidaktischer Rahmen für eine solche Sichtweise ist die Phänomenologie (Murmman, 2006; Buck, 2006a).

Innerhalb des *mainstreams* der Physikdidaktik sind solche Ansichten nicht ohne weiteres verankert. Bereits Redeker stellt fest, dass die fachdidaktisch etablierten lern- bzw. entwicklungspsychologischen Paradigmen die Theorien von Piaget und Gagné sind – beides Theorien, die letztlich formal-rationale kognitive Prozesse bzw. Lernformen als Entwicklungsziele setzen, die dann innerhalb der Fachdidaktik, eben etwa im Rahmen eines didaktischen Konstruktivismus, wiederum mehr oder weniger kritisch auf Sachstruktur der Schulphysik bezogen werden (vgl. etwa (Bleichroth et al., 1999)). So einleuchtend es ist, dass Qualitätsstufen des Verständnisses beim Lerner existieren und dass diese Stufen sich wohl erst mit dem Reifen der Persönlichkeit des Lernalers entwickeln, so wenig ist damit über das jeweils konkrete, individuelle Verständnis eines Themas beim Lerner gesagt. Marton und Booth (1997) stellen die Frage nach dem Lernen nicht aus der Warte der Differenz zwischen angestrebten und erreichten Wissenstrukturen, sondern *phänomenographisch*: Welche “Ordnung des Verständnisses” ergibt sich, wenn nicht die Fachsystematik, sondern die Vielfalt individueller Arten des Verstehens zugrundegelegt werden?

Eine solche Frage verweist typischerweise auf Qualitätsstufen, die sich ganz ähnlich charakterisieren lassen, wie die Anforderungsstufen “nominell”, “funktional”, “konzeptuell” und “prozedural” für *scientific literacy*: der Lerngegenstand wird auf zunehmend komplexere Weise – also etwa “äußerlich reproduzierend”, “elementar anwendend”, “in Hinsicht auf seine Beziehungen zu anderen Teilen des Vorwissens” und “seine spezifische Komplexität und Eigenheit berücksichtigend” – in das bestehende Verständnis integriert. Diese Stufung hat dabei den Charakter einer *Disposition*, für die Marton und Booth die Bezeichnung *awareness* geprägt haben. Lernen ist dann die Entwicklung dieser Disposition, die sich in verschieden komplexen Arten der Interaktion mit dem anzueignenden Lernfeld niederschlägt. Wechselt man bezüglich der Verteilung dieser Disposition von der Querschnittsperspektive auf eine

Längsschnittperspektive, entsteht eine Entwicklungsperspektive, die "Reifung" des Verständnisses beim einzelnen Lerner über charakteristische Phasen der Orientierungssuche, der Begegnung mit sinnhaften Gesamtheiten und der Integration in den persönlichen Umgang mit den Herausforderungen der Außenwelt (Rehm, 2006, 2007; Maier, 2008).

Das Wissen des Lehrers: Lee Shulmans Wissentypologisierungen.

Lee Shulman teilt das Schicksal Martin Wagenscheins, gerne rezipiert und zitiert zu werden, aber wenig der vertretenen Standpunkte durchgesetzt zu haben. Beide argumentieren dabei in ausgesprochen überzeugender Sprache, meist in essayistischer Form, beide sind zutiefst Praktiker – und beide bleiben zuletzt Außenseiter. Shulmans Gedankenwelt kreist allerdings um ein grundlegend anderes, ja regelrecht polar angelegtes Thema als die Überlegungen Wagenscheins: nicht das "Verstehen des Lerners" ist die Frage, sondern die Verhältnisse, in die sich verschiedene Dimensionen des Lehrerwissens setzen lassen, und welche Funktionen dieses Lehrwissen erfüllen muss.

Charakteristisch für die Art Shulmans, diese Fragen zu bedenken, ist der Aufsatz *The Practical and the Eclectic: A Deliberation on Teaching and Educational Research* (Shulman, 1984), in dem er prominente methodologische Standpunkte innerhalb der amerikanischen Erziehungswissenschaft aufeinander bezieht (Joseph Schwab, Robert Merton und Lee S. Cronbach). Der Titel umreißt dabei ein doppeltes Spannungsfeld, das die beiden Hauptachsen von Shulmans Denken zeigt: Die Opposition von Theoriebezug und Praxis in der Ausrichtung von Lehrerausbildung und Forschung, sowie die Spannung zwischen individuellem pädagogischen Impetus bzw. Vermögen und dem allgemein-etablierten Rahmen der erziehungswissenschaftlichen Disziplin.

Shulman ist in meinen Augen deswegen ein besonders interessanter Vertreter der Didaktik, weil er nicht versucht, hinsichtlich dieser Orientierungsmöglichkeiten eine Entscheidung herbeizuführen, sondern gerade das Bestehen dieser Spannungen als produktives Moment sehen kann und dabei regelrecht fordert und fördert. Produktiv wird dieses Spannungsfeld dadurch, dass eine feine Balance zwischen Einlassung auf Standpunkte und ordnende Meta-Gesichtspunkte gesucht bzw. gewahrt wird. Leitend ist dabei an vielen Stellen explizit oder implizit aristotelisches Gedankengut. So wird im erwähnten Text der Beginn von *De anima* zum gleichermaßen präzisen wie zwanglosen Argument für Methodenvielfalt innerhalb der *social sciences* oder er sympathisiert mit Schwabs Notation von *teaching as an art* auf eine Weise, die klar macht, dass er damit im modernen Verständnis von "Technik" (im methodischen Sinne) die aristotelische Wurzel der *technē*, der "Kunst" stärken möchte.

Shulmans vielleicht bekanntester Beitrag zur Didaktik, das Konzept des *pedagogical content knowledge* (PCK) ordnet sich in eine solche Sichtweise nahtlos ein: in *Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching* (Shulman, 1986) zeigt er zunächst aus historischer Perspektive (so war im 19. Jahrhundert Lehrersein allein aus dem Fachwissen ableitbar) die moderne Unterbewertung des Fachwissens des Lehrers, aber auch die Relativität einer solchen Situation. Wieder zitiert er Aristoteles (diesmal die *Metaphysik*), um ohne Umschweife zu thematisieren, dass es die Einheit von Wissen und Wissen um Erwerb dieses Wissens ist, die den Lehrer auszeichnet – mithin die moderne Trennung in Fachwissenschaft und Erziehungswissenschaft ein historisch junges (und in seinen Augen zweifelhaftes) Experiment ist. Er plädiert für eine Perspektive auf Lehrersein, die sowohl die pädagogischen Aufgaben und Fähigkeiten einschließt, als auch ein fundiertes Verhältnis zum Fachwissen. Shulman identifiziert drei *Typen* von Wissen, die er von Lehrern aus dieser Perspektive “erwartet”:

- Ein umfassendes, in Zusammenhängen strukturiertes inhaltliches Wissen auf den Gebieten des Faches, aber auch Allgemeinbildung (*content knowledge*).
- Inhaltliches Wissen hinsichtlich der Lehrbarkeit der Fachinhalte, also etwa gängige Lernhindernisse, typische Fehlvorstellungen oder Missverständnisse, schlagende Analogien oder Beispiele, überzeugende Experimente etc. (*pedagogical content knowledge*).
- Inhaltliches Wissen um die verfügbaren Materialien, bestehende bzw. bewährte Unterrichtsstrategien zum fraglichen Thema (die “*materia medica*” der Pädagogik, das *curricular knowledge*).

Das Konzept eines PCK liegt auf der Linie typisch fachdidaktischen Denkens und ist ein wiederkehrendes Motiv in Forschung und Ausbildung. Weniger gut rezipiert ist, dass Shulman dezidiert für *Fallstudien* als Methode plädiert, dieses Wissen einzubetten:

A case, properly understood, is not simply the report of an event or incident. To call something a case is to make a theoretical claim – to argue that it is a “case of something” or to argue that it is an instance of a larger class. [...]

Case knowledge is knowledge of specific, well documented, and richly described events. [...] The cases may be examples of specific instances of practice – detailed descriptions of how an instructional event occurred – complete with particulars of context, thoughts, and feelings.

Zwar unterteilt Shulman alle drei Wissensbereiche zunächst weiter in die Kategorien “propositionales Wissen”, “fallspezifisches Wissen” und “strategisches Wissen”. Dabei ist er sich jedoch sehr bewusst, dass jeder dieser Wissensbereiche, ja (aus Gründen der praktischen Erinnerbarkeit) jedes Wissensselement selbst einen spezifischen theoretischen und methodologischen Rahmen braucht (vgl. den Unterschied zwischen fachlichem Diskurs im Fall des *content knowledge* und didaktischem Diskurs im Fall des PCK). Das Fallwissen stellt ebendiesen Rahmen zur Verfügung. Das bereits angeschlagene Thema der *Typologisierung von Wissen* differenziert er weiter, indem er vertritt, dass jedes Wissensselement selbst (mehr oder weniger erschöpfend) einem der Bereiche “Prinzipien”, “Maximen” und “Normen” zuzuordnen ist. Erste wären das Ergebnis systematischer empirischer Untersuchungen, etwa die Regeln für guten Unterricht von Meyer (2004). Zweiteres wären Erfahrungsregeln, die keinen speziellen Theoretischen Hintergrund beanspruchen, sondern sich schlicht bewährt haben. Letztere wären Grundsätze, die Handeln und Interaktionen leiten und auf ethisch-moralische Ziele wie Respekt, Fairness etc. abzielen. Der Topos des “Falls” lässt sich entsprechend durchdeklinieren in *Prototypen* (als Stellvertreter oder Vehikel für Prinzipien), *Präzedenzfälle* (als Stellvertreter für Maximen) und *Parabeln* (die stellvertretend Normen transportieren).

Die dritte Kategorie des Lehrwissens, das strategische Wissen, hat dann die Aufgabe, den “unilateralen” Charakter von propositionalem und fallspezifischen Wissen hinsichtlich der einseitigen Orientierung hin auf einzelne Regeln oder Sichtweisen auszugleichen. “Wissen” in diesem umfassenden Sinn ist nicht die Routine, der Rückgriff auf Bewährtes, Vorhersagbares, sondern die Möglichkeit abzuwägen, Freiräume zu nutzen, Prioritäten neu oder anders zu setzen. Solches Wissen entsteht nach Shulman in der kontrollierten Konfrontation von Prinzipien oder Maximen mit den Einzelfällen, in denen charakteristische Abwägungsprozesse sichtbar werden. Shulman erweitert damit das Konzept des “Exemplarischen” entscheidend: Die exemplarische Praxis erhält ihren Wert nicht nur durch den Rückbezug auf den entsprechenden systematischen Rahmen (wie es weitgehend bei Wagenschein geschieht), sondern ist offen für die unvermeidlichen Aporien und Heuristiken des Erfahrungsalltags, und bestimmt die Rolle des Einzelnen entsprechend als das verantwortliche Überführen von Bedingtheiten und Erwartungen in konkretes Handeln. Damit sind zugleich Motive genannt, die auch für das Format der “physikalischen Expeditionen” relevant sind: naturwissenschaftliche Praxis setzt neben ihren “Prinzipien” ebenfalls auf Maximen, und es braucht ebenfalls strategisches Wissen, das hilft, die unvermeidlichen Differenzen zwischen Theoriebildung und realem physikalischen Vorgang zu integrieren – die Expeditionen sind Fallstudien im Shulman’schen Sinne, allerdings auf dem Gebiet der Schulphysik.

2. Schulphysik als Expedition? Eine Lesehilfe

Die vorliegende Schrift dokumentiert einen Versuch zur Formulierung eines neuen didaktischen Leitbildes, das sich am Topos der “naturwissenschaftlichen Untersuchung”, der *inquiry* orientiert. Ausgangspunkt ist die Affinität zu phänomenologischen Arbeitsweisen und zwei Hauptmotive spielen dabei eine zentrale Rolle: eine Abgrenzung der Physik gegenüber der Mathematik und die Beschreibung genuin physikalischer (im Sinne von *fachtypischer*) Formen der Begriffsbildung und Evidenz. Dabei konturiert sich ein didaktisches Programm: Die “Veranstaltung Schulphysik” wird nicht mehr als Vermittlung von auf ihren Gegenstand – nämlich die Natur – bezogenen Inhalten genommen, sondern das fachtypische dieser Beziehung selbst wird immer mehr zum Thema. Die dabei entstehende Perspektive auf Schulphysik bietet für alle Beteiligten Anknüpfungspunkte und einen Rahmen für ein facettenreiches, autonomes und vielschichtiges Lehren, Lernen und Verstehen. Und es kommt damit Forschungsbedarf in Sicht: Wie sehen Beispiele aus, gelingen der erhoffte Kompetenzaufbau und die Entwicklung von Methoden zur Beschreibung und Erfassung des so erworbenen, vermutlich anders gearteten Verständnisses von Physik?

Die Essays sind in zwei Abteilungen im Wesentlichen chronologisch geordnet. Der erste Teil entwickelt theoretische Gesichtspunkte, der zweite beschäftigt sich mehr mit Physik. Die Anliegen und die genannten grundlegenden Hauptmotive werden im ersten Teil des Buches dargestellt, mit Argumenten aus Didaktik, Kognitionspsychologie, Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie gestützt, auf die aktuelle didaktische Diskussion bezogen und in einer Reihe von konkreten didaktischen Problemen pointiert. Der zweite Teil liefert Arbeiten, die das dabei sich konturierende Format der “physikalischen Expedition” in Beispielen konkretisieren – dabei entsteht an typischen “Schulthemen” durchaus spannende und tiefsinnige Physik. Der Adressat aller dieser Arbeiten ist dabei zuletzt die Schulpraxis. Es wird dabei aber nicht für eine spezielle Sachstruktur oder Methode des Unterrichtens plädiert, sondern für eine “gelebte Naturkunde”, die sich über die Angemessenheit ihrer Methoden und Denkbewegungen und auch über deren Orientierung “auf Physik hin” Rechenschaft geben kann. Wie in Kapitel 5 (S. 99 ff.) ausführlicher dargestellt, verortet sich ein solches Anliegen zwanglos im Professionswissen des Lehrers.

Auf den folgenden Seiten werden Gesichtspunkte entwickelt, die es erlauben, verschiedene Teile der vorliegenden Texte jeweils als zusammenhängende Geschichten zu lesen, indem mehrere übergeordnete Ausgangspunkte und Zielrichtungen der behandelten Themen dargestellt werden. Anders gesagt: ich möchte aufzeigen, welche tieferen Fragen und Gesichtspunkte mich bewegt haben, damit besser nachvollziehbar wird, worin die interessanten, kritischen und neuen Momente liegen, wenn Schulphysik als Gelegenheit für "physikalische Expeditionen" verstanden wird. Die Darstellung wird durch eine Darstellung der für die Physikdidaktik prägenden Spannung zwischen ihren beiden einander tief fremden Quellen – Physik und Erziehungswissenschaft – eröffnet. Vor diesem Hintergrund lassen sich dann die Motive prägnant skizzieren, die in den Essays verfolgt werden. Es ist im Rückblick deutlich, dass vieles aus heutiger Sicht besser, kürzer oder gar anders gesagt hätte werden können oder müssen. Im Rahmen dieser Sammlung besteht nicht die Möglichkeit, daran etwas zu ändern. Der Umstand zeigt aber auch die z. T. mühsame Entwicklung des (Selbst-)Verständnisses hinsichtlich der behandelten Anliegen und die zugrundeliegende apologetische Stimmung – erscheinungsorientierte, an Goethe oder Wagenschein orientierte, phänomenologische, auf individuelle Evidenzmodi setzende etc. Standpunkte sind Minderheitsvoten, die ihre Berechtigung nur durch fruchtbare Praxis zeigen können. Dazu beizutragen, das ist hier das übergeordnete Anliegen.

Eine Ordnung des didaktischen Diskurses

Michel Foucaults *L'ordre du discours* (Foucault, 1996) legt nahe, dass akademische Diskurse im Grunde genommen komplexe soziale Prozesse sind, die ihre Themen, Methoden und Strukturen, ja sogar ihr Verständnis von Wahrheit weniger transparenten und rationalen Auseinandersetzungen verdanken, sondern oft untergründigen, wenig bewussten Motiven der Gruppendynamik folgen. Im 21. Jahrhundert kann sich es sich daher keine Wissenschaft leisten, auf Selbstreflexion und ein Bewusstsein von den Bedingtheiten ihrer Strukturen und Methoden zu verzichten. Innerhalb der Physikdidaktik ist dieser "Bewusstwerdungsprozess" (in Hinblick auf Ihre konstituierenden Bestandteile "Physik" und "Erziehungswissenschaft") in ihren Sparten *Nature of Science* und Unterrichtsmethodik durchaus lebendig: Eine Vorstellung davon, wie Physik entsteht und funktioniert, gehört ebenso zu den Grundlagen des Physikunterrichtes wie Vorstellungen davon, welche gängigen psychologischen Modelle von kognitiver Entwicklung und welche Lerntheorien existieren und wie sie im Unterricht angewendet werden können. Viel weniger prominent und explizit ist allerdings die Auseinandersetzung darüber, was für die Physikdidaktiker jeweils die Grundlagen, Ziele, Qualitätsmerkmale etc. ihres Diskurses sind.¹ Hier tritt eine dritte, *bildungstheoretische* Dimension der Fachdidaktik in Erscheinung: Warum soll gelernt werden, wie wird Bildung verstanden, welches Menschenbild liegt dem Unterricht zugrunde?

Was wird also in konkreten didaktischen Arbeiten adressiert und was wird vorausgesetzt, was sind die Paradigmen? Es ist unschwer zu sehen, dass dabei oft die beiden "Mutterkulturen" Physik und Erziehungswissenschaft als Vorbilder dienen, die den konkreten fachdidaktischen Diskurs bestimmen: Versucht wird jeweils unter "fachtreuen" bzw. "fachkritischen" Gesichtspunkten zu besserem Physikunterricht zu kommen – im ersten Fall geht es um "gute Physik", die aufgrund ihrer Strukturmerkmale Vorteile bietet (also etwa weniger anfällig für naive, unphysikalische Vorstellungen ist oder wie ein überzeugender mathematischer Beweis durch "Mitsdenken" eingesehen werden kann...), im zweiten Fall um "gute Darstellung", also Verbesserungen an der Methodik des Unterrichtens (weil vielleicht gerade der Überzeugungskraft der Sachstruktur misstraut wird...). Mit solchen Grundannahmen operieren Wiesner, Hopf, Wilhelm und andere (vgl. etwa (Hopf, Tobias, Waltner, Wilhelm & Wiesner, 2009; Wilhelm, o. J.)) bei ihrem Versuch nachzuweisen, dass eine bestimmte Sachstruktur der Mechanik Lernvorteile bietet. Noch weiter gehen Friedrich Hermann und Co-Autoren: Der Karlsruher Physikkurs legt (KPK, o. J.) eine

¹Eine Vielzahl von Didaktikern bringen sich – je nach persönlichem *commitment* oder Selbstverständnis – vornehmlich in nur einen der beiden prominenten Fachverbände (DPG und GDGP) ein, die sich entsprechend eben eher fach- oder erziehungswissenschaftlich konstituieren. Die Schulpraxis trifft sich dann noch unter einem dritten Dach, dem Verein MNU...

strukturell bereinigte Schulphysik vor, von der die Autoren offenbar erwarten, dass sie stringent genug ist, um den Schülern uneingeschränkt einzuleuchten².

Auf der anderen Seite stehen Versuche z. B. vor einem lerntheoretischen Hintergrund zu zeigen, dass bestimmte Präsentations- oder Organisationsformen bzw. bestimmte Methoden (Multimediales Lernen, historische oder alltägliche Kontexte, Textgestaltungen etc.) Lernvorteile bieten (vgl. (Muckenfuß, 1995; Priemer, 2004; Pitton, 2006; Kasper, 2007a)). Offenbar liegt beiden Herangehensweisen eine jeweils grundverschiedene Lesart von "Verstehen" zugrunde, die sich auf verschiedene Lesarten von "Kausalität" reduzieren lässt (Buck, 2006a). Der erste Ansatz stellt – typisch naturwissenschaftlich – auf die *causa efficiens*, die Wirkursache ab. Eine erziehungswissenschaftliche Herangehensweise rechnet zumindest mit den jeweiligen Fragehorizonten des Lerners und betont perspektivische Gebundenheit und Situiertheit des Lernvorgangs. Und: Es kann dabei an dieser Stelle nicht überraschen, dass auch die phänomenologisch orientierte Naturwissenschaftsdidaktik dieser dualen Struktur folgt, vgl. (Theilmann et al., 2010).

Bei allen Unterschieden und trotz der Konkurrenz dieser beiden "Linien" innerhalb der Physikdidaktik liegt im Bekenntnis zu "Fachtreue" bzw. "Fachkritik" jedoch auch das Vertrauen in die Integrität dessen, wofür sich der jeweils andere Standpunkt interessiert. Kurz gesagt: Wenn ich es mir leisten kann, über die Sachstruktur nachzudenken, vertraue ich auf die Lernprozesse im Unterricht und umgekehrt. Das moderne Leitbild der *didaktischen Rekonstruktion* (Kattmann et al., 2005) und Initiativen wie PIKO (*Physik im Kontext*, o. J.) lassen sich unter solchen Gesichtspunkten als differenziertere Integrationsversuche von fachtreuen und fachkritischen Motiven der Unterrichtsgestaltung nehmen. Solche Versuche sind wertvoll, weil sie die Möglichkeit bieten, berechtigte Gesichtspunkte aus beiden Quellen der Physikdidaktik zur Geltung zu bringen. Eine grundlegend neue Perspektive auf Physikdidaktik entsteht dabei nicht, denn Unterrichtsinhalte, -themen und -formen werden auch dabei aus "kritischem" und "treuem" Verhältnis zum Fach abgeleitet.

Das in diesem Buch verfolgte Projekt einer erscheinungsorientierten und explorativen Physikdidaktik ordnet sich *nicht* gleich reibungslos in ein solches Bild von "Physikdidaktik zwischen Fachwissenschaft und Erziehungswissenschaft" ein, obwohl es vielfach Motive aus beiden Herkunftskulturen der Didaktik aufgreift oder berührt. Das zu skizzierende Leitbild wird nämlich nicht aus fachtreuer oder -kritischer Perspektive (oder einem sonstigen Konsens innerhalb der Didaktik) sichtbar, sondern aus einem erkenntnistheoretischen Gesichtspunkt: Was heißt es, Natur auf naturwissenschaftliche Weise zu verstehen?³ Die Beantwortung dieser Frage wird

²Vgl. dazu (Starauscheck, 2002a, 2002b, 2003).

³Hier liegt, bei aller möglichen und nötigen Abgrenzung, eine Nähe zu Wagenschein, dessen pädagogischem Denken die Frage danach, was "Verstehen" ist oder sein soll, zugrunde liegt.

Ausgangspunkt für das hier gemeinte *didaktische Programm* – Physik-Lernen wird zu einem Kennenlernen der einem solchen Verstehen zugrunde liegenden Fragehaltungen und Denkbewegungen. Warum eine Perspektive von außerhalb der Didaktik gebraucht wird und wo die Antwort auf die Frage nach dem naturwissenschaftlichen Verstehen gesucht wird, wird auf den folgenden Seiten genauer dargestellt werden. Die Texte des ersten Teils beschreiben dann das Programm inhaltlich genauer und verorten es innerhalb der fachdidaktischen Diskussion.

Die Chimäre Schulphysik und das grundlegende Paradox des Unterrichtens

In den Präambeln von Lehrplänen, Prüfungsanforderungen oder Bildungsstandards finden sich noch immer entschiedene Bekenntnisse zur Wichtigkeit oder zum Bildungswert von Physik. Wir schauen in diesem Umfeld auf konkurrierende Motive für eine Orientierung des Physikunterrichtes: Alltagsbezug, Popularisierung moderner Physik, Förderung von Urteilsfähigkeit in gesellschaftlich relevanten Themen (*climate change*, Nutzung der Kernkraft etc.), Physik als Teil der abendländischen Kulturgeschichte. . . – und *last but not least* das möglichst gute Abschneiden der betroffenen Schüler bei Vergleichstests wie TIMMS oder PISA. Der Reformprozess des Physikunterrichtes, der durch die Veröffentlichung der Bildungsstandards im Jahre 2004 markiert wurde, spiegelt diese Gemengelage insofern wieder, als die drei Dimensionen des für das Fach Physik zugrundegelegten Kompetenzstrukturmodells jeweils auf verschiedene dieser Motive verweisen – die Kompetenzbereiche orientieren sich an einem vielseitigen und sicher nicht genuin naturwissenschaftlichen Leistungsprofil moderner Wissensgesellschaften, die Anforderungsbereiche am Ideal einer *scientific literacy*, also einem auf gesellschaftliche Partizipation ausgerichteten Leitbild, während die fachlichen Inhalte durch hochabstrakte Basiskonzepte strukturiert werden, von denen man offenbar mögliche Lernvorteile (insbesondere Anreiz zum kumulativen Lernen) und Anschlussfähigkeit an die akademische Physik erhofft. Der mit der expliziten Output-Orientierung einhergehende Paradigmenwechsel in der Kultuspolitik erschwert wohl zusätzlich zu sehen, was Physikunterricht in einem solchen Umfeld sein sollte oder werden könnte. Indem viel, ja fast alles gefordert scheint, lässt sich ja auch praktisch in jedem Fall etwas davon einlösen. . . Doch bei aller Angreifbarkeit des *status quo* bietet er vielfältige Freiräume für Gestaltung. Die Bildungsstandards geben vielleicht keine eindeutige Gestaltungsrichtung vor, aber sie stellen die Frage danach, wie der Schlüsselbegriff *Kompetenz* auf dem Feld der Physik gedacht werden muss, sprich: was es heißen soll, “Physik zu können”. Und das ist der willkommene Anlass für Reflexion, Ab- und Eingrenzung, wie sie in

den Kapiteln des ersten Teils stattfindet.

Fragen wir uns zu unserer eigenen Orientierung also einmal kurz, was der Ausgangspunkt einer “Unternehmung Physikunterricht” sein sollte oder könnte. Eine Möglichkeit, das zu realisieren, ist die folgende “Gretchen-Frage”: Betrachten wir die Schulphysik als etwas bereits Gegebenes, also bestehendes, vermittelbares und zu vermittelndes, *systematisch*-darstellbares Wissen, oder eher als einen charakteristischen *Prozess* von Wissensgewinnung über die Natur? Die oben geschilderte Dualität von Fach- und Erziehungswissenschaft innerhalb der Physikdidaktik klingt hier an, ohne dass die Frage einfach oder automatisch in ihr aufgeht – beide Positionen lassen sich “fachtreu” oder “fachkritisch” auslegen. Es ist das Verdienst von Martin Wagenschein, den Blick dafür geöffnet zu haben, dass an dieser Stelle nicht nur eine wechselseitige Abhängigkeit vorliegt, sondern zugleich ein irritierender *Antagonismus* – je mehr Physik gleichsam als “Liegenchaftsverzeichnis” oder “Buch der Antworten” verhandelt wird, desto unwahrscheinlicher werden persönliche Entdeckungen, die schlagenden, individuellen Evidenzerlebnisse, die sie braucht, um als Schulfach zu funktionieren und legitim zu sein. Aber wie kommt man auf einzelnen, zufälligen Wegen zu belastbarem Fachwissen, um das es ja auch gehen soll? Eine wenigstens scheinbar paradoxe Situation: Naturerkenntnis müsste so an den Lerner herangetragen werden, dass er den “Gegenständen” möglichst authentisch, neu und unverstellt begegnet und gerade dadurch die Systematik des Fachs sichtbar wird und ihren Sinn und Wert erhält. Insbesondere das Kapitel 4, aber auch das Kapitel 6 und die Arbeiten des zweiten Teils setzen sich mehr oder weniger explizit damit auseinander, wie das aussehen könnte.

Zwei Häretiker: Goethe und Wagenschein auf der Suche nach anderen Formen von Evidenz

Erzählung einer Szene mit einer Kellnerin in einem dunklen Türrahmen; Bericht über die Beobachtung eines farbigen Mond-Hofs mit Datum und Wetterbericht; Beobachtungen an Kristallen oder auf Wanderungen. . . – Goethes Farbenlehre kommt über weite Strecken als fragmentierte, lockere bis lose Folge von Beobachtungen und Gedanken daher. Nach unserem heutigen Verständnis handelt es sich dabei kaum um einen physikalischen Text, selbst wenn es um physikalische Themen (“physische Farben”) geht. Physik handelt heute von Repräsentationen und den zugehörigen Regelapparaten, von Formeln, Werten, Graphen etc. Goethe behandelt zwar Empirie, aber nicht als äußerliche “Tatsache”, sondern als *Erlebnis*, und ein solches mutet uns moderne Didaktiker vielleicht als “sinnstiftender Kontext” (Muckenfuß) an, aber wir lassen es wohl kaum als “richtige” Physik gelten. Das beginnt bei der Einteilung des

Buches, die dort, wo wir *Mechanismen* wie Brechung, Beugung, Interferenz erwarten würden, recht situativ bleibt – es geht um “Farben der Durchsicht” oder sonst in Abhängigkeit der Blickrichtung usw. Und: Der Autor verweigert sich auf mehreren Ebenen der abgeklärten naturwissenschaftlich-apparativen Perspektive auf Natur, indem nicht nur “subjektive” Experimentiersituationen gleichberechtigt, ja systematisch einbezogen sind, sondern Farbe überhaupt und grundsätzlich nur als gesehene, erfahrene, gemalte, hergestellte usw. Farbe in Betracht kommt. Der Mensch ist hier das Maß aller Dinge und damit steht auch zweieinhalb Jahrtausende nach Protagoras die Gefahr von ganz unnaturwissenschaftlichem Relativismus und Subjektivismus im Raum.

Goethe macht es also einer klassisch-physikalischen Denkungsart schwer – nicht nur die Form seiner Arbeit ist problematisch, auch seine Methodik. Goethe operiert nicht mit Prinzipien oder Sätzen, er rechnet und geometrisiert nicht; eher sucht er Ratio, “Sinn” und bezieht dafür weitgehend Sachverhalte auf Sachverhalte. Dennoch kann die *Physikdidaktik*, ohne ihm in der Sache vollständig folgen oder sich einer Spielart von Phänomenologie verschreiben zu müssen, an den *Beiträgen zur Farbenlehre* dabei einiges lernen. Goethe beschreibt dort, was wir oben gerade als Forderung bzw. ”paradoxe Situation” ins Auge gefasst hatten: einen authentischen Lernweg von Alltagserfahrungen zur Wissenschaft (aus Goethes Aufsatz “Erfahrung und Wissenschaft”, 1798):

Was wir also von unserer Arbeit vorzuweisen hätten, wäre:

- Das *empirische Phänomen*, das jeder Mensch in der Natur gewahrt wird und das nachher
- zum *wissenschaftlichen Phänomen* durch Versuche erhoben wird, indem man es unter andern Umständen und Bedingungen, als es zuerst bekannt gewesen, und in einer mehr oder weniger glücklichen Folge darstellt.
- Das *reine Phänomen* steht nun zuletzt als Resultat aller Erfahrungen und Versuche da. Es kann niemals isoliert sein, sondern es zeigt sich in einer stetigen Folge der Erscheinungen. Um es darzustellen, bestimmt der menschliche Geist das empirisch Wankende, schließt das Zufällige aus, sondert das Unreine, entwickelt das Verworrene, ja entdeckt das Unbekannte.

Verschiedene Punkte verdienen hier Aufmerksamkeit, etwa die Metamorphose, die die Lesart von “Phänomen” durchmacht: vom kontingenten *Ereignis*, das unverbunden, aber auch unverbindlich und unverstellt passiert, zum *Projekt*, das zielstrebig verfolgt wird, weiter zum *Konzept*, das es erlaubt, Geschehen in seinen Bedingtheiten, Defiziten, Verwandtschaften und Wirkungen zu überschauen. Wir sollen auch

bemerken, dass damit ein methodischer Anspruch formuliert ist – im Lichte dieses Zitats sind die *Beiträge zur Farbenlehre* nicht unverbindlicher, subjektiver Entwicklungsroman, sondern eine gezielte Darstellung ebendieses reinen Phänomens, das *nicht abgelöst vom Weg dorthin besprechbar ist*. Und ein Drittes, das daran anschließt: Die physikalischen Grundprinzipien, die sich in den empirischen Phänomene dann mehr oder weniger deutlich und rein zeigen, werden unbedingt und ausschließlich als *Ziel* – gleichsam streng *bottom-up* oder als etwas “Immer-nur-vor-Augen-Schwebendes” – gedacht, nicht als etwas Bestehendes, Voraussetzbares, von dem aus Empirie erklärt werden kann.⁴

Einer der wenigen, die Goethe in diesem Sinne “didaktisch” gelesen haben, ist wiederum Martin Wagenschein. Ihm gebührt das Verdienst erkannt zu haben, dass in dieser Art, Naturwissenschaft zu denken, der Schlüssel dafür liegt, den oben geschilderten Antagonismus von Systematik und individueller Erkenntnis aufzulösen, und er hat jedenfalls die ersten beiden hier angedeuteten Punkte didaktisch erschlossen. Wagenschein interessiert sich zwar immer wieder auch für Sachstrukturen. Aber sein didaktisches Anliegen sind Themen wie der “Lehrgang”, also die Untersuchung, die das alltäglich-naheliegende Erlebnis mehr und mehr ins Wissenschaftlich-Gedachte transzendiert, oder die Metamorphose des Denkens und Sprechens, das dem Lerner widerfährt, und seine Sorge, dass dabei so wenig Fremdbestimmtes und Unselbstständiges wie möglich wirksam werden möge. Ihn führt das zum Topos des *genuinen Verstehens*, der eine ganze Generation von Didaktikern inspiriert hat. Beide Spuren werden auch in diesem Buch verfolgt: Das Kapitel 5 setzt sich mit dem Potenzial von Goethes Methode für die Physikdidaktik auseinander, das Kapitel 7 mit einer Kritik und der Weiterentwicklung von Wagenscheins Verstehensbegriff.

Zauberwort Exploration

Meine Google-Suche nach “Exploratorium” liefert⁵ auf der ersten Seite allein drei Institutionen im Großraum Berlin, daneben aber auch Links auf und rund um das “Ur-Exploratorium” in San Francisco, USA. Es handelt sich um öffentliche Einrichtungen, die jeweils zentral Naturwissenschaft thematisieren, jedoch auf faszinierende, vielfältige, z. T. auch aufwändige Art: als Ausstellungsort, Lehr- und Fortbildungsstätten, Begegnungsraum usw. Insofern damit auf *exploratives Lernen* gezielt wird, handelt es sich um ein bekanntes didaktisches Paradigma (“entdeckendes Lernen”), das Lernen als offene Form der (typischerweise experimentellen) Auseinandersetzung mit

⁴Es bedürfte einer eigenen Darstellung, um diesen Punkt aus der intensiven und konstruktiven Auseinandersetzung Goethes mit *Kant* heraus wirklich verständlich zu machen – hier nur der Hinweis darauf, dass sich Goethe 1798 der Schwierigkeit *synthetischer Urteile a priori* sehr bewusst ist!

⁵Zugriff am 30.8.2010, 11 Uhr.

bereits gestellten Themen oder aber noch breiter als ggf. assistierte, aber eigenständige Auseinandersetzung mit selbstgewählten Themen (“Erkundung der Welt”) anlegt. *Exploration* steht für ein Lernen, in dem Welt – und auch der naturwissenschaftliche Weltzugang – als interessant, produktiv, aufschlussreich etc. erlebt werden.

Allen diesen Angeboten ist gemeinsam, dass die Begegnung mit der Welt in “künstlichen Räumen”, d. h. durch Kultur (und nicht Natur) gestaltetem Ambiente und anhand diesem Zweck dienlicher Medien stattfindet – im Ur-Exploratorium noch durch expressive Architektur und die Einbeziehung bildender und multimedialer Kunstwerke gesteigert. Die so zur Schau gestellte Naturwissenschaft ist nicht eine langweilige Trophäensammlung, sondern *science as inquiry*. Dass die zu machenden Entdeckungen nicht neu und originär, sondern sorgfältig vorbereitete Spiele sind, tut der Attraktivität dieser Orte keinen Abbruch. Einerseits ist ja für den Lerner das, was da erlebt wird, normalerweise dennoch durchaus neu und aufregend. Andererseits geht es auch weniger um ein benennbares Ergebnis, sondern mehr um einen Prozess, es steht nicht der Inhalt, sondern die naturwissenschaftliche Methode oder der naturwissenschaftliche Weltzugang im Vordergrund. “Exploration” ist dabei eine Vokabel⁶ mit einer signifikanten militärischen (oder wenigstens abenteuerlich-martialischen) Konnotation. Letztlich ist vielleicht auch die konkrete Methode austauschbar, worum es geht, ist: es wird ein spezifisches Erlebnis vermittelt, nämlich der Natur zielstrebig und kunstfertig Einsichten abzuringen. Als Motivation und Volotion sind solche Aspekte des Handelns legitimer Bestandteil naturwissenschaftlicher Kompetenz. Dennoch kein schönes Bild: der Forscher als engagierter Treiber auf einer Jagd oder Wegbereiter einer Invasion?

Es ist angesichts solcher Sorgen eindrucksvoll zu sehen, wie die Implementierung des Leitbildes “*science as inquiry*” in den amerikanischen Bildungsstandards (Olson & Loucks-Horsley, 2000) Exploration auf curricularer Ebene schildert: Die Weitung des Blicks auf Naturwissenschaft als Milieu für gemeinschaftliches Arbeiten, inhaltliche Auseinandersetzung, soziale Tugenden (etwa Kritikfähigkeit) stehen dem methodisch unternommenen, konkreten Untersuchungsprozess gleichberechtigt zur Seite. Alle diese Elemente werden in einer Reihe von programmatischen Forderungen gewissermaßen als “Dimensionen” naturwissenschaftlicher Praxis beschrieben, die für guten Unterricht berücksichtigt werden sollen. Damit ist ein Paradigma formuliert, das Wissenschaftlichkeit eher als Erkenntnis*haltung* denn als Erkenntnis*inhalt* beschreibt. Oder anders gesagt: Ein solche curriculare Orientierung vertraut mehr auf die Prägung des Lerners durch eine integre Erkenntnispraxis (und damit letztlich auf seine zukünftige Entwicklung) als auf den Wert bestimmter

⁶Lat. *ex-plorare* ist ursprünglich Jägersprache, das “Heraus-Schreien” (vgl. dt. “*plärren*”) des Wildes; der *explorator* ist später der Kundschafter und Provokateur, der jenseits der Grenze Gelände, Hindernisse und Feindstellungen auskundschaftet, um die eigenen Operationen vorzubereiten. . .

Inhalte.

Doch wie ist das genau mit dem Verhältnis von Methode/Erkenntnispraxis einerseits und dem Wissensbestand andererseits? Der Wissensbestand einer Naturwissenschaft Physik baut selbstverständlich auf einer bewährten Praxis des Experimentierens, aber auch des “Datenlesens”, des Argumentierens, Modellierens, Interpretierens usw. Umgekehrt ist es gerade die “Bewährtheit”, die den Methodenteil einer Wissenschaft selbst zum Bestand oder Inventar macht. Dabei kann es passieren, dass sich die Rollen von Signifikant und Signifikat vertauschen: Der Theorieinhalt steht nicht mehr als gedankliches Destillat für Gesetzmäßigkeiten der Erfahrung, sondern einzelne Erfahrungen werden als Verweis auf zentrale inhaltliche Konstrukte genommen (“die Fallgesetze”, “die Induktion”, “die Brechung von Licht” usw.). Sowohl innerhalb der Fachdidaktik als auch aus wissenschaftshistorischer Perspektive gibt es eine Vielzahl von Kategorien und Gesichtspunkten, die gegenüber der Frage nach Funktionen, Modalitäten und Formen des Experimentierens Orientierung schaffen können. Doch kann uns das nicht darüber hinweghelfen, dass eine Reduktion der methodisch-erkenntnispraktischen Elemente auf einen Teil dessen, was man von einer Wissenschaft eben auch – mehr oder weniger umfänglich und korrekt reproduzierend oder gar transferierend... – wissen kann, diese Wissenschaft zu einem statischen Korpus macht. Exploration ist aber ein Stichwort, das uns auf das Noch-nicht-Gewusste, Noch-zu-Entdeckende verweist, das Wissenschaft ihren Sinn gibt. Irgendwo zwischen einem funktionalem Physik-Können und prozeduraler Kompetenz, die es dem Lerner erlaubt, selbstständig auf Expeditionen⁷, auf neue Erkenntniswege zu gehen, verläuft ein veritabler Riss, beginnt neuer Boden. Die letzten drei Essays des ersten Teils analysieren diese Situation genauer, bilden sie auf die aktuelle didaktische Debatte ab und entwickeln einige, z. T. recht weit reichende Folgerungen: wenn Schulphysik nicht nur Darstellung von einem (früher oder anderswo passiertem oder sonstwie unerreichbarem) *fremden* Erkenntnisstreben sein soll, sondern eine Methode, dieses Erkenntnisstreben selbst zu vermitteln, was braucht es dann für einen konzeptionellen fachdidaktischen Rahmen?

Kurzbeschreibungen der Arbeiten

Bildungstheoretische Arbeiten

Experimentieren zwischen Entertainment und affirmativer Praxis Ausgangspunkt dieses kurzen Essays ist die Beobachtung, dass Physikunterricht nicht nur

⁷Die Etymologie von “Expedition” beschwört eine ganz andere Bilderwelt als die von “Exploration” – lat. *pedica* ist die Fessel, die *ex-peditio* eine offene Unternehmung der neuen, ungebundenen Wege...

erwiesenermaßen nicht nicht das leistet, was von ihm erhofft und erwartet wird, sondern auch offenbar ein enges und vereinseitigtes Bild der relevanten Inhalte zeigt. Der Text kontrastiert diese Inhalte am Beispiel Mechanik mit der Reichhaltigkeit tatsächlicher, i. e. alltäglicher mechanischer Erfahrungen und pointiert dies in dem Gegensatz zwischen der Behandlung “vorgestellter Erfahrungen” im Unterricht, die “tatsächlichen” im Leben gegenüberstehen. Der Grund für dieses Missverhältnis wird in der Ausrichtung der physikalischen Systematik an der Mathematik gesucht: Die Vielfalt des Erlebens wird einer stringenten, formalen Darstellung geopfert, in der Erfahrung und Experimente nur noch als *affirmative Praxis* Platz haben. Der Text schließt mit einem Plädoyer für die didaktische Fruchtbarkeit alltagsnaher Experimentierszenarien und dem Hinweis auf die Nähe einer solchen Haltung zur naturwissenschaftlichen Methodik Goethes.

Der Gedanke im Kontext – Zur Charakteristik einer erscheinungsorientierten Physik Der Text entstand als expliziter Versuch einer Antwort auf das flapsige Verdikt des damaligen Schriftleiters Physik der MNU, “modellfreie Physik” sei keine Physik. Er führt die Bezeichnung “erscheinungsorientiert” anstelle von “modellfrei” ein und beschreibt methodische Kernanliegen eines solchen Zugangs: dem Verzicht auf die allgegenwärtigen kinematischen Bilder innerhalb von Optik, Elektrizitätslehre etc., auf die üblichen, Erklärungen abkürzende und Nachdenken verhindernde “Mythen” (Wiesing, 2009), und die Beschreibung des fraglichen Themengebietes ausschließlich anhand von Konzepten, die sich auf mögliche Beobachtungen (was instrumentelle Erfahrungen durchaus einschließt!) beziehen. Exemplarisch durchgeführt wird eine Beschreibung der Reflexion anhand des Spiegelraumkonzeptes, wobei neben dem Anschluss an die konventionellen Lerninhalte zum Thema besonderer Wert auf die spezielle, eben unkonventionelle Form des Argumentierens und der Evidenz gelegt wird.

Integrierendes Verstehen – Über die mögliche, explizite Rolle von Intuition für das Physik-Verstehen In diesem Beitrag wird, ausgehend von einem geometrischen Beispiel, zunächst inhaltlich der Unterschied von “analytischer” und “integrierender” (i.e. synthetischer) Gedankenführung bzw. Evidenz dargestellt: Im ersten Fall erweist sich “Richtigkeit” durch Konformität einzelner Argumentationsschritte mit konsistenten Regeln, im anderen Fall wird versucht eine integrale Beschreibung des Sachverhalts zu geben, die einsichtig werden lässt, was die fraglichen Inhalte sind und warum bestimmte Beziehungen bestehen. Letztere Methode wird (am klassischen Thema der “prismatischen Farben”) dann an einem physikalischen Beispiel erprobt. Dabei entsteht nicht nur eine kritische Lesart von Goethes Behandlung des Themas, sondern auch eine Synopse mit anderen optischen Themen wie He-

bung, Beugung oder Polarisation. Der Kontrast zur konventionellen, modellierenden Methode der Schulphysik wird in der Auseinandersetzung mit der mechanistischen Sichtweise von Physik des 19. Jahrhunderts sichtbar gemacht. Zuletzt wird gezeigt, dass eine solche integrierende Methodik an bereits etablierte didaktische Themen und Paradigmen anschließt und eine vollwertige, auf "Sinn-Erlebnisse" zielende Alternative zur konventionellen Art des Argumentierens darstellt.

Physikalisches Verstehen als fachbezogene Kompetenz Der Aufsatz untersucht anhand empirischer Arbeiten anderer Autoren zunächst, wie physikalisches Argumentieren mit Modellen funktioniert und welche typischen Schwierigkeiten dabei auftreten. Dem "Erklären" in diesem Sinn wird ein "Verstehen" gegenübergestellt, das nicht auf funktionale gedankliche Repräsentation ausgeht, sondern auf eine individuelle, kontextualisierte und methodenbewusste "Aneignung". Eine solche Aneignung ist im Grunde in den bildungstheoretischen Paradigmen wie *scientific literacy* verankert. Dort wird aber gerade der "Beteiligungsaspekt" einer solchen konzeptuell-prozeduralen Verständnisstufe übersehen: das Gelernte erhält nur durch individuell-biographische Initiative des Lerners einen Bedeutungsradius, der über die Unterrichtssituation hinausgeht. Daraus folgt aber auch, dass diese Verständnis-(oder Kompetenz-)Stufe sich nicht "asymptotisch" durch Entwicklung funktionalen Verständnisses ergibt. Wie an einem einfachen optischen Beispiel so ein Verstehen aussieht und wie das "explorative Interesse" (bzw. eine "Didaktik des Verstehens") charakterisiert werden kann, das dafür konstituierend ist, bildet den zweiten Teil des Textes.

Die Kunst der naturwissenschaftlichen Untersuchung – eine konstruktive Kritik des Verstehensbegriffs bei Wagenschein Der Text behandelt die Frage der einer "Naturwissenschaft Physik" angemessenen Methodik und Evidenz noch einmal aus anderer, wissenschaftshistorischer bzw. -theoretischer Warte: Wie erlebe ich Evidenz gegenüber Sachverhalten in der Mathematik anders als gegenüber einer in Veränderung begriffenen und überraschenden physischen Welt? An klassischen Texten Platos und Aristoteles wird diese Frage entwickelt und das Aristotelische Konzept der spezifischen *Erkenntnistugenden* entwickelt, aus deren Warte sich die beiden Situationen begrifflich und inhaltlich tatsächlich unterscheiden lassen. Diese Gegenüberstellung wird anhand typischer Praktikumssituationen aktualisiert und es wird dafür argumentiert, dass das moderne didaktisch-psychologische Verständnis von "Kompetenz" im Grunde genommen genau solche individuellen Tugenden beschreibt, die nicht auf einer alltagsfernen Systematik operieren, sondern im oft wenig übersichtlichen Verstehen-Wollen tatsächlicher Erfahrungssituationen. Es wird gezeigt, dass Martin Wagenschein eine solche Unterscheidung weitgehend ausklam-

mert und sein Konzept eines Genetischen Verstehens dadurch beeinträchtigt wird. Das Thema wird abschließend auf verschiedene aktuellere Beispiele von Naturwissenschaftsdidaktik bezogen.

Physikalische Arbeiten

Wie kinematisch ist die Lichtgeschwindigkeit? Methodisches Kernanliegen einer modellfreien Optik ist es, auf die Vorstellung von Transportvorgängen bei "Licht" zu verzichten. Was macht man dann aber mit der "Lichtgeschwindigkeit", die in so vielen physikalischen Argumenten eine Rolle spielt? In diesem Aufsatz wird exemplarisch das klassische "Drehspiegel-Experiment" zum Thema genauer untersucht und Versuchsaufbau und -durchführung ausgehend von den üblichen kinematischen Vorstellungen in die zugrundeliegende abbildungsoptische Problemstellung einer "Abbildung einer Lichtquelle auf sich selber" übersetzt. Dabei wird nicht nur die Funktion verschiedener Komponenten, etwa der speziellen Linse mit ungewöhnlich großer Brennweite, die beim "kinematischen Nachdenken meist gar nicht erst berücksichtigt wird, erst nachvollziehbar, sondern auch die trickreiche Einrichtung der Abbildungsverhältnisse, die trotz eines schnell drehenden Spiegels eine statische Abbildung erlaubt. Zuletzt lässt sich das Experiment "bildoptisch" in völliger Analogie zu Rømers Beobachtung einer Konstellationsabhängigkeit der Zeiten für die Verdunkelung der Jupitermonde lesen und als "lichthafte" Beziehung zwischen Beobachter und Gegenstand auch relativitätstheoretisch ohne Bewegung von Licht deuten.

Der Blick ins Becken – perspektivische Effekte und Bildverzerrungen in einfachen Situationen mit optischen Medien Das bildoptisch-modellfreie Gegenstück zur strahlenoptischen "Brechung" ist die "Hebung" – die scheinbare Nähe (und Verzerrung) des Beckenbodens durch eine Schicht Wasser, durch die der Beobachter aus dem Luftraum in das optisch dichtere Medium blickt. Der Text führt in Form eines kleinen Lehrgangs durch das Thema und schließt dabei eine Reihe kleinerer und größerer konzeptioneller Lücken, die sich durch die Literatur ziehen. Kernstück ist die Einsicht, dass bildoptisch vor allem *perspektivische* Effekte die Ansicht bestimmen, und die Behandlung einer Reihe von Problemen in diesem Zusammenhang. Den Abschluss bildet eine Untersuchung zur Frage, in wie weit sich bei der Brechung zum "Spiegelraum" (der modellfreien Konzeptualisierung der Reflexion) analoge quantitative Konzepte finden lassen – verschiedene "schwache Formen" dieser Analogie werden entwickelt und es wird gezeigt, dass im allgemeinen kein Perspektivwechsel die Effekte der Hebung aufheben (oder imitieren) würde.

Pingpong im Nebenzimmer – Energie und Kinematik springender Bälle Diese Arbeit thematisiert die Konzeptualisierung von “Energie” als “Zeitgestalt” eines Vorgangs an einem alltäglichen und dabei spannenden Beispiel, nämlich der Folge von Kraftstößen, die springender Ball erfährt. Dafür wird eine Curriculumsequenz entwickelt, die ausgehend vom idealen Vorgang zu quantitativen Messungen und physikalischen Interpretationen der Abweichungen vom idealen Vorgang übergeht. Es werden zwei verschiedene Dissipationskanäle des Vorgangs sichtbar, denen mit weiteren Beobachtungen und Überlegungen nachgespürt wird. Ähnlich wie beim Text “Blick ins Becken” steht der investigative Charakter im Vordergrund, dem die klassischen Fachinhalte “zuarbeiten”.

Die phänomenalen physikalischen, chemischen und biologischen Erfahrungsgrundlagen eines Begriffs von Energie als Bilanzierungsgröße Die Frage danach, was “Energie” ist und wie sie im Unterricht glücklich beigebracht wird, durchzieht die Physikdidaktik wohl seit ihrem Beginn. Der Aufsatz ist der Versuch einer erscheinungsorientierten Annäherung an das Thema. Dabei spielen Betrachtungen zu Alltags- und Leibeserfahrungen ebenso eine Rolle wie sprachtheoretische Überlegungen. Das physikalische Begriffssystem “Arbeit, Energie und Leistung” ordnet sich unter solchen Gesichtspunkten zwanglos in die elementaren Zeitbezüge “vorher, während, nachher” des fraglichen Vorgangs ein. Da zuletzt quantitatives Bilanzieren angestrebt ist, werden verschiedene konzeptionelle Zwischenstufen dieses Bilanzierungsgedankens und eine Hierarchisierung dieser Konzeptstufen vorgeschlagen. Es zeigt sich dabei eine zwanglose Beziehung zu chemiedidaktischen Überlegungen.

Lichtspuren im Wasser – Ein Experiment zum Verhältnis von Brechung und Hebung Der Text ist das Ergebnis der Auseinandersetzung mit einer scharfsinnigen Frage, die Johannes Grebe-Ellis 2005 gestellt hatte: “Gibt es ein objektives/abgelöstes Experiment zur Hebung?” Ich hatte daraufhin das in diesem Text vorgestellte Experiment vorgeschlagen, das von Johannes Grebe-Ellis und Matthias Rang dann 2007 erstmals auf einem Workshop präsentiert wurde. Der Aufsatz entwickelt den konzeptionellen Rahmen anhand der Gegenüberstellung von eingebundener (subjektiver) und abgelöster (objektiver) Perspektive an einfachen Experimenten und entfaltet dann in zwei Schritten den Reichtum der zu machenden Beobachtungen bei der Darstellung “abgelöster Hebungseffekte”. Dabei wird nicht nur das Konzept der “Hebung” vertieft, es entstehen auch einige überraschende Einsichten und eine zum Snellius’schen Brechungsgesetz analoge quantitative Hebungsgesetzmäßigkeit, die die Strahl- bzw. Blickrichtung “unter Wasser” nur anhand zugänglicher geometrischer Parameter liefert.

Teil I.

Essays zum Verstehen von Physik

3. Experimentieren zwischen Entertainment und affirmativer Praxis¹

Es ist keine Neuigkeit: Physik ist bei den Schülern nicht nur ein ausgesprochen unbeliebtes Fach (Muckenfuß, 1995), der Unterricht ist auch bedenklich erfolglos (Heuer & Wilhelm, 1997; Bruhn, 1983). Andererseits gelten die Lerninhalte der Physik als biographisch und auch gesellschaftlich relevant, sogar bei den Schülern, die das Fach selbst nicht schätzen (Muckenfuß, 1995). Müssen wir mit diesem Kummer, diesem Zwiespalt leben oder gibt es Abhilfe, liegt das Heil vielleicht in einem grundsätzlich anderem didaktischen Griff, etwa nach Wagenschein (Wagenschein, 1965), oder dadurch, dass man versucht, das Curriculum begrifflich zu entschlacken? Anhand von Thesen soll hier eine recht persönliche Analyse des Problems versucht werden. Doch das eigentliche Anliegen sind Gesichtspunkte dazu, auf eigenen Wegen nach Lösungen zu suchen – bei uns selbst.

Physik (nicht) verstehen

Eine erste hilfreiche Beobachtung auf diesem Weg ist, dass die Schüler tatsächlich dankbar sind, wenn man sie mit dem Physikunterricht erreicht. Eigentlich, so die erste These, eigentlich wollen die Schüler gern Physik lernen. Und, so die zweite These, sie sollen auch: “Was sich in Physik lernen lässt, lässt sich nur in der Physik lernen”! Die Physik hilft uns nicht nur in tausenderlei Alltagssituationen zu verstehen, was um uns vorgeht, und auch uns ggf. selber zu helfen, sie weitet den Blick für Zusammenhänge in Natur und Gesellschaft schafft eine spezifisch wissenschaftliche Urteilsfähigkeit. Wenn wir dies beides ernst nehmen, folgt zunächst, dass man sich mit der misslichen Lage des Schulfaches Physik nicht abfinden darf, noch ganz abgesehen davon, was Industrie und Universitäten fordern. Also gilt es zunächst besser zu verstehen, worin das grundsätzliche – denn um ein solches scheint es zu gehen – Problem der Schüler (oder wessen auch immer) denn liegt.

Wohl jeder Physik(lehr)er kennt das: man kommt mit jemandem ins Gespräch und auch auf den eigenen Beruf. Dann hört man vielleicht: “O ja, Physik – Physik habe ich in der Schule gehasst, ich habe *nichts* kapiert!” Merkwürdig ist nur, dass

¹Erschienen in Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 56/6 (2003), S. 368 – 370.

man es zumeist eigentlich mit ganz verständigen Zeitgenossen zu tun hat. Auch sagt man, Mädchen hätten es mit Physik schwerer (und ganz sicher studieren viel weniger Frauen Physik als Männer) (Herzog, Neuenschwander, Violi, Labudde & Gerber, 1999). Aber am Geschlecht allein liegt es sicher nicht, denn es gibt ja umgekehrt genug richtig gute Schülerinnen. Und warum leuchtet manches, das wir Lehrern für ganz durchsichtig und großartig halten (und sehr versucht haben, gut zu erklären), intelligenten und kooperativen Schülern nicht wirklich ein? Sie machen dann – wohl uns zuliebe – vielleicht das, was wir von ihnen wollen, aber nicht mit innerer Überzeugung oder gar Begeisterung.

Nun könnte man denken, es ist einfach zu schwierig. Und man könnte in der Folge darüber nachsinnen, ob eher die Schüler “nachgelassen” haben, oder ob man als Lehrer vielleicht zu viel verlangt. Allerdings sind aktuelle Schulbücher deutlich schöner und bemühter als die, die wir als Schüler hatten, die Inhalte sind ansprechend und modern, dazu mundgerecht aufbereitet. Im Allgemeinen sind dafür “die” Schüler sicher gut genug – man halte sich nur vor Augen, was auch ein im Mathematisch-Naturwissenschaftlichen schwacher Schüler dort leisten kann, wenn ihn/sie etwas wirklich interessiert. Ein grundsätzliches Interesse für Physik findet man, wie erwähnt, andererseits sogar bei den Schülern, die es mit dem Fach schwer haben. Es scheint also Teil unseres Problems, dass sich dieses Interesse im Unterricht nicht wecken lässt. Wenn dem so ist, müsste nicht die Physik noch interessanter werden, sondern der Unterricht – aber wie?

Stereotypen und Begriffe?

Tröstlicherweise kennt man solche Erfahrungen sogar in Australien... In einer Arbeit zur Physikdidaktik (Yeo & Zadnik, 2000) berichten die Autoren folgenden Vorgang: nach dem Mechanik-Unterricht beherrscht praktisch kein daraufhin befragter Schüler die Kräftezerlegung an der schiefen Ebene selbstständig. Die Sache wird so ernst genommen, dass ein spezielles, Computer-animiertes Studienprogramm zusammengestellt wird, um dergleichen zu üben. Zwar gelingt es damit, die Leistungen der Schüler bei dieser Problemstellung signifikant zu heben, schon leicht abgewandelten Aufgaben gegenüber sind diese allerdings weiterhin genauso hilflos wie zuvor. Die Nähe zu den von Heuer (Heuer & Wilhelm, 1997) geschilderten Erfahrungen ist deutlich: das Anliegen, den Schülern der Wirklichkeit gegenüber eine Art universelles (Verständnis-)Werkzeug an die Hand zu geben, wird im Unterricht verfehlt. Was sich nach einigem Aufwand eingepreßt hat, sind nicht Einsichten, sondern bestenfalls Stereotypen, die von den Schülern wie lateinische Vokabeln gelernt – und vergessen werden.

Wer zum ersten mal für Schüler die Beschleunigungsgesetze an der schiefen Ebene

demonstrieren wollte, wird vielleicht ebenso unangenehm überrascht worden sein wie der Autor: Wenn man es nicht "geschickt" anfängt, kommt die quadratische Zunahme der zurückgelegten Strecken aus den Messdaten nicht heraus. Vielleicht ist man versucht, stattdessen eine Computersimulation zu zeigen, doch Physik-Simulationen brauchen eben kein Geschick und fördern es vielleicht auch bei den Schülern nicht! Mit Heuers Untersuchung zur aktiven (Nicht-)Beherrschung des Trägheitsgesetzes ist es ein wenig ähnlich; unsere Schüler merken jeden Morgen auf dem Weg zum Physikunterricht, dass ihr Fahrrad auf verschiedenen Wegbelägen verschieden gut rollt, dass sich die Fahrräder verschieden leicht fahren (aber besser rollen als die Klapproller), dass Wind von vorne sehr anders ist als von hinten und dass auch nur etwas schneller zu fahren u. U. deutlich schwerer geht. Welchen Stellenwert kann ein Lerninhalt für die Kinder haben, der sich auf *vorgestellte Erfahrungen* bezieht, nicht auf die von ihnen gemachten?

Andererseits haben wir natürlich die Möglichkeit, geeignete Experimente zu diesen Inhalten zu zeigen. Vielleicht böte gelungenes Experimentieren eine doppelte Lösung, indem der Unterricht (vgl. oben) einerseits interessanter wird, andererseits die geforderten Inhalte handfest verdeutlicht werden. Guter Unterricht wäre dann der im Titel angesprochene Mix aus Unterhaltung und Nahebringen dessen, was in den Büchern steht ("*Edutainment*"). Dazu aber ein Vorversuch: Ziehen wir eines der Physik-Lehrbücher aus dem Schrank, die uns im Studium begleitet haben, und schlagen es irgendwo mittendrin auf. Dann lässt man jemanden, der (oder besser: die) nicht vom Fach ist, sagen, wovon da wohl die Rede ist. Mit einiger Wahrscheinlichkeit (der Autor hat das ein paar Mal versucht) wird unser Testkandidat auf Mathematik tippen.

So falsch liegt er dabei auch nicht. Es geht ja tatsächlich um Mathematik, nur eben im Umfeld der Naturwissenschaft. Das ergibt eine interessante, philosophisch angehauchte Fragerichtung: Haben wir in der Physik auch zuerst (Mathematik-artige) Begriffe und untersuchen dann (nach mathematischer Methode) deren Verhältnis? Oder leben wir nicht zunächst in diesen Verhältnissen und entwickeln daraus die Begriffe, also die Gesichtspunkte für unser Weltverhältnis? Also zum Beispiel: Haben wir die Zutaten Kraft, Masse und Beschleunigung und *formulieren* als deren Verhältnis $F = ma$? Oder haben wir die Erfahrung "Zum Führen der Bewegung eines Gegenstandes muss ich Kraft ausüben" und finden beim Dem-Nachgehen das, was sich zu Kraft, Masse und Bewegungsänderung in diesem Kontext denken lässt?

Mathematik statt Erfahrungswissenschaft

So ziemlich alle Vorgänge in der Welt sind potentiell Physik-Experiment und so ziemlich nichts funktioniert dabei nach Lehrbuch. Wollen wir, dass unsere Schüler

wirklich hinsehen, was eigentlich los ist, oder geht es in Physik mehr um eine (mathematisch) saubere Scheinwelt (vgl. (Hagemeister, 2001))? Die Schüler interessieren sich zutiefst und zu Recht für die Welt, die sie umgibt. Mir scheint, wenn Heinz Muckenfuß mit seinem "sinnstiftenden Kontext" (Muckenfuß, 1995) erfolgreich ist, wenn Schüler an praktischen Fragen anbeissen, liegt das auch am Eingehen auf dieses Grundinteresse.

Dieses Interesse ist kostbar, nicht nur, weil es der Schlüssel für einen gelungenen Unterricht ist, sondern auch, weil mehr *inter-esse*, also Anteilnahme an der Welt das erste und wichtigste Unterrichtsziel überhaupt ist. Das Eingehen darauf scheint mir nicht so sehr eine Frage des Lehrplans oder der experimentellen Ausrüstung als vielmehr unserer Gesinnung als Lehrer. Es ist für den Unterricht natürlich bequem, die Naturgesetze durchzugehen und abzuhaken. Nicht so bequem ist es, sich einer auch schon auf Laborebene verwickelten Welt zu stellen und nicht nur darum ringen zu müssen, ihr gerecht zu werden, sondern dabei auch noch klar und spannend zu bleiben. In der Erklärung "das ist jetzt so, weil..." kommt es offenbar sehr auf die Fortsetzung an. Bemühe ich höhere Gesetzmässigkeiten, die allzu leicht zum Schema werden? Schaffe ich es, den Vorgang an der Sache selbst verständlich zu machen?

Natürlich gehört beides zur Methodik der Physik. Ich habe fast vier Jahre lang experimentell geforscht und sehe, dass da einerseits ein Weg zurückzulegen war, auf dem wir komplizierte Verhältnisse erst allmählich kennen- und dann auch deuten und ansprechen lernten. Andererseits wäre es zumindest Kraft- und Zeitverschwendung gewesen, für Darstellungen und im Weiterforschen so zu tun, als wüsste man noch nicht, worauf es einem ankommt und wie es weitergehen könnte. Aber es scheint, als gäbe es zwei verschiedene, ja fast komplementäre Arten, die Sache anzugehen: eine – im obigen Sinne mathematische – Weise, Physik zu treiben, und die Situation, dass Erfahrungen gemacht und gedanklich durchdrungen werden sollen. Erkenntnis braucht beides, besonders für die Schüler. In der Forschung führt der Weg typischerweise von den Erfahrungen zur (mathematischen) Durchdringung.

Im Unterricht stehen wir dann als die, die wissen, wie alles (eigentlich!) ist – es kann einen ja erschüttern zu sehen, wieviel Autorität in der Öffentlichkeit das Etikett "Physiker" hat, sei es auf den Autorenbeschreibungen populärwissenschaftlicher Bücher, sei es in den vermischten Meldungen der Medien. Ist das ein Ergebnis eines kollektiven Schultraumas, einer Einschüchterung, die nebenbei am Lernen hindert? Hierzu die dritte These: Der Kern des pandemischen schulischen Desasters im Fach Physik ist, dass wir den Kindern der Gesinnung nach als Mathematiker entgegentreten, wo sie eigentlich Erfahrungswissenschaft nötig hätten. Wir tragen den Schülern (ja eigentlich allen Nicht-Physikern) zu oft und zu gern eine schematische Welt entgegen, ihre Fragen haben sie aber an die reichen Erlebnisse, an die Vielfalt, an das Konkrete. Kein Wunder, dass sie uns erst nicht verstehen und dann nicht mehr zuhören...

Naive Physik?

Selbst wenn die dritte These stimmen sollte, besteht eine offensichtliche Gefahr, nämlich die Orientierung des Unterrichts hin auf (zu) naives Veranschaulichen. Doch eigentlich wäre es wohl gar nicht so schwer, Inhalte wie die Fallgesetze zwar nicht zu beweisen, aber aufzuzeigen. Vielleicht so: Wenn wir " $s = at^2/2$ " schön zeigen wollen, muss das, was die Bewegung hindert, gegen die (Fall-)Beschleunigung entlang der schiefen Ebene unerheblich sein. Auch ohne Luftkissenbahn und spezielle Präparationen merkt man das dennoch beim blossen Steiler-Stellen der Bahn; erst wenn dieser Sachverhalt eingesehen ist, macht die Luftkissenbahn Sinn!

Im konkreten Vorgang zeigen sich als Tendenz immer sowohl Fall- oder Beschleunigungsgesetz, als auch die unausweichlichen Widerstände gegen Bewegung. Unter bestimmten Bedingungen sieht man mehr das eine, unter anderen Bedingungen ist es vielleicht anders; verschiedene Vorgänge sind anders "komponiert", lassen sich aber einordnen. Offenbar ist es an dieser Stelle nicht mehr nötig, im Experiment die Reibung ganz zu beseitigen, sie gehört dazu. Man sehe sich an der schiefen Ebene einmal die "Gesetzesbrüche" ausführlicher an. Verschiedene Kugeln rollen durchaus nicht gleich gut (und klingen dabei sehr verschieden); auf flachen Bahnen kommen die Kugeln sehr schnell in stationäre Bewegungszustände; gleiche Kugeln zeigen sehr verschiedenes; mit Schleifpapier und Schmiermitteln ist einiges zu erreichen usw. – es kann einem dabei die Lust vergehen, die schiefe Ebene als Paradebeispiel für gleichmässig beschleunigte Bewegung zu zeigen. Nicht, weil es diesen Aspekt dabei nicht gäbe, sondern weil es eine Vereinseitigung, ein Unrealistisch-Machen der Situation bedeutet. Das Fallgesetz ist nicht das, was im Versuch eigentlich zu sehen sein müsste, sondern das, was an der konkreten Bewegung gesetzhaft auftritt.

Neue alte Wege

Nicht ein bestimmtes Experiment allein belehrt uns, sondern dessen gezielte Abwandlung; um etwas zu verstehen, brauche ich Einsicht in das mehr oder weniger von dem, was jeweils für den Vorgang eine Rolle spielt. Das Fallen von Feder und Bleiklumpchen ist unter Atmosphärenbedingungen sehr verschieden, was vom gleichartigen Fallen im Vakuum her aber eigentlich gar nicht besser verständlich wird. Deutlicher wird die Sache erst im sukzessiven Evakuieren und der einhergehenden Angleichung. Dann stellen sich auch Fragen, die zu anderen Versuchen führen: etwa ein Bleiklumpchen, das in Öl fällt, oder der Fall am Fallschirm. Einen linearen Zusammenhang von Verformt-Werden und Zugkraft kann ich erst würdigen, wenn ich gesehen habe, wie anders sich das bei Holz oder Gummi verhält. Bedeutung und Grenzen des Ohmschen Gesetzes erfahre ich an konkreten U - I -Kennlinien.

Damit allerdings hat man sich schon ziemlich von der Präsentation oder Abarbeitung eines Programms "Die Welt, physikalisch erklärt" entfernt. Physik ist nicht mehr zu bestätigendes Erklärungsmuster, sondern ein Abenteuer mit ungewissem Ausgang, das offen ist für die Zukunft. Dies sei die vierte und letzte These: Darin liegt nicht nur didaktisches Potenzial, es macht auch dem Lehrer Spass! Die Nähe eines solchen Vorgehens zur Methodik Goethes (J. W. von Goethe, 1973) wird hoffentlich niemanden stören. Zwei Dinge müsste man dafür beachten. Zum einen: möglichst nicht zu denken "Mist, das ist jetzt schief gegangen", wenn ein Versuch nicht das Erwartete zeigt, sondern zu merken, dass es auf mehr oder anderes ankommt als gedacht, um den Vorgang zustande zu bringen. Zum anderen: wie ist die Art, in der wir über die Dinge denken und sprechen – mathematisch oder konkret? Je mehr es gelingt, den abstrakten Begriff an konkretes Geschehen anzuschließen, desto tiefer wird dieser Gesichtspunkt befriedigen. Es ist dies eine andere Befriedigung als sie aus einer im obigen Sinn mathematischen Diskussion erwächst. Überspitzt gesagt, wird der Vorgang nicht "kanonisiert", sondern man macht sich mit ihm vertraut.

Um es zusammenzufassen: Die Befürchtung ist, dass das eigentliche Problem des Physikunterrichtes, ja des Bildes der Physik in der Öffentlichkeit überhaupt, bei uns Physikern liegt. Wir verwechseln das so gewohnten Mathematisierens der Welt mit dem Kennenlernen und auf Verstehen zielendem Erklären derselben. Der Hinweis darauf ist nicht neu, er findet sich mindestens schon bei Wagenschein, und die Praxis vieler Kollegen steuert dagegen. Aber es müsste nicht nur empfunden, sondern klar verstanden werden: Der mathematisch-systematische Aspekt ist zwar für die Formulierung der Physik zentral, für den Unterricht (und übrigens auch für die Forschung) aber allzu leicht kontraproduktiv. Eine Physik-erklärt-Euch-alles-Grundstimmung des Lehrers kränkt, wenn sie die Lebenswirklichkeit der Schüler nicht achtet, den Frageernst der Kinder und verbaut die Offenheit für immer neue, andere, dem Alten widersprechende zukünftige Gedanken und Erfahrungen. Ein Ausweg aus dieser Stimmung wäre, gerade im Experimentieren nicht die Bestätigung für schon Gewusstes, Schematisches zu suchen, sondern das "Wie" des Vorgangs. Vielleicht ist das ja ohnehin die eigentliche Aufgabe der Physik. Und ich persönlich wäre sehr interessiert und dankbar, von Erfahrungen damit auch zu hören.

4. Der Gedanke im Kontext – Zur Charakteristik einer erscheinungsorientierten Physik¹

Es dürfte im Kreis derjenigen, die es angeht, weitgehend Einigkeit über einen Wert des Fachs Physik jenseits des Lehrens bestimmter Inhalte – die als Teil einer erstrebenswerten “Allgemeinbildung” gelten oder Urteilsfähigkeit gegenüber Zeitfragen begründen mögen – herrschen. Curricula und Lehrbücher betonen daneben auch (vgl. jüngst (DPG, 2006)), dass Physik-Lernen eine Gelegenheit ist, sich eine spezifische, höchst erfolgreiche Denkungs- oder Verstehensart gegenüber der Welt anzueignen. Und weil gute, fruchtbare Physik sich dadurch erweist, dass sie auf ein quantitatives, in Formeln und Zahlen fassbares Verständnis des Untersuchungsgegenstandes hinführt, ist die Erarbeitung eines solchen Verständnisses an ausgewählten Beispielen nicht nur ein zentrales Anliegen des Schulunterrichtes, es ist für viele Lehrende synonym für die Methodik der Physik überhaupt. Die im Umfeld der Waldorfschule, aber auch an anderer Stelle verfolgte Methodik der sogenannten “modellfreien” oder, wie wir sie im Folgenden nennen wollen, *erscheinungsorientierten* Physik (Maier, 1993c; Mackensen & Ohlendorf, 1998) stösst hier schnell auf Vorbehalte: Jede quantitative Formulierung eines physikalischen Sachverhaltes beruht ja letztlich auf einer bestimmten Vorstellung, die man sich vom fraglichen Vorgang macht – also eben auf einem “Modell”. Wenn es aber ohne Modelle zugehen soll, wie kann dann das oben geschilderte zentrale Anliegen der Physik erreicht werden?

Dieser Beitrag hat das Anliegen klarzustellen, dass hier ein Missverständnis vorliegt, das wohl durch die problematische Bezeichnung “modellfrei” ausgelöst wird. An einem einfachen optischen Beispiel soll gezeigt werden, dass erscheinungsorientierte Physik durchaus im geschilderten Sinn “gute Physik” sein kann – und dabei das Potential hat, Schüler bereits in der Auseinandersetzung mit elementaren physikalischen Vorgängen an die explorative Haltung “echter Forschung” heranzuführen. Forschen wird dabei verstanden als *die Suche nach angemessenen Begriffen für die Erfahrungen, die wir machen*. An der scheinbar einfachen Frage “Was zeigt das Spiegelbild?” wollen wir das “erscheinungsorientierte Konzept” des *Spiegelraumes* exemplarisch mit einer Diskussion unter Verwendung des klassischen Spiegel-

¹Erschienen in Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 61/4 (2008), S. 236 – 241.

gesetzes (“Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel”) vergleichen und die gegenseitigen inhaltlichen Bezüge und Unterschiede beschreiben.

“Modellfrei”: Frei von was?

Mit Attributen wie “phänomenologisch”, “modellfrei”, “erscheinungsorientiert” verbindet sich auf dem Gebiet der Optik ein bestimmtes methodisches Anliegen: Optische Erscheinungen sollen aus ihrem erfahrbaren Kontext heraus so verständlich gemacht werden, dass der Rückgriff auf als wirksam vorgestellte, aber im gegebenen Kontext nicht beobachtbare Vorgänge (etwa “Teilchentransport” oder “Wellenvorgänge”) unterbleiben kann. Mehr als 20 Jahre nach den Pionierzeiten, in denen Georg Maier, Manfred von Mackensen und andere dieses Anliegen für die Oberstufe an Waldorfschulen aufgegriffen und ausgearbeitet haben, hat sich viel getan: Auch im akademischen Umfeld besteht Interesse an solchen Ansätzen, es gibt ein entsprechendes Curriculum in Berlin und es liegen inzwischen eine Vielzahl von Arbeiten auf diesem Gebiet vor, die das ganze Spektrum von Lehrmaterial, Abituraufgaben bis hin zu wissenschaftstheoretisch oder philosophisch tingierten Beiträgen, aber auch praktisch das gesamte Spektrum optischer Themen abdecken. Darüber ist auch besser verständlich geworden, was methodisch gewollt ist, und dieser Arbeitsansatz ist nicht mehr auf das Gebiet der Optik beschränkt (vgl. (Mackensen, 2003; Theilmann, 2006a)).

In seinem programmatischen Aufsatz² “Hypothesenfreie Erkenntnis der unorganischen Natur” erklärt Georg Maier, worauf verzichtet werden soll: Nicht auf Vorstellungen von der Sache, sondern auf Annahmen über den physikalischen Vorgang, die über das Beobachtbare hinausgehen und deren Angemessenheit aus dem Vergleichen von daraus abgeleiteten Eigenschaften des Vorgangs und den tatsächlichen Eigenschaften beurteilt wird. Leider durchzieht die populäre Wissenschaftstheorie das Vorurteil, die Verwendung solcher Annahmen sei ein Merkmal von (Natur-)Wissenschaftlichkeit schlechthin.³ Schon eine oberflächliche Beschäftigung mit der Geschichte der Quantenmechanik zeigt allerdings, dass dem nicht so ist, ja exemplarisch den Übergang vom Theorieparadigma des Arbeitens mit Hypothesen zu einer Theoriebildung, die im Heranreifen immer stärker deskriptiven Charakter bekommt, aber ohne dabei ihren quantitativen Charakter zu verlieren (Heisenberg, 2002). So

²Wiederabgedruckt in (Maier, 2004a), wo sich eine Vielzahl weiterer Anregungen zum Thema findet.

³Prominentester Vertreter dieser Ansicht ist sicher Sir Karl Raimund Popper, vgl. (Popper, 2005). Dass die Sache grundsätzlich komplizierter ist, zeigen uns Vertreter der poststrukturalistischen Schule (Foucault, 1996) oder Thomas Kuhn (Kuhn, 2002). Zur langen Tradition deskriptiver Physik vgl. die Arbeiten Friedrich Steinles zu Goethe, Ampere und Faraday, vgl. den Aufsatz in (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006).

lässt sich an dieser Stelle – zwar noch recht abstrakt und provisorisch, aber positiv formuliert – bereits ansprechen, welche Art physikalisches Verständnis mit erscheinungsorientierter Physik gesucht wird: es geht darum, die relevanten in Erscheinung tretenden Elemente eines Vorgangs zu benennen und ihre Beziehungen zu formulieren.

Die Terminologie hat hier allerdings ihre eigene Dynamik. Es gibt eine bestimmte Tradition des Begriffs “phänomenologisch” in der Physik, etwa im Genre “phänomenologische Thermodynamik”. Letzteres meint, dass eine Physik makroskopischer Zustandsgrößen eines thermodynamischen Systems gesucht wird, etwa der Temperatur oder des Drucks, im Gegensatz zu einer Herleitung entsprechender Beziehungen aus der kinetischen Gastheorie anhand mechanischer Überlegungen. Die physikalischen Zustandsgrößen der phänomenologischen Thermodynamik sind dabei keineswegs alle auch “Phänomene”, also “Erscheinung” – innere Energie, Wärmemengen oder Entropie sind Konzepte, die uns nicht direkt auf Beobachtungen verweisen, also keine “Observablen” im engen Sinn. Das methodische Anliegen erscheinungsorientierter Physik ist strenger als das einer in diesem Sinne phänomenologischen Physik – gemeint ist nicht nur eine Theorie, also eine “Betrachtungsart”⁴, die ohne vorgestelltes mikroskopisches Gewimmel auskommt, sondern der Anspruch ist, für das Verständnis möglichst nur Konzepte zu verwenden, die sich auf Beobachtbares beziehen.⁵ Dies soll an einem elementarem Beispiel transparent gemacht werden.

Spiegelgesetz und Spiegelraum

Generationen von Mittelstufenschülern (so auch ich) haben sich darin gefallen, Mitschüler oder Lehrer mit den kleinen “Sonnenflecken” zu ärgern⁶, die man an einem sonnigen Vormittag durch Spiegelung am Deckglas der Armbanduhr im Zimmer hervorrufen und herumwandern lassen kann. Diese Spielchen sind einladend, weil man den Fleck mit unscheinbaren Bewegungen des Handgelenks steuern kann, also äusserlich die typischen Bedingungen an einen braven Schüler (wie Still- und Gradesitzen) erfüllen kann und dennoch dort an der Wand etwas anstellt. Das Zielen erfolgt dabei, oberflächlich betrachtet, völlig analog der Handhabung eines Laserpointers oder einer Taschenlampe: die Stellung des spiegelnden Glases kontrolliert die Position des hellen Flecks. Erst bei grösseren Winkeländerungen macht sich eine gewisse Eigenständigkeit der Bewegung des Flecks bemerkbar – er wandert grössere Winkel als das Handgelenk. Die ganze Handhabung und der Augenschein legen na-

⁴Das altgriechische *theorein* bedeutet in etwa “betrachten”.

⁵Für einen ausführlichen Überblick zum Thema siehe (Grebe-Ellis, 2005).

⁶Vgl. auch die entsprechende Szene im wahrhaft betagten Klassiker “Die Feuerzangenbowle”, wo Heinz Rühmann einem Mitschüler auf diese Weise geographische Hilfestellungen gibt.



Abbildung 4.1.: Ein Spiegel lenkt Licht aus dem Schein einer hellen Lampe: Der Vorgang drängt einem die Vorstellung eines “Abprallvorgangs” auf, die Beleuchtungsrichtung des reflektierten Lichtes ändert sich gemäss “Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel” und hinter dem Spiegel liegt tiefdunkler Schlagschatten, dort “fehlt das Licht”, das nun stattdessen von rechts auf die Muschel fällt.

he, es handle sich um eine Art Abprallenlassen von Sonnenlicht an der Spiegelfläche (Abb. 4.1).

Eine völlig andere Welt als das “Herumschießen” von Licht eröffnet der Umgang mit Spiegelbildern. Als Gegenüber ist der Spiegel so vertraut wie (wenigstens latent) unheimlich, das Spiegelbild (Abb. 4.2) ist einerseits eine Art erbarmungslos getreues Abbild des Urbildes, andererseits ist es auf eine meist zu oberflächlich bedachte Weise “verkehrt”: An den Spiegelgegenständen ist nicht – wie oft zu hören oder lesen ist – rechts und links vertauscht (so wenig wie oben und unten vertauscht sind), sondern sie sind im Vergleich zu ihren Urbildern “umgestülpt”, alle Formen, die im Gegenstandsraum in den Spiegel hineinweisen, weisen im Spiegelbild in die Gegenrichtung (und umgekehrt).⁷ Der bruchlose räumliche Eindruck dessen, was im Spiegel zu sehen ist, die stimmige Perspektive, die authentische Farbigkeit usw. erwecken den Eindruck, als würde der Spiegel die Gegenstände verdoppeln und damit auch verselbstständigen.⁸

⁷Wenn ich nach links weise, weist mein Spiegelbild in dieselbe Richtung, allerdings mit der anderen Hand. In diesem Sinne “bleibt also links links”, obwohl im Spiegel die anderen Hand ins Spiel kommt.

⁸Diese Motive sind in der Weltliteratur allgegenwärtig, vgl. die Dialoge der Stiefmutter mit ihrem Spiegel in “Sneewittchen” oder die bekannten Bücher von Lewis Caroll. Zu Beginn der phantastischen Erzählung *Tlön, Uqbar, Orbis Tertius* von J. L. Borges (in (Borges, 2004)) spielt der Autor mit fiktiven Assoziationen an einen Eintrag in einer obskuren Enzyklopädie (und damit mit noch ganz anderen Konzepten von “Spiegelung” der Welt): “Vom fernen Ende des Ganges belauerte uns der Spiegel.



Abbildung 4.2.: Das Spiegelbild einer Muschel zeigt den Gegenstand nicht nur von der anderen Seite, sondern in ihrer Orientiertheit im Raum verändert, so etwa diese Muschel mit umgekehrten Drehsinn, eben spiegelbildlich.

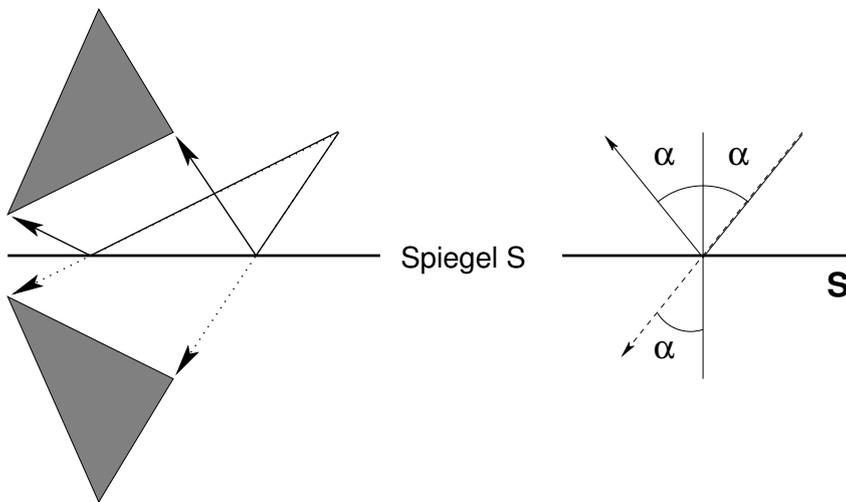


Abbildung 4.3.: Die Reflexion am Spiegel liefert für jedes Blickziel eine Sichtverbindung “wie zu einem Spiegelgegenstand” (links). Das Spiegelgesetz “Einfallswinkel = Ausfallswinkel” heisst (wegen der Gleichheit der Scheitelwinkel am “Reflexionspunkt”) auch, dass sich der “scheinbare Blick” geradlinig in den Spiegel hinein fortsetzt (rechts)!

Man kann sich unschwer klarmachen, wie die Ansicht des Spiegelgegenstandes durch Reflexion an der Spiegeloberfläche entsteht (Abb. 4.3). Auf dem Umweg über den Spiegel realisieren sich neue Sichtbeziehungen zum Gegenstand, und zwar genau so, wie sich die direkte Sicht auf einen Spiegelgegenstand einstellen würde. Auf dieser Stufe sind Sprechweisen, die die sich bietende Ansicht als Reflektionsvorgang beschreiben, und solche, die von "Spiegelgegenständen" reden, äquivalent – es ist dasselbe Prinzip, das den beiden Konzepten zu Grunde liegt, nämlich eindeutige Winkelbeziehungen "an der Spiegeloberfläche". Auf den ersten Blick erscheint dabei der Bezug auf eine Art realen Raum, den Spiegelraum, hinter dem Spiegel allerdings ein wenig gewollt, vielleicht auch betont naiv. Andererseits kann man bemerken, dass die Gedankenbewegung "ich schaue via Spiegel so auf den Gegenstand, wie wenn ich direkt auf einen Spiegelgegenstand schauen würde" offen ist für verschiedene Lesarten oder Vorstellungen davon, "wie das geht". Während Denken in "Reflexionen" einen Transportvorgang impliziert (und damit ein "Etwas" des Lichtes), ermöglicht das Denken in Sichtbeziehungen durchaus den Verzicht darauf, diese Frage zu stellen – unsere Formulierung hängt nicht an einem speziellen Lichtmodell, etwa der Verwendung von "Lichtstrahlen", wir sagen etwas aus über die Eigenschaften der Ansicht, nicht über ihr Zustandekommen. Und ein zweiter Blick zeigt, dass dieses "wie wenn" durchaus interessant, weil "prognostisch" anwendbar ist: Für eine gegebene Konfiguration von Gegenständen, deren Spiegelansicht erschlossen werden soll, müsste ich, wenn ich nur das Reflexionsgesetz zur Verfügung habe, die Ansicht etwa über die geometrische Konstruktion von Positionen markanter Punkte zusammensetzen. Unsere scheinbar naive Formulierung hin auf einen Spiegelraum ist nicht nur eine Aussage über einzelne Sichtbeziehungen, sondern beschreibt die Sichtverhältnisse "als Ganzes". Ich kann mir klarmachen, welche Spiegelgegenstände im Spiel sein werden und wo sie im Spiegelraum stehen; die damit sich einstellende Ansicht ist die gesuchte Spiegelansicht, inclusive gegenseitigen Verdeckungsverhältnissen, Perspektive usw. So ist der "Spiegelraum" kein Wort- oder Gedankenspiel, sondern im geschilderten Kontext eine durchaus sachgemässes Konzeptualisierung, die durchaus genau formuliert, was der Spiegel zeigt. Die Eigenständigkeit der Spiegelgegenstände zeigt sich dabei nicht nur "jenseits des Spiegels" oder in ihrem Bildcharakter (Abb. 4.4): Sogar die Beleuchtungsverhältnisse spielen frei zwischen diesseits und jenseits des Spiegels.

Wir entdeckten (in tiefer Nacht ist diese Entdeckung unvermeidlich), daß Spiegel etwas Monströses haben. Daraufhin erinnerte sich Bioy Casares, einer der Häresiarchen von Uqbar habe erklärt, die Spiegel und die Paarung seien abscheulich, weil sie die Zahl der Menschen vervielfachen."



Abbildung 4.4.: Der Spiegel mit Kerze und Schattenwerfer: der Spiegelraum beansprucht, gleichberechtigt mit dem gewöhnlichen Raum angeschaut zu werden – Licht und Schatten spielen frei und dabei optisch korrekt, ohne ein Diesseits oder Jenseits des Spiegels zu beachten.

Explorative Gedankenbewegungen

Spätestens hier lässt sich gewissermaßen umgekehrt zur obigen Position die Frage aufwerfen, ob es nicht eher künstlich ist, die Sicht in einzelne, jeweils einzeln reflektierte Sichtbeziehungen oder Strahlen zu zerlegen. Das Zustandekommen der Ansicht würde dabei über recht zusammenhangslose, quasi-mechanisch ablaufende Reflexionsereignisse vorgestellt, ihre Struktur aber nicht ohne weiteres verständlich. Die Ansicht im Spiegel als Blick in den Spiegelraum zu konzeptualisieren, ist für jedes einzelne Detail der Sicht (also den einzelnen "Strahl") geometrisch gleichwertig zum Denken in Reflexionsvorgängen, aber ermöglicht, die sich bietende Spiegelansicht als Ganzes in den Zusammenhang von "echten" Gegenständen und Spiegel zu stellen.⁹ Indem wir uns nicht mehr einen in Strahlen- oder Wellengänge aufgelösten optischen Vorgang vorstellen, sondern im Konzept "Spiegelraum" die sich einstellenden Sichtbeziehungen konstatieren, vollziehen wir auch einen methodischen Paradigmenwechsel. Wie konsequent der Spiegelraum unseren "echten" Sehraum erweitert, erschliesst sich uns erst Schritt für Schritt, indem wir seine Eigenschaften kennenlernen. Der Spiegelraum ist zunächst eine bestimmte Gedankenbewegung, deren Wert darin besteht, dass wir im Verfolgen derselben die optische Situation immer weiter erkunden und immer differenzierter erfassen. Der erscheinungsorientierte Begriff "Spiegelraum" integriert die *Tatsachen* der Situation, es wird tatsächlich Beobachtetes, also in diesem Sinn "Wirkliches" entdeckt, bedacht und besprochen. Wir behaupten nicht einen magischen Raum hinter der Scheibe; was zu sehen ist, muss als Sichtbares bewusst von einer nicht gegebenen stofflichen Existenz unterschieden werden ("Seh-Ding vs. Tast-Ding", vgl. (Berkeley, 1975)). Wir sagen etwas aus darüber, wie sich Ansichten konfigurieren, aber spekulieren nicht über die Realität der Spiegelbilder.

Physikalisch erklären heisst im gewöhnlichen Verständnis, zu einem Phänomen eine passende Deutung parat zu haben, also das, was geschieht oder vorliegt, anhand bestimmter abgesicherter, "kanonischer" oder konventionsgemäss für erklärend oder gültig gehaltener Begriffe zu schildern. Wir entwickeln diese Gedanken aus der erklärenden Hypothese, die den eigentlichen Sachverhalt typischerweise im Bild eines vorgestellten mikroskopischen Vorgangs (Licht als Photonenfluss, Wärme als molekulare Bewegung etc.) formuliert. Erscheinungsorientiertes Arbeiten heisst dagegen Suche nach Verstehen, nach dem Begriff für das, was sich zeigt und auch für das, was an anderen, neuen Aspekten gleichsam dazugesammelt wird. "Spiegelraum" meint vielleicht zuerst virtuelle Dubletten an zu den Originalen symmetrischen Standorten, dann auch Fortsetzung von Perspektive, Parallaxe und der Verde-

⁹Schließlich lässt sich auch der helle Fleck an der Wand, der durch das Uhrglas zustandekommt, als Ort verstehen, der hell ist, weil er direkt von einer Spiegelsonne beschienen wird.

ckungsordnung, dann die gleichberechtigte Mitwirkung der Spiegelgegenstände am Spiel von Licht und Schatten und zuletzt erweist sich sogar, dass gespiegelte optische Mittel wirken, wie wenn sie räumlich-stofflich da wären, und im Spiegelraum sogar relativistische Überlegungen funktionieren (Theilmann & Maier, 2004; Theilmann, 2006b). Das Konzept Spiegelraum erweist sich auch im Kontext eines erweiterten Umfeldes von optischen Modalitäten als tragfähig und das schrittweise Erkunden dieser Sachverhalte vermehrt nicht nur die Menge der gemachten Erfahrungen, sondern füllt auch den verwendeten Begriff. Die physikalische Situation offenbart mehr und mehr ihre "Ratio", die der Begriff eben zu "greifen" sucht. Genau diese gedankliche und experimentelle Suchbewegung ist aber typisch Forschung, der Vorgang hat, obschon er kein eigentliches physikalisches Neuland erschliesst, durch die Art, in der er geführt wird, in natürlicher Weise explorativen Charakter (Steinle, 2006).

Erkenntnissicherheit und Erkenntnisziele

Ganz allgemein haben wir es in der Physik nicht mit isolierten Erscheinungen zu tun, sondern mit mehr oder weniger komplizierten Erscheinungskomplexen, und deren Struktur und Umfeld bilden das Bezugssystem, an dem sich jede Repräsentation des Sachverhaltes messen lassen muss. Habe ich eine modellgestützte Erklärung an der Hand, ist es nicht gesagt, dass angestrebt wird, diese Struktur zur Gänze oder möglichst vollständig kennenzulernen. Jeder gegenüber Einzelbeobachtungen möglicher Erklärungsansatz kann eigentlich gelten und so kippt die Sache leicht: Der Durchgang durch die Entwicklungsreihe der Atommodelle oder der Blick auf die mehr oder weniger regelmässigen Palastrevolutionen in der Kosmologie vermitteln den Schülern u. U. weniger die Stimmung von Ringen um Wahrheit als einen subtilen Nihilismus – "scheinbar kommt es den Physikern bloss darauf an, eine Erklärung parat zu haben".¹⁰

Es ist daher spannend, sich zu fragen, woran man jeweils die Erkenntnissicherheit gegenüber der Sache bezieht. Am Spiegel läge die Sache etwa so:

erklärend/modellierend: Zumindest implizit ausgehend von einer Hypothese über den physikalischen Vorgang ("Strahl", "Abprallvorgang" o. ä.) wenden wir das Reflexionsgesetz an (eigentlich eine "Reflexionsregel", denn der Gesetzcharakter ist ja Teil der Hypothese). Wir konstruieren damit etwa in einer Seitansicht wie in Abbildung 4.3 Bildpunkte und folgen dabei den Regeln der Geometrie, in die sich "Einfallswinkel=Ausfallswinkel" als Vorschrift einreicht. Wir treiben Mathematik nach den Regeln der Kunst – das Gefühl der Sicherheit,

¹⁰Eine Stimmung, die entsprechendes Abprüfen dieser Inhalte verstärken kann. . .

die Evidenz unserer Konstruktion gegenüber beruht auf unserem autoritativen Verhältnis zur Geometrie.

beschreibend/erscheinungsorientiert: Wir suchen Begriffe für das, was der Spiegel zeigt. Merkmale der Ansicht wie “Verdopplung des Sehgegenstandes”, die Umkehrung von “hinein” und “hinaus”, die symmetrischen Positionen der Gegenstände, die Fortsetzung der Perspektive etc. formieren sich zu einem Bild davon, dass und wie sich der Sehraum hinter dem Spiegel als “Spiegelraum” stetig fortsetzt. Je mehr diese Umstände im Bewusstsein sind, desto inhaltvoller kann vom Spiegelraum gesprochen werden – unsere Sicherheit beruht auf eigenen, autonomen Einsichten.

Je nach Zugang wird man sich der Sache auch experimentell anders nähern. Im ersten Fall liegt es nahe, Schauversuche zu zeigen, in denen an gespiegelten schmalen Lichtstreifen Winkelmessungen vorgenommen werden o. ä. Ziel wird eine Art quantitative Bestätigung der Reflexionsregel sein, die in den Konstruktionen zur Anwendung kommt, experimentieren wird tendenziell zur Bestätigungsübung (Theilmann, 2003). Im zweiten Fall wird man auf Situationen zugehen, die den Sachverhalt eindrücklich zeigen, wie etwa in Abbildung 4.4. Ziel wird dann eher sein, genauere oder schärfere Begriffsbildung einzufordern, so an unserem Beispiel den Abschied von der Annahme, der Spiegel gebe schlicht wieder, was vor ihm aufgestellt wird – eine zu oberflächliche Erwartung, die sich in Situationen wie in Abb. 4.2 noch gut beibehalten lässt.

Dabei ist vollkommen klar, dass ein Reden von Spiegelräumen im selben äußerlich-modellierenden Verstehensmodus geschehen kann, in dem ein strahlenoptisches Argumentieren stattfindet (oder umgekehrt Geometrisieren zu höchst authentischen Erlebnissen führen kann!). Dies ist der Versuch zu umreißen, dass ercheinungsorientiertes Arbeiten vor allem eine Frage der inneren Haltung ist und dass bestimmte Konzeptualisierungen diese Haltung fördern, andere sie hindern mögen. Zugleich liegt darin ein Plädoyer für Lehrinhalte, die dem Schüler das selbstständige Bewegen in und Erweitern von einem angemessenen Fragehorizont ermöglichen. Wir verstehen das Spiegelbild noch nicht, wenn wir uns abprallende Photonen vorstellen, so wenig wie ein abstraktes Wissen vom heliozentrischen Bau des Planetensystems uns Orientierung gegenüber den Erscheinungen des Nachthimmels verschafft. Erscheinungsorientiertes Arbeiten steht für das Bilden von Begriffen anhand von realen Erscheinungskontexten und die Möglichkeit, auch an einfachen physikalischen Systemen echte Entdeckungen zu machen. Lernziel für ercheinungsorientierte Physik ist nicht ein Satz erklärender Inhalte, sondern Förderung des autonomen Interesses am umgebenden Naturgeschehen und der Kompetenz eines verständnissuchenden Umgangs damit – durchaus bis hin zum quantitativen Verständnis. Ein grundsätzlicher inhaltlicher Gegensatz zum konventionellen Zugang besteht also in diesem

Sinn nicht, auch wenn mit der geschilderten Lesart von Physik durchaus didaktische, methodische oder erkenntnistheoretische Unterschiede impliziert sind. Der Prozess, diese zu formulieren und zur Diskussion zu stellen, hat begonnen (Grebe-Ellis, 2005; Theilmann, 2006a; Grebe-Ellis & Theilmann, 2006) und verdient weitere Aufmerksamkeit und Darstellungen.

5. Integrierendes Verstehen – Über die mögliche, explizite Rolle von Intuition für das Physik-Verstehen¹

Was “naturwissenschaftlich wahr” ist, sollte keine Frage des persönlichen Standpunktes sein, sondern sich aus zwingenden Schlüssen oder der Datenlage ergeben. Diese Forderung ist Teil des Fundamentes der naturwissenschaftlichen Bestrebung und zugleich die Nagelprobe für die methodische Qualität konkreter Arbeit. Ein genauerer Blick zeigt jedoch, dass es methodisch grundverschiedene Wege zu einer physikalischen Einsicht geben kann. Diese Situation wird an Beispielen entwickelt und in einigen methodischen und didaktischen Konsequenzen erörtert, wobei von dieser Seite her auch Licht auf die alte Kontroverse zwischen Goethe und Newton um die prismatischen Farben fällt. Es wird sich dabei zeigen, dass ein ganzheitlicher gedanklicher Zugriffsmodus – der im Sinne eines *terminus technicus* “Intuition” heißen mag – eine zentrale und konstruktive Rolle in physikalischen Untersuchungen spielen kann, wenn entsprechendes Methodenbewusstsein gegeben ist. Ebenfalls berührt wird die Frage, wie sich ein solches Thema in der Fachdidaktik konstruktiv verorten lässt.

Zwei Arten der gedanklichen Untersuchung

In der Mathematik-Didaktik wird durchaus damit gerechnet, dass konkrete, also individuelle Verstehensprozesse auf Evidenzerlebnissen aufbauen, die intuitiven Charakter haben (Buck & Rehm, 2003). So kann ein klassischer geometrischer Sachverhalt, etwa der Satz des Pythagoras, auf ganz verschiedene Weise eingesehen werden², und schon auf den ersten Blick lassen sich Argumentationen unterscheiden, die ein formales *Kalkül*³ verwenden (Abbildung 5.1), und solche, die den Sachverhalt gleichsam als Ganzes bzw. “direkt” zu erschließen suchen (Abbildung 5.2). Der Unterschied zwischen diesen Arten des Argumentierens, der hier hervorgehoben werden soll, ist das verschiedene Verhältnis zwischen Gesamtsachverhalt und ge-

¹Erschienen in *chim. &ct. did.* 101 (2008) S. 6 – 27.

²Wikipedia nennt die Zahl von über 300 Beweisen.

³Etwa arithmetische Umformungen, flächentreue Transformationen etc.

Einziehen der Höhe h von C auf die Seite c zerlegt das Dreieck in zwei ähnliche Unterdreiecke. Es gilt $q/a = a/c$ und $p/b = b/c$. Algebraische Umformung liefert $a^2 = cq$ und $b^2 = cp$. Diese beiden Gleichung addiert ergeben die gesuchte Beziehung:

$$a^2 + b^2 = cq + cp = c(q + p) = c^2.$$

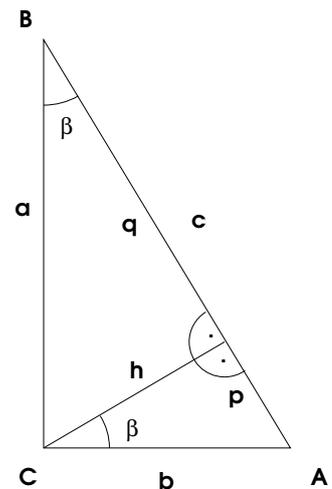


Abbildung 5.1.: Beweis des “Satz des Pythagoras” in einer “analytischen Gedankenführung” (vgl. Text). Ausgehend von Streckenverhältnissen werden die entsprechenden Gleichungen umgeformt und in eine Gleichung übergeführt, die den Sachverhalt als *rechnerisch richtig* aussagt. Eine inhaltliche Interpretation als “Gleichheit von Flächen” würde daran erst anschließen.

danklicher Aktivität. Im ersten Fall entsteht Erkenntnissicherheit, indem *einzelne* Gedankenschritte kunstgerecht aneinandergereiht werden, die einen “schlüssigen” Weg von den Voraussetzungen zu den gemachten Aussagen – dem *Satz* – bilden. Im zweiten Fall wird der Sachverhalt so arrangiert, dass er als Ganzes oder wenigstens in wesentlichen Teilen überschaubar werden kann.

Eine Argumentation des ersten Typs werden wir im folgenden als *analytische Gedankenführung* ansprechen. Sie geht aus von gemachten Voraussetzungen, die formalisiert, also in eine geeignete algebraische oder geometrische, also *abstrakte* Form (etwa eine Gleichung oder eine Figur) gebracht werden. In diesen Anfang gehen neben dem so formalisierten Inhalt auch die zugrundeliegenden, oft impliziten Konventionen ein. Die so entstandenen Gedanken, oder besser: *Gedankenformen* werden dann nach gegebenen Regeln umgeformt, bis eine abstrakt-symbolische Form des behaupteten Sachverhaltes entstanden (oder begründet) ist. Eine Argumentation des zweiten Typs wird den Sachverhalt eher “*sinnhaft*” oder inhaltlich als formal aufgreifen und ihn geeignet in einen überschaubaren Gesamtzusammenhang einbetten, so dass seine “innere Verwandtschaft” bzw. sein inhaltlicher Zusammenhang mit den Voraussetzung mehr oder weniger offenbar ist. Wir werden von diesem Typ des Argumentierens im Folgenden als “*einbettender*” oder “*integrierender Gedankenführung*” sprechen.

Bei einer analytischen Gedankenführung lässt sich das Anerkennen des Sachver-

Vier gleiche rechtwinklige Dreiecke lassen sich z. B. auf die hier gezeigten zwei Arten in ein Quadrat legen, dessen Seitenlänge gerade die Summe der beiden Katheten ist. Einmal bleibt dabei das “Hypothenusenquadrat” unbedeckt, einmal die beiden “Kathetenquadrate”. Die unbedeckte Fläche ist in den beiden Fällen offenbar *gleich groß*...

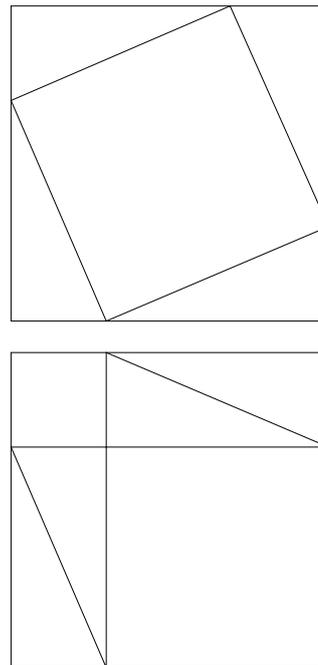


Abbildung 5.2.: Beweis des “Satz des Pythagoras” in einer “integrierenden Gedankenführung” (vgl. Text). Ausgehend von einer neuen, geschickt gewählten Gesamtfigur werden die Dreiecke so verschoben, dass sich der Sachverhalt als “Gleichheit von Flächen” unmittelbar einsehen lässt. So schlagend die hier präsentierte Argumentation ist, sie verpasst noch die Chance, den Lernenden etwa durch Variation der Lagebeziehungen umfassender in das “gedankliche Milieu” des Problems mitzunehmen – für eine ausführliche Darstellung dazu vgl. (Nölle, 2007)

haltes in kleine Einzelschritte auflösen. Der Fokus der Gedankenführung liegt schnell auf der formal korrekten Durchführung der Einzelschritte und nicht mehr auf einem sinnhaften Ganzen, das es zu beweisen galt; hinter ihnen steht jedoch die Autorität der Disziplin selbst und diese gewährleistet vielleicht noch nicht inhaltlich, aber zumindest formal die Korrektheit der Behauptung (Theilmann, 2008a). Die integrierende Gedankenführung besteht darin, einen gedanklichen Gesamtzusammenhang zu bilden⁴, der Voraussetzungen und behaupteten Sachverhalt zugleich *aktuell* umfasst. Dies so auszusprechen macht zugleich klar, dass dieser Gesamtzusammenhang “größer”, *umfassender*⁵ sein muss als es der gedankliche Inhalt von Voraussetzung oder Behauptung für sich genommen ist. Einsicht in die Richtigkeit letzterer ent-

⁴Dieser Gesamtzusammenhang entspricht wohl in etwa der *Beweisidee* einer analytischen Gedankenführung.

⁵Bortoft (Bortoft, 1996) verwendet engl. *universal*.

steht genau dann, wenn wir uns für einen Moment gleichsam dazu aufschwingen, den jeweiligen Gesamtzusammenhang zu sehen.

Der schillernde Begriff *Intuition* kann als Name für diesen Moment dienen. Eine Intuition müsste aber, strenger genommen, nicht nur die Richtigkeit des in Frage stehenden Sachverhaltes umfassen, sondern auch den *Aufweis* dafür (Nölle, 1986; Wyss et al., 1995), dass der Sachverhalt sich sinnvoll befragen lässt – nicht nur, dass so etwas wie $a^2 + b^2 = c^2$ gilt, muss eingesehen werden, sondern auch, dass die rechtwinkligen Dreiecke in der Mannigfaltigkeit der Dreiecke so ausgezeichnet sind, dass so ein hochspezieller Sachverhalt überhaupt auftauchen kann. Es ist klar, dass diese zweite Forderung letztlich auf die Möglichkeit abstellt, weite Teile des Gebietes zu überschauen: Es geht nicht um Bauchurteile, sondern um *fachmännische* Überlegungen, die auf Erfahrung mit dem Gegenstand fußen (Holt, 2002), vgl. auch (NE Reclam, 2003, Buch VI, 1142a 9ff.). Es soll dabei nicht eine scharfe und dabei belastbare Trennung oder eine Unvereinbarkeit der beiden geschilderten Arten gedanklicher Untersuchung vertreten werden, sondern es geht im Folgenden um zweierlei: Einerseits darum, deutlich zu machen, wie verschieden die beiden Arten der Gedankenführung uns (bzw. “den Untersuchenden”) ansprechen, und auch, wie verschieden sie uns fordern. Das andere Anliegen dieses Textes ist es, diese Gegenüberstellung an einem wohlverstandenen physikalischen Problem auszuführen und auf methodische und didaktische Konsequenzen hin zu untersuchen.

Zweierlei Blick durchs Prisma

Der Blick in die Welt durchs Prisma zeigt ein verzerrtes, irritierend unscharfes Bild; daneben erscheinen an Hell-dunkel-Kanten, die parallel zur Kante des Prismas sind, kräftige farbige Säume. Die Physiker erklären einem die Sache schnell: Das weiße Licht sei aus Strahlen oder Anteilen verschiedener Farbe zusammengesetzt, die am Glas des Prismas unterschiedlich stark gebrochen würden. Diese Art, die Sache zu denken, ist allgegenwärtig und findet sich im Lexikon ebenso wie auf dem Plattencover (Abbildung 5.3). Der experimentelle Sachverhalt wird konsequent analytisch gedacht, die Antwort ist kurz, aber keineswegs elementar: Dass über Licht eine “Zusammengesetztheit aus Strahlen” oder “Brechbarkeit” ausgesagt wird, setzt die Existenz eines irgendwie äußerlich vorhandenen Lichtes ebenso voraus wie die Möglichkeit, die *Sinnesqualität Farbe* dieser Entität zuzuordnen.

Noch völlig abgelöst vom Inhalt erscheint hier der methodische Konflikt, der Goethes Auseinandersetzung mit Newton zur Farbenlehre beherrschte: Für Goethe muss eine solche Erklärung inakzeptabel gewesen sein – eine Erklärung, die das, was zu sehen ist, auf vorgestellte Lichtstrahlen und Vorgänge reduziert, passt nicht zu seinem überall im Werk spürbaren Bedürfnis, die Welt als sinnvolles Ganzes zu verste-



Abbildung 5.3.: Die gängige Vorstellung zur Entstehung der “prismatischen Farben” hat Ikonen-Status, hier auf dem Cover des epochalen Pop-Albums *The Dark Side of the Moon* der Band *Pink Floyd*.

hen. Es geht ihm in seiner “Farbenlehre” um mehr als um das Finden einer besseren Erklärung – Goethes Art, das Problem zu bedenken, beansprucht nicht einfach “besser” oder “richtiger” zu sein als die Erklärung Newtons, sondern sie zielt *auf eine andere Art Weltverhältnis*: er sucht gegenüber einem physikalischen Problem ein im obigen Sinn integrierendes, einbettendes Verständnis. Schlüssel für die prismatischen Farben sind ihm Situationen, in denen Farbe als Effekt der Durchsicht in selbst ungefärbten optischen “Mitteln”⁶ – also etwa Dunst oder vermeintlich klarer Luft – auftritt. Der dunkelblaue Himmel unter trockenen meteorologischen Bedingungen und die Gelb-Rot-Töne des Sonnenlichtes bei tiefstehender Sonne entstehen, indem das Medium “Luft” sich gegenüber der Durchsicht als “nicht neutral” erweist: Der Blick in den dunklen Hintergrund des Himmels sieht Sonnenhelligkeit mit, so wie der Blick in Richtung der Sonne die umgebende Dunkelheit (Abbildung 5.4) – und dabei färbt sich die Ansicht⁷. Der Sachverhalt lässt sich an einem geeigneten Stück milchigen Glases oder mit einem kleinen Becken voll Wasser, in dem eine geeignete milchige Emulsion präpariert wird, ohne weiteres demonstrieren: Unter freiem Himmel erscheint “das optische Mittel” unauffällig weislich-trüb, doch die Durchsicht hin auf einen dunklen Hauseingang o. ä. ist bläulich gefärbt. Tragen wir das Medium ins Haus, erscheint hingegen der Blick nach draußen, also ins Helle,

⁶Er spricht dann von *dioptrischen Farben*, die er in zwei Klassen unterteilt.

⁷In das “Wie” der Färbung gehen im Allgemeinen Richtungsbeziehungen und Parameter wie Partikelgröße etc. ein. Neben Färbung tritt z. B. auch Polarisation auf.

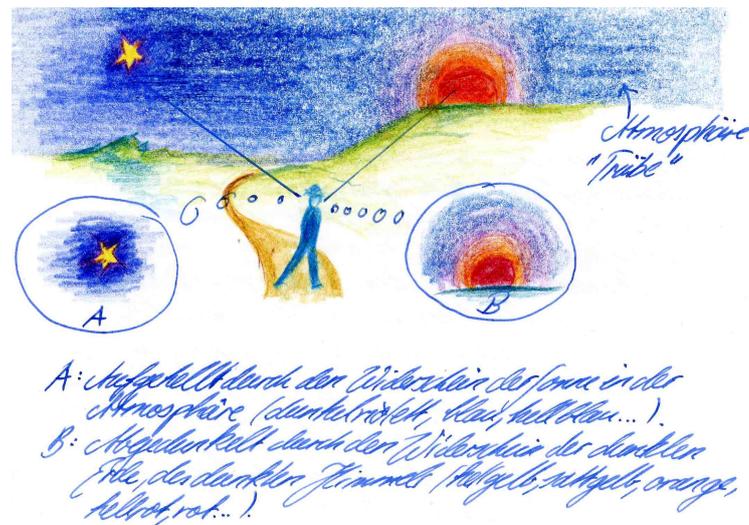


Abbildung 5.4.: Zur Entstehung der atmosphärischen Farben: Himmelsbläue entsteht dort, wo die Atmosphäre vor dem dunklen Sternenhimmel aufgehellt wird, die gelb-rote Färbung der tiefstehenden Sonne entsteht in der Durchsicht durch eine die Dunkelheit des Sternenhimmels wiedergebende Luft.

gelblich gefärbt, das Mittel selbst (i. e. ohne sehr viel helleren Hintergrund) ist aber wiederum nur weißlich-trüb. Goethe formuliert so (J. Goethe, 1979, §175):

Ein solches Urphänomen ist dasjenige, das wir bisher dargestellt haben. Wir sehen auf der einen Seite das Licht, das Helle, auf der anderen die Finsternis, das Dunkle; wir bringen Trübe zwischen beide, und aus diesen Gegensätzen, mit Hilfe gedachter Vermittlung, entwickeln sich gleichfalls in einem Gegensatz, die Farben, deuten aber alsbald durch einen Wechselbezug unmittelbar auf ein Gemeinsames wieder zurück.⁸

Wir würden vielleicht besser noch expliziter formulieren: Durch ein geeignetes trübes Mittel gesehen erscheint Helles in dunkler Umgebung (des Mittels) gelb-rot verfärbt, Dunkles in heller Umgebung hingegen bläulich. Anders als in der oben gegebenen aphoristischen physikalischen Erklärung ist damit keinerlei Aussage gemacht, welcher Mechanismus den Effekt erzeugt, sondern es wird lediglich die Konfiguration von Bedingungen formuliert, die den Effekt hervorruft. Das Urphänomen "erklärt" also nicht, sondern ist Formulierung davon, wie wir in einer bestimmten Situation die Art und Weise der Farbentstehung als etwas gesetzmässig Geschehendes, "Sinnvolles" verstehen. Goethe versucht im Anschluss daran, auch die prismatischen

⁸Vgl. das "Einander-Bedingen" von Himmelsblau und Abendrot oben!

Farben – die “dioptrischen Farben zweiter Art” – auf dieselbe Art zu diskutieren, nämlich dadurch, dass der Durchblick durch ein Prisma als “erhellte Trübe vor Dunkelheit” (bzw. umgekehrt) interpretiert wird.⁹ In der Farbenlehre lässt sich die Stelle lokalisieren, an der Goethe seine Voraussetzung, die Durchsicht an Glas sei ein weiteres Beispiel für den Blick durch “Trübe”, formuliert (J. Goethe, 1979, §178):

Die dioptrischen Farben der beiden Klassen schliessen sich genau aneinander an, wie sich bei einiger Betrachtung sogleich finden lässt. Die der ersten Klasse erschienen im Felde der trüben Mittel, die der zweiten sollen uns nun in durchsichtigen Mitteln erscheinen. Da aber jedes empirisch durchsichtige an sich schon als trüb angesehen werden kann, wie uns jede vermehrte Masse eines durchsichtig genannten Mittels zeigt, so ist die nahe Verwandtschaft der beiden Klassen einleuchtend.

Doch ist hier Vorsicht geboten, denn diese elegante Eingemeindung der prismatischen Farberscheinungen ist nach wenigstens zwei Richtungen hin fragwürdig: Einerseits muss man sich fragen, ob einem dieser Ansatz der Sache nach einleuchtet. Es ergeben sich durch Trübung im Allgemeinen gar nicht die satten Farben, wie sie schon am einfachen Handprisma zu sehen sind¹⁰. Andererseits ist gar nicht klar, ob die *optischen* Modalitäten für das Auftreten prismatischer Farben wirklich so analog zu den Bedingungen sind, unter denen Streuungsfarben auftreten. Man müsste grundsätzlicher fragen: Wie lassen sich denn prismatische Farben *als optisches Phänomen* verstehen? Folgt man dieser Spur, findet man eine ganze Reihe optischer Erscheinungen, die in verschiedener Weise zum Auftreten von prismatischen Farben in Beziehung stehen.

Wir wollen also im Weiteren *exemplarisch* folgendes Anliegen verfolgen: Wie würde im Umriss eine optische Untersuchung prismatischer Farben aussehen, die einer integrierende Gedankenführung folgt? Oder mit anderen Worten: Welche optischen Gesetzmäßigkeiten und Erscheinungen bilden den optischen Kontext, den ideellen Gesamtzusammenhang, in den sich die Farbsäume beim Blick durchs Prisma einbetten lassen? Neben dem bereits angeschnittenen Thema “Streuung” gibt es

⁹Was aus heutiger Sicht künstlich scheint. Nichtsdestotrotz gibt es seither eine ungebrochene Tradition von Versuchen, ihm hier zu seinem Recht gegenüber der Newtonschen Erklärung durch Strahlbrechung zu verhelfen, oft genug allerdings in Richtung darauf, die Farbenlehre durch eine gelungene Erklärung der prismatischen Farben zu einem Theoriegebäude zu machen, das vollständig genug ist, um in seinem Rahmen wiederum analytische Untersuchungen anzustellen. . . (Veugelers, 2005; Bauer, 2005; Proskauer, 2003).

¹⁰Am ehesten wohl noch eben bei tiefstehender Sonne – unter Beteiligung extrem heller Beleuchtung und sehr langer optischer Wege durch Luft. Es lassen sich allerdings unter besonders guten Bedingungen im Verlauf eines Sonnenuntergangs die Färbungen der Sonne durch atmosphärische Streuung und Brechung unterscheiden (“*green flash*” nach Sonnenuntergang), vgl. (Greenler, 1994; Minnaert, 1999)!

wenigstens drei weitere Themenfelder, die zu diesem Gesamtzusammenhang wesentlich beitragen: Die Hebung oder Brechung als Besonderheit der Optik dichter Medien, die Beugung, bei der auf ganz andere Art dieselben Farberscheinungen auftreten, und das komplexe Thema der Physiologie des Farbensehens. Auf diese Themen sei kurz im Einzelnen eingegangen. Das Projekt ist, prismatische Farben als "sinnvolle Erscheinung" zu entwickeln – wir formulieren dazu den "sinnstiftenden Kontext".

Hebung und Brechung

Eine erste markante Besonderheit des Einblicks in "optisch dichter Medien" wie Wasser oder Glas, die es im Umfeld von "streuender Trübe" wie Dunst oder Luftfeuchtigkeit nicht gibt, ist die *Hebung*. Wir bezeichnen damit die Verzerrung der Ansicht beim Blick in einen gefüllten Trog, ein volles Aquarium oder Glas (Bild 5.5). Dort erscheint etwa der Beckenboden zum Betrachter hin geneigt und ein eingetauchtes Tafellineal noch oben hin geknickt (Abb. 5.5). Diese Störungen der direkten Sicht folgen dem Snellius'schen Brechungsgesetz, das die Beziehung zwischen der Neigung der Lichtstrahlen (bzw. der optischen Wege) zur Oberflächennormalen auf beiden Seiten der Grenzfläche formuliert. Die so entstehenden Sichtverhältnisse genügen dabei immer noch dem Fermatschen Prinzip, dass der tatsächlich realisierte Lichtweg unter den gegebenen Randbedingungen extremal – und hier sogar minimal – ist. Die Knickung der Lichtstrahlen bzw. der optischen Wege lässt sich so als optimaler Kompromiss zwischen "Verkürzung des Weges im optisch dichteren Wasser" und "Verlängerung des Weges in der optisch weniger dichten Luft" verstehen. Die resultierende Verzerrung der Ansicht ergibt dabei für einen bestimmten Standort des Einblicks ein Bild, das die Szenerie unter der Wasseroberfläche gleichsam von einem anderen Standort aus zeigt.

Farbsäume bei der Beugung

Beugung bezeichnet bekanntlich eine breite Palette von optischen Erscheinungen, die mit der Begrenzung des Sichtfeldes durch scharfe Kanten oder mit der modifizierenden Wirkung kleiner, definiert geformter "Störkörper" im Blickfeld zu tun haben. Unter solchen Bedingungen "umfließt" Helligkeit diese Hindernisse und dringt – unter Umständen *nicht geradlinig!* – in den durch die Geometrie der Anordnung gegebenen Schattenraum. Neben den Interferenzeffekten sind diese Erscheinungen historisch eines der überzeugendsten Argumente für eine Wellennatur des Lichtes gewesen. Beugung hat, so gesehen, viel mit der oben charakterisierten "Streuung" gemeinsam: Die Helligkeitsbänder, die sich beim Zusammenknäufen der Augenlider an Laternen oder anderen Lampen "ziehen" lassen, oder die Höfe um Mond bzw.

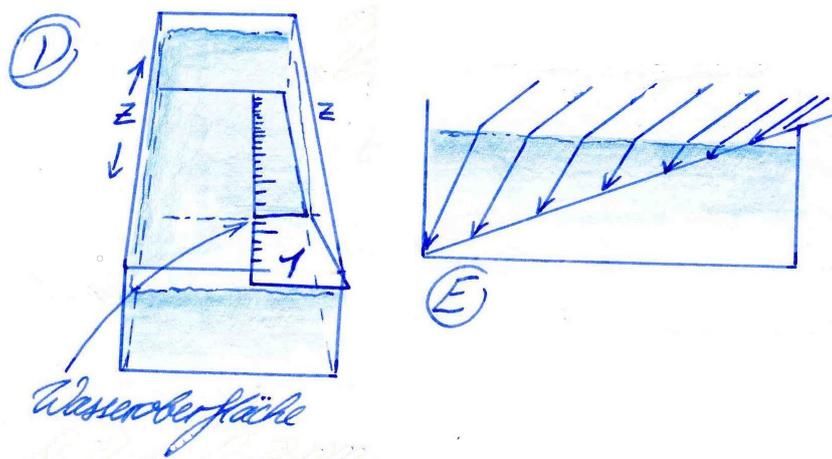


Abbildung 5.5.: Schülerzeichnung zu Hebung und Brechung: Links der Blick ins Becken mit dem charakteristischen “Hochklappen” der Ansicht unter der Wasserlinie. Rechts das korrespondierende “Abknicken nach unten” der Sichtlinien.

Straßenlaternen, sie sind ebenfalls “Helligkeit am falschen Ort”. Eine Kerze erscheint durch einen Spalt gesehen durch die Beugung deutlich verfremdet (Abb. 5.6). Wird der Spalt genügend verengt, lösen sich die Lichtbänder quer zur Spalttrichtung in eine Folge unterscheidbarer *Nebenbilder* der Kerzenflamme auf. Diese haben eine erkennbare Periodizität und sie zeigen an ihren Rändern die kräftigen Farben, die wir auch beim Blick durchs Prisma finden. Die Nebenbilder sind “echte”, “aktuelle” Bilder der Kerze, die auch den richtigen stereoskopischen Abstand haben, aber unter anderem Sichtwinkel erscheinen – wir sehen die Kerze gewissermaßen auf optischen Wegen, die ohne Spalt verboten sind (Grebe-Ellis et al., 2002; Maier, 2004a; Sommer et al., 2004; Sommer, 2005; Erb, 1994; Feynman, 2002).

Diese Erscheinungen sind typischerweise vom Auftreten derselben Farben begleitet, die am Prisma zu sehen sind – beim “Hof” des Vollmondes ebenso wie beim bunten Schillern einer CD. Der Kosmos der Beugungserscheinungen ist aber nicht nur ein Beispiel für das Auftreten der fraglichen Farben unter ganz anderen Bedingungen als der von “Trübe” oder “Durchsichtigkeit”. Es lässt sich eine wesentliche Lektion lernen: Die Beugungsfarben erscheinen, indem sich die Nebenbilder für verschiedene Farben mit verschiedenen Perioden anordnen – Spalt oder Beugungsgitter vermitteln “rote Anteile der Beleuchtung” unter größeren Winkeln als die blauen Anteile. Damit erscheinen diese Farben einerseits als “enthalten” in der Beleuchtung, andererseits entstehen in der Ansicht farbige Bereiche, die sich vielleicht als “auseinandergezogene (oder -gefallene) verschiedenfarbige Teilbilder” ansprechen lassen. Der rote Rand eines Beugungsbildes ist so etwas wie ein rotes Bild der Lichtquelle,

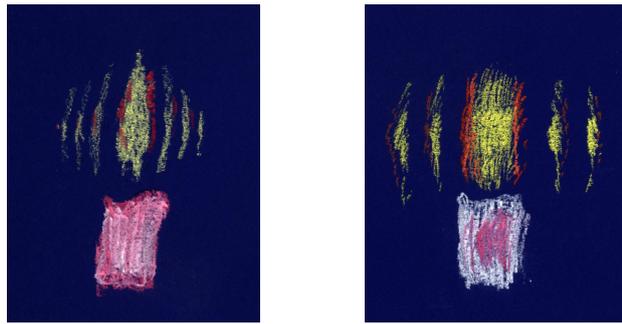


Abbildung 5.6.: Kreideskizzen der Kerzenansicht durch den senkrechten Spalt, links bei breiterer, rechts bei schmalerer Öffnung.

das vor einem dunklen Hintergrund erscheint, weiße Bildbereiche entsprechen einer mehr oder weniger vollständigen Superposition farbiger Teilbilder.

Die Grenze zur Physiologie: Farbe sehen

Die Abbildung 5.3 zeigt nicht nur, wie sich der Graphiker prismatische Farbentstehung durch Brechung vorstellt, sie zeigt auch, welche Farben er erwartet. Der Umstand, dass eine solche Darstellung – etwa als Illustration in Wikipedia – zumindest populärwissenschaftlich völlig akzeptabel ist, obwohl die realen Spektren keineswegs so aussehen, offenbart nicht nur eine gewisse Borniertheit gegenüber der Sache, sondern birgt auch eine unbequeme Einsicht: Wir sehen spektral differenziertes Licht¹¹ gar nicht ohne weiteres als “bunt”! Projizieren wir einen Spalt auf einen Schirm und bringen ein Prisma ein, so ergeben sich in Abhängigkeit des Abstandes Prisma-Schirm sehr verschiedene Ansichten. Je größer dieser Abstand ist, desto weiter zieht sich das Spektrum auseinander, desto dunkler wird es, desto schmaler ist die spektrale Verteilung für eine gegebene Stelle auf dem Schirm – und desto weniger Farben sind zu sehen. Wir enden nicht beim Farbenspiel des Regenbogens, sondern mit einem letztlich “dreieinhalbfarbigem” Spektrum, das markantes Rot, einen grünen Mittelbereich (mit einer gelblichen Flanke zum Rot hin) und Blau-Violett zeigt.¹²

Eine tiefere Beschäftigung mit dem Thema “Farbensehen” lässt einen daran zwei-

¹¹Mit “spektral differenziert” oder “spektral verschieden” etc. ist ganz funktional eine entsprechende Helligkeitsverteilung oder Energiedichte als Funktion eines Beugungs- oder Brechungswinkels bzw. einer Lichtwellenlänge λ oder Energie $\hbar\omega$ gemeint.

¹²Matthias Rang zeigte mir im November 2007 folgendes Experiment: Während das mit Hilfe eines Beugungsgitters projizierte Spaltspektrum auf der Leinwand im Zwischenbereich von “rot” und “grün” bestenfalls “gelbgrün” ist, zeigt der Blick von der Leinwand zum Monochromator ein helles, sattes gelb. Die Pupille ist dabei immer noch klein gegenüber den lateralen Dimensionen, auf denen sich der Farbeindruck ändert.

feldn, dass es sich dabei noch um ein physikalisches Thema handelt. Es gibt eine ganze Reihe physiologischer Grundtatsachen zu beachten, deren Untersuchung und Schilderung im Übrigen in Goethes Farbenlehre einigen Raum einnimmt. Offenbar sind wir nicht auf ein "objektives Farbsehen" hin organisiert, das spezifischen spektralen Signalen eindeutige Farbeindrücke zuordnet, sondern eher auf eine Konstanz des Farburteils unter den mit Tageszeit und anderen Modalitäten ja wechselnden Alltagsbedingungen. Hierher gehören Stichwörter wie Komplementärfarbe, Simultankontrast, gewöhnliches und schnelles Nachbild und vieles mehr. Philosophisch gesprochen gibt das spektrale Signal nur die "Gelegenheitsursache" für einen Farbeindruck ab, dessen Verwirklichung durch eine Vielzahl anderer Modalitäten bis hin zu einem erheblichen intentionalen Anteil mit bestimmt wird: In der Dämmerung erscheint die weiße Beleuchtung des Zimmers von draußen gesehen warm gelb; sind wir eingetreten, erscheint sie neutral, aber dafür ist der vorher graue Abendhimmel, den wir jetzt durchs Fenster draußen sehen, tiefblau. . .

Synopse: Dispersion

An einem schwarz-weißen Muster am Boden eines gefüllten Beckens tauchen bei schräger Einsicht und genügender Beleuchtung zart und schmal dieselben Farbsäume auf, die auch der Blick durchs Prisma zeigt (Bild 5.7). Stellen wir einen anderen Versuch daneben: mit einem Diaprojektor wird ein kreisförmiges Loch über ein "Wassereck" projiziert – es erscheinen Kantenspektren (Bild 5.8). Das dichte Medium ändert in beiden Fällen Seh- bzw. Projektionsrichtung: das Muster am Beckenboden erscheint gehoben, der Projektor leuchtet fast streifend in die Vorderseite des Beckens, das Bild entsteht aber fast streifend entlang der Langseite. Das Bild der Blende wird dabei allerdings auch breit auseinandergesogen. Wir sehen wiederum Farbsäume, oder, je nach Abstand, sogar ein vollständiges Spektrum, vgl. oben. Es lässt sich nachvollziehen, wie die Färbung entsteht: Vom gelben Rand aus gesehen erscheint die Projektoröffnung leuchtend gelb, vom blauen Rand aus leuchtend blau.

Sind die Farben ein Effekt der "Durchsicht"? Wir präparieren mit Hilfe von Spektallampen oder durch Farbfilter direkt hinter der Projektoröffnung spezifischere spektrale Verteilungen: im Licht der Na-Dampf-Lampe erscheint das Muster im Becken gehoben, aber gestochen scharf und ohne Säume, bei wenigen diskreten Linien (so z. B. im Licht älterer "Energiesparlampen" mit Quecksilber als Leuchtstoff) überlagern sich scharfe farbige Einzelbilder. Und: Verschiedene Farbfilter ermöglichen es, einzelne, im Projektionsversuch farbige, mehr oder weniger scharfe Blendenbilder zu präparieren, doch diese erscheinen an der Wand verschieden stark abgelenkt – weniger stark abgelenkt für rot, stärker für grün oder gelbliche Farben, noch stärker für blau oder violett (Bild 5.8 rechts). Es ist wie bei der Beugung: *Die Farben*

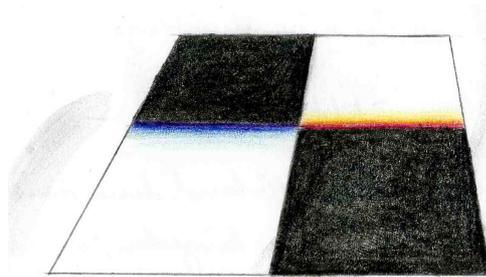


Abbildung 5.7.: Schülerzeichnung zu den Farbsäumen eines Musters im Becken.

entstehen in Abhängigkeit vom Leucht- bzw. vom Einblickwinkel!

Fassen wir zusammen: Das Wasser vermittelt die Projektion (und analog die Sicht) in verschiedene Richtungen, je nachdem wie die Lichtquelle "spektral präpariert" wird. Diese optische Eigenschaft des optisch dichten Mediums heisst "Dispersion" – je nach dem spektralen Profil auf dem Schirm und der Konfiguration der Gesamtansicht erscheinen verschiedene Farben. Die Farbsäume der Projektion sind Bereiche, in denen nur ein Teil der in weißem Licht möglichen Farben darstellbar ist. An den äußersten Rändern lassen sich nur noch ein scharf begrenztes dunkelrotes und ein relativ breit gezogenes, dunkelviolettes Bild herausfiltern. Im roten Licht erscheint hinter dem violetten Filter einfach Schatten und umgekehrt, die stärker bzw. schwächer abgelenkten Lichtqualitäten fehlen auf der jeweils anderen Seite. Es entstehen näher an der Beckenecke, die uns als Prisma dient, jeweils komplementär gefärbte Bereiche ("Kantenspektren") von blau-cyan und gelb-rot, bzw. es erscheint im grösseren Abstand vom Becken bei Überlappung der Kantenspektren ein grüner mittlerer Bereich an Stelle des weißen Miteinanders aller spektraler Qualitäten. Die Farbsäume beim Blick auf das Schwarz-Weiß-Muster im Becken lassen sich analog verstehen: Wir sehen das Muster im Becken aufgrund der Dispersion nicht "einheitlich" oder "einfach", sondern als Miteinander von farbigen Teilbildern, die je nach spektralem Ursprung verschieden stark gehoben werden. Zum Sichtbarwerden der Farben braucht es in allen Fällen Kontrast – nur wenn farbig gesehenes Helles in sonst dunkle Bildbereiche fällt, kommt es zur Geltung. Prismatische Farben sind eine Spielart einer Grundfigur, die uns – was hier aber nur für die Beugung angedeutet worden ist – auch bei Beugung (Sommer, 2005), Interferenz und Polarisation (Grebe-Ellis, 2005) entgegentritt: verschiedene spektrale Qualitäten der Beleuchtung führen zu unterscheidbaren (spektral verschiedenen) Teilbildern bzw. zu Superpositionen derselben, die dann auch als verschiedenfarbig wahrgenommen werden. Und damit ist ein optischer Gesamtzusammenhang, in den sich prismatische Erscheinungen einordnen lassen, umrissen.

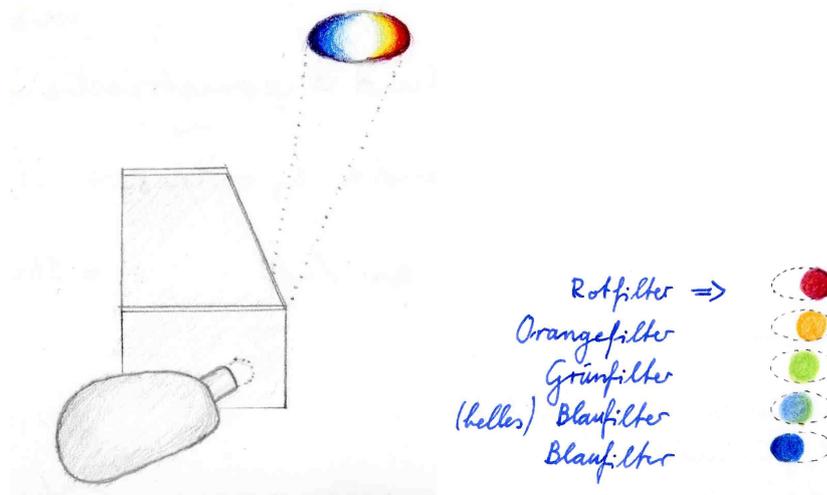


Abbildung 5.8.: Schülerzeichnungen zur Projektion eines Spektrums mit einem Wasserbecken, das als Prisma dient (links) und zu den Blendenbildern bei Verwendung von Farbfiltern. Vorsicht: die blauen Blendenbilder sind realiter weitaus unschärfer als es hier gezeichnet wurde!

Szenenwechsel: Naturerkenntnis als psychologisches Problem

In der Mathematik sind analytischer und integrierender Zugriffsmodus seit der “Grundlagenkrise der Mathematik”, die in der Auseinandersetzung zwischen Brouwer und Hilbert ausgetragen wurde, mehr oder weniger gleichberechtigt (Thiel, 1972). Für die Physik steht eine vergleichbare Methodendebatte noch aus – blenden wir zurück: Am 14. August 1872 hält der Physiologe Emil du Bois-Reymond, Bruder des Mathematikers Paul du Bois-Reymond, einen in der Folge gedruckten und vielbeachteten Vortrag mit dem Titel “Über die Grenzen des Naturerkennens” (du Bois-Reymond, 1914). In der Einleitung zu seinen Ausführungen heißt es:

Naturerkennen [...] ist Zurückführen der Veränderungen in der Körperwelt auf Bewegungen von Atomen, die durch deren von der Zeit abhängige Zentralkräfte bewirkt werden, oder Auflösen der Naturvorgänge in Mechanik der Atome. Es ist psychologische Erfahrungstatsache, dass, wo solche Auflösung gelingt, unser Kausalitätsbedürfnis vorläufig sich befriedigt fühlt. Die Sätze der Mechanik sind mathematisch darstellbar, und tragen in sich dieselbe apodiktische Gewissheit, wie die Sätze der Mathematik.

Bei aller offensichtlichen Zeitgebundenheit dieser Aussage – sie würde, wenn “Mechanik” etwa durch “Quantenmechanik” usw. ersetzt wird, innerhalb der *scientific community* als Formulierung des Hauptziels eines “Projektes Naturwissenschaft” wohl auch heute mindestens mehrheitsfähig sein. So prägnant, wie du Bois-Reymond das Naturerkennen definiert, so prägnant wird es auch begründet: Diese Erkenntnis-haltung ist nicht Ergebnis eines erkenntnistheoretischen Diskurses, sondern sie ist schlicht deswegen die richtige, weil es *psychologische Erfahrungstatsache* ist, dass unser *Kausalitätsbedürfnis* sich auf diesem Wege befriedigen lässt. Ein wesentlicher Punkt dabei scheint zu sein, dass sich der physikalische Inhalt im obigen Sinn formalisiert darstellen und sich so in eine mathematisch konsistente Form bringen lässt.

Was du Bois-Reymond “Kausalitätsbedürfnis” genannt hat, erscheint als Sehnsucht nach einem bestimmten Typus von gedanklicher Untersuchung, den er offenbar auf dem Gebiet der Mechanik bzw. *Himmelsmechanik*¹³ für exemplarisch realisiert hält. Damit ist zum einen der Anspruch im Raum, die von Anfang an als Wirkung verstandenen Naturvorgänge auf Ursachen zurückzuführen, deren Mechanismen “apodiktisch”, also “unbedingt” oder “unumstößlich” gewiss sind.¹⁴ Zugleich ist damit offenbar, wie er sich die Befriedigung des Kausalitätsbedürfnis vorstellt: durch den Nachweis der Gültigkeit (oder: Anwendbarkeit) eines vollkommenen Determinismus. Du Bois-Reymond war sich allerdings des Problems, dass er dabei Kräfte und die diesen Kräften unterworfenen Materie schlichtweg voraussetzen muss, sehr wohl bewußt.

Emil du Bois-Reymond formuliert – stellvertretend für den *mainstream* der Naturwissenschaftlichen Bemühungen bis heute – sein Gefühl, dass sicheres Naturerkennen gleichzusetzen ist mit möglichst gediegener analytischer Untersuchung der Natur. Dieser Anspruch ruht auf zwei Säulen: der mathematischen Struktur des Kalküls und der Gültig-, aber auch der Zugänglichkeit von Naturgesetzen, die das Naturgeschehen beherrschen. Für eine beliebige Naturerscheinung gilt es in so einem Konzept jeweils analytisch abzuleiten, wie unter den gegebenen Umständen die zugrundegelegten Naturgesetze genau dieses Ergebnis hervorgebracht haben. Die fragliche Erscheinung ist damit *erklärt*.

Voraussetzungslos oder “selbstverständlich” ist so ein Konzept von Naturwissenschaftlichkeit allerdings nicht: Der spezifische analytische Diskurs, oft auch die dafür verwendeten mathematischen Werkzeuge, ja sogar die “Tatsachen” des Gebiets sind auf diesen Zweck hin instrumentalisierte, ja manchmal sogar erschaffene Konstrukte – die “Gaja” der Geophysiologie, der “Big Bang” der Kosmologen oder der “Climate

¹³Er spricht auch immer wieder von “astronomischer Kenntnis” z. B. des Bewegungszustandes der Atome unseres Leibes etc., die dann im Prinzip beliebige Extrapolation in die Vergangenheit und Zukunft erlauben würde.

¹⁴Die Physik, die ihm dabei vor Augen stand, erfüllte diese Forderung allerdings nicht so sehr durch den Inhalt, sondern durch die mathematische Struktur ihrer Gesetze.

Change” sind so wenig wie “Photonen”, “Felder”, “Atome” *a priori* gegebene Tatsachen, sondern *Gegenstände* spezialisierter Denkungs- und Untersuchungsarten. Als solche sind sie für einen Teil der Naturwissenschaft treibenden Menschen selbstverständlich oder evident, für andere nicht.

Die analytische Gedankenführung sichert einen konkreten Sachverhalt im Sinne der zu führenden Untersuchung – die “Tatsache” – auf ihre Konformität mit den anerkannten Voraussetzungen, sonstigen Tatsachen und Schlussregeln der Disziplin hin ab. Es entsteht zwar eine spezifische Gewissheit – “ja, das stimmt!” –, aber wir erfassen noch nicht, warum die spezifische Analyse genau so aussieht. Um diese Einsicht geht es bei einer integrierenden Untersuchung des Problems: Der Blick durchs Prisma zeigt dem, der da schaut, ein Rätsel, das genuin verstanden werden will – und dorthin führt nicht die Erklärung im Sinne einer Spielart geometrischer Optik. Wie so ein Verständnis gewonnen werden kann und welche Struktur es hat, haben wir exemplarisch dargestellt: es geht um das Anknüpfen an und das Verknüpfen von eigene(r) Erfahrung und die Schaffung einer sachgemäßen Expertise – “das, was ich da sehe, passt auf diese und jene Weise sinnvoll zu dem, was ich als Erfahrungsschatz habe...”

Das Sinn-Erleben, die Evidenz des Fragenden ist hier nicht geahnte Richtigkeit oder getragen durch Mathematik, sondern tritt auf als explizite, möglichst umfassende Zustimmung: *Ja, so muss man darüber nachdenken!* Diese Einsicht ist umfassender als das Erlebnis, dass die Analyse eines bestimmten Problems im Rahmen eines gegebenen Diskurses aufgeht: sie kann sogar bestehen, wenn auf diese Weise gerade *keine Antworten*, sondern neue offene Fragen entstehen. Nicht die Brechbarkeit von Licht oder die Dispersion der Medien als solche sollen einleuchten, sondern die ganze Art, die Natur zu befragen und Antworten zu suchen. Nicht nur die konventionellen Antworten, sondern der Umgang und die Auseinandersetzung mit der Art, zu Antworten zu kommen, werden zum Inhalt des Physik-Lernens. So wie oben “Erklären” der Name für eine analytische Untersuchung war, lässt sich die geschilderte Übersicht über das physikalische Problem und seine Struktur als “Verstehen” und die zugehörige Form von Evidenz als “Intuition” ansprechen. Goethes Verdienst ist es, eine entsprechende Methode exemplarisch ausgearbeitet und damit eine entsprechende naturwissenschaftliche Tradition begründet zu haben (Bortoft, 1996; Böhme & Schiemann, 1997; Grebe-Ellis & Theilmann, 2006).

Folgen und Folgerungen

Die Betonung der analytischen Denkart in der Physik hat auch Folgen für die Physikausbildung gehabt: *Welche Physik wird gelernt?* Es wird unter diesen Gesichtspunkten offenbar, dass physikalische Ausbildung zwischen Primarstufe und Diplom

oder Master fast generell einen einseitigen Schwerpunkt auf der Ausbildung der analytischen Fähigkeiten hat. So erscheinen typische Physikaufgaben letztlich als Spielart von mathematischen Textaufgaben, und es ist eine Errungenschaft modernerer Lehrwerke bzw. -ansätze, wenigstens kleinere Biotope "kontextreicher" Inhalte anzubieten oder einen Schwerpunkt auf "sinnstiftenden (Alltags-)Kontext" zu legen (Muckenfuß, 1995). Die auf allen Ausbildungsstufen zu beobachtenden Defizite beim selbstständigen Umgang mit physikalischen Inhalten bekommen hier einen Deutungsrahmen: eine mangelhafte Ausbildung im integrierenden Umgang mit physikalischen Problemen. Dabei gibt es einen perfiden Teufelskreis, der dazu führt, dass sich die "Lehrphysik" von der "Forschungsdisziplin Physik" zunehmend abkapselt: Physik wird auch den angehenden Lehrern als ein verengtes Konstrukt präsentiert, in dem sich auf alle relevanten Fragen Antworten finden lassen, die systematisch korrekt sind – und diese Sichtweise wird dann durch affirmatives Experimentieren (Theilmann, 2003) oder die Verwendung virtueller Experimente untermauert. Wer aber Physik als festes System kennengelernt hat, in dem eben analytisch operiert wird, ist offenbar weiter von der lebendigen, sich entwickelnden Disziplin Physik entfernt als jemand, der Umgang damit hat, für physikalische Probleme den jeweiligen gedanklichen Zusammenhang jeweils zu suchen (Theilmann, 2008a).

Was müßte Physik-Lernen und Lehren heißen? In der Einleitung zu den Bildungsstandards (KMK, 2004b) heißt es:

Ziel naturwissenschaftlicher Grundbildung ist es, Phänomene erfahrbar zu machen, die Sprache und Historie der Naturwissenschaften zu verstehen, ihre Ergebnisse zu kommunizieren sowie sich mit ihren spezifischen Methoden der Erkenntnisgewinnung und deren Grenzen auseinander zu setzen. Dazu gehört das theorie- und hypothesengeleitete naturwissenschaftliche Arbeiten, das eine analytische und rationale Betrachtung der Welt ermöglicht.

Die damit artikulierte Aufgabe naturwissenschaftlicher Bildung umfasst weite Teile dessen, was oben zur Charakterisierung von analytischer und integrierender Methodik ausgeführt wurde. Offenbar gilt es, mit beiden geschilderten Arten der Untersuchung vertraut zu sein, mit dem Handwerkszeug mathematisch-quantitativer Naturbeschreibung und mit der Perspektive auf Sinn und Inhalt dieses Zugriffsmodus. Diese erst erlaubt ein Verhältnis des Lernenden zur Formulierung physikalischer Fragen und zur Interpretation der durch deren Untersuchung gegebenen Antworten, aber auch eine angemessene Perspektive auf den geschichtlichen Hintergrund der jeweiligen Fragestellung.

Das Miteinander von analytischer und integrierender Gedankenführung im Spiegel von Nature of Science, PCK (Shulman) und curricularen Setzungen

Analytisches Arbeiten ist unter diesem Gesichtspunkt *Teil, nicht Ziel* der Physikausbildung – auch in der Schule. Die Fähigkeit dazu und ein angemessenes Problembewusstsein erscheinen damit auch als Schlüsselqualifikation für jeden Physik-Lehrenden. Die entsprechenden Kompetenzfelder – “Lernen über Physik”, “NoS”, “Lernen über Modelle” etc. – müssen dabei vielleicht bewusst gemacht, aber nicht neu erfunden werden (Höttecke, 2001; Mikelskis-Seifert, 2002a). Daneben sind solche Überlegungen einmal mehr Anlass, für ein exemplarisches Lernen von Physik in der Schule zu plädieren, das sich den mit physikalischen Effekten verbundenen Themenkomplexen und ihrer integrierenden Untersuchung widmen kann. Ein Schritt in diese Richtung wäre die Implementierung exemplarischer Themen als Alternativen innerhalb der Rahmenlehrpläne.

Wie kann dem Rechnung getragen werden? In seiner umsichtigen Verortung des Projektes *Nature of Science* (McComas, Clough & Almazroa, 1998) formuliert William McComas, die Herausforderung “[...] is for science teachers to translate an understanding of the knowledge generation process into meaningful classroom experiences and appropriate classroom discourse.” Er zitiert dazu Shulman’s Votum (Shulman, 2004),

[...] teachers must not only be capable of defining for students the accepted truths in a domain. They must also be able to explain why a particular proposition is deemed warranted, why it is worth knowing and how it relates to other propositions, both within the discipline and without, both in theory and practice.

Shulman analysiert in diesem Text das Problem, dass weder ein umrissener Vorrat naturwissenschaftlichen Fachwissens noch ein Vorrat an Lehrtechniken das “Projekt Lehren” legitimieren oder tragen kann. Beide Standpunkte greifen explizit oder implizit auf ein als statisch und verfügbar vorgestelltes Fachwissen zurück, das es nur angemessen zu vermitteln gelte. Die damit gegebene Trennung von Fachwissen und Pädagogik identifiziert er als eine geschichtlich junge, pädagogisch unfruchtbare Situation, die durch die Perspektive auf ein Nebeneinander von Fachwissen (*subject matter content knowledge*), Fachpädagogik (*pedagogical content knowledge*) und allgemeinpädagogischem Wissen (*curricular knowledge*), die in der Lehrerpersönlichkeit “konstruktiv interferieren”, aufzulösen wäre. Beide zitierte Voten lassen

sich zwanglos als Paraphrasierung dessen nehmen, was mit einem “integrierendem Zugang” zur Physik gemeint ist – es wird exemplarisch ein Sachverhalt und sein Kontext *erforscht*, das heisst aktiv und explorativ experimentiert, gedacht und kommuniziert. Es ist klar, dass der Normalfall der Lehrerausbildung den Lehrernachwuchs nicht oder nur unzureichend auf solche Aufgaben vorbereitet. Die sich entwickelnde didaktische Debatte um *PCK* könnte der Schauplatz sein, auf dem hier sinnvolle Änderungen entwickelt und implementiert werden könnten.

Im Plädoyer für eine stärkere Rolle integrierender – und das heißt oft: phänomenologischer oder erscheinungsorientierter – Behandlung physikalischer Themen liegen methodische Implikationen, die es erlauben Naturwissenschaft im geschilderten Sinne wieder zum Bildungsgut zu machen, ohne letztlich naturwissenschaftsfremde, etwa historisierende Inhalte zuzuziehen. Solche integrierenden Ansätze wurden im Rahmen von Waldorf- oder Wagenschein-Pädagogik vielfach dargestellt: Begriffe wie “genetisch-sokratisch-exemplarisch”, “goetheanistisch” oder die Forderung nach Epochenunterricht sind unter solchen Gesichtspunkten nicht sentimentale Wünsche, sondern methodisch wohlbegründete Anliegen. Die Unterrichtspraxis engagierter Lehrer, erprobte Curricula (Mackensen & Ohlendorf, 1998; Mackensen, 2003; Mackensen & Ohlendorf, 2000; Theilmann, 2006a), die kontinuierliche Arbeit von AGs¹⁵, aber auch wissenschaftliche Treffen wie *open eyes 2005* (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006) zeigen, dass ein solcher Weg in der Praxis gangbar ist. Die inhaltlichen Besonderheiten der genannten alternativen Richtungen in der Pädagogik lassen sich unter den geschilderten Gesichtspunkten jedenfalls undogmatisch in konkrete methodische Gesichtspunkte übersetzen – es geht darum, physikalische Fragen möglichst sinnhaft und explizit zu verstehen, die nötige gedankliche Beweglichkeit für ihre Beantwortung zu erziehen und die nötigen pädagogischen Voraussetzungen dafür zu schaffen.

Ich danke Peter Buck für seine Anregungen und seine Begleitung bei diesem Thema!

¹⁵Vgl. die Arbeit von Klaus-Peter Haupt, der 2008 den Georg-Kerschensteiner-Preis der DPG erhielt.

6. Physikalisches Verstehen als fachbezogene Kompetenz¹

Die Frage danach, wie Physikunterricht gelingt und gestaltet oder verbessert werden kann, ist immer auch die Frage danach, wie Denken innerhalb der Physik funktioniert. Physikalische Fragestellungen oder Phänomene werden im Allgemeinen im Kontext von (u. U. konkurrierenden) Modellvorstellungen gestellt bzw. bedacht, und so wird Physik auch gelehrt. Es ist daher konsequent, dass in den letzten Jahren Modellkompetenz und "Lernen über Modelle" verstärkte Aufmerksamkeit erfahren (Mikelskis-Seifert, 2002a; Leisner, 2005; Mikelskis-Seifert, 2006b). Die damit umrissene Praxis der Konzeptualisierungen im Physikunterricht erweist sich im "wahren Leben" allerdings schnell als höchst unphysikalisches Durcheinander: die Schüler leben erschreckend oft mit "Hybridvorstellungen", in denen Sprech- und Denkweisen aus völlig verschiedenen Modellzusammenhängen vermischt werden, um Beobachtungen oder Problemstellungen einer (offenbar für wünschenswert gehaltenen) Scheinerklärung zuführen zu können. Die Analyse des damit gestellten Problems – die hier durch das Okular einer "erscheinungsorientierten" oder an Wagenschein orientierten Physik vorgenommen wird – eröffnet den Blick auf zweierlei: Es werden einerseits pädagogische Gesichtspunkte sichtbar, die fordern, ein *spezifisch physikalisches Verstehen* und ein damit eng verbundenes *exploratives Interesse* als fachbezogene Kompetenzen ernstzunehmen, zu erforschen und zu fördern. Zugleich wird deutlich, dass sich dieser bisher wenig beachtete Aspekt der komplexen Wirklichkeit von Lernen und Lehren differenziert und konstruktiv auf die Begrifflichkeit der Bildungsstandards beziehen lässt.

Hybride Erklärungsstrategien von Schülern

In Martin Horns jüngst vorgelegter Dissertation (Horn, 2007, S. 209 ff.) findet sich das Transkript eines Schülerinterviews, das mit der Frage "Was stellen Sie sich unter Licht vor?" beginnt. Martin Horn interessiert sich im Umfeld von Unterricht zum Thema Holographie dafür, wie und warum Schüler Modelle benutzen, wenn sie aufgefordert werden, einen physikalischen Sachverhalt zu schildern. Ein Auszug aus

¹Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN) 14 (2008), S. 85 – 97.

dem “prototypischen” Dialog von Interviewer und Schüler – nachdem die Stichwörter Strahlen-, Wellen- und Teilchenmodell gefallen und ein wenig dargestellt sind, geht es um eine (graphische und inhaltliche) Darstellung des Wellenmodells:

I: *Also, eine Welle wandert praktisch von einem Punkt zum anderen?*

S: Nein, eine Welle ist an und für sich konstant, oder? Ja, genau. Naja, was heißt konstant? Eine Welle ist Träger einer Information oder ein Teilchen wandert auf der Welle entlang.

I: *Aha. Wo ist denn hier das Teilchen jeweils? Wenn Sie mir das mal kurz zeigen könnten?*

S: Das beschreibt diese Bahn. (S. zeigt auf die Sinuskurve.)

Die Liste solcher Zitate, von hilflosen Versuchen, Zusammenhänge rund um die Interferenzerscheinungen einigermaßen frei und zusammenhängend aus den Schülern herauszuholen, ließe sich leicht verlängern (Horn, Leisner & Mikelskis, 2002; Mikelskis & Rabe, 2006). Und man fühlt sich zwanglos an eigene Erlebnisse mit eigenen Schülern erinnert, oder an die keineswegs weniger abenteuerlichen Exkurse zur Physik, die man mit Studenten mittleren Semesters zu eigentlich gar nicht exotischen Fragen wie “Warum wärmt ein Schlafsack?” oder elementaren Sachverhalten wie dem hydrodynamischen Paradoxon haben kann. Oder allerdings auch an ernsthafte fachliche Diskussionen, in denen versucht wird, einen noch fremden Sachverhalt mit den Vorstellungen, die einem eben zur Verfügung stehen, näher zu kommen. Letztlich gehört auch die schon klassische Aussage, am Doppelspalt gehe das Elektron durch beide Spalte, genau in diese Kategorie unorthodoxen Argumentierens.

Was mit der Vermischung von Inhalten und Denkbewegungen verschiedener Modelle verfehlt wird, ist die eindeutige (Re-)Konstruktion der Erklärung für das physikalische Phänomen, die ja der Zweck des Modells war.² Erfolg oder Misserfolg spiegelt sich nicht nur in den Interviews, sondern lässt sich durch *concept mapping* quantitativ erheben; Martin Horn schlussfolgert (Horn, 2007, S. 212), dass in seinem Problemzusammenhang

... Schülerinnen und Schüler, die eine ausgeprägte Trennschärfe zwischen den unterschiedlichen Lichtmodellen vornehmen und die Modelleigenschaften in differenzierter Weise beschreiben oder zumindest anwenden können, die Beschreibung der physikalischen Grundlagen weit besser gelingt als Schülern, die eine ausgeprägte Modellmischung aufweisen. Sie [offenbar erstere, FT] erklären die Holographie in der Regel nahezu konsistent.

²Zum Thema “Eindeutigkeit” des Erklärens vgl. auch die Dissertation von Susann Hartmann (Hartmann, 2004)

Erklären: Zurückführen auf Modelle

Hier lohnt es sich innezuhalten und sich anzusehen, was von den Schülern eigentlich verlangt wird. Sie sollen etwas erklären und dazu "konsistent" Modelle benutzen. "Modelle" sind hier nicht irgendwelche Abbilder der Wirklichkeit, sondern maßgeschneiderte Vorstellungen von der Sache, die mit dem Ziel einer mathematischen Modellierung des Sachverhalts formuliert werden. Ein solches *Erklärungsmodell* ist typischerweise eine Schilderung des beobachteten Vorgangs oder Sachverhaltes in einer Sprechweise, die einen anderen, als elementar vorgestellten Vorgang als Referenz benutzt. Eine archetypische Form dieser Art naturwissenschaftlichen Denkens ist etwa die Schilderung des klassischen Atomismus im Bestseller *Sophie's Welt* (Gaarder, 1999) – nämlich die Zurückführung der vielfältigen Gegenstandswelt auf die atomistischen "Legosteine", die schlicht verschieden zusammgebaut werden. Die Grundfigur ist, dass die komplizierte Natur verständlicher erscheint, indem sie als konstituiert von überschaubar vielen Grundprinzipien und -vorgängen gedacht wird. Das Nachdenken über die Welt findet damit allerdings nicht mehr "in der Welt" statt: Der Erfahrungswelt wird eine Nebenwelt mit eigenen Gesetzen und Inhalten an die Seite gestellt, diskutiert wird nicht die Erfahrungswirklichkeit, sondern eine Art "Gleichnis"³.

Für den, der in diese Art Denken eingeführt wird, stellt sich damit aber eine neue Frage: Wie wirklich ist diese Nebenwelt, ja, ist sie vielleicht *wirklicher* als die Erfahrungswelt (weil es ja "eigentlich" so ist)? Indem sich das Nachdenken über die Sache hier in verschiedene Ebenen verzweigt, wird zugleich eine metakognitive Auseinandersetzung eröffnet (Mikelskis-Seifert, 2002a). Das populäre naturwissenschaftliche Denken gerät hier in eine Spannung zwischen einem besänftigenden "ist doch nur ein Modell!" einerseits und der selbstverständlichen Tradition der Kant'schen "Dinge an sich" (eventuell verbunden mit der psychologische Tatsache einer Sehnsucht nach einfachen Antworten...). Es droht ein Kurzschluss, im dem der Modellwelt und den "Modell-Dingen" dieser Status zugewiesen – und weiteres Nachdenken eingestellt – wird. Doch vor dem Bekenntnis zu einer bestimmten Form physikalischen Denkens liegt die Einsicht, dass es um eine denkerische Auseinandersetzung mit der durch Alltag und Experimente gegebenen Erfahrungswirklichkeit gehen muss – nur dann ist Physik *empirische* Naturwissenschaft. Das heisst, der Wirklichkeitscharakter der im Modell gegebenen "Nebenwelt" bemisst sich nicht an der vermeintlichen Wirklichkeit der Nebenweltsgegenstände (also an einer vorausgesetzten Wirklichkeit des verwendeten Bildes), sondern an der Äquivalenz der damit implizierten Struktur *möglicher Erfahrung* mit der Struktur *tatsächlicher Erfahrung*. Die Rea-

³Offenbar war ein Gutteil der zähen Rezeption Newtons bei seinen Zeitgenossen dessen expliziter Ablehnung dieser Art naturwissenschaftlichen Argumentierens geschuldet, vgl. das Vorwort in (Fierz, 1983).

litätsfrage lässt sich somit auch pragmatisch stellen – gegenüber dem Schattenwurf sind Lichtstrahlen und ein vorgestellter Teilchenfluss in der Beleuchtung ziemlich “gleich wahr”, gleich real, *weil gleich plausibel*. Anders gesagt: nicht die Strahlen oder Teilchen sind wirklich und deshalb erklärend, sondern es geht schlicht um *Angemessenheit* des verwendeten Bildes, um Kompatibilität zur Beobachtung und um prediktives Potenzial. Der tastbare Kristall ist wirklich, ist äußerliche Tatsache, wir können ihn sehen und anfassen und anderes mehr; sein Zusammengesetztsein aus Atomen steht außer Zweifel, doch ist *deren* Wirklichkeit etwa durch die Stöchiometrie oder Beugungsexperimente gegeben, sie muss ohne die geschilderte Realitäts-Rückversicherung einer Anfassbarkeit auskommen und ist damit ontologisch von einer grundsätzlich anderen Art.⁴

Dabei sind uns verschiedene Modelle allerdings verschieden zugänglich oder sympathisch: Dirac soll bei seiner Formulierung der Quantenmechanik von seiner Expertise in projektiver Geometrie profitiert haben, Werner Heisenberg von seiner Vertrautheit mit der Gedankenwelt der Antike; immer wenn Atome oder Elektronen ins Spiel kommen, sprechen teilchenhafte Modellvorstellungen uns durch ihre Anschaulichkeit und “Handfestigkeit” an, vielleicht weil sie an die Selbstverständlichkeit des Im-Leib-Steckens appellieren etc. Wenn hier die Wirklichkeitsfrage nicht sauber gestellt und beantwortet wird, stehen zumindest im Unterricht (zu) schnell Modellvorstellungen mehr oder weniger gleichberechtigt neben, ja vielleicht sogar über der Erfahrungswelt. Diese Vielheit von möglichen “Bezugssystemen” bildet die Umgebung für die *Erklärungskompetenz*, die oben in Sachen Holographie versuchsweise abgefragt wurde – es galt dort, die wesentlichen Charakteristika realer holographischer Experimente zu kennen und sie jeweils im Rahmen *eines* angemessenen Erklärungsmodells deuten, also interpretieren zu können.

Verstehen vs. Erklären

Naturwissenschaftliche Einsicht wird in diesem gedanklichen Millieu schnell synonym dafür, jeweils ein schlagkräftiges oder wenigstens plausibles Erklärungsmodell parat zu haben. Das ist für den Unterricht nicht unbedingt ein Problem: entlang von Themen werden bestimmte Lerninhalte – nämlich Erklärungsmodelle – angeboten, deren erfolgreiche Aneignung in diesem eingeschränkten Rahmen gut funktioniert und geprüft werden kann. Abbildung mit Linsen: Geometrie mit “Strahlen”; Photoeffekt: eine Art Lichtatomismus; Interferenz: Quasimaterielle Wellen. Ein Schema des Typs “Stichwort – Erklärung bzw. Erklärungsmodell” für die Verknüpfung von Inhalten heißt in der Informatik “assoziative Liste” oder *hash*. So bemisst sich

⁴Für das analoge Beispiel der Unterscheidung einer mechanistischen und einer “optischen Optik” vgl. (Berkeley, 1975; Maier, 1993b; Grebe-Ellis, 2005).

physikalisches Verständnis am Umfang und an der Korrektheit der *hash*-Einträge, und an der Kompetenz, sie gegenüber physikalischen Themenstellungen aufzurufen. Umgekehrt: Wenn ein Schüler oder Student aus der Rolle fällt und Modelle mischt bzw. nicht die orthodoxe Erklärungsvariante reproduziert, verstösst er gegen die Spielregeln, denn er soll die verschiedenen Erklärungsmodelle kennen *und* auseinanderhalten können. Naturwissenschaft erscheint analog zum Problem, sich als Neuling mit der Ettikette eines fremden Königshauses oder Clubs zurechtzufinden.

Das mulmige Gefühl, das sich gegenüber dieser Lesart von naturwissenschaftlichem Denken einstellen kann, korrespondiert damit, dass sich damit das eigentliche Projekt, nämlich etwas von der Welt außerhalb des Klassenzimmers verstehen zu wollen, zu verflüchtigen droht. Die Auseinandersetzung zwischen Schüler und Lehrer dreht sich intensiv und differenziert um Inhalte, um Gedanken und Gedankenbewegungen, die sich immer weniger auf ein Verstehen-Wollen von *physis*, also Natur im weiteren Sinn, richten, sondern – wie in einem mathematischen Gedankengebäude – um vorgestellte Inhalte, um deren Konsistenz und um deren ordentliche Verwaltung. Wenn Modellmischung ein Problem ist, muss die Lösung nicht ein Training hin auf sauber ausdifferenzierte Modelltrennung oder eine “Modellkompetenz” als solche sein. Im Sinne des oben formulierten Anspruchs von Physik, über Naturgeschehen nachdenken zu wollen, braucht es nicht einfach “mehr Ordnung” im Kopf des Lernenden, sondern zuerst Bewusstsein für den Kontext, der die Bilderwelt des Modells legitimiert. Für Interferenzerscheinungen oder Holographie ginge es so etwa nicht darum, dem Schüler möglichst dauerhaft einzuprägen, warum das Photonenbild – das doch das modernste Modell in der Reihe ist! – jetzt doch wieder nicht gut sein soll und wo das aber dennoch anzuwenden ist, sondern ihn an die Einsicht heranzuführen, “*dass Licht zu periodischen Phänomenen fähig ist*” (M. Wagenschein).⁵ “Wellenoptisch” daran ist, dass die Helligkeit geometrisch denselben Regeln folgt wie vorgestellte Muster aus Wellen entsprechend kleiner Wellenlänge unter entsprechenden Reflexionsbedingungen.

Mit anderen Worten: Modelldenken ist eine Form physikalischen Argumentierens im Unterricht, die aktuelles *Verstehen* von Phänomenen verfehlen kann, ohne dass Kategorien wie “falsch” und “richtig” greifen würden. Beide Zugriffsmodi, “Erklären” und “Verstehen”, gehen auf eine gedankliche Verarbeitung physikalischer Erscheinungen und Fragen, doch im ersten Fall *funktional*, mit dem Ziel einer Einordnung in einen vorauszusetzenden, bestehenden Diskurs, im zweiten Fall mit dem Ziel einer “Rationalisierung”, einer persönlichen und adäquaten kognitiven *Aneignung*.

⁵Wenn zwei Lichtquellen (z. B. durch Immer-näher-Rücken) für den Betrachter ununterscheidbar werden, gliedern sich die Sichtbeziehungen periodisch in räumliche Bereiche gesteigerter Helligkeit (“konstruktive Interferenz”) und von verhinderter Sicht (“destruktive Interferenz”). Zum Verstehen gehört aber auch, diese Erscheinungen systematisch an Beugungerscheinungen oder die Optik dispersiver Medien anzuschließen.

nung, die versucht, einzelne Fakten und Inhalte zu integrieren, zu vertiefen und möglichst das “wie wenn”, das Bewusstsein von gemachten Analogien bewahrt. Wenn die Sache so ausgesprochen ist, ist auch der Wert von Modellen klar ansprechbar – etwa, dass sie prägnant den Rahmen für Begriffe und Denkbewegungen geben, die das Verstehen braucht, oder dass sich an ihnen eben wissenschaftlicher Diskurs studieren und üben lässt.

Verstehen als eigenständige Kompetenz

Die oben skizzierte Gegenüberstellung von einem auf “Erklären” zugeschnitten Umgang mit Physik und dem Versuch, Schüler zum “Verstehen” zu bringen, lässt sich auf die Frage naturwissenschaftlicher bzw. physikalischer Kompetenz im Sinne der deutschen Bildungsstandards (KMK, 2004b) abbilden.⁶ Die KMK sagt offen (KMK, 2004a, S. 5), dass der Akzent auf fachbezogene Kompetenzen wesentlich durch die Ergebnisse internationaler Vergleichsstudien zu Bildungsleistungen (i. e. durch den darüber entstandenen öffentlichen Druck) motiviert ist – Bildungsstandards sind mit Zielblick gesetzte “Wissensnormen”. Die Präambel zu den Bildungsstandards im Fach Physik hält fest: “Die in vier Kompetenzbereichen festgelegten Standards beschreiben die notwendige physikalische Grundbildung.” Der Topos einer *notwendigen physikalischen Grundbildung* ist hier weniger harmlos, als es auf den ersten Blick scheinen mag – notwendig *wofür*? Die Hybridvorstellungen und fortgeschrittene Varianten des Umgangs mit Modellen lassen sich in diesem konzeptionellen Rahmen als Kompetenzstufen des Umgangs mit einem physikalischen Inhalt im Bereich Fachwissen schildern, die Basiskonzepte (mehr oder weniger) adäquat benutzen bzw. integrieren. So können wir sagen, Hybridvorstellungen sind in der Dimension “Anforderungsbereiche” (ABe) des KMK-Kompetenzmodells noch (defiziente) Spielarten der “Wiedergabe”, korrekte Modellverwendung reicht dagegen mindestens hinein in den AB “Anwendung”. Eine Einordnung hin auf *scientific literacy* (SL) (Bybee, 1997) würde ein hybrides Argumentieren mit Modellmischungen als Symptom bloss nominaler SL nehmen, während das Lernziel “konsistentes Erklären” auf eine funktionale SL geht.

Die nächste Kompetenzstufe wäre dann im Jargon der ABe “Transfer” bzw. im Jargon der SL “konzeptionelle und prozedurale SL”. Der damit implizierte Kompetenzschritt ist dabei ziemlich genau von der Art wie der, den wir oben zwischen

⁶Die KMK folgt bekanntlich der Kompetenzdefinition von Weinert (Weinert, 2001): Kompetenzen sind “die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können”.

“Erklären” und “Verstehen” beschrieben haben – diese nächsthöhere Stufe von SL ist definiert als (Schecker & Parchmann, 2006)

Verständnis zentraler naturwissenschaftlicher Ideen und Verfahren, Herstellung von Beziehungen zwischen Fakten, Begriffen und Prinzipien, naturwissenschaftliche Fragestellungen und Untersuchungsmethoden erkennen und anwenden.

Das den Kompetenzstufen der KMK zugrundeliegende Kompetenzstrukturmodell ist erklärtermaßen zunächst auf “Stoffvermittlung” ausgelegt⁷, und das impliziert, Transferfähigkeit bzw. konzeptionelle SL ergäbe sich (oder ließe sich anschließen), wenn “nötige Grundbildung”, also ein bestimmter Stand in nominaler und funktionaler SL erreicht ist. Die Fähigkeit, Natur zu verstehen, erscheint in Form höherer Kompetenzstufen, die zwar zum bewährtem Kanon pädagogisch-didaktischer Ziele gehören, sich aber nicht geradlinig aus Stoffwiedergabe oder -anwendung ableiten lassen. Die “Innenseite” von Transferfähigkeit oder konzeptioneller SL ist z. B. ein noch einzugrenzendes, spezifisch “exploratives Interesse” für die Um- und Mitwelt⁸ und das, was in ihr stattfindet. Daneben geht es um eine fachbezogene gedankliche Beweglichkeit, es geht darum, neue Fragen und Probleme im Fachkontext zunächst überhaupt als solche zu erkennen und dann diese nicht nur in konvergenten, sondern auch in divergenten Denkbewegungen zu adressieren und schließlich auch zu integrieren. So beinhaltet “Verstehenskompetenz” mehr als Erklären, nämlich eine recht grundsätzlich andere Haltung zur Welt, die in der Schule Gelerntes ins Leben trägt – und erst dann wird Wissen zu Bildung.⁹

Insgesamt herrscht also Konsens, dass physikalisches “Verstehen” (im skizzierten Sinn) auch im Sinne der Bildungsstandards ein zentrales Motiv oder gar das eigentlich Anzustrebende ist – ein Verstehen, das sich in selbstständig gefundenen neuen Ideen und Fragen äußern muss, das neue Aspekte und Widersprüche zu altem Wissen sucht, und also *nicht* ohne Bruch innerhalb des in den Bildungsstandards gegebenen Rahmens zu erreichen ist. Hier muss allerdings erneut Unbehagen aufkommen: Im Bekenntnis zu einer “Verstehenskompetenz”, die über einen virtuosen Umgang mit mehr oder weniger komplexen Erklärungen hinausgeht, liegt damit auch die Herausforderung, das Erreichen oder Nicht-Erreichen dieses Ziels letztlich nicht an Regelanforderungen etc., sondern am Lernenden und letztlich sogar an außerschulischen Gesichtspunkten festzumachen. Wenn die Sache einmal so ausgesprochen ist,

⁷Man muss das Argumentarium der KMK (KMK, 2004a) an manchen Stellen wirklich so verstehen, dass Ziel der Bildungsstandards ist, einen Schulbetrieb zu implementieren, der dann in schultypischen Tests eben gut abschneidet, vgl. etwa die Antwort zu Frage 3 a. a. O.

⁸Vgl. auch die Arbeiten von Friedrich Steinle zu Faraday oder Goethe (Steinle, 1998, 2006) – im übrigen sind beide nicht nur hervorragende Naturforscher gewesen, sondern auch sog. *fachwissenschaftliche Laien!*

⁹Vgl. zum Thema “Kompetenz und Bildung” auch (Höttecke, 2006).

ist also auch die Frage gestellt, wie wir dann diese Kompetenzstufe – oder eben vielleicht eher: diese *andere, prozedurale und konzeptionelle Kompetenzform* empirisch erfassen, wie wir einen solchen Lernvorgang selbst verstehen und in Kompetenzmodellen abbilden¹⁰ – und *last but not least* wie wir dieser Situation pädagogisch gerecht werden.

Ein eingeschobenes Beispiel: Halbschatten

Die hohe Mittagssonne des Juli beleuchtet den Efeu am Aufgang des Hauses sehr steil von oben. Die wenigen Stufen sind praktisch genau nach Süden ausgerichtet und über der kleinen Plattform vor der Haustür liegt auf der Hausseite die deutliche Schattenlinie der Dachtraufe, auf der Seite des Geländers der unregelmässige Schatten des Efeus. Spätestens der zweite Blick zeigt allerdings markante Unterschiede zwischen den beiden Schatten. Der Schatten des Dachs ist auffallend unscharf und wirkt auch weniger dunkel als der Schatten unterm Efeu. Letzterer erweist sich bei näherem Hinsehen allerdings selbst ebenfalls als zusammengesetzt (oder überlagert) aus Einzelschatten unterscheidbarer Blätter und Stengel, die selbst unterschiedlich scharf ausfallen. Eingehendere Untersuchung bringt eine einfache Struktur der Angelegenheit zutage: je näher der Schattenwerfer am “schattenzeigenden” Boden ist, desto schärfer und dunkler wird der geworfene Schatten. Die Sache mit dem Schatten ist also wohl komplizierter als oben in der Modelldebatte behauptet: Schatten ist gar nicht gleich Schatten und eine wirklich scharfe Schattengrenze scheint auch unter Bedingungen, die wellenoptische Effekte sicher ausschliessen, nur von Gegenständen möglich, die sich sehr nahe am “Schirm” befinden.

Die Sache lässt sich natürlich vertiefen: warum ist das so? Ein verblüffend einfacher Gedanke erweist sich ganz ohne Konstruktion von Strahlengängen als ausgesprochen erhellend. Schatten, das sind die Bereiche des Bodens, wo keine Sonne hin scheint, weil der Schattenwerfer sie verdeckt. Die unscharfen Randzonen erscheinen, weil es zwischen “Sonne ganz sichtbar” und “Sonne ganz verdeckt” Positionen gibt, von denen aus die Sonne *teilweise* sichtbar ist – es herrscht dort “Halbschatten”. Gut, aber wie ist das: ein und dieselbe Sonne ist ja in allen Fällen Lichtquelle, wieso sind die Übergangsbereiche dann verschieden breit? Eine Antwort liefert die Gegenfrage: Was ist denn auf den Stufen an verschiedenen Orten *zu sehen*? Die verschiedenen Grade der Unschärfe von Schattenkanten sind unter diesem Gesichtspunkt Spielarten eines anderen optischen Genres, nämlich von Perspektive und Parallaxe: ein Käfer, der auf dem Schirm die Schattenzonen durchwandert, sieht die Sonne (“optisch unendlich fern”) mitwandern und die Gegenstände seines Gesichtsfeldes sich

¹⁰Für einen Versuch siehe (Rehm, 2006).

gegeneinander verschieben. Die Halbschattenbereiche ergeben sich bei teilweise verdeckter Sonne; auf seinem Weg sieht er die immer noch ferne Dachtraufe ein wenig langsamer mitziehen (entsprechend einer breiten Halbschattenzone), das nahe Blatt aber schnell zurückbleiben (entsprechend einer schmalen Halbschattenzone). Und auch die verschiedenen Grade der Helligkeit klären sich aus der Käferperspektive sofort auf: Im Schatten des Daches ist immer noch ein großes Stück heller Himmel zu sehen, nicht aber direkt unter einem tiefen Efeublatt. . .

Das Nebeneinander verschieden heller und verschieden scharfer Schatten unter eigentlich sonst recht vergleichbaren Entstehungsbedingungen leuchtet nun ein gutes Stück besser ein, die Ausgangsbeobachtung wurde in den Kontext ihres Zustandekommens eingebettet. Einmal darauf aufmerksam, findet man überall Gelegenheit, Beobachtungen dazu zu machen. Eine Haltestange im Türbereich einer Berliner S-Bahn kann Hauptdarsteller in einer furiosen Schau werden, in der es zwischen scharfem Schlagschatten und den immer wieder erstaunlichen "hellen Schatten" vor dem Fenster vorbeiziehender Objekte eine Menge Physik zu sehen gibt. Am Sonnentaler unter einem sonnenbeschienen Baum erscheint der Sonnenumriss, die Situation wird zur *camera obscura* unter freiem Himmel. Halbschatten erweist sich als noch reichlich ungenauer Begriff für eine breite Spanne von Beobachtungen, die sich wiederum einem grundlegenden optischen Prinzip unterordnen lassen: Lampe und Blende konkurrieren zwar gleichsam um Sichtbarkeit, sie bringen sich aber je nach Geometrie der Sichtverhältnisse zwischen den Polen "Sonnentaler" und "scharfer Schatten" gegenseitig zur Geltung – indem sie selbst zurücktreten (Maier, 1993b, 2004a).



Schatten von Bäumen und Dach in der Wintersonne an einer Hauswand. Die verschiedenen Schatten sind – je nach Abstand – nicht nur sehr verschieden scharf, sie sind auch verschieden hell.

Integrierendes Denken im Angesicht der Erscheinung

Das Thema "Verstehen" wird periodisch neu erfunden und spielt etwa bei Martin Wagenschein und Autoren seiner Tradition eine zentrale Rolle (Wagenschein, 1999b; Buck & Mackensen, 2006; Buck, 1996). Als "genuines Verstehen" ist es der Schlüsselbegriff, wenn es gilt, das reale Sich-Verbinden einer Erfahrung mit einem Deutungskontext (im Gegensatz zu gleichsam bloss nachahmendem oder reproduzierendem, im obigen Sinn "nominalem" Verstehen) anzusprechen (Rehm, 2006; Aeschlimann & Buck, 2007). Es ist nötig, ein hohes Maß an begrifflicher Schärfe zustande zu bringen, um auch nur die wichtigsten Differenzierungen der kognitiven Aktivitäten sichtbar zu machen, die das Begriffsfeld "Verstehen" abdeckt – und dabei zugleich eine ernsthaftere Herausforderung... Der voranstehende Exkurs möge erhellen, in welcher Art "Verstehen" hier in den Blick genommen werden soll: Verstehen meint hier einen vom Lernenden aktiv durchzumachender *Prozess*, in dem ein Problem gestellt, begrifflich durchdrungen und das damit Erreichte *universalisiert* wird. Es geht solange weiter, wie buchstäblich *inter-esse*, Beteiligung gewährleistet ist. Das Verstehen-Wollen, das Eintreten auf eines der gemachten Angebote, ist dabei eine innere Bewegung, die wir dem Schüler nicht abnehmen können, eine Bewegung hin auf das Teilnehmen- oder Dabeisein-Wollen mit dem Gebotenen.

Die Disziplin Physik zu lehren verlangt nun aber mehr mehr als nur Wecken und Binden von Interesse im Sinne von Neugier, von Sympathie, von Zuschauen- oder Unterhalten-sein-Wollen – Physik wird zur Physik, indem sie ihre Themen *auf ihre Art* integriert, sammelt, aufeinander bezieht. *Physikalisches Verstehen* ist die Fähigkeit, immer selbstständiger einen immer größer werdenden Kreis von Erscheinungen und Fragestellungen auf solche Art zu bedenken. Teilgebiete der Physik, etwa Mechanik, Optik, Wärmelehre etc., bezeichnen einerseits charakteristische Situationen und ebenso charakteristische Sätze potentieller Erfahrungen, die in solch typischen Situationen zu machen sind. Andererseits hat jedes Teilgebiet ganz bestimmte Begriffe und Methoden hervorgebracht, die diese Erfahrungen ordnen und aufeinander beziehen – etwa im Gebiet der Mechanik "Kräfte, Trägheit, Impuls,...", im Gebiet der Optik "Helligkeit, Farbe, Sichtverbindung, optische Wege,...", in der Wärmelehre "Temperatur, Wärmekapazität, Entropie,...". Ein physikalisches Problem entsteht, indem eine Erfahrungssituation – eine Alltags- oder Naturerfahrung, ein (Schul-)Experiment etc. – in physikalischen Begriffen beschrieben und auch *befragt* wird. Eine eventuelle Antwort entsteht in einem spezifisch physikalischen Diskurs – hierher gehören Modellierungen, oder aber Überlegungen wie die des obigen Exkurses. Diese Antwort wird dann wiederum im Allgemeinen noch keine Bedeutung für die Erfahrungswelt haben – sie muss dafür nicht nur gleichsam zurückübersetzt, son-

dern auch in ihrer *Relevanz*, ihren Implikationen und in ihrer Bedingtheit interpretiert werden. Insgesamt schauen wir auf einen gedanklichen Prozess, der “Bedeutung schafft”, indem Tatsachen durch sachgemäße Konzeptualisierung aufeinander bezogen werden. Diese kognitive Aktivität ist nicht mehr nur reproduktiv oder anwendend, wenn der Lernende diesen Integrationsprozess selbst sucht und führt – die nächste Kompetenzstufe ist erreicht.

Der Lehrende wird dabei immer mehr zum Partner: Das Leben ist gleichsam gepflastert mit Gelegenheiten, vermeintlich Bekanntes unter neuen Gesichtspunkten zu entdecken, Gelegenheiten, die im Unterricht geteilt werden können und keineswegs notwendig vom Lehrer zum Schüler weisen. Wenn wir neben dem Stoff- oder Prüfungs-orientierten, eher reproduktiven Lernen ein genuines Feld des Verstehens, also eines explorativen und autonomen Umgangs mit den Inhalten des Fachs anerkennen, erscheinen eine Vielzahl von Parametern und Modalitäten des Lernprozesses in anderem Licht. Aufgabe des Lehrenden ist immer weniger, “Stoff zu vermitteln”, also wohldefinierte Repräsentationen von physikalischen Inhalten zum Gegenstand des Lernprozesses zu machen, sondern selbstständige Prozesse zu ermöglichen, zu moderieren und zu individualisieren – einschließlich der konsituierenden inneren Suchbewegungen, also dabei unvermeidlichen Pannen, Fehler und Irrwege (Rehm & Murmann, 2007).

Exploratives Interesse

Wenn das “Verstehen” einmal so thematisiert ist, ist auch besprechbar, dass es nicht als eine Art krönender Abschluss an Lernen und bodenständige Stoffvermittlung anschließt, sondern einen gesunden Lernprozess wohl ständig begleitet. *Verständiges Lernen* wäre vielleicht ein geeigneter Terminus für einen Lernprozess der im obigen Sinne ständige Transfer-, Integrations- und Vertiefungsprozesse einschließt. Hier wird das Thema offenbar pädagogisch und hier lohnt der Blick in die Praxis: Erscheinungsorientiertes Arbeiten setzt von vorneherein dort an, indem physikalische Tatsachen nicht als Stoff-Items erscheinen, sondern Aspekte eines Kennenlernprozesses sind, mit dem ein größeres Thema erkundet wird. Eine Reihe von gut beschriebenen und unterrichtserprobten Beispielen für einen solchen Ansatz liegen ebenso vor wie Arbeiten zum methodischen und wissenschaftstheoretischen Hintergrund – siehe etwa (Maier, 1993b; Mackensen & Ohlendorf, 1998; Grebe-Ellis & Theilmann, 2006; Sommer, 2005; Grebe-Ellis, 2005; Theilmann, 2006a, 2008a, 2007). An dieser Stelle soll vor allem ein Aspekt in den Blick genommen werden: Wenn wir einmal anfangen, den sicheren Handlauf loszulassen, den ein klar umrissener Stoffumfang, speziell konstruierte Berechnungsprobleme und ein sicherer, spürbarer Abstand von Schulphysik zu den Alltagserfahrungen bieten, wenn unberechenbare

Fragen auftauchen und wir uns Sätze wie “Hm, das weiss ich so auf Anhieb auch nicht...” sagen hören, was hält dann das Projekt Unterricht am Laufen, was gibt Elan, Ziele, Themen, Rechtfertigung?

Ein Gefühl für die Wichtigkeit des Fachs Physik scheint, bei allen Vorbehalten, bei den Schülern breit vorhanden, Interesse an physikalischen Unterrichtsthemen lässt sich durch “sinnstiftenden Kontext” aus Lebenswelt oder Gesellschaft fördern (Muckenfuß, 1995). *Interesse an Physik* erscheint dabei als “aktualisiertes” oder “situationales” Interesse, in der individuellen Interesse im Sinne einer “persönlichen Disposition” auf eine hinreichend ansprechende Lernumgebung trifft (Krapp, 1992). Für den geschilderten, zunehmend selbstständig verfolgten Verstehensprozess müssen die “damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten” (Weinert, 2001) über das Über-sich-ergehen-Lassen von Unterricht offenbar hinausgehen. Hier kommt das zentrale Merkmal der *Selbstintentionalität* bei Interessehandlungen in den Blick (Krapp & Schiefele, 1989), die nun allerdings gegenüber einem *neuen* Gegenstand zu entwickeln ist. Was braucht es dafür? Die hier vertretene These ist, es braucht angemessene Begegnung mit physikalischen Fragen, es braucht individuelle und altersspezifische Erfolgserlebnisse des Lernenden bei der Suche nach Antworten (eben das “physikalische Verstehen”) und es braucht das ureigene Erlebnis, dass das Leben dadurch reicher wird (Buck, 2006b). Unabhängig von der konkreten Auslegung eines Modells zur Wirkungsweise von Interesse ist daran das Motiv der positiven Rückkopplung von mit den Interessehandlungen (hier: das Verfolgen physikalischer Fragen) verbundenen Erlebnissen an das innere Gefüge der seelischen Prozesse, die diese Handlungen hervorbringen. Und: auch hier geht es um einen qualitativen Sprung – entwickelt und gefördert werden soll nicht ein bestimmtes Interesse *an etwas*, sondern die Motivation und seelische Kraft dafür, sich *überhaupt* fragend, erkundend und ausdauernd auf etwas zu beziehen, *was man noch nicht kennt*.

Nicht die vielfach erforschten Präferenzen in Hinblick auf Schulfach, bestimmte Fachgebiete, Inhalte oder Unterrichtstätigkeiten oder auch lebensweltliche Bezüge und Kontexte etc. sind hier somit Thema, sondern ein *exploratives Interesse*, das mehr eine Erkenntnisgrundhaltung als eine inhaltliche Ausrichtung des individuellen Gegenstandsbezugs ist (Prenzel, 1988; Lehrke, 1988; Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998). Die Aufgabe des Lehrers ist es, diese Erkenntnishaltung zu entwickeln – in den Schülern, aber auch in sich selber. Die geschilderten Erfolgserlebnisse so zu ermöglichen, dass über solchem Unterricht eine “Wachheit” für ein größeres physikalisches Thema entsteht, ist eine Sache des pädagogischen Handwerks. Eigene Erfahrungen gehen in die Richtung, dass vor allem eigenes authentisches Interesse des Lehrers an der Unterrichtssituation für die Schüler zum Schlüssel für den gewünschten Schritt wird – exploratives Interesse will vorgelebt sein.

Wie wird Verstehen empirisch?

Das Wort “Verstehen” bezeichnet mindestens zwei nahe beieinanderliegende und doch recht verschiedene Seiten eines kognitiven Prozesses: die sachgemäße Repräsentation eines Sachverhaltes in den zur Verfügung stehenden Begriffen und das innere Erlebnis, einen Sachverhalt so gegenwärtig zu haben, dass man seine wesentlichen Aspekte und Beziehungen überschauen und zu anderen Erlebnisbereichen in Beziehung setzen kann. Ersteres schildert die Sache “von außen”, hin auf einen konzeptionellen Rahmen, an dem sich etwa “Sachgemäßheit” festmachen lässt. Die zweite Lesart von Verstehen erfährt unter phänographischen Gesichtspunkten oder als “genuines Verstehen” immer mehr Aufmerksamkeit. In wie weit Unterricht beim Schüler Verstehen im äußerlichen Sinne ermöglicht hat, lässt sich durch bewährte¹¹ oder speziell darauf zugeschnittene Erhebungsmethoden – etwa *concept maps* oder die Tests, die Rehm (2007) vorschlägt, geeignete schriftliche oder mündliche Interviews oder auch durch Sichtung selbstständig verfasster Beschreibungen oder Zusammenfassungen in Schülerheften beleuchten. Hier wird eine andere Schicht des Lernens (und Lernerfolgs) sichtbar als bei der Konfrontation mit klassischen Physikprüfungen, wobei auch sprachliche und darstellerische Fähigkeiten (und Schwierigkeiten) des Unterrichts und der Schüler auf den Prüfstand kommen.

Während das Abschneiden in Tests entscheidend ist für den schulischen Erfolg, steht zu vermuten, dass gelungenes Verstehen – und ein darüber gewachsenes positives Verhältnis zum Fach – nicht nur zum schulischen Erfolg, sondern auch zu anderen Parametern einer Lernbiographie korreliert. Während etwa Interesse offenbar *per definitionem* mehr oder weniger fachbezogen ist, ist *Interessefähigkeit*, also Wachheit und Offenheit als Teil des individuellen Persönlichkeitsprofils weit weniger fachgebunden, und auf diesem Wege mögen fachspezifische Lernerfolge auch in anderen Fächern fruchtbar werden. Solche Korrelationen, etwa auch zur Einstellung gegenüber dem Fach, zu Interessenschwerpunkten oder zum Berufswunsch, aber auch zur Fähigkeitsbildung in anderen Fächern und Lebensfeldern, versprechen spannende Einsichten in Lernprozesse und Ansatzpunkte für deren Verbesserungen. Für die Gestaltung von naturwissenschaftlichem Unterricht, der Offenheit gegenüber Fachanliegen oder Berufsorientierung hin aufs Fach fördern will, eröffnen sich hier neue Möglichkeiten umfassender Qualitätssicherung.

Die in diesem Text vertretene Lesart von Verstehen nimmt darüber hinaus den prozessualen Charakter dieser schwer abstrahierbare inneren Tätigkeit oder Seite des Seelenlebens in den Blick. Es geht nicht nur um (Fach)Wissen oder um den

¹¹R. Erb hat kürzlich empirische Ergebnisse vorgestellt (Einsiedler, 2007; Krause, 2007), in denen das krasse Nebeneinander von korrekt gelernten Inhalten zur Optik und diesen widersprechenden Vorstellungen von Licht thematisiert wurde. Hier müsste ein erfolgreiches Verstehen *per definitionem* signifikante und quantifizierbare Verbesserungen zeigen!

Erfolg beim “Beibringen”, sondern um die Ausbildung einer individuellen Fähigkeit, sich ein aufgeworfenes Thema *und seine Behandlung* zueigen zu machen und selbstständig weiterzuverfolgen. Hier kommen plötzlich eine ganze Reihe von Tugenden ins Blickfeld, die naturwissenschaftliche Fähigkeiten wie “Wiedergabe” oder “Anwendung” aufs wertvollste ergänzen: Empathie, Erfindungsreichtum oder auch “Befriedigung durch/Bedürfnis nach gedanklicher Klarheit und Ordnung”. So stellt sich die Frage nach einer *Didaktik des Verstehens* gewissermaßen auf lange Sicht. Es ist selbstverständliches Ziel jedes sich selbst ernstnehmenden Physikunterrichts, das Verstehen von physikalischen Sachverhalten zu fördern – lässt sich das empirisch erfassen? Fördern wir belegbar im Unterricht auch die Fähigkeit, sich zu interessieren? Pädagogik nach Wagenschein und erscheinungsorientierte Physik haben ihre Berührungspunkte genau dort, wo diese Frage gestellt werden darf. Wir hoffen plausibel gemacht zu haben und durch weitere Arbeit zu zeigen, dass diese Frage nicht nur legitim ist, sondern neue, konstruktive Perspektiven in der aktuellen Forschung zu naturwissenschaftlichen Kompetenzen eröffnet.

7. Die Kunst der naturwissenschaftlichen Untersuchung – eine konstruktive Kritik des Verstehensbegriffs bei Wagenschein¹

Die berühmte didaktische Trias *exemplarisch-genetisch-sokratisch* Martin Wagenscheins vereinigt eine ganze Reihe diaktischer und pädagogischer Grundüberzeugungen, Hoffnungen und Anliegen, an denen sich bis heute in vielen Fällen praktischer Unterricht und akademischer Diskurs orientieren. Dieser Text stellt im Kontext der Physikdidaktik einen kleinen Teil davon in Frage, ohne die grundsätzliche Blickrichtung dieser drei Motive abzulehnen: wir werden versuchen zu zeigen, dass der zugrundeliegende Verstehensbegriff Wagenscheins auf einem nicht-naturwissenschaftlichen Wissenstypus aufbaut – und dass darum z. B. auch die “sokratische Methode” nicht (oder nicht ohne weiteres) ein geeignetes Diskursparadigma für die Naturwissenschaften und insbesondere Physik ist. Dieses Argument wird in zwei Stufen entwickelt: Wir referieren zwei Quellen der klassischen Antike für diese Auseinandersetzung und argumentieren dann dafür, dass auch eine moderne Lesart dieser Quellen vernünftig ist. In einem dritten Teil untersuchen wir, welche methodischen Folgerungen sich damit gerade aus der Wagenscheinschen Blickrichtung auf eine authentische und individuelle Aneignung von Erkenntnis der Naturwissenschaften ergeben.

Antike Wissens- bzw. Erkenntnistypologie und die Unterscheidung zwischen Denk- und Erfahrungswissen

Wir beginnen mit zwei kleinen Exkursen – zum Ursprung des Lernproblems – “Wie eignet sich der Mensch neue Erfahrungen und Einsichten an?” – in der abendländischen Kultur und auf die Rätselseiten unserer Tageszeitungen, um die Grundlinien unseres Gedankengangs einzuführen. Im Anschluss daran wird die klassische Lösung des Lernproblems durch Aristoteles referiert und dessen Konzept soweit aktualisiert, dass besprechbar wird, in wie weit seine Sichtweise auch auf ein modernes

¹Erscheint in *Chimica etc. artes didacticae* 104 (2011).

Verständnis von Naturwissenschaft anwendbar ist.

Der erste Exkurs: Menons Paradoxon

Der junge, vornehme Thraker Menon hat eine wichtige Frage an den Philosophen Sokrates: Kann man Gut-Sein (gr. *aretē*² – “Tugend”, lat. *virtus*, engl. *virtue*) lehren? Platons fiktiver Dialog (Menon, 2005) spielt etwa im Jahr 402 v. Chr. und verfolgt diese Frage in verschiedene Richtungen. Es wird z. B. klar, dass es sich bei einem solchen Lehrproblem offenbar nicht um eine im weiteren Sinne technische Frage handelt – wenn es eine funktionierende Technik des Zum-Guten-Erziehens gäbe, gäbe es auch ausgewiesene Fachleute dafür und dann hätten die einschlägigen reichen Männer sicher keine Kosten und Mühen gescheut, um ihren nichtsnutzigen Söhnen eine entsprechende Erziehung angedeihen zu lassen. Einige Diskussion gibt es, weil das Problem schon damit beginnt, das “Gute”, das da gelehrt werden soll, scharf in den Blick zu nehmen. Gut ist oder wird Handeln, Unterlassen oder Streben offenbar nicht durch bestimmte, allgemein angebbare Merkmale, sondern erst im Verhältnis zu dem, der da handelt, unterlässt oder strebt, sowie zur Situation. Dieselbe Tat etc. kann bei jemanden anderem oder unter etwas anderen Verhältnissen völlig anders zu beurteilen sein, dasselbe Merkmal für oder wider Gut-Sein sprechen.

Allerdings scheint es einen Ausweg zu geben: Was Gut-Sein heißt, lässt sich vielleicht nicht diskursiv ableiten, es kann aber dennoch gewusst werden. Denn Sokrates vertraut darauf, dass die menschliche Seele, weil sie unsterblich ist, in früheren Erdenleben hat Erfahrungen sammeln können [81b,c]. Im Hier und Jetzt könnte dann die Möglichkeit bestehen, auf dieses Wissen zurückzugreifen – Wissen wäre *Wiedererinnern* (gr. *anamnesis*). Als Beleg dafür präsentiert der Philosoph ein klassisches Lehrstück, in dem ein geometrischer Inhalt durch jemanden abgeleitet wird, der ihn sicher nicht vorher gelernt hat: Der erstbeste Sklave im Hause Menons muss herhalten, um – nur geleitet durch Sokrates geschickt gestellte Fragen – zu beweisen, welche Seitenlänge ein Quadrat mit “Flächeninhalt 2” hat [82b ff.].

Und es funktioniert: Nachdem das Vorurteil, eine Verdopplung der Seitenlänge bringe auch die gewünschte Verdopplung des Flächeninhaltes, ausgeräumt und der Sklave bereit ist, wirklich nachzudenken, wird in einem klassischen “sokratischen Gespräch” die Lösung bald gefunden: Die Beobachtung, dass die Diagonale die Fläche des Quadrates halbiert, ist der Schlüssel für die gewünschte Antwort (Abb. 7.1). Doch die Sache ist damit keineswegs ausgestanden: Einerseits hat sicher niemand Menons Sklaven in Geometrie instruiert (so, wie auch der nachvollziehende Leser

²Das zugehörige Adjektiv, *agathós*, lässt sich oft auch mit “vortrefflich”, “tüchtig” übersetzen, so dass “Gut-Sein” nicht zu moralisch tingiert ist – es geht weniger um Gutmenschentum irgendwelcher Couleur, sondern durchaus um Leistungsfähigkeit, Vorbildlichkeit, Exzellenz oder Sich-Bewähren!

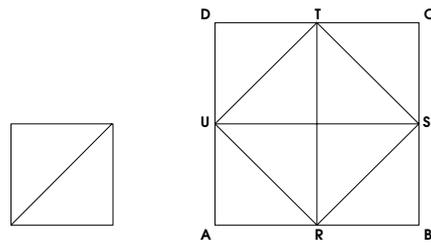


Abbildung 7.1.: Die Figur, anhand derer Sokrates die gewünschte Seitenlänge ableitet: Die Diagonale halbiert offenbar die Fläche des Quadrates (links). Verdopplung der Seitenlänge führt zum Vervielfachen des Flächeninhaltes (Quadrat ABCD), aber die gezeigte Halbierung der Fläche durch die Diagonalen bildet das gesuchte Quadrat RSTU mit doppelten Flächeninhalt.

nicht unbedingt ein Fachmann für Geometrie zu sein braucht), andererseits ist *ohne* dergleichen Vorwissen schlüssig gezeigt, wie man zur gesuchten Seitenlänge kommt – woher nimmt der Sklave, woher nehmen wir hier die Erkenntnissicherheit? Wenn sich “Wissen aus mir selbst hervorholen” lässt, wo war es dann vorher und wie wurde es erworben? Plato spitzt diese Frage auf ein Dilemma (“Menons Paradoxon”) zu (Menon, 2005, 80e):

Der Mensch kann seine Suche weder auf etwas richten, was er weiß – er weiß es ja, und wer etwas weiß, braucht seine Suche nicht darauf zu richten – und wohl auch nicht, was er nicht weiß, denn er weiß ja nicht, worauf er seine Suche richten soll...

Doch Sokrates These, Erkenntnis sei Wiedererinnern, löst das Problem nur vordergründig: Wenn etwas zu lernen heißt, dass ich es schon wissen muss, wie *knüpft Wissen dann an?* Dies ist die Frage, die auch die moderne Lernpsychologie seit Vygotskij und Piaget beschäftigt und jeder Auflösungsversuch, der darauf antwortet, indem eine Instanz vorausgesetzt wird, die das Anknüpfen besorgt, gerät in denselben Strudel von Rekursionen, den Plato hier beschreibt.³

Der zweite Exkurs: Grundverschiedene Arten von Rätsel

Gegen das Problem, die überschüssige Zeit zu verbringen, die in den Zwischenräumen des modernen Lebens offenbar doch noch lauert, sind Kreuzworträtsel und Sudokus so bewährte – und gefragte – Mittel, dass praktisch keine Tageszeitung

³Marton und Booth (Marton & Booth, 1997) spielen eine stattliche Reihe von modernen Varianten durch.

ohne Abdruck täglich neuer Rätsel auskommt. Diese beiden Arten von Rätseln haben formale Gemeinsamkeiten: ein streng umrissener Satz von Zeichen muss jeweils systematisch in Felder eingetragen werden, wobei wenigstens ein Teil der Einträge dabei simultan mehr als einer Anforderung genügen muss. So sind typischerweise beim Kreuzworträtsel Buchstaben Teil zweier verschiedener Wörter oder Namen, im Sudoku darf die eingetragene Zahl weder in derselben Zeile, noch im selben Neuner-Feld, noch in derselben Spalte wiederholt werden. In beiden Fällen gibt es charakteristische Schwierigkeiten, unterschiedliche Schwierigkeitsgrade und im übrigen auch Beispiele für nicht-eindeutige Problemstellungen.

In der konkreten Rätselpraxis zeigt sich allerdings einen grundlegenden Unterschied: Während ein erfahrener Kreuzworträtsellöser sicherlich in Einzelfällen mit einiger Sicherheit "Wörter" der geforderten Länge in das leere Gitter eintragen wird, besteht der eigentliche Test dafür, ob ein Kreuzwort-Eintrag "korrekt" ist, darin, dass sich *in Zukunft* weitere Einträge machen lassen, die mit dem gemachten Eintrag passende Buchstaben teilen. Mit anderen Worten: ob ein Eintrag verworfen wird oder nicht, entscheidet sich letztlich daran, dass das Rätsel letztlich (mehr oder weniger) als Ganzes aufgeht. Anders beim Sudoku: Reiz und Herausforderung des Rätsels ist es, die Einträge anhand von (mehr oder weniger raffinierten) Schlüssen aus der aktuellen Situation *abzuleiten* (Abb. 7.2). Die Schlüsse selbst beruhen wiederum auf den Sudoku-Regeln und das Rätsellösen besteht damit (sofern eben nicht einfach geraten wird...) in allen Stufen letztlich in der Anwendung ebendieser Regeln.

Sehr wahrscheinlich gab es in der Antike weder die eine noch die andere Form von Rätseln. Allerdings ist mit diesen Überlegungen klar, dass Sokrates wohl sehr gut ein angemessen schwieriges Sudoku-Problem anstelle der geometrischen Beweisführung zur Diskussion hätte stellen können – nicht aber ein Kreuzworträtsel. Der Sklave hätte sich in der Zahlenlogelei, geleitet durch sanft hinweisende Fragen und gesunden Menschenverstand, sicherlich zurechtgefunden. Doch wäre es sicher hoffnungslos, ein Kreuzworträtsel ohne einen geeigneten Hintergrund an nötigem "lexikalischem Wissen" lösen (lassen) zu wollen: Es müssen zum einen alle relevanten Vokabeln gewusst und orthografisch korrekt geschrieben werden können, zum anderen aber auch die vorgegebenen Beschreibungen genügen, um uns auf die gesuchten Wörter zu bringen. Und beides ist an explizite (Aus-)Bildung gebunden, die beim Kreuzwort-Rätseln aktiviert werden muss. Mit anderen Worten: Offenbar handelt es sich damit um einen komplett verschiedenen Typus von Wissen bzw. Wissensanwendung als beim "Schließen" in der Geometrie oder in Logeleien.

Aristotelische Ethik und die dianoetischen Tugenden

Der mit Menons Frage an Sokrates – "*Ist das Gute lehrbar?*" – angeschnittene Themenkreis findet in Aristoteles Schrift "Nikomachische Ethik" (NE Loeb, 1929/2003)

	8			7	9	1		2
2	7			1		8		9
				3			7	
	1					7		
5								4
		4					6	
	4				5			
9			7		4		5	6
8		5	6	9			2	

1	2	3	4	5	6	7	8
9							
10				11		12	13
14						14	
15				16			
17						18	19
20	21	22	23				
24							
25							26

Abbildung 7.2.: Im Sudoku (links) lässt sich z. B. im Eckfeld rechts unten die 7 mit Sicherheit platzieren – ein gut gestelltes Rätsel lässt sich in dieser Weise komplett lösen und sein Schwierigkeitsgrad bemisst sich an der Schwierigkeit, die “determinierten Zahlen” abzuleiten. Das Lösungsmuster des Kreuzworträtsels rechts ist im Allgemeinen nur heuristisch abzuleiten – die Beschreibungen der Einträge sind Platzhalter für Teile des Musters, die eine bestimmte Länge haben müssen und darüber hinaus mit den *weiteren* Einträgen kompatibel zu sein haben. Der Schwierigkeitsgrad bemisst sich daran, wie schwer die gesuchten Einträge zu “erraten” sind.

eine ausführliche Behandlung. Bereits Plato stellt fest, dass “das Gute” nur situativ festzustellen ist und darum “Gut-Sein” oder “Tugend” nicht ein bestimmtes, festgelegtes Verhaltensmuster, sondern eher eine Art Stil ist, eine Fähigkeit, die jeweils gegebenen Situationen angemessen handzuhaben. Hier hakt Aristoteles ein: Angemessen heißt, dass das “Mittlere” angestrebt wird, das die “rechte Gesinnung”, der *orthòs lógos* vorgibt. Und die rechte Gesinnung besteht in einem innerlich gefassten Ziel, das ins Auge fassen zu können sich durch Vorbilder, Studium ethischer Grundsätze, Aufmerksamkeit für die Folgen eigenen Handelns oder das Handeln anderer etc., kurzum durch Erfahrungen, aus denen man für die eigene Seelenbildung etwas macht, tatsächlich erwerben lässt. Zunächst wird für die charakterlichen Tugenden diskutiert, was rechte Gesinnung ist und wie sie eingegrenzt, definiert werden kann. Im sechsten Buch wendet sich der Autor dann den Tugenden des Denkens, der *dianoía*, zu und unterscheidet verschiedene Aspekte des erfolgreich-rationalen Umgangs mit Leben und Welt, die sogenannten *dianoëtischen* Tugenden:

- Weisheit (*sophía*), fachliches Können (*technē*)
- *epistēmē*, das sichere Wissen vom Typ “Am rechtwinkligen Dreieck ist die Summe der Kathetenquadrate gleich dem Quadrat über der Hypotenuse” etc. und

- *nūs* und *phrónēsis*, zwei weitere Eigenschaften, die für Aristoteles im Vordergrund stehen und auch für unser Vorhaben zentral sind.

Während Weisheit und fachliches Können auf moralisch oder praktisch tingierte Persönlichkeitsmerkmale verweisen, geht es bei den anderen beiden Punkten um ausgesprochene *Erkenntnistugenden*. Die dabei von Aristoteles gemachte Unterscheidung sei kurz umrissen, weil sie einen wesentlichen Punkt für unsere Unternehmung enthält: der Blick auf zwei grundsätzlich verschiedenen Erkenntnismodi gegenüber der Welt.

Aristoteles unterscheidet (NE Reclam, 2003, VI, 1139a2 ff.) zunächst zwei Bereiche von seelischen Aktivitäten: einen rationalen (gr. *lógon échon*) Bereich und ein irrationalen (gr. *álogon*). Die für jegliche Art Wissenschaft in Frage stehende rationale Seelentätigkeit teilt er dann in weitere zwei Instanzen auf, nämlich in die Fähigkeit, absolute oder notwendige Wahrheiten aufzufassen – also solches (“Formen des Seienden”), “dessen Sein Veränderung nicht zulässt” – und die Fähigkeit, Veränderliches, Kontingentes oder Unbeständiges aufzufassen. Erstere nennen wir im Folgenden das *analytische oder spekulative Denken* (gr. *to epistēmōnikón*), letzteres die *abwägende Reflexion* (gr. *to logistikón*).⁴ Er erörtert dann konsequent die Frage, worin jeweils die spezifische *aretē* besteht und entwickelt so ein System “dianoetischer Tugenden” für diese beiden Instanzen.

Da eine spekulative Denkbewegung weder auf ein Handeln noch auf ein Hervorbringen oder Erfinden zielt – sondern auf Feststellungen –, ist es leicht zuzusagen, worin hier “Tüchtigkeit”, *aretē* besteht: es kommt auf das sichere Unterscheiden von “richtig/ableitbar” und “falsch/ungültig”, von “durch die Regeln gedeckt” und “den Regeln widersprechend” an. Die entsprechende Fähigkeit heißt bei Aristoteles und im Folgenden *epistēmē*, das sichere deduktive Schließen-Können. Anders bei der abwägenden Reflexion: Hier geht es etwa darum, was zu tun ist oder angemessen wäre, wie etwas gemeint oder zu verstehen oder zu beurteilen war etc. Die in diesem Sinn urteilende oder kreativ-handlungsorientierte Aktivität involviert noch andere Fähigkeiten als Analyse oder logisches Denken – und hier setzt die Parallelität an: Das “Richtige” beim Auffassen der veränderlich-bewegten Welt zu finden, braucht eine gediegene Ausbildung der passenden Seelenfähigkeiten (so wie das gute Handeln auf einer Ausbildung des Charakters beruht). Diese Ausbildung für die abwägende Reflexion beruht aber offenbar auf dem *Sammeln von Erfahrungen* (vgl. [Buch VI, 1142a 10 ff.]): “Warum kann ein junger Mensch zwar Mathematiker, aber nicht ein Philosoph oder Naturwissenschaftler werden?” Nun, Mathematik muss und kann Kraft des eigenen Denkens *eingesehen und erschlossen* werden; den Antworten auf ethische Fragen oder der Kenntnis der Natur nähern wir uns auf ganz anderen Wegen, auf denen wir das jeweils Einmalige der Situation mit allgemeineren (aber eben

⁴In diesen Bezeichnungen folge ich der Übersetzung von Franz Dirlmeier (NE Reclam, 2003).

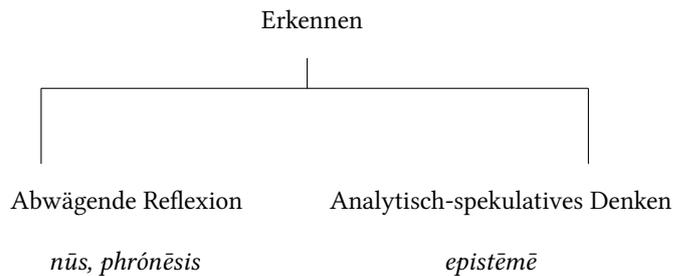


Abbildung 7.3.: Die Erkenntnistugenden nach Aristoteles

nicht wirklich allgemeingültigen), bewährten Prinzipien ins Verhältnis setzen – diese Fähigkeit heißt bei Aristoteles und im Folgenden *phrōnēsis*, die Fähigkeit, die Struktur oder das Stabil-Gesetzhafte einer Situation zu sehen und zu formulieren wäre *nūs*.

Wissenstypologie – Denk- vs. Erfahrungswissen

Wir erkennen in der Unterscheidung zwischen spekulativem und abwägend-reflektierendem Denken den Kontrast wieder, die wir an den zweierlei Arten von Rätseln skizziert haben: ein Denken, das seinen Gegenstand anhand gegebener Regeln erschließt, und ein Erfassen von Gegenständen und deren Beziehungsgeflecht, die sich erst konturieren müssen (Abb. 7.3). Das Rätsel des geometrisierenden Sklaven sehen wir damit klarer: Sokrates hat mit der Lektion für Menons Sklaven gar nicht den Erinnerungscharakter von Wissen gezeigt. Wir sind stattdessen Zeuge davon, dass sich eine mathematische Frage (wenigstens in einfacheren Fällen) auch ohne Erfahrungshintergrund *logisch*, durch spekulativ-analytisches Denken entscheiden lässt.

Für die wissenschaftliche Gesinnung seit der Neuzeit und vor dem 20. Jahrhunderts war die mathematische Natur einer Naturwissenschaft Physik nicht nur selbstverständlich⁵, sondern sogar konstituierend für deren Wert als Naturwissenschaft: Physik wurde zur Leitwissenschaft, weil sich Mechanik mathematisch geschlossen formulieren und Physik konsequent mechanisch-mechanistisch denken ließ – vgl. etwa (du Bois-Reymond, 1914). Dass sich Naturbeschreibung mathematisieren lässt, ist für die Physik des 20. Jahrhunderts dann immer noch eine irritierende Gegebenheit⁶, die letztlich auf das Spannungsfeld von Rationalität und Irrationalität

⁵Galileis *dictum*, das Buch der Natur, das noch im Mittelalter ganz deskriptiv-konkreten, ordnenden Charakter hat (Megenberg, 1990), sei (lies: eigentlich) in der Sprache der Mathematik geschrieben (Galilei, 1896), lässt sich vor diesem Hintergrund als ein platonistisches Aufbegehren gegen ein aristotelisches Regime lesen, das den Moment der einigenden Idee der Natur zurückgestellt hatte. Ähnlich liegt im Übrigen auch Goethes Leiden an der Botanik des 18. Jahrhunderts. . .

⁶Vgl. (Weizsäcker, 1943), (Wagenschein, 1999a, S. 41 f.) oder die Einleitung zu (Feynman, 2002)

verweist⁷. Rationalität lebt in der mathematischen Naturbeschreibung und im fachtheoretischen Diskurs, die dem Ideal spekulativen Denkens folgen. Hier ist *epistēmē* gefragt: Ausgehend von “Prinzipien”⁸, die etwa in Gestalt von “Grundgesetzen” oder als Satz grundlegender Gleichungen daherkommen, werden speziellere oder konkretere Problemstellungen der Physik als Anwendungen dieser Prinzipien (und des durch diese implizierten Kalküls) behandelt – letztlich also deduktiv “gelöst” (oder “erklärt”). Einen solchen *Wissenstyp*, also einen Satz spezifischer Inhalte und die zugehörige Art, zu argumentieren und etwas einzusehen, nennen wir im Folgenden *Denkwissen*.

Die Erfindung von Schlüsselexperimenten oder wesentliche theoretische Fortschritte sind dagegen gerade Stellen, die nicht einfach “systematisch” sind, sie sind höchstens zum Teil Ergebnis eines “Systems Physik”, sondern Ergebnis von “Grenzüber tretungen” Einzelner. Logisch-spekulativ geht es dort zu, wo der konzeptionelle Rahmen ebenso abgesteckt ist wie der Erfahrungshorizont. Der Prozess dieses Absteckens, des Verlassens des Altbekanntes, Ableitbaren, ist aber weitgehend identisch mit der forschenden Praxis der Physik. Diese lässt sich hier nicht auf analytisch-spekulatives Denken reduzieren, sondern braucht offenere und individuellere Modi der Erkenntnis, die wir oben als abwägende Reflexion bezeichnet hatten. Pointiert gesagt: Physik ist dann kein Sudoku, sondern viel eher ein Kreuzworträtsel. Diese Arten zu Argumentieren oder von Einsicht, die ihre Kohärenz nicht aus der Systematik beziehen, sondern aus der Forschungserfahrung derjenigen, die die Systematik auf unbekanntem Gebiet anwenden, bewerten oder umschreiben, nennen wir im Folgenden *Erfahrungswissen*.

Physik als Erfahrungswissenschaft vs. Physik als Lehrgebäude

Naturwissenschaft – und also insbesondere auch Physik – ist in Aristoteles Augen keine Disziplin, die sich mit notwendigen Wahrheiten beschäftigt. Wenn dem so ist, müssten wir bereit sein, über die Voraussetzungen für eine *aretē*, also eine erfolgreiche Aneignung in bzw. von Physik ähnlich nachzudenken, wie wir über Menons Frage nach der Lehrbarkeit des Guten nachdenken müssen: Wir haben gelernt, dass Erkenntnisfragen innerhalb geeigneter systematischer Strukturen ziemlich voraus-

⁷Vgl. etwa die Auseinandersetzung mit der “Nachtseite der Physik” (E. Fischer, 2003) oder das jüngere Interesse an der Beziehung zwischen Wolfgang Pauli und Carl Gustav Jung.

⁸“Prinzipien der Physik” heißt etwa die hiesige Anfängervorlesung – ein solches Projekt stellt sich methodisch mehr oder weniger bewusst in eine Reihe mit Russells Versuch einer konsistenten Darstellung der Mathematik (Whitehead, Russell & Gödel, 2008) oder Newtons Griff nach einer mathematisierten Naturbeschreibung (Principia, 1972).

setzungslos durch spekulatives Denken lös- bzw. entscheidbar sind. Dies gilt aber nicht gleichermaßen für Fragen der abwägenden Reflexion, und also auch nicht für Naturwissenschaft – so steht also unverhofft die Frage im Raum, ob und wie denn etwa Physik lehrbar ist. . . Es ist allerdings keineswegs klar, ob über einen Abstand von über 2000 Jahren “Naturwissenschaft” auch nur annähernd das meint, was heute darunter verstanden wird. Wenn wir Aristoteles Einteilung nachvollziehen wollen, ist zu zeigen, dass das, was wir unter Physik verstehen, tatsächlich nicht eine bloße Disziplin spekulativen Denkens ist, die sich mit logisch erschließbaren Problemen befasst, und welche Rolle dianoetische Tugenden in ihr spielen. Dazu werden wir zunächst zwei exemplarische Praktikumssituationen näher untersuchen und dann versuchen, die Erkenntnistugenden des Erfahrungswissens auf die Physik zu übertragen.

Im Physikpraktikum: Erfahrungen an der schiefen Ebene

Werfen wir im Folgenden einen instruktiven Blick auf zwei Praktikumssituationen des Wintersemesters 2008/2009 mit Studenten innerhalb unserer Lehramts-Bachelor-Ausbildung:

- Zwei Studenten haben sich im “Praktikum Schulexperimente” entschieden, für ihre Lerngruppe ein bestimmtes Demonstrationsexperiment zur Kinematik der schiefen Ebene aufzubauen: die gleichmäßige Zunahme der Geschwindigkeit mit der Zeit. Ihre Ausrüstung ist eine Luftkissenschiene mit passendem Gleiter und ein Satz Lichtschranken samt einem modernen mehrtorigem Steuergerät.
- Ein Student hat in einem Seminar Wagenscheins Hinführung zu den Fallgesetzen an der schiefen Ebene kennengelernt (Wagenschein, 1962, S. 288 ff.) und versucht, den dort beschriebenen “Lehrgang” (Wagenschein) mit der Seminargruppe nachzuvollziehen. Die Ausrüstung für eines der dabei verwendeten Experimente ist ein aufrecht fixiertes Dielenbrett (dessen Fuge als Kugelbahn dienen soll), einige Kugeln verschiedener Größe und aus verschiedenen Materialien und ein Metronom.

Natürlich ist den Studenten im ersten Fall bekannt, was das systematische Umfeld der (Schul-)Physik zu ihrem Problem ist. Ihr Demonstrationsversuch hat stark affirmativen Charakter und wird für die Mitstudenten bewusst ohne die in einer analogen Unterrichtssituation sicher nötige Einbettung und Absicherung durch Rekapitulation der relevanten kinematischen Grundkenntnisse, Erklärung der doch anspruchsvollen Messtechnik etc. realisiert. Auch im zweiten Fall kennen die Studenten zwar “die Physik” der Sache, doch steht hier eine Art “Selbsterfahrung” im Vor-

dergrund, bei der eine reale Lehr-Lernsituation simuliert wird, um die besondere Qualität des genetisch-sokratischen Vorgehens kennenzulernen.

Im ersten Experiment erfolgt die Geschwindigkeitsmessung indirekt über die Messung der Verdunklungszeit an einer Lichtschranke, wenn der Gleiter diese unterbricht – er ist also umso schneller, je kürzer die Unterbrechung ist. Die Studenten erwarten, den linearen Zusammenhang $v \propto t$ schnell und unkompliziert darstellen zu können: Vier Lichtschranken werden entlang der Luftkissenschiene in gleichmäßigen Abständen entlang der Schiene postiert, die Unterbrechungszeiten aufgenommen und die Kehrwerte probeweise in ein Diagramm eingetragen – sie entsprechen im Aufbau vier verschiedenen “Zeitpunkten” t_i . Heraus kommt allerdings alles andere als ein linearer Zusammenhang. Die Studenten wiederholen den Messvorgang, tüfteln eine Weile an ihrem Aufbau, und kommen schließlich ins Nachdenken. Dann ist die Sache schnell klar – es gilt ja nicht $s \propto t$, also kann man die *Streckenskala* nicht direkt auch als *Zeitskala* verwenden. Wenn den Schrankenpositionen die korrekten (z. B. gemessenen) Zeiten zugeordnet werden, ergibt sich auch ein überzeugender linearer Zusammenhang.

Im zweiten Experiment gilt es, das klassische Experiment Galileis nachzuvollziehen: In zeitlich gleichen Abständen sollen die Studenten die Positionen der herabrollenden Kugeln auf dem Brett mit Kreidestrichen markieren. Wenn die Kugel zu Beginn eines “Taktes” losrollt, sollten sich die Abstände zwischen den einzelnen Kreidestrichen einer Folge wie 1:3:5:... verhalten. Als Taktgeber fungiert zunächst ein Student, der sich selbst den Puls fühlt und bei jedem gefühlten Herzschlag einen kurzen Laut von sich gibt, dann ein Metronom. Die Sache hat durchaus ihre praktischen Schwierigkeiten (etwa in der Koordination der beteiligten Personen oder beim “Anzeichnen im Takt”), die Striche liegen zunächst wild verstreut auf dem Brett und ihre Abstände werden bergab zwar größer, aber keineswegs im erwarteten Verhältnis. Der Übergang zum Metronom führt dazu, dass die Marken verschiedener Durchgänge einigermaßen “gehäuft” liegen, die gewünschten Streckenverhältnisse stellen sich dennoch nicht ein. Es werden unter Anleitung weitere Beobachtungen gemacht: die Geräusche beim Rollen (die den Beschleunigungsvorgang, aber auch das Stationär-Werden des Bewegungsvorgangs verraten können), dass verschiedene Kugeln durchaus verschieden gut rollen (“Groß und schwer geht besser als klein und leicht”) und auch, dass steilere Bahnen sich “vorschriftsmäßiger” verhalten als flachere. Nach weiteren, “verbesserten” Wiederholungen wendet sich die Gruppe der Vermessung von Wasserstrahlen zu, an denen sich die Wurfparabel ablesen lassen soll.

Der Unterschied der beiden geschilderten Erfahrungsweisen von “Fallgesetz” ist erheblich: Der Verständnisrahmen von “ $s = at^2/2$ ” ist im ersten Fall der formal-mathematische Zusammenhang dieser Formel mit “ $v = at$ ” etc. Zum Tragen kommt die Fähigkeit, den gemachten systematischen Fehler als solchen zu erkennen und

die entsprechenden Korrekturen zu machen. Nicht der physische Vorgang des Experimentes mit seinen sinnlich-unmittelbaren Erlebnissen und Modalitäten ist dabei Gegenstand dieser Erfahrung, sondern seine quantitative Repräsentation auf Orts- und Zeitskalen. Die zweite Gruppe beschäftigt sich gerade damit, diese quantitative Repräsentation auf eine miterlebbar Art zu *realisieren* und so eine Art Brücke zwischen dem vorgestellten kinematischen Vorgang und dem erlebten Geschehen und Handeln zu schaffen. Die Fallgesetze sind hier das, was am Vorgang von den konkreten Experimentierbedingungen *abstrahiert* werden kann.

Denk- und Erfahrungswissen in der Physik

Physik wird im fachdidaktischen Kontext gerne als “theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft”⁹ charakterisiert. In der Tat: Offenbar beinhaltet Physik Elemente von exaktem, gleichsam mathematischem Denkwissen, das sich mit “Universalien” (gr. *kátholon*, das “Auf-das-Ganze-Gehende”, Allgemeine) oder notwendigen Wahrheiten beschäftigt. Es gibt bewährte Theoriegebäude und innerhalb dieser verläuft der Diskurs zweckmäßig auf analytischen bzw. spekulativen Bahnen. Wir schauen jedoch insgesamt auf das Miteinander von Denkbewegungen, die sich analytisch-spekulativ innerhalb gegebener Theoriesysteme abspielen, und andererseits von der doppelten Notwendigkeit, sowohl die Grundprinzipien der Theoriesysteme zu erkennen, als auch jede konkrete, einmalige Erfahrungssituation sachgemäß auf die passende Theorie abzubilden. Weder die Prinzipien, der Ausgangspunkt der Analyse, noch der Einzelfall, also das, wofür es noch keine Regeln geben kann, können im strengen Sinn durch analytisch-spekulatives Denken erreicht werden, das im Grunde genommen immer deduktiven Charakter hat¹⁰: “*We reach the limit of analysis as much when we descend to particulars as when we ascend to first principles*”.¹¹ So besteht eben in der Naturerkenntnis, anders als etwa im Verfolgen eines korrekten geometrischen Argumentes, die grundsätzliche Möglichkeit, ja: Notwendigkeit des *Zweifels* an der Gültigkeit des eigenen Gedankengangs.

Sofern der physikalische Diskurs das Feld des erstgenannten, scheinbar mathematisch-exakten Erkenntnismodus verlässt, kommen andere Herausforderungen als kunstfertiges Rechnen in den Blick: Vertraut-Werden mit experimentellen und theoretischen Praktiken, das Wissen um Möglichkeiten und Grenzen angewandeter Theorien, persönliche Evidenzerlebnisse, Schaffung lebendiger Bezüge zwischen Erfahrungswelt und Theorie, vielleicht auch genuine Theoriebildung und anderes. Diese nicht-deduktiven Anteile in der Physik lassen sich mit Aristoteles Unterscheidun-

⁹So in den EPA (EPA, 1989/2004) oder beispielsweise in (RLP Physik Brandenburg, 2008, Fachprofil).

¹⁰Zum Induktionsproblem in der Naturwissenschaft – das auch schon Aristoteles beschäftigt hat – vgl. etwa die Aufsätze von R. Carnap in (Krüger, 1970).

¹¹Aus Burnets Übersetzung (Burnet, 1979/1900) zu NE VI. viii. 9.

gen innerhalb der abwägenden Reflexion differenzieren: Die Fähigkeit zu Denkbewegungen, die theoretisches Wissen mit konkreten Situationen verbinden, ist eben *phrónēsis*, (“Verständigheit”, “Planvoll-Sein”, engl. *prudence*). Diese Fähigkeit wird etwa gebraucht, um die richtige Formel für ein gegebenes Problem zu finden.¹² Der apprehensive Griff nach neuen theoretischen Horizonten – überlebensgroß in den Verdiensten eines Galilei, Newton oder Einstein – wird als *nūs*, das “Sinn-Denken” oder “denkende Erkennen” (engl. *intelligence*) angesprochen. In den geschilderten beiden Praktikumssituationen werden die Fallgesetze einmal als Gegenstand von Denkwissen oder *epistēmē* behandelt, in das sich die Empirie einzuordnen hat. Für die Teilnehmer am Wagenscheinschen Lehrgang zu den Fallgesetzen sind die Erwartungen an ein “Ideal-Sein” der beobachteten Vorgänge zurückgenommen und es kommen ursprünglichere Momente in den Blick: das Wunder des Beschleunigens, die Probleme rund um das zuverlässige Takten der Striche oder die Schwierigkeit, den Ort eines bewegten Etwas zu bestimmen, aber auch, was sich als “Struktur” oder “Gesetzmäßigkeit” des Vorgangs erst anbahnt. Hier gibt es zwei verschiedene Lern-Projekte oder -Schritte: Einerseits den Übergang zu verbindlichen, regelhaften Streckenverhältnissen, andererseits das Realisieren, dass die konkreten Streckenverhältnisse gleichsam die Folge 1:3:5:... *werden wollen*. Ersteres wäre im geschilderten Sinn ein Akt der *phrónēsis*, zweiteres ein Akt von *nūs*. Wir schauen auf eine Suchbewegung, einen Prozess, den der Lerner durchläuft und in dem sich der interne Umkreis grundsätzlich ändert – insbesondere die Referenz auf so etwas wie Naturgesetzlichkeit erst konstituiert.

Diese beiden Erkenntnismodi des Erfahrungswissens unterscheiden sich dabei nicht nur in ihrer Funktion (“theorieanwendend” vs. “theoriebildend”), sondern auch in der Richtung ihrer Denkbewegung: Während *nūs* eine verallgemeinernde Denktätigkeit ist, realisiert *phrónēsis* Bezüge zwischen allgemeinen Gesichtspunkten (etwa Erfahrungsregeln oder Formeln) und konkreten Situationen. Aristoteles schildert in (VI. viii. 9) diese Polarität der beiden Erkenntnismodi für Erfahrungswissen: *nūs* ist für “Eingrenzungen”, Begriffsbildungen oder Definitionen zuständig, die nicht der analytischen Ableitung zugänglich sind, *phrónēsis* hingegen für den Umgang mit dem *eschaton*, dem letztlich gegebenen Einzelnen, von dem es kein *epistēmē*, kein sicheres, durch Nachdenken ableitbares Wissen, sondern nur *aisthēsis*, also “Wahrnehmung” geben kann.

¹²Aristoteles nennt als lebensnahe Beispiele außerdem die Fähigkeit, im praktischen Leben den eigenen Vorteil zu wahren oder politisches Geschick.

Individuelle und authentische Lernwege zur Erfahrungswissenschaft Physik

Physik als Lehrgegenstand in Schule und Hochschule ist – in diesem Sinne also in einem gewissen Gegensatz zur Physik als wissenschaftlicher, sich entwickelnder Disziplin – gemeinhin das, was sich an physikalischen Inhalten *systematisch* darstellen lässt. Soweit dieser konzeptionelle Rahmen überschaut wird, besteht die Aufgabe des Lernenden hier darin, die Elemente dieser Praxis wiederzugeben und anzuwenden (KMK, 2004b). Didaktisch spiegelt sich diese Situation z. B. wider, wenn ein physikalisches Thema “rekonstruiert” werden soll und dafür zunächst “elementarisiert” werden muss¹³ (Kattmann et al., 2005) oder wenn innerhalb eines physikalischen Teilgebietes konkurrierende Deduktionsschemata – die sogenannten “Modelle” – gelehrt werden. Doch ein sinnvoller Umgang damit verlangt nicht nur deren korrekte Anwendung, sondern etwa auch die Fähigkeit, sie kritisch zu bewerten – also “Modellkompetenz” (Mikelskis-Seifert, Thiele & Wünscher, 2005; Leisner, 2005; Mikelskis-Seifert, 2006b). Auch ein verständiger Umgang mit Fachwissen auf der Stufe von Transfer (Theilmann, 2008b), das in den Bildungsstandards vorgesehene Fruchtbar machen von Fachwissen für gesellschaftliche Fragestellungen und das selbstständige Kommunizieren darüber, der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung etc. verweisen uns auf das Problem, auch für diese Aspekte von Physik entsprechende Fähigkeiten zu entwickeln. Und an dieser Stelle sollte bereits deutlich sein, dass dieses Problem regelrecht *fordert*, neben der üblichen Ausbildung von *epistēmē* (durch systematische Darstellung, quantitative Aufgaben etc.) bei der Ausbildung auch abwägende Reflexion angemessen einzubeziehen. Die Feststellung, dass der so oft bemühte Kompetenzbegriff der Bildungsstandards für Physik (Weinert, 2001; KMK, 2004b),

“die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können,”

weitgehend auf der Linie des klassischen Verständnisses der dianoetischen Tugenden liegt, ist hier vielleicht schon überfällig. Kompetenz ist in diesem Verständnis nicht – wie in der allgemeinen Sprachwissenschaft¹⁴ oder im genetischen Strukturalismus – eine generell mögliche, gleichsam phylogenetische Disposition, sondern individuell, biographisch und konkret: es geht um das angemessene Zurecht-Kommen mit, das

¹³I. e. festgestellt wird, welcher Satz von Prinzipien zur Deduktion des gewünschten Ergebnisses nötig ist.

¹⁴In Opposition zu “Performanz” etwa bei (Chomsky, 1969).

Fachmann-Sein in einer komplexen Materie in variablen Situationen, wobei Denk- und Erfahrungswissen gefragt ist.

Ein individueller lernpsychologischer Rahmen: Erfahrungsumkreise und referentielle Aspekte

What does it take to learn? Marton und Booth entwickeln ihre bereits oben zitierte Untersuchung zu dieser Frage (Marton & Booth, 1997) selbst in bester aristotelischer Manier: Jede Erfahrung (*experience*) hat eine "Was-Seite", den referentiellen oder Bedeutungs-Aspekt, und eine "Wie-Seite", den strukturellen Aspekt: eine Art "Hintergrund" oder "Rahmen", vor dem (bzw. innerhalb dessen) sich der Gegenstand des Lernens als Gegenstand – also als umrissener Bewusstseinsinhalt – formiert. Dieser Hintergrund lässt sich differenzieren in den externen Umkreis (*external horizon*), in den alles fällt, was die Erfahrung äußerlich konstituiert, und den internen Umkreis (*internal horizon*), das, was wir aufgrund unseres Vorwissens oder von Vorerfahrungen her innerhalb der aktuellen Erfahrung als Struktur, Beziehungen etc. "hineinsehen" (Abb. 7.4).

Lernen besteht offenbar gerade darin, dass innerhalb des eigenen Lernhintergrundes neue Beziehungen gestiftet werden und sich das "hintergrund-bildende" Gefüge von Gegenständen, Erwartungen, Kategorien, Konzepten etc. nicht einfach als Bestand fortpflanzt, sondern modifiziert wird. Die erste Experimentiergruppe kommt mit ihrem Bestätigungsexperiment zwar nicht glatt durch, das Problem ist aber völlig systematischer Natur: die vorschnelle Analogisierung der räumlichen Abstandsverhältnisse mit den zeitlichen Verhältnissen des Vorgangs – wohl auch eine plausible Schülerfehlvorstellung – geht nicht auf und muss korrigiert werden. Die zweite Experimentiergruppe erlebt eine echte Differenz zwischen dem konkreten und dem theoretisch-idealen Geschehen: der reale Vorgang zeigt gar nicht die Merkmale, die ihm in den Fallgesetzen zugeschrieben werden. Stückchenweise kann sich aber klären, welche Experimentierbedingungen diese Merkmale brauchen (oder: bräuchten).

Die beiden geschilderten Studentengruppen machen ihre jeweiligen (Lern-)Erfahrungen in recht vergleichbaren externen Umkreisen. Insofern die Fallgesetze als Gegenstand von *epistēmē* behandelt werden, spiegelt sich das deutlich im internen strukturellen Aspekt – sie werden als Teil der formal-mathematischen Struktur "Mechanik" genommen. Das impliziert dann ein affirmative Experimentiersetting, wobei Reibung ebensowenig in Betracht gezogen wird wie Probleme, die sich aus der räumlichen Ausdehnung von Lichtschranken, Gleitern etc. ergeben mögen. Auch der referentielle Aspekt (Reduktion auf Orte, Zeitpunkte, reine Gesetzmäßigkeiten etc.) ordnet sich dem unter. Das Lernproblem hier ist, ob es gelingt, die entsprechenden

Strukturelemente und eine adäquate Vernetzung zu realisieren. Auf die korrespondierende Struktur der Erfahrung im genetischen Lehrgang sind wir in Abschnitt 7 bereits kurz eingegangen – was ist das korrespondierende Lernproblem für die erfahrungswissenschaftlichen Aspekte?

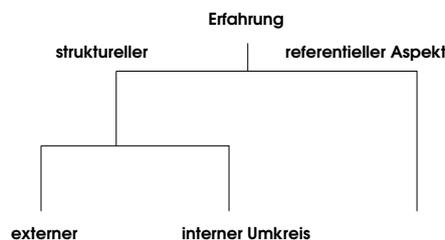


Abbildung 7.4.: Die generelle Struktur der Erfahrung nach Marton und Booth (Marton & Booth, 1997)

Was heißt “Verstehen” im Kontext von Denk- und Erfahrungswissen?

Wagenscheins elegante Wendung “Verstehen heißt, selber einsehen, ‘wie es kommt’” (Wagenschein, 1999a, S. 120) ist im Grunde genommen eine moderne Spielart des Aristotelischen Verstehensbegriff, der *theōría*, i. e. der umfassenden Anschauung einer Sache. Nun ist es an dieser Stelle naheliegend zu unterscheiden, wie sich eine solche Anschauung auf dem Gebiet des logisch-spekulativen Denkens anders ausnimmt als auf dem Gebiet der abwägenden Reflexion. An der schiefen Ebene ist es etwa möglich, logisch-analytisch einzusehen, dass Streckenverhältnisse von 1:3:5: . . . für in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen zurückgelegten Strecken zu Sätzen wie “ $s \propto t^2$ ” oder “ $v \propto t$ ” führen und umgekehrt. Auch die Beziehung dieser Sätze zur Flugbahn einer schweren und nicht zu schnellen Kugel – der Wurfparabel – oder zum Bogen eines Wasserstrahls am Brunnen kann eingesehen werden. Eine Überschau über diese Zusammenhänge mag mit Recht als “Verstehen” (etwa der Fallgesetze) angesprochen werden und die Nähe zu *epistēmē* ist deutlich: Physik ist wiederum System. So gesehen zeigt sich: Wagenscheins Lehrgänge sollen gar nicht die Natur explorieren, sondern das fachliche Verstehen durch einen entsprechenden Aneignungsprozess auch in der Persönlichkeit des Lerners “einwurzeln”¹⁵

Der Charakter von Überschau auf einem Gebiet des Erfahrungswissens ist anders als der einer systematischen Überschau. Ein guter Automechaniker zeichnet sich nicht vorrangig dadurch aus, dass er die Vielzahl der Teile und ihre Funktionen benennen oder beschreiben kann, sondern eher dadurch, dass er Öl- oder Abnutzungsspuren sucht und deutet, Geräusche, Lebensdauern oder Risiken angemessen ein-

¹⁵Wagenschein leiht sich dieses Bild bei Simon Weil: die naturwissenschaftliche Erkenntnissuche soll nicht unabhängig oder irgendwie außerhalb der sonstigen Lebenswirklichkeit des Lernenden stattfinden, sondern innerhalb derselben als sinnvoll Erlebtes.

schätzt, Probleme erkennt oder Lösungen findet, die nicht auf der Hand liegen. Ein "guter Arzt" zeichnet sich nicht primär durch Fachwissen, sondern durch diagnostisches oder handwerkliches Geschick aus, aber auch durch eine glückliche therapeutische Hand. Erfolgreiche naturwissenschaftliche Arbeitsgruppen sind nicht notwendig fachlich besser als andere, aber sie haben typischerweise spezifisches praktisches *know-how*, etwa Expertise im Umgang mit komplexen Geräten oder der Reduktion bzw. Interpretation von Daten, sie kennen die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Apparate oder Programme, sie kennen auch ihren Forschungsgegenstand so gut, dass neue Projekte eher an wichtigen oder erfolgversprechenden Stellen angesetzt werden.

Das tieferliegende Motiv, die Kompetenz, ist in diesen Fällen eine Art *Exzellenz in der Sache*, die durch die Arbeit an dieser Sache erworben worden ist. Diese "Beschäftigung mit etwas" entwickelt eine Art Organ, unter Umständen sogar eine Gewohnheit für die Anwendbarkeit der dabei verwendeten Techniken, Denkbewegungen und Gesichtspunkte – *phrónēsis*. Diese Entwicklung ist wohl noch kaum auf Bewusstsein von Methodik etc. oder der eigenen Rolle angewiesen. Wenn dieses Bewusstsein vorhanden ist, können weitergehende Fragen nach den Grenzen von Methode oder Systematik entstehen. Das Befragen von Zusammenhängen und die eigenständige Konzeptualisierung derselben sind dann Anwendungen von *nūs*. Die Frage nach einer Einwurzelung dieser Art Verstehens stellt sich offenbar dabei so gar nicht. Was "überschaut" wird, ist nicht vorrangig eine äußere Systematik, sondern bereits ein persönlich-biographischer Kontext von Erfahrung, Konzepten, Problemlösungsstrategien oder Fragerichtungen. Und damit lässt sich das erfahrungswissenschaftliche Lernproblem formulieren: Es gilt ebendiesen Kontext herzustellen.

"Verstehendes Wissen": Ein Kompetenzstrukturmodell für Erfahrungswissen?

Markus Rehm entwickelt in seinem Kompetenzmodell (Rehm, 2006) ein Komponentenmodell für eine Kompetenz "verstehendes Wissen", die er im Sinne eines Genetischen (i. e. genetisch-sokratisch-exemplarisches) Verstehen von Phänomenen und Fachbegriffen anlegt. Eine solche Orientierung ergänzt die Output-Orientierung konventioneller Standards und der gängigen Lesart von *scientific literacy* um die Perspektive auf das Subjekt, das diesen Output hervorbringen soll, bzw. dessen "Bildung". Er unterscheidet dafür vier Kompetenzstufen, die vier Fähigkeiten des erkennenden Subjektes entsprechen, sich zu einem Phänomen in Beziehung zu setzen (Abb. 7.5). Das Anliegen Rehms entwickelt sich dabei aus der Auseinandersetzung mit der Spannung zwischen dem eher ergebnisorientierten Blick auf naturwissenschaftliche Kompetenz vom Standpunkt der SL aus und der Orientierung an

“Prozessen” bzw. naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen (Shamos, 2002; Hammann, 2004) als Schritt “vom Prozessmodell zum Qualitätsmodell des Verstehens”. Diese Fähigkeiten sind prozessorientiert charakterisiert und schildern Stufen einer immer umfassenderen und differenzierten Auseinandersetzung zwischen erkennendem Subjekt und einem Phänomen.

Markus Rehm betont ausdrücklich eine “inhaltliche Vielfalt des Verstehens”, i. e. die (phänomenographisch belegte) Tatsache, dass Begriffe und Phänomene individuell auf jeweils charakteristische Weise verschieden und in unterschiedlich vielen Stufen verstanden werden. Eine differenzierte Untersuchung und Schilderung dieses Sachverhaltes findet sich wiederum in (Marton & Booth, 1997): Der Weg zum Verstehen ist einerseits ein diachroner Prozess und involviert andererseits verschiedene kognitive Modi (Abb. 7.6). Er bezieht die vier Modi des “Lernraums” (Abb. 7.6) im Sinne einer “Kohärenzprüfung” auf die vier Fähigkeitsstufen seines Modells. Zwar ist damit die strukturelle Kompatibilität der angenommenen Kompetenzstruktur mit einer empirisch gewonnenen Landschaft der Lernerfahrungen plausibel, doch bleibt die Frage, welche Art des Verstehens jeweils zugrunde gelegt wird.

Der Schlüsselbegriff des *verstehenden Wissens* integriert verschiedene Wissenstypen (Messner, Rumpf & Buck, 1997b; Buck & Müller [Rehm], 2002) oder -formen im Spannungsfeld zwischen mimetisch-symbolischem, lebenspraktischem und systematischem Naturwissen. Er ist dadurch charakterisiert, dass (etwas) nicht “nur gewusst” wird, sondern der Aneignungsprozess die dem Wissensinhalt zugrunde liegenden Entstehungs- und Wirkungszusammenhänge aufzuklären bestrebt ist (Messner & Rumpf, 1992). Verstehendes Wissen verlangt also (wie auch Genetisches Verstehen) einerseits ein persönliches Verhältnis zur Sache, andererseits eine möglichst umfassende *systematische* Übersicht. Wie bei Wagenschein geht es also nicht um Erfahrungswissen, also wirklich eigenständige und selbst zu verantwortende Interesse-, Urteils- und Handlungsfähigkeit.¹⁶ Die Anlage des Kompetenzmodells hin auf verstehendes Wissen überlagert die konsequent vollzogene “*first person perspective*” auf den Lernvorgang mit der Perspektive auf einen gleichsam in absoluten Koordinaten beschreibbaren Wissensraum – das Fachwissen, das auch in den für verstehendes Wissen konstruierten Testaufgaben den Hintergrund für die Problematisierungsprozesse und Diskussionen bildet. Während Martons Lernraum die Entscheidung, mit welcher Sorte Erkenntnisprozess man es zu tun hat und welche dianoetischen Tugenden involviert werden, (auch aufgrund einer gewissen begrifflichen Unschärfe) nicht präjudiziert, impliziert das Ideal der Übersicht ein Primat von *epistēmē*, von spekulativ-analytischen Denkbewegungen im Sinne von Abschnitt 7.

¹⁶Wie schon oben bemerkt, wird Physik bei Wagenschein etwa in (Wagenschein, 1962) explizit vor dem Hintergrund einer geschlossenen Fachsystematik verhandelt, die exemplarisch zur Geltung gebracht werden soll.

Mit anderen Worten: wir sind noch nicht bei einem wirklichen Paradigmenwechsel angekommen.

Primat der Methodik vs. “Kunst der Untersuchung”

Es sollte soweit exemplarisch deutlich geworden sein, dass sich dianoetische Tugenden innerhalb realer Lehr-Lern-Situationen im Kontext moderner Physikausbildung als Kategorien konkreter Erkenntnisschritte wiederfinden lassen. Doch wird auch spürbar, dass es nicht leicht ist, ihnen innerhalb des typischen zeitgenössischen Verständnisses von Physik oder Physiklernen eine klare epistemische Rolle zuzuweisen oder entsprechende lerntheoretische Konstrukte anzugeben – ist *nūs* so etwas wie “Verstehen” und was würde das denn heißen? Der Grund für die Schwierigkeit, die persönlichen Erkenntnisprozesse, in denen sich dianoetische Tugenden aussprechen, zu verorten, wird in (Holt, 2002) allerdings klar in den Blick genommen: Das moderne Verständnis von Wissenschaftlichkeit definiert sich idealerweise *gerade nicht* durch moralische oder intellektuelle Autorität oder gesellschaftliche Rolle des Wissenschaftlers, sondern durch die Referenz auf eine entsprechende Methodik samt einer entsprechenden Fachsystematik, einschließlich der Fachsprache. Hier ist nicht die Stelle, diese Position grundsätzlich zu kritisieren (was in (Holt, 2002) durchaus geschieht), aber es entstehen Fragen: Muss dieses Verständnis von Wissenschaftlichkeit auch für die Ausbildung leitend sein oder ist es unter Umständen hinderlich?¹⁷

Epistemisch heißt der Fokus auf Systematik und Methodik die Frage nach propositional organisierten Inhalten, entsprechenden mentalen Repräsentationen und deren kanonisches Beziehungsgeflecht. Auf dem Gebiet der abwägenden Reflexion greifen diese Werkzeuge jedoch nur bedingt – propositionale Strukturen sind nicht mehr Referenzpunkte, von denen ausgehend wir den Status des Lernenden beschreiben könnten. Sie interessieren auch als solche gar nicht vorrangig – wir interessieren uns für den Prozess des Lernenden, in dem er diese Fixpunkte hinter sich lässt oder aufhebt. Die Beschreibung des Erwerbs von fachbezogenem Erfahrungswissen als kognitivem Prozess wird also nicht vor dem Hintergrund einer stabilen propositionalen Struktur geschehen können, sondern mit Blick auf Erkenntnisdispositionen und auf die Frage, ob mögliche, fachtypische und -relevante Begriffsbildungen oder Denkbewegungen auch realisiert werden. Das entsprechende Lernproblem besteht so gesehen darin, ob der fachtypische Aneignungsprozess gelingt, ob “die Kunst der physikalischen Untersuchung” gelernt wird – und genau darauf stellen eine Reihe

¹⁷So setzt etwa Wagenscheins Forderung nach exemplarischen Arbeiten gerade am Primat der Systematik an – und bleibt solange unwirksam, wie an diesem Primat festgehalten wird. Dass Wagenschein die Physik und auch exemplarisches Arbeiten selbst immer im Rahmen einer anzustrebenden, übergeordneten Fachsystematik denkt (vgl. (Wagenschein, 1953, S. 17 ff.) oder (Wagenschein, 1999a, S. 7 ff.)), ist an dieser Stelle dann schon belanglos.

der gängigen fachspezifischer Kompetenzen auch ab!

Es ist klar, dass der lerntheoretische Rahmen diese Fragerichtung widerspiegeln muss. An scheinbar nah verwandten Themen leben bei den Studenten in den beiden geschilderten Experimentier-Projekten nicht nur zwei sehr verschiedene “Erkenntniskonfigurationen” oder “Erfahrungsd dispositionen”, oder, in der Ausdrucksweise von Marton und Booth, zwei sehr verschiedene Formen von *awareness*. Sie unterscheiden sich auch dadurch, dass die Erfahrung am Experiment im ersten Fall innerhalb *einer* bestimmten Konfiguration steht (und auch stehen soll), während sich die *awareness* der Teilnehmer am zweiten Projekt verschiebt, verändert (und auch verändern soll). Somit geht es bei einer “Kunst der Untersuchung” ähnlich wie beim didaktischen Umgang mit “Schülervorstellungen” und “Konzeptwechsel” um Änderungen der Konzeptualisierung des Lerners. Das Kriterium für Erfolg ist aber nicht ein Erreichen oder Nicht-Erreichen eines Wissenskanons, Bestehen oder Nicht-Bestehen einer bestimmten Form von *awareness*, sondern die Qualität eines autonomen, selbstkonzipierten Prozesses, der Wissensbestand und *awareness* verändert. Die Untersuchung der Studenten im genetischen Lehrgang wird zu einer *physikalischen* Untersuchung,

- indem der lebensweltliche Vorgang zum quantitativen, wissenschaftlichen Vorgang wird, der in fachtypischen Begriffen und Beziehungen formalisiert werden kann, und
- eine systematisch adäquate Struktur gesucht und formuliert wird
- und diese wiederum – und zwar u. U. durchaus spannungsvoll – auf die bisher gemachten und in Zukunft zu machenden Erfahrungen bezogen wird.

Wir sehen drei charakteristische, der Fachdidaktik durchaus vertraute Stufen oder Phasen eines individuellen Aneignungsprozesses von Erfahrungswissen charakterisiert: eine erste “Problematisierungsphase” (in der die lebensweltliche Erfahrung zum Fachproblem wird), eine “Orientierungs- und Verortungsphase” (in der das Fachproblem seinen – eventuell noch zu schaffenden – systematischen Platz erhält) und eine “Etablierungsphase” (in der das in der zweiten Phase erreichte Verständnis zu anderem Erfahrungswissen und neuen Erfahrungen in Beziehung gesetzt wird – und sich bewährt, relativiert etc.). Dabei weist letztere über die unmittelbare Auseinandersetzung mit der Experimentier-/Erfahrungssituation hinaus.

Ausblick auf eine erfahrungswissenschaftliche Naturwissenschaftsdidaktik

Ganz offenbar ist es uns Menschen möglich (und vermutlich auch fruchtbar, ja vielleicht sogar nötig), jenseits von bloß reproduzierend Angeeignetem auch persön-

liches und genuines “Wissen” zu *lernen*, und wir können mit Aristoteles auch in aller Kürze sagen, wie das funktioniert: Durch Anwendung generischer kognitiver Fähigkeiten, entweder von *epistēmē* (etwa gegenüber Mathematik) oder aber durch Anwendung von *phrónēsis* und *nūs* (etwa in den Naturwissenschaften). Die klassischen Ein-Wort-Übersetzungen für diese Fähigkeiten, “Wissen”, “Besonnenheit”, “Vernunft” etc., befriedigen dabei (ähnlich wie bei *awareness*) nicht wirklich. Umschreibungen könnten lauten

<i>epistēmē</i>	klar einsehen, analytisch durchschauen
<i>phrónēsis</i>	etwas als “Fall von X” nehmen, mit Zielblick einordnen
<i>nūs</i>	auf den Punkt bringen, das Wesentliche “einfangen”,

und die Frage, welche deutschen Ausdrücke hier treffen, mag noch offen bleiben. Wir schauen dabei auf kognitive Aktivitäten, die sich weder auf bestimmte Tätigkeiten (Experimentieren, Lösen von Rechen- oder Verständnisaufgaben etc.) beschränken noch auf bestimmte Funktionen festlegen lassen, sondern als Evidenz-stiftend in konkreten – und das heißt auch: individuellen – Erkenntnismomenten aufscheinen. Der fachliche und auch der erzieherische Wert solcher Momente ist offensichtlich.

Diese Liste intellektueller Tugenden besteht aus i. A. positiv belegten Erkenntnismomenten und auf den ersten Blick scheint es unproblematisch, dieselben innerhalb der Fachdidaktik als Gesichtspunkte einzubeziehen. Ein wesentlicher Punkt beim Herausarbeiten der Rolle dieser Fähigkeiten für das individuelle Erkennen war allerdings die Einsicht, dass es zwei konkurrierende, echt verschiedene Erkenntnismodi gibt – spekulativ-analytisches Denken und abwägende Reflexion – und ersterer für Naturwissenschaft als Lehrgebäude, zweiterer für Naturwissenschaft als Erkenntnisfeld anzuwenden ist. Das gängige Verständnis von “Kompetenz” impliziert eindeutig Fähigkeiten mit beiden Seiten der Naturwissenschaft, also einerseits *epistēmē* für den Umgang mit Denk-Wissen¹⁸ und andererseits *phrónēsis* und *nūs* für den Umgang mit Erfahrungswissen¹⁹. Hier besteht offenbar weiter Bedarf nach theoretischer Auseinandersetzung – zu der dieser Text beitragen möchte.

¹⁸Etwa das Verfügen über ein strukturiertes fachliches Basiswissen bzw. Wissen über Grundprinzipien, die korrekte Beherrschung der Fachsprache und das Verfügen über Metawissen zur Methodik der Physik (EPA, 1989/2004, S. 3 f).

¹⁹Etwa Erfahrungen mit Strategien zur Erkenntnisgewinnung und zur Generierung/Strukturierung von Fachwissen, diskursivem Argumentieren oder die Möglichkeit, differenziert zu gesellschaftlichen, sozialen oder technischen Implikationen und Fragen der Physik Stellung zu beziehen (EPA, 1989/2004, S. 3 f).

Die fachdidaktisch entscheidende Frage ist jedoch analog zu der, die Menon gestellt hatte: "Wie lässt sich ein Gebiet von Erfahrungswissen *lehren*?" Die hier vertretene Antwort ist "Durch Ausbildung der entsprechenden Erkenntnistugenden!". Wir zielen damit auf die Selbstständigkeit der Lerner und rechnen mit deren individuellen Möglichkeiten und Lernbiographien. Die Frage nach der Rolle von Erkenntnistugenden in der Unterrichtsgestaltung kann helfen, klare(re) Gesichtspunkte dafür zu bekommen, welche Ziele und Methoden in konkrete Unterrichtsgestaltung einbezogen werden sollen. Offenbar setzt der Erwerb von Erfahrungswissen auch ein geeignetes Angebot an zu machender Erfahrung voraus, was ein Hinweis auf eine Sonderrolle des Experimentierens ist. Wie bereits erwähnt, lässt sich durchaus vertreten, dass mit dem Experimentieren der Schüler der Erwerb wesentlicher naturwissenschaftlicher Kompetenzen verbunden ist (Hammann, 2004) und es ist zumindest plausibel, dass auch Anwendung und Ausbildung von Erkenntnistugenden dabei geübt wird.

Einen Schritt weiter führt dann, die sich abzeichnende Gliederung des Aneignens von Erfahrungswissen in charakterisierbare Phasen ernst zu nehmen. Die bei Wagenschein oft zu findende Dramaturgie "Problematisierung – Orientierung – Etablierung" oder Martons Folge von "*acquiring – knowing – making use of*" bezeichnen didaktisch-methodisch zu unterscheidende "Räume", in denen Erfahrung zunehmend differenziert und auch internalisiert werden kann und soll. Eine naheliegende didaktische Folgerung daraus ist es, diese Räume auch bewusst zu schaffen, einzuräumen. Genau das wird typischerweise im phänomenologisch orientierten naturwissenschaftlichen Unterricht an Waldorfschulen praktiziert, wobei dort der Prozess jeweils möglichst zwei aufeinanderfolgende Unterrichtstage einbezieht – eine Praxis, die auch unter modernen erkenntnispsychologischen Gesichtspunkten und unter dem Gesichtspunkt der Schlafrorschung Sinn macht (Grebe, 2008). Für den Chemieunterricht verfolgte eine empirische Untersuchung über die Anwendung der ikonologischen Erkenntnismethode Erwin Panofskis (die eine analoge Dreistufigkeit aufweist) eine ähnliche Richtung und konnte jüngst ein signifikant positiveres Bild der Chemie, eine positivere Unterrichtsbeschreibung und signifikant bessere Ergebnisse in Wissens-, Kompetenz- und (bezüglich Anwendungs- und Kontextorientierung) erweiterten Test nachweisen (Kuchnowski, 2008). Ein dokumentiertes Fallbeispiel einer an Wagenschein orientierten Unterrichtspraxis zum Themenkomplex Barometer/Luftdruck findet sich in (Aeschlimann, 1997). Peter Gasser analysiert in seinem "didaktischen Kommentar" (Gasser, 1997) die Arbeitsformen der 16 beschriebenen Schullektionen und zeigt daran ebenfalls die charakteristische, aus Unterrichtsgang und der Sache entstehende Dreiphasigkeit des Lehrgangs auf. Es ist offensichtlich, dass sich hier ein weites Feld für die Ausarbeitung und den Austausch von praktischen Vorschlägen und Erfahrungen, aber auch für den Einbezug kognitionspsychologischer Aspekte öffnet.

Solche Gesichtspunkte lassen sich zwanglos in einem entsprechend weit gefassten methodischen Rahmen verorten und die Handhabung des Lehrens von Erfahrungswissen erscheint dann etwa als Kapitel innerhalb des Bestandes an professionellem *pedagogical content knowledge* (PCK, (Shulman, 2004)) etc. Probleme entstehen allerdings, wenn angehende Lehrer das Erlebnis von *phrónēsis* und *nūs*, von Evidenz im Angesicht von genuinen Erfahrungen weder in ihrer Schulzeit noch innerhalb ihrer Berufsausbildung kennenlernen. Tatsächlich zeigen unsere Erfahrungen mit entsprechenden Angeboten als "berufsfeldbezogenes Modul", dass dies im Moment wohl eher der Normalfall ist. So entsteht auf allen Stufen der Ausbildung Bedarf für eine Erweiterung des naturwissenschaftlichen Selbstverständnisses über Beherrschung der Fachsystematik und kanonischer Methoden hinaus. Diese Erweiterung müsste sich als Freiraum für die Entwicklung *individueller* Erkenntnisfähigkeiten verstehen und würde Naturwissenschaft als Lehrgebäude nicht aufheben, sondern ergänzen. Wie gezeigt, gibt es lerntheoretische Werkzeuge, die eine solche Entwicklung abbilden und der fachdidaktischen Beschreibung bzw. Diskussion zugänglich machen können. Leitend könnte dabei eines der *Worte am Rande* von Emil Nolde sein, das wahrscheinlich auch als Motto für eine weitere Differenzierung des Kompetenzbegriffs konsensfähig wäre: "Das Beste am Kunstwerk ist das Ungelernte".

Fokus des Subjekts	Fähigkeit	Beschreibung der Fähigkeit
Phänomen	Fragwürdigkeit erkennen: Ein Phänomen als fragwürdig erkennen können.	Das Subjekt erfasst/erkennt ein Phänomen, das es in der Welt ent- deckt bzw. das ihm dargeboten wird, als fragwürdig (Aporie, Problem, rätselhafter Zusammenhang...)
Subjekt ↔ Phänomen	Beziehung stiften: Eine Beziehung zum Phänomen aufbauen können.	Das Subjekt schreibt dem Phänomen eine Bedeutung für sich selbst zu und baut hierdurch eine Beziehung zu diesem Phänomen auf.
Subjekt	Sinn stiften: Sinn konstruieren können.	In einem aktiven Konstruktionsprozess entwickelt das Subjekt einen Sinnzusammenhang zwischen sich und dem Phänomen bzw. das Subjekt ist in der Lage, die Bedeutung des Phänomens für sich selbst in beste- hende Sinnzusammenhänge einzu- ordnen und diese damit zu erweitern.
Subjekt und Phänomen in der Welt	Verstehen: Das Subjekt versteht das Phänomen.	Das Subjekt kann die Fragwürdigkeit des Phänomen erhellen bzw. erklären, indem es das Phänomen in die/in seine Welt einordnen kann. Es stellt eine Beziehung zwischen sich, dem Phänomen in der Welt her und baut hierdurch neue Strukturen auf.

Abbildung 7.5.: Tabellarische Darstellung der Fähigkeiten, die Rehms Kompetenzmodell für “verstehendes Wissen” konstituieren.

	acquiring	knowing	making use of
committing to memory (words (items))	memorizing words (items)	remembering words (items)	reproducing words (items)
committing to memory (meaning)	memorizing meaning	remembering meaning	reproducing meaning
understanding (meaning)	gaining understanding	having understanding	<i>being able</i> to do something, to do something differently, to do something different
understanding (phenomenon)	gaining understanding	having understanding	relating

Abbildung 7.6.: Der “erfahrbare Lernraum” (*outcome space of learning*): Matrixdarstellung der tatsächlich stattfindenden kognitiven Aktivitäten und Fähigkeiten, aufgeschlüsselt nach Phasen und Modi des Lernens nach Marton (Marton & Booth, 1997, Kapitel 3).

Teil II.

Expeditionen in die Physik

8. Wie kinematisch ist die Lichtgeschwindigkeit?

*Die Lichtgeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes und anderer elektromagnetischer Wellen. Sie hat im Vakuum einen Wert von 299.792.458 m/s, also knapp 300.000 km/s oder etwas mehr als eine Milliarde km/h (1.079.252.849 km/h) und trägt als physikalisches Symbol den Buchstaben c (lat. *celeritas* zu dt. *Schnelligkeit*). Die heute angenommene Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist eines der grundlegenden physikalischen Prinzipien.*

Online-Enzyklopädie *Wikipedia* (*Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*, o. J.) zum Stichwort “Lichtgeschwindigkeit”

Was sagt die erscheinungsorientierte Optik zur Lichtgeschwindigkeit? Kann man gegenüber Experimenten zur Lichtgeschwindigkeit am Verzicht auf die Vorstellung von “Licht als Transportvorgang” festhalten, oder ist dieser Verzicht nicht doch ein recht künstliches Projekt von eingeschränkter Geltung? Die Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit spielt in so vielen Argumenten auf ganz verschiedenen physikalischen Gebieten und in der “populären Physik” bis hin zur *science fiction* eine so zentrale Rolle, dass man den Eindruck haben kann: Unsere gewohnte Art über Physik nachzudenken, *fordert eigentlich ein sich bewegendes Licht*. – Auf der Suche nach Antworten auf die oben gestellten Fragen werden Probleme und Gesichtspunkte sichtbar, die uns Experimente zur Lichtgeschwindigkeit neu und besser verstehen lassen, und zugleich den ursprünglichen Fragehorizont verschieben. Ich will im Folgenden zeigen, wie sich ein klassisches und auch typisches Experiment zur Lichtgeschwindigkeit in den Kontext erscheinungsorientierter Optik einordnen lässt, und welche Lesart der Lichtgeschwindigkeit dabei möglich ist. Es wird nicht ein Teilgebiet der Optik erscheinungsorientiert abgehandelt, sondern wir arbeiten mit Spiegeln und Linsen innerhalb eines einigermaßen komplexen optischen Aufbaus im Sinne einer “Optik der Bilder”. Dies ist auch eine Gelegenheit, das Thema nach einer ersten Publikation vor zwei Jahren (Theilmann & Maier, 2004) noch einmal anders und unter Einbezug dessen, was ich heute daran anders oder besser verstehe, zu diskutieren.

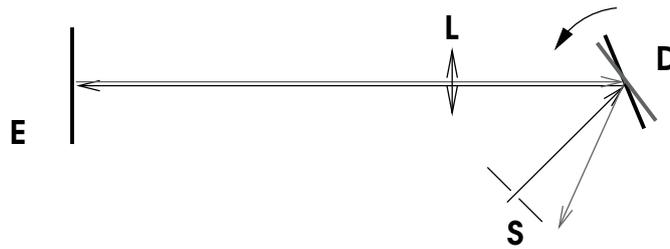


Abbildung 8.1.: Die Grundidee des Experimentes: der Drehspiegel D rotiert mit hoher Geschwindigkeit; von S her “eingestrahktes” und am Spiegel E reflektiertes Licht (grau) findet auf seinem Rückweg den Spiegel D ein Stückchen weiter gedreht und geht nicht den gleichen Weg zurück, den es gekommen ist. Kennt man die Drehgeschwindigkeit, den Ablenkwinkel und die Strecken, kann man die Zeit bestimmen, die das Licht von D nach E und wieder zurück gebraucht hat – und damit die Lichtgeschwindigkeit! Allerdings ist noch eine Linse L im Spiel, warum? Und die Aufstellungsgeometrie ist nicht frei: Der Abstand D–E entspricht der doppelten Linsenbrennweite, die Abstände S–D und D–L entsprechen jeweils der einfachen Brennweite.

Auf der Lichtrennbahn

Die Bewegung des Lichtes mit der Geschwindigkeit c darzustellen, ist aus den genannten prinzipiellen Gründen ein möglicher kleiner Höhepunkt im Unterricht für Oberstufenschüler oder Studenten der ersten Semester. Ein klassisches Experiment dazu ist die Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Michelson-Foucault, die “Drehspiegelmethode”. Die Grundidee ist ebenso einfach wie pfiffig (vgl. Schema in Abbildung 8.1): man projiziert einen hellen Spalt S über einen Spiegel, der auf einem Motor sitzt (“Drehspiegel D”) und über eine Linse L auf einen zweiten Spiegel (“Endspiegel E”). Man richtet – zunächst bei stehendem Drehspiegel – das Experiment so ein, dass das helle Bild des Spaltes an E gespiegelt wird, zurück auf D fällt und als heller Strich auf einer Skala beobachtet wird. Rotiert dann der Drehspiegel, so ändert sich der Ort des Strichs auf der Skala. Die Deutung scheint zwingend: Das Hin-und-Her des Lichtes zwischen den beiden Spiegeln dauert einen Moment, der Drehspiegel hat sich inzwischen ein wenig weitergedreht und das zurückkehrende Licht wird von ihm in eine etwas andere Richtung gelenkt! Ein sorgfältig gemachtes Schulexperiment liefert den Zahlenwert von c damit auf wenige Prozent genau. *Und es bewegt sich doch...*

Andererseits: Einen unabhängigen Nachweis einer äusserlich-räumlichen Bewegung von Licht in einem strengen Sinn haben wir damit noch nicht. Wenn von einem “Zurücklegen des Weges” zwischen Spiegeln die Rede ist, wird ein Etwas, das sich da bewegt, schon mitgedacht. Wir stehen dem Konzept nach wie an einer Rennbahn und schauen auf einen Bewegungsvorgang zwischen zwei Orten A und B. Aber diese

Seitenansicht einer Bewegung ist in der Optik generell und auch an unserem Drehspiegelexperiment nicht zu haben – wir beschäftigen uns mit der Geschwindigkeit einer *vorgestellten Bewegung* des Lichtes, die mit dem Versuchsergebnis verträglich ist. Oder anders gesagt: wir stellen fest, wie schnell der vorgestellte Transportvorgang verlaufen müsste, um das beobachtete Resultat zu erklären.

Was dieser Transport eigentlich ist, bleibt also offen, ebenso wie zahlreiche Details des Vorgangs. So überzeugend der erste Blick auf das Experiment eine Lichtbewegung nahelegt, die Sache kompliziert sich, wenn wir anfangen, uns den Bewegungsvorgang im Detail auszumalen. Wie ist das zum Beispiel *genau*: Die Bewegung des Drehspiegels wird das gerade einfallende Licht in ein divergent propagierendes Etwas transformieren – was passiert dann unterwegs an der Linse und dem Endspiegel? Haben wir es mit infinitesimalen oder mit ausgedehnten Lichtportionen zu tun? Wie ordnet sich das alles in die Vorstellungswelt der klassischen Optik ein? Oder: warum erspart mir auch die Verwendung eines Lasers als Lichtquelle nicht, die Linse L im Aufbau zu haben, wo muss sie stehen und warum kommt es bei dieser Linse auf einen grossen Querschnitt an?

Das Unbehagen, das gegenüber solchen Fragen auftauchen kann, hat seine Entsprechung im Unbehagen gegenüber den nicht unerheblichen praktischen Schwierigkeiten beim Aufbau des Experimentes. Wir merken, wir schlagen uns mit Problemen herum, um die es uns ursprünglich gar nicht gegangen war. Der Wert des Drehspiegelexperimentes ist es, auf zumindest scheinbar recht anschauliche Art einen quantitativen Versuch zur Bewegung des Lichtes zu ermöglichen. Man schaut sich den Versuch nicht an, um tiefsinnig-begriffliche Fragestellungen zur “Natur des Lichts” oder zur Kinematik des Vorgangs aufzuwerfen. Die Überzeugung, *dass* Licht sich bewegt, war schon Voraussetzung dafür, sich das Experiment auszudenken. Nicht nur im Demonstrationsexperiment dominiert der *affirmative Charakter* des Versuchs (vgl. (Theilmann, 2003)). Die Versuchsidee selbst entsteht von vorneherein aus der Frage, “wie schnell” sich Licht bewegt, nicht “ob”: Wir bestätigen uns die gewohnte Art, Licht kinematisch zu denken. Wenn ich die gar nicht voraussetzen möchte, muss ich für ein Verständnis des Versuchsgeschehens auch auf die Vorstellung flitzender Lichtportionen verzichten und mich stattdessen z. B. fragen, wie denn – das heisst *durch welche optische Abbildung* – der helle Strich auf die Skala kommt. Doch damit sind wir bei der Frage, was denn das Experiment als *optischer* Versuch ist.

Licht geht auf die Reise. . .

Was so konzeptionell geradlinig klingt, war im Beginn der Arbeit zu diesem Thema ein langsamer, mühsamer, schrittweiser Prozess. In (Theilmann & Maier, 2004) fin-

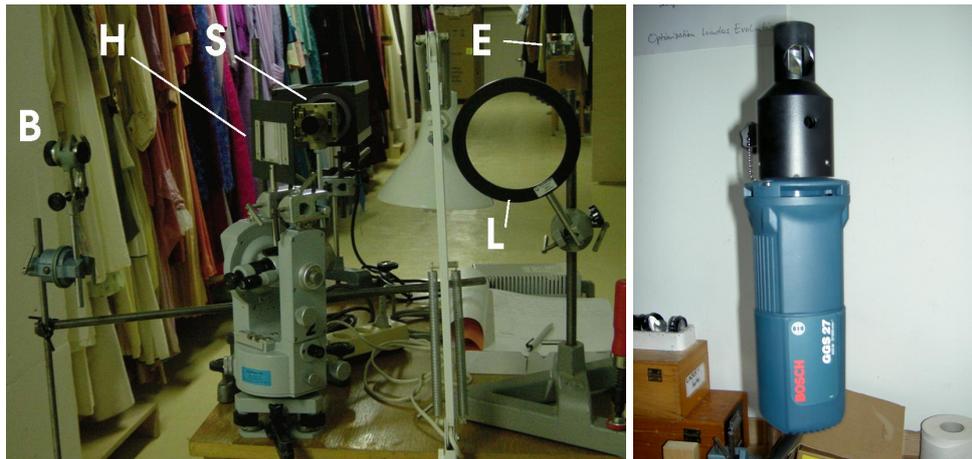


Abbildung 8.2.: Der in (Theilmann & Maier, 2004) beschriebene Aufbau zur Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Drehspiegelmethode: Im linken Bild sieht man in der Mitte einen Spalt S, der von der Metalldampfampe dahinter ausgeleuchtet wird; das Licht fällt von dort auf den Drehspiegel D (rechtes Bild), der etwa 4 Meter hinter dem Photographen des linken Bildes vorzustellen ist. Im linken Bild erkennt man ausserdem auf der rechten Seite die Linse L und, ca. 10 Meter weiter entfernt, den Endspiegel E. Im Vordergrund ist auf einem Theodoliten ein halbdurchlässiger Spiegel H montiert. Er ist so aufgestellt, dass ein Teil des durch E reflektierten, “zurücklaufenden” Lichtes auf ein Okular mit Längenskala zur Beobachtung des Spaltbildes (B) gespiegelt wird. Der Aufbau steht in einem Kostümfundus, einem ruhigen Ort mit genügend Platz für die erheblichen “Laufstrecken”...

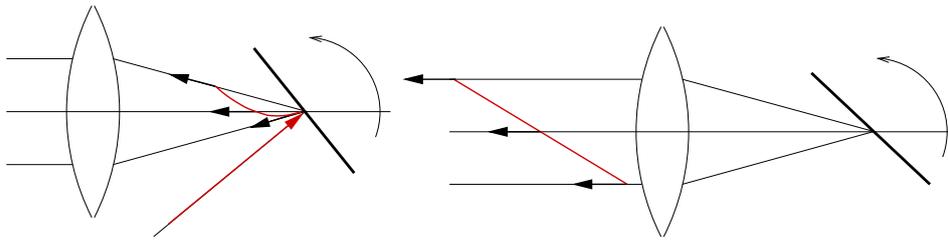


Abbildung 8.3.: Skizzen zum vorgestellten Abprallen des Lichtes am Drehspiegel: Der Drehspiegel fächert das einfallende Licht auf (links), nach dem Durchgang durch die Linse sind seitlich versetzte Lichtportionen auf parallelen Wegen unterwegs (rechts)

det sich eine relativ ausführliche Darstellung zum Aufbau (vgl. Abb. 8.2) und wie man ihn in seinen optischen Eigenschaften kennenlernen kann. Dies soll hier in abgewandelter Form und dabei so wiederholt werden, dass eine Art Eingewöhnung in die optische Lesart des Versuchs möglich wird. Verfolgen wir dazu zunächst noch einmal auf kinematische Art die oben angerissene Frage – wie kann man auch für drehenden Drehspiegel das Zustandekommen eines ruhenden Spaltbildes am Beobachterstandort B verstehen?

Versuchen wir eine Erklärung, die die Grundidee sich bewegenden Lichtes konsequent anwendet: Wir stellen uns vor, die Beleuchtung besteht aus einem kontinuierlichen, schmalen und parallelen Lichtbündel, also etwa einem Laser. “Das Licht” (was auch immer das ist) propagiert parallel und in einem kleinen Querschnitt mit der Geschwindigkeit c und fällt so auf den Drehspiegel (Bild 8.3 links). Der rotierende Drehspiegel reflektiert das einfallende Licht in jedem Moment in eine andere Richtung, die parallele Bewegung transformiert sich also durch die Reflektion in eine divergente Bewegung, deren Zentrum der Drehspiegel D ist. Das reflektierte Licht bewegt sich mit Geschwindigkeit c weiter, jetzt allerdings radial, das Bündel formt eine Art Ausschnitt einer Spirale und die Spiralkurven ziehen sich auseinander.

Ein Teil der fächerförmigen Trajektorien des Lichtes wird auf die Linse L treffen. Deren Wirkung auf das einfallende Licht ist klar: der Drehspiegel steht im Brennpunkt der Linse, das einfallende Licht wird also so umgelenkt, dass es nun auf parallelen Bahnen weiterpropagiert (Bild 8.3 rechts). So fällt es nach dem zweiten, grösseren Teil der Laufstrecke auf den Endspiegel E . Nun ist auch klar, wie es weitergeht: Sofern dieser Spiegel genau senkrecht zu den Lichtbahnen steht, geht die Reise auf denselben Wegen zurück bis zur Linse, die das Licht wieder auf den Drehspiegel bündelt.

Es funktioniert!

Was geschieht nun am Drehspiegel mit dem zurückkehrenden Licht? Wieder wird das auf den Drehspiegel zurückfallende Licht in jedem Moment den Drehspiegel in einer anderen Stellung finden. Und: Das zurückfallende Licht kommt ausserdem von der Linse her in jedem Moment selbst aus einer anderen Richtung! Für einen ortsfesten Leuchtfleck nach der zweiten Reflektion am Drehspiegel kommt es darauf an, dass sich dennoch nur eine einzige Ausfallsrichtung ergibt. Dass dem so ist, können wir uns klar machen, indem wir uns überlegen, dass die Reise vom Drehspiegel zum Endspiegel und zurück eine einzige feste Zeitspanne " $\tau = d/c$ " braucht, egal unter welcher Richtung sich unser kinematisches Licht auf die Reise gemacht hat. Denn die Aufstellung des Drehspiegels im Brennpunkt der Linse heisst, dass die *optische Weglänge* d vom Drehspiegel über die Linse zum Endspiegel und zurück für alle möglichen optischen Wege gleich ist!

Mit anderen Worten: Das von E zurückfallende Licht folgt nach unserer Konstruktion nicht nur denselben Wegen, die es auf dem Hinweg genommen hat, sondern es trifft auch aus den verschiedenen Richtungen immer um dieselbe Zeit τ nach der ersten Reflektion wieder am Drehspiegel ein, sozusagen "in derselben Reihenfolge". Es ergibt sich damit wieder eine einheitliche Ausfallsrichtung für das Licht – wenn ω die Drehgeschwindigkeit des Drehspiegels ist, ist diese Richtung nach der zweiten Reflektion am Drehspiegel um $\alpha = 2\omega\tau$ gegen die "Einfallrichtung", also die Richtung vom Drehspiegel zum Laser, verschoben.

Diese kinematische Argumentation liefert also das erhoffte Ergebnis und auch einige zusätzliche Antworten, etwa zur Rolle der Linse L im Aufbau. Es wurde plausibel, weshalb der Drehspiegel im Brennpunkt der Linse platziert wird und auch, warum für diese Linse ein grosser Querschnitt wünschenswert ist. Keineswegs klar ist aber, warum der Endspiegel und die Lichtquelle jeweils im Abstand "doppelte Brennweite" von der Linse entfernt stehen. Mit solchen Erwägungen haben wir uns auch schon ein wenig von der gerade in der Einfachheit des Gedankens liegenden Schlagkraft der Grundidee entfernt: Sich genauer vorzustellen, wie sich Licht als "Etwas" durch die Lichtrennbahn bewegt, erzeugt "Klärungsbedarf". Gerade die divergenten und konvergenten Teile des Weges fordern eigentlich noch genauere Darstellung. Haben wir eine Art kontinuierliches Lichtband, also ein *Feld*, haben wir einen örtlich begrenzten Partikelstrom? Die zweite Vorstellung ist uns vielleicht sympathischer, weil sie näher am kinematischen Charakter des Arguments ist, aber man merkt auch, dass man sich darüber den Reflexionsvorgang am Drehspiegel nicht zu mechanisch vorstellen darf, weil sonst "Drall" oder zusätzliche seitliche Geschwindigkeitskomponenten zum Thema werden. Noch gar nicht berührt ist die Fragwürdigkeit der Vorstellung einer definierten Trajektorie des Lichtes durch den Aufbau, die schon in der klassischen Optik nicht trägt. Und wie würde mit einem sol-

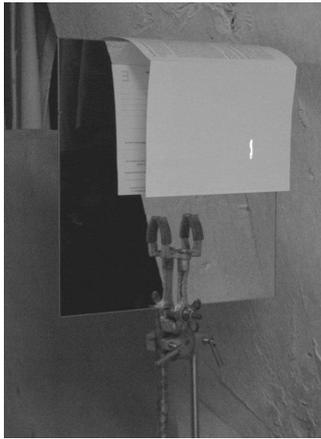


Abbildung 8.4.: Darstellung des reellen Bildes der Lichtquelle (hier eines beleuchteten Spaltes) auf einem Blatt Papier am Ort des Endspiegels.

chen Argument ein Aufbau verständlich, der nicht einen Laser, sondern eine Lampe mit vorgesetztem Spalt als Lichtquelle verwendet, die selbst schon divergentes Licht “aussendet”?

Was sieht man durch die Linse?

Selbst für Menschen, die Georg Maiers “Optik der Bilder” (Maier, 1993c) kennen, ist es vermutlich ungewohnt, komplexere Abbildungen und Linsenwirkungen anhand der Durchsicht eines Aufbaus zu bedenken. Gerade dafür bietet aber der grossräumige Aufbau des Drehspiegelexperimentes Gelegenheit, man kann buchstäblich darin spazieren gehen und kennenlernen, was wo wie zu sehen ist. Schon das Einrichten des Versuchs zwingt einen, anders mit den Elementen des Aufbaus umzugehen als sie lediglich als Stationen des kinematischen Vorgangs zu sehen. Der Ort des Drehspiegels entscheidet sich vielleicht anhand “mechanischer” Kriterien: Wo und wie kann er so zuverlässig befestigt werden, dass er auch unter voller Drehzahl nur wenig vibriert und eine befriedigende Abbildung des Leuchtflecks am Beobachterstandort zustandekommt? Linse und Lichtquelle werden dann entsprechend eingerichtet, und zwar so, dass auf dem Endspiegel ein *reelles Bild* entsteht (Bild 8.4), das durch eine Abbildung mittels der Linse L mit “Bildweite = Gegenstandsweite = doppelte Brennweite” vermittelt wird.

Die Justierung des Endspiegels besteht darin, ihn so auszurichten, dass das reflektierte reelle Bild wiederum – in diesem Abstand allerdings nicht als scharfes Bild, sondern als unscharfer heller Fleck! – auf den Drehspiegel fällt. Dieses Kriterium ist wohl unmittelbar plausibel und wir erkennen das “Rückwegmotiv” wieder, das wir oben verfolgt haben. Wenn sonst “alles richtig gemacht wurde” (Einrichtung halbdurchlässiger Spiegel, Skala, evtl. Okular...), erscheint damit “*das Bild des reellen*

Bildes” als Leuchtmarke auf der Skala. Die Leuchtmarke ist umso heller, je weniger divergent die Lampe den abgebildeten Spalt ausleuchtet.

An dieser Stelle ist verständlich, wie für eine bestimmte Stellung des Drehspiegels eine beobachtbare Abbildung der Lampe auf der Skala zustandekommt. Doch wieso bleibt die Leuchtmarke auch für andere Stellungen des Drehspiegels sichtbar und sogar ortsfest? Hier bringt der Blick vom Endspiegel zur Linse eine überraschende Einsicht (Abbildung 8.5): Die Linse liefert eine Ansicht des Drehspiegels, die jede unserer seitlichen Bewegungen mitmacht. Auf Seite 80 ff. in (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006) erklärt Georg Maier die Erscheinung der *Parallaxe* – die Verschiebung der Gegenstände in einer Ansicht unter seitlicher Bewegung gibt Aufschluss darüber, wie weit sie entfernt sind, sie verändern ihren Platz im Blickfeld umso weniger, je weiter weg sie sind. Die Linse liefert mit anderen Worten also eine Ansicht des Drehspiegels, als ob dieser *unendlich weit weg* (und dennoch recht gross zu sehen) wäre. Wir haben oben die Leuchtmarke als reelle Abbildung des – ebenfalls reellen – Spaltbildes auf dem Endspiegel verstanden. Vorsichtiges Drehen am Drehspiegel zeigt einem, wie dieses erste Spaltbild (Abb. 8.4) über den Endspiegel wandert. Nun können wir uns klarmachen, dass die oben beschriebene Justierung des Endspiegels daraufhin, dass *ein bestimmtes* Spaltbild auf den Drehspiegel zurückreflektiert wird, dasselbe auch für *alle* anderen Positionen des Spaltbildes auf dem Endspiegel leistet: eine Ameise, die die Spur möglicher Orte des Spaltbildes auf E abwandert, sieht den Drehspiegel immer genau senkrecht über sich, er wandert ja mit! Und “genau senkrecht über” heisst: alles Licht, das von D auf eine Stelle des Spiegels E fällt, wird wieder auf D zurückgespiegelt. So gibt es einen ganzen Bereich möglicher Orte für die Bilder des Spaltes auf E, je nach Stellung des Drehspiegels. Aber unabhängig von der genauen Stelle des Bildes “steht der Drehspiegel immer richtig”, das Bild fällt von allen möglichen Stellen auf E als Leuchtmarke auf die Skala.

Tiefer hinein in die Optik

Zwei weitere Punkte verdienen hier Aufmerksamkeit: Zum einen kann man wiederum bemerken, dass bestimmte oben entwickelte *kinematische Vorstellungen* eigentlich gleichsam verzerrte Repräsentationen *optischer Sachverhalte* sind. Das trotz allem höchst ordentliche Hin-und-Her einzelner Lichtportionen auf bestimmten Trajektorien ließe sich beispielsweise als “Erzählung” davon nehmen, dass bei entsprechender Einrichtung von E für verschiedene Stellungen von D die verschiedenen reellen Bilder alle wieder auf “ihren” Drehspiegel reflektiert werden. Doch zum anderen kann man bemerken, wie grundsätzlich dabei der Bruch ist zwischen den beiden Arten, dasselbe Problem zu bedenken: Das kinematische Argument verfolgt einen Beleuchtungsvorgang anhand vorgestellter Bewegungen, als *räumliches* Geschehen zwischen räumlich bestimmten Gegenständen. Das versuchte optische Argument

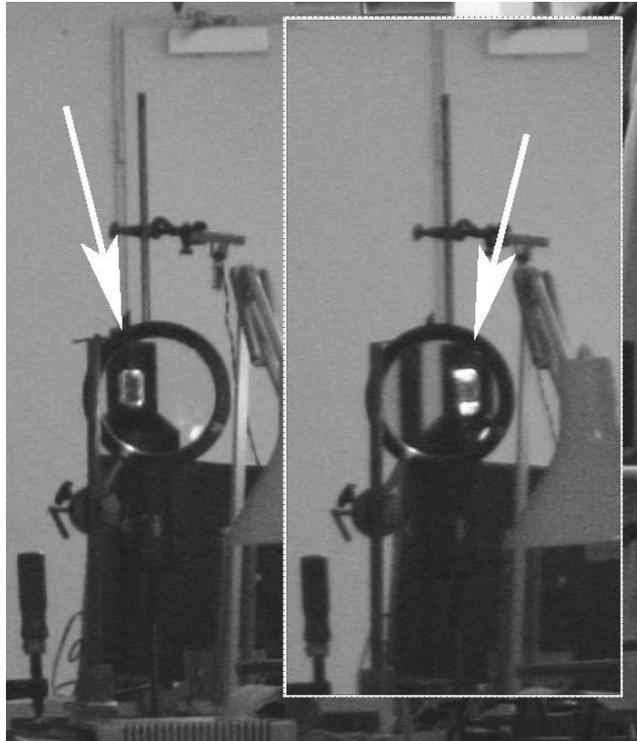


Abbildung 8.5.: Parallaxetest des durch die Linse gesehenen Drehspiegels: Unser Blick geht vom Endspiegel E aus durch die Linse. Wir sehen die runde Linse, darinnen den “Kopf” des Drehspiegels vergrössert (Pfeil links, vgl. Abb. 8.2), der Spiegel selbst glänzt hell; über der Linse und perspektivisch deutlich ferner ragt die Stativstange hervor, an der der Drehspiegel befestigt ist; an der Wand im Hintergrund ist eine Tür zu sehen. Im Kasten dieselbe Ansicht von einem Standort ca. 15 cm weiter rechts: die Gegenstände bleiben zurück, sie rutschen alle ein wenig nach links, umso *mehr*, je *näher* sie sind. Das Bild des Drehspiegels (Pfeil rechts) in der Linse begleitet uns jedoch, es wandert mehr als die Linse, mehr als die Stativstange, mehr sogar als die ca. 25 m entfernte Tür: es ist mitgewandert und damit optisch “unendlich” fern, obwohl es so gross aussieht.

verfolgt den Zusammenhang der Sichtbeziehungen. So hat der “optische Drehspiegel”, den wir von E aus durch die Linse sehen, *keinen bestimmten räumlichen Ort*, er ist ganz “Sehding” (vgl. Seite 75 ff. in (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006)) und es kommt nicht mehr auf Positionen an, sondern – typisch Optik! – *auf Richtungsbeziehungen*.

An dieser Stelle ist umrissen, dass die Leuchtmarke, die im Experiment beobachtet wird, als “Abbildung ihres eigenen reellen Bildes” (jeweils mittels der Linse L) zustandekommt, und dass die Abstände des Experimentes wirklich trickreich so eingerichtet sind, dass diese Abbildung unter Verdrehen von D ortsfest bleibt, solange sie überhaupt zustande kommt. In meinen Augen ein handfester Vorteil der optischen Diskussion ist, dass ein Verständnis dieser Verhältnisse überhaupt nicht darauf angewiesen ist, parallel einfallendes Licht vorzusetzen. Unklar ist an dieser Stelle jedoch immer noch, weshalb sich die Leuchtmarke verschiebt, wenn der Drehspiegel mit hoher Geschwindigkeit rotiert. Um hier weiterzukommen, müssen wir noch einen Schritt tiefer in die “Schwelt” des Versuchs hinein!

Der Schlüssel dazu ist ein wunderbares Thema in jeder Einführung zur erscheinungsorientierten Optik, der *Spiegel*. Nicht nur Mittelstufenschüler, auch ausgewachsene Physiker können mit diesem Thema immer wieder überraschende Entdeckungen machen, so die “optische Tiefe” des Raumes hinter dem Spiegel oder die eigentlich beunruhigende Eigenständigkeit von gespiegelten Lichtquellen und Schattenwerfern, die sich durchaus im “Diesseits” bemerkbar machen (so macht ein grosser Spiegel ein Zimmer tendenziell heller, weil er den Zimmerbewohnern zusätzliche Fenster oder Lampen bereitstellt). Man kann die Sichtverhältnisse sehr prägnant im Konzept des *Spiegelraumes* zusammenfassen, das Georg Maier in seinem Beitrag erläutert (vgl. Seite 84 in (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006), vgl. auch (Julius, 1982; Maier, 1993c; Mackensen & Ohlendorf, 1998)). Die Idee ist, kurz gesagt, dass sich Optik mit ebenen Spiegeln konsistent so verstehen lässt, als wäre der Spiegel ein Fenster zu einem Raum, in dem die Gegenstände unserer Welt noch einmal, und zwar symmetrisch zur Spiegelebene angeordnet sind – die Sicht auf die Welt “über” den Spiegel erscheint so, als wäre sie Sicht “in” den Spiegelraum. Dieser Spiegelraum ist äusserlich-räumlich nicht da, doch er ist eben optisch ganz real. Unser Drehspiegelexperiment verwendet zwei Spiegel – was für Sicht- und Abbildungsverhältnisse sind damit gegeben?

Der Aufbau im Spiegelraum

Die Idee, dieser Frage nachzugehen, entstand beim Justieren des Endspiegels, als mich unsere Lampe, die eigentlich in meinem Rücken stand, als helles Licht in einiger Entfernung im Spiegel *vor mir* blendete. . . Es braucht eventuell einen gewissen inneren Griff, um das, was der Spiegel zeigt, als “Raum zu sehen”. Am relativ grossen

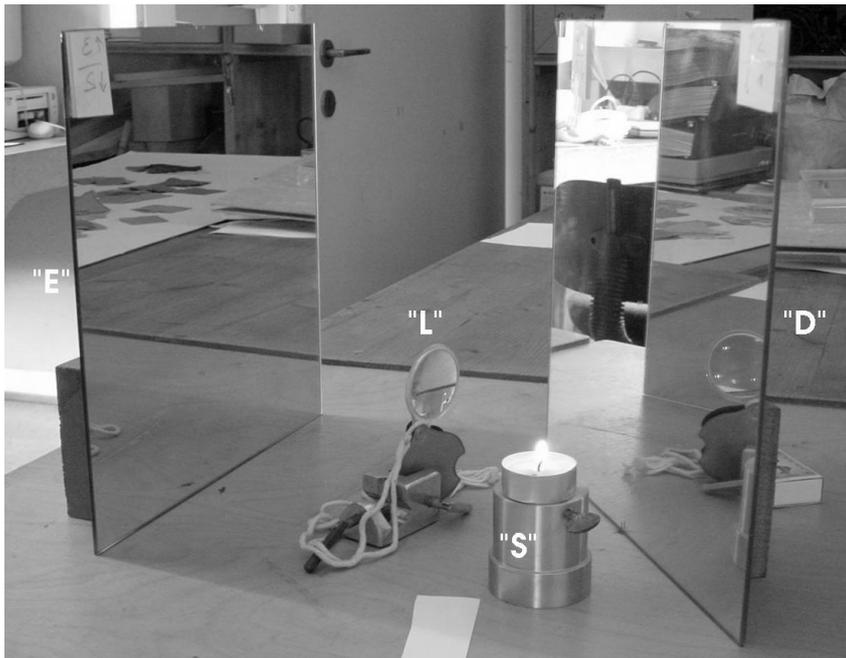
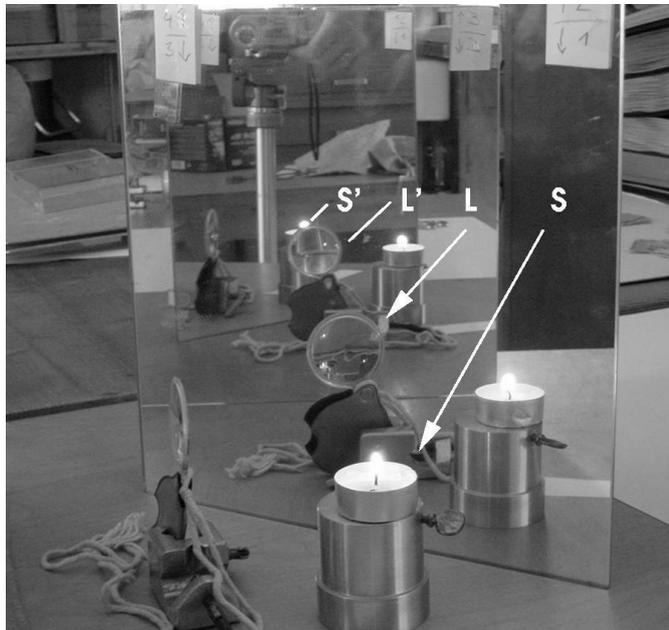


Abbildung 8.6.: Ein vereinfachter Nachbau des Experimentes, an dem sich die Sichtverhältnisse studieren lassen (links): Zwei Spiegelkacheln stehen für die Spiegel E und D, eine Kerze steht für den Spalt S und eine einfache Handlupe für die Linse L.

Endspiegel ist das möglich, am kleinen Drehspiegel wohl nicht wirklich. So entstand die Idee zu einem Modell des Versuchs, das es erlaubt, ebendiese Verhältnisse zu studieren (Abb. 8.6). Zwei grössere Spiegel spielen die Rolle von D und E, eine Kerze steht für die Lampe, eine Lupenlinse für L. Die Abstände werden mit “realistischen Proportionen” eingerichtet, also wiederum eine Brennweite Abstand von der Kerze zu D, ebenso von D zu L, zwei Brennweiten Abstand von L nach E.

Der Blick in den Spiegel D (Bild 8.7) irritiert: Das mit der Rolle des Drehspiegels verbundene “Über-Eck” des Experimentes ist einer geradlinigen Sichtgeometrie gewichen, in der wir die optischen Elemente “Lichtquelle” und “Linse” mehrfach wiederfinden, aber auch Spiegelbilder der Spiegel. An diesen entsteht einerseits wie an Fenstern gerade der “Blick in die Tiefe”, andererseits verraten uns jeweils die Brüche im Hintergrund und Umfeld, dass da gewissermaßen “verschieden Räume aneinandergeliebt” werden. Zusammen mit den realen optischen Elementen am Tisch vor uns ergeben sich zwei “Hauptrichtungen”, entlang derer sich Lichter und Linsen aufreihen (Bild 8.8). Die reelle Abbildung der Lichtquelle auf E (Bild 8.4) lässt sich dank der maßstabsgetreu verkleinerten Abstände direkt nachvollziehen, aber sie erscheint als eine Abbildung *der Spiegelkerze...*



"ferne Lichtquelle" (S', das Spiegelbild in E des Spiegelbildes in D...)

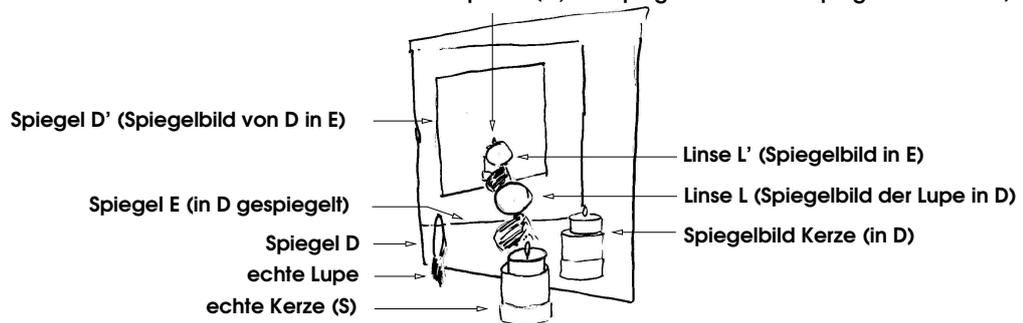


Abbildung 8.7.: Der Blick in den Spiegel D zeigt den optisch wirksamen Aufbau aus zwei Linsen und die ferne Lichtquelle S'. Verschiedene Spiegelräume reihen sich aneinander: jeweils hinter D, E und D', dem Spiegelbild von D in E, "geht es weiter..." L und L' sind Spiegelbilder der Lupe, die ferne Lichtquelle ein (doppeltes) Spiegelbild der Kerze – vgl. auch Abb. 8.6.

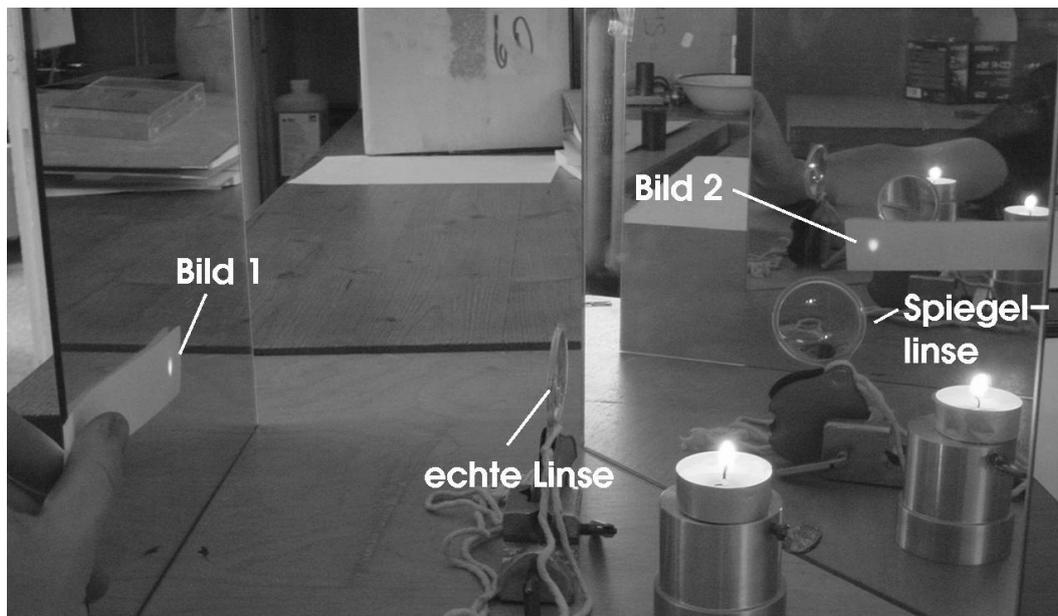


Abbildung 8.8.: Im Spiegelraum unseres Drehspiegels gibt es zwei Abbildungsachsen: von der echten Kerze aus “in den Spiegel hinein”, von der Spiegelkerze aus “von rechts nach links”. Mit einem Papier lässt sich das reelle Bild auf dem Endspiegel E zeigen (“Bild 1”, vgl. auch Abb. 8.4). Entsprechend gibt es im Spiegelraum ein Bild auf dem Spiegelbild von E (“Bild 2”). Die Sache ist abenteuerlich: Augenscheinlich entsteht Bild 1 als Bild der gespiegelten Kerze über die echte Linse auf einem echten Papier, Bild 2 als Bild der echten Kerze über die “Spiegellinse” auf dem Spiegelpapier. Im Spiegelraum hinter Bild 1, aber auch im Spiegelraum hinter Bild 2 findet derselbe Versuch jeweils noch einmal (mit jeweils umgekehrten Richtungen) statt!

Die “optische Strecke” von der Kerze in den Spiegel hinein führt über zwei Linsen wieder zu einer Kerze. Die Aufstellung der Kerzen und der zwei Linsen ist symmetrisch bezüglich des *Spiegelbildes* von E. Was im eigentlichen Drehspiegelexperiment als Leuchtmarke beobachtet wird, hatten wir oben als “reelles Bild eines reellen Bildes” bezeichnet, das durch die Spiegelung an E eigentlich wieder auf der Lichtquelle selbst zu liegen kommen würde und mittels eines halbdurchlässigen Spiegels H der Beobachtung zugänglich wird (vgl. Abb. 8.2). Mit der optischen Aufstellung aus Abb. 8.8 vor Augen müsste man die Sache anders auffassen: Die beiden Linsen vermitteln Abbildungen zwischen den beiden Kerzen. Es muss jetzt darum gehen zu verstehen, *wie* sie das tun, also welche Eigenschaften die aufgestellte Optik hat. Um sich das klarzumachen, ist es gut noch einmal festzuhalten, welche Elemente zwischen dem Bild, das im echten Experiment als Leuchtmarke dient, und dem Urbild, der fernen Lichtquelle hinter den diversen Spiegeln, stehen (Abb. 8.9):

- B ist der Ort des Bildes, das ohne “Auskoppeln” an H (vgl. Abb. 8.2 links) auf der echten Kerzenflamme (bzw. auf dem echten Spalt S) liegt.
- Im Abstand f steht der Drehspiegel D (in den wir aber jetzt “hineinschauen”),
- dann um f weiter hinten die Linse L,
- im Abstand $4f$ von B, also wiederum $2f$ weiter hinten, steht der Endspiegel E (auch in diesen schauen wir *hinein*). Danach alles in umgekehrter Reihenfolge, nämlich
- im Abstand $6f$ von B eine zweite Linse, L’,
- im Abstand $7f$ von B das Spiegelbild von D im Spiegel E, ein drittes “Fenster” D’,
- im Abstand $8f$ von B brennt eine Spiegelkerze bzw. dort steht der erleuchtete “Spiegelspalt” S’.

Ein optisches Getriebe

Die Abbildung der fernen Lichtquelle S’ über die beiden Linsen L und L’ auf B ist für die geschilderte Geometrie nicht schwer zu verstehen: Mit der schon oben formulierten Bedingung “Gegenstandsweite = Bildweite = doppelte Brennweite” entsteht an L’ ein reelles Bild von S’ in der Ebene von E. Die Linse L bildet dieses dann auf B ab. Die Symmetrie der beiden “Abbildungsstufen” unter Einbezug des Spiegelraums entspricht dem Hin-und-Her, wenn wir die Verhältnisse so anschauen, dass an E

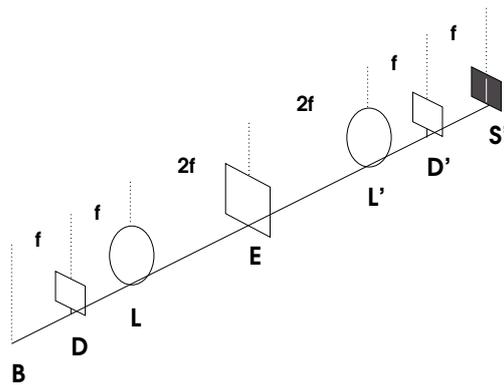


Abbildung 8.9.: Der Aufbau, so wie er in den Spiegeln gesehen wird: Wenn man die Spiegel als Fenster anschaut, blickt man von B aus über zwei Linsen auf eine ferne Lichtquelle (die ferne Kerze in Abb. 8.8 rechts, im Aufbau aus Bild 8.2 ein ferner erleuchteter Spalt) am Ort S'.

eine Reflexion stattfindet. Die Abbildung findet nicht nur “von S' auf B zu” statt, sondern auch umgekehrt, von S aus hin zu einem “Spiegelbeobachter”, der sich eine Leuchtmarke ansieht, die eigentlich auf S' zu liegen käme. Das reelle Zwischenbild aus Abb. 8.4 bzw. 8.8 gehört jeweils zu dieser zweiten “Abbildungsrichtung”. Das reelle Zwischenbild, das zur Leuchtmarke in B wird, müsste jeweils im Spiegelraum “hinter E” angeschaut werden.

Die Sache wird allerdings sofort komplizierter, wenn wir uns klarmachen, dass die Geradlinigkeit dieses Arrangements an der speziellen Stellung von D hängt. Verdrehen wir den Drehspiegel ein wenig, “knickt” die Verbindungslinie zwischen B und S' an zwei Stellen ab – am Drehpunkt von D und am Drehpunkt von D' (der Knickwinkel ist jeweils der doppelte Drehwinkel). Zwischen diesen beiden Punkten stehen die beiden Linsen und man kann sich durch Ausprobieren bzw. durch Anbringen von Orientierungsmarken überzeugen, dass die gerade Ausrichtung auf diesem Stück erhalten bleibt. Das ist verständlich, denn L' ist ein Spiegelbild von L im Spiegel E, und der ändert seine Ausrichtung zur Lupe nicht, auch wenn D dreht. Das “Abknicken” geschieht symmetrisch, das Verdrehen von D' ist ja das, was sich in E vom Verdrehen des Drehspiegels D spiegelt.

Was bedeutet das für die Abbildung? Die Zeichnung 8.10 zeigt die Situation. Für kleine Winkel führt das Knicken *de facto* zu seitlichen, buchstäblich spiegelbildlichen Verschiebungen von B und S'. Jede seitliche Verschiebung von S' ergibt aber gerade eine *umgekehrte* Verschiebung des Zwischenbildes. Doch damit liegt das reelle Abbild des Zwischenbildes mittels L wiederum am Ort von B! Wir begegnen also einer dritten Art, die “Stabilität” der Position der Leuchtmarke unter verschiedenen Stellungen des Drehspiegels zu verstehen: Die vom Spiegel E gewährleistete

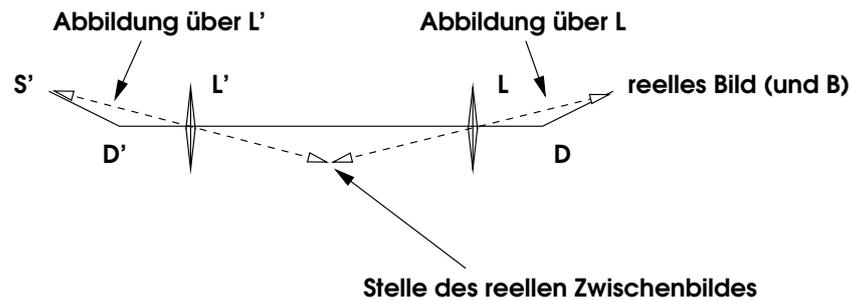


Abbildung 8.10.: Abbildungsgeometrie mit verdrehten Drehspiegeln: Das Bild von S' bleibt am Ort B , auch wenn D (und damit D') verdreht wird! Das Zwischenbild entspricht Bild 2 in Abb. 8.8.

Symmetrie der Orte B und S' und die doppelte symmetrische Abbildung an Linse und Spiegellinse kompensieren sich gerade. Für jede bestimmte Drehspiegelstellung ergibt sich eine andere Abbildungsgeometrie, Bild B und Urbild S' (bzw. letztlich S) bleiben aber in dieser Beziehung zueinander. Und auch hier wird plausibel, warum ein grosser Linsenquerschnitt wünschenswert ist – je grösser die Linse ist, desto grösser ist der Bereich von Stellungen des Drehspiegels, in denen ein Zwischenbild zustandekommt. Ein hinreichend breiter Spiegel E ermöglicht dann die Abbildung auf B . Und die Ratio der gewählten Abstände ist nun vollkommen verständlich: diese Art Invarianz unter Drehungen von D braucht ein reelles Zwischenbild in der Spiegelebene von E .¹

Die dynamische Situation

Die Situation ist nun also die Folgende: wir können uns das Zustandekommen der Leuchtmarke verständlich machen als Abbildung über zwei Linsen, die gleichsam den Mittelteil eines sich “getriebeartig” bewegenden Aufbaus bilden – Ausschwenken der Lichtquelle und Ausschwenken des Beobachtungsortes sind “1:1 gekoppelt”, aber das Abbildungsverhältnis zwischen beiden bleibt innerhalb der durch die Linsenbreite gegebenen Möglichkeiten bestehen. Klargemacht haben wir uns diese Verhältnisse an verschiedenen *statischen* Stellungen des Drehspiegels. Setzen wir den Motor des Drehspiegels nun langsam in Gang, bleibt die Leuchtmarke zunächst an der Stelle, auf die sie justiert wurde. Die Intensität fällt allerdings stark ab: Das “Abknicken” in D und D' geschieht jetzt im Zuge einer durchgehenden Bewegung und nur für einen kurzen Moment steht der Drehspiegel “richtig” zu den Linsen und zum

¹Allerdings funktionieren Abbildungen mit “Gegenstandsweite \neq Bildweite” analog!

Endspiegel. Höhere Drehzahlen ändern daran nichts: Der Drehspiegel steht zwar öfter, aber auch kürzer richtig. . .

Bei immer höherer Drehzahl beginnt die Leuchtmarke aber nun auszuwandern, und zwar proportional zur Drehzahl bzw. zur Winkelgeschwindigkeit ω des Drehspiegels. Wenn wir ernst nehmen, was wir uns zum Zustandekommen der Abbildung überlegt haben, müssen wir das so deuten: Die Winkelstellung des Knicks an D weicht mehr und mehr von der des Knicks an D' ab! Beide Winkelstellungen ändern sich mit einer Winkelgeschwindigkeit von 2ω , der Drehsinn ist dabei gegenläufig. Das Auswandern der Leuchtmarke hat eine Richtung, die sich zu den Drehrichtungen in Beziehung setzen lässt. Das Auswandern verrät uns mit anderen Worten noch mehr über die Winkelstellung bei D': Diese ist nicht mehr spiegelbildlich zur Stellung von D, sondern sie "hinkt nach", der Knick bei D' "ist noch nicht so weit wie der bei D" – es fehlt noch ein kleines Stück Drehung im Vergleich zu D. Mit anderen Worten: die Winkelstellungen sind zwar immer noch korreliert, aber das Spiegelbild folgt dem echten Spiegel, und zwar umso bemerkbarer, je schneller dieser dreht: D und D' erweisen sich als *zeitlich versetzt*.

Man kann die Veränderung der Leuchtmarke auf der Skala und die Geometrie des Aufbaus dazu verwenden, den Unterschied der Knickwinkel *quantitativ* zu bestimmen, oder auch z. B. wie wir in (Theilmann & Maier, 2004) den "Auskoppelspiegel" H nachführen und den Winkel direkt messen (vgl. Bild 8.2). Die Proportionalität des Winkelunterschieds zur Drehgeschwindigkeit verweist uns darauf, dass nicht eine feste Phasenverschiebung der Drehungen vorliegt, sondern ein fester "delay" zwischen D und D'. Mit den Zahlenwerten der Winkelmessung und aus der Geometrie des Aufbaus finden wir für diesen *delay* den oben kinematisch abgeleiteten Wert τ . Der Wert ist proportional zur Grösse des Aufbaus, genauer vom Abstand zwischen D und D', und es gilt (unter Vernachlässigung der Linsendicke) $\delta f / \tau = c$.

Wer oder was bewegt sich mit c ?

Vielleicht ist spürbar, wie sich der Blick auf den Aufbau im Laufe dieser Diskussion gewandelt hat. Die anfängliche Versuchsidee, die Geschwindigkeit des sich bewegenden Lichtes nachzumessen, hat sich gewandelt in den Betrieb einer Art Uhr: wir messen einen *Zeitunterschied* τ zwischen zwei korrelierten Drehvorgängen in D und D'. Der Kontext dafür ist die *Sicht* auf eine Lichtquelle, die durch die Stellung des Drehspiegels und seines Spiegelbildes vermittelt wird. Mit der speziellen Relativitätstheorie als Deutungsrahmen haben wir es zwischen D und D' mit einer "lichthaf-ten" Raum-Zeit-Beziehung zu tun, für die räumlicher und zeitlicher Abstand über $d^2 - (c\tau)^2 = 0$ miteinander verknüpft sind – das ist, was das Experiment zeigt. Wenn wir unser Drehspiegelexperiment auf die Sichtbeziehungen hin analysieren, können wir es so schildern:

Wir konstruieren eine Situation, in der wir als Beobachter in B anhand der Eigenschaften des abbildenden Aufbaus folgern können, dass die Sicht auf den Spiegel D', der um die Distanz $d = 6f$ weiter von uns entfernt ist als der Spiegel D, diesen in einer Drehstellung zeigt, die der von D um die Zeit $\tau = d/c$ vorher entspricht.

Diese Verhältnisse sind konsistent mit der Vorstellung eines sich äusserlich-räumlich bewegenden Lichtsignals der Geschwindigkeit c , aber das muss nicht als notwendig vorausgesetzt werden, um die Situation zu verstehen. Die Relativitätstheorie besteht aus einem bestimmten Transformationsverhalten der raum-zeitlichen Beziehungen, nicht eigentlich in der These einer äusserlichen Lichtbewegung. Das Drehspiegelexperiment zeigt auch als optisch interpretiertes Experiment – und zwar quantitativ richtig! –, dass der “Blick in den Raum” zugleich ein “Blick in die Vergangenheit” ist. Auf die Vorstellung einer Lichtbewegung kann dafür verzichtet werden.

Es wird einem dabei auch klar: Die am statischen Aufbau studierten konkreten Sichtverhältnisse lassen sich nicht auch für den mit 27'000 U/min rotierenden Drehspiegel nachvollziehen. Die rasende Geschwindigkeit des Vorgangs wirft uns als Beobachter aus der Rolle des “Mitvollziehers” in die Rolle eines “Wächters” über die Position der Leuchtmarke. Wir sind darauf angewiesen, unsere Fragen an den Vorgang durch gedankliches Schliessen zu beantworten und können nicht im anschauenden und ordnenden Beschreiben von tatsächlichen Beobachtungen oder Tatsachen verbleiben. In diesem Sinne übersteigt das Drehspiegelexperiment offenbar die Möglichkeiten einer “erscheinungsorientierten Optik”, die allerdings die für das gedankliche Schliessen nötigen Eigenschaften des optischen Aufbaus liefern kann. Die Analyse des “Drehspiegels in Betrieb” ist zuletzt doch wieder ein kinematisches Problem geworden, denn dieser Betrieb vollzieht sich einfach zu schnell, um mitvollzogen zu werden.

Auf zweierlei sei zudem als Ausblick hingewiesen: Zum einen eröffnet der Blick auf den grundlegenden Trick des Drehspiegelexperimentes, nämlich das Auswerten des zeitlichen Bezugs von Drehspiegel und dessen Spiegelbild über ihren optischen Abstand, auch die Einsicht, dass letztlich alle klassischen Experimente zur “Lichtgeschwindigkeit” so funktionieren: wir messen die Verzögerung der Sicht im Hier-und-Jetzt auf einen zeitlich definierten Vorgang “auf Abstand”! Zum anderen legt uns obige Interpretation eine andere Lesart von c nahe als die einer Geschwindigkeit eines sich räumlich bewegenden Signals: c wäre die Geschwindigkeit, mit der ich mich von einem Ort entfernen müsste, um *ein bestimmtes Zeitverhältnis zu ihm zu bewahren*. Für eine solche Beobachterbewegung würde “der Blick zurück einfrieren”! Damit ist auch eine ziemlich anschauliche Vorstellungsrichtung dafür gegeben, in welche Zeitverhältnisse uns Bewegungen mit $v < c$ gegenüber dem ursprünglichen Bezugsrahmen stellen (“Zeitdilatation” etc.) und wie sie sich verstehen lassen.

Das Ausgangsproblem, die Frage, ob in einem typischen Experiment zur Lichtgeschwindigkeit nicht doch eine Bewegung von Licht nachgewiesen wird, findet vor diesem Hintergrund zunächst eine gewissermaßen salomonische Lösung – der er-scheinungsorientierte Blick auf das Drehspegelexperiment lehrt uns, die Optik des Aufbaus deutlich besser zu verstehen, und führt zu einer sorgfältigeren Formulierung als üblich davon, was der Gegenstand des Versuchs ist: wir weisen nicht eine eigentliche Bewegung des Lichtes nach, sondern wir vermessen auf raffinierte Art extrem kurze relative zeitliche Verschiebungen im Ablauf synchronisierter Vorgänge. Diese Formulierung ist, wie oben bereits festgestellt, durchaus im Einklang mit den Aussagen der speziellen Relativitätstheorie. Licht muss auch hier nicht gegenständlich oder in mechanisch-körperlichen Analogien gedacht werden. Doch der zweite Blick auf das Problem zeigt, worum es noch geht: Licht als aktuelle *Sichtbeziehung* vermittelt eine gemeinsame Gegenwart von Angeschautem und dem, der schaut. Die Lektion hier ist auch, dass es keine allgemeinverbindliche Gegenwart für die verschiedenen Beobachter in der Welt gibt! Der Verzicht auf einen vorgestellten Transportvorgang beim Licht erweist sich, so gesehen, zugleich als der Verzicht darauf, die damit implizierten inkompatiblen und konkurrierenden Gleichzeitigkeiten durch solche Vorstellungen doch wieder auf eine einzige, als solche eben auch bloß vorgestellte Wirklichkeit in Raum und Zeit zurückzuführen – die Provokation, vor die uns Einstein gestellt hat, wird dadurch erst ernst. Wittgensteins Dictum *“Die Welt ist alles, was der Fall ist”* liest sich aber umgekehrt als *“Was nicht der Fall (also Tatsache) ist, ist auch nicht Welt”* und damit als Ermunterung dafür, mit einer er-scheinungsorientierten Lesart ernst zu machen.

9. Der Blick ins Becken – perspektivische Effekte und Bildverzerrungen in einfachen Situationen mit optisch dichten Medien¹

Die Essenz der Brechung von Licht an der ebenen Grenzfläche zwischen Luft und Wasser beim Blick in ein Becken ist strahlenoptisch das Snellius'sche (Brechungs-)Gesetz. Dieses Thema ist auch normalerweise der zentrale Inhalt im entsprechenden Physikunterricht. Dabei zeigen sich selbst bei einfachen Sichtgeometrien am Becken eine Reihe komplexer Effekte: Gegenstände erscheinen dem Beobachter verzerrt oder am falschen Ort etc. Dieser Beitrag hat in diesem Zusammenhang zwei Anliegen: Inhaltlich wird eine Reihe solcher Effekte so diskutiert, dass eine Art "Kurs" entsteht, bei dem der Abstraktionsgrad und der Schwierigkeitsgrad der verwendeten mathematischen Methoden vom Mittelstufenniveau zum Niveau der gymnasialen Oberstufe ansteigt. Methodisch besteht dabei ein besonderes Interesse daran, diese Diskussion sowohl mit Methoden der geometrischen Opti, als auch im Rahmen systematischer Behandlung von "Ansichten" zu führen.

"Brechung" vs. "Hebung"

An einem gefüllten Becken erscheint das Wasser weniger tief als es tatsächlich ist. Verschieden hoch mit Wasser gefüllte, "sonst gleiche" Gläser mit Wasser zeigen – ebenso wie Brunnenröge oder die Wellen, die über Kiesel am flachen Ufer spielen –, dass der Boden oder Untergrund umso näher am Betrachter erscheint, je mehr Wasser darüber steht (Abbildung 9.1): Wir begegnen optischen Phänomenen, die oft unter "Hebung" zusammengefasst werden. Physiklerner mögen mit derlei Erfahrungen mehr oder weniger vertraut sein, wenn sie im Optikunterricht dem Thema Brechung begegnen. Wie lassen sich aber die Einsichten der geometrischen Optik auf das beziehen, was alltägliche Seherfahrung ist oder gezielt gesuchtes Experiment werden kann? In dieser Frage stehen sich zwei Arten, optische Phänomene zu erfahren, gegenüber: eine formale, eher mathematische Behandlung von "Licht"

¹Erschienen in Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (PhyDid) A (2010), S. 45 – 53.

als äußerlich darstellbarem Sachverhalt in “abgelöster” Perspektive und eine systematische Diskussion von “Ansichten” oder “Bildern”, die “subjektiv”, “eingebunden” erfahren werden. Das physikalische Interesse an eingebundenen Erfahrungen ist typisch für phänomenologische Ansätze zum Physikunterricht und lässt sich zwanglos bis zu Goethes gerade 200 Jahre alt gewordenen Beiträgen zur Farbenlehre zurückverfolgen. Man muss allerdings kein Verfechter phänomenologischer Zugänge zur Optik sein, um den didaktischen Wert der Frage nach eingebundenen Experimenten anerkennen zu können – die Integration lebensweltlicher Erfahrungen und Kontexte, das Potential für motivations- und interessesteigernder Experimente, die vielfältigen Ansatzpunkte für Themen des Themenkreises Nature of Science, dies und mehr ließe sich zugunsten einer “Optik der Bilder” (Maier, 1993b) anführen.

Solche Zugänge zur Optik sind auch fachlich interessant, obwohl im Zusammenhang mit phänomenologischen¹ Unterrichtsansätzen immer wieder das Vorurteil oder Missverständnis auftaucht, dass dabei nicht “wirkliche Physik” gesucht würde. Dem ist nicht nur zu widersprechen, sondern gerade die Doppelperspektive auf abgelösten und eingebundenen Sachverhalt bietet die Möglichkeit vielfältiger Vertiefungen (Sommer & Meinzer, 2009; Theilmann, Grebe-Ellis & Rang, 2009) des Verständnisses und der Behandlung der Optik im Unterricht – auch auf akademischen Niveau². Hier möchte der vorliegende Beitrag beitragen: Wie lässt sich die (gehobene) Ansicht am wassergefüllten Becken qualitativ und quantitativ besser verstehen? Oder umgekehrt: Welche Effekte hat die Brechung auf die werden, also durchaus “Oberstufen-tauglich” sind. Ansicht dessen, was unter Wasser ist? Die Spanne der dabei behandelten Themen hat durchaus “Kurscharakter” und reicht dabei von “elementar” (Sek-I-Niveau) bis zu Themen, die unter Einbezug von Infinitesimalrech-

²Vgl. neben (Maier, 1993b; Mackensen & Ohlendorf, 1998), die nicht nur viele wichtige Themen der Optik unterrichtstauglich behandeln, sondern auch erkenntnistheoretische Fragen explizit behandeln, auch (Grebe-Ellis & Theilmann, 2006; Sommer, 2005; Grebe-Ellis, 2005; Theilmann, 2008a; Quick & Grebe-Ellis, 2010).



Abbildung 9.1.: Der Boden eines Wasserglases erscheint umso näher, je mehr Wasser im Glas ist.

nung und analytischer Geometrie behandelt.

Elementare Beobachtungen: Sichtverbindung auf Umwegen

Die Hebung korrespondiert zu den immer wieder aufs Neue eindrucksvollen Schwierigkeiten, ein Objekt unter Wasser mit einer geradlinigen Bewegung zu treffen (“Harpunieren”) oder den u. U. buchstäblich schwindelerregenden räumlichen Verhältnissen, mit denen man es bei einer genaueren “Inspektion” der Sichtverhältnisse am gefüllten Aquarium zu tun bekommt. Unsere gewohnte Urteilsgrundlage über das “Wo und Wohin” der Dinge trägt nicht mehr, obwohl das optisch dichte Medium nur durch eine ebene Grenzfläche von uns getrennt ist. Der – von der Seite gesehen – ebene Boden eines gefüllten Troges oder Beckens³ erscheint dem Betrachter, der von oben ins gefüllte Becken schaut, zu ihm hin geneigt. Dieser Effekt nimmt zu, wenn der Betrachter in die Knie geht oder auf andere Weise ein flacherer Einblick ins Becken zustande kommt – der Boden ist auch nicht mehr “gerade”, die ganze Geometrie erscheint zunehmend verzerrt (Abb. 9.2 rechts). Wenn zwei Betrachter auf gegenüberliegenden Seiten eines Wasserbeckens dieses Urteil fällen, wird deutlich, dass die Wirkung der Grenzfläche von den geometrischen Verhältnissen zwischen Betrachter und Grenzfläche abhängt, sie ist “lokal”, soll heißen: für jeden Beobachter anders. Werfen wir nun einen ersten Blick darauf, wie “die Brechung” diese Bild-Effekte erzeugt und wie sich die Lichtwege “im Bild” darstellen lassen.

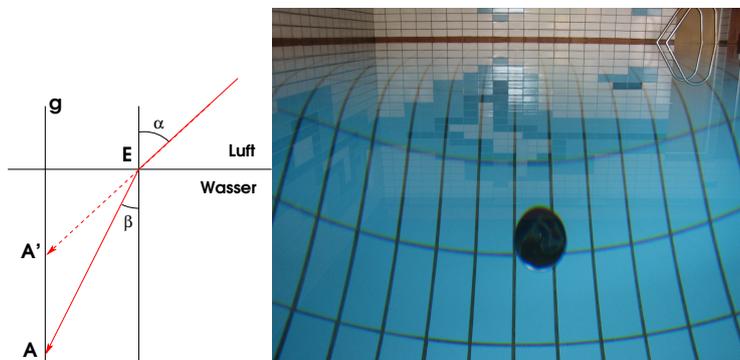


Abbildung 9.2.: Links: Die Brechung des Lichtes an der Grenzfläche zum optisch dichten Medium führt dazu, dass das Blickziel A höher erscheint als es im Lageraum zu ertasten wäre, es wird in Richtung EA' gesehen. Rechts: Starke Hebung geht mit drastischer Verzerrung der Sichtgeometrie einher (Bild von Udo Backhaus).

³Diese Situation wollen wir im Folgenden für unsere Betrachtungen voraussetzen.

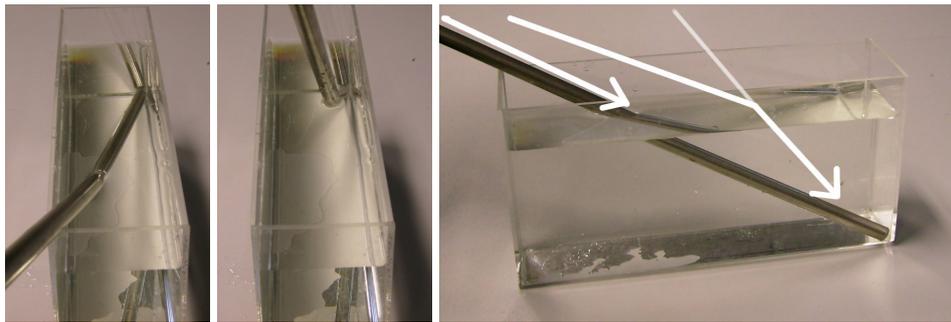


Abbildung 9.3.: Beobachtungsreihe zum Verlauf der Sichtverbindung beim Einblick ins Becken, vgl. Text.

Bereits (Maier, 1993b) beschreibt, wie die “Brechung” von Licht den Eindruck eines gehobenen Blickziels erzeugt. Die Winkel α und β der Sichtverbindung an Luft bzw. im Wasser zum Lot der Grenzfläche sind bekanntlich über das Snellius’sche Brechungsgesetz $\sin \alpha / \sin \beta = n$ mit dem Brechungsindex n verknüpft. Die Sichtverbindung bzw. die Blickrichtung ist demgemäß unter Wasser steiler orientiert als an Luft (Abb. 9.2 links); genau senkrechter Einblick bleibt allerdings senkrecht. Die verschiedenen Blickrichtungen an Luft und in Wasser definieren dabei eine senkrechte “Blickebene” (die die Punkte EAA' enthält). Bei aufrechtem Kopf und zweiäugiger Sicht schneiden sich die beiden Blickebenen der beiden Augen in der Geraden g , so dass die scheinbare Position A' des Blickziels A tatsächlich in diesem Sinn senkrecht über A gesehen wird. Zugleich gilt damit offenbar $EA/EA' = n$, die *scheinbare* Länge der Sichtverbindung von der Einblicksstelle E nach A' in Wasser ist also um einen Faktor $1/n$ kürzer als die tatsächliche Länge EA (∇).

Kaum diskutiert ist die umgekehrte Frage: “Was sehe ich von der Sichtverbindung zwischen Auge und Punkten auf dem Beckenboden?” Ausgehend vom Fermat’schen Prinzip wird klar, dass sich die optische Gesamtweglänge verkürzen lässt, wenn der Weg an Luft verlängert, dafür aber Wegstrecke im optisch dichten Medium eingespart wird, vgl. (Maier, 1993b; Erb, 1994). Der gebrochene Lichtweg verläuft also in einer Ebene, die die direkte Verbindung Auge–Blickziel enthält. Die Abbildung 9.3 zeigt, wie sich die Sichtverbindung nachvollziehen lässt: Das Bild der hinteren rechten Beckenecke erscheint im linken Bild nicht in der Verlängerung des näheren Teils der Stativstange (die ja dort endet), sondern *oberhalb*, also unter flacherem Einblickwinkel. Im mittleren Bild wird die Stange deutlich *steiler* gehalten und steht dann gerade so, dass wir *unter Wasser* die Stange entlang zur Ecke schauen. Daraus ergibt sich der Verlauf der gesamten Sichtverbindung (rechtes Bild).

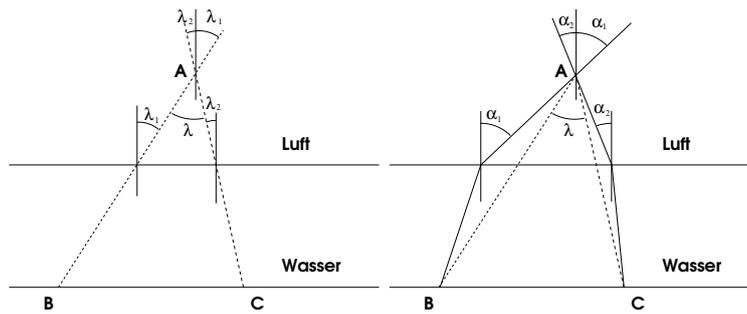


Abbildung 9.4.: Links: Der Blickwinkel α von A auf die Strecke BC wäre an Luft $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$. Rechts: Der tatsächliche Blickwinkel von A auf die Strecke BC ist (mit Wasserfüllung) wegen $\alpha_1 > \lambda_1$ und $\alpha_2 > \lambda_2$ dann $\alpha_1 + \alpha_2 > \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda$, also größer als an Luft.

Vertiefung: Perspektivische Vergrößerung durch Brechung

Die geschilderten Sachverhalte sind, etwas genauer bedacht, keineswegs besonders übersichtlich: Brechung sorgt dafür, dass Sichtverbindungen unter Wasser steiler verlaufen als an Luft, zugleich erscheint das Becken flacher als es ist; beim Einblick ins Wasser ist die optische Weglänge bei gleicher geometrischer Entfernung gegenüber Luft im optisch dichten Medium (um den Faktor $n > 1$, den Brechungsindex) *länger*, andererseits erscheint der Boden eines Beckens mit Wasserfüllung *näher* als an Luft bzw. ist der scheinbare Abstand zwischen Einblicksstelle und Blickziel gerade um $1/n$ verkürzt... Im vorherigen Abschnitt haben wir untersucht, wie sich die qualitative Änderungen der Blickrichtungen darstellen und nachvollziehen lassen. In diesem Abschnitt soll anhand des bisher in der Literatur vernachlässigten Blickwinkels auf *perspektivische Effekte* ein "Untersuchungsgang" dazu skizziert werden, wie der Eindruck des "Näher-als-an-Luft" entsteht.

"Brechung" ist zunächst eine Aussage über Blickrichtungen. Oben (∇ , S. 164) hatten wir uns bereits überlegt, dass Brechung dazu führt, dass der Abstand Blickziel-Einblicksstelle scheinbar verkürzt wird. Das Urteil, der Beckenboden erscheine mit Wasser "näher", meint aber etwas anderes – ein Blickziel unter Wasser sieht nicht "näher als an Luft" (oder: "näher als sich beim Hineinfassen herausstellt") aus, weil sich die Blickrichtung – für die uns der Vergleich ja sogar fehlen mag – geändert hat oder Abstände "in Blickrichtung" – die wir vielleicht gar nicht beurteilen – verkürzt wären, sondern weil ein *vergrößerter Schwinkel* (im Vergleich zur Sicht an Luft) auf Kanten, Umrisse oder sonstige Merkmale des angeschauten Etwas scheinbare Nähe verheißt. Untersuchen wir also die Vergrößerung des Blickwinkels beim Blick durch die Wasseroberfläche näher.

Die Abbildung 9.4 zeigt einen Vergleich zwischen den Blickwinkeln auf einen Abschnitt BC, wenn das "Auge" (oder der perspektivenrelevante Beobachterstandort) A über dieser Strecke liegt. Die linke Abbildung zeigt den Blickwinkel λ , wie er sich ohne optisch dichtes Medium ergäbe – wir sprechen für diesen Fall im Folgenden auch vom "Lagewinkel" λ . Mit Medium erfolgt der Blick AB bzw. AC auf "Umwegen", der Winkel zur Grenzflächennormalen vergrößert sich auf der Luftseite. Der resultierende Blickwinkel α von A aus auf BC ist die Summe der beiden Winkel α_1, α_2 zu den Oberflächennormalen, so dass sich tatsächlich ein vergrößerter Sehwinkel bzw. eine perspektivische Vergrößerung ergibt.

Solche Überlegungen erlauben, eine altgediente Fehlvorstellung zu beheben – ein bekanntes Einführungsexperiment in den Themenkomplex Brechung/Hebung/optische Dichte ist dies: Eine Geldmünze wird in einem gefüllten Glas versenkt und man vergleicht die scheinbare Größe dieser Münze mit einer zweiten Münze, die an Luft neben das Glas gehalten wird. Für einen vergleichbaren Größeneindruck muss man die Münze an Luft ein Stück heben – Abmessen, etwa mit einem Lineal, ergibt, dass sich die tatsächliche Wassertiefe t der versenkten Münze und die "scheinbare Tiefe" t' der Vergleichsmünze (also ihr Abstand zum Niveau der Wasseroberfläche) recht genau nach $t/t' = n$ (mit der optischen Dichte n) verhalten. Dieser Sachverhalt ist nach den Eingangsüberlegungen in diesem Abschnitt nun *nicht* eine Demonstration der Verkürzung des (scheinbaren) Abstandes zwischen Einblickstelle und gehobenen Blickziel (∇ , 164), sondern eine Vergrößerung des Blickwinkel auf die Münze (vgl. Abb. 9.5 links). Zur Behandlung reicht es, den Winkel zwischen der Normalen der Wasseroberfläche (Richtung AC) und beispielsweise dem Rand der Münze (B) zu betrachten. Die Sichtverbindung AB ist an der Grenzfläche gebrochen, der Sehwinkel auf das "Objekt" (oder den "Abschnitt") BC ist vergrößert – in welcher Tiefe t' hätte ein direkt gesehenes Objekt B'C' dieselbe scheinbare Größe, also denselben Sehwinkel? Es gilt offenbar

$$b = h \cdot \tan \alpha + t \cdot \tan \beta \quad (9.1)$$

bzw.

$$b = (h + t') \cdot \tan \alpha. \quad (9.2)$$

Für hinreichend kleine Winkel gilt $\tan \alpha \approx \sin \alpha$ bzw. $\tan \beta \approx \sin \beta$, und außerdem ja wegen des Brechungsgesetzes $\sin \beta = \sin \alpha/n$. Einsetzen dieser Beziehungen in Gleichung (9.1) ergibt dann $b = (h+t/n) \cdot \tan \alpha$, der Vergleich mit (9.2) also $t' = t/n$.

Die Darstellung aus Gl. 9.1 erlaubt es, den Themenkomplex "Blickwinkel" analytisch zu behandeln. Im Folgenden bezeichne λ wieder den (hypothetischen) Blickwinkel "ohne Wasser" bzw. den Lagewinkel, α den (tatsächlichen) Blickwinkel "mit Wasser". Der Winkel λ ist dabei ein Maß für den tatsächlich-tastbaren sagittalen

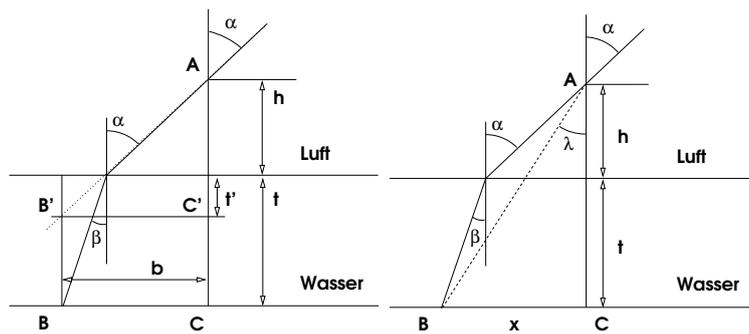


Abbildung 9.5.: Links: Der Sehwinkel von A durch eine Wasserschicht der Tiefe t auf den Streckenabschnitt BC sei α . Dies entspricht der Sicht ohne Wasser auf einen Streckenabschnitt B'C' im Abstand t' unter der Niveau der Wasseroberfläche. Rechts: Skizze zur analytischen Beziehung zwischen Sichtwinkel α und Lagewinkel λ , vgl. Text.

Abstand x des Blickziels vom Beobachter – und α hängt ebenfalls von x ab. Die Eindeutigkeit der Abbildung zwischen λ und α – wir würden sonst *mehrere* Bilder eines Blickziels durch die Grenzfläche sehen, oder bestimmte Bereiche des Beckenbodens blieben unsichtbar – lässt sich rechnerisch nachvollziehen: Wenn wir h als Höhe von A über der Grenzfläche und t als Dicke der optisch dichteren Schicht ansetzen (Abb. 9.5 rechts), ergibt sich

$$x = \tan \lambda \cdot (h + t) = \tan \alpha \cdot h + \tan \beta \cdot t. \quad (9.3)$$

Damit ist zunächst $\lambda(\alpha) = \tan^{-1}(\tan \alpha \cdot h + \tan \beta \cdot t / (h + t))$ darstellbar und könnte Anlass für eine Anwendung von wichtigen Sätzen aus der Infinitesimalrechnung außerhalb der Analysis sein. Auch andere Fragen lassen sich daran anschließen, etwa: “Vergrößert sich der Sehwinkel auf einen Gegenstand oder Abschnitt unter Wasser *in jedem Fall?*” Eine solche Frage ist reizvoll, weil sie die höchste Anforderungsstufe des Kompetenzbereichs “Erkenntnisgewinnung” tangiert. Für eine Behandlung müsste man den Blickwinkel $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ (o. B. d. A. sei $\lambda_2 > \lambda_1$) ohne Wasser auf einen sagittal orientierten Abschnitt auf dem Beckenboden und den Blickwinkel $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ vergleichen. Zwar gelten $\alpha_i = \alpha(\lambda_i)$ und $\alpha_i > \lambda_i$ ($i = 1, 2$), aber gilt auch

$$\Delta\alpha > \Delta\lambda? \quad (9.4)$$

Wir werden in Abschnitt 9 ein anschaulich-geometrisches Argument für das Zutreffen von Gleichung (9.4) geben.

Ergänzung: Ein genauerer Blick auf die realen Modalitäten des Einblicks

Der Physikdidaktiker Andreas Müller hat in einem persönlichen Gespräch kritisiert, dass Überlegungen wie in Abschnitt 9 implizit eine wesentliche Grundtatsache des Sehens vernachlässigen: das Auge bildet nicht eine einzelne Blickrichtung oder einen einzelnen Strahl, sondern einen kleinen, aber nicht verschwindenden Raumwinkel ab. Obwohl es als Erfahrungstatsache gelten mag, dass Überlegungen mit *einer* Blickrichtung die erfahrbare Wirklichkeit gut abbilden, wäre es wünschenswert, die Abbildungsverhältnisse *explizit und quantitativ* zu diskutieren. Dies könnte ein Lernhindernis darstellen und die korrespondierende fachliche Lücke soll in diesem Abschnitt so geschlossen werden, dass es mit Schülern nachvollzogen werden kann: Wir schätzen strahlenoptisch das örtliche Auflösungsvermögen der Abbildungssituation beim Einblick ins Becken ab.

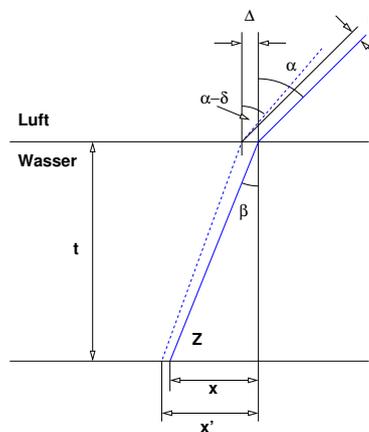


Abbildung 9.6.: Zur Ortsauflösung beim Einblick ins Becken: Der Hauptstrahl (blaue durchgezogene Linie) trifft in Z auf den Beckenboden. Der Randstrahl des durch die Pupille gehenden Strahlenbündels (blaue gestrichelte Linie) trifft die Wasseroberfläche im Abstand Δ und unter dem Winkel $\alpha - \delta$. Wir interessieren uns für $\Delta x = x' - x$.

Betrachten wir ein konvergentes Strahlenbündel mit Öffnungswinkel 2δ , dessen “Zentral- oder Hauptstrahl” unter dem Winkel α auf die Wasseroberfläche des Beckens trifft (Abb. 9.6). Dieses Strahlenbündel stellen wir uns als von einem Bildpunkt im Auge des Beobachters ausgehend vor, das auf die Stelle Z (Auftrittsstelle des Zentralstrahls auf dem Beckenboden) akkomodiert ist. Offenbar werden in der Sagittalebene oberhalb und unterhalb des Zentralstrahls liegende Strahlen beim Durchgang durch die Wasseroberfläche an anderen Stellen und unter anderem Winkel gebrochen, so dass die Konvergenz in Z nicht mehr unbedingt gilt – wir wollen

die daraus resultierende sagittale Größe des Urbildbereiches abschätzen. Dabei sei r der seitliche Versatz des Randstrahls gegenüber dem Hauptstrahl bei der Brechung, Δ der Abstand der Einblickstellen von Randstrahl und Hauptstrahl – offenbar gilt $r/\Delta = \sin(\pi/2 - \alpha) = \cos(-\alpha) = \cos \alpha$. Der Randstrahl trifft die Wasseroberfläche unter einem Winkel von $\alpha - \delta$ und den Beckenboden im Abstand $\Delta x := x' - x$ vom Hauptstrahl. Die beiden Strahlen haben in Wasser die Winkel $\beta = \sin^{-1}(\sin(\alpha)/n)$ bzw. $\beta' = \sin^{-1}(\sin(\alpha - \delta)/n)$ zum Lot der Wasseroberfläche. Dann sind

$$\begin{aligned} x &= t \cdot \tan \beta \\ x' &= \Delta + t \cdot \tan \beta' \end{aligned}$$

Um Δx auszuwerten, nehmen wir eine Reihe von Abschätzungen vor. Der Öffnungswinkel δ des Strahlenbündels entspricht etwa dem Verhältnis von Pupillenradius des beobachtenden Auges zum Abstand Auge – Blickziel, ist also recht klein. Damit ist (Taylorentwicklung um $\sin \alpha/n$)

$$\beta' \approx \sin^{-1}(\sin(\alpha)/n) - \frac{\delta}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha/n^2}} = \beta - \frac{\delta}{\cos \beta}. \quad (9.5)$$

Wir setzen $\delta' := \delta/\cos \beta$ und erhalten

$$\tan \beta' \approx \tan(\beta - \delta') = \frac{\tan \beta - \tan \delta'}{1 + \tan \beta \cdot \tan \delta'}. \quad (9.6)$$

Auch δ' ist ein recht kleiner Winkel, denn $\cos \beta$ kann nicht kleiner werden (Grenzfall $\alpha \rightarrow \pi/2$) als $\cos(\sin^{-1}(1/n)) \approx 2/3$. Mit $\tan \delta' \approx 0$ reduziert sich Gleichung 9.6 zu $\tan \beta' \approx \tan \beta$. Insgesamt erhalten wir in dieser Näherung

$$\Delta x \approx \Delta = \frac{r}{\cos \alpha}. \quad (9.7)$$

Wir erhalten eine anschauliche Faustregel: *Die Ortsunschärfe des Urbildes ist – für nicht zu flachen Einblick – in der Größenordnung des Pupillenradius des beobachtenden Auges.*

Beobachtungen

Wie wenig die Effekte ausgedehnter Strahlenbündel die Urteile über scheinbare Nähe/Lage von Blickzielen berühren, zeigt der Blick durch *pinholes*, die den Querschnitt des Strahlenbündels künstlich reduzieren. Die Frage, ob und ggf. wo abbildende Strahlenbündel auf der Urbildseite konvergieren (vgl. die Diskussionen in (Nasser, 1994) oder (Dittmann & Schneider, 1989)) scheint für die in Abschnitt 9 diskutierten Effekte bestenfalls zweitrangig – es kommt für Richtungs- und Entfernungsurteile normalerweise zunächst und vor allem auf die *Konvergenz der Sehachsen* der beiden Augen an (siehe auch (Metzger, 1975)). Das Auftreten von Farbsäumen an transversalen Kanten in kontraststarken Mustern auf dem Beckenboden legt

zudem nahe, dass die Unschärfe aufgrund von Dispersion ähnlich groß (oder größer) ist.⁴ Offenbar ist es keine unzulässige Ungenauigkeit, beim Einblick ins Becken sich für die Diskussion der Brechungseffekte auf diese Achsenrichtungen zu beschränken. Für Distanzen jenseits der ausgestreckten Arme ist dann sogar “zyklopisches”, also ein scheinbar einäugiges, reines Richtungssehen eine gute Näherung (Metzger, 1975).

Komplexe Probleme: Die Hebungskonchoide

Unter diesen Voraussetzungen ist ein weiterer Untersuchungsschritt möglich: die quantitative Analyse der Verzerrung. Wieviel Raum man einem solchen Thema in der Oberstufenphysik einräumen wird, sei dahingestellt – das wesentliche Werkzeug, die *Hebungskonchoide* wurde jedenfalls als Vertiefungsthema im Hinblick auf das Abitur entwickelt (Grebe-Ellis et al., 2002) und die Physik ist spannend. Wir entwickeln hier diese Diskussion vor allem in geometrischer Hinsicht weiter, wodurch es – ähnlich wie in den vorherigen Abschnitten für die Infinitesimalrechnung – auch für den Mathematiklehrer interessant werden mag.

Bei flacher Einsicht ins Becken ist der Gesamteindruck des durch die Brechung verzerrten Beckenbodens der einer Art Wanne (Abb. 9.2 rechts, vgl. aber auch (Minnaert, 1999)), die *scheinbare Position* eines Bodenpunktes beim Blick auf den Beckenboden durch eine Wasserschicht lässt sich analytisch angeben.⁵ Da die Brechung nur Richtungsänderungen der Lichtwege in sagittaler Richtung wirkt, reicht es aus, die scheinbare Höhe y eines Bodenpunktes (bezogen auf das Niveau der Wasseroberfläche) in Abhängigkeit des Abstandes x des Bodenpunktes von einem Punkt auf dem Beckenboden senkrecht unter dem Beobachterstandpunkt anzugeben: x und y genügen der Konchoidengleichung

$$\frac{y^2}{(y+h)^2} \cdot x^2 \cdot \frac{n^2-1}{n^2} + y^2 = \frac{t^2}{n^2}. \quad (9.8)$$

Dabei sind h und t wiederum die Höhe des Beobachters über der Wasseroberfläche bzw. die Tiefe des Beckens und n der Brechungsindex des optisch dichten Mediums.

⁴Die hier besprochene “Urbild-Unschärfe” wird Kontraste bzw. Kanten verwischen und es darum *schwerer* machen, Farbsäume zu sehen. Die fragliche Abbildungsunschärfe macht sich also bei schlechter Beleuchtung (große Pupille!) und flachem Einblick (i. e. $\cos \alpha \rightarrow 0$) dadurch bemerkbar, dass sie die Farbsäume verschwinden lässt. Für einen realistischen Eindruck des Verhältnisses von Unschärfe durch Dispersion und Unschärfe durch $\delta > 0$ vgl. auch das überraschend scharfe Bild bei Beleuchtung des Beckenbodens mit einer hellen Na-Spektrallampe.

⁵Die Darstellung (9.8) in (Grebe-Ellis et al., 2002) verdanken wir dem Kasseler Mathematiklehrer Peter Baum, die Herleitung wird in der frei zugänglichen Dissertation von Pascal Guderian (Guderian, 2006) referiert.

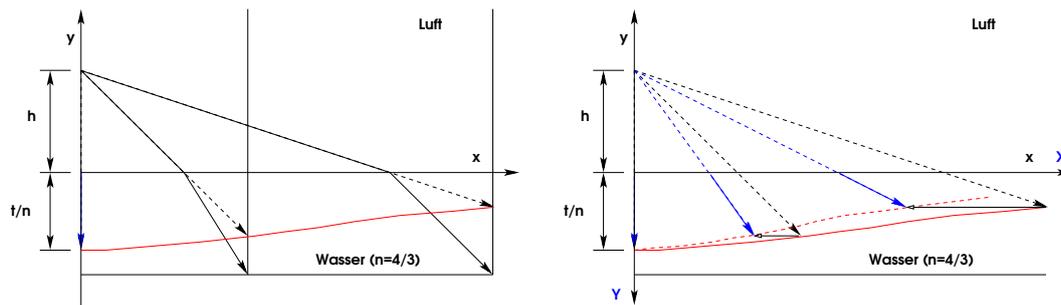


Abbildung 9.7.: Die Hebungskonchoide: Links zeigt die rote Linie schematisch die scheinbare Position des Beckenbodens, wie sie sich bei senkrechter Hebung gemäß dem Snellius'schen Gesetz ergibt. Rechts der Übergang auf die neuen Koordinaten X und Y : Die X -Skala ist gegenüber der x -Skala kontrahiert, die Länge der durchgezogenen blauen Pfeile ist in allen Blickrichtungen gleich, vgl. Text. Der "Versatz" zwischen x - und X -Koordinate ist proportional zu x .

Als neuen Schritt wollen wir diese Gleichung noch genauer geometrisch auswerten und interpretieren. Die Koordinatentransformation

$$X = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{n^2}} x \quad Y = y + h$$

führt Gl. 9.8 in die (kartesische) Normalform der Konchoidengleichung

$$(Y - h)^2 \cdot (X^2 + Y^2) = \frac{t^2}{n^2} Y^2$$

über. Der Pol dieser Konchoide entspricht der Beobachterposition, die Skala der Y -Achse ist im Vergleich zur y -Skala um h nach unten verschoben, die X -Skala ist im Vergleich zur x -Skala kontrahiert – Abb. 9.7 zeigt schematisch beide Kurven: Links die "real gesehene" Konchoide im (x, y) -System, die sich aus der nur scheinbar geradlinigen Sichtverbindung zu Punkten auf dem Beckenboden ergibt, rechts gestrichelt die Konchoide im (X, Y) -System.

Aus dieser Konstruktion ergeben sich einige neue Folgerungen. Zunächst ergibt sich eine anschauliche Antwort für die in Gleichung 9.4 formulierten Frage danach, ob ein sagittal orientierter Abschnitt immer vergrößert erscheint: Die Hebungskonchoide stellt den scheinbaren Ort dar, an dem Punkte des Beckenboden in bestimmten Abstand gesehen werden, und sie ist überall zum Beobachter hin geneigt – ein sagittaler Abschnitt entspricht also zwei Punkten auf der Konchoide mit demselben Δx , der Abschnitt ist zum Betrachter hin geneigt, erscheint also immer länger als ohne Wasser.

Der Übergang von (x, y) -Koordinaten zur Normalform in (X, Y) -Koordinaten bedeutet geometrisch, dass wir auf ein Bezugssystem wechseln, in dem die Wasseroberfläche die Leitgerade und die Höhe des Beobachters über der Wasseroberfläche unverändert h ist. Im (X, Y) -System liegt das scheinbare Bodenprofil dann gerade so, dass der Abstand zwischen Wasseroberfläche und Boden für jede "Blickrichtung" des Beobachters t/n beträgt – umgekehrt lässt sich dieser "Erhaltungssatz" auch als einfache Konstruktionsregel für die scheinbare Lage des Beckenbodens im (X, Y) -System lesen. Für das (x, y) -System ergibt sich die *real gesehene* Hebungskonchoide durch Streckung der x -Skala um einen konstanten Faktor c gegenüber der X -Skala, wobei offenbar fernere Konchoidenpunkte um größere Strecken "in die Ferne gerückt werden" als nahe (vgl. die waagrechten Verschiebungen in Abb. 9.7 rechts). Auch dieser Faktor lässt sich geometrisch interpretieren: Mit den Werten für "streifenden Einblick" ($\alpha \rightarrow \pi/2$) ist $n = 1/\sin \beta_s$ und damit

$$c = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{n^2}} = \sqrt{1 - 1/n^2} = \sqrt{1 - \sin^2 \beta_s} = \cos \beta_s. \quad (9.9)$$

Streifender Einblick heißt dabei "sehr große x Werte für die Einblicksstelle und praktisch waagrechte Sichtrichtung". Die scheinbare Entfernung des Blickziels von der Wasseroberfläche ($= t/n$ im (X, Y) -System) nimmt also im (x, y) -System für $\alpha \rightarrow \pi/2$ gerade um einen Faktor c zu. Dieser Faktor entspricht gerade dem Verhältnis von tatsächlicher Wassertiefe t und dem Abstand Einblicksstelle – Blickziel auf dem Beckenboden unter einem Winkel β_s der Sichtverbindung.

Mit der durch die Hebungskonchoide gegebenen scheinbaren Lage des Beckenbodens lassen sich durch Zentralprojektion leicht "virtuelle Ansichten" der Situation erstellen (Abb. 9.8): Wir bringen zwischen "Beobachter" B und gehobenen Blickziel einen Schirm ein und markieren die Durchstoßpunkte von geeigneten Projektionsstrahlen auf dem Schirm. Solche Darstellungen sind spannend, weil sie die Beeinträchtigung durch die spiegelnde Wasseroberfläche vermeiden und sich numerisch auswerten lassen. Die Berechnung der Positionen dieser Bildpunkte ist elementare analytische Geometrie, angewendet auf die Eckpunkte kleiner Kacheln ergeben sich plastische Bilder der Hebungsgometrie (Abb. 9.9) – hier ist der geometrische Abstand zwischen B und Beckenboden fast vollständig mit Wasser gefüllt ist. Die Hebungskonchoide begegnet uns dabei als das (von der Blickrichtung ja unabhängige) Profil einer scheinbaren Mulde im Beckenboden, in größerem Abstand scheint der Beckenboden direkt unter der Wasseroberfläche zu "kleben". Diese Ansicht ist dabei völlig analog zu Abb. 9.2 rechts.

Eine letzte vertiefende Überlegung, die daran anschließt: Am ebenen Spiegel erscheinen für einen Beobachter im Spiegel Ansichten der Umgebung, die nicht nur "spiegelverkehrt" sind, sondern auch zu einem anderen Blickwinkel gehören. In ei-

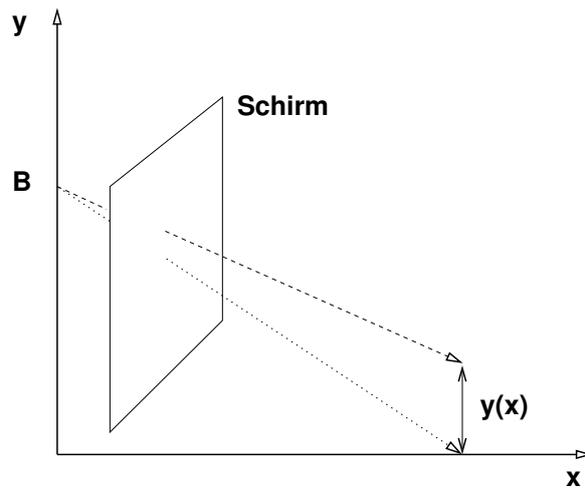


Abbildung 9.8.: Die Konstruktion der Zentralprojektion von gehobenen Punkten des Beckenbodens: Von B aus werden Bildpunkte auf einem Schirm markiert. Die gepunktete Linie zeigt den Verlauf der Sichtverbindung bei direkter Sicht, die gestrichelte Linie den Verlauf für den um $y(x)$ gehobenen Bodenpunkt.

ner Optik der Bilder wird dieser Sachverhalt nicht als “Reflexion” (etwa von Lichtstrahlen) diskutiert, sondern im Rahmen des “Spiegelraums” – die jeweilige Ansicht im Spiegel lässt sich verstehen, wenn man sich an die Stelle des eigenen Spiegelbildes versetzt und nachvollzieht, was durch ein “Fenster” am Ort des Spiegels zu sehen wäre... Die Spiegelansicht wird so *integral* verständlich (Theilmann, 2008a) und das Reflexionsgesetz ergibt sich als Geometrisierung dieser Einsicht. Die Verzerrung des ebenen Beckenbodens durch die Brechung an der Grenzfläche nach Gleichung (9.8) macht allerdings klar, dass sich die Ansicht eines gehobenen Beckenbodens nicht durch eine einfache Transformation – insbesondere nicht durch eine Translation des Beobachterstandpunktes – ergibt. Anders gesagt: Es gibt für einen gegebenen Beobachterstandort im Allgemeinen keinen zweiten Standort, von wo aus das *leere* Be-

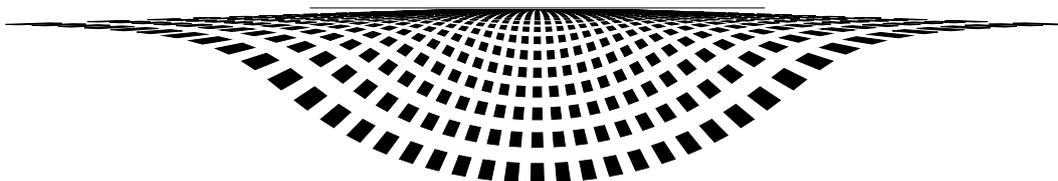


Abbildung 9.9.: Zentralprojektion eines nach Gl. 9.8 gehobenen Kachelmusters – vgl. auch Abb. 9.2 rechts. Für einen möglichst realistischen Eindruck sollte die Horizontlinie auf Augenhöhe gehalten werden und der Betrachtungsabstand gut die halbe Bildbreite sein.

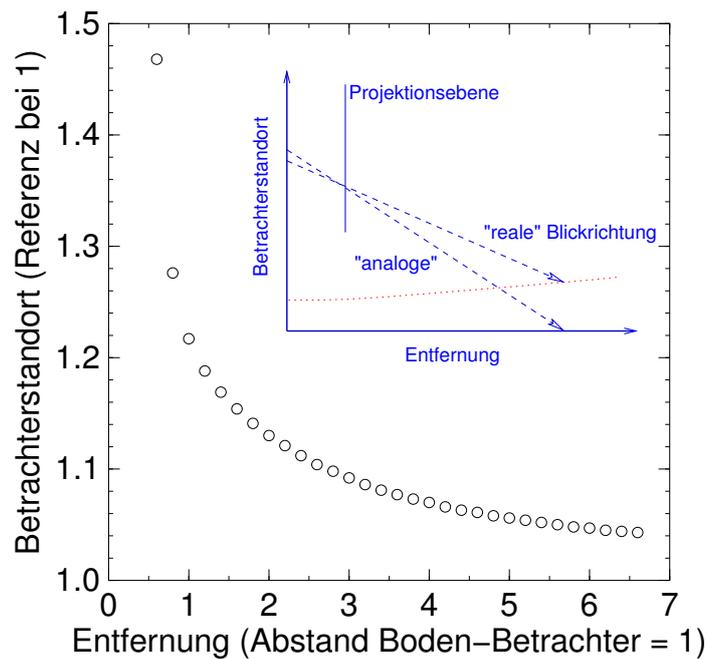


Abbildung 9.10.: Scheinbare Beobachterhöhe (h in Abschnitt 9) als Funktion des Abstandes x des angeschauten Beckenbodenpunktes. Die blaue Graphik erklärt die Konstruktion: Die “reale” Blickrichtung ergibt sich als direkte Sicht auf den gehobenen Beckenboden. Von wo aus sähe man *ohne Wasser* einen bestimmten Bodenpunkt am gegebenen Bildpunkt? Diese Position ergibt die “analoge” Blickrichtung. Die Längeneinheit ist der tatsächliche Abstand Beobachter – Beckenboden, der Abstand der Projektionsebene vom Beobachter ist 0.4, die Wassertiefe 0.7.

cken so aussieht, wie mir vom ersten Standpunkt aus das *gefüllte* Becken erscheint.

Andererseits lässt sich fragen, ob nicht eine Art “schwache Analogie” gilt, also ob etwa für *einzelne* kleine Kacheln im gefüllten Becken so ein “Ersatzstandpunkt” näherungsweise angebar ist. Eine solche Überlegung hätte Ihren didaktischen Wert im Kontext von Themenkreisen wie “Erkenntnisgewinnung” und “*Nature of Science*”. Die Abbildung 9.10 zeigt das Ergebnis einer solchen Untersuchung: Für eine einzelne Kachel wird die Ansicht/Projektion des gehobenen Urbilds (“reale Blickrichtung”) nicht als Hebungseffekt, sondern als senkrechter Positionswechsel von B interpretiert, so dass die nicht gehobene Kachel (Sichtsituation “leeres Becken”) gerade an der Stelle des Schirms liegt, an der sie mit gefülltem Becken erscheint (“analoge Blickrichtung”). Die Abbildung 9.10 zeigt die Abhängigkeit von “scheinbarer Beobachterhöhe” und Entfernung des Blickziels. Wie nach Abbildung 9.9 zu erwarten, macht sich der Effekt vor allem in näheren Umkreis des Beobachters geltend.

Schlussbetrachtung

Die Brechung von Licht an ebenen Grenzflächen zwischen Medien verschiedener optischer Dichte ist ein Thema, das formal relativ übersichtlich, in den Effekten auf die sich ergebenden Ansichten allerdings durchaus komplex ist. Die traditionelle oder “klassische” Darstellung der Optik in diesen Fällen erfolgt aus abgelöster, strahlenoptischer Perspektive (Niedrig, 1993; Born, 1970), die dann für den Schulgebrauch entsprechend elementarisiert wird. Vor allem aus didaktischen Motiven heraus wurden in den letzten Jahrzehnten daneben eingebundene, “bildoptische” Zugänge entwickelt, die dabei durchaus auch quantitative Aspekte anspruchsvoll berücksichtigen, siehe etwa (Grebe-Ellis et al., 2002). In beiden Linien ist das Verständnis für den Wert des jeweils anderen Zugangs inzwischen soweit gewachsen, dass eine Integration abgelöster und eingebundener Betrachtungsweisen und Experimente wünschenswert und möglich erscheint (vgl. etwa (Sommer & Meinzer, 2009; Theilmann et al., 2009)). Im vorliegenden Text wird die wohl einfachste “Brechungssituation” in diesem Sinn für eine Reihe elementarer und weiterführender Fragestellungen diskutiert, wobei der Schwerpunkt in einem genaueren Verständnis davon, was “Hebung” meinen kann, und in den Auswirkungen der brechenden Grenzfläche auf die perspektivischen Verhältnisse liegt. Das Anliegen ist, strahlenoptische Überlegungen an mögliche Beobachtungen aus der eingebundenen Perspektive anzuschließen (und *vice versa*), wobei hier nicht speziell ein Strahlenmodell von Licht vorausgesetzt wird, sondern die Strahlen typischerweise für konkrete Blickrichtungen, für Begrenzungen von Blickwinkeln oder allgemeiner für Lichtwege stehen. Die Anordnung der in diesem Text diskutierten Probleme versucht dabei einen zusammenhängenden Diskussionsbogen zwischen ursprünglicheren und raffinierten Aspekten des *Blicks ins Becken* zu schlagen. Die Vielfalt von möglichen Fragen, Bezügen, Methoden und Beobachtungen überrascht ob des scheinbar einfachen Themas – und lässt es gerade darum lohnend erscheinen.

10. Pingpong im Nebenzimmer – Energie und Kinematik springender Bälle¹

Ein Gutteil der Schulmechanik handelt von der Bewegung von Körpern unter dem Einfluß äußerer Kräfte, insbesondere der Schwerkraft. Für die Behandlung solcher Bewegungen ist es in vielen Fällen eine spürbare Erleichterung, nicht nur mit Kräften, sondern auch mit *Energie* (bzw. deren Erhaltung) zu argumentieren – bei Schwingungen, Stößen oder beim *looping* sind auf diese Weise kinematische Größen gut zugänglich. Die Frage, was diese Energie eigentlich ist, bekommt dabei meist weniger Aufmerksamkeit, jenseits der formalen Verwendung liegt zwar ein klar umrissener konzeptioneller Rahmen, inhaltlich wird es aber schnell diffus. Damit einher geht die Versuchung, sich in der Mechanik auf reibungs- bzw. verlustfrei vorgestellte Systeme zu beschränken – und so die Kluft zwischen Lebenswelt und Physik zu vergrößern. In diesem Beitrag möchten wir den in (Theilmann & Rehm, 2005) dargestellten Ansatz von “Arbeit, Energie und Leistung als Prozessgrößen” kurz skizzieren und zeigen, wie unter solchen Gesichtspunkten aus konventionellen Inhalten der Mechanik eine spannende und lehrreiche “physikalische Expedition” werden kann.

Der Vorgang in der Zeit

Arbeit, Energie und Leistung gehören zu zentralen Inhalten der Mechanik, Energie ist sogar eines der Basiskonzepte, die unsere Curricula strukturieren. Unsere Alltagserfahrung bietet allerlei Anknüpfungspunkte, vor allem im Umfeld des Tätig-Werdens und der Technik. Wir interessieren uns für die Leistung von Autos oder elektrischen Geräten; wir haben gerade viel oder wenig Arbeit und denken dabei etwa an Berge von Bügelwäsche oder Papieren; man hat oder hat nicht Energie, um abends noch auszugehen. Und: es gibt ein weites Feld existenzieller Erfahrungen mit körperlicher Anstrengung – doch gerade diese sind gar nicht so leicht zu konzeptualisieren (Heithecker, 2006; Theilmann, 2006a). Erklärend sagt man den Schülern vielleicht “Energie ist gespeicherte Arbeit” oder “ist die Fähigkeit, Arbeit zu leisten”²

¹Erschienen in *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)* 63/7, S. 407 – 412.

²Sieht man modernere Schul- und Studientexte daraufhin durch, scheint die Unterscheidung von Arbeit und Energie sogar langsam ganz zu verschwinden, indem von Arbeit als eigenständiger Größe gar nicht mehr die Rede ist, sondern sie gleichsam als aktuelle Veränderung der Energiebilanz

und "Leistung ist Arbeit pro Zeit". Mechanische Arbeit im physikalischen Sinn ist "bestimmtes Kraftaufbringen über (genauer: entlang) eine gewisse Wegstrecke", und damit sind eine ganze Reihe von Abstraktionen entweder schon impliziert oder noch zu machen. So soll etwa keine Rolle spielen, wie die Kraft aufgebracht wird, die Dauer des Vorgangs interessiert für dieses Verständnis von Arbeit nicht, für vollbrachte Arbeit "zählt" die Kraft nur gegen die Wegrichtung. Der Vorgang wird durch die Reduktion auf Quantität einerseits *unsinnlich*: Nicht das Erlebnis oder die Situation interessiert, sondern lediglich: wie stark wird gedrückt oder gezogen und wie weit? Er wird andererseits *unwirklich*, indem die tatsächlich aufgebrauchte Anstrengung zum Teil nicht als Arbeit anerkannt wird. Lastentragen treppab ist zwar leichter als treppauf, aber dennoch mühevoll (vgl. auch (Labudde, 1993)).

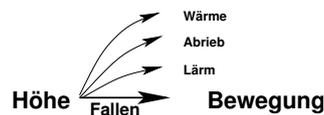
Eine andere Art, sich diesen Begriffen zu nähern, entsteht, wenn man sich klar macht, dass Energie ein Konzept ist, dass fast immer dazu verwendet wird, *Vorgänge* zu beschreiben. Ein Einstieg dazu kann der Blick auf die drei Grund-Zeitstufen – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft – sein. Speziell der Blick auf das "Vorher" eines Vorgangs ist immer der Blick auf ein Umfeld mit *Möglichkeitscharakter*. Diese Blickweise lässt sich an vielerlei Beispielen wie "Hausbau", "Abendessen", "Wanderung" erproben: Ein Abendessen mit Freunden bedarf der Einladung, des Einkaufs, einer Idee davon, was es geben soll, der handwerklichen Fähigkeit des Kochens und einer funktionierenden Küche. . . Die extensive Seite des Vorgangs findet dabei ihre Entsprechung in einem "je mehr . . . , desto" einzelner Vorbedingungen: mehr Gäste erfordern mehr Lebensmittel oder Getränke, eine große Tour braucht bessere Kondition und macht mehr Hunger als ein Nachmittagsspaziergang etc. Der Vorgang mit seinem konkreten Vorher, Vollzug und Vollbrachtem ist, worauf die Begriffe Energie, Leistung und Arbeit verweisen. Die oben geschilderten Abstraktionen hin auf eine rein quantitativ-berechenbare Beschreibung konkreter Vorgänge liefern uns Energie als (quantitatives) Möglichkeitsmaß (etwa die durch eine Tankfüllung Benzin zur Verfügung stehende Energiemenge und den sich daraus ergebenden voraussichtlichen "Aktionsradius"), Leistung als Quantifizierung der Aktivität oder Heftigkeit des Vorgangs (in diesem Beispiel dann die "Vollgasfahrt", "Sparfahrt" etc. von A nach B) und der Arbeit als Ergebnis (in diesem Beispiel dann die zurückgelegte Wegstrecke).

Ein typisches Lernziel für den Physikunterricht ist die Verwendung von "Energieansätzen", also das Aufstellen geeigneter Gleichungen, zur Berechnung von Vorgängen wie "Bergabrollen eines Fahrrades aus der Höhe h ". Man sagt, "die Lageenergie wird zu Bewegungsenergie umgewandelt", schreibt " $mgh = mv^2/2$ " und kann anfangen zu rechnen. Sofern man Umverteilung von Energiesubstanz im Sinn hat, ist diese Art Bilanz ein naheliegender Gedanke, der reale Vorgang, bei dem auch noch Luftwiderstand oder ein vorsichtiges Bremsen vor der Kurve dabei sind,

verstanden wird.

wird so allerdings nicht wirklich beschreibbar, sondern Anlass zur Rechenaufgabe. Und schlimmer noch – die Sache bietet Anlass für Verwirrung (die anstecken kann), wenn der Schüler wirklich nachdenkt: “Wieso soll das gleich sein? Die Höhe verschwindet ja gerade, während die Geschwindigkeit v zunimmt; ist h jetzt Höhe (wie in der Definition der Lageenergie) oder Fallstrecke...?” – der Energieansatz blendet den (“Umwandlungs-”)Vorgang aus. In diesem Text wollen wir gerade für das Gegenteil werben: wir sollen uns mehr für die Vorgänge interessieren, weil auf diesem Weg ein vielfältigeres und besser kontextualisiertes Verständnis der relevanten Physik entsteht.

Beschreiben wir konkrete Vorgänge also zunächst mit Worten – ein Akku treibt einen Elektromotor, mit dessen Hilfe Schrauben eingedreht werden; Treibstoff betreibt einen Motor, der einen Wagen von A nach B bewegt; ein Fahrradfahrer saust den Berg hinunter und kommt mit dem Schwung ein gutes Stück den Gegenhang hinauf. Als ersten Formalisierungsschritt empfiehlt sich eine Art “Reaktionsgleichung”, die anders als die bekannten “Energieflussdiagramme” noch nicht auf Energieformen, sondern die lebensweltlichen Begriffe abstellt:



Eine solche Darstellung ist hilfreich, wenn man (sich) klarmachen will, was man einsetzt, was man erreichen will und was sonst noch stattfindet. Jeder konkrete Vorgang wird nicht nur den einen gewünschten Effekt zeigen, sondern auch Seiten, die sich nicht mehr nutzen lassen werden oder sonst unerwünscht sind. Soll dann auch gerechnet werden, lassen sich die einfließenden Näherungen (Reibung weglassen etc.) lokalisieren, das Ergebnis lässt sich als idealisierte Darstellung einordnen. Abb. 10.1 zeigt eine Schülerdarstellung für das komplexere Beispiel eines zyklischen Prozesses, das Schwingen eines Federpendels.

Ballgeschichten

In Jacques Tatis Filmklassiker “Die Ferien des Monsieur Hulot” gibt es eine Szene, in der visuell (fast) nichts passiert, aber ein Tischtennispiel im Nebenraum vom (zunehmend entnervten) Zuschauer anhand der Spielgeräusche mitverfolgt werden muss. Charakteristisch ist dabei das *Taktaktatata*, wenn der Ball außer Spiel gerät: Wir hören dabei Mechanik, nämlich die sich ereignenden Kraftstöße, wenn der Ball nach einer Flugphase auf den Boden prallt. In der Sequenz steckt also einerseits die typische “Schul-Dynamik” (Fallgesetze etc.), das Geräusch der Sprungfolge erzählt uns aber auch eine kompliziertere Geschichte: die Sprunghöhen nehmen ab,

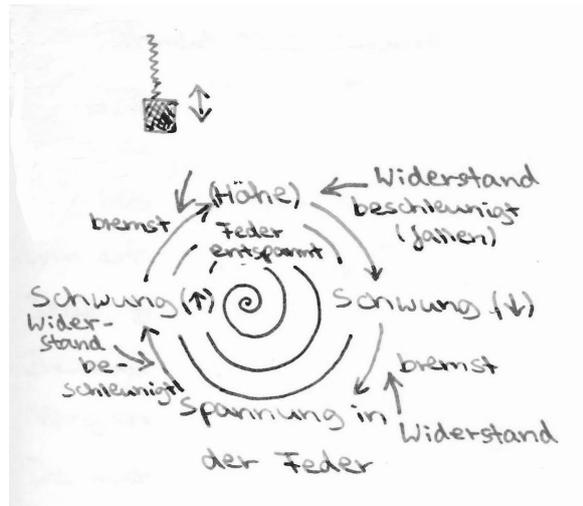


Abbildung 10.1.: Der Vorgang “Schwingen eines Gewichtes an einer Feder” (Skizze oben links) in einer Art Prozessdiagramm: “Höhe” impliziert die Möglichkeit zum Fallen, also *Lageenergie*; wird tatsächlich gefallen, entsteht “Schwung” (abwärts!), also die Möglichkeit sich gegen den Widerstand der sich dehnenden Feder weiterzubewegen (*kinetische Energie*); die Spannung der Feder unterhalb der Ruhelage “verzehrt den Schwung”, eröffnet aber die Möglichkeit für Bewegung gegen die Fallrichtung, also wiederum potentielle Energie bzw. “*Federenergie*”; nach Durchlaufen des unteren Umkehrpunktes beschleunigt die schwingende Masse nach oben, ihr “Aufwärtsschwung” ermöglicht Bewegung gegen die Schwerkraft oberhalb der Ruhelage. Bewegungswiderstände verhindern, dass sich der Kreis schließt: die “Trajektorie” des Vorgangs in diesem “Phasenraum” wird zur Spirale!

es geht Energie und Impuls verloren. Unser Ansatz war es nun, diese Geschichte ernst zu nehmen und die physikalische Diskussion nicht auf den idealisierten Fall zu beschränken. Dabei entsteht eine “physikalische Expedition”, die gut zu einem Unterrichtsstil der *guided discovery* (vgl. (Langlet, 2010)) passt und vielfältige Anknüpfungspunkte für erkundendes Lernen und andere Lerneraktivitäten, sowie zur Stärkung der Kompetenzen in den Bereichen Erkenntnisgewinnung und in metawissenschaftlichen Fragen bietet (vgl. auch (Kraus, 2010; Hammann, 2004)). Wir skizzieren im Folgenden die von uns gewählte Route. Es ist dabei klar, dass ein solcher Unterrichtsansatz eine weitgehend offene Dramaturgie erfordert. Mechanik wird nicht als geschlossene Systematik, sondern als Werkzeugkasten für erleb- und nachvollziehbare Probleme inszeniert, mechanische Inhalte erscheinen weniger als formale Konzepte, sondern als Werkzeuge eines sich entwickelnden Verstehens.

Jede Flugphase lässt sich in eine Steig- und eine Fallphase aufteilen, die durch das Erreichen des Scheitelpunktes der Bahn getrennt sind. Während ersterer ermöglicht anfänglicher “Aufwärtsschwung” das Steigen gegen die “bremsende Schwerkraft”,

Die Sprunghöhen h_n des frei springenden Balls nehmen in der Sprungfolge kontinuierlich ab. Wir wollen Kinematik und Dynamik des Vorgangs näher untersuchen:

1. Zeichnen Sie ein schematisches v - t -Diagramm für einige solche Sprünge (v nach oben sei positiv).
2. Welchen Impuls hat der Ball bei einem Flug der Dauer T zwischen Absprung und Aufprall (wir vernachlässigen den Luftwiderstand)? Zeigen Sie, dass in dieser Näherung gilt $\Delta p = mgT$ und berechnen Sie Zahlenwerte für $T=0.5$ s und einen Wettkampfball von 2.7 g.
3. Diskutieren Sie, welche Dämpfungsmechanismen in der Realität mit-spielen könnten und wie der Übergang zum ruhenden Ball für größere Zeiten aussieht.
4. Leiten Sie die Beziehung von Sprunghöhe h und der Zeit T zwischen zwei Taks in der Näherung "Die bekannten Fallgesetze gelten" ab. Wenn im realen Fall $h_{n+1} = \lambda h_n$ (mit $\lambda < 1$), wie ist dann die Beziehung zwischen T_{n+1} und T_n ?
5. **Vertiefung:** In erster Näherung wird die Luftreibung beim Tischtennisball proportional zu seiner Geschwindigkeit sein. Erstellen Sie mit diesem Wissen ein realistischeres v - t -Diagramm! Wohin geht der fehlende Impuls? Ist die Annahme einer geometrischen Folge h_n für die Sprunghöhen dabei realistisch? Wenn nein – unter- oder überschätzt man damit die Verluste?

Kasten 10.1: Einstiegsaufgaben zur Kinematik einer Sprungfolge eines Tischtennisballs.

während zweiterer verrichtet die Schwerkraft Beschleunigungsarbeit:



In beiden Fällen wird auch Luft mitbewegt – und dieser Aufwand geht für den Ball verloren und es ist schon deshalb plausibel, dass während einer Sprungserie die Sprunghöhen abnehmen werden. Weniger offensichtlich ist das Geschehen während des Aufpralls: Wie wird aus der Abwärtsbewegung des fallenden Balls die Aufwärtsbewegung des erneut abspringenden Balls? Offenbar muss dazu die Unterlage für die Dauer des Aufpralls eine entsprechende aufwärtsgerichtete Kraft auf den Ball ausüben. Analog zur Flugphase lässt sich die Aufprallphase in eine "Eindell-Phase" und eine "Ausbeul-Phase" unterteilen, die durch einen Moment maximaler Verformung des Balls getrennt sind. Und: auch hier gibt es neben der Ausübung des Kraftstoßes einen manifesten Nebeneffekt: *Schall!* Kasten 10.1 macht Vorschläge zu einigen

Einstiegsaufgaben dazu, die Inhalte wiederholen und auf die weitere Untersuchung einstimmen sollen.

Für quantitative Messungen benutzen wir einen Golfball und die Möglichkeiten, mit Mobiltelefonen, MP3-Spielern oder Laptop-Rechnern auf einfache Weise Tonaufnahmen zu machen. Sprungfolgen werden so akustisch aufgezeichnet, die entstandenen WAV-Dateien lassen sich mit freier Software öffnen, bearbeiten und analysieren. Dank der hohen Datenerfassungsraten lassen sich auf diese Weise die Aufschläge des Balls auf wenige Millisekunden genau auf einer Zeitachse lokalisieren. Abb. 10.2 zeigt oben links ein Bildschirmfoto des Auswertevorgangs und oben rechts eine Darstellung des Zeitverlaufs einer Sprungfolge. Das "Auslaufen" der Sprungfolge zeigt sich in der asymptotischen Annäherung der Folge von Aufprallzeitpunkten an eine horizontale Gerade.

Diese Beobachtung korreliert mit immer kürzeren zeitlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Aufprallereignissen. Diese Abstände lassen sich in einem Tabellenkalkulationsprogramm leicht aus der Liste der "Ereigniszeiten" gewinnen und wiederum für die Sprungfolge darstellen (Abb. 10.2 unten links). Das sieht zunächst ziemlich vertraut aus: Der Verlauf legt auf den ersten Blick die gewohnte exponentielle Abnahme der Sprungdauer nah. Doch wie ist das genau? Die Physik der Dämpfung bzw. der Verluste spricht sich gerade im Detail der Abnahme von Sprungdauer bzw. -höhe aus. Auch haben wir bereits durch Nachdenken zwei verschiedene potentielle "Verlustkanäle" identifiziert – Luftwiderstand und Schall. Finden wir empirische Hinweise dafür, dass tatsächlich beide eine Rolle spielen? Für eine genauere Analyse berechnen wir mit Hilfe der Tabellenkalkulation das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Sprungdauern. Für ein verlustfreies System wäre dies gleich 1, und es wird umso näher bei 0 liegen, je größer die Verluste sind. In Abb. 10.2 unten rechts ist das Ergebnis abgebildet. Zu Beginn der Sprungfolge liegt das Verhältnis knapp unter 92 % *und steigt dann an* – um ab ca. dem 20. Sprung mehr oder weniger konstant bei etwa 95 % zu bleiben.

Interpretation – und weitere Experimente

Die Abnahme der Verluste im Verlauf der ersten zwanzig Sprünge korrespondiert damit, dass die Sprunghöhe in unseren Versuchen von etwa einem Meter auf wenige Zentimeter abgenommen hat und damit auch die mittlere Geschwindigkeit während der Sprünge drastisch zurückgegangen ist. Da der jeweils wirksame Luftwiderstand umso größer ist, je schneller sich ein Gegenstand bewegt, liegt hier ein erster Hinweis darauf, wie (Abb. 10.2 unten rechts) interpretiert werden könnte: Indem der Ball sich über immer kleinere Strecken – und also langsamer – bewegt, fällt der Luftwiderstand als Verlustmechanismus immer mehr weg. Ein zuletzt konstantes

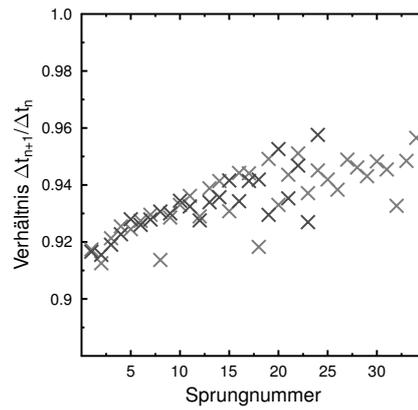
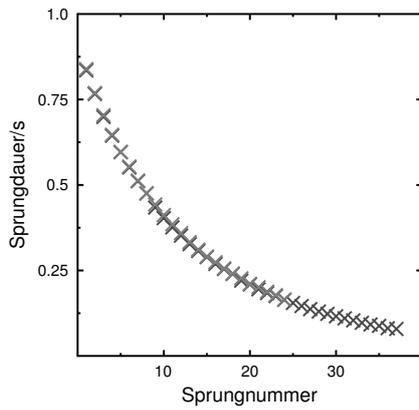
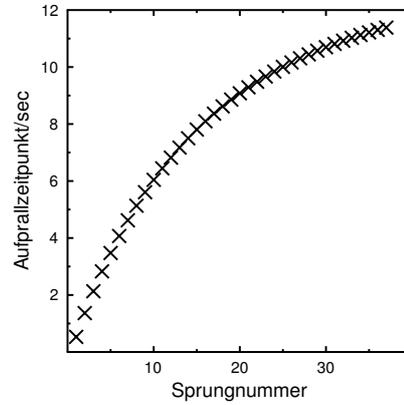
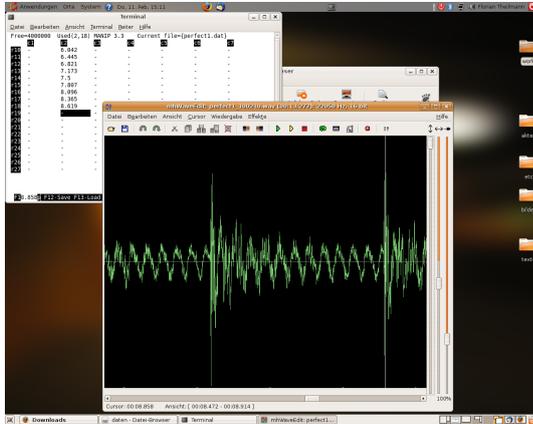


Abbildung 10.2.: Oben links: *Screenshot* der Auswertung einer Sprungfolgen-Tonspur. Oben rechts: Darstellung der Ergebnisse: Jeder Datenpunkt entspricht einem “Aufprallereignis”, die Folge nähert sich asymptotisch einem “Ruhezeitpunkt”. Unten links: Die Entwicklung der Sprungdauer innerhalb der Sprungfolge – die Sprünge dauern immer kürzer (und sind immer weniger hoch). Verschiedene Symbole gehören zu verschiedenen Messreihen. Unten rechts: Das Verhältnis der Dauer zweier aufeinanderfolgender Sprünge ist umso näher am Wert 1, je weniger (relative) Energieverluste auftreten – dieses Verhältnis ist für hohe Sprünge anders als für kurze (und niedrige) Sprünge! Verschiedene Symbole gehören zu verschiedenen Messreihen.

Verhältnis $\lambda = T_{n+1}/T_n$ für große n verweist uns (vgl. Aufgabe 3 in Kasten 10.1) auf ein ebenfalls konstantes Verhältnis $h_{n+1}/h_n = \sqrt{\lambda}$ der Sprunghöhen – und damit ($E_p(h) = mgh$) auch auf ein konstantes Verhältnis $E_p(h_{n+1})/E_p(h_n)$, also einen Energieverlust, der proportional zur Gesamtenergie des Balls ist. Ist dafür noch der Luftwiderstand verantwortlich?

Wir schätzen den Energieverlust ΔE durch Luftwiderstand als Funktion der Sprunghöhe ab:

$$\Delta E = \int_{\text{Sprung}} F_R(v) ds \approx \langle F_R \rangle \cdot 2h,$$

wobei $\langle F_R \rangle$ die über den Sprung gemittelte Kraft ist, in der sich der Luftwiderstand manifestiert. Für $F_R \propto v$ ist auch $\langle F_R \rangle \propto \langle v \rangle$ (Die Verallgemeinerung auf $F_R \propto v^\kappa$ mit $\kappa > 1$ ist offensichtlich). Mit $\langle v \rangle \approx v_{max}/2 \approx \sqrt{gh}/2$ ergibt sich so $\langle F_R \rangle \propto h^{3/2}$. Eine Abnahme der Sprunghöhe auf ein Zehntel geht in dieser Näherung also mit einer Abnahme des Energieverlustes ΔE durch Luftwiderstand auf ca. 1/30 des ursprünglichen Wertes einher. Damit ist die beobachtete Entwicklung von T_{n+1}/T_n für den Übergang “hohe Sprünge zu niedrigen Sprüngen” plausibel und auch grob quantifizierbar: 3 bis 4 % von 8 % Verlusten in Abb. 10.2 unten gehen auf Kosten des Luftwiderstandes. Die naheliegende Frage, was beim Aufprall passiert und ob Verluste durch Schall/Schockwellen (die Erschütterungen des Fußbodens durch den springenden Golfball sind zimmerweit zu hören...) zu den restlichen, nicht von h abhängigen Verlusten passen, wird im Ausblick und den Aufgaben in Kasten 10.2 noch berührt – zunächst wollen wir noch eine weitere Runde über der Kinematik des Vorgangs drehen.

Die hier gegebene Interpretation des Unterschieds “hohe Sprünge” und “niedrige Sprünge” (in Hinblick auf Verluste) lässt sich weiter stützen. Mit $p = mv$ und einer Reibungskraft F_R , die von v und der Geometrie des fallenden Körpers abhängt, lässt sich die Bewegungsgleichung für die senkrechte Bewegung (vgl. Aufgabe 1 in Kasten 10.1) als $\dot{p} = -mg - F_R(v)$ schreiben. Dividieren durch m ergibt

$$\dot{v} = -g - \frac{1}{m} F_R(v),$$

so dass sich Luftreibung umso weniger bemerkbar macht, je schwerer die Kugel ist. Der direkte Vergleich des Golfballs mit einem Tischtennisball zeigt dann auch, dass die Sprünge der beiden Bälle nach sehr wenigen *Taks* außer Takt geraten, wenn sie aus Tischhöhe fallen, aber über eine Reihe von Sprüngen synchron springen, wenn sie aus geringer Höhe losgelassen werden.

Für Tischtennisbälle lässt sich die Stärke der Luftreibung auch quantitativ behandeln: Für einen Fall aus einem oberen Stockwerk nimmt die Geschwindigkeit des Balls nach kurzer Zeit nicht oder kaum mehr zu. Dann gilt $\dot{v} \approx 0$ (bzw. $v \approx \tilde{v} =$

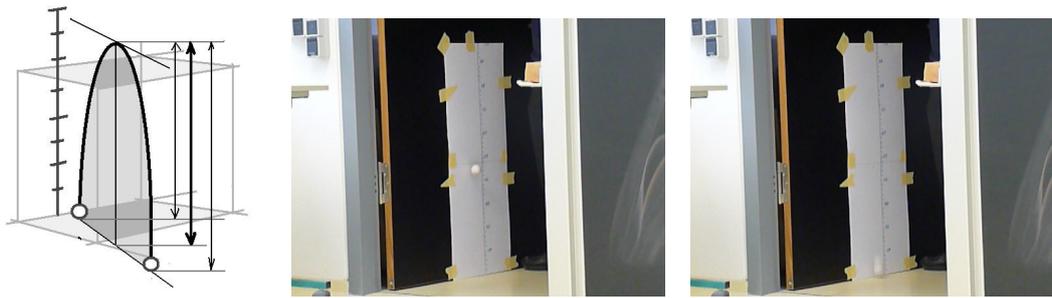


Abbildung 10.3.: Versuch zur Videoauswertung des springenden Balls: Um die Flugbahn des Balls zeitaufgelöst zu analysieren (links), wurde ein Video gedreht, dessen Standbilder dann mit Hilfe des Maßstabes im Hintergrund ausgewertet werden sollten. Während sich der Scheitelpunkt schön “einfangen” lässt (Mitte), “verwischt” das Bild des Balles während des schnellen Falles – eine quantitative Analyse bräuchte hier einerseits kürzere Belichtungszeiten, wird aber auch dadurch begrenzt, dass die Kamera nur eine bestimmte Anzahl Bilder pro Sekunde aufnimmt, “Zeitpunkte” also nur als “Zeitfenster” bestimmt werden können.

const. (mit der stationären Fallgeschwindigkeit \tilde{v}) und somit $-g = F_R(\tilde{v})/m$ (der Ball fällt, v ist dann in unserer Wahl negativ, F_R entgegengesetzt gerichtet, also positiv). Für den Ansatz $F_R(v) = \alpha v$ lassen sich die oben gemachten Näherungen leicht nachvollziehen – so springt unser Ball beim Fall aus ca. 1.8 m nur noch wieder etwa halb so hoch, was einem α von ca. 6.5 g/s bzw. einer stationären Fallgeschwindigkeit \tilde{v} von ca. 4 m/s entspricht. Dieser Wert lässt sich mit Werten von einigen m/s für den stationären Fall vergleichen, die sich durch Fallversuche im Treppenhaus ergeben.

Zusammenfassung und Ausblick

Trotz des banalen Sujets und der relativ einfachen Experimentieranordnungen ergibt sich rund um die springenden Bälle eine vielfältige und interessante Landschaft physikalischer Überlegungen mit exemplarischem Charakter: Fallgesetze, graphische Darstellungsformen, die Bewegungsgleichungen der Dynamik, Luftreibung, Datenerhebung und -interpretation, qualitative und quantitative Diskussion von “Verlusten” von Energie bzw. Impuls – diese und weitere Themen lassen sich einbeziehen und leisten ihre Beiträge auf einem physikalischen Untersuchungsgang. Dieser zielt nicht auf die (Re-)Produktion kanonischer fachlicher Ergebnisse, sondern lebt von der Fragehaltung, wie sich Schulphysik, Alltags- und Experimentiererfahrungen und Phantasie zur Aufklärung des Vorgangs verwenden lassen.

Der Anwendung, Wiederholung, Kontextualisierung etc. mechanischer Kerninhalte steht dabei die Entwicklung von Forschermentalität gleichrangig zur Seite. In

unserem Setting wurde dafür stark an die Eigeninitiative der Lerner appelliert – dass dabei Irrwege beschritten werden (Abb. 10.3) ist hinzunehmen, gelernt wird in diesem Beispiel trotzdem: nicht nur wurden die perspektivischen Bedingungen überzeugend und einfach analysiert, es wird auch das Konzept der Momentangeschwindigkeit unter nicht-idealisierten Bedingungen erfahren. Ähnlich wie das Interesse an den Abweichungen vom idealen Flug durch die beschriebene Sequenz führte, führt auch Interesse am Aufprallvorgang zu Fragen – Kasten 10.2 zeigt Beispielaufgaben, die auf Themen wie “Belastung des Untergrundes” oder “weiche vs. harte Bälle” eingehen.

Die Flugphasen sind offenbar Phasen eines permanenten Verlustes an “Aufwärtsgeschwindigkeit” bzw. “Verlust an Impuls nach oben”, die durch kurze “Aufwärtsstöße” unterbrochen werden, wenn der Ball aufprallt. Welche Spitzenbelastung erfährt der Untergrund dabei? Wir wollen dafür näher untersuchen, wie die Kraftstöße

$$\Delta p = \int_0^\tau dt F(t)$$

aussehen, wenn wir verschiedene konkrete Annahmen über den Kraftverlauf machen. Wir nennen τ die Dauer des Aufpralls und machen drei verschiedene Ansätze:

$$F(t) = \begin{cases} F_0 & \text{– also Kraft konstant während des Aufpralls} \\ 2F_0 t/\tau \text{ für } t \in [0, \tau/2] \text{ und } 2F_0(\tau - t)/\tau \text{ für } t \in (\tau/2, \tau] & \text{– “}\Delta\text{-Profil”} \\ F_0 \sin(\frac{\pi}{\tau}t) & \text{– “Sinusbeule”} \end{cases}$$

1. Skizzieren Sie die jeweiligen Kraftverläufe als Funktionen der Zeit. Integrieren Sie explizit und vergleichen mit dem Ausdruck für Δp aus Teilaufgabe 2 aus Kasten 10.1 – welche Werte ergeben sich für F_0 als Funktion von m , g , T und τ ?
2. Erklären Sie, wie verschiedene Weichheit bzw. Härte zweier Bälle bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit und gleicher Masse (also gleichem Δp) zu verschiedenen Werten für τ führt (Hinweis: Stellen Sie sich die Situation unmittelbar nach dem Aufprall vor – mit welcher Geschwindigkeit wird der Ball eingedellt und welche Kraft muss dafür aufgewendet werden?).
3. Alle diese Ausdrücke für F_0 sind linear in T/τ – benutzen Sie diese Einsicht, um zu erklären, weshalb eine große Glasmurmelnach einem Fall vom Tisch eine Glasscheibe zerschlagen kann, ein ähnlich schwerer Gummiball aber nicht. Mein Lehrer Georg Maier prägte dafür den Ausdruck “Zeithebel” – erläutern Sie die Analogie in diesem Sinne (Hinweis: Umformen nach $F_0\tau = \dots$).
4. **Vertiefung:** Das Tak des Aufpralls klingt für verschiedene Höhen verschieden laut, aber sonst recht ähnlich – was kann man daraus für den Kraftverlauf $F(t)$ beim Aufprall ableiten (Hinweis: Denken Sie an den Zusammenhang von Schwingungsdauer und Amplitude beim Federpendel...)?

Kasten 10.2: Aufgaben zum springenden Ball: Explizite Berechnung des Kraftstoßes und zur maximalen Belastung des Untergrundes während des Aufpralls.

11. Die phänomenalen physikalischen, chemischen und biologischen Erfahrungsgrundlagen eines Begriffs von Energie als Bilanzierungsgröße¹

Anknüpfung an Klaus Schelers Energiedidaktik

In Heft 93/94 dieser Zeitschrift hat Klaus Scheler (Scheler, 2004) kürzlich einen neuen Ansatz vorgestellt, wie er den Energiebegriff in der Sekundarstufe I erschließen möchte: eine konsequente Didaktik der Energiebegriffs, bei dem "Energie" als "Tauschwert" angesehen wird, als Bilanzierungsgröße also, so wie schon Einstein & Infeld (Leopold Infeld, 1987, S. 39) formulierten: "Die gesamte Energie, kinetische plus potentielle, ist ... zum Beispiel einem Geldbetrag vergleichbar, dessen Wert man stets auf gleicher Höhe hält, ihn aber unter Zugrundelegung eines wohl berechneten Wechselkurses ständig von einer Währung in die andere, sagen wir von Dollars in Pfund Sterling und umgekehrt, umwechselt." Scheler diskutiert mit seinen Schülerinnen und Schülern Tauschvorgänge im Alltag und münzt schließlich die physikalische Größe 'Energie' als 'Tauschwert'. Damit vermeidet er die irreführende Vorstellung von Energie als einer Art Materie, als einem Treibstoff quasi (vgl. (Duit, 1986)) oder von Energie, die immer an einen Träger gebunden sei (vgl. (Parchmann & Demuth, 2004)).

Seine Tauschvorgänge laufen damit auf den Vergleich von Zuständen hinaus – damit wird der prozessuale Aspekt nebensächlich. Dieser aber ist, wie Buck (Buck, 1981) gezeigt hat, geradezu das Eingangstor zum Energiebegriff, wenn man von den Phänomenen ausgehen will. Etwa ein Konzept wie "Energienmenge" bleibt abstrakt, wenn nicht einbezogen wird, wie sie denn konkret eingelöst wird oder werden könnte. Unbefriedigend am Schelerschen Ansatz bleibt daher, dass er zu schnell auf *Wertungen* hinaus will und das *Gefüge der eigentlich energetischen Erscheinungen* unterbelichtet bleibt. Für einen phänomenologisch orientierten naturwissenschaftlichen Unterricht muss es daher noch einen Schritt vor dem Schelerschen Schritt geben: das Bewusstwerden und Bedenken unserer Erfahrungen, die wir im Zusam-

¹Erschienen in *chimica didactica* 93/94 (2005), S. 42 – 60, mit Markus Rehm als Koautor.

menhang mit “Energie” machen. Gedanken und Wege dazu sollen in diesem Beitrag herausgearbeitet werden.

Für den Unterricht in Mechanik ist der hier gezeigte Gedankengang in seinen einzelnen Schritten im Physikunterricht an 10. Klassen in verschiedenen Waldorfschulen in Deutschland, der Schweiz und in Australien erprobt und auch bereits in seinen groben Zügen vorgestellt worden (Theilmann, 2002) und (Theilmann, 2006a). Wir nehmen das Thema hier noch einmal auf, indem wir noch systematischer biologische und dazu auch chemische Erfahrungen berücksichtigen, die üblicherweise im Physikunterricht ausgeblendet werden, die aber erst den Energiebegriff zu einem disziplinübergreifenden naturwissenschaftlichen Begriff machen, der auch in der Chemie Sinn macht.

Energie, Arbeiten und Leisten in der Lebenserfahrung

Zahlreiche Wörter im heutigen lebensweltlichen Gebrauch waren zwar ursprünglich, bevor sie zu physikalischen Fachtermini wurden, Wörter aus der Lebenswelt. Sie sind nach Uwe Pörksen “ausgewandert” in die Wissenschaft und “rückgewandert in die Gemeinsprache”: “Seit die Wissenschaft volkssprachig geworden ist, spanisch und italienisch und französisch, niederländisch, deutsch und schwedisch, was ja gar nicht so lange zurückliegt, zieht sie die Begriffe der allgemeinen Sprache an, prägt sie um und entlässt sie verändert in die allgemeine Umgangssprache, wo sie dann eine enorme Wirkung entfalten.” (Pörksen, 1988, S. 17 f.). Dabei kommen in der Regel bei solchen grundlegenden Wörtern wie “Energie”, “Arbeit” oder “Leistung” die semantischen Felder der Fachsprache und der Umgangssprache nicht zur Deckung, ja werden vielleicht gar zu Lernhindernissen; die STCSE-Bibliographie belegt dies mit zahlreichen Untersuchungen zu den “*misconcepts*”, den “Fehlvorstellungen” (Duit, 2004a). Wir müssen dies beachten, wenn wir in der folgenden Betrachtung unsere lebensweltlichen Erfahrungen zum Energiebegriff in Worte fassen wollen.

Unsere Alltagserfahrung bietet allerlei Anknüpfungspunkte, um das Spannungsfeld zwischen Fachsprache und Umgangssprache auszuloten, vor allem im Umfeld des Tätig-Werdens und der Technik. Wir interessieren uns für die Leistung von Autos oder elektrischen Geräten. Wir haben gerade viel oder wenig Arbeit und denken dabei etwa an Berge von Bügelwäsche oder an Texte, die wir schreiben müssen. Man hat oder hat nicht Energie, um abends noch auszugehen, man spricht von “regenerativen Energien” oder “Energieerzeugung”.

Das Arbeiten mit dem Leib bedeutet immer Muskelbetätigung, die ihrerseits spürbare physiologische Vorgänge hervorruft: uns wird warm, Herz- und Atemfrequenz

steigen; danach stellen sich Ermüdung, vielleicht auch Appetit oder Muskelkater ein. Wie schnell oder stark diese Reaktionen eintreten, hängt ab von der "Kondition" dessen, der sich bewegt. Ganz generell erhöht bzw. normalisiert sich Herz- und Atemfrequenz *mit Verspätung*; auch ein guter Sportler, etwa ein Schüler, der kurze Sprints etc. noch wegsteckt, könnte mit längerer Anstrengung zum Keuchen gebracht werden. Ganz schnell wird das erreicht, wenn der Sportler oder die Sportlerin mit jemandem auf dem Rücken in den zweiten Stock und wieder herunter steigt: Die nun sehr deutliche Reaktion nach so kurzer Strecke zeigt, dass beim Steigen wirklich etwas Neues ins Spiel kommt.

Von solchen Erfahrungen sehen die Physiker lieber ab, wenn von Arbeit, Energie und Leistung die Rede ist. Mechanische Arbeit, das ist ganz allgemein so etwas wie "bestimmtes Kraftaufbringen über (genauer: entlang) eine gewisse Wegstrecke", und damit sind eine ganze Reihe von Abstraktionen entweder schon impliziert oder noch zu machen. So soll etwa keine Rolle spielen, wie die Kraft aufgebracht wird; die Dauer des Vorgangs interessiert für die physikalische Arbeit nicht; für vollbrachte Arbeit "zählt" die Kraft nur *gegen* die Wegrichtung: Schiebt man einen Wagen, so trägt der das Gewicht der Last; Mühe macht noch der Luft- und Rollwiderstand gegen die Fortbewegung. Der Vorgang wird in der Physik einerseits *unsinnlich*, indem er ganz auf quantitative Fragen reduziert wird – die Qualität der Erfahrung zählt eigentlich nicht, es zählen nur Zahlenwerte: Wie stark wird gedrückt oder gezogen und wie weit? Der Vorgang wird andererseits wie *unwirklich*, indem die tatsächlich aufgebrauchte Anstrengung zum Teil nicht als Arbeit im physikalischen Sinn anerkannt wird. Doch Lastentragen treppab ist zwar leichter als treppauf, aber eben dennoch mühevoll.

Energie und Leistung werden in der Schule meist vor diesem Hintergrund erklärt, genauer gesagt definiert. Man sagt den Schülern vielleicht "Energie ist gespeicherte Arbeit" oder "ist die Fähigkeit, Arbeit zu leisten" und "Leistung ist Arbeit pro Zeit". Ob die Sache so verstanden wird, erweist sich schnell als weniger wichtig. Es geht dem Lehrer hier oft nicht zuerst um ein Verständnis, sondern um die Handhabung von Formeln. In einem Unterricht, der auf erlebte Phänomene aufbauen möchte, ist dieses Vorgehen unbefriedigend.

Unser Alltag ist voll von technischen Apparaten und Vorgängen rund um das (nicht nur mechanisch zu verstehende) Arbeiten und die Energie, die einem unbefangenen Beobachter *magisch* scheinen müssten. Man befüllt sein Auto mit Benzin und fährt viele Hundert Kilometer über Berg und Tal. Elektromotoren in Aufzügen oder Lokomotiven bewegen scheinbar mühelos stattliche Lasten, während *woanders* (im "Kraftwerk"!) dafür gearbeitet wird, oder, wie man sagt, Elektrizität erzeugt wird. Eine kleine dunkle Fläche aus Silizium liefert selbst bei schlechter Beleuchtung genügend Elektrizität für den Betrieb eines Taschenrechners. Die Technik erlaubt es uns, chemische Reaktionen in Elektrizität umzusetzen und umgekehrt Batterien

und Akkus aufzuladen – mit “Energie?” oder mit Strom? Elektrizität kann in mechanische Arbeit verwandelt werden und umgekehrt (Elektromotoren und Dynamos), Wärme in mechanische Arbeit und umgekehrt, Elektrizität in Wärme oder Licht und umgekehrt, Bewegung in Wärme und umgekehrt, chemische Reaktionen im Körper ermöglichen körperliche Arbeit und sichern unsere Körperwärme, auch außerhalb, z.B. beim Lagerfeuer, können sie zu Wärmeproduktion führen, in besonderen Anordnungen, z.B. Batterien, auch zu Elektrizität Was ist denn das Verbindende in diesem Wirrwarr, woher kommen und wohin gehen all diese “Energien”? Es ist also noch einiges zu klären, d.h. es gilt die verwendeten Begriffe zu bedenken und ggf. zu schärfen. Dabei steht das Tripel “Arbeit”, “Leistung” und “Energie” im Mittelpunkt dieser Betrachtung.

Erfahrungen am eigenen Leib

Wesen und Erscheinungsformen der Technik werden oft verständlicher, wenn man sich auf ihren Ursprung als “Erweiterung des menschlichen Leibes” besinnt (Vgl. (Theilmann, 2006a)). Vielleicht sollten wir also noch etwas genauer auf unsere typischen körperlichen Erfahrungen schauen, die wir machen, wenn wir mit unserem Leib arbeiten – mit unserem Leib machen wir schließlich alle Erfahrungen. Sie sind daher auch wohl für den Lernprozess bedeutsamer als die bloße Betrachtung *vor* uns (und nicht *in* uns) ablaufender Prozesse. Verfolgen wir diese kleine Geschichte: Wir sind mit dem Fahrrad unterwegs, mit Gepäck auf dem Radweg einen Fluss entlang, dann, eine Flussbiegung abkürzend, den Berg hinauf, was deutlich schwerer geht² Am Berg mag ein Blick in die Landkarte anstehen, es ist unangenehm, das Rad zu halten und schließlich stellt man es doch ab. Auf der anderen Seite entschädigt man sich für den Anstieg mit einer Abfahrt, es geht ungewohnt schnell und der Schwung reicht noch für ein kurzes Stück Fahrt im Flachen, allerdings geht er rasch verloren.

Schon die anfängliche Fahrt im Flachen macht natürlich Mühe, und zwar umso mehr, je schneller gefahren wird. Sobald wir etwas Tempo zulegen, wird die leichte Jacke schon zu warm und wird höchstens offen getragen, fahren wir noch zügiger, kommen wir selbst bei kaltem Wetter ins Schwitzen. Wir schnaufen auch stärker, d.h. wir müssen mehr Luft ein- und ausatmen. Die ungewohnte Last auf dem Gepäckträger macht sich zunächst praktisch nur durch die Schwerfälligkeit beim Lenken bemerkbar, wird aber dann, sobald es bergauf geht, eine Schweiß treibende Angelegenheit. Mühsamer, anstrengender und dabei langsamer als gewohnt geht es bergan. Der Puls aber geht schneller, wir müssen vielleicht sogar um Luft ringen. Am Ende muss sogar geschoben werden, was aber kaum leichter, allerdings auch kaum lang-

²Es ist heutzutage übrigens gar nicht selbstverständlich, dass Jugendliche diese Erfahrungen schon gemacht haben. Unter Umständen muss man sie daher eigens im Schulkontext arrangieren.

samer als die langsame Kletterfahrt geht. Auch nach dem Anhalten am Berg müssen wir uns gegen das Rad stemmen, es würde sich sonst talwärts selbstständig machen. Das lässt sich allerdings vermeiden, wenn wir den Ständer benutzen können oder es an einen Baum am Straßenrand lehnen. Bergab geht es dann umgekehrt ganz mühelos und eher schneller als sonst, auch das Auslaufen im Flachen hält länger an. Wir können schließlich auch wieder zu unserer alten Puls- und Atemfrequenz zurückkehren.

Dieser kleine Ausflug zeigt drei verschiedene Arten des Sich-Mühens: die Anstrengung, um eine Bewegung aufrecht zu erhalten, die Anstrengung beim Heben einer Last und die, um zu halten. In dieser einfachen Feststellung steckt erstaunlich viel Physik:

- Die fast mühelose langsame Fahrt im Flachen und der Unterschied von Rücken- und Gegenwind verweisen auf das weite Feld des Luftwiderstandes, die Unterschiede durch verschiedene Bereifung, Wegbeläge, Schmierung usw. auf noch andere *Bewegungswiderstände*, die ständig am Werk sind. Bewegung erfährt immer Bewegungswiderstand; ziemlich streng gilt ein “je schneller, desto mühsamer”, andererseits machen bessere Ausrüstung, Windschatten-Fahren oder eine glatte Strasse die Sache wieder leichter. Das Einstellen der *aktiven* Bemühung führt unweigerlich dazu, dass sich ein *passiver* Bewegungszustand einstellt: Ruhen oder eine “andere Spielart” des (geführten) Fallens. Wir begegnen der alltäglichen, der irreversiblen Mechanik!
- Die Fahrt bergan ist besonders mühselig: wir *heben* uns und unsere Ausrüstung und das geht umso schwerer, je größer die Last ist. Auch der sonst recht unbewusst bewegte eigene Leib ist in diesem Sinne Last. Sogar der langsame Aufstieg bringt uns ins Schwitzen, lässt uns schneller atmen und erhöht die Herzfrequenz. Die Mühe lässt sich zwar auf kleinere Etappen verteilen, aber nicht vermeiden. Die gewonnene Höhe gewährt nicht nur Ausblick, sondern auch die Aussicht auf eine Abfahrt auf der anderen Seite des Berges. Die Beobachtung: “jetzt geht es schwerer, aber dadurch später leichter” ist der Ausgangspunkt der Energetik.
- Beim Stehenbleiben am Berg “versucht” das Fahrrad bergab – so wie das auf einer Schräge eben möglich ist – zu fallen und dagegen müssen wir *halten*. Das Halten wird schnell unbequem, es ist leichter, sich dagegen zu lehnen. Doch spätestens wenn wir die Berührungsstellen unangenehm spüren, sehen wir uns nach einer anderen Lösung um: wir lehnen das Rad an einen Baum oder eine Mauer, oder wir stellen es ab. Der nötige Widerstand kommt jetzt “ohne uns” durch eine “Konstruktion” oder Haftreibung (die auch uns das Stehen am Hang ermöglicht) zustande. Hier beginnt die Statik.

Die Anstrengung zum Aufrecht-Erhalten einer Bewegung oder zum Halten scheint im Prinzip verhandelbar: das Halten lässt sich eventuell ganz an Konstruktionen abgeben, etwa an das Gestänge eines Kranes oder an die Knochen des Skeletts. Die Bewegungswiderstände lassen sich wenigstens teilweise überlisten. Normalerweise werden die Widerstände schwächer, wenn die Bewegung langsamer wird. Am Aufwand für das Heben selbst lässt sich nichts einsparen – jegliche Erleichterung der Kraft wird mit einem mehr an Weg bezahlt (vgl. Flaschenzug oder schiefe Ebene). Aber mit gewonnener Höhe besteht für später *die Möglichkeit zu fallen*, was, wie zur Belohnung, von allein geht; und natürlich ist umso mehr Fallen möglich, je mehr vorher gehoben wurde. Der Kraftaufwand ist derselbe wie beim Halten, die Last sorgt dafür, *dass* es Mühe macht. Außerdem gilt: *je mehr* gehoben wird, *desto* mühevoller ist es und desto mehr kann danach gefallen werden. Der alte Traum vom *perpetuum mobile* hat hier sein Urbild: das Heben mit verminderter Mühe – wir werden unten darauf zurückkommen, ebenso auf die leibliche empfundene Mühe, das Atmen und das Schwitzen.

Eine Fahrradfahrt über weichen Boden und eine mit hartem Gegenwind mögen ähnlich anstrengend sein, doch nur bei der Fahrt bergauf gibt es eine Chance, ein späteres “Leichter” davon zu ernten. Die Fahrt bergab ist für die Physiker ein klassischer Fall von Energieumwandlung. Gelehrt spricht man vielleicht so davon: *Lageenergie* verwandelt sich in *Bewegungsenergie*. Was aber ist damit gemeint?

Energie, arbeiten und leisten – eine erste Ordnung der Gesichtspunkte

Vor dem Hintergrund der geschilderten Erfahrungen ist es schon deutlich: die Fahrt bergauf birgt die Möglichkeit zum mühelosen Herabsausen auf der anderen Seite des Hügels. Es wird anfänglich klar: Die “Lageenergie” ist eigentlich der Name für die Möglichkeit, dass etwas über eine gewisse Höhe fallen kann. Wird tatsächlich gefallen, so entsteht Schwung, Bewegung. Auch im Schwung, in der Bewegung von etwas liegt Möglichkeit für sonst mühevollere Vorgänge: Bewegung gegen Widerstand, Drehen eines Generators im Wasserkraftwerk, Einschlagen eines Pfahls in den Boden, Spalten eines Holzklotzes usw. Die Mühe gegen Widerstand hält zwar den Bewegungszustand aufrecht, aber die Fahrtrichtung ist egal. Die Mühe des Hebens ist mit dem “bergauf” verbunden, das Geschehen hat eine Richtung und der Aufwand lässt sich an der gewonnenen Höhe ablesen.

Sowohl die ebene Fahrt als auch der Weg bergan erfordern also Anstrengung, doch nur im zweiten Fall wird aus der verrichteten Arbeit auch Energie (für neue Arbeit). Auf der einen Seite hat die Situation etwas Ungerichtetes, es geht eben ein-

fach schwer, egal wohin, und die Mühe verflüchtigt sich, sie bleibt nicht nutzbar. Auf der anderen Seite haben wir die Extra-Mühe bergauf, Last wird gehoben, gegen ihre Tendenz, wieder bergab zu rollen oder zu fallen. Die erreichte Höhe kann dabei als eine Art Skala des Geschehens genommen werden, und mit einer Skala beginnt das *Bilanzieren*. So scheinen zweierlei Blickwinkel möglich:

pragmatisch: Letztlich fordert *jede* Aktivität Aufwand – “wenn was passieren soll, muss was dafür getan werden”, egal ob es um Fortbewegung oder Umgestalten oder anderes geht. Sogar wenn zwar nichts getan wird, aber bei Bedarf etwas getan werden könnte, scheint eine Art Aktivität vorzuliegen: ob man beim Menschen den physiologischen Grundumsatz nimmt, den Leerlauf eines Motors oder das *stand-by* eines Elektrogerätes, hier wird Strom, Treibstoff usw. verbraucht, ohne dass äußerlich etwas geschaffen wird. Der Aufwand kann sich allerdings verflüchtigen oder nutzbar bleiben.

bilanzorientiert: Bestimmte Aktivitäten schaffen die Bedingung dafür, dass der Aufwand *später in einem anderen Vorgang wirksam wird*. Beispiele wären das Aufziehen von Uhren, Aufladen von Akkus und dergleichen. Man könnte sagen, solche Aktivitäten wirken möglichkeits-schaffend, sie sind typischerweise zielvoll-gestaltend, werden bewusst eingesetzt. Wir bewerten dabei Situationen auf ihre Brauchbarkeit, ihr “Potential” hin. Die Energie als dieser Wert ist dann eine *gedankliche Konstruktion*.

Jeder, der schon im Gebirge gewandert ist, kennt wohl den “Höhenmeter-Blick”, wo Wege nur noch nach der zurückzulegenden Höhendifferenz beurteilt werden. “Nein, wir gehen lieber hier, da drüben müssen wir sonst wieder aufsteigen...”, egal was am Wege wächst oder sonst zu sehen ist. Ähnlich ist es beim Segeln, wo die Skala nicht zwischen oben und unten aufgespannt ist, sondern zwischen Luv und Lee. Der Ruderer schaut wohl eher nach dem kürzesten Weg, dem Segler ist die Wegstrecke viel weniger wichtig, ihn interessiert die “Höhe am Wind” – bilanzorientiert. Beide Beispiele mögen das Gemeinte illustrieren: indem es bergab oder mit dem Wind anders geht als bergauf oder gegen den Wind *bekommen die Vorgänge insgesamt eine Richtung*. Wohlgemerkt: die Vorgänge, die *Prozesse* bekommen eine Richtung, es ist der “Pfeil der Zeit” gemeint, mit dem Eddington (Eddington, 1935, Kapitel 3) den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in eine Metapher fasst, nicht eine räumliche Richtung – pragmatisch gesehen: Es auch geht um die Nutzbarkeit (oder Nichtnutzbarkeit).

Ist 'Energie' eine Art 'Stoff'?

An dieser Stelle verdient unser Gedankenprozess selbst Aufmerksamkeit. In seinen "Philosophischen Betrachtungen" ringt Ludwig Wittgenstein (Wittgenstein, 1994) mit dem Problem, die Wirklichkeit gedanklich – und somit aussprechbar – zu erfassen (Penzance Russel, die Frau von Bertrand Russell, schreibt in einem Brief an G. E. Moore über dieses Problem: "... im Laufe meiner Unterhaltungen mit ihm [Wittgenstein] bekam ich eine ziemlich gute Vorstellung davon, woran er arbeitet. Er gebraucht die Wörter 'Raum' und 'Grammatik' in besonderen Bedeutungen, die mehr oder weniger mit einander verknüpft sind. Er hält fest: Wenn es bedeutsam ist zu sagen 'Dies ist rot', dann kann es nicht bedeutsam sein zu sagen, 'Dies ist laut'. Es gibt einen Raum der Farben und einen anderen Raum der Geräusche. Diese 'Räume' sind offensichtlich in einem Kantischen Sinn a priori gegeben, oder wenigstens, vielleicht nicht genau in diesem Sinn, aber doch nahe dabei." (Wittgenstein, 1994, S. IX)) Die Erscheinungen treten also nicht isoliert auf, sondern haben einen jeweils besonderen Zusammenhang, ihre "Räume", in denen sie sich entfalten können. Wittgenstein spricht davon, dass zu den Räumen jeweils "Grammatiken" gehören, was offenbar einen bestimmten Satz Begriffe und die Möglichkeiten, sie zu gebrauchen, umfasst. Die "laute Farbe" ist ein starkes Bild, weil sie eigentlich eine Unmöglichkeit ist. Die Rhetorik kennt die Zusammenstellung solcher unpassender Begriffe als *Oxymoron*. Wenn wir den Ausdruck "eine laute Farbe" gebrauchen, können wir uns fragen, in welchem "Raum" er Sinn macht. Offenbar nicht in dem der unmittelbaren Sinneswahrnehmung! In welchem Raum gehört nun die Energie?

Arbeit wird zu Energie, indem sie auf ihren Möglichkeitswert hin bilanziert wird. Man behandelt dann Energie als mengenartige Größe, für die ein "mehr" (oder weniger) denselben Sinn macht wie für Kuchenzutaten. Damit aber beginnen wir, eine gedankliche Konstruktion *wie einen Stoff* zu behandeln, sie rutscht uns in einen Denk- und Sprech-Raum, wo sie gar nicht hingehört! Energie wird ja quantifiziert (vgl. die Stromrechnung oder Nährwerttabellen), gehandelt, verbraucht oder vergeudet, transportiert oder gewonnen. Ein "Stoff" ist sie trotzdem nicht. Diese Praxis hat einen dicken Haken: Das, was wir mit "Energie" bezeichnen, entspricht *keiner möglichen sinnlichen Erfahrung*. Wir können z. B. die Temperatur, die Schwere, die Form, vielleicht auch die Geschwindigkeit von etwas sinnlich wahrnehmen, nicht aber das, was mit Energie gemeint ist! Es ist auch keine Abstraktion in dem Sinne wie 'der Stoff' (von dem es keinen Plural gibt) all die vielen 'Stoffe' (Wasser, Gold, Zucker, Luft, ...) zu einer Kategorie zusammenfasst.

So ist die Energie als Bilanzgröße ein Begriff, der etwas Gedankliches, Unsinnliches meint, der aber dazu verführt, sich etwas Stoffartig-Konkretes vorzustellen und dadurch sich den Blick dafür zu verstellen, dass er die Grenzen des sinnlich Erfahrbaren überschreitet. Unser Duden nennt einen solchen Begriff "transzendent".

In modernen Studententexten zur Physik wird man nicht Wert darauf legen, dass da transzendente Begriffe gepflegt werden, es passiert aber genau dies: wir reden über prinzipiell Unerfahrbares so, als ob es wirklich stattfände.

Wie hilfreich Wittgensteins Hinweis auf die notwendige Existenz von Räumen aus [Phänomenen-]Kontexten sein kann, lässt sich an Formulierungen von Georg Job studieren, der zuerst am liebsten “auf alles Gerede über ‘Energieformen’ verzichten” möchte, und dann doch anerkennen muss, dass es sinnvoll sein kann, Qualitätsunterschiede zu machen. Zuerst (1994) übersieht Job die unterschiedliche Struktur der bei ihm für einen Vergleich benutzen Begriffe: “Wir ersparen uns viele Worte, wenn wir auf unnütze Differenzierungen verzichten. Es ist zwar oft bequem, von Flaschen- oder Tütenmilch zu sprechen, aber ziemlich unnützlich, das Umfüllen oder Trinken deswegen als Milchumwandlung zu formulieren und den Inhalt des Trinkglases oder des Magens als besondere Milchform zu definieren. Bei der Energie ist es kaum anders.” (Job, 1994, S. 322). Job geht gegen den Begriff ‘Energieform’ an, den er für eine überlebte Altlast” des Physikunterrichts hält und der daher “entsorgt” werden müsse.

Im Jahre 2002 fasst er sein Anliegen differenzierter. Die Qualitäten werden nun anerkannt. Die gemeinsame Sachstruktur im Vergleich von Wasser und Energie wird herausgearbeitet, ohne dass das Missverständnis gefördert wird, Wasser (bzw. Milch) und Energie stünden auf ein und derselben Erscheinungsstufe: “Wir ersparen uns viele Worte, wenn wir auf nutzlose Differenzierungen verzichten. Was Grundwasser, Regenwasser, Meerwasser, Kondenswasser, Leitungswasser, Trinkwasser, Warmwasser, Abwasser unterscheidet, ist nicht das Wasser selbst, sondern sein Fundort, Verwendungszweck, Transportmittel, Beimengungen usw., alles Attribute, die irgendwelche Begleitumstände kennzeichnen und die beim Umgang mit den Wässern gewisse Vorkehrungen erzwingen oder manche Nutzungsweisen begünstigen, andere ausschließen. Bei der Energie ist es nicht anders. Was die Energie als kinetisch erkennbar macht, ist der mit ihr assoziierte Impuls. Wir nennen eine Energie elektrisch, wenn sie bei der Verschiebung elektrischer Ladung mitbefördert wird. Wir sprechen von Wärme, wenn die Energie mit der Entropie liiert ist und so weiter. Impuls, Ladung, Entropie . . . sind es, um deren Auftreten und Verbleib wir uns kümmern müssen und welche die besonderen Eigenschaften der zugehörigen ‘Energieformen’ bedingen.” (Herrmann & Job, 2002, S. 12). Es gibt eben qualitativ verschiedene Wasserarten (vgl. auch (Minssen & Buck, 1986; Buck, 1989), so wie es qualitativ verschiedene Energiearten gibt.

Wenn wir nicht gewohnheitshalber darüber hinweggehen, sondern ernst nehmen, was da gesagt wird, erscheint Energieumwandlung im Bilde von Jobs erstem Vergleich als das Umgießen einer transzendenten Substanz. Der zweite Vergleich deutet schon eine partielle Strukturanalogie der Räume ‘Energie’ und ‘Stoff’ an, die noch näher zu klären ist.

Auch der Stoffwechsel gehört zum Umfeld der Energie

Dem Warm-werden, dem Schwitzen und den anderen Körpererfahrungen bei unserer Fahrradtour müssen wir uns noch etwas genauer zuwenden. Sie gehören offenbar zum Energie-Raum (im Sinne Wittgensteins als begriffliches Umfeld oder Kontext) und verweisen uns auf den ureigensten Stoffe-Raum, der Raum eben, in dem sich die Chemie abspielt. Ich schwitze beim Radfahren – vornehmlich den Stoff “Wasser”, das meine Schweißdrüsen produzierten. Ich muss essen, damit ich überhaupt arbeiten kann. Und nach einer Fahrradtour bin ich besonders hungrig. Ich atme Luft ein und reiche sie mit Kohlendioxid und Wasser an beim Ausatmen. In diesem Stoffe-Raum gibt es ein Vorher, ein Jetzt und das Nachher, ja, wie Rozumek (Rozumek, 2003) gezeigt hat, ist diese zeitliche Gliederung geradezu konstitutionell und Struktur gebend für den Stoffbegriff.

- Der Zucker und das Fett (aber natürlich beim Autofahren auch das Benzin oder Erdgas) und nicht zu vergessen der Sauerstoff der Luft, der uns zwar bequem zugänglich ist, aber nicht minder bedeutsam, ja essentiell ist für den Stoffwechselprozess des Körpers machen *zusammen* das *Vorher* aus.
- Das Schwitzen, die Hitze, der beschleunigte Puls, das schneller Atmen verweisen auf das *Jetzt*. Es wird bestimmt von den biochemischen Prozessen.
- Die Stoffwechselprodukte Kohlendioxid und Wasser sind in dieser Beziehung das untrennbare *Nachher*. Gekoppelt und untrennbar sind die Stoffe und ihre Umwandlungsreaktionen mit der verrichteten Arbeit und der dabei “produzierten” Wärme verbunden. Das Eine funktioniert nicht ohne das Andere und ist auch nicht durch Tricks abtrennbar (wohl dagegen modifizierbar).

Nur unsere denkerische Betrachtung lässt die traditionelle Arbeitsteilung der Physik und Chemie zu (Energie gehört zur Physik, allenfalls zur physikalischen Chemie, Stoffumwandlungen aber zur Chemie), und erlaubt uns je einen eigenen Energie-Raum und einen Stoffe-Raum zu konzipieren. Diese Verbandelung des Energie-Raumes mit dem Stoffe-Raum ist unaufhebbar, auch wenn die Wissenschaftstraditionen damit anders umgegangen sind: Keine chemische Umwandlung ohne auftretende Energien, kein Energieumwandlung ohne involvierte Stoffe.

Machen wir es uns noch einmal ganz deutlich klar: Es ist eigentlich unberechtigt, den Zucker für den “Brennstoff” zu halten und die Bedeutung des Sauerstoffs der Luft beim Verbrennungsprozess durch diese Wortwahl zu bagatellisieren: *Beide* sind für das Zustandekommen von Wärme und Arbeit auf einander angewiesen.

Erst wenn beide zusammenkommen und dabei vergehen, verschwinden, und Platz machen für andere Stoffe (Kohlendioxid und Wasser) kann auch Wärme und Arbeit auftreten. Und erst *im* Reagieren mit einander machen sich Energieeffekte bemerkbar, egal ob es sich um Stoffumwandlungen im Lagerfeuer handelt oder in der Batterie meines Handys oder im Stoffwechsel meines Körpers. Julius Robert Mayer hatte für diese Energieform einen treffenden Ausdruck: “Chemisches Getrenntseyn” und “Chemisches Verbundenseyn” (Mayer, 1980, S. 27).

Diese Unabtrennbarkeit hat Folgen für den Energiebegriff ebenso wie für das Gefüge der chemischen Grundbegriffe. Wie die Lageenergie oben als eine Möglichkeitsform für die Bewegungsenergie konzipiert wurde, sind wir gezwungen in analoger Weise eine weitere potentielle Energieart – die “chemische” Energie – zu konzipieren, die die Möglichkeitsform für Wärme und Arbeit bei körperlicher Arbeit, überhaupt bei chemischen Reaktionen, rechnerisch handhabbar, bilanzierbar machen soll.

Energie, arbeiten und leisten – eine prozessuale Ordnung der Phänomene

Auch auf die drei Begriffe Arbeit, Leistung und Energie kann der Blick auf die drei Grund-Zeitstufen – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft – klärend wirken. Sammeln wir dazu assoziativ Stichwörter, die einem einfallen oder die von Schülern genannt werden, wenn man das Stichwort “tun, etwas machen” vorgibt, und an konkreten Beispielen gesammelt wird, was alles dazugehört:

Vorher	tun wollen oder werden	Vornahme, Plan, Vorfreude/Unlust, Möglichkeit, Sorge, Bereitschaft, Vorbereitung. . .
Jetzt	tun	Anstrengung, Bemühen, Leistung, Aufmerksamkeit, Wirken/Verändern/Veränderung. . .
Nachher	getan haben	Werk/Tat, Ergebnis, Folgen, Erschöpfung, Befriedigung. . .

Speziell der Blick auf das Vorher ist immer der Blick auf ein Umfeld, das der Vorgang braucht. Die Sache lässt sich an vielen Beispielen konkretisieren; für einen Hausbau, ein Abendessen, eine Wanderung finden wir dann schier unzählige Vor- oder Möglichkeitsbedingungen. Zum Hausbau gehört nicht nur der Bauwille, es muss auch ein Grundstück und eine Baugenehmigung da sein, die Finanzierung muss stehen, die Sache will geplant sein. Ein Abendessen mit Freunden bedarf der Einladung, des Einkaufs, einer Idee davon, was es geben soll, der handwerklichen Fähigkeit des Kochens und einer funktionierenden Küche. Eine Wanderung hat ein Ziel

und wird mit Landkarte, Butterbrot und Ausrüstung vorbereitet; man muss sich fragen, ob die Seilbahn in Betrieb sein wird und ob der Schwierigkeitsgrad der Route angemessen ist, was der Wetterbericht sagt usw. Die extensive Seite des Vorgangs findet dabei ihre Entsprechung in einem "je mehr . . . , desto" einzelner Vorbedingungen. Ein größeres Haus braucht mehr Geld, mehr Gäste erfordern mehr Lebensmittel oder Getränke, eine große Tour braucht bessere Kondition und macht mehr Hunger als ein Nachmittagsspaziergang.

Der Vorgang mit seinem konkreten Vorher, Jetzt und Nachher ist es, worauf auch die Begriffe Energie, Leistung und Arbeit verweisen. Die oben geschilderten Abstraktionen hin auf eine rein quantitativ-berechenbare Beschreibung konkreter Vorgänge liefern uns Energie als (quantitatives) Möglichkeitsmaß, Leistung als Quantifizierung der Aktivität oder Heftigkeit des Vorgangs und Arbeit als Ergebnis. Man blickt gleichsam aus dreierlei Perspektive auf ein Geschehen: Ein gefüllter Tank bedeutet einen bestimmten Aktionsradius; dann gibt es das Fahren, schnell oder langsam, direkt oder mit Umwegen, das diese Möglichkeit verwirklicht; zuletzt ist ein bestimmter Weg zurückgelegt und das Benzin verbraucht.

Die Energie als Maß für mögliches Geschehen steht auf der ideellen Seite des Vorgangs, sie wird gleichsam in die Situation "hineingesehen". Ein Tun lässt sich letztlich gar nicht speichern, es vollzieht sich einfach; was dann bleibt, sind die Wirkungen. Arbeit bezeichnet solche konkreten Ergebnisse, die so und so vielen Werkstücke, die Höhenmeter mit Gepäck, die Menge an ausgeatmetem Kohlendioxid, die als Maß für den körperlichen Stoffwechselumsatz genommen werden kann. Insofern in diesen der mögliche Ausgangspunkt für neues Geschehen liegt, lassen sie sich dann wieder als Energie ansprechen. Nur "insofern" freilich, je nachdem, wie wir das Vorher und Nachher quantitativ vergleichen, fällt die Bilanz mal negativ und mal positiv aus.

Die Herkunft und die Hinkunft³ der Energie

Die Ökologie kommt hier wie von alleine ins Spiel, sobald die Frage gestellt wird: Woher kommt unsere Energie? Ist sie "regenerativ" oder "nichtregenerativ"? Gehe ich mit meinen Ressourcen verantwortet um? Einige Beispiele aus der Lebenswelt schildern typische Erfahrungen: Als Fußgänger bin ich ziemlich unmittelbar angeschlossen an das Wo und Wie meiner Bewegung. Der Vorgang "Herr T. bewegt sich von da nach dort" ist verbunden mit leiblicher Betätigung, mit Aktivität und An-

³Ebenso wie hier wird dieser vielleicht merkwürdig anmutende Begriff bei (Buck & Kretz, 1988), aufbauend auf einen früheren Beitrag (Buck, 1984), in einem ökologischen Zusammenhang verwendet: Mit einer Betrachtung des *Vorher*, *Jetzt* und *Nachher* will Buck will einen prozessualen Stoffbegriff entwickeln, der auch wirklich "existentialrelevant" sei.

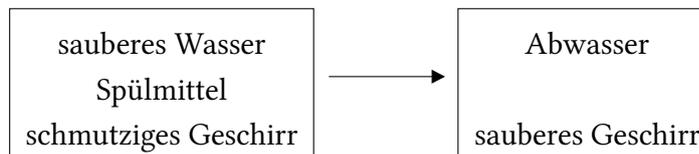
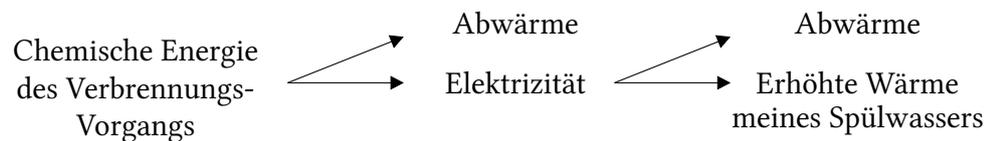
strenge. Lege ich den Weg zum Institut als Fahrradfahrer zurück, geht es auf dem Hinweg bergab und ohne Mühe. Heimwärts kann ich mir sagen: "Jetzt ist es mühsam, aber dafür hast Du es *morgen* wieder leicht". Fahre ich mit dem Auto, geht es in jedem Fall ohne Anstrengung, durch Verbrennung eines Destillates aus Erdöl, in Urzeiten entstanden aus Pflanzenresten ferner Länder, und eine "schlechte Luft" hinterlassend. Oder: Das Blockheizkraftwerk in der Nähe meines Arbeitsplatzes betreibt "Wärme-Kraftkopplung". Es ist ein Beispiel für den bewussten Umgang mit den "Nebenwirkungen" der Energieerzeugung. Strom (190 kW Leistung) entsteht als Nebenprodukt der Wärmeerzeugung durch einen mit Erdgas betriebenen Spezialmotor, dessen Abwärme zu Heizzwecken benutzt wird. Für den Zusammenhang, den wir hier betrachten, ist wichtig, dass Elektrizität sich in dieser kleinen bedarfsangepassten Anlage viel unproblematischer und wirtschaftlicher mitnutzen lässt als umgekehrt die Wärme, die bei der Stromerzeugung in einem Großkraftwerk anfällt. Die Abluft ist dabei sauberer als die Luft an einer befahrenen Kreuzung. . .

Ein Beispiel, das ein Schüler im Unterricht aufgebracht hat – der scheinbar unpektakuläre Vorgang des Geschirrspülens: Auf der Seite der Vorbedingungen erweitert sich die Sache schnell. Da ist nicht nur eine Aufgabe in Form eines Stapels dreckeriger Teller, sondern wir bemühen auch allerlei Infrastruktur: Wasserversorgung, Strom zum Erwärmen, eine funktionierende Spüle (wer stellt die bereit?), Waschmittel (wie wird das gemacht?). Wie immer, wenn man in diese Richtung denkt, merkt man schnell, wie die Zusammenhänge immer unkonkreter und dabei umfassender werden und irgendwann bricht man diese Überlegungen vielleicht ab, weil die Kluft zwischen banalem Vorgang und globalen Voraussetzungen absurd zu werden droht. Das ist der Zeitpunkt, wo bereits verstanden wurde, wie es *im Prinzip* geht: Auf der Ergebnisseite steht zunächst nur sauberes Geschirr, vielleicht noch: Befriedigung. Die Teller sind zwar sauber geworden, aber dafür *ist nun Wasser dreckig*. Sofern wir überhaupt noch mit der Hand spülen, ist es eindrucksvoll sich klarzumachen, wie die schmutzige Spüllauge aus dem Vorgang verschwindet: wir ziehen den Stöpsel raus, die braune Brühe läuft gurgelnd ab – und ist nicht mehr unser Problem. Hier mag sich ein kurzes Innehalten im Unterricht lohnen: der Vorgang ist ein schönes Bild für unseren Umgang mit der Welt. Ob fossile Brennstoffe, Atomtechnik, Wegwerfartikel, wir interessieren uns für einen bestimmten "Nutzen" am Vorgang und schieben all zu leicht die weniger sympathischen Folgen beiseite.

Je mehr wir uns auf die Nutzung unserer "Energie-Kultur" einlassen, desto mehr trennen sich Vorgang und Aufwand. Was ich hier und jetzt mache, beruht nicht nur auf aktuellem Einsatz, sondern auch auf vergangenem, oder zukünftigem Aufwand (etwa bei der Umweltverschmutzung), der dabei vielleicht ganz woanders gesucht werden muss. Wir treten ein in die Wirksamkeit großräumiger Transport- und Austauschnetze, seien es die der Ölmultis oder die der Stromerzeuger oder der Nahrungsmittelproduktion. Es ist für den Alltag ein Unterschied, ob man ein Haus mit

einer Gaszentralheizung oder einem Ofen heizt, und dabei *typisch*, dass letzteres mehr Mühe macht und viel mehr Bewusstsein fordert. Und die Folgen “nichtregenerativer” und “regenerativer” Energiequellen. treten in den Vordergrund. Ja ist es überhaupt sinnvoll von *Energiequellen* zu sprechen?⁴

Es lohnt sich die Struktur des Energie-Raums und des Stoffraums der im Unterricht diskutierten Beispiele durch Diagramme zu veranschaulichen, etwa:



So eine Darstellung ist hilfreich, wenn man (sich) klarmachen will, was man einsetzt, was man erreichen will und was sonst so stattfindet. Sie liegt also in der Darstellung des Themas *vor* den Bilanzgleichungen, auf die man sich üblicherweise beschränkt (und die so eigentlich erst verständlich werden). Wenn wir Energie nicht naiv als eine Art Stoff denken, sondern ‘Stoff’ und ‘Energie’ je eigene Wittgenstein’sche Räume zuweisen, scheint ‘Energie’ nur ein Name für das zu sein, was in einer bestimmten Situation insgesamt möglich ist, fast unabhängig davon, was es dann konkret sein wird, oder ob es tatsächlich passiert. Und es wird auch klar, dass ein bestimmter Umfang von Möglichkeiten streng genommen nur dann erhalten werden kann, *wenn nichts geschieht!* Jeder konkrete Vorgang wird nicht nur den einen gewünschten Effekt zeigen, sondern auch Züge, die sich nicht mehr nutzen lassen werden oder sonst unerwünscht sind. Das gilt für Stoffumwandlungen ebenso wie für Energieumwandlungen. Und auch der Wunsch nach dem *perpetuum mobile* hat hier seinen Ursprung: es ist der Wunsch nach dem “reinen Nutzen” (oder einem “Genuss ohne Reue”), in dem man sich von den sonst unvermeidlichen unangenehmen Folgen des eigenen Tuns abwendet – und damit auch mit dem Eingebundensein in die Welt und die damit verbundenen Rücksichtnahmen brechen möchte.

⁴Im Grunde genommen handelt es sich in der Praxis fast immer um die eine Energiequelle, eben die Sonne!

Zusammenfassung: Gemeinsames und Verschiedenes in den Räumen ‘Energie’ und ‘Stoff’

Was ist das Ergebnis der Betrachtung unserer lebensweltlichen Erfahrungen im Umfeld der Energie? Wir haben zwei Ordnungsprinzipien angewandt: den Blick auf den jeweiligen Erscheinungskontext und den Blick auf die Zeitstufen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.

- Das zeitartige Ordnungsprinzip – Vorher, Jetzt, Nachher – verweist nicht nur auf den prozessualen Stoffbegriff (Rozumek, 2003), sondern erlaubt es auch, die physikalischen Begriffe Energie, Leistung und Arbeit in ihrer Struktur zu erfassen. Diese temporale Betrachtungsweise erwies sich auch als ausgesprochen weiterführend in der Diskussion eines ökologisch verantworteten Umgangs mit der Natur.
- Das kontextuale Ordnungsprinzip wurde bei Wittgenstein gefunden; es erlaubt uns die Parallelen und Unterschiede des Energiebegriffs und des Stoffbegriffs zu erfassen:

Es gibt Stoffarten		Es gibt Energiearten
Stoffart-Umwandlungen	sind immer verbunden	mit Energieart-Umwandlungen
Stoffarten erkennt man an spezifischen Stoffeigenschaften		Energiearten erkennt man an spezifischen Ursachen und Wirkungen
Für Stoffumwandlungen	gilt	Für Energieumwandlungen
das Gesetz der eingeschränkten Umwandlungsmöglichkeiten: Edukte und Produkte müssen dieselben chem. Elemente enthalten	aber:	keine Einschränkung hinsichtlich der Umwandlungsmöglichkeiten: Jede Energieart kann in jede andere Energieart umgewandelt werden
Hinsichtlich der Stoffmengen (gemessen in mol) gilt kein Äquivalenzprinzip		hinsichtlich der maximal umwandelbaren Energiemenge sind Wärme und chemische Energie nicht gleichwertig
		Hinsichtlich der Energiemengen (gemessen in Joule) gilt ein Äquivalenzprinzip

	Sofern nicht relativisti- sche Effekte spürbar sind	
gilt ein Erhaltungsgesetz für die umgesetzte Masse		gilt ein Erhaltungsgesetz für die umgesetzte Energiemenge

In dieser Tabelle wurde eine terminologische Entscheidung getroffen, die umgangssprachlich und technologisch gesehen unproblematisch, weil üblich ist, aber die von dem in der Physik üblichen Sprachgebrauch abweicht: Indem zugelassen wird von *Energiearten* zu sprechen muss auch von *Energiemenge* gesprochen werden. Es ist in der Physik aber üblich von ‘Energie’ statt von ‘Energiemenge’ zu sprechen. In diesem Fall ist ‘Energie’ die ausschließliche Bilanzierungsgröße, von der Scheler, Einstein und Infeld sprechen. Der Begriff “Energieart” meint die Unterscheidung, die beim Abstraktionsvorgang hin auf die transzendente Energie als “Altlast entsorgt” werden müsste (vgl. Job 1994, Job & Herrmann 2002).

Der in der Übersicht verwendete Sprachgebrauch löst auch ein anderes physikdidaktisches Problem: Es wird dadurch berechtigt, von “Energieverbrauch” und “Energieerzeugung” zu sprechen: Energie wird insofern *verbraucht* (qualitativ und quantitativ), als eine vom verbrauchenden Menschen ausdrücklich bestellte und ihm gelieferte Energieart (z.B. Strom, Wärme) für seine Zwecke in andere Energiearten umgewandelt wurden. Die Energieversorgungsfirmen “erzeugten” aber diese Energiearten (meist “Elektrizität”) z. B. durch Umwandlung von chemischer Energie (des Verbrennungsvorgangs) in elektrische Energie. Bei dieser “Energiegewinnung” kommen solchen Produzenten erhebliche Energiemengen abhanden; das ist naturgesetzlich gesehen unvermeidlich. Die gelieferte Energiemenge ist maßgeblich für die Geldsumme, die man zu ihrem Erwerb bezahlen muss. Auch die gelieferte Energieform beeinflusst den Preis. Wechselstrom aus der Steckdose ist um vielfaches billiger als Gleichstrom aus Batterien. Die gewonnene (ausdrücklich gewünschte, “benötigte”) Energiemenge ist in der Regel sehr viel kleiner als die von der Energieversorgungsfirma bezogene Energiemenge. Die Differenz zwischen beiden Energiemengen wird als “verloren” betrachtet (meist ist es Wärme), tatsächlich wird sie genau so an die Umwelt “abgegeben”, wie das Kohlendioxid beim Verbrennungsprozess in einem Kohlekraftwerk.

Wenn man Kohle, Erdgas, Holz usw. als “Energieträger” bezeichnet, ist das insofern berechtigt, als man die zur Verbrennung ebenso unabdingbare Luft (Sauerstoff) kostenlos aus dem grenzenlosen und eigentümerlosen Luftmantel der Erde nimmt und dieser Sauerstoffverbrauch daher nicht auf den Geldbeutel schlägt. Genau betrachtet sind – wie schon oben betont – beide: Brennstoff *und* Sauerstoff nur *gemeinsam* “Energieträger”; erst ihre Reaktion zu neuen Stoffen ermöglicht die Umwandlung der chemischen Energie dieser Reaktion zu Wärme und ggf. Licht oder andere

Energiearten.

Elektrizität, Wärme, Licht sind und bleiben ganz verschiedene Phänomenbezirke, aber es lässt sich unter charakteristischen technischen Prozessen jeweils mechanische Arbeit verrichten, die zusammen mit der auftretenden Wärme als eine Art “gemeinsame Währung” dienen kann. Im Umgang damit wird immer weniger zwischen verschiedenen Naturgebieten unterschieden – die “Energie” der Physiker bzw. der Wortteil ‘Energie.’ in “Energienmenge” meint dann keine spezifische Energieform mehr, sondern, ebenso generell wie unbestimmt, *Arbeit und/oder Wärme auf Abruf*.

12. Lichtspuren im Wasser – Ein Experiment zum Verhältnis von Brechung und Hebung¹

Es wird ein Experiment vorgestellt, das die “Brechung von Licht an Grenzflächen” von einer überraschenden Seite zeigt, indem es die dabei auftretenden Effekte im Phänomen verschränkt: “Strahlbrechung” und “Bildhebung” ergeben sich als konzeptuell verschiedene Perspektiven auf den gleichen physikalischen Sachverhalt. Die Darstellung des komplementären Verhältnisses zwischen Beleuchtungs- und Sichtbeziehungen birgt nicht nur didaktisches Potential; sie legt nahe, das Brechungsgesetz als Beispiel für die Beziehung von Seh- und Tastraum zu lesen.

Hebung und Brechung

Ob beim Versatz des Strohhalmes im Sprudelglas oder der unterschätzten Wassertiefe am Brunnentrog – dass dort, wo physikalisch Brechung von Licht im Spiel ist, Hebung gesehen wird, ist bekannt (Niedrig, 1993; Minnaert, 1999). Weniger bekannt ist, wie weitgehend sich Brechung und Hebung als konzeptionell eigenständige Zugänge zu demselben physikalischen Sachverhalt systematisch ausformulieren lassen und welches didaktische Potential die Möglichkeit birgt, zwischen diesen Zugängen zu wechseln (Duit et al., 1995a). Ihre methodischen Eigenschaften und ihr gegenseitiger Bezug werden im Folgenden an dem einfachen und inzwischen klassischen “Eimerversuch” in Erinnerung gerufen. Die damit vorgestellten Beobachtungssituationen bilden zugleich die Vorstufe zu einem Experiment, dessen scheinbare Widersprüchlichkeit dadurch aufgelöst werden kann, dass man versteht, wie die genannten Perspektiven gleichzeitig wirksam sind, obwohl sie sich komplementär zueinander verhalten.

Eingebunden: Hebung. Im Eimerversuch stellen sich die Beobachter so, dass sie die am Boden des Eimers liegende Kachel gerade nicht sehen können. Nach und nach wird der Eimer mit Wasser gefüllt, und es wird deutlich: Je höher der Wasserspiegel, desto mehr ist von der Kachel und dem Eimerboden zu sehen, Boden und Kachel

¹Erschienen mit geteilter Erstautorenschaft (mit Johannes Grebe-Ellis) und Matthias Rang als Co-Autor in *Physikdidaktik in Schule und Hochschule (PhyDid)* 3/8 (2009), S. 86 – 91.

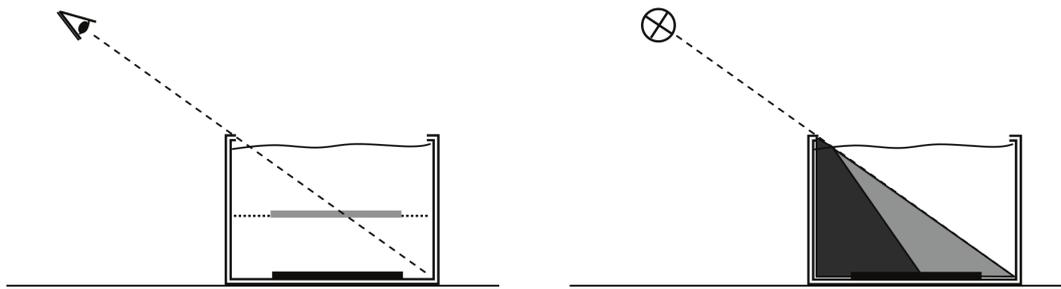


Abbildung 12.1.: Der Eimerversuch in der eingebundenen Perspektive (links): Optische Hebung des Eimerbodens in Abhängigkeit vom Blickwinkel. Abgelöste Perspektive (rechts): AN der Grenzfläche Luft-Wasser zum Lot hin abknickende Schattenkante.

erscheinen relativ zu ihrer tastbaren Lage gehoben (Abb. 12.1, links). Wie sich durch den Vergleich von tastbarer und gesehener Tiefe für *senkrechten* Einblick in den Eimer feststellen lässt, verhalten sich diese wie 4:3, womit im vorliegenden Fall das *Hebungsmaß* charakterisiert ist. Diesem entspricht in der abgelösten Perspektive die *Brechzahl*. *Eingebunden* wird die hier eingenommene Perspektive genannt, weil der Gesamtzusammenhang des Phänomens "Hebung" vom Stand-punkt des Beobachters bzw. seinem Blickwinkel abhängt (Maier, 1993b; Dittmann & Schneider, 1989).

Abgelöst: Brechung. Nun wird der vorher geleerte Eimer so mit einer Lampe beleuchtet, dass der Boden gerade im Schatten liegt (Abb. 12.1, rechts). Damit die Schattenränder an der Innenwand des Eimers einigermaßen scharf sind, empfiehlt es sich, eine kleine Leuchte zu wählen. Wird nun der Eimer nach und nach gefüllt, so zieht sich der Bodenschatten mit jedem neu hinzukommenden Schwung Wasser immer mehr gegen den im Schatten liegenden Teil des Eimers zurück, bis etwa die Hälfte des vormals beschatteten Bodens beleuchtet ist. Je nach Beschaffenheit des Eimers kann man an der Außenwand sehen, wie die Schattenkante am Wasserspiegel nach unten abknickt. Abgelöst wird diese Perspektive genannt, weil der Phänomenzusammenhang "Brechung nicht wie in der vorausgehenden Situation an den Beobachter gebunden, sondern unabhängig von diesem ist.

Dass es sich in beiden Fällen um denselben physikalischen Sachverhalt handelt, wird deutlich, wenn man sich klarmacht, dass der zweite Versuch aus dem ersten dadurch hervorgeht, dass man das Auge mit der Lampe vertauscht: Sichtbeziehungen (eingebunden) werden mit Beleuchtungsbeziehungen (abgelöst) identifiziert. Formal ergibt der Vergleich von Tast- und Sehwegen die Snellius'sche Formulierung des Brechungsgesetzes: $l_t/l_s = n_2/n_1$ (Abb. 12.2).

Eine genauere Analyse der Verhältnisse erfordert die Unterscheidung *sagittaler* und *meridionaler* Abbildungsbedingungen: Blickt man mit seitlich geneigtem Kopf durch die Wasseroberfläche ins Becken, so erscheint der Boden nicht lotrecht, son-

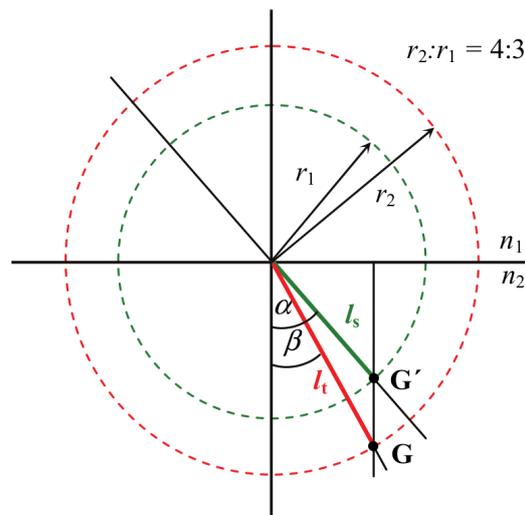


Abbildung 12.2.: Geometrische Deutung des Brechungsgesetzes nach Snellius als Regel für die Kopplung von Sicht- und Tastmaßen an einer optischen Grenzfläche (hier der Übergang Luft-Wasser mit $n_2/n_1 = 4/3$)

den zum Beobachter hin gehoben. Die bei aufrechtem Blick horizontal nebeneinander angeordneten Augen befinden sich dann in unterschiedlichen Höhen über der Wasseroberfläche und durchblicken diese folglich unter verschiedenen Winkeln. Dadurch wird die Beobachtung von der Sagittalebene in die Meridionalebene verlagert. Man kann so den Astigmatismus der schrägen Abbildung durch die ebene Grenzfläche beobachten. Für Vertiefungen hierzu und allgemein zum Thema Hebung-Brechung sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Dittmann & Schneider, 1989; Nasser, 1994; Grebe-Ellis et al., 2002; *PhenOpt Lernsoftware*, 1995).

Damit sind zum einen und in aller Kürze wesentliche Merkmale im Phänomenkontext “Hebung und Brechung” vergegenwärtigt. Zum anderen wird exemplarisch gezeigt, wodurch sich eingebundene und abgelöste Perspektive auszeichnen und wie die jeweiligen Beobachtungen aufeinander bezogen werden können.

Die Möglichkeit, diese Beziehung herzustellen, soll indessen nicht darüber hinwegtäuschen, dass den geometrischen Bedingungen von *Sicht* und *Licht* in Bezug auf die Beteiligung des Beobachters üblicherweise sehr unterschiedlich bewertete Versuchssituationen zugrunde liegen: subjektive und objektive. Und auch wenn man die Eigenständigkeit der Seherfahrung gegenüber der Tastwahrnehmung gelten lassen kann, so bleiben Hebung und Brechung auf phänomenaler Ebene doch mehr oder weniger unvermittelt nebeneinander stehen.

Im Folgenden wird ein Demonstrationsexperiment vorgestellt, in dem innerhalb eines optischen Aufbaus Hebung und Brechung als konkrete und gewissermaßen

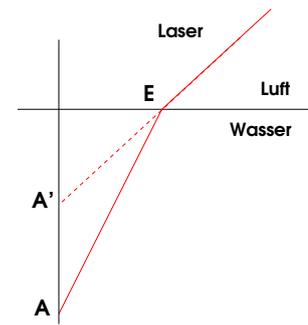
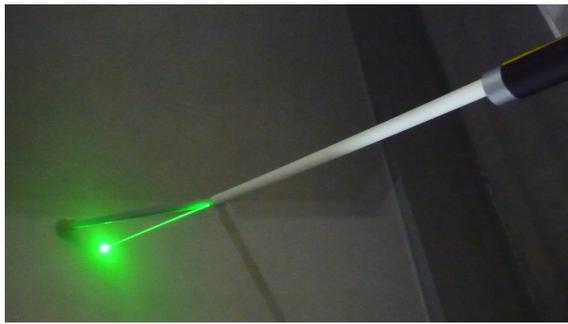


Abbildung 12.3.: Links: Ein zum Laserstrahl paralleler Zeigestab erscheint unter Wasser geknickt, die Lichtspur geht jedoch scheinbar gerade weiter. Rechts: Damit die Lichtspur gerade erscheint, muss der Spurpunkt A an der Stelle A' gesehen werden.

komplementäre Aspekte des gleichen Sachverhaltes gleichzeitig wirksam sind – mit anderen Worten: ein “objektives Experiment” zur Hebung.

Ein optisches Puzzle

Der oben beschriebene Eimerversuch wird zunächst modifiziert, indem als Lichtquelle ein Laser verwendet wird, der den Boden eines leeren Wasserbeckens beleuchtet. Wird nun Wasser in das Becken gefüllt, so kann man Folgendes beobachten: Die Lichtspur des ins Wasser gerichteten Laserstrahls *erscheint an der Wasseroberfläche nicht gebrochen* (Abb. 12.3). Es sieht so aus, als würde das Licht seinen Weg ins Wasser hinein einfach fortsetzen. Das Konzept der Hebung – gerade Lichtwege und entsprechend veränderte Tastraumgeometrie – erscheint damit im Experiment (vgl. auch Abb. 12.4, Mitte). Hier liegt ein spannendes Moment produktiver Verunsicherung. Verschiedene Hypothesen mögen ins Spiel kommen. Es lohnt sich indes auch, noch genauer hinzuschauen: Verfolgt man nämlich den Verlauf einer zum Lichtweg in Luft parallelen Stange unter die Grenzfläche, so zeigt diese durchaus den charakteristischen Knick nach oben (vgl. Abb. 12.3). Der Punkt an der Stelle, die der Laser auf dem Boden des Wasserbeckens beleuchtet, befindet sich im Verhältnis dazu näher an der “Eintauchstelle” der Lichtspur. Die Lichtspur folgt demnach – obwohl sie gerade aussieht – nicht der von der Stange markierten “Tastgeraden”, sondern sie ist (qualitativ) genau so geknickt, wie es in Abbildung 12.3 rechts gezeigt ist. Mit anderen Worten: *Der eingetauchte Teil der geraden Stange erscheint nach oben geknickt; die Lichtspur ist nach unten geknickt und erscheint gerade.*

Warum sieht die geknickte Lichtspur dennoch gerade aus? In Abbildung 12.3 rechts ist die Situation skizziert: Die Lichtspur verläuft in Luft und im optisch dichten Medium jeweils geradlinig. Damit die Lichtspur EA unter Wasser als Verlän-

gerung der Lichtspur an Luft erscheint, muss sie für den Beobachter entlang der gestrichelten Linie EA' verlaufen. Der Beobachter betrachtet diesen Teil der Spur dabei ebenfalls vom Luftraum aus, so dass er die Spur selbst wiederum gehoben sieht. Damit der Lichtspurpunkt A an der Stelle A' (in der Verlängerung der Laserspur in Luft) gesehen wird, muss er entsprechend stark gehoben erscheinen – also die Sichtverbindung zwischen Beobachter und Spurpunkt A an der Wasseroberfläche einen Knick um denselben Winkel erfahren, wie die Lichtspur des Laserstrahls. Das bedeutet, dass wir durch die Wasseroberfläche den Punkt A am Ort A' sehen, wenn unser Einblickwinkel gerade der Einfallswinkel des Lasers ist. Diese Aussage gilt auch dann, wenn der Beobachterstandpunkt nicht in der durch einfallenden und reflektierten Laserstrahl definierten Ebene liegt, es interessiert nur der Winkel zur Normalen der Wasseroberfläche. Wenn diese Bedingung etwa bei deutlich flacherem Einblick nicht mehr erfüllt ist, zeigen sich auch deutliche Abweichungen in den Richtungen der Lichtspuren über und unter Wasser. Eine detailliertere Analyse zeigt, dass diese Bedingung bei deutlich flacherem Einblick nicht mehr ausreicht, aber auch, dass der Effekt gegen kleine Winkelabweichungen recht stabil ist. Mit anderen Worten: Das Abknicken der Lichtspur nach unten (abgelöster Modus) und ihre optische Hebung (eingebundener Modus) gleichen sich (in etwa) aus – sofern Laserbeleuchtung und Beobachtung unter ähnlichem Winkel erfolgen.

Der erweiterte Versuchsaufbau – Spiegelungen

Die Grundidee des objektiven Hebungsexperiments, das nun im Folgenden beschrieben wird, besteht darin, eine Situation zu präparieren, in der sich die Hebung eines unter Wasser befindlichen Spiegels auf das Spiegelbild auswirkt. Der oben beschriebene Aufbau wird dazu um eine auf dem Boden des Wasserbeckens planparallel zur Wasseroberfläche justierte Spiegelkachel erweitert. Diese wird von schräg oben mit dem Laser beleuchtet (Abb. 12.4, links). Der Reflex wird an der gegenüberliegenden Seite mit einem Tafellineal aufgefangen. Der Einfachheit halber wird die Geometrie des Aufbaus *symmetrisch* eingerichtet, so dass der Laser bei leerem Becken in der Mitte des Beckens auf den Spiegel trifft. Füllt man nun das Becken wieder mit Wasser, so erscheint der Boden und mit ihm die Spiegelkachel zunehmend gehoben; gleichzeitig wandert der Leuchtfleck auf dem Tafellineal nach oben (Abb. 12.4, mitte). Abbildung 12.4 rechts zeigt den ungestörten und gebrochenen Strahlverlauf für leeres und volles Becken gemäss der abgelösten Perspektive (vgl. Abb. 12.1, rechts).²

²Zu beachten ist hier, dass in den Abbildungen 12.1, 12.4, 12.5 und 12.6 vereinfachend der ganze Boden parallel zu seiner Tastlage gehoben dargestellt ist, obwohl das dargestellte Hebungsmass streng genommen nur für den jeweils angegebenen Blick- bzw. Beleuchtungswinkel gültig ist (Abb. 12.2): Der Einblick ins Becken von einem gegebenen Standpunkt zeigt ja gerade einen je nach Einblickwin-

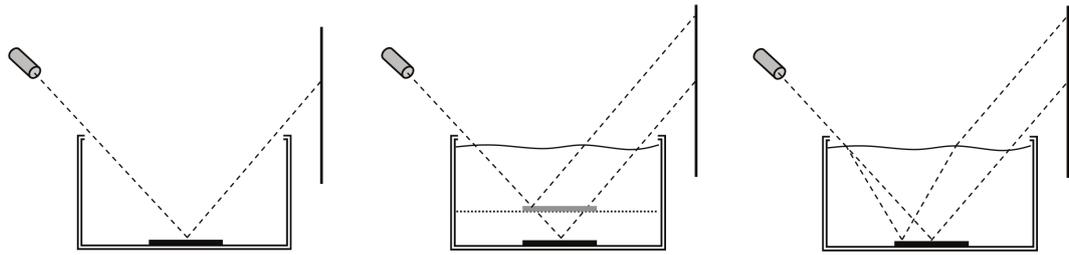


Abbildung 12.4.: Die Sicht- und Beleuchtungsgeometrie am leeren und gefüllten Wasserbecken. Links: Beleuchtung der Spiegelkachel mit dem Laser. Der Reflex auf dem Lineal gegenüber wird als Positionsmarke für die Lage der Kachel betrachtet. Mitte: Eingebundene Perspektive. Die vertikale Verschiebung des Reflexes durch die optische Hebung der Spiegelkachel. Rechts: Abgelöste Perspektive. Die vertikale Verschiebung des Reflexes durch Abknicken der Beleuchtungsrichtung an der Grenzfläche Luft-Wasser.

Ein zweiter Blick ins Becken führt allerdings zu irritierenden Beobachtungen. Vergisst man für einen Moment, wie das Experiment eingerichtet wurde und betrachtet den Spiegel als Fenster in einen unterhalb des Beckenbodens liegenden Spiegelraum, so beleuchtet der Laser das “Spiegellineal”, während der “Spiegellaser” aus dem Spiegelraum von unter dem Becken nach schräg oben auf das Lineal leuchtet, dem man gegenübersteht (Abb. 12.5, rechts). Trübt man das Wasser etwas an (z. B. mit Schmierseife) so zeigt sich nicht, wie man vielleicht erwarten würde, eine einfache geknickte Lichtspur, sondern ein Lichtspurenkreuz, dessen Äste unterschiedlich hell sind (Abb. 12.5, links). Überraschenderweise liegen die Helligkeitsunterschiede aber nicht symmetrisch zum Spiegel, sondern die vom “Spiegellaser” ausgehende, von links unten nach rechts oben gerichtete Spur a' ist deutlich heller als die vom Laser ausgehende, abwärts gerichtete Spur a . Die Schwierigkeit, die sich dadurch für die Zuordnung der gespiegelten Spürhälften a'_1 und a_2 zu ihren Urbildern a_1 und a'_2 ergeben, löst sich erst auf, wenn man berücksichtigt, dass die Spur a' ihre Helligkeit aus der Vorwärtsstreuung, a dagegen aus der Rückwärtsstreuung bezieht.³

kel unterschiedlich stark gehobenen Boden. Wird dementsprechend der Laser verdreht, so ändert sich die Hebung des Spiegels entsprechend dem jeweils neuen Winkel.

Da das Laserlicht als annähernd parallel angesehen werden kann, realisiert der Laser immer nur ein Hebungsmass der Spiegelkachel. Vom Standpunkt der eingebundenen Perspektive entspricht dem Laser ein Beobachterstandort im Unendlichen. Ein solcher Beobachter würde in der Tat den ganzen Spiegel einheitlich und planparallel gehoben sehen.

³Für sehr kleine Schwebeteilchen (Durchmesser klein gegen die Wellenlänge) ergeben sich in Vorwärts- und Rückwärtsstreuung nahezu gleiche Intensitäten (Rayleigh-Streuung). Die Streuung an größeren Schwebeteilchen wird durch die allgemeinere MieTheorie beschrieben. Das Streudiagramm hängt dann stark vom Brechungsindex und der Partikelgröße ab, zeigt aber für den Streuwinkel von 0 Grad hohe Intensität, während die Intensitäten in anderen Streuwinkeln für verschiedene Teilchen

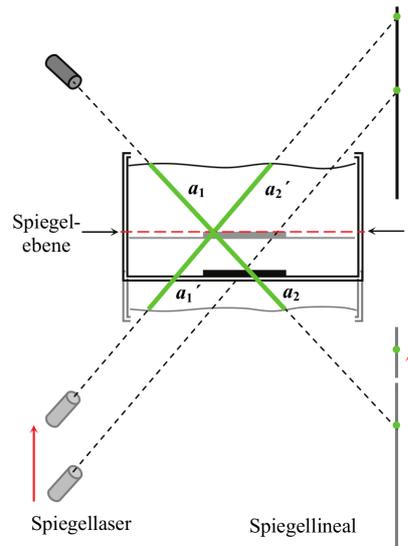
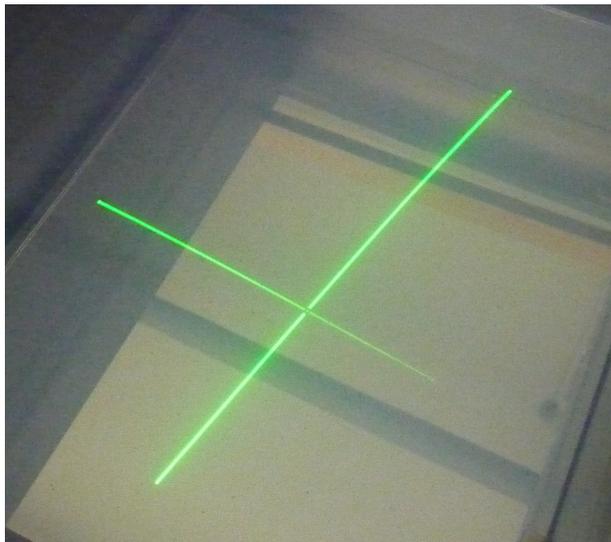


Abbildung 12.5.: Das Lichtspurenkreuz. Links: Das Lichtspurenkreuz bei Beleuchtung der Spiegelkachel mit einem grünen Diodenlaser und einer Füllhöhe von 20 cm. Rechts: Die Geometrie der Sichtverhältnisse. Die Spurlängen a und a' werden begrenzt durch den spiegelungsbedingt verdoppelt gesehenen Füllstand des Wasserbeckens, der gegenüber der tastbaren Wassertiefe ausserdem noch hebungsbedingt abgeflacht erscheint.

Quantitative Diskussion

Als Messgrößen sind bei gegebener Beleuchtungsgeometrie die Wasserhöhe H und die vertikale Verschiebung des Reflexes Δ in Abhängigkeit vom Wasserstand zugänglich. Abbildung 12.6 links zeigt die Situation: Die Verschiebung Δ des Reflexes nach oben ist gerade doppelt so gross wie die Hebung δ des Spiegels – in diesem Sinn kann man die Hebung also *messen*. Um die Verschiebung des Reflexes mit dem Wasserstand zu korrelieren, wird anstelle der aufgebauten Situation der Strahlengang des "Spiegellasers" zugrunde gelegt. Anstatt den reflektierten Lichtweg zu diskutieren, betrachten wir den Reflex als die Stelle, die durch eine entsprechend dicke Wasserschicht (z. B. in einem Aquarium) vom Spiegellaser beleuchtet wird (Abb. 12.5). In Abbildung 12.5 wird, wenn sich der Spiegel um δ hebt, der Spiegellaser um $\Delta = 2\delta$ gehoben. Entsprechend verringert sich die *spiegelungsbedingte* Schichtdicke des Wassers von $2H$ bei der Füllhöhe H *hebungsbedingt* um $\Delta = 2\delta$ auf $2(H - \delta)$.

Die Winkel des Lichtwegs an Luft (α) und in Wasser (β) sind über das Brechungsgesetz miteinander verknüpft (Abb. 12.6). Für die abknickende Lichtspur im Medium gilt $\tan \beta = s/2H$ bzw. $2H = s/\tan \beta$. Die analoge Überlegung für die ungestörte

stark schwanken und bei verschiedenen Winkeln Minima durchlaufen (Hulst, 1982).

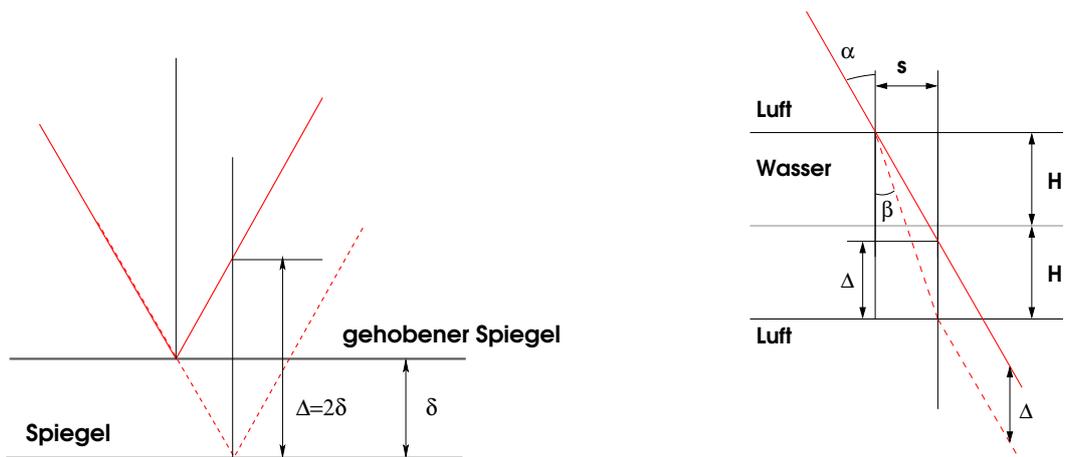


Abbildung 12.6.: Zur Geometrie des Versuchs: Links die Hebung Δ des Reflexes in Abhängigkeit von der Hebung δ des Spiegels. Rechts die Hebung des Reflexes Δ in Abhängigkeit von der Dicke der Wasserschicht H .

Lichtspur liefert $\Delta = s / \tan \beta - s / \tan \alpha$. Setzt man noch $s = 2H \tan \beta$ ein, ergibt sich $\Delta = 2H(1 - \tan \beta / \tan \alpha)$. Bei gemessenen Werten für α von ca. 35° und einem Wasserstand von ca. 15 cm liefert diese Formel für $n = 1,33$ einen Winkel β von rund $25,5^\circ$ und eine Reflexverschiebung von etwa 10 cm – was gut mit der Messung übereinstimmt (Abb. 12.8). Die Reflexverschiebung Δ und der Wasserstand H hängen trotz der im Einzelnen nichtlinearen Beziehungen der Größen untereinander über eine lineare Funktion zusammen. In Abbildung 12.6 lässt sich dies direkt ablesen: Bei gegebenen Winkeln ist s proportional zu H – und Δ wiederum proportional zu s .

Aus der vorangehenden Betrachtung ergibt sich $\tan \beta / \tan \alpha = (H - \delta) / H = (2H - \Delta) / (2H)$. Formal ist dieser Ausdruck dem Snellius'schen Gesetz ähnlich und stellt insofern eine Zusammenfassung der vorliegenden Verhältnisse dar. Die Tangensfunktionen der Winkel, welche die abgelöste Betrachtung charakterisieren, verhalten sich zueinander wie die Hebung der Spiegelkachel zur messbaren Wassertiefe im Becken bzw. wie der gehobene Spiegellaser zum ungehobenen. Daraus ergibt sich auch in der quantitativen Diskussion eine Äquivalenz der unterschiedlichen Betrachtungsweisen.

Schluss

Das geschilderte "objektive" Hebungsexperiment bietet Gelegenheit, den Themenkomplex "Brechung" auf vielseitige und vertiefende Art kennen zu lernen und zu

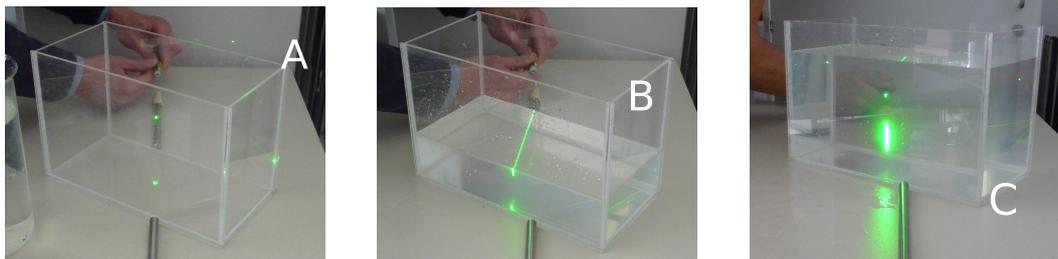


Abbildung 12.7.: Ergänzung I: Dokumentation der Lichtspuren beim Durchleuchten eines Wasserbeckens mit einem Laser. Die Strahlrichtung in Luft ist durch Stangen marliert: A) Leeres Becken, B) “gebrochene” Lichtspur (durch die Wasseroberfläche gesehen!), C) scheinbar gerade Lichtspur im vollen Becken – dieselbe Physik, die oben als “Hebung” gelesen wurde, führt hier zu einem seitlichen Versatz der Sicht durch das Becken.

diskutieren. Der Effekt wird abgelöst von der Seherfahrung als relevanter quantitativer Faktor innerhalb eines einfachen Abbildungsexperimentes darstellbar. Und zugleich bleibt deutlich, dass Beleuchtungs- und Sichtgeometrie verwandte Aspekte von Licht sind. Mit dem Experiment wird, wie sich die eingebundene Perspektive des Beobachters auf “gehobene Verhältnisse” objektiviert, wenn berücksichtigt wird, dass die gehoben gesehene Lagegeometrie des optischen Arrangements auch Beleuchtung vermittelt: nicht nur die Ansicht wird gehoben, auch die Abbildung.

Diese Einsicht ist spannend, weil sie sich der üblichen Bevorzugung einer räumlich-geometrischen Lesart der Lageverhältnisse im Tastraum gegenüber den “scheinbaren” optischen Verhältnissen zunächst widersetzt. Die dabei auftretenden Widersprüche sind auflösbar, das zentrale Motiv des Experimentes ist damit aber nicht verschwunden: Optisch dichte Medien vermitteln Sicht- und Beleuchtungsverhältnisse auf eine für uns “In-Luft-Seher” ungewohnte und oft überraschende Weise.

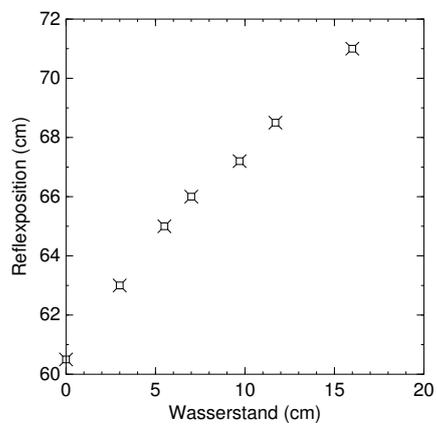


Abbildung 12.8.: Ergänzung II: Darstellung eines am Lineal (vgl. Abb. 12.4 und 12.5) abgelesenen Datensatzes “Reflexposition gegen Wasserstand”, die den linearen Zusammenhang zeigt.

Literatur

- AAAS. (1989). *The Scientific Enterprise*. <http://www.project2061.org/publications/bsl/online/index.php?chapter=1>.
- Aeschlimann, U. (1997). Pascals Barometer. In H. Berg & T. Schulze (Hrsg.), *Lehrkunstwerkstatt I* (S. 90 – 115). Luchterhand, Berlin.
- Aeschlimann, U. & Buck, P. (2007). Über vier Modi Gravitation zu verstehen und zwei Auffassungen, wie mit der Pluralität der [genuinen] Schülerverständnisse umgegangen werden soll. In D. Höttecke (Hrsg.), *Tagungsband der GDGP-Tagung in Essen 2007* (S. 188 – 190). Lit Verlag, Berlin.
- Aristoteles. (2003). *Nikomachische Ethik*. Phil. Reclam, Stuttgart.
- Aristotle. (1929/2003). *Nicomachean Ethics*. Loeb Classical Library.
- Backhaus, U. & Schön, L.-H. (2001). *Physik plus. Gymnasium Klasse 8, Nordrhein-Westfalen*. Verlag Volk und Wissen, Berlin.
- Baravalle, H. von. (1985). *Physik als reine Phänomenologie*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Basfeld, M. (1997). Phänomen – Element – Atmosphäre. Zur Phänomenologie der Wärme. In G. Böhme (Hrsg.), *Phänomenologie der Natur* (S. 190-222). Suhrkamp Verlag, Frankfurt a. M.
- Basfeld, M. (1998). *Wärme: Ur-Materie und Ich-Leib*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Bauer, H. (1966). Zur Physik des Wassers. *Erziehungskunst*, 1/2, 13 – 28.
- Bauer, H. (1976). Gibt es eine Schwerkraft? *Mathematisch-Physikalische Korrespondenz*, 100.
- Bauer, H. (2004). *Mechanik in goetheanistischer Darstellung*. Pädagogische Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen.
- Bauer, H. (2005). *Goethe und Newton – Die prismatischen Farben: Versuch einer Klärung*. Pädagogische Forschungsstelle Stuttgart.
- Baumert, J., Stanat, P. & Demmrich, A. (2001). PISA 2000: Untersuchungsgegenstand, theoretische Grundlagen und Durchführung der Studie. In *PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich* (S. 15 – 68). Leske + Budrich, Opladen.
- Berkeley, G. (1975). *Philosophical Works*. In (Kap. An essay towards a new theory of vision). Everyman, J. M. Dent, London.
- Bjerke, A. (1961). *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre*. Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Bleichroth, W., Dahncke, H., Jung, W., Kuhn, W., Nerzyn, G. & Weltner, K. (1999). *Fachdidaktik physik*. Aulis Verlag, Köln.
- Bockemühl, J. (1996 – 2004). *Ein Leitfaden zur Heilpflanzenerkenntnis*. Verlag am Goetheanum. (Drei Bände)

- Borges, J. L. (2004). *Fiktionen*. Fischer Verlag, Frankfurt.
- Born, M. (1970). *Optik. Eine Einführung in die elektromagnetische Lichttheorie*. Springer, Berlin.
- Bortoft, H. (1996). *The Wholeness of Nature: Goethe's Science of Conscious Participation in Nature*. Lindesfarne Press, Hudson NY.
- Bruhn, J. (1983). Zur Schwierigkeit des Physikunterrichts. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, **36**, 321–325.
- Buck, P. (1981). Die Thematisierung von Energie im Chemieunterricht. *chimica didactica*, **7**, 103–124.
- Buck, P. (1984). Was ist Chlor? Plädoyer für eine existenzialrelevante chemische Begriffsbildung. *chimica didactica*, *bf* **9**, 117–140.
- Buck, P. (1989). Ist Wasser ein Plastikwort? – von der Irrelevanz chemischer Begriffsbildung. *chimica didactica*, **15**, 151–164.
- Buck, P. (1996). Über physikalische und chemische Zugriffsmodi. *ZfDN*, **3**, 25–38.
- Buck, P. (2002). Verstehen verstehen. *Elemente der Naturwissenschaft*, **77**, 79–90.
- Buck, P. (2006a). Warum ist der Himmel blau? – Eine phänomenographische Miniatur. *chimica didactica etc.*, **97**, 130–137.
- Buck, P. (Hrsg.). (2006b). *Wie gelangt ein Mensch zu Sinn? Eine Installation zu Fragen der Pädagogik*. Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Buck, P. & Kretz, C. (1988). Vom Kochsalz zu den chlorierten Kohlenwasserstoffen. In M. Schallies (Hrsg.), *Umweltschutz – Umwelterziehung* (S. 104–128). Deutscher Studien-Verlag, Weinheim.
- Buck, P. & Mackensen, M. (2006). *Naturphänomene erlebend verstehen*. Aulis Verlag Deubner.
- Buck, P. & Müller [Rehm], M. (2002). Vier Thesen zur bildungstheoretischen Einordnung eines phänomenologischen Chemieunterrichtes. *chimica didactica*, **28**, 21–26.
- Buck, P. & Rehm, M. (2003). Die Kluft des Nicht-Verstehen-Wollens. *math. did.*, **26** (2), 3–20.
- Buck, P., Rehm, M., Lutz-Schön, H. & Theilmann, F. (2010). Wie gelangt eine Lehrperson zu ihren Lehrinhalten? Inhaltsauswahlkriterien im deutschen Physik- und Chemieunterricht im Vergleich. In H. Paschen (Hrsg.), *Erziehungswissenschaftliche Zugänge zur Waldorfpädagogik* (S. 327–336). VS Verlag, Wiesbaden.
- Burnet, J. (1979/1900). *The Ethics of Aristotle*. Arno Press.
- Bybee, R. (1997). Towards an Understanding of Scientific Literacy. In Gräber, W./ Bolte, C. (Hrsg.): *Scientific Literacy* (S. 37–68). IPN, Kiel.
- Böhme, G. & Schiemann, G. (Hrsg.). (1997). *Phänomenologie der Natur*. Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, Frankfurt am Main.
- Chomsky, N. (1969). *Aspekte der Syntax-Theorie*. Suhrkamp Verlag, Frankfurt.

- Dahlmann, W. (1998). Empathisches versus antipathisches Naturverstehen – ein Beitrag zu einer kulturalistischen Chemiedidaktik, I. *chimica didactica*, 77, 85 – 109.
- Dahlmann, W. (1999). Wider die Einseitigkeit, Kausalität nur als Wirkursache zu sehen – erkenntnistheoretische und anthropologische Grundlagen einer alternativen Naturwissenschaft – ein Beitrag zu einer kulturalistischen Chemiedidaktik, II. *chimica didactica*, 79, 23 – 60.
- Dawkins, R. (1976). *The selfish gene*. Oxford University Press.
- Der Karlsruher Physikkurs. (o.J.). <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/index.html>.
- Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG). (2006, März). *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik*. http://www.dpg-physik.de/info/broschueren/lehramtsstudie_2006.pdf.
- Deutsches PISA-Konsortium (Hrsg.). (2001). *PISA 2000: Untersuchungsgegenstand, theoretische Grundlagen und Durchführung der Studie*. Leske + Budrich, Opladen.
- Dewey, J. (1902). *The Child and the Curriculum*. The University of Chicago press.
- Die Kultusministerkonferenz. (1989/2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen im Fach Physik*. <http://www.kmk.org>.
- Ditfurth, H. (1976). *Der Geist fiel nicht vom Himmel – Die Evolution unseres Bewusstseins*. Hoffmann und Campe, Hamburg.
- Dittmann, H. & Schneider, W. (1989). Mit dem Computer ins Aquarium geschaut. In *Wege in die physikdidaktik* (Bd. I, S. 226 – 236). Palm & Enke, Erlangen. (<http://www.solstice.de/veroeffentlichungen/buchreihe-wege-in-der-physikdidaktik/band-1/wege-in-der-physikdidaktik-band1.html>)
- du Bois-Reymond, E. (1914). *Über die Grenzen des Naturerkennens*. Verlag Veit & Comp., Leipzig.
- Duit, R. (1986). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. IPN.
- Duit, R. (2004a). *Bibliography – stcse: Student's and teacher's conceptions and science education*. <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>.
- Duit, R. (2004b). Didaktische Rekonstruktion. *PIKO-Brief*, 2.
- Duit, R., Häußler, P., Mikelskis, H. & Westphal, W. (1995a). *Physik – Um die Welt zu begreifen (Jahrgangstufe 7/8)*. Diesterweg, Frankfurt am Main.
- Duit, R., Häußler, P., Mikelskis, H. & Westphal, W. (1995b). *Physik – Um die Welt zu begreifen (Jahrgangstufe 9/10)*. Diesterweg, Frankfurt am Main.
- Duit, R., Häußler, P. & Prenzel, M. (2001). Schulleistungen im Bereich naturwissenschaftlicher Bildung. In F. Weinert (Hrsg.), *Leistungsmessung in Schulen* (S. 169 – 186). Beltz Verlag, Weinheim.

- Eddington, A. (1935). *Die Naturwissenschaften auf neuen Bahnen*. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Einsiedler, O. (2007). *Schülervorstellungen zur Ausbreitung des Lichts*. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung, Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd.
- Erb, R. (1992). Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. *Physik in der Schule*, **30** (9), 291 – 293.
- Erb, R. (1994). *Optik mit Lichtwegen*. Westarp Wissenschaften, Bochum und Magdeburg.
- Erb, R. (1995). Optik in der Oberstufe. *Physik in der Schule*, **33** (2), 51 – 56.
- Erb, R. (1999). *Das Thema "Optische Abbildung" im Physikunterricht*. Habilitationsschrift.
- Erb, R. & Schön, L. (1996). Ein Blick in den Spiegel – Einblick in die Optik. In H. Fischer (Hrsg.), *Handlungs- und Kommunikationsorientierter Unterricht in der Sekundarstufe II*. Dümmler Verlag, Bonn.
- Feynman, R. P. (2002). *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton Science Library.
- Fierz, M. (1983). Vorwort. In *Isaac Newton: Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts*. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Fischer, E. (2003). *Die aufschimmernde Nachtseite. Kreativität und Offenbarung in den Naturwissenschaften*. Libelle Verlag.
- Fischer, H., Glemnitz, I., Kauertz, A. & Sumfleth, E. (2006). Auf Wissen aufbauen – kumulatives Lernen in Chemie und Physik. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg.
- Foucault, M. (1996). *Die Ordnung des Diskurses*. Fischer Verlag, Frankfurt.
- Foundation, N. N. S. (Hrsg.). (1970). *Report of the Advisory Committee for Science Education – The Task ahead for the National Science Foundation* (Bd. NSF Publication 71-13). NSF (National Science Foundation).
- Friege, G. (2000). *Wissen und Problemlösen*. Logos Verlag, Berlin.
- Friege, G. & Lind, G. (2003). Allgemeine und fachspezifische Problemlösekompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, **9**, 63 – 74.
- Gaarder, J. (1999). *Sophies Welt*. DTV, München.
- Galilei, G. (1896). *Ii saggiatore* (Bd. VI). Edition Nazionale, Florenz.
- Gasser, P. (1997). Fallstudie zum Lehrstück "Pascals Barometer". In H. Berg & T. Schulze (Hrsg.), *Lehrkunstwerkstatt i* (S. 119 – 124). Luchterhand, Berlin.
- Gläser, E. (2002). *Arbeitslosigkeit aus der Perspektive von Kindern*. Verlag Julis Klinckhardt.
- Goethe, J. (1979). *Farbenlehre*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.

- Goethe, J. W. von. (1973). Der Versuch als Vermittler von Subjekt und Objekt. In *Gesamtausgabe* (Bd. Band 39). DTV.
- Grebe, J. (2008). Zeit und Lernen: Erfahrungen mit Epochenunterricht – Eine Recherche. In D. Höttecke (Hrsg.), *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Schwäbisch Gmünd* (S. 232 – 234). Lit Verlag, Münster.
- Grebe-Ellis, J. (2001). Doppeldrehung und Polarisation. *Elemente der Naturwissenschaft*, 75, 13 – 32.
- Grebe-Ellis, J. (2005). *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*. Logos Verlag, Berlin.
- Grebe-Ellis, J. (2006a). Phänomenologische optik: eine optik der bilder (teil i). *chmica didactica etc.*, 97, 81 – 124.
- Grebe-Ellis, J. (2006b). Von der Optik im Tastraum zu einer Optik des Sehens. In J. Grebe-Ellis & F. Theilmann (Hrsg.), *open eyes 2005* (S. 235 – 245). Logos Verlag, Berlin.
- Grebe-Ellis, J., Sommer, W. & Vogt, J. (2002). *Modellfreie Optik II – Hebung, Beugung und Polarisation. Abituraufgaben*. Pädagogische Forschungsstelle Kassel.
- Grebe-Ellis, J. & Theilmann, F. (Hrsg.). (2006). *Open Eyes 2005. Tagungsband*. Logos Verlag, Berlin.
- Greenler, R. (1994). *Rainbows, Halos, and Glories*. Peanut Butter Publishing.
- Guderian, P. (2006). *Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte*. Unveröffentlichte Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin. (<http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/guderian-pascal-2007-02-12/PDF/guderian.pdf>)
- Guderian, P. & Schön, L.-H. (2004). *Von der Spiegelwelt zu den Planetenbahnen*. Vortrag auf der DPG-Frühjahrstagung 2004.
- Hagemester, V. (2001). Ein Beitrag zur Analyse der empirischen Basis von TIMSS. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 54 (7), 178 – 184. (Vgl. auch die Erwiderung von F. K. Schmidt und “Widererwiderung” in MNU 54/7 pp. 442)
- Hammann, M. (2004). Kompetenzentwicklungsmodelle. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 57 (4), 196 – 203.
- Hartmann, S. (2004). *Erklärungsvielfalt*. Logos Verlag, Berlin.
- Heisenberg, W. (2002). *Der Teil und das Ganze*. Piper Verlag, München.
- Heithecker, B. (2006). *Phänomenologie der Krafterscheinungen*. Logos Verlag, Berlin.
- Herrmann, F. & Job, G. (2002). *Altlasten der Physik*. Aulis Verlag.
- Herzog, W., Neuenschwander, M., Violi, E., Labudde, P. & Gerber, C. (1999). Mädchen und Jungen im koedukativen Physikunterricht: Ergebnisse einer Interventionsstudie auf der Sekundarstufe II. *Bildungsforschung und Bildungspraxis* (1), 99 – 124.

- Heuer, D. & Wilhelm, T. (1997). Aristoteles siegt immer noch über Newton. *MNU (Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht)*, 50, 280 – 285.
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. IPN, Kiel.
- Holt, L. (2002). *Apprehension. Reason in the absence of rules*. Ashgate, Hants.
- Holtsmark, T. (1969). A Demonstration of Additive Color Mixing Rules under the Influence of Color Contrast. *American Journal of Physics*, 37 (6), 662 – 664.
- Holtsmark, T. (1970). Newton's Experimentum Crucis Reconsidered. *American Journal of Physics*, 38 (10), 1229 – 1235.
- Holtsmark, T. & Valberg, A. (1971). On Complementary Color Transitions due to Dispersion. *American Journal of Physics*, 39, 201 – 204.
- Hopf, M., Tobias, V., Waltner, C., Wilhelm, T. & Wiesner, H. (2009). *Einführung in die Mechanik*. Eigenverlag. <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/Mechanikbuch\%20Auflage3.pdf>.
- Horn, M. (2007). *Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes zur Holographie mit Untersuchungen von Lernprozessen zur Interferenzoptik*. Dissertation, Universität Potsdam.
- Horn, M., Leisner, A. & Mikelskis, H. (2002). Schülervorstellungen zur Holographie. *Tagungs-CD der DPG-Frühjahrstagung 2002*.
- Hulst, H. (1982). *Light Scattering by Small Particles*. Peter Smith Pub Inc.
- Höttecke, D. (2001). *Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen*. Logos Verlag, Berlin.
- Höttecke, D. (2006). Kompetenz und Bildung – ein Vermittlungsversuch. *Tagungs-CD der DPG-Frühjahrstagung 2006*.
- Höttecke, D. (2007). Historisch orientierter Physikunterricht. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik Methodik. Ein Handbuch für den Unterricht* (S. 57 – 69). Cornelsen Verlag, Berlin.
- Janich, P. (1992). *Grenzen der Naturwissenschaft*. C. H. Beck, München.
- Janich, P. (1997). *Das Maß der Dinge*. Suhrkamp, Frankfurt.
- Job, G. (1994). Altlasten der Physik (1): Die Energieformen. *Physik in der Schule*, 32, pp. 322.
- Julius, F. (1982). *Entwurf einer Optik*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Jung, W. (1997). Konstruktivismus, Physikalismus und Phänomenologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 3 (2), 3 – 14.
- Kasper, L. (2007a). *Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*. Logos Verlag, Berlin.
- Kasper, L. (2007b). Narration. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik Methodik. Ein Handbuch für den Unterricht* (S. 164 – 171). Cornelsen Verlag, Berlin.

- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (2005). Das Modell der didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftdidaktische Forschung und Entwicklung. *ZfDN*, 3 (3), 3 – 18.
- Kircher, E. (1995). *Studien zur Physikdidaktik*. IPN, Kiel.
- Kirschner, P., Sweller, J. & Clark, R. (2006). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: AN ANalysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experimental, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, 41 (2), 75 – 86.
- Klafki, W. (1959). *Das Problem des Elementaren und die Theorie der Kategorialen Bildung*. Beltz Verlag, Weinheim.
- Klafki, W. (1996). *Neue Studien zu Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik*. Beltz Verlag, Weinheim.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M. et al. (2003). *Zur entwicklung nationaler Bildungsstandards*. <http://www.bmbf.de>.
- Klimawandel vor Gericht*. (2009). <http://www.idn.uni-bremen.de/klimawandel/>.
- Koyré, A. & Cohen, B. (Hrsg.). (1972). *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.).
- Krapp, A. (1992). Konzepte und Forschungsansätze zur Analyse des Zusammenhangs von Interesse, Lernen und Leistung. In A. Krapp & M. Prenzel (Hrsg.), *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung* (S. 9 – 52). Aschendorf, Münster.
- Krapp, A. & Schiefele, H. (1989). Haben Sie Interesse! *Psychologie heute*, 16 (12), 40 – 45.
- Kraus, M. (2010). Kompetenzen fördern statt fordern. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 63 (1), 56 – 60.
- Krause, R. (2007). *Vorstellungen zur optischen Abbildung*. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung, Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd.
- Krüger, L. (Hrsg.). (1970). *Erkenntnisprobleme der Naturwissenschaft*. Kiepenheuer und Wisch, Berlin.
- Kuchnowski, M. (2008). *Ästhetische Zugänge zur Chemie*. Inauguraldissertation der Christian Albrechts-Universität zu Kiel.
- Kuhn, T. (2002). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Suhrkamp Verlag, Frankfurt.
- Kulgemeyer, C. & Schecker, H. (2009a). Kommunikationskompetenz in Physik: Zur Entwicklung eines domänenspezifischen Kommunikationsbegriffs. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 15, 131 – 153.
- Kulgemeyer, C. & Schecker, H. (2009b). Physikalische Darstellungsformen. Ein Beitrag zu Klärung von “Kommunikationskompetenz”. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 62 (6), 328 – 331.

- Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz. Erläuterungen zur Konzeption und Entwicklung.* (2004a). Luchterhand.
- KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10).* (2004b). Luchterhand.
- Köhnlein, W. (1982). *Exemplarischer Physikunterricht.* B. Franzbecker Verlag, Bad Saltdetfurth.
- Köhnlein, W. (1998). *Der Vorrang des Verstehens.* Julius Klinkhard-Verlag.
- Kühl, J. (2000). Goethes Farbenlehre und die moderne Physik. In P. Heusser (Hrsg.), *Goethes Beitrag zur Erneuerung der Naturwissenschaften* (S. 409 – 432). Verlag Paul Haupt, Bern/Stuttgart/Wien.
- Labudde, P. (1993). *Erlebniswelt Physik.* Dümmler Verlag, Bonn.
- Labudde, P., Duit, R., Fickermann, D., Fischer, H., Harms, U., Mikelskis, H. et al. (2009). Schwerpunkttagung “Kompetenzmodelle und Bildungsstandards: Aufgaben für die naturwissenschaftsdidaktische Forschung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 15, 331 – 358.
- Langlet, J. (2010). Doppelstunden im naturwissenschaftlichen Unterricht. In (Kap. Unterrichtsdrehbücher). MNU Themenreihe Bildungsstandards.
- Lehrke, M. (1988). *Interesse und Desinteresse am naturwissenschaftlich-technischem Unterricht.* IPN, Kiel.
- Leisner, A. (2005). *Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht.* Logos Verlag, Berlin.
- Lenewit, G. (2008). Methodisches zur goetheanistischen Physik. In R. Dorika, R. Gehlig, A. Heinze & H.-J. Strüh (Hrsg.), *Jahrbuch für Goetheanismus 2008/2009* (S. 293 – 344). Tycho-Brahe-Verlag, Niefern-Öschelbronn.
- Leopold Infeld, A. E. und. (1987). *Die Evolution der Physik.* Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck bei Hamburg.
- Lobek, F. (1954). *Farben anders gesehen.* Zbinden Verlag, Basel.
- Mackensen, M. (1982). *Klang, Helligkeit und Wärme.* Berufsbildendes Gemeinschaftswerk Kassel.
- Mackensen, M. (2003). *Felder, Wellen und Zerfall.* Pädagogische Forschungsstelle Kassel.
- Mackensen, M. & Ohlendorf, H. (1998). *Modellfreie Optik. Zur Physik der 12. Klasse.* Pädagogische Forschungsstelle Kassel.
- Mackensen, M. & Ohlendorf, H. (2000). *Kräfte – Eine Einführung.* Pädagogische Forschungsstelle Kassel.
- Maier, G. (1988). Eine Stufenfolge optischer Grundsätze. *Elemente der Naturwissenschaft*, 49, 96 – 106.
- Maier, G. (1993a). Gedanken zur Komplementarität. *Elemente der Naturwissenschaft*, 58, 65 – 75.
- Maier, G. (1993b). *Optik der Bilder.* Kooperative Dürnau.

- Maier, G. (1993c). *Optik der Bilder*. Kooperative Dürnau.
- Maier, G. (2004a). *blicken – sehen – schauen. Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft. Zusammengestellt von Johannes Grebe-Ellis*. Kooperative Dürnau.
- Maier, G. (2004b). Ein verformbarer Hohl-Wölb-Spiegel. In *blicken – sehen – schauen* (S. 63 – 77). Kooperative Dürnau. (Ursprünglich erschienen in *Elemente der Naturwissenschaft* 22:33 – 43 (1975).)
- Maier, G. (2008). Aesthetics: Appreciating the Appearances. In *Being on Earth*. Logos Verlag, Berlin.
- Marquardt-Mau, B., Mayer, J. & Mikelskis, H. (1993). *Umwelt. Lexikon ökologisches Grundwissen*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek bei Hamburg.
- Martin, M. (1979). *Die Kontroverse um die Farbenlehre*. Novalis Verlag, Schaffhausen.
- Marton, F. & Booth, S. (1997). *Learning and Awareness*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah (NJ).
- Mathematics), N. N. C. of Teachers of (Hrsg.). (1998). *Principles and Standards for School Mathematics*. NCTM (National Council of Teachers of Mathematics).
- Mayer, J. (1980). *Die universelle Anwendung des Prinzips vom mechanischen Äquivalent der Wärme*. Franzbecker Verlag, Bad Salzdetfurth.
- McClelland, D. (1973). Testing for Competence Rather Than for “Intelligence”. *American Psychologist*, 28, 1 – 14.
- McComas, W., Clough, M. & Almazroa, H. (1998). The Role and Character of the Nature of Science in Science Education. In W. McComas (Hrsg.), *The Nature of Science in Science Education – Rationales and Strategies* (S. 3 – 40). Kluwer Academic Press, Dordrecht.
- McComas, W. & Olson, J. (1998). The Nature of Science in International Science Education Standards Documents. In *The Nature of Science in Science Education* (S. 41 – 52). Kluwer Academic Publishers.
- Megenberg, C. (1990). *Buch der Natur*. Insel Verlag, Frankfurt.
- Messner, R. & Rumpf, H. (1992). Natur und Bildung – Gedanken zum schulischen Umgang mit Naturfragen. *Die Grundschulzeitschrift*, 9 – 13.
- Messner, R., Rumpf, H. & Buck, P. (1997a). Formen des Naturwissens. *Chimica Didactica*, 74 (1), 5 – 31.
- Messner, R., Rumpf, H. & Buck, P. (1997b). Natur und Bildung – Über Aufgaben des naturwissenschaftlichen Unterrichts und Formen des Naturwissens. *chimica didactica*, 23, 5 – 31.
- Metzger, W. (1975). *Gesetze des Sehens*. Waldemar Kramer, Frankfurt.
- Meyer, H. (2004). *Was ist guter Unterricht?* Cornelsen Verlag, Berlin.
- Mikelskis, H. (1977a). Die Aspekte des Themas “Energieversorgung durch Kernkraft-

- werke" als Ausgangspunkt für einen fachüberschreitenden Physikunterricht. *Der Physikunterricht*, 11 (2), 41 – 52.
- Mikelskis, H. (1977b). *IPN Curriculum 9/10*. Klett Verlag, München.
- Mikelskis, H. (1980). Das Thema Energieversorgung im Physikunterricht. 1980, S. . *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie*, 28 (11), 387 – 393.
- Mikelskis, H. (1988). Zu den Anfängen einer Optik der Farben Heft 2, Bad Salzdetfurth 1988, S. 21 - 44. *physica didactica*, 15 (2), 21 – 44.
- Mikelskis, H. (2006a). Goethe meets Newton – ein multimedialer, narrativer Disput über Farben. In A. Pitton (Hrsg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Jahrestagung der GDGP in Paderborn 2005* (S. 93 – 96). (Vgl. http://www.uni-potsdam.de/db/physik_didaktik/files/goethe.pdf)
- Mikelskis, H. (2006b). Physikunterricht als Beitrag zu gesellschaftlichen Schlüsselproblemen. In H. Mileskis (Hrsg.), *Physikdidaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 11 – 37). Cornelson Verlag, Berlin.
- Mikelskis, H. (2007). Unterrichtsprinzipien: exemplarisch – genetisch – sokratisch. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik Methodik. Ein Handbuch für den Unterricht* (S. 44 – 56). Cornelsen Verlag, Berlin.
- Mikelskis, H. & Rabe, T. (2006). Schülervorstellungen zur Beugung am Spalt. In J. Grebe-Ellis und F. Theilmann (Hrsg.), *open eyes 2005 – Tagungsband* (S. 91 – 110). Logos Verlag, Berlin.
- Mikelskis, H., Seifert(-Mikelskis), S. & Roesler, F. (1999). Optik lernen mit der Simulationssoftware phenOpt. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 52 (8), 460 – 466.
- Mikelskis-Seifert, S. (2002a). *Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern*. Logos Verlag, Berlin.
- Mikelskis-Seifert, S. (2002b). *Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multibler Repräsentationsebenen*. Logos Verlag, Berlin.
- Mikelskis-Seifert, S. (2006a). Die Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. In H. Mikelskis (Hrsg.), *Physik Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 120 – 138). Cornelsen Verlag, Berlin.
- Mikelskis-Seifert, S. (2006b). Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. In *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 120 – 138). Cornelsen Verlag, Berlin.
- Mikelskis-Seifert, S., Thiele, M. & Wünscher, T. (2005). Modellieren – Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. *PhyDid*, 4 (1), 30 – 46.
- Minnaert, M. (1999). *Light and Colour in the Outdoors*. Springer, New York.
- Minssen, M. & Buck, P. (1986). Das also ist Wasser! – Das alles ist Wasser! *chimica didactica*, 12, 113 – 136.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Cornelsen Verlag, Berlin.

- Murmann, L. (2006). Phänomenologische Erkenntnistheorie und Fachdidaktik. In J. Grebe-Ellis & F. Theilmann (Hrsg.), *open eyes 2005 – Tagungsband* (S. 111 – 125). Logos Verlag, Berlin.
- Müller, O. (2007). Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma. In J. Steinbrenner & S. Glasauer (Hrsg.), *Farben. Betrachtungen aus Philosophie und Naturwissenschaften* (S. 64 – 101). Suhrkamp Verlag, Frankfurt.
- Nabokov, V. (1999). *Speak, Memory*. Everymans Library. (Ursprünglich publiziert in den Jahren 1947 ff. als Artikelserie in der Zeitschrift *New Yorker* und anderen Literaturjournalen)
- Nasser, A. (1994). Apparent Depth. *The Physics Teacher*, **32**, 526 – 529.
- Neumann, K., Kauertz, A., Lau, A., Notarp, H. & Fischer, H. (2007). Die Modellierung physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, **13**, 101 – 121.
- Niedrig, H. (Hrsg.). (1993). *Bergmann – Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik. Optik* (Bd. III). Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Nussbaumer, I. (2008). *Zur Farbenlehre*. edition solitter, Wien.
- Nölle, B. (1986). Willmann, Wagenschein und Wyss. Didaktische Variationen über den Lehrsatz des Pythagoras. *Neue Sammlung.*, **26** (4), 559 – 565.
- Nölle, B. (2007). *Wagenschein und Lehrkunst in mathematischen Exempeln*. Franzbecker Verlag, Hildesheim.
- OECD (Organization for the Economic Co-Operation and Development). (1991). *Schools and Quality*.
- OECD (Organization for the Economic Co-Operation and Development). (1999). *Measuring student knowledge and skills: A framework for assessment*. www.oecd.org/dataoecd/45/32/33693997.pdf.
- Olson, S. & Loucks-Horsley, S. (Hrsg.). (2000). *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington D. C.
- Ott, G. (1965). *Zur Entstehung der prismatischen Farben*. Zbinden Verlag.
- Parchmann, I. & Demuth, R. (2004). Energie verstehen – Energie nutzen: Bedeutung des Basiskonzeptes Energie zur Entwicklung einer Scientific Literacy. *chimica didactica*, **93/94**, 132 – 143.
- PhenOpt Lernsoftware*. (1995). http://www.uni-potsdam.de/u/physik/didaktik/homepage/mik1.htm/index.php?article_id=34&clang=0?87,43.
- Physik im Kontext*. (o.J.). <http://www.uni-kiel.de/piko/>.
- Picht, G. (1965). *Die deutsche Bildungskatastrophe*. DTB, München.
- Pitton, A. (Hrsg.). (2006). *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP) in Paderborn*. Lit-Verlag, Münster.

- Plato. (2005). *Menon*. Philipp Reclam Junior, Stuttgart.
- Popper, K. (1992). *Die offene Gesellschaft und ihre Feinde*. UTB, Stuttgart.
- Popper, K. (2005). *Logik der Forschung*. Mohr Siebeck, Tübingen.
- Prenzel, M. (1988). *Die Wirkungsweise von Interesse*. Westdeutscher Verlag, Opladen.
- Prenzel, M., Rost, J., Senkbeil, M., Häußler, P. & Klopp, A. (2001a). Naturwissenschaftliche Grundbildung: Testkonzeption und Ergebnisse. In *PISA 2000: Untersuchungsgegenstand, theoretische Grundlagen und Durchführung der Studie* (S. 192 – 250). Leske + Budrich, Opladen.
- Prenzel, M., Rost, J., Senkbeil, M., Häußler, P. & Klopp, A. (2001b). Naturwissenschaftliche Grundbildung: Textkonzeption und Ergebnisse. In J. Baumert et al. (Hrsg.), *PISA 2000: Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich* (S. 192 – 250). Leske und Budrich, Opladen.
- Priemer, B. (2004). *Physiklernen mit dem Internet*. Verlag Peter Lang.
- Proskauer, H. (2003). *Zum Studium von Goethes Farbenlehre*. Zbinden Verlag.
- Pörksen, U. (1988). *Plastikwörter – Die Sprache einer internationalen Diktatur*. Klett-Cotta Verlag, Stuttgart.
- Quick, T. & Grebe-Ellis, J. (2010). *Wo wird das Bild einer unter Wasser liegenden Münze gesehen?* Vortrag auf der Frühjahrstagung der DPG 2010 in Hannover (DD 18). (Vgl. auch Phydid B)
- Rahmenlehrplan für die Klassen 7 – 10, Brandenburg.* (2008). <http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de>.
- Rang, M. (2009). Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. *Elemente der Naturwissenschaft*, **90**, 46 – 79.
- Rang, M. (2010). *Experimente mit der Spiegelspaltblende*. http://www.lehrerseminar-forschung.de/lehrmittel_buecher/shop/catalog/advanced_search_result.php?keywords=spiegelspaltblende&x=0&y=0. (Gerät und Unterrichts Anwendungen.)
- Rang, M. & Grebe-Ellis, J. (2009). Komplementärspektren - Experimente mit einer Spiegelspaltblende. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, **62** (4), 227 – 231.
- Rang, M. & Müller, O. (2009). Newton in Grönland. *Philosophia naturalis*, **46**, 61 – 114.
- Redeker, B. (1995). *Martin Wagenschein phänomenologisch gelesen*. Deutscher Studien Verlag, Weinheim.
- Rehm, M. (2006). Allgemeine naturwissenschaftliche Bildung – Entwicklung eines vom Begriff “Verstehen” ausgehenden Kompetenzmodells. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, **12**, 23 – 44.
- Rehm, M. (2007). Testaufgaben zur Erhebung des Verstehens als Fähigkeitsmerkmal naturwissenschaftlicher Kompetenz. *chimica etc. didacticae*, **100**, 105 – 136.

- Rehm, M. & Murmann, L. (2007). Verstehen *lehren* und Erfahrungslernen. *Lehren und Lernen*, 2, 34 – 39.
- Reinhold, P., Lind, G. & Friege, G. (1999). Wissenszentriertes Problemlösen in Physik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 5 (1), 41 – 62.
- Rozumek, M. (2003). Elemente eines prozessualen Stoffbegriffs, entwickelt in Anknüpfung an die aktuelle Wissenschaftspraxis der Chemie. *chimica didactica*, 29, 11 – 33.
- Rumpf, H. (2004). *Diesseits der Belehrungswut – Pädagogische Aufmerksamkeiten*. Juventa Verlag, Weinheim.
- Rumpf, H. (2006). Ist die Schule als Sinnvermittlungsinstitut überfordert? In P. Buck (Hrsg.), *Wie gelangt ein Mensch zu Sinn?* (S. 67 – 72). Verlag Freies Geistesleben.
- Schad, W. (1982 – 1985). *Goetheanistische Naturwissenschaft*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart. (4 Bände)
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *ZfDN*, 12, 45 – 67.
- Scheler, K. (2004). Energie als Tauschwert – ein neuer Ansatz zur Erschließung des Energiebegriffs in der Sekundarstufe I. *chimica didactica*, 93/94, 67 – 80.
- Scheuerl, H. (1958). *Die exemplarische Lehre*. Niemeyer Verlag, Tübingen.
- Schieren, J. (1998). *Anschauende Urteilskraft*. Parerga Verlag, Köln und Bonn.
- Schmidt, M. (2008). *Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I – Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*. Logos, Berlin.
- Schreiber, N., Theyßen, H. & Schecker, H. (2009). Experimentelle Kompetenz messen?! *PhyDid*, 8 (3), 92 – 101.
- Schwenk, T. (1997). *Das sensible Chaos*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Schön, L.-H. (1994). Ein Blick in den Spiegel – von der Wahrnehmung zur Optik. *Physik in der Schule*, 32, 2 – 5.
- Science), A. A. A. for the Advancement of (Hrsg.). (1989). *Science for all AMERICANS*. AAAS (American Association for the Advancement of Science).
- Sciences, N. A. of. (o.J.). *Science Education Standards*. <http://www.nap.edu/catalog/4962.html>.
- Shamos, M. (2002). Durch Prozesse ein Bewusstsein für die Naturwissenschaften entwickeln. In W. Gräber, P. Nentwig, T. Koballa & R. Evans (Hrsg.), *Scientific Literacy – Der Beitrag der Naturwissenschaften zur Allgemeinen Bildung* (S. 45 – 68). Leske und Budrich, Opladen.
- Shulman, L. (1984). The Practical and the Eclectic: A Deliberation on Teaching and Educational Research. *Curriculum Inquiry*, 14 (2), 183 – 200.
- Shulman, L. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15 (2), 4 – 14.

- Shulman, L. (2004). Lee S. Shulman/Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. In S. Wilson (Hrsg.), *The Wisdom of Practice: Essays on Teaching, Learning, and Learning to Teach* (S. 189 – 215). Wiley.
- Soentgen, J. (1994). Chaotisierendes Chaos – eine Phänomenologie des Wassers. *Novalis* (4/5), 34 – 40.
- Soentgen, J. & Völtzke, K. (Hrsg.). (2006). *Staub – Spiegel der Umwelt*. oekom Verlag, München. (Band I der Reihe “Stoffgeschichten”)
- Sommer, W. (2005). *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege*. Logos Verlag, Berlin.
- Sommer, W., Grebe-Ellis, J. & Vogt, J. (2004). Zur Beugung – Von einfachen Freihandversuchen über die Laue-Kegel zum reziproken Gitter und zur Ewald-Kugel. *PhyDid* 2/3, 67 – 86.
- Sommer, W. & Meinzer, N. (2009). Vom Kranz zum Beugungsbild – Untersuchung von Unordnungs-Ordnungsübergängen. *PhyDid*, 8 (4), 104 – 111.
- Starauscheck, E. (2002a). Ergebnisse einer Evaluationsstudie zum Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 8, 7 – 21.
- Starauscheck, E. (2002b). Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer empirischen Studie. *PhyDid*, 1 (1), 12 – 18.
- Starauscheck, E. (2003). Elektrizitätslehre nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer empirischen Studie. *PhyDid*, 2 (1), 39 – 47.
- Steiner, R. (1987). *Einleitungen zu Goethes Naturwissenschaftlichen Schriften*. Rudolf Steiner Verlag, Dornach. (GA 1)
- Steinle, F. (1998). Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren: Ampères frühe Arbeiten zum Elektromagnetismus. In M. Heidelberger und F. Steinle (Hrsg.), *Experimental Essays – Versuche zum Experiment* (S. 272 – 297). Nomos Verlag, Baden-Baden.
- Steinle, F. (2006). “Das Nächste ans Nächste reihen”: Goethe, Newton und das Experiment. In Johannes Grebe-Ellis und Florian Theilmann (Hrsg.), *open eyes 2005. Tagungsband*. Logos Verlag, Berlin.
- Suchantke, A. (2002). *Metamorphose – Kunstgriff der Evolution*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Sumfleth, E., Fischer, H., Glemnitz, I. & Kauertz, A. (2006). Ein Modell vertikaler Vernetzung im naturwissenschaftlichen Unterricht. In A. Pitton (Hrsg.), *Lehren und lernen mit neuen Medien. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik* (S. 219 – 221). Lit Verlag, Münster.
- Sällström, P. (2010). *Monochromatische Schattenstrahlen - Ein Film über die Rehabilitation der Dunkelheit*. DVD. ISBN 978-3-940606-60-0.
- Theilmann, F. (2002, November). Energie und ihr Umfeld, unmetaphysisch bedacht. *Erziehungskunst*, 11, 1205 – 1216.

- Theilmann, F. (2003). Experimentieren zwischen affirmativer Praxis und Entertainment. *MNU (Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht)*, 56, 368 – 370.
- Theilmann, F. (2006a). *Expeditionen in die Mechanik*. Edition Waldorf.
- Theilmann, F. (2006b). Wie kinematisch ist die Lichtgeschwindigkeit? In Johannes Grebe-Ellis und Florian Theilmann (Hrsg.), *open eyes 2005. Tagungsband*. Logos Verlag, Berlin.
- Theilmann, F. (2007). Jenseits von Goethe und Newton. *Erziehungskunst*, 5, 499 – 504.
- Theilmann, F. (2008a). Der Gedanke im Kontext. Zur Charakteristik einer erscheinungsorientierten Physik. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 61(4), 236 – 241.
- Theilmann, F. (2008b). Physikalisches Verstehen als fachbezogene Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, 14, 99 – 124.
- Theilmann, F., Aeschlimann, U., Buck, P., Dahlin, B., Kuchnowski, M., Østergaard, E. et al. (2010). Von der Erfahrung zum Verständnis – individuelle Zugänge zum Phänomen. In D. Höttecke (Hrsg.), *Die Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Systematik und Phänomen – Jahrestagung der GDGP in Dresden* (S. N.). Lit-Verlag. (Erscheint wegen eines Herausgeberfehlers erst 2011 im Tagungsband zur Tagung 2010 in Potsdam.)
- Theilmann, F., Grebe-Ellis, J. & Rang, M. (2009). Lichtspuren im Wasser – Ein Experiment zum Verhältnis von Hebung und Brechung. *PhyDid*, 8 (3), 86 – 91.
- Theilmann, F. & Maier, G. (2004). Die Frage nach der Lichtgeschwindigkeit im Kontext der modellfreien Optik. *MNU (Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht)* 57/7, 413 – 419.
- Theilmann, F. & Rehm, M. (2005). Die phänomenalen physikalischen, chemischen und biologischen Erfahrungsgrundlagen eines Begriffs von Energie als Bilanzierungsgröße. *chimica didactica*, 96, 42 – 60.
- Theyßen, H., Schmidt, M., Einhaus, E. & Schecker, H. (2006). Ein indikatorbasiertes Verfahren zur Einstufung von Testaufgaben in ein Kompetenzmodell. *PhyDid*, 5 (2), 123 – 134.
- Thiel, C. (1972). *Grundlagenkrise und Grundlagenstreit. Studie über das normative Fundament der Wissenschaften am Beispiel von Mathematik und Sozialwissenschaft*. Hain, Meisenheim am Glan.
- Veugelers, P. (2005). Prismatic colours explained with Goethe's fundamental phenomenon. *Elemente der Naturwissenschaft*, 82, 73 – 86.
- Wagenschein, M. (1951). *Das Tübinger Gespräch*. <http://martin-wagenschein.de/Archiv/W-102.pdf>.
- Wagenschein, M. (1953). *Natur physikalisch gesehen*. Diesterweg.

- Wagenschein, M. (1962). *Die pädagogische Dimension de Physik*. Westermann, Braunschweig.
- Wagenschein, M. (1965). *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken*. Klett, Stuttgart.
- Wagenschein, M. (1968). Verstehen lehren. In (Kap. Zum Problem des genetischen Lehrens). Beltz Verlag, Weinheim.
- Wagenschein, M. (1999a). *Verstehen lehren*. Beltz.
- Wagenschein, M. (1999b). *Verstehen lehren*. Beltz.
- Weber, T. & Schön, L.-H. (2000). Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz – Vorschläge zum Anfangsunterricht über Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht: Physik*, 11 (60), 30 – 36.
- Weinert, F. E. (2001). Leistungsmessungen in Schulen. In (Kap. Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit). Beltz Pädagogik, Weinheim.
- Weizsäcker, C. (1943). Kontinuität und Möglichkeit. In *Zum Weltbild der Physik* (S. 211 – 239). S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- Werner, J. (2000). *Vom Licht zum Atom*. Logos Verlag, Berlin.
- Whitehead, A., Russell, B. & Gödel, K. (2008). *Principia mathematica*. Suhrkamp Verlag, Frankfurt.
- Wiesing, L. (2009). *Das Mich der Wahrnehmung. Eine Autopsie*. Suhrkamp Verlag, Frankfurt.
- Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. (o.J.). <http://www.wikipedia.de>.
- Wilhelm, T. (o.J.). *Publikationsverzeichnis*. <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/publikationen.htm>.
- Willer, J. (2003). *Didaktik des Physikunterrichts*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- Wittgenstein, L. (1994). *Philosophische Bemerkungen (Wiener Ausgabe)* (Bd. I). Springer Verlag, Wien.
- Wyss, A., Bühler, E., Liechti, F. & Perrin, R. (1995). *Lebendiges Erkennen durch Geometrie*. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- Yeo, S. & Zadnik, M. (2000). Newton, we have a problem.. *Australian Science Teachers Journal*, 46 (1).