

Walter Jung

Fakten und Deutungen in den Naturwissenschaften.

Analyse eines didaktischen Problems

1 Einleitung

Meine sehr verehrten Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen ! Für die Einladung zu einem Vortrag, der recht passend einzuordnen ist, danke ich dem Fachbereich sehr herzlich. 1992 hatte ich im Anschluss an einen Vortrag an der Freien Universität Berlin einen Schwur getan, nie wieder Vorträge zu halten. Dank der Überredungskunst eines Ihrer Kollegen breche ich nun diesen Schwur, und daran mögen sie meine außerordentliche Wertschätzung für den Kollegen Bruhn ermessen. Gegen meine Bedenken wegen des schlechten Gewissens wurde freundlicherweise geltend gemacht, ein schlechtes Gewissen sei immerhin besser als gar keines.

Der Direktor des Instituts 6 im Fachbereich schrieb, ich hätte mich bereit erklärt, einen „wissenschaftlichen Vortrag“ zu halten. Wenn ich mich recht erinnere, war das nicht ganz der Tenor bei der Anfrage, bei der eher meine Weisheit gefragt schien, wobei sicher Altersweisheit gemeint war. Doch sind Weisheit und Wissenschaft durchaus disjunkt. Ich werde versuchen, beide Elemente zu verbinden. Dass ich dabei meiner bekannten Neigung zum Zitieren gelegentlich nachgebe, mögen Sie mir nachsehen, ebenso wie einige an passender Stelle eingefügte biographische Bemerkungen als Tribut ans Alter.

2 Wissenschaft – hart oder weich ?

Lassen Sie mich, in der gebotenen Verkürzung, einige Anmerkungen zum Thema Wissenschaft machen, weil das auch direkt in die Thematik des Vortrags hinein führt. Das alte Thema der „Zwei Kulturen“ ist ja keineswegs überholt. /1/ Wir haben auf der einen Seite die Fakten-Wissenschaften: Sie *produzieren* – wie ich nicht ohne Absicht formuliere – >hard facts<, vom unerschütterlich – das ist ironisch gemeint – genauen Wert des Planckschen Wirkungsquantums zur Gestalt der Doppel-Helix und diversen Gen-Karten. Aber es sind nicht nur „Dinge“, die da produziert werden. Es sind auch Prozesse. Zu den harten Tatsachen gehört z.B. auch ein Prozess wie die Zellteilung, die Öffnung und Schließung von Ionenkanälen in den Zellmembranen, viel aus der Hirnphysiologie gehört heute schon zu den harten Fakten; oder, um die Physik heranzuziehen, die Bildung von Kristallen aus Lösungen, der Prozess der Energieerzeugung in der Sonne, um nur

einige beliebig herausgegriffene Beispiele zu nennen. Zu den Prozessen gehören natürlich auch die sie regelnden *Gesetze*. Dann gibt es auch Dinge und Prozesse und Gesetze, die noch nicht erforscht und das heißt zu harten Fakten avanciert sind. Wir wissen z.B. noch nicht, wie im Detail der Prozess der Organdifferenzierung bei der Entwicklung des Fötus abläuft, oder wie Zellen der verschiedensten Art zu Krebszellen degenerieren. Auch in Physik und Chemie gibt es noch viele offene Fragen, die man glaubt früher oder später beantworten zu können. Roger Penrose z.B. meint sogar, es sei arrogant zu glauben, wir würden bereits alle physikalischen Gesetze kennen, die für lebende Organismen bedeutungsvoll sind. (Penrose 1995, 409) Aber noch erstaunlicher sind Fakten, wie wir sie in der Physik finden. Es sind Fakten der Unmöglichkeit: Es ist unmöglich, ein *perpetuum mobile* herzustellen, es ist unmöglich, einen Elektronenstrahl zu produzieren mit exakten Orts- und Impulswerten. Es ist unmöglich, die Bewegungen einer Gruppe von Billardbällen umzukehren, weil wegen der Unbestimmtheitsrelation schon nach wenigen Zusammenstößen ein ganz anderes Bewegungsmuster entsteht. Ja, man kann ausrechnen, dass bei molekularen Größenordnungen bei normalen Dichten in einem Gas nicht einmal *ein* Stoß rückwärts als Umkehrung des molekularen Gewimmels möglich ist (Sexl 1981). Mich hat immer gewundert, dass in der Didaktik dieser ganz neue Typ von Gesetzen so wenig thematisiert wird. Arbeiten zur Quantenphysik im Unterricht, die ich mit meinem damaligen Mitarbeiter Wiesner publiziert habe, hatten u.a. diesen Punkt als eine Motivation. Die Quantenmechanik lehrt die harte Tatsache, dass etwas, was wir nahezu selbstverständlich als möglich annehmen, grundsätzlich nicht möglich ist. Sie lehrt auch, dass es für bestimmte Prozesse wie den radioaktiven Zerfall eines Atoms zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Gründe gibt – auch wenn der Dalai Lama, wie Prof. Zeilinger (Wien) berichtet hat, den Physikern aufgibt, sich einfach mehr anzustrengen, sie würden dann schon die Gründe finden. Im Weltbild des Dalai Lama hat der Zufall keinen Platz.

Natürlich ist diese Feststellung von Unmöglichkeit nicht wirklich neu. Es war schon immer alles unmöglich, was den physikalischen Gesetzen zuwider lief. Nur wurde es nie thematisiert oder als Modell dafür genommen, dass die Natur unserem Machbarkeitswahn Grenzen setzt. Das ist etwas, was uns in der heutigen Situation als etwas Bedeutungsvolles auffällt. Wie vor fast einem Jahrhundert ein englischer Philosoph (Mathematiker und theoretischer Physiker) zugespitzt schrieb: >Everything of importance has been said before by somebody who did not discover it.< (Whitehead 1929, 119) /2/

Aber zurück zu den >hard facts< und den >weichen< Wissenschaften. Ich hoffe, ich ärgere nicht wieder jemand, wenn ich die Erziehungswissenschaften zu den weichen rechne. Gewiss gibt es auch da >hard facts<, und das soll gerade hier nicht vergessen werden. Da gibt es z.B. Ergebnisse von Erhebungen, die wenn, sorgfältig dokumentiert, sind was sie sind – nur leider ist ganz ungewiss, ob sie auch morgen oder übermorgen noch bei einer Wiederholung gültig sein werden. Das ist bei den harten Fakten der Naturwissenschaften ganz anders. Nehmen wir ein anderes Beispiel, die Geschichtswissenschaft. Auch da gibt es harte Tatsachen, eben Dokumente, Akten, Grabungsfunde etc. Nur weiß man leider oft nicht, ob sie erstens vollständig sind, und vor allem weiß man nicht, was sie *bedeuten*. Vom Ausgräber Kaldewey ist die Bemerkung überliefert, die archäologischen Befunde seien die zur Zeit gültigen Irrtümer. Das Verleihen von Bedeutung ist selbst ein historischer Prozess, weil die harten Fakten der Geschichte mitnichten einfach sind was sie sind: Was sie „wirklich“ sind, worin ihre Bedeutung besteht, das entscheidet sich aus dem was aus ihnen entsteht, und das ist in aller Regel kein simpler Kausalzusammenhang wie meist in den Naturwissenschaften. Es unterliegt der kontroversen Deutung. Man kann so weit gehen zu sagen, dass hier die Deutungen erst die Realität erzeugen. Jeder aufmerksame Zeitgenosse konnte diesen Prozess in den letzten Dezennien sehen, nämlich bei der sogenannten „Bewältigung der Vergangenheit“ – ich habe nie verstanden, wie man Vergangenheit „bewältigen“ kann – , nämlich der nationalsozialistischen, faschistischen, stalinistischen Ereignisse. Und gerade in jüngster Zeit wieder ist das auffällig bei der Aufarbeitung der Ereignisse um 1968. Nirgends sonst ist der soziale Konstruktivismus übrigens einleuchtender als auf diesem Feld. Die Geschichtswissenschaft ist eben keine Faktenhuberei, sondern entfaltet sich durch meist kontroverse Deutungen der Ereignisse, und das hat immer eine politische Dimension, ob es einem gefällt oder nicht. Nicht umsonst war in den letzten Monaten so oft vom Kampf um die >Deutungshoheit< die Rede. Was über die Geschichtswissenschaften gesagt wurde, gilt in gewissem Sinn natürlich auch für die Fakten der Erziehungswissenschaften. Aber das brauche ich hier vermutlich nicht weiter auszuführen. Der Hinweis auf Untersuchungen über Gesamtschulen oder TIMSS mag genügen.

Ähnliches beobachten wir in den Kontroversen über die Gentechnologie. Auch dabei geht es letztlich um Deutungshoheit. Zwar gibt es harte Fakten, z.B. die Lokalisation von Erbkrankheiten in Genen. Aber die Kontroverse dreht sich um die Frage, was das *be-*

deutet, was daraus entsteht, und da bleibt letzten Endes auch nur der Realität schaffende öffentliche Konsens, der, das lässt sich gefahrlos prognostizieren, keiner für die Ewigkeit sein wird.

Nehmen wir noch Literaturwissenschaften in den Blick. Auch da gibt es natürlich harte Fakten, z.B. wer was wann und wo produziert hat, was der Autor gelesen hat usw. Aber das ist nicht das Zentrum der Disziplin. Sie besteht ebenfalls in regelmäßig kontroversen Deutungen der Fakten; die das Material darstellen. Hier haben wir also Beispiele für den Typ der Wissenschaften, deren Zentrum die Interpretation ist, die *hermeneutischen Wissenschaften*. Ob und wie sich die Naturwissenschaften davon als >harte< Disziplinen unterscheiden, das ist vom didaktischen und allgemeiner vom pädagogischen Standpunkt aus eine höchst wichtige Frage. Dabei ist es interessant zu sehen, dass ein Physiker meines Fachbereichs kürzlich in einem Bericht zur Gymnasiallehrerausbildung den schlechten Zustand des Physikunterrichts auf den übertriebenen >Akzent< auf die >Hermeneutik und Didaktik< zurückführen will. (Prof. Dr. Stock, Leibnizpreisträger). Hermeneutik ist also eine durchaus aktuelle Vokabel für die Fachdidaktiker.

Bei dem, was ich hier unter dem Sammelbegriff >Interpretation<, oder Deutung, meine, geht es um begriffliche Analyse, um das Herstellen von bislang nicht gesehenen Zusammenhängen und auch um das Erfinden neuer Begriffe, die mit neuen Einsichten verbunden sind, die sie vor allem aus der privaten Einsicht ins Öffentliche heben – und nur so entsteht überhaupt ein Anspruch auf Wissenschaftlichkeit. So verstanden besteht der Wissenschaftszweig, der sein Zentrum im Interpretieren hat, aus philosophischen Disziplinen, in meinem weiten Verständnis von Philosophie, die ja durchaus in ihrer umfassenden >Analysis of Meaning< Fortschritte erkennen lässt, hinter die ein Forscher, bei Strafe der Missachtung, nicht zurückfallen darf. Um es grob zu exemplifizieren: Niemand könnte heute z.B. Anerkennung in der Philosophie als Disziplin finden, der nur Aristoteles gelesen hat. Und Analoges gilt für Geschichts- oder Literatur- oder Erziehungswissenschaften. Der schon erwähnte Philosoph hatte formuliert, >Philosophy is not a science.< (Whitehead 1948, 46) Und der höchst lesenswerte philosophierende Physiker John Ziman hat ganz ähnlich unterschieden zwischen Wissenschaft, die sich auf das Öffentliche und >Konsensibel< beschränkt, und den Disziplinen, die zwar auch öffentlich aber nicht konsensibel sind (Ziman 1968). Das war und ist bei beiden Autoren nicht als Herabsetzung der philosophischen Disziplinen gemeint. Vielmehr geht es (zu-

mindest bei Whitehead, aber ich denke auch bei Ziman – man sehe seine Bemerkung im ersten Kapitel von *Reliable Knowledge* 1978) um eine differenzierende Funktionsbeschreibung. Bevor man nämlich überhaupt anfangen kann, sich um Fakten zu kümmern, muss man ja in einer Welt erwacht sein, die von Deutungen geprägt und durchdrungen ist. Deutungen, die aufgedeckt, kritisiert, revidiert, ganz neu entworfen werden können und oft auch müssen. Das heißt, diese Typen von wissenschaftlicher Tätigkeit, das was im angelsächsischen schlicht „science“ heißt auf der einen Seite, was im weitesten Sinn philosophisch ist auf der anderen, sie sind auf einander angewiesen, mit einer je eigenen gewachsenen Selbstdefinition und Würde, mit gelegentlichen überschießenden Funktionsbeschreibungen, wie sie in dem folgenden Zitat ausgedrückt sind: >one aim of philosophy is to challenge the half-truths constituting the scientific first principles.< (1929, pt.I, chpt I, sec IV) Immerhin können hier Einstein und die Relativitätstheorie – mit Ernst Mach im Hintergrund – und die Quantentheorie als herausragende Illustrationen genannt werden: Von Bohr weiß man, dass er von Kierkegaard, Höfding und William James beeinflusst war, und die Gruppe um Heisenberg hat sich vor allem im Zusammenhang mit dem Kausalitätsprinzip intensiv mit Kant befasst. (Cassidy 1995, 317ff, siehe auch Eisner 2001) C.F. von Weizsäcker hatte hier in Hamburg eine Professur für Philosophie übernommen, die er vor allem nutzte, um Kant genauer zu studieren, wie er erst kürzlich wieder in einem Kolloquium in Frankfurt berichtet hat. (Ich habe ihn in den sechziger Jahren bei einem Besuch in Hamburg in einem Festvortrag in einem Gymnasium darüber reden hören.)

3 Naturwissenschaften – wie hart ?

Lassen Sie mich nun, nach dieser eher konventionellen, vornehmlich den Natur- und Geisteswissenschaften gewidmeten Bemerkungen ein wenig mehr auf die Naturwissenschaften eingehen. Auch diesen Blick möchte ich mit einem Zitat einleiten, und hier möchte ich mir etwas umfangreichere, aber wie ich denke auf den Punkt kommende Zitate erlauben: >...there are no brute, self-contained matters of fact, capable of being understood apart from interpretation as an element in a system<. (o.c., pt I, chpt.I, sec.VI) – Es wäre übrigens nicht ohne Interesse zu fragen, in welche Zeit jemand das lokalisiert. – Nun, das ist sehr allgemein und fasst auf seine Art Wesentliches von dem zusammen, was ich bereits ausgeführt habe. Aber nun haben wir als Fortsetzung den Blick auf die Naturwissenschaften, übrigens von einem Philosophen, der auch als theo-

retischer Physiker hervorgetreten ist: >Every scientific memoir in its record of the 'facts' is shot through and through with interpretation.< (l.c.) Und: >If we desire a record of uninterpreted experience, we must ask a stone for its autobiography.< (l.c.) Jeder Laie, der heute ein naturwissenschaftliches Publikationsorgan zur Hand nimmt, kann das leicht verifizieren. Und das Problem gibt es im übrigen, wenn auch in geringerem Grad, bei popularisierenden Darstellungen.

Ich erinnere mich an eine Diskussion mit Physikern und Didaktiker (in Frankfurt in den frühen Siebzigern des letzten Jahrhunderts), wo es u.a. darum ging, vernünftige Ziele für den Physikunterricht zu bestimmen. Ich hatte als eine Möglichkeit, das Niveau von Zielen zu definieren, vorgeschlagen, Artikel aus dem *Scientific American* – damals das führenden Popularisierungsorgan für die Naturwissenschaften – als eine Art Testmaterial zu nehmen, nämlich zumindest der Gymnasialunterricht sollte erreichen, dass die Artikel für den gebildeten Bürger zugänglich seien. Aber das galt als viel zu anspruchsvoll, und ein Physikdidaktiker, ausgerechnet, kehrte die Forderung um und verlangte, die Artikel müssten eben so geschrieben sein, dass sie der gebildete Bürger verstehen könne. Das war für mich, der damals noch nicht so lange in der Disziplin tätig war und nach festen Haltebojen in dem didaktischen Diskussionsgewässer – so empfand ich das damals – suchte, eine wichtige Erfahrung. Und es ist ja bis heute nicht gelungen, trotz verschiedener Ansätze wie etwa in der Delphi-Studie des IPN, und neuerdings in Empfehlungen der MNU (MNU 2001), einen schlüssigen Diskurs über Ziele zu etablieren. 2001). Man bewegt sich im Kreis und alles endet im Dezisionismus von Kommissionen, in denen letzten Endes der gemeinsame Nenner der Mitglieder gefunden wird. Ich will nicht missverstanden werden, ich denke keineswegs, dass das eine schlechte Lösung sein muss. Nur braucht man dazu keine akademisch etablierte Didaktik. Das dachte ich damals, und das denke ich immer noch. Es ist dies ein gutes Beispiel für das, was ich oben bezüglich der Erziehungswissenschaften, zu denen ich die Fachdidaktiken zähle, ausgeführt habe, nämlich ein Beispiel für den grundlegend hermeneutischen Charakter der Disziplin, die zwar analytische und konstruktive Arbeit voranbringt, letzten Endes aber nicht zu >konsensiblen< Ergebnissen führt, nicht in dem Sinn, in dem das in den exakten Naturwissenschaften der Fall ist. (Dabei darf nicht vergessen werden, dass in hochkomplexen Sachgebieten auch Naturwissenschaftler häufig zu revisionsbedürftigen Urteilen finden.)

Wie steht es also mit den harten Tatsachen ? Ich habe gerade die Zirkularität in einer Diskussion über Ziele des Physikunterrichts erwähnt. Hier ist ein, allerdings extremes Beispiel dafür, dass auch die Physik, dieses Musterbeispiel für eine empirische, exakte Wissenschaft, von Zirkularität nicht verschont ist. Ich zitiere aus einer Diskussion über Webers Versuche, Gravitationswellen experimentell nachzuweisen: >What the correct outcome is depends upon whether there are gravity waves hitting the earth in detectable fluxes. To find this out we must build a good gravity wave detector and have a look. But we won't know if we have built a good detector until we have tried it and obtained the correct outcome ! But we don't know what the correct outcome is until ... and so on ad infinitum.< (Collins, zitiert aus Gooding, p.210f.) (until we know that we have built a good detector, meint er.) Das ist die beißende Argumentation von Collins, der einer der führenden Köpfe der *New Science and History-Group* ist. Für sie beruhen letzten Endes alle Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften auf sozialem Konsens. Wir wissen, dass solche zugespitzten sophistizierten Argumente die Wissenschaft nicht aufgehalten haben und nicht aufhalten werden./3/ Aber sie machen nachdenklich und weisen auf Probleme hin, die auch beim schulischen Lernen von großer Bedeutung sind.

Arbeiten dieser Gruppe haben sich übrigens detailliert und in Gesprächen mit bedeutenden Physikern mit dem Konsensproblem beschäftigt. So haben sie Experimente betrachtet und analysiert, die in *einer* Arbeitsgruppe funktionierten, aber von anderen nicht wiederholt werden konnten, z.B. bestimmte Laserkonstruktionen (Collins/Pinch 1982). Auch sonst gibt es in der Physik interessante Beispiele für derartige Anomalien, etwa Millers Wiederholung des Michelson-Morley-Experiments. Millers abweichende Ergebnisse konnten viele Jahre lang nicht aufgeklärt werden. Max Born hat sich in einem Brief sehr negativ über Miller und sein Labor geäußert. Und das ist ein Hinweis auf ein weiteres wichtiges soziales Element: Die >scientific community< muss darüber urteilen, ob der Experimentator kompetent und zuverlässig ist. Darauf hatte auch schon Ziman (1968, 35) hingewiesen. Das sei, urteilte er, wichtiger als zahllose Wiederholungen eines Experiments. All das ist kaum zu bestreiten. Mein Einwand gegen die Festlegung auf soziale Prozesse war und ist, dass zwar jedes Urteil, sogar jedes Wahrnehmungsurteil, irrig sein kann, dass aber sozialer Konsens der kompetenten, sachkundigen Beurteiler – wieder haben wir offenkundig eine zirkuläre Situation ! – keine *Definition* von Wahrheit ist. Konsens in der >scientific community< ist kein *politischer* Konsens. Etwas mehr oder weniger stark Zwingendes, das außerhalb der Konsens suchenden Men-

schen liegt, ist die teleologische Ursache, wie man ironisch sagen könnte, der Konsenssuche der Wissenschaftler, oder in den Worten des englischen Wissenschaftshistorikers Gooding: >It is clear that observers' interaction with the world makes a difference we cannot explain without reference to a world that is not of the observers making.< (Gooding 1990, 89)

Nun sieht das alles dem, was die Öffentlichkeit über die Naturwissenschaften erfährt, wenig ähnlich. Das hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass wissenschaftliche Veröffentlichungen in der Regel *Rekonstruktionen* sind (Gooding 1990, p.4, p.26f., p.130f.). In den zwei oder drei fruchtbaren, auch zu Übertreibungen neigenden, Dezennien nach Thomas Kuhns bekanntestem Buch hat es zahlreiche Studien zu diesem wie zu den schon skizzierten Themen gegeben. (Ich erwähne hier nur Gooding 1990, Nerssesian 1984, Bevilacqua 1983). Eifrige Detektive haben sich über die von den Autoren leichtsinniger Weise nicht vernichteten Notizzettel, Labortagebücher, Korrespondenzen der Naturwissenschaftler hergemacht und damit einen sehr viel detaillierteren und realistischeren Einblick in das Produzieren von Effekten und Fakten gewonnen. Ein schönes Beispiel aus der Physik ergibt sich aus MacKinnons Analyse des Ursprungs von Heisenbergs Matrizenmechanik. (MacKinnon 1977, zusammenfassend 137 und 184f.). Man kann daraus deutlich erkennen, wie der mühsame Weg der Erkenntnis schließlich unter einem gleichsam stromlinienförmigen Text verschwindet. Allan Franklin, um ein anderes Beispiel zu nennen, hat Millikans Notizzettel und Labortagebücher unter die Lupe genommen (Franklin 1986), die seine berühmten Experimente zur Bestimmung der elektrischen Elementarladung betreffen. Physikhistoriker wissen, dass es damals eine sehr intensive Kontroverse, auch Konkurrenz, zwischen Millikan und dem Wiener Physiker Ehrenhaft gab. Der hatte mit Millikans Tröpfchenmethode zur Bestimmung der Ladung der Tröpfchen zwischen zwei Kondensatorplatten – heute ein Schulversuch ! – signifikant andere Werte als Millikan erhalten, was Millikan zwang, erneut Messreihen durchzuführen. Dabei fand er nicht nur durchgehend niedrigere Werte als den in seiner ersten Veröffentlichung angegebenen. Er fand auch deutlich abweichende Werte, und man kann in den publizierten Kopien seiner Notizzettel, zwar undeutlich, aber unmissverständlich lesen >Won't work<. Das alles wirft schwerwiegende Fragen auf. Zwar hat der Mitarbeiter Ehrenhafts Millikan geschrieben, er anerkenne nun dessen Ergebnisse, wobei ihm freilich die von Millikan ausgesonderten Messergebnisse und Daten nicht be-

kannt waren. Ich kann dieses ganze Drama, das für den Laien schließlich langweilig ist, weil man in zahlreiche quantitative Details eindringen muss, nicht ausbreiten. Holton (Harvard, s. Franklin 1986) verdächtigte Millikan wegen der Aussonderung unpassender Messergebnisse sogar einer >mehr als kosmetischen Operation< (Franklin). Man kann die Details bei Franklin studieren. Hier kommt es mir auf zwei Punkte an. Einmal auf das Element des sozialen Konsenses, und zweitens auf die Kompetenz der konkurrierenden und zum Konsens findenden Experimentatoren. Dass Millikan die höhere Kompetenz besaß, war und ist, auch nach Franklins Nachrechnung des ganzen Datenmaterials, unbestritten *opinio communis* der Physiker. Von besonderem Interesse war nämlich die Frage, ob Millikan gar Tröpfchen mit einem Drittel der Elementarladung gefunden, und ob er diese Ergebnisse ausgesondert hatte. Das ist deshalb eine interessante Frage, weil *Quarks* ein Drittel der Elementarladung tragen. Franklins sehr aufwendige statistische Untersuchung kommt zu dem Ergebnis: >I conclude that Millikan's original data give strong evidence for charge quantization and no convincing evidence for fractional residual charge, although two events (out of sixty one) are consistent with such an interpretation.< (Franklin o.c., 162) Zwar gab es Berichte über Experimente, die ein Drittel der Millikanschen Elementarladung geliefert haben – mit tiefst gekühlten Niob-Kügelchen –, aber Eingang in den Kanon der harten Fakten hat das nach meinem Wissen bisher nicht gefunden. Das hätte es wohl, da doch heute schon jeder Gymnasialschüler >weiß<, dass *Quarks* ein Drittel der Elementarladung tragen.

In diesem Zusammenhang muss ein anderer Gesichtspunkt erwähnt werden, den vor allem Collins in seinen Arbeiten verdeutlicht hat: Experimente erfordern ein spezielles Geschick, spezielle >skills<, die meist zum stillschweigenden, nicht verbalisierten, vielleicht nicht einmal verbalisierbaren Handlungswissen des Experimentators gehören. Ich hatte das Vergnügen, mehr als zwei Jahrzehnte einem physikalischen Fachbereich anzugehören, und ich weiß, welcher Aufwand z.B. bei der Vorbereitung der großen Experimentalphysik-Vorlesung getrieben werden musste, welches Geschick dazu gehörte, damit die Effekte dann in der Vorlesung auch >richtig<, wie nach dem Lehrbuch, zu sehen waren. Das ist der didaktische Aspekt der oben erwähnten Rekonstruktion bei den Publikationen.

Dass selbst einfache Experimente dieses Geschick erfordern, weiß ich aus eigener Erfahrung. Zwei Beispiele mögen hier genügen: Newton hatte ein ebenso einfaches wie geniales Experiment in seiner *Opticks* beschrieben, mit dem er dartun wollte, dass die

Lichtstrahlen an einer Stelle des Spektrums einfach sind, monochromatisch, wie wir sagen: Er kreuzte zwei Prismen, so dass das vom einen Prisma erzeugte Spektrum durch das quer davor gestellte nach oben abgelenkt wurde. Die monochromatischen Strahlen werden dann *nicht* erneut zu Spektren auseinander gezogen, sondern einfach mehr oder weniger stark nach oben ausgelenkt, und das heißt, sie sind im Newtonschen System einfach. So entsteht ein schräg nach oben gerichtetes Spektrum. Ein Kollege, der einen auf Physikgeschichte basierenden Optikkurs publiziert hatte, schrieb, dieser Versuch sei nicht möglich. Aber ich habe ihn in der Vorlesung vorgeführt – man braucht Geduld und Geschick dazu. Ein anderes Beispiel stammt aus meiner Anfangszeit als eifriger Physiklehrer. Ich habe viel Zeit aufgewendet, um den Schülern mit einer sehr einfachen Anordnung, die m.W. Ampère erfunden hatte, zu demonstrieren, dass die magnetische Kraft, die ein stromdurchflossener gerader Draht erzeugt, umgekehrt proportional zum Abstand vom Draht abnimmt. Es ist mir nicht gelungen. Gooding (1990), der sich sehr gründlich mit der Entwicklung des Elektromagnetismus an Hand von Dokumenten befasst hat, spricht richtig von *>a delicate operation requiring much skill to maintain an equilibrium on the needle<* (o.c., p.61) – diese *>delicate skill<* hatte ich nicht, vielleicht auch nicht genügend Geduld. Übrigens brauchte ich das Gleichgewicht auch gleich bei zwei Magnetnadeln zugleich.

Gooding hat auch berichtet, dass eine Gruppe von Studenten historische Versuche zur frühen Elektrizitätslehre (Faraday, Biot, Ampère) zu replizieren versuchte, was aber misslang. Einen ähnlichen Bericht kenne ich von einem amerikanischen Kollegen, der genau nach den Beschreibungen Galileis Versuche mit der Fallrinne hat durchführen lassen – mit weit abweichendem Resultat. (Lesenswertes Material auch in Heering et al. 2000.)

Ich plädiere nicht dafür, dass die harten Fakten weich sind – härtere dürften nirgends zu finden sein. Schon gar nicht argumentiere ich für die extreme Position der sozialen Konstruktivisten, für die sie nichts als soziale Konventionen sind. Das ist eine unhaltbare Position. Auf einem Kongress fragte ich einen Vertreter dieser Auffassung, ob er denn glaube, die kritische Masse von Uran mit all den Folgen einer Explosion sei eine bloße Konvention – an eine Antwort erinnere ich mich nicht. Vermutlich war ich da auch zu ungeduldig. Doch wäre es falsch, die Argumente dieser Autoren und die von ihnen inspirierten Untersuchungen zu ignorieren. Gerade unter didaktischen, und weiter gesehen pädagogischen Aspekten ergeben sich Fragen, auf die wir Antworten finden müssen.

Obgleich das, was ich vortrage, im Prinzipiellen nicht neu ist – ich selbst habe darüber publiziert – , kann ich noch keine angemessene Reaktion finden, es gibt kaum eine Diskussion darüber. Das hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass der Fortschritt in den Naturwissenschaften so ungemein beschleunigt erscheint: Der Physikdidaktiker, und für die anderen Naturwissenschaften ist das nicht anders, hetzt ständig hinter den Neuigkeiten her. Er muss sie erst einmal selbst verstehen und muss sie dann für Studenten / Schüler zugänglich machen, was, wenn man lange genug wartet, die Wissenschaft in der Regel schon selbst besorgt. Aber so lange kann und will man heutzutage nicht warten, selbst die Zeitungen berichten fast in Echtzeit über die neuesten Entdeckungen. Daher muss man es zu den genuinen Aufgaben des Didaktikers rechnen, diese Vermittlung zu leisten. Allerdings, das sollte nicht vergessen werden, ist es auch eine wichtige Aufgabe des Didaktikers zu prüfen, was künftig als zum Grundwissen gehörig anzunehmen, und was ephemere und modisch ist. Eine bloße >Nachlauf-Didaktik<, wie ich das einmal genannt habe, wird ihrer Aufgabe nicht gerecht.

Es wird vielleicht aufgefallen sein, dass ich bisher kaum von Theorien sondern fast ausschließlich über experimentelle Effekte gesprochen habe, die man in anderen Kontexten auch *Phänomene* nennen kann, eine Terminologie, in der übrigens Newton und Goethe gut übereinstimmen (vgl. Goethe 1963). Teil 2 der schon mehrfach erwähnten Studie von Gooding trägt den bezeichnenden Titel >Making Natural Phenomena<.(meine Hervorhebung, W.J.). Ich selbst hatte in früheren Publikationen vom Prozess der Raffinierung von Effekten gesprochen, der das Ziel der Produktion eines >reinen Phänomens< verfolgt. Später entdeckte ich, dass das auch ein Terminus bei Goethe ist, und auch in einem Lehrbuch der Theoretischen Physik vorkommt. Gerade Gooding zeichnet diesen Prozess für den Elektromagnetismus sehr eindrücklich nach. Die Effekte müssen überhaupt erst einmal stabilisiert und kommunizierbar gemacht werden, was bei neuen Effekten keineswegs eine triviale Angelegenheit ist, und gerade deshalb ist das Studium solcher Prozesse für den Didaktiker so bedeutungsvoll. Wenn neue Effekte auftauchen, wie im hier betrachteten Fall z.B. der Oersted-Versuch, gibt es erst einmal eine chaotische Situation (was übrigens auch bei meinen Versuchen zum >Lauten Denken< deutlich war, Jung 1984/85). In dem von Gooding untersuchten Feld der frühen Elektrizitätslehre mit Faraday, Biot und Ampère als den Hauptakteuren wird diese Phase allerdings als >kurz dauernd< charakterisiert. (o.c., p.33) Diese chaotische Phase ist ein für die

Didaktik wichtiges Datum: Ob >kurz dauernd< oder lange dauernd, früher oder später wird der elementare Effekt stabilisiert und kanonisch. Zweifel bleiben erlaubt, sind aber ineffektiv. Das begründet letzten Endes den Ruf der naturwissenschaftlichen Disziplinen als Wissenschaften der >hard facts<. Beim Studium von Goodings Analysen liegt übrigens der Vergleich mit empirischen Lernprozess-Studien nahe, die wir Kollegen in Bremen verdanken. Sie haben unsere Kenntnis solcher Prozesse bedeutend erweitert.. (Ob sie selbst solche historischen Vergleiche sehen, weiß ich aber nicht:) Sie protokollierten und analysierten mit Videoaufnahmen mehr oder weniger sich selbst organisierende Lerngruppen, übrigens auch aus der Elektrizitätslehre, so dass sogar eine thematische Nähe besteht. Dabei wird allerhand herausgebracht, über dessen Bedeutung man auch streiten kann und muss – wie anders soll Wissenschaft diesen Typs voran gebracht werden? Was mir dabei auffiel, ist die Tatsache, dass erstens *Handlungen* wichtig sind, *nicht bloßes Betrachten* (vgl. Gooding passim, bes. p.61). Zweitens kann man erkennen, dass *verbale Kommunikation* eine entscheidende Rolle spielte, die sich allmählich terminologisch stabilisiert. Das stimmt sehr genau mit dem überein, was Goodings historische Analyse auch zeigt. Aber drittens, und das ist für mich im gegenwärtigen Zusammenhang besonders wichtig, kann man sehen, dass Effekte keineswegs zur richtigen Physik führen müssen. Das Chaotische ist auch nicht immer >kurz dauernd<, und ohne Anleitung resultierte nicht das, was man von Physikunterricht erwartet. Dabei gehören ja schon die Apparaturen oft zum stabilen kanonischen Endzustand der Physik, weshalb sie katalytisch wirken können. Man muss ja überhaupt davon ausgehen, dass das Feld der Wahrnehmung, schon weitgehend vorstrukturiert ist, wenn Physikunterricht einsetzt. (Das stimmt überein mit dem klassischen Befund von Butts (1963): Er hat Lernende mit Schraubenfedern versorgt und sie dann allein gelassen, mit kümmerlichem Erfolg.) Das ist ein für die Didaktik zentraler Befund: Ohne Anleitung, d.h. gezieltes Lehren, ist kein Lernen zu erwarten, von Ausnahmen abgesehen. (Ich komme im letzten Teil darauf zurück.). Physiklehrer kommen trotz aller Schwierigkeiten, um die es hier geht, doch zweifellos irgendwie zurecht, wenn auch oft mit bedauerlich mäßigem Erfolg – eine Feststellung, die sofort in die hermeneutische Zirkularität führt: Was sind die Kriterien für Erfolg ? Und was sind die Kriterien für Kriterien ? (Das ist übrigens auch eine Frage an TIMSS. Die Kritik von Hagemeister (2001) an einigen Items teile ich vom physikdidaktischen Standpunkt aus. Die ausführliche Replik von Baumert et al. 2000 zeigt, dass sich von

einem anderen Rahmen her, nämlich dem technisch-testtheoretischen, die Beurteilungen ganz anders darstellen.)

Wenn Ich mich also – um auf die Eingangsfrage zu diesem Abschnitt zurück zu kommen – bisher mit dem Bereich der Effekte und Phänomene und kaum mit Theorien beschäftigt habe, so liegt das daran, dass die Effekte ja das Fundament des gesicherten Wissens darstellen, und nicht zuletzt deswegen fühlen wir uns ja gehalten, Naturwissenschaften zu unterrichten. Hier scheinen wir auf relativ sicherem Boden zu stehen, und wäre es nicht so, müssten wir den Zusammenbruch all unserer technischen Erfolge fürchten. Aber der Punkt ist, dass man den komplexen Prozess der *Konstituierung* dieser (relativen) Sicherheit durchschauen muss.

4 Phänomene und Theorien

Was Theorien angeht, so gibt es einen breiten Konsens darüber, dass sie durch die empirischen Daten unter-determiniert sind. Die Diskussion über die Quine-Duhemsche These wird schwerlich zu einem endgültigen Ergebnis führen (Franklin 1986, Sec.4.1). Einige ziehen Wahrscheinlichkeits-Argumente an, z.B. Bayes Bestätigungslogik (Franklin 1986, Sec.4.3). Das sind schwierige Fragen von Wissenschaftstheoretikern. Aber meine eigene Erfahrung im Umgang mit Physikern führt zu dem Ergebnis, dass all diese Fragen für den praktizierenden Physiker, sei er Experimentalphysiker, sei er Theoretischer Physiker, keine Rolle spielen: Die Probleme werden *pragmatisch* gelöst. Ein schönes Beispiel ist Newtons Gravitationstheorie. Es war wohl bekannt im 19.Jahrhundert, dass sie keine Erklärung für die Periheldrehung des Merkur lieferte. Aber mangels einer alternativen Theorie hielt man an der Newtonschen fest. Das ist eine pragmatische Entscheidung, und Physiker können so vorgehen, weil sie natürlich wissen, dass Theorien unter-determiniert sind und einen begrenzten Gültigkeitsbereich haben. Theorien werden benutzt wie eine Computer-Software: Newtons Theorie arbeitet bis heute ausreichend genau bei der Beantwortung vieler Fragen, und daher wird sie verwendet, solange sie den Anforderungen an technische Zuverlässigkeit genügt. Wenn die Theorie nicht mehr ausreicht, muss sie durch eine bessere Software ersetzt werden.

Hier haben wir ein Problem, auch ein didaktisches, das ganz anders liegt als im Fall der Effekte und Phänomene. Wenn wir an Physikunterricht denken, wird sofort klar, dass der Theorie-Aspekt der Physik ja für den Laien viel mehr beinhaltet als Software zum

Berechnen von Messdaten. Der Physikunterricht, und die popularisierende Literatur, bezieht sich auf erschlossene >Dinge<, wie ich undifferenziert sagen will, also Atome, Elektronen, Quarks, Photonen u.v.a.m. Hier gibt es weit auseinander laufende Standpunkte. T. S. Kuhn, und er steht damit nicht allein, hat argumentiert, zwar gebe es Fortschritte in der technischen Präzision und Zuverlässigkeit der Theorien, also in ihrem Software-Aspekt, keineswegs aber in den >Dingen<, die im laienhaften Verstand Gegenstand der Theorien sind (Kuhn 1982, 148ff). Denn die Geschichte zeige ja, dass es dabei keine dauerhaften Fortschritte gebe. (Ähnliche Argumente findet man bei Laudan 1981 sogar für die methodologischen Prinzipien der exakten Naturwissenschaften, die danach ebenfalls starkem Wandel unterworfen sind – wir glauben heute natürlich, wir haben endlich die richtigen methodologischen Prinzipien.) Dieser Standpunkt ist nicht unwidersprochen geblieben. Adair z.B., ein Elementarteilchenphysiker, wendet sich vehement dagegen mit der Feststellung: >... virtually all working physicists believe firmly that there is a real universe and that their admittedly imperfect procedures converge to a description of that reality. Moreover, although they know that description to be incomplete, they are confident that it is not seriously in error. ...< (Adair 1987, 12) Auch dafür spricht einiges, aber wir brauchen die Frage hier nicht zu entscheiden. Nur eine Bemerkung ist mir wichtig: Was den Unterricht anlangt, sollten die Schüler diesen kontroversen Sachverhalt kennen lernen. Ich komme gleich darauf zurück.

Es gibt einige ins Detail gehende historische Studien, die der Frage nachgehen, wie denn Deutungsprobleme auf dem Feld konkurrierender Theorien gelöst wurden. Ein Beispiel aus der Optik ist der Streit der englischen und französischen Schulen über die Licht-Theorien: Ist die Korpuskulartheorie korrekt, oder die Undulationstheorie? (So vorsichtig wird die Frage aber oft nicht formuliert, sondern: *Ist* Licht eine Welle, oder Korpuskel?) In einer Studie von Frankel (1976) sieht man, dass eine Frage, für die der Physikunterricht eine Stunde, oder jedenfalls wenige Stunden, zur Beantwortung braucht, eine lange Zeit heftiger Auseinandersetzungen zur Folge hatte, bis eine Entscheidung erreicht war. Dazu zwei Anmerkungen: Erstens trieb der Streit, wie man sehr detailliert nachlesen kann, die Kontrahenten zu immer weiter verfeinerten *Experimenten*, bis schließlich die unterlegene Partei keine überzeugende Alternative – keine *sie selbst überzeugende* – mehr vorbringen konnte. Das illustriert, was ich oben im Zusammenhang mit der Newtonschen Gravitationstheorie ausgeführt habe. Die Entscheidung für bzw. gegen eine Theorie ist in der Tat >pragmatisch< in dem Sinn, dass Kontrahenten

nichts mehr einfällt. Das ist aber eine durchaus menschliche und möglicherweise vorläufige Entscheidung, wie gerade dieser Fall belegt: Nämlich am Ende, nach der Kapitulation der Korpuskulartheoretiker, hätte sich, vor rund 200 Jahren, niemand so seltsame >Dinge<, oder >Objekte<, vorstellen können, die dann mit der Quantentheorie des Lichts um die Wende zum 20. Jahrhundert aufkamen, und womit manche Physiker noch immer kämpfen – sie ziehen es vor, sich auf den Software-Aspekt zurück zu ziehen, um unersprießlichen, >philosophischen<, Kontroversen aus dem Wege zu gehen. Es ist erhellend, den Kommentar eines Mathematikers und Theoretischen Physikers aus den zwanziger Jahren zu lesen, der die Verunsicherung verdeutlicht: >This discontinuous existence in space ... assigned to electrons ... seems to be borrowing the character which some people have assigned to the Mahatmas of Tibet.< (Whitehead 1925) – und da waren die Seltsamkeiten der Photonen, die sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, ohne eine Bahn durchlaufen zu dürfen, noch nicht so verbreitet ! Heute fordern Physikern dazu auf – und sie wenden sich dabei nicht nur an Laien, sondern auch an ihre Kollegen – , sich einfach an die Seltsamkeiten zu gewöhnen. Man kann es nicht verstehen, man muss sich daran gewöhnen. Das ist nicht so paradox wie es zunächst klingen mag. Wann immer etwas Neues auftaucht, seien es >gespensterhafte< Photonen, oder Prionen etc., man muss sich daran gewöhnen. Freilich wird man immer versuchen, das Neue auch zu integrieren, es an Bekanntes auf die eine oder andere Weise anzuschließen. Kann denn überhaupt etwas Neues Eingang in unsere Erfahrung finden, das gar keine Verbindung mit schon Bekanntem hätte ?

Auf den dritten Aspekt der genannten Studie von Frankel will ich nicht weiter eingehen. Sie illustriert nämlich den Einfluss nationaler Rivalitäten auf derartige wissenschaftliche Kontroversen.

Lassen Sie mich die beiden Teile, die erörtert wurden, die auf Effekte und Phänomene bezogen waren, und die, die Theorien in den Blick genommen haben, was ja nicht wirklich unabhängig von einander diskutiert werden kann, wie zuletzt am Beispiel der Lichttheorien zu sehen war, zusammen führen durch einen Gedanken von Lichtenberg, den ich übrigens Studenten, und früher Schülern, zu Beginn des Experimentellen Praktikums gern zitiert habe:

>... Alle mathematischen Gesetze, die wir in der Natur finden, sind mir trotz ihrer Schönheit immer verdächtig. Sie freuen mich nicht. Sie sind bloß >Hilfs-Mittel<. *In der Nähe ist alles nicht wahr.*< (Lichtenberg 1943, J 1843, meine Hervorhebung)

Aus ähnlichen Äußerungen, die konkreter sind und sich auf bestimmte Gesetze beziehen (o.c., J 1908), lässt sich erkennen, dass es dabei gerade auch um Phänomene geht, sofern sie mathematisch gefasst werden. Jeder, der z.B. Experimente zur Brechung gemacht hat, weiss, dass die mathematische Idealisierung im Brechungsgesetz >in der Nähe< >nicht wahr< ist. Es wäre reizvoll, Lichtenberg hier weiter zu interpretieren, etwa auch an Hand der vorangehenden Notiz: >Allein zu glauben, daß deswegen Mathematik zur Physik absolut notwendig sei, ist Torheit, denn wo dieses wirklich statt findet, hat der Mensch schon das Beste gefunden.< (o.c., J 1841). Das muss ich mir hier versagen. Was aber durchaus auch in diesen Zusammenhang gehört, möchte ich etwas näher ausführen. Das Weltbild der klassischen Physik beruhte auf einer durchgängig als mathematisch verfasst gedachten Natur, mit durch Differentialgleichungen determinierten Abläufen, also genau auf dem, wovon Lichtenberg sagt, >Es freut mich nicht<. Schon die nichtlineare Dynamik hat dieses Weltbild ins Wanken gebracht, erst recht dann die Quantenmechanik. Seltsam ist nur, dass auch in der Quantenmechanik der Glaube an die mathematische Verfasstheit der Natur, obwohl als klassische Physik gescheitert, wieder auflebt: Die Schrödinger-Gleichung nämlich für die Psi-Funktion ist genau so eine Differentialgleichung wie die in der klassischen Physik, und sie definiert genau so determinierte Abläufe wie in der klassischen Physik. Zwar gilt das dann nicht mehr – jedenfalls in der am meisten verbreiteten Deutung der Quantentheorie – für die Realität schaffende Beobachtung, oder Messung. Aber die Determiniertheit der Psi-Funktion überträgt sich doch auf die *Wahrscheinlichkeiten* von möglichen Messergebnissen, oder Beobachtungsergebnissen, die wiederum als *mathematisch präzise* vorgestellt werden. Dabei ist klar: So wie in der klassischen Physik die Substitution der Natur durch mathematische Strukturen prinzipiell nicht verifizierbar ist, so sind erst recht präzise Wahrscheinlichkeiten im Sinne einer mathematischen Struktur in der Quantenmechanik nicht verifizierbar. In Wahrheit ist diese Ersetzung der Natur durch mathematische Strukturen, in der klassischen Physik wie in der Quantenmechanik, ein >Hilfs-Mittel< (Lichtenberg), eine pragmatische Prozedur, die weil erfolgreich schnell vergessen lässt, dass >in der Nähe< >alles nicht wahr< ist. Ein besonders schönes Zeugnis dafür, wie problematisch diese (nennen wir es) Philosophie ist, findet man in der folgenden Äußerung von Roger

Penrose: >Wir sind mit Leib und Seele Teil einer Welt, die ungeheuer subtilen und weitreichenden *mathematischen Gesetzen* außerordentlich genau *gehört*.< (1995, 268, meine Hervorhebung) Die Genauigkeit ist in vielen Bereichen nicht zu bestreiten, und ich will das auch gar nicht konterkarieren mit der Bemerkung von Ziman: >... It is seldom that a precise fit between theory and observation lies within the instrumental uncertainty of the experimental techniques. In practice, the theoretical physicist may have no better evidence for his model than that it gives the correct quantitative pattern of results for a variety of data, none of which are closely fitted.< (Ziman 1978, p.34.) /4/

Viel interessanter ist die Phrase, die Welt >*gehört*< mathematischen Gesetzen – nun, wie *machen* es mathematische Gesetze, dass ihnen etwas *gehört* ? Hier wird, scheint mir, etwas verwechselt – eine naheliegende Analogie ist die von Kant kritisierte Verwechslung von regulativen und konstitutiven Prinzipien. Es gibt andere Beispiele, in denen diese Verwechslung frappant ausgedrückt wird. So schreibt z.B. mein Kollege Görnitz, erst die Quantentheorie ermögliche stabile Grundzustände (Görnitz 2001) – als ob es nicht vor der Quantentheorie schon stabile Grundzustände gegeben hätte ! Natürlich weiß der Autor das, nur ist verräterisch, dass er in diese Ausdrucksweise hinein rutscht, ebenso wie Penrose und andere. (Vgl. auch meine Rezension von *Particle Physics* 1989.) Offenkundig bleiben hier noch viele philosophische Fragen offen. /5/ In einem sehr lesenswerten, im jüngsten Heft der *Physikalischen Blätter* abgedruckten Panorama der Erfolge der Physik, ihrer Bedeutung für unser tägliches Leben, ihrer Zukunftsperspektiven, wird dies übrigens u.a. als Problem vermerkt: >Über diese unglaubliche Kongruenz von Mathematik und Physik werden wir noch viel nachzudenken haben< (Großmann 2001, 27)

Wie gehen wir als Didaktiker und Pädagogen nun mit all diesen Komplikationen und Verwerfungen um ? Das ist – in Anlehnung an den Titel eines klassischen Essays von Hempel (1965) –

5 >The Didactician's Dilemma<

Ich möchte, nachdem ich dieses Material ausgebreitet habe, und wie ich hoffe auch dessen didaktische Relevanz erkennbar geworden ist, einen harten Schnitt machen, und den möchte ich einleiten nach dem Modell, das Kierkegaard einmal in seinen Tagebüchern beschrieben hat. Er würde gern, schrieb er, eine Predigt von Luther auswendig

lernen und am Sonntag in der Kirche halten – was würde wohl passieren ? /6/ Nun, ich denke natürlich nicht an eine Predigt von Luther, ich denke an eine Feststellung von Friedrich Hund, dem bedeutenden Physiker aus der großen Zeit in Göttingen, der im *Handbuch der Pädagogik* Ende der zwanziger Jahre ein immer noch sehr lesenswertes Kapitel über *Die Erziehung in den exakten Naturwissenschaften* geschrieben hat. Ich zitiere:

>Vor einem zu starken Heranbringen von Erkenntnissen der modernen Physik muss wohl gewarnt werden. Die Einsicht selbst in verhältnismäßig einfache Zusammenhänge wie den Bau des Atoms aus Kern und Elektronen erfordert eine so große Kette von Beobachtungen und Schlüssen, daß doch nur Wenige daran die Art physikalischen Denkens erleben können.< (Hund 1930, 383) /7/ Hunds dictum würde, wenn man es zusammen sieht mit den historischen, begrifflichen und experimentellen Komplikationen, die ich skizziert habe, das Ende eines großen Teils des Physikunterrichts bedeuten. Und ich denke, für Disziplinen wie Chemie und Biologie lässt sich Ähnliches geltend machen. Im Hinblick z.B. auf die gegenwärtige Gen-Karten-Euphorie wären hier sicher kritische Diskussionen am Platz, oder ernsthafte Diskussionen über die Evolutionstheorie.

Ich möchte meine Reaktion auf dieses Gemenge an Problemen bezüglich der Effekte, also der Fakten, ebenso wie der Theorien und ihrer Beziehung im Anschluss an eine These, die ich 1989 in einem Kongress in Salerno entwickelt hatte, in drei Positionen zusammenfassen.

Die *erste Position* besteht in der Unterscheidung von *zwei Phasen* des Unterrichts – und wiederum: so, denke ich, liegen die Dinge für die Physik so wie auch für andere naturwissenschaftliche Fächer. Diese zwei Phasen stimmen *zeitlich* grob aber nicht ganz mit der Oberstufe und dem vorausgehenden Unterricht überein. Der zeitliche Aspekt, so sehe ich es heute, ist jedoch gar nicht entscheidend. Es ist ein *qualitativer* Unterschied, nämlich der zwischen einer >weichen< und einer >harten< Phase. Die >weiche< Phase charakterisiert nach dieser Position überwiegend die Oberstufe. Damit ist ein im wesentlichen >narrativer< Unterricht gemeint, der weitgehend analog einem guten Geschichtsunterricht verläuft. (Mein Begriff von >narrativ< stimmt nicht mit dem überein, den Kubli in seiner Untersuchung verwendet hat, Kubli 1998) Das mag wieder einmal eine meiner anstößigen Ideen sein. Aber wenn wir an das Zitat von Hund denken, scheint es mir der einzige Ausweg aus einem Dilemma zu sein: Einerseits nämlich sind die Entwicklungen

der modernen Physik – die ja seit Hunds Zitat förmlich explodiert ist – für den Laien nicht wirklich zu verstehen, jedenfalls nicht in dem Sinn, in dem sie in der Physik selbst verstanden werden müssen. Andererseits zählen eine Reihe dieser Entdeckungen zu den bedeutenden Kulturleistungen mit großen Auswirkungen nicht nur auf unser Leben, sondern auch auf unser Welt- und Selbstverständnis. Wenn Schule u.a. so etwas leisten will wie >kulturelle Sozialisation< (sit venia verbo), dann müssen Schüler, wie übrigens erwachsene Laien, damit bekannt gemacht werden, aber so, dass irreführende Vorstellungen, z.B. über die Endgültigkeit dieser Wahrheiten, vermieden werden. Feynman hat – auch eines meiner Lieblingszitate – gesagt, wir Physiker haben gelernt, auf unsicherem Boden zu gehen. Das müssen die Schüler verstehen, und so muss der Unterricht gestaltet werden, dass sie es verstehen *können*.

Es gibt dabei – in einem solchen Oberstufenunterricht – zwar harte Fakten, Effekte, die in der Wissenschaft fest etabliert sind, z.B. G.I.Taylors Doppelspalt-Versuch mit >einzelnen< Photonen (1909, also Anfang des 20.Jahrhunderts, als es das Wort >Photon< noch nicht gab, eine Prägung des amerikanischen physikalischen Chemikers G.N. Lewis 1926), oder der Compton-Effekt, der Millikan-Effekt, die sog. e/m -Bestimmung u.a.m. (Ich habe als Physiklehrer noch Lenard-Versuche vorgeführt, was aus Strahlenschutzgründen heute gar nicht mehr erlaubt ist.). Die für diese Versuche von der Lehrmittel-Industrie gelieferten Apparate sind jedoch vorgefertigt, und sie können nicht wirklich die Forschungs-Atmosphäre beleben, die *Physik als Prozess* gerade ausmacht. Vor allem können sie den Konsensfindungsprozess, den Prozess der Raffinierung, der allmählichen Reindarstellung des Effekts, nicht liefern. Collins und Shapin haben vorgeschlagen, den Konsensfindungsprozess wenigstens durch Diskussionen in der Klasse zu simulieren (Collins/Shapin 1983). Aber es ist und bleibt eine Simulation.

Die Experimente haben demnach im wesentlichen zwei Funktionen, sie illustrieren und veranschaulichen zentrale Effekte, und sie können einen Eindruck davon vermitteln, wie schwierig es ist, einen Effekt zu stabilisieren. Das läuft aber am Ende auf eine Einbettung in die tatsächlichen, oder rekonstruierten, Forschungsprozesse hinaus, die >erzählt< werden müssen. Holton (Harvard) z.B. hatte seine Studenten verpflichtet, Studien an Original-Dokumenten zu treiben. Aber das ist in der Praxis des Schulunterrichts kaum möglich. Daher bleibt es – bestenfalls ! – bei sorgfältig ausgewählten Berichten, und häufig sogar bei >erfundener Geschichte<. Erfundene Geschichte habe ich einmal als didaktische Kunst bezeichnet. Ich habe oben geschildert, dass Wissenschaftler

selbst solche Rekonstruktionen vornehmen. Auch in Lehrbüchern kommen sie häufig vor. French, ein bekannter MIT-Physiker, hat in seiner Einführung in die Relativitätstheorie eine typische Rekonstruktion ihrer Entstehungsgeschichte verwendet. Und er wurde prompt von Wissenschaftshistorikern hart kritisiert. Er stehe, sagte er selbstironisch, an der Spitze einer >rogues´ gallery<. Aber solche Rekonstruktionen sind durchaus zulässig als didaktische Hilfsmittel, vorausgesetzt, sie werden nicht als die tatsächliche Geschichte präsentiert, sondern als eine Geschichte, wie sie hätte sein können, oder sollen. Darum herum lässt sich dann die tatsächliche Komplikation als Korrektiv, und als Diskussionsanreiz, einbringen.

Worauf es mir hier ankommt, ist die Analogie zum Geschichtsunterricht herauszustellen. Dort passiert Ähnliches. Der Unterricht kann keine *Geschichtswissenschaft* betreiben, und der Physikunterricht kann keine physikalische *Wissenschaft* treiben, sicher nicht auf diesem Feld. /8/ Alles läuft auf eine *dialogische Erzählkunst* hinaus, dialogisch zwischen Experiment, Dokument, Lehrer, Schüler. Ob wir es so sehen mögen oder nicht, es ist so. Und dabei müssen wir uns mit den Gefahren auseinandersetzen, die das überall, im Physikunterricht wie im Geschichtsunterricht, einfließende *autoritative Element* darstellt. Das ist ein für mich ganz zentraler Gesichtspunkt, den Physiklehrer nach meiner Erfahrung nicht mögen. In Diskussionen, die ich vor vielen Jahren mit Prof. Hecht hatte – damals war er noch Leiter der Lehrmittelabteilung von Leybold in Köln – , betonte er, der Schüler müsse dem Lehrer *vertrauen*. Das ist genau der Punkt. Es ist nicht wichtig, ob man von Vertrauen oder von Autorität spricht, beides geht ohnehin zusammen. Und übrigens muss der Lehrer selbst ja auch dem Lehrbuch vertrauen, und den ausbildenden Professoren.

Ich erinnere mich an eine Kontroverse mit einem Kollegen in einer Fortbildungsveranstaltung in Bremen. Ich wies darauf hin, dass der Schüler bei der Historie auf die Autorität des Lehrers angewiesen sei. Der Kollege wollte das nicht gelten lassen und meinte im Hinblick auf das Beispiel des Photo-Effekts, über den wir diskutiert hatten: >Aber Sie halten doch Stuewer< – der darüber eine historische Studie verfasst hatte – >auch für zuverlässig!< Das tue ich. Aber das war gar nicht der Punkt: Der Kollege hatte nicht gemerkt, dass er doch gerade bestätigte was er bestritt.

Kommen wir zu den Deutungen, zur Theorie. Es gibt inzwischen aufgrund der enormen experimentellen, apparativen und didaktischen Fortschritte höchst instruktive Zugänge zur Quantentheorie, die *im Prinzip* jedem normal denkenden Menschen verständlich zu

machen sind. (Gute Darstellung bei Penrose 1995). Dabei geht es um den *qualitativen* – man könnte auch sagen den philosophisch explosiven – Kernbestand der Quantentheorie, nämlich die *Superposition von Zuständen*. Ein Quantenobjekt kann – um es an einem ebenso einfachen wie paradoxen Fall zu sagen – *zugleich* am Ort A *und* am Ort B sein. Selbst der Formalismus, der die paradoxen Effekte aus der Theorie zu deduzieren erlaubt, lässt sich gut *simulieren*, wenn man einmal diese paradoxe Superposition akzeptiert. Aber wie soll das *gedeutet* werden? Zeilinger hat berichtet, dass er Schülern die Effekte geschildert habe, und in den Diskussionen kamen alle Deutungsansätze vor, natürlich in schlichterer Form, die es von Physikern auch gibt. Ich habe mit meinem Mitarbeiter Wiesner schon vor Jahren diese Deutungsprobleme als wünschenswerte Elemente des Unterrichts dargestellt (vgl. z.B. Jung / Wiesner 1984, neuere didaktische Entwicklungen, an denen ich nicht mehr teilgenommen habe, sind in Pospiech (ed.) 2000 dokumentiert, auch mit einer schönen Arbeit von Bruhn.)

Hier kommt meine *zweite Position* ins Spiel, die ich in der erwähnten Konferenz vertreten habe, nämlich das Toleranz-Gebot: Versuche nicht, Endgültigkeit der Deutung zu suggerieren, schon gar nicht die der Lieblingsdeutung des Lehrers. Schüler müssen lernen, auch im naturwissenschaftlichen Unterricht, mit offenen Situationen umzugehen. Das ist eine ganz wichtige erzieherische Aufgabe, die sachgerecht nur vom Fachlehrer geleistet werden kann. Das Toleranz-Gebot betrifft die Deutung einzelner Effekte, aber auch die mehr grundsätzlichen >regulativen< Vorstellungen, z.B. die über das Verhältnis von Mathematik und Natur, wie es oben angedeutet wurde:: >gehört< die Natur den mathematischen Gesetzen, oder bringt die Natur die Gesetze hervor? Oder bringt sie >der menschliche Geist< hervor (Einstein: >freie Schöpfungen des menschlichen Geistes< – >des< !?), oder schreibt sie die richterliche Vernunft der Natur vor (Kant) ? Welchen Status hat die Evolutionstheorie, um ein anderes Fach anzuführen? Auch hier: Toleranz und keine dogmatische Endgültigkeit. (Biologen mögen widersprechen, aber ich vermute übrigens, Hunds dictum lässt sich m. m. auch auf die Evolutionstheorie anwenden.) Es gibt in aller Regel gute Gründe *für* eine Aussage, und auch gute Gründe *dagegen*, und oft sind wir weit davon entfernt, alle, oder auch nur die Mehrheit, von dem Überwiegen der guten Gründe *dafür* zu überzeugen. (Biologen mögen widersprechen, aber ich vermute, das Hundsche dictum lässt sich Wir müssen lernen, und lehren, offene Situationen auszuhalten, und zwar durchaus eingedenk des Umstands, dass die Naturwissenschaften das beste und sicherste Wissen liefern, das wir haben. Wir Physiker

jedenfalls haben gelernt, um noch einmal auf dieses dictum von Feynman zurück zu kommen, auf unsicherem Boden zu gehen.

Das *übergeordnete pädagogische Thema* ist hier das der *Balancen*. Schule muss eine ganze Reihe von Balancen leisten, und das ist schwierig. Sie muss z.B. die Balance halten zwischen Gängelung und Spontaneität der Schüler, zwischen selbst finden und belehrt werden, etc. Im jetzigen Zusammenhang handelt es sich um die Balance zwischen gesunder Skepsis hinsichtlich der Endgültigkeit wissenschaftlicher Ergebnisse einerseits, und ihrer pragmatischen Sicherheit andererseits. Man kann sich darauf verlassen – bis auf weiteres. (So schon Newton in seinen methodologischen Regeln.)

Ich will mich abschließend zu diesem Punkt noch einmal auf das Hund-Zitat beziehen und fragen: Lernt man so die typische Vorgehensweise der Physik? Ich belasse es bei der offenen Situation. (Die Antwort kann nur lauten Ja *und* Nein, denke ich. Aber ich will niemand das Weiterdenken abnehmen.)

Kommen wir zur *dritten Position*, der den >harten< Teil des Unterrichts betrifft.. Kann es den, nach allem, was ich gesagt habe, überhaupt geben? Es mag seltsam scheinen, dass ich diesen >harten< Teil ganz überwiegend in den frühen, sogar den einführenden, Unterricht lege. Dort liegt der Schwerpunkt auf den experimentellen Phänomenen, die in schülereigener experimenteller Arbeit erkundet werden. Das ist gewiss keine Neuigkeit. Dennoch sind mir hier zwei Anmerkungen wichtig. Erstens kommt es sehr darauf an, das Experimentieren, gerade am Anfang, nicht mit irreführenden Taktiken zu belasten, etwa durch Bemerkungen wie >Die Physiker haben das natürlich genau herausgefunden, wir können das hier nicht<. Es muss klar sein, dass Messwerte immer streuen, und dass Phänomene immer ein wenig ungenau sind: Kein Signal ohne >Rauschen<. Zweitens aber sollte man diese Dinge im Anfangsstadium *nicht thematisieren*, jedenfalls nicht breit treten. Es sollte >informell<, nebenbei, vermittelt werden. Im Zentrum sollen die Effekte stehen, die Phänomene, das Verlässliche daran. /9/

Dabei ist der Gesichtspunkt ausschlaggebend, dass unsere Wahrnehmung habituell *idealisiert*, und das war übrigens bedeutungsvoll auch in der Entwicklung der Physik selbst. Und wir können das im Unterricht nutzen. (Ich habe die Bedeutung von >Gestalt<-Effekten in Utrecht 1985 am Beispiel der Mechanik exemplifiziert.). Anschließend, beim Übergang zu expliziter Theoriebildung, sollte jedoch das Genauigkeitsproblem thematisiert werden. Ich habe in meiner Konzeption, die die drei Teile >Phänomene und

Begriffe<, >Theorien und Motive< und >Verwertung und Kriterien< vorsieht, beim Übergang zum Teil II ein eigenes kleines Heft verfasst, das genau das leisten soll. Ich muss es mir versagen, das in Einzelheiten zu schildern, möchte aber aus der Einleitung dieses Lehrgangsteils einige mir wichtige Sätze zitieren:

>Die Physik der letzten dreihundert Jahre beruhte darauf, daß man die immer etwas unordentliche Natur durch eine genaue, eine >Ersatznatur<, ergänzen konnte: Die Ersatznatur der genauen rechnerischen und mathematischen Gesetze und Formeln liefert *stellvertretend* Antworten auf Fragen über Naturvorgänge. Diese Antworten stimmen für die wirkliche Natur im allgemeinen *nicht genau*. Aber sie stimmen *genügend genau* für die meisten praktischen Zwecke.< /10/

Das wird dann in einem kleinen Lehrgang, der eine Gelenkfunktion im Gesamtlehrgang hat, an einer Reihe von Beispielen behandelt, die auf die Effekte der vorangegangenen Phase zurückgreifen, sie unter dem angeführten Gesichtspunkt betrachten, und zudem werden sie dadurch auch noch einmal zusammenfassend wiederholt.

Ich erinnere mich sehr lebhaft an ein Interview mit einer sechzehnjährigen Schülerin. Ich hatte ihr erklärt, dass Messungen i.d.R. streuen und die Berechnungen nicht genau stimmen. >Und weshalb macht man das dann überhaupt?< fragte sie spontan. Damals stürzte gerade ein Satellit ab /11/, und es gab Ängste darüber, ob und wo er wohl einschlagen könnte. Ich erklärte ihr, dass man das berechnen könne, natürlich nicht genau, aber doch den Korridor, der für Einschlagorte in Frage kommt – und das sei doch etwas sehr Nützliches. Ihre Antwort habe ich mir ebenfalls gut gemerkt, sie sagte: >Und weshalb hat uns das unser Lehrer noch nie erklärt?< Obgleich es sich also eigentlich um eine relativ triviale Sache handelt, wird sie im Unterricht nach meiner Erfahrung nicht ausreichend geklärt. Und ich denke, eine offene Diskussion der Thematik, wie z.B. in dem erwähnten Heft skizziert, kann dabei helfen, die Balance zu halten, die Balance zwischen >endgültig wahr< (jetzt wissen wir's) und >doch alles nicht wahr<, zwischen >wozu braucht man das überhaupt< (wozu ist das gut?) und >doch ganz praktisch<, zwischen >in der Nähe ist alles nicht wahr< und >doch irgendwie wahr<.

Viel wäre noch im Detail auszuführen, aber ich hoffe, ich konnte einen Eindruck davon vermitteln, mit welchen Problemen wir es im naturwissenschaftlichen Unterricht zwischen Fakten und Deutungen zu tun haben, und wie ich mir eine Lösung vorstelle. Damit möchte ich schließen.

Anmerkungen

- /1/ Als ich im Januar das Vortragsmanuskript verfasste, war mir nicht bewusst, dass dies ein bis ins Feuilleton hinein aktuelle Thematik sein könnte, vgl. z.B. das Interview mit Gerhard Roth in LITERARISCHE WELT vom 3.März 2001, S.9: „Es gibt keine dritte Kultur“, nach Roth nämlich gibt es *nur eine*. Weitere Artikel ließen sich anführen, auch aus anderen Zeitungen. Das Gen-Karten-Projekt hat das Feuilleton aufgescheucht. Auf den bekannten Streich von Sokal, der gewisse Modeerscheinungen in der Auseinandersetzung zwischen Natur- und Geisteswissenschaften lächerlich gemacht hat, gehe ich hier nicht ein.
- /2/ Man zitiert nicht, um Belesenheit zu dokumentieren, sondern weil man eine Formulierung gefunden hat, die man selbst auch nicht besser hätte produzieren können, manchmal auch, um zu dokumentieren, aus welchen Quellen das eigene Denken schöpft. (Ähnliches gilt für die zitierten Bücher.) – Ich habe mir überhaupt erlaubt, im Text an passenden Stellen das eine oder andere Zitat und das eine oder andere Anekdotische einzustreuen. – Dies Zitieren erinnert mich an Wagenschein, der mich – ich war damals ein junger Dachs – gebeten hatte, eine Rezension über sein Buch *Die pädagogische Dimension der Physik* zu schreiben. Über das Ergebnis war er einigermaßen verschnupft, u.a. weil ich geschrieben hatte, seine Kapitel seien mit Lesefrüchten garniert. Auch hatte ich dafür plädiert, den Antagonismus zwischen den pädagogisch und den fachlich orientierten Lehrern aufzuheben. Auch das fand er wohl nicht passend, schon gar nicht mein Zitat von Oliver Cromwell: >My brethren, by the bowels of Christ, I beseech you, bethink you that you may be mistaken.< Ich hatte das gerade gelesen und dachte, es werde ihn amüsieren, was sich als deutliche Fehleinschätzung erwies: Er gab mir das Manuskript zurück mit der Bemerkung, das könne ich ja nach seinem Tod publizieren. – Da gelegentlich bezweifelt wurde, dass ich die Bücher, die ich anführe, gelesen haben könne, habe ich mich hier auf wenige beschränkt. Tatsächlich lese ich in den letzten Jahren auch nicht mehr viel.
- /3/ Bis zur Abfassung des Manuskripts gibt es keinen erfolgreichen Detektor. Doch steht die Erprobung eines deutschen Exemplars (Prof. Danzmann) bevor.
- /4/ Andere Autoren ließen sich anführen, z.B. Scriven 1963, mit dem bezeichnenden Titel *The Key Property of Physical Laws – Inaccuracy*. Der Artikel, obgleich 40 Jahre alt, ist noch immer lesenswert. Die Abhandlung von Cartwright 1983 ist tiefergehend und bezieht die Quantenmechanik mit ein.
- /5/ Wenn man die erzieherische Rolle des naturwissenschaftlichen Unterrichts ernst nimmt, müssen Fragen dieser Art im Unterricht kontrovers und mit offenem Ende diskutiert werden. Welche Rolle die Vorstellung spielt, die Wirklichkeit sei >eigentlich< mathematisch präzise verfasst, erkennt man daran, dass sie selbst in der politischen Öffentlichkeit (z.B. Zeitung) ihren naiven Niederschlag findet. So liest man in einer überregionalen Zeitung z.B., niemand kümmere sich beim Ein-

steigen in ein Auto darum, >wie hoch die mathematisch exakte Wahrscheinlichkeit für einen tödlichen Unfall ist.< (Die WELT, 07.04.2001, S.8) Allenfalls könnte man die gerade aktuelle relative Häufigkeit ermitteln.

- /6/ In Kierkegaards Tagebüchern findet man überhaupt interessante Bemerkungen, z.B.: >Alles Unheil wird einmal von den Naturwissenschaften kommen<, und: >Hätte Jesus das mit dem Mikroskop gewußt, hätte er die Jünger erst unter dem Mikroskop untersucht.< – ein Motto für Geniaks. - Da ich die Tagebücher vor etwa 50 Jahren gelesen habe, schenke ich mir die Mühe, die Seitenzahl zu recherchieren. Den Wortlaut habe ich nie vergessen. (Wer es aber wissen möchte, dem suche ich es heraus.)
- /7/ Ich habe den alten Hund 1982 auf einer Fortbildungsveranstaltung in Kaiserslautern getroffen und ihn gefragt, ob er diese Position heute noch vertrete – er konnte sich überhaupt nicht mehr daran erinnern, das geschrieben zu haben. Er wollte sich nicht festlegen. Ich hätte es wirklich gern gewusst.
- /8/ Bedenkenswert ist in diesem Zusammenhang auch Hunds Feststellung, Mathematik sei die einzige dem Schüler zugängliche Wissenschaft (o.c.372)
- /9/ Die entscheidende Wendung zur öffentlich zugänglichen Demonstration am Ursprung der modernen Naturwissenschaft wird ausführlich dargestellt in Shapin / Schaffer 1985, siehe auch Shapin 1998. Dabei wird auch wieder Zirkularität deutlich. Es geht um die Öffentlichkeit und den Konsens der *qualifizierten* Beobachter. Dass dabei Idealisierungen eine große Rolle spielen, ebenso wie das Moratorium bezüglich Anomalien, wird aus Shapin / Schaffers Bericht über Boyles Versuche zum sog. Boylschen Gesetz deutlich. Schließlich muss erwähnt werden, dass heutzutage die meisten Versuche an der Front der Forschung nicht mehr wirklich >öffentlich< zugänglich sind. Das hängt mit der Großforschung ebenso zusammen wie mit dem veränderten Stil der Forschung, die auf Selbstreklame für die Akquisition der enormen Finanzmittel angewiesen ist. Welche Veränderungen das auf lange Sicht auch für die naturwissenschaftlichen Wissenschaften haben wird, ist eine offene Frage.
- /10/ Wer hier eine Inkonsistenz zum Toleranzgebot sieht, hat das möglicherweise mißverstanden: Es verlangt nicht, dass der Lehrer keine eigene Position haben und nicht kund tun darf. Es verlangt aber eine faire Darstellung und Diskussion anderer Positionen. Das ist eine Sache des Unterrichts, die im Zitat nicht dargestellt ist.
- /11/ Zufällig ergab sich nach Abschluss des Manuskripts wieder eine ähnliche Situation durch den bevorstehenden Absturz der MIR.

Literatur

ADAIR, R. K., The Great Design. Particles, Fields, and Creation. Oxford University Press, New York / Oxford 1987

BAUMERT, J., E.KLIEME, M.LEHRKE, E.SAVELSBERGH, Konzeption und Aussagekraft der TIMSS-Leistungstests. Zur Diskussion um TIMSS-Aufgaben aus der

- Mittelstufenphysik. In: *Die Deutsche Schule* **92**(2000) Nr.1, 102 – 115 und Nr.2, 196 – 217
- BEVILACQUA, F., *The Principle of Conservation of Energy and the History of Classical Electromagnetic Theory*. La Golardica Pavese, Pavia 1983
- BUTTS, D., The Degree to which Children Conceptualize from Science Experience. In: *Journal of Research in Science Teaching* **1**(1963) No 1, 135 – 143
- CARTWRIGHT, N., *How the Laws of Physics Lie*. Oxford University Press, Oxford 1983
- CASSIDY, D. C., *Werner Heisenberg. Leben und Werk*. Spektrum Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford 1995
- COLLINS, H. M., PINCH, T.J., *Frames of Meaning: The Social Construction of Extraordinary Science*. Routledge&Kegan Paul, London 1982
- COLLINS, H. M., SHAPIN, St., Experiment, naturwissenschaftlicher Unterricht und die neue Geschichte und Soziologie der Naturwissenschaften. In: *physica didactica* **11**(1984) Heft 1, 33 – 40
- EISNER, W., Der Kopenhagener Geist. Ansätze zu einer Sozialgeschichte der Quantentheorie. In: *Physikalische Blätter* **57**(2001) Nr.6, 75 - 79
- FRANKEL, E., Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: The Science and Politics of a Revolution. In: *Social Studies of Science* **6**(1976) 141 – 184
- FRANKLIN, A., *The neglect of experiment*. Cambridge University Press, Cambridge et al., 1986
- GOODING, D., *Experiment and the Making of Meaning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht et al., 1990
- GOODING, D., PINCH, T.J., and SCHAFFER, S., Editors, *The Uses of Experiment. Studies in the natural Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge 1989
- GOETHE, J. W. von, *Erfahrung und Wissenschaft*. In: *Schriften zur Botanik und Wissenschaftslehre*. Dtv 1963, 179 – 180
- GÖRNITZ, T., Immer Ärger mit den Quanten. FAZ Feuilleton vom 23. Januar 2001
- GÖRNITZ, T., *Quanten sind anders*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford 1999
- GROSSMANN, S., Faszination Physik. Ein erdachtes Gespräch einer Studentin (S) mit einem Emeritus (E). In: *Physikalische Blätter* **57**(2001) Heft 5, 23 – 27
- HACKING, I., *Representing an intervening. Introductory topics in the philosophy of natural science*. University of Cambridge Press, Cambridge 1983
- HAGEMEISTER, V., Ein Beitrag zur Analyse der empirischen Basis von TIMSS. In: *der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* **54**(2001) Heft 3, 178 - 184
- HEERING, P., F.RIESS, C.SICHAU, (Hrsg.), *Im Labor der Physikgeschichte. Zur Untersuchung historischer Experimentalpraxis*. bis: Informations- und Bibliothekssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg 2000
- HUND, F., *Die wissenschaftliche Erziehung in den Naturwissenschaften. Mathematik und Physik*. In: *Nohl, H., Pallat, L., Hrsg., Handbuch der Pädagogik. Band III. Allgemeine Didaktik und Erziehungslehre*. Verlag J.Beltz, Langensalza 1930
- JUNG, W., *Philosophy of Science and Science Education*. Invited paper presented to the Conference <Verso il 2000. Problemi Aperti di Didattica delle Scienze. Università Salerno, 5. – 7.4.1989. Durchgesehenes Manuskript 1999
- JUNG, W., Welträtsel gelöst, für Gebildete – Anfänger und Fortgeschrittene. In: *physica didactica* **16**(1989) Heft 2, 74 – 76. – Rezension von: K.A.Adair, *The Great Design, Particles, Fields, and Creation*, und N.G.Cooper. G.B.West, Editors, *Particle Physics. A Los Alamos Primer*
- JUNG, W., A non-traditional way of structuring mechanics for secondary schools. In: *P.L.Lijnse, Editor: The many faces of teaching and learning mechanics in secon-*

- dary and early tertiary education. *Proceedings of a Conference on Physics Education, Utrecht – The Netherlands, 20. – 25. August 1985. Organized by Group International Sur L'Enseignement De La Physique, in Cooperation with SVO and UNESCO. W.C.C.- Utrecht 1985, 587 – 606*
- JUNG, W., Versuche mit dem „Lauten Denken“ bei physikalischen Problemen. Forschungsbericht WS 1984/85
- JUNG, W., WIESNER, H., Kontroverse Deutungen der Quantenphysik als Gegenstand des Physikunterrichts. In: *Praxis der Naturwissenschaften P/C* **33**(1984) 276 – 281
- KUBLI, F., Plädoyer für Erzählungen im Physikunterricht. Aulis Verlag, Köln 1998
- KUHN, T.S., Metapher in Science. In: A.Ortony, Editor, *Metaphor and Thought. Cambridge University Press, Cambridge 1982*
- LAUDAN, L., Science and Hypotheses. Historical Essays in Scientific Methodology. D.Reidel Publisher, Dordrecht 1981
- LICHTENBERG, G. Chr., Schriften und Briefe Band II. Verlag Zweitausendeins, Frankfurt a.M. 1994
- MACKINNON, E., Heisenberg, Model, and the Rise of Matrix Mechanics. In: *McCORMACH, R., PEYENSON, L., Editors, Historical Studies in the Physical Sciences. Eighth Annual Volume. John Hopkins Press, Baltimore 1977*
- MNU: Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V., Physikunterricht und naturwissenschaftliche Bildung – aktuelle Anforderungen. Als Anlage in: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* **54**(2001) Heft 3, I - XVI
- NERSESSIAN, N. J., Science and Philosophy. Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theory. Martinus Nijhoff, Dordrecht 1984
- PENROSE, R., Schatten des Geistes. Spektrum Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford
- POSPIECH, G., Hrsg., Atome und Quanten im Unterricht. Erfahrungen und Perspektiven. Institut für Didaktik der Physik der JWG Universität Frankfurt a.M., Frankfurt a.M. 2000
- SCRIVEN, M., The Key Property of Physical Laws – Inaccuracy. In: *Feigl, H., Maxwell, G., Editors, Current Issues in the Philosophy of Science. Holt, Rinehart&Winston, New York 1961*
- SCHAFFER, S., Glass-works: Newton's prism and the uses of experiment. In: *Gooding, D., PINCH, T. J., and SCHAFFER, S., Editors, o.c. 1989, 67 – 104*
- SEXL, R., Irreversibilität und stochastisches Verhalten deterministischer Systeme. In: *A.Scharmman, A.Hofstetter, W.Kuhn, Hersg., Deutsche Physikalische Gesellschaft Fachausschuss Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung 1981. Gießen 1981, 417 – 432*
- SHAPIN, St., Die wissenschaftliche Revolution. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt a.M. 1998
- SHAPIN, St., SCHAFFER, S., Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life. Princeton University Press, Princeton 1985
- WHITEHEAD, A. N., Science and the Modern World. Löwe Lectures 1925. Macmillan, New York 1925. (Ich zitiere nach der Mentor Book Edition der New American Library 1949)
- WHITEHEAD, A. N., The Aims of Education and Other Essays. Macmillan, New York 1929. (Ich zitiere nach der Mentor Book Edition der New American Library 1949)
- WHITEHEAD, A. N., Process and Reality. An Essay in Cosmology. Macmillan, New York 1929. (Ich zitiere nach dem Reprint von The Social Book Store, New York 1941)

WHITEHEAD, A. N., Essays in Science and Philosophy. Philosophical Library, New York 1948

ZIMAN, J., Public Knowledge. The Social Dimension of Science. Cambridge University Press, Cambridge 1968

ZIMAN, J., Reliable Knowledge. An exploration of the grounds for belief in science. Cambridge University Press, Cambridge 1978. – Deutsch: Wie zuverlässig ist wissenschaftliche Erkenntnis? Verlag Vieweg, Braunschweig 1982