

Phänomenologische Optik: eine „Optik der Bilder“

Teil 1: Erkenntnistheoretische, experimentiermethodische und didaktische Merkmale eines nichtreduktionistischen Zugangs zur Optik

von

Johannes Grebe-Ellis

Humboldt-Universität zu Berlin

Zusammenfassung:

Die Beschreibung optischer Gesetzmäßigkeiten wurde historisch mit mechanischen Analogien begründet (DESCARTES, HUYGENS und NEWTON). Auf diesem Weg ist eine physikalische Optik entstanden, die zum herausragenden Beispiel für den vereinheitlichenden Charakter physikalischer Beschreibung überhaupt geworden ist. Die Festschreibung dieser Optik im „metaphysischen Realismus der klassischen Physik“ (PLANCK) hat indessen auch dazu geführt, dass sie keine echte Erfahrungswissenschaft ist. Dies ist verschiedentlich angemerkt worden: zum einen im Kontext der Quantenphysik (MUELLER, COLLETT), zum anderen aus der Perspektive nichtreduktionistischer Naturzugänge (GOETHE, BÖHME, STEINLE). Wie im Sinne einer *phänomenologischen Optik* der Rekurs auf nichtobservable Größen und Vorgänge vermieden werden kann, indem die Gesetzmäßigkeiten optischer Erscheinungen aus den Bedingungen ihres Erscheinens erschlossen werden, ist inzwischen mehrfach gezeigt worden (MAIER, MACKENSEN). Im ersten Teil der vorliegenden Studie werden erkenntnistheoretische und experimentiermethodische Gesichtspunkte der phänomenologischen Optik als einer *Optik der Bilder* (MAIER) herausgearbeitet und gegen den metaphysischen Realismus der modellgestützten Beschreibung abgegrenzt. Es wird aufgezeigt, welche didaktischen Probleme mit konzeptionellen Aspekten der klassischen Physik im Bereich der Optik verbunden sind und worin die didaktische Aktualität des phänomenologischen Ansatzes gesehen werden kann.

Abstract

The usual treatment of optical phenomena was historically based on mechanical analogies (DESCARTES, HUYGENS, NEWTON). On this way, the resulting optics became an outstanding example for the unifying character of physical descriptions. However, the codifying of this method as the „metaphysical realism of physics“ (PLANCK) meant that optics is no longer a „science of real experience“, since it deals with non-observable quantities. This has been annotated in different contexts, e.g. in the field of

quantum physics (MUELLER, COLLETT) and also from the perspective of non-reductionistic natural philosophy (GOETHE, BÖHME, STEINLE). There are some examples of an so called „phenomenological“ optical treatment that avoid completely referring to non-observable entities by inferring the optical laws from the conditions of the phenomena (MAIER, MACKENSEN). The first part of this study aims on the epistemological and experimental standpoints of phenomenological optics as an *optics of vision* (MAIER). It will be discussed which didactical problems are involved with the classical treatment of optics and where the phenomenological approach can be an significant improvement.

1. Begriffsklärung und Vorarbeiten

Die Bezeichnung <phänomenologisch> wird im Zusammenhang der vorliegenden Studie nicht streng philosophisch, d.h. etwa im Sinne Husserls oder Schmitz verwendet. Gelegentlich wird an ihrer Stelle auch von <modell-> oder <hypothese[n]frei> gesprochen, um zu verdeutlichen, dass es bei der hier angestrebten Blickrichtung vor allem um beobachtbare Erscheinungen und weniger um die Ableitbarkeit von Erscheinungen aus Hypothesen geht. Insofern können die im Teil 2 vorgesehenen Beispiele einer Phänomenologie der Polarisation auch als Elemente einer *Erscheinungslehre der Polarisation* bezeichnet werden.

1.1 Phänomenologie und Theoretische Physik

In der Theoretischen Physik bedient man sich der Bezeichnung <phänomenologisch>, um einen nicht-atomistischen Beschreibungstypus zu kennzeichnen; dabei handelt es sich aber nicht wirklich um einen physikalisch bzw. für den Kontext der Physik wissenschaftstheoretisch klar definierten Begriff. Beispielsweise wird die Ginzburg-Landau-Theorie der Supraleitung im Gegensatz zum mikroskopischen Ansatz des Bardeen-Cooper-Schrieffer-Modells als phänomenologisch bezeichnet, weil sie funktionelle Zusammenhänge zwischen Observablen beschreibt und keine weitere Abbildung dieser Zusammenhänge auf die Eigenschaften hypothetischer Größen und Vorgänge auf atomarem Niveau enthält. Auch die Maxwell-Gleichungen werden in diesem Sinne als phänomenologische Gleichungen der Elektrodynamik bezeichnet. Zur Verdeutlichung des Unterschieds zwischen phänomenologischer und statistischer Beschreibung ist auch die Theorie der Wärme angeführt worden: „Die phänomenologische Betrachtungsweise arbeitet nur mit Begriffen wie Temperatur, Wärmemenge usw., die der makroskopischen Beobachtungswelt entnommen sind und direkt gemessen werden können. Die so gewonnenen Sätze haben den Vorzug, ganz hypothese[n]frei gewonnen zu sein“ (Joos 1959, S. 33). Auf einen für den erkenntnistheoretischen Standpunkt der vorliegenden Studie wesentlichen Aspekt hat Mueller hingewiesen, indem er darauf aufmerksam gemacht hat, dass die Maxwell-Gleichungen in ihrer Anwendung auf die

Optik ihren phänomenologischen Charakter verlieren, weil die elektromagnetischen Felder eines Lichtbündels, ihre Frequenz und Phase keine Observablen sind. Die von ihm entwickelte „phänomenologische Theorie einer Matrix-Optik“, die von Parke ausgearbeitet wurde, verhält sich zur Wellen- bzw. Photonenoptik wie die Theorie der Gase zur statistischen Mechanik. Die Forderung, grundsätzlich zwischen beobachtbaren, hypothetischen und prinzipiell unbeobachtbaren Größen zu unterscheiden und nach mathematischen Formulierungen zu suchen, die funktionale Zusammenhänge zwischen ausschließlich beobachtbaren Größen beschreiben, ist im Zusammenhang mit dem Messproblem der Quantenmechanik und der quantenmechanischen Zustandsbeschreibung mehrfach erhoben worden (Heisenberg 1925, S. 879; Verhulst 1994). Die genannten Beispiele machen indessen deutlich, dass sich die Auffassungen von „Phänomenologie“ in der Physik im Wesentlichen auf konzeptionelle Unterschiede innerhalb der Theoretischen Physik beschränken.

1.2 Phänomenologie und Physikdidaktik

Im Bereich der Physikdidaktik werden mit den Bezeichnungen <phänomenorientiert> <wahrnehmungsbezogen> oder <explorativ> Zugänge zur Physik apostrophiert, die der Bedeutung von Erlebnisbezügen im Physikunterricht Rechnung zu tragen versuchen, indem sie „von den Phänomenen ausgehen“. Die Begriffe ‚Phänomen‘ und ‚phänomenologisch‘ werden indessen sehr unterschiedlich verwendet. BUCK & VON MACKENSEN (2006, S. 12-15) unterscheiden sechs unterschiedliche Wortbedeutungen. Der im vorliegenden Beitrag praktizierten Phänomenologie entspricht am ehesten das dort unter *vi* gezählte Verständnis: „Ein Phänomen ist ... eine ganzheitliche Erkenntniserfahrung; im goetheschen Sinn kann man vom Ergebnis ‚anschauernder Urteilskraft‘ sprechen“ (ebd., S. 15). Die entscheidenden Impulse zu einer „Rettung der Phänomene“ im Physikunterricht verdankt die Physikdidaktik dem Wirken WAGENSCHAINS (Wagenschein 1976; Muckenfuß 1995, Redeker 1995).¹ Eine konzeptionelle

¹ Die Bezüge auf seine Vorschläge innerhalb der Physikdidaktik sind sehr vielfältig (Muckenfuß 1995). Gemeinsam ist ihnen mehr oder weniger die Überzeugung, dass die Hinwendung zu den Phänomenen letztlich *Vorstufe* bleiben muss: der eigentliche Gegenstandsbereich des Physikunterrichts betrifft ein Wissen von der Natur, dessen Gültigkeit gerade durch die Abstraktion vom einzelnen Phänomen und vom Wahrnehmen des Einzelnen gesichert ist. Hiervon unterscheidet sich der Ansatz VON MACKENSENS, der nicht nur „ausgeht von den Phänomenen“, um sie dann zugunsten der „eigentlichen Physik“ wieder zu verlassen, sondern der ein „Verweilen bei den Phänomenen“ mit dem Ziel eines erlebnisgesättigten Naturverständnisses für möglich hält (von Mackensen 1992; Buck & von Mackensen 2006).

Begründung von ‹Phänomenologie› im Sinne eines eigenständigen fachdidaktischen Ansatzes, der sich zum einen auf weitere, unabhängig von WAGENSCHNEIDER entstandene Konzeptionen von phänomenologischem Physikunterricht (z.B. VON MACKENSEN) und zum anderen auf eine breitere empirische Basis stützen könnte, steht indessen noch aus².

1.3 Das Projekt „Phänomenologie der Natur“

Phänomenologie als wissenschaftliche Disziplin kommt zunächst als Teilbereich der Philosophie in Betracht. Der Begriff ist von hier aus auch im Zusammenhang mit Naturzugängen gebraucht worden, die eine Alternative zu dem naturwissenschaftlich-technischen Paradigma der Neuzeit darstellen.³ Das „Projekt Phänomenologie der Natur“ von BÖHME, SCHIEMANN u.a. stellt einen naturphilosophischen Ansatz dar, der den Erkenntniszugriff des neuzeitlichen Reduktionismus in der Naturwissenschaft mit seinen praktischen Folgen umfassend kritisiert und, anknüpfend an Aristoteles und GOETHE, alternative Naturzugänge aufzeigt, die sich u.a. durch ihre ethische und didaktische Aktualität auszeichnen (Böhme & Schiemann 1997).⁴ Der Unterwerfung und Beherrschung von Natur und der Unterdrückung des wahrnehmenden und erkennenden Subjektes als Grundgeste cartesischer Urteilsbildung wird die bewusste Hinwendung an das Eigensein der Erscheinungen, die erlebende Teilnahme an dem Phänomenalen der Natur und das eigene „Leibsein als Aufgabe“ entgegen gestellt (Böhme 2002). Dass solche Naturzugänge durchaus die methodologischen Anforderungen erfüllen können, die an eine empirische Wissenschaft gestellt werden müssen, hat BÖHME in Anknüpfung an die Vorarbeiten GÖGELEINS (Gögelein 1970) zu GOETHE gezeigt (Böhme 1993, S. 123). Von BASFELD stammt in diesem Zusammenhang der *Entwurf einer Phänomenologie der Wärme* (Basfeld 1997), HEITHECKER hat eine *Phänomenologie der Krafterscheinungen* entwickelt (Heithecker 2006). Der wissenschaftsmethodische Wert dieser

² Über Arbeiten an einer solchen Naturwissenschaftsdidaktik hat P. BUCK auf der GDGP-Tagung in Bern vorgetragen (Buck 2006).

³ Die Möglichkeiten und Grenzen dieses Paradigmas wurden innerhalb der Physik des ausgehenden 19. und des 20. Jahrhunderts selbst immer wieder in Abgrenzung an den Wissenschaftsansatz GOETHES bestimmt. So z.B. in zum Teil umfangreichen Würdigungen bei HELMHOLTZ (1932, S. 213ff), PLANCK (1919, S. 66), HEISENBERG (1947, S. 54ff) und VON WEIZSÄCKER (1941, S. 81; 1981, S. 539ff).

⁴ Ein anderes Beispiel bietet die „Neurophänomenologie“ innerhalb der modernen Kognitionswissenschaft, die ihre methodische Anknüpfung an die Phänomenologie HUSSERLS und MERLEAU-PONTYS mit der Perspektive verbindet, „ohne Vorurteile und vorschnelle Wertungen die eigenen Erfahrungen und Wahrnehmungen zu erforschen, sich selbst als Wissenschaftler in die Reflexion mit einzubeziehen, um eine entkörperte, rein abstrakte Analyse zu vermeiden“ (Varela in Pörksen 2002).

Arbeiten liegt u.a. darin, dass in ihnen das *methodische* Vorbild der Farbenlehre Goethes nicht einfach übernommen wird, sondern für jeweils ganz verschiedene Phänomenbereiche, d.h. den dort vorgefundenen Anforderungen und Eigenheiten gemäß, neu entwickelt wird. Wesentliche Aspekte für das wissenschaftliche Selbstverständnis solcher phänomenologischer Bestrebungen innerhalb der Geschichte der Physik haben die historisch-erkenntniskritischen Arbeiten STEINLES zum von ihm so genannten „Explorativen Experimentieren“ zutage gefördert. STEINLE zeigt, dass die bei GOETHE in besonders reiner Ausprägung vorhandene und von ausgereifter methodischer Reflexion begleitete experimentelle Arbeitsweise einen Typus des Forschens darstellt, der sich in vielfältigen Variationen und abgeschwächten Formen u.a. auch bei DUFAY, FARADAY und OERSTEDT finden lässt und der demnach sehr viel verbreiteter war und ist, als bisher angenommen wurde (Steinle & Ribe 2002; Steinle 2002a,b; 2004).

1.4 Phänomenologie in der Nachfolge Goethes

Der rationale Empirismus GOETHES spielt für die phänomenologischen Bestrebungen der Gegenwart deshalb eine besondere Rolle, weil er Nachfolger gefunden hat, die im Methodenbewusstsein der Gegenwart auf praktisch allen Gebieten der Naturwissenschaft arbeiten (Haas o. J.). Zu den Gebieten, die in diesem Zusammenhang bisher am gründlichsten ausgearbeitet wurden und deren praktische Ergebnisse seit einigen Jahren erste Verbreitung in Schule und Hochschule gefunden haben, gehört die Optik. Es konnte gezeigt werden, dass sich phänomenologische Optik nicht im naiven Bestaunen von Phänomenen erschöpft. Klare erkenntnistheoretische und experimentiermethodische Konzeptionen ermöglichen vielmehr über die „Phänomenologie als motivierenden Einstieg“ hinausgehend methodisch geschlossene und durchsichtige Zugänge in die moderne Physik, die sich didaktisch durch eine hohe Bewertung der auf die eigene Sinnesbetätigung gestützte Beobachtungskultur und modellfreie Urteilsbildung auszeichnen. Die grundlegenden und in ihrer methodischen Anknüpfung an Berkeley, Goethe und Steiner konsequentesten Arbeiten zu diesem Bereich sind in den letzten dreißig Jahren u.a. von BARAVALLE, JULIUS, WILSON, MAIER, MACKENSEN und OHLENDORF vorgelegt worden, zum Teil in Form von inzwischen vielfach überarbeiteten Unterrichtsentwürfen für den Mittel- und Oberstufenunterricht, zum Teil in Form von wissenschaftlichen Beiträgen zu einer „Optik der Bilder“ bzw. „Modellfreien Optik“.⁵ Einzelne Aspekte wurden in den letzten Jahren weiter

⁵ MAIER hat wiederholt darauf hingewiesen, dass im Bereich der phänomenologischen Optik als einer „Optik der Bilder“ gerade der Verzicht auf die für die physikalische Optik charakteristischen metaphysischen Implikationen verschiedener quasimechanischer Lichtmodelle zu konzeptionellen Berührungen

ausgearbeitet, erweitert und vertieft so dass inzwischen nahezu alle Bereiche der Optik phänomenologisch durchgearbeitet oder zumindest erschlossen sind.⁶

Zu den Bereichen, die im Kontext der phänomenologischen Optik bisher am wenigsten Beachtung gefunden haben, gehört die Polarisation. Es liegen zwar eine Reihe phänomenologischer Studien zu einzelnen Aspekten der Polarisation vor: Die Arbeiten von BARTHOLINUS, GOETHE, HAIDINGER, LOBECK, HOWALD-HALLER und PRÖBSTL liefern eine Fülle interessanter Anregungen und Anknüpfungspunkte. Der Versuch, den *Gesamtumfang* der Polarisationserscheinungen als ein Ganzes zu erschließen und eine in den Erscheinungen selbst liegende Ordnung herauszuarbeiten, der sich geometrisch ausgezeichnete Modi der Hebungs-, Spiegelungs-, Atmosphären- und Fabenoptik unterordnen, stand jedoch bisher aus und ist im Rahmen einer Dissertation unternommen worden (Grebe-Ellis 2005). Das Ziel war dabei, auf der in den Arbeiten MAIERS und VON MACKENSENS gegebenen erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Basis die Erscheinungszusammenhänge, in denen Polarisation als qualitative „Eigenschaft von Ansichten“ auftritt, so zu erarbeiten, dass sich so etwas wie ein im Wandel der Erscheinungen Beständiges zeigt, – eine Art Grundprinzip oder Urphänomen, das sich in unterschiedlichen Kontexten und für den jeweiligen Kontext charakteristischen Abwandlungen wiederholt und das sich in jedem einzelnen Polarisationsphänomen mehr oder weniger rein anschauen lässt.

Zum einen ist damit ein weiteres konkretes Beispiel für die phänomenologische Arbeitsweise als solche gegeben. Zum anderen bilden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungsgänge (Grebe-Ellis 2005, S. 63-244) einen strukturierten Komplex von systematischen Beobachtungen, der als Ganzes, aber auch in Ausschnitten die fachliche Grundlage für

mit der modernen Physik führen (Maier 1988; 1993; 1996). Der Ansatz seiner „Optik der Bilder“ zeichnet sich in diesem Sinne dadurch aus, dass er neben den methodischen Bezügen auf ARISTOTELES, BERKELEY, GOETHE und STEINER zugleich eine ausdrückliche Bezugnahme auf Konzepte der modernen Physik enthält.

⁶ Vgl. u.a. den Leitfaden *Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation – Materialien für einen modellfreien Optikunterricht im Grund- und Leistungskurs Physik* von GREBE-ELLIS, SOMMER und VOGT (Grebe-Ellis u.a. 2002; Sommer u.a. 2004), ferner *Grundversuch für die Lichtbeugung an Kanten* von SEIPP (2002), *Zur Rolle der Lichtgeschwindigkeit in der modellfreien Optik* von THEILMANN und MAIER (2004) sowie die Dissertation *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege* von SOMMER (2005).

Curriculumentwicklungen zur Polarisation in Schule und Hochschule bilden kann.⁷

2. Anliegen und Zielsetzung

2.1 Physikalische Optik und „Optik der Bilder“ – Vorbemerkungen zu den folgenden Kapiteln

Im Kapitel 5 dieser Studie wird der phänomenologische Ansatz skizziert, wie er von MAIER und VON MACKENSEN als „Optik der Bilder“ bzw. als „Modellfreie Optik“ entwickelt worden ist. Die Spezifika dieses Ansatzes werden an drei Gesichtspunkten erläutert, die das *erkenntnistheoretische*, *experimentiermethodische* und *didaktische* Selbstverständnis des phänomenologischen Vorgehens in Anknüpfung an BERKELEY und GOETHE und im Zusammengehen mit konzeptionellen Aspekten der modernen Physik präzisieren. Zur Kontrastierung wird den entsprechenden Abschnitten ihre jeweilige Entsprechung im Selbstverständnis der physikalischen Optik vorangestellt (Kapitel 2, 3 und 4). Dies erfordert zum Teil ein sehr grundsätzliches Eingehen auf den wissenschaftstheoretischen Charakter der jeweiligen Blickrichtung, ohne das aber das mit Phänomenologie im hier gemeinten Sinne verknüpfte Anliegen nicht deutlich werden würde. Gleichwohl kann damit nicht der Anspruch erhoben werden, eine auch nur annähernd erschöpfende wissenschaftstheoretische bzw. historisch-erkenntniskritische Darstellung der Beziehung zwischen dem reduktionistischen Charakter der auf technische Anwendungen hin orientierten physikalischen Optik einerseits und dem Ansatz der phänomenologischen Optik andererseits zu geben.⁸

Es bleibt nicht aus, dass bei einem in wesentlichen Punkten so andersartigen naturwissenschaftlichen Vorgehen wie dem der phänomenologischen Optik auch andere Begriffs- und Sprachformen gefunden werden müssen – solche, die *beschreiben* ohne zugleich zu *deuten*, die durchlässig sind für die Qualitäten und Gesten von Erscheinungen und das Besondere der einzelnen

⁷ Im Bereich der Physikdidaktik hat Karen RIECK eine Dissertation zu *Polarisation von Licht im Physikunterricht* vorgelegt, die einen *Elementarisierungsansatz zur Einführung in quantenphysikalische Begriffe und Prinzipien* enthält. Die methodische Blickrichtung der Arbeit unterscheidet sich von der hier angestrebten grundlegend dadurch, dass die klassische Deutung der Polarisation im Rahmen der modellgestützten Optik vorausgesetzt wird (Rieck 2003).

⁸ Versuche zu einer solchen Darstellung, denen bei aller Unterschiedlichkeit die Zuspitzung des Themas in dem *casus Goethe-Newton* durchgängig gemeinsam ist, findet man u.a. bei BASFELD (1992), BÖHME (1993), BORTOFT (1996), HEISENBERG (1947), MIKELSKIS (1990), SCHIEMANN (1997), STEINLE (2002a,b), VERHULST (1994) und ZAJONC (1994).

Erscheinung nicht von vornherein auf ein hypothetisches Allgemeines hin abstrahieren. Begriffe wie brechen, beugen, streuen, reflektieren, emittieren, transmittieren, absorbieren etc. legen die jeweils gemeinten *«Erscheinungen»* bereits in ihrem *«Wahrgenommenwerden»*, das aus der hier vertretenen phänomenologischen Sicht gar nicht als solches bezeichnet werden kann, auf den quasimechanischen Deutungshorizont der gängigen Lichtmodelle fest. Für eine vorurteilslose Strukturierung von Beobachtungen nach Maßgabe *erscheinungsimmanenter* Kriterien und Ordnungsmerkmale (Erscheinungsordnungen) sind sie deshalb ungeeignet.

Dies ist auch im Zusammenhang didaktischer Untersuchungen zur Bildung epistemologischer Überzeugungen und zum Problem fehlender Modellkompetenz bei Schülern von Bedeutung (Muckenfuß 1995, Leisner 2005). – Wie soll etwa ein Schüler, um zunächst einmal einen unbefangenen Zugang zu Phänomenen zu entwickeln, davon abgehalten werden, sich „Licht“ von vornherein als einen transversal strukturierten Teilchenstrom vorzustellen, der, mit unvorstellbar hoher Geschwindigkeit aus der Richtung der Lichtquelle kommend, ein Stück Polarisationsfolie *«durchsetzt»*, von der Folie zum Teil *«durchgelassen»*, zum Teil *«verschluckt»* wird etc., wenn ihm dieser mechanistische Deutungszusammenhang mit den Bezeichnungen Polarisationsfilter, Durchlass- bzw. Schwingungsrichtung, Transmissions- und Absorptionsgrad schon implizit mitgeliefert wird?

Im Hintergrund solcher bereits im Sprachgebrauch liegender Deutungen sind ferner zwei weitere didaktisch relevante Voraussetzungen wirksam, die in den Kapiteln 4 und 6 thematisiert werden: Zum einen verschleiert die unreflektierte Anwendung der genannten Begriffe auf optische Phänomene die Grenze zwischen tatsächlich observablen und prinzipiell hypothetischen Größen, so dass Vorstellungskonstrukte mit beobachtbaren Phänomenen verwechselt werden. Zum anderen fördert der unreflektierte Rückbezug dessen, was tatsächlich beobachtet und gemessen werden kann, auf unbeobachtbare Größen und Vorgänge die Einübung auf ein Verständnis von *«Erklärung»*, bei dem die Überschreitung der sinnlichen Tatsachen zugunsten einer mit „subjektiver Wahrnehmung“ angeblich nicht erreichbaren „objektiven Wirklichkeit“ begründet wird. Die damit verbundene Abwertung der sinnlichen Wahrnehmungsbefähigung des Einzelnen hat, insbesondere wenn sie gegenüber Schülern in einer Phase wirksam wird, in der erste eigene Vorstellungen über einen Erkenntniszugang zur Natur gebildet werden, weitreichende Folgen für das Vertrauen in die Möglichkeit einer auf selbständig gemachte Beobachtungen gestützte Naturerkenntnis („Sinnssicherheit“ bei WAGENSCHN) (Wagenschein 1976; Buck & von Mackensen 2006; Mackensen 1990; 1992).

3. Physikalische Optik

Besinnt man sich auf die Grundlagen der physikalischen Optik, die heute an Schulen und Hochschulen gelehrt wird, so erweisen sich folgende Voraussetzungen als besonders kennzeichnend: Die Behandlung der *Optik im Bild quasimechanischer Vorgänge* und die Funktion des *Experiments als Mittel der Beweisführung*. Eine umfassende historische und wissenschaftstheoretische Würdigung dieser Voraussetzungen kann hier nicht gegeben werden. Stattdessen werden schlaglichtartig einige Gesichtspunkte beleuchtet. Wenn historische Bezüge hergestellt werden, so nur zu dem Zweck, wesentliche Aspekte des erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Selbstverständnisses der physikalischen Optik sichtbar werden zu lassen, die auch heute noch von Bedeutung sind. Von didaktischem Interesse ist, welche Konsequenzen sich aus diesen Voraussetzungen für das Verständnis ergeben, das Schüler am Vorgehen der physikalischen Optik über Bedingungen der Möglichkeit von Naturerkenntnis entwickeln. In einem Ausblick auf solche Konsequenzen werden didaktische Aspekte einer *Optik ohne Auge* bedacht.

3.1 Optik im Bild quasimechanischer Vorgänge

Das Ziel der physikalischen Optik, die in den Arbeiten von DESCARTES, HUYGENS und NEWTON entworfen und in Ansätzen ausgeführt wird, ist die Ausbildung einer Lichttheorie, die gestattet, den gesamten Komplex der optischen Erscheinungen „aus einer einheitlichen Vorstellung von dem Wesen des Lichtvorganges abzuleiten“ (König 1928, S. 141). Die vornehmste Aufgabe des Naturforschers wird darin gesehen, die *sichtbaren Erscheinungen als Wirkungen mechanischer Ursachen* zu betrachten. So heißt es im Untertitel des *Traité de la lumière* von HUYGENS: „Worin die Ursachen der Vorgänge bei seiner Zurückwerfung und Brechung und besonders bei der eigentümlichen Brechung des Isländischen Spates dargelegt sind.“ Zwar beginnt HUYGENS das erste Kapitel seiner Abhandlung mit dem Bekenntnis zur Optik als *Erfahrungswissenschaft*: „Die Beweisführungen der Optik gründen sich [...] auf Wahrheiten, welche aus der Erfahrung abgeleitet sind“. Vier Absätze weiter wird jedoch deutlich, dass der Weg von den optischen Erscheinungen zu einer mechanischen Theorie derselben nicht ohne Mutmaßungen und Hypothesen auskommt:

„Man wird nicht zweifeln können, dass das Licht in der Bewegung einer gewissen Materie besteht. Denn betrachtet man seine Erzeugung, so findet man, dass hier auf der Erde hauptsächlich das Feuer und die Flamme dasselbe erzeugen, welche ohne Zweifel rasch bewegliche Körper enthalten, [...]: dies deutet sicherlich auf Bewegung hin, wenigstens in der wahren Philosophie, in welcher man die Ursachen aller natürlicher Wirkungen auf mechanische Gründe zurückführt. Dies muss man meiner Ansicht nach tun, oder völlig auf jede Hoffnung verzichten, jemals in der Physik etwas zu begreifen“ (Huygens 1996, S. 9f).

Leitend für die Entwicklung seiner Lichttheorie wurde für HUYGENS die Analogie zur Schallausbreitung einerseits und die Kenntnis der Stoßgesetze andererseits. Dass die Einheitlichkeit der Beschreibung nur durch die Reduzierung der optischen Erscheinungen auf einen mechanischen Bewegungsvorgang erlangt werden konnte, dem keine Beobachtungstatsache mehr entsprach und der deshalb als Hypothese postuliert werden musste, stellte für HUYGENS kein Hindernis dar.⁹ Wenn man seiner Gedankenführung folgt, stellt man vielmehr fest, dass gerade die Brillanz seines Vorgehens darin bestand, das Licht als hypothetisches Konstrukt mit denjenigen mechanischen Eigenschaften auszustatten, derer er bedurfte, um verschiedene Typen der Wechselwirkung von Licht mit Materie (Brechung, Reflexion) als Wirkungen dieser Eigenschaften deuten zu können (vgl. Grebe-Ellis 2006). Mit dem Ziel, das mechanisch-geometrische Kalkül auf den Bereich der Optik zu übertragen, gibt Huygens ein Musterbeispiel des Cartesischen

⁹ Verschiedene Ausführungen NEWTONS in seiner *Optik* aber auch in den *Principia* belegen, dass er sich des Problems der Hypothesenkonstruktion im Kontext einer „experimentellen Philosophie“, wie die Physik zu seiner Zeit genannt wurde, sehr viel deutlicher bewusst war, als dies bei HUYGENS der Fall gewesen zu sein scheint. So heißt es im Scholium Generale, womit die *Principia* schließen, hinsichtlich der Frage nach den Ursachen der Schwere: „Die Ursache dieser Eigenschaften der Schwere habe ich aber noch nicht aus den Erscheinungen ableiten können, und Hypothesen ersinne ich nicht. Was nämlich nicht aus den Erscheinungen abgeleitet wird, muss Hypothese genannt werden, und Hypothesen, seien es metaphysische oder physikalische, solche, die mit okkulten Eigenschaften arbeiten oder mechanische, gehören nicht in die experimentelle Philosophie. In dieser Philosophie werden Propositionen aus Erscheinungen abgeleitet und durch Induktion verallgemeinert“ (Newton 1999, S. 516). Dieser Grundsatz wird auch der *Optik* vorangestellt. Im ersten Satz des ersten Buchs der *Optik* heißt es: „Es ist nicht meine Absicht, in diesem Buche die Eigenschaften des Lichts durch Hypothesen zu erklären, sondern nur, sie anzugeben und durch Rechnung und Experiment zu bestätigen“ (Newton 1996, S. 5). Wie streng allerdings NEWTON diesem Grundsatz tatsächlich Folge geleistet hat, wurde u.a. von ROSENBERGER und DIJKSTERHUIS kritisch untersucht. Sie weisen nach, wovon man sich durch einen Blick in das Anfangskapitel und insbesondere in die „Queries“ am Schluss der *Optik* selbst überzeugen kann: Dass NEWTON den angegebenen Standpunkt (*Hypotheses non fingo*) keineswegs konsequent durchführte, im Gegenteil. Sein tatsächliches Bestreben schien gerade nicht auf breite Empirie bzw. auf die Formulierung funktionaler Zusammenhänge (Propositionen) gerichtet zu sein, die sich ausschließlich auf gesicherte Beobachtungen stützten. Zum „Beweis“ seiner in Form von Lehrsätzen ausgesprochenen Annahmen über die korpuskularen Eigenschaften des Lichts begnügte er sich mit der Präparation einiger weniger, im Falle des *experimentum crucis* nicht einmal besonders repräsentativer Versuche, und in den „Queries“ ergeht er sich in Mutmaßungen über das Wesen des Lichts, die sich jeder experimentellen Kontrolle entziehen (Rosenberger 1978; Dijksterhuis 1956, S. 541ff; Steinle & Ribe 2002, S. 46f).

Wissenschaftsprogramms: Erst durch die Reduzierung der optischen Phänomene auf die primären Qualitäten: räumliche Gestalt, Lage und Bewegungsmodus, werden sie zum geometrisch beherrschbaren, wissenschaftlichen Phänomen erhoben.¹⁰ Die Eingliederung der Lichttheorie in eine optische, elektrische und magnetische Erscheinungen übergreifende Strahlungstheorie durch Maxwell stellt eine weitere Vereinheitlichung dar: die physikalische Optik wird Teil der elektromagnetischen Strahlungstheorie. Die Grundvorstellung von Licht als einem hypothetischen, quasimechanisch vermittelten Bewegungsvorgang zwischen Sender und Empfänger, unabhängig davon, ob dieser Vorgang als Wellenbewegung oder als Teilchenstrom gedacht wird, bleibt im Rahmen der Maxwellschen Theorie erhalten.

3.2 Metaphysischer Realismus und Physik

Damit ist ein Wesenszug der physikalischen Optik als „Optik im Bild quasimechanischer Vorgänge“ skizziert, der bis heute in der Vorstellungsbildung und Ausdrucksweise über optische Grundtatsachen wirksam ist. Das zeigt ein Blick in gängige Lehrbücher und in Lehrpläne. Das zeigt ferner eine Besinnung auf die Sprache, in der man gewohnt ist, auch und gerade die einfachsten optischen Erscheinungszusammenhänge durch mechanische Termini, d.h. *als* quasimechanische Probleme zu beschreiben. Die Rede von einem den Raum mit unvorstellbarer

¹⁰ Zugleich ist damit am Beispiel der Optik das naturwissenschaftliche Programm gekennzeichnet, dem KANT die erkenntnistheoretische Grundlage geschaffen hat. Wie die Bedingungen der Möglichkeit von naturwissenschaftlicher Erkenntnis zu denken sind und demnach das Verhältnis zwischen dem Subjekt und dem Objekt der Erkenntnis aufzufassen ist, wird in seiner Vorrede zur zweiten Auflage der *Kritik der reinen Vernunft* in das Bild von der Natur im Zeugenstand gebracht. Der entsprechende Absatz wird hier wiedergegeben, weil im Folgenden darauf Bezug genommen wird. Es werden darin Aspekte eines naturwissenschaftlichen Selbstverständnisses ins Bild gebracht, die bis heute zu den zentralen Voraussetzungen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung gerechnet werden.. KANT: „Die Vernunft muss mit ihren Prinzipien, nach denen allein übereinstimmende Erscheinungen für Gesetze gelten können, in einer Hand und mit dem Experiment, das sie nach jenen ausdachte, in der anderen an die Natur gehen, zwar um von ihr belehrt zu werden, nicht aber in der Qualität eines Schülers, der sich alles vorsagen lässt, was der Lehrer will, sondern eines bestellten Richters, der die Zeugen nötigt auf die Fragen zu antworten, die er ihnen vorlegt. Und so hat sogar die Physik die so vorteilhafte Revolution ihrer Denkart lediglich dem Einfalle zu verdanken, demjenigen, was die Vernunft selbst in die Natur hineinlegt, gemäß dasjenige in ihr zu suchen (nicht ihr anzudichten), was sie von dieser lernen muss, und wovon sie für sich selbst nichts wissen würde“ (Kant 1787, S. 14f).

Geschwindigkeit durcheilenden Licht („Wie lange ist das Licht von der Sonne bis zur Erde ‹unterwegs›?“), das von einer Lichtquelle emittiert, unterwegs gestreut, gebeugt, gebrochen, reflektiert, polarisiert und schließlich irgendwo absorbiert wird, ganz gleich, ob im Einzelnen elektromagnetischen Wellen oder von Photonen gesprochen wird, gehört zum selbstverständlichen Vokabular in der Optik. Dass man dabei im Unterschied zu anderen Bereichen der Physik keine beobachtbaren Tatsachen beschreibt, sondern Begriffe benutzt, die ursprünglich im Bereich der Mechanik (Wellen- und Stoßmechanik) bzw. Elektrodynamik (Signalübertragung zwischen Sender und Empfänger) gebildet werden und die im Analogieschluss auf die Optik zu hypothetischen bzw. metaphysischen Konstruktionen werden, macht man sich in der Regel nicht mehr bewusst.

Dabei hat gerade die konsequente Anwendung des quasimechanischen Lichtbegriffs in der modernen Physik durch seinen metaphysischen Charakter zu schwerwiegenden Widersprüchen und schließlich zu seiner Preisgabe geführt. Ausgerechnet Planck, dessen Werk für diese Entwicklung bahnbrechend werden sollte, hat den metaphysischen Charakter der klassischen Optik und die scheinbare Widersprüchlichkeit einer „Optik ohne Auge“ als Voraussetzungen ihrer Wissenschaftlichkeit mehrfach deutlich hervorgehoben und gerechtfertigt. So heißt es z.B. in einem Vortrag PLANCKS von 1919 *Über das Wesen des Lichts*:

„Die erste Aufgabe der physikalischen Optik, die Vorbedingung für die Möglichkeit einer rein physikalischen Theorie des Lichtes, ist die Zerlegung des ganzen Komplexes von Vorgängen, die mit einer Lichtwahrnehmung verbunden sind, in einen objektiven und einen subjektiven Teil. Der erstere bezieht sich auf diejenigen Vorgänge, welche außerhalb und unabhängig von dem empfindenden Organ, dem sehenden Auge, verlaufen – diese, die so genannten Lichtstrahlen, sind es, welche die Domäne der physikalischen Forschung bilden. [...] Wenn auch der Name der Einfachheit beibehalten worden ist, so hat doch die physikalische Lehre vom Licht oder die Optik, in ihrer vollen Allgemeinheit genommen, mit dem menschlichen Auge so wenig zu tun, wie etwa die Lehre von den Pendelschwingungen mit der Tonempfindung...“ (Planck 1990, S. 66).

In Abgrenzung gegenüber dem Positivismus MACHS, aber auch gegenüber FARADAY und GOETHE, die auf unterschiedlichen Wegen den metaphysischen Charakter der klassischen Physik als Makel empfanden und eine streng auf beobachtbaren Tatsachen aufgebaute, hypothesenfreie Naturwissenschaft forderten, erläutert PLANCK 1930 in einem Vortrag über *Positivismus und reala Außenwelt*, worin für die Physik der notwendige Schritt in die Metaphysik besteht, um zur Naturwissenschaft zu werden:

„Die Grundlage, die der Positivismus der Physik gibt, ist zwar fest fundiert, aber sie ist zu schmal, sie muss durch einen Zusatz erweitert werden, dessen Bedeutung darin besteht, dass die Wissenschaft nach Möglichkeit befreit wird von den Zufälligkeiten, die durch die Bezugnahme auf einzelne menschliche Individuen in sie hineingebracht werden. Und das geschieht durch einen

prinzipiellen, [...] durch die gesunde Vernunft gebotenen Schritt ins Metaphysische, nämlich durch die Hypothese, dass unsere Erlebnisse nicht selber die physikalische Welt ausmachen, dass sie vielmehr uns nur Kunde geben von einer anderen Welt, die hinter ihnen steht und die unabhängig von uns ist, mit anderen Worten, dass eine reale Außen Welt existiert. [...] Die beiden Sätze: «Es gibt eine reale, von uns unabhängige Außenwelt», und: «Die reale Außenwelt ist nicht unmittelbar erkennbar», bilden zusammen den Angelpunkt der ganzen physikalischen Wissenschaft. [...] Das Ziel ist metaphysischer Art, es liegt hinter jeglicher Erfahrung“ (Planck 1990, S. 126).

Der hiermit von PLANCK charakterisierte Typus von Naturwissenschaft ist vielfach, insbesondere aber auch aus der Physik des ausgehenden 19. und des 20. Jahrhunderts heraus Gegenstand kritischer und selbstkritischer Überlegungen geworden. In der antimetaphysischen Perspektive des Positivismus nach MACH, wie sie VON WEIZSÄCKER in einer Studie über *Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants* darstellt, ist es

„ein Missbrauch der Worte, den Begriff «wirklich» auf eine hypothetische, jenseits jeder möglichen Erfahrung liegende Welt anzuwenden und damit erst den Sinnesempfindungen den abwertenden Charakter des «bloßen Scheins» zu geben. [...] Der metaphysische Realismus [der klassischen Physik], der behauptet, hinter den Sinnesempfindungen stehe eine wirkliche Welt, ist grundsätzlich weder beweisbar noch widerlegbar, da er das einzige Beweismittel, das er besitzt, die Erfahrung, nicht als Beweismittel gelten lässt“ (von Weizsäcker 1941, S. 95).

Der Wandel, den die bekanntermaßen zunächst scharf ablehnende Haltung von HELMHOLTZ dem „bloß beobachtenden“ Wissenschaftsansatz GOETHE gegenüber im Laufe von drei Jahrzehnten durchlaufen hat, gibt ein lehrreiches Beispiel dafür, wie mit der zunehmenden Bereitschaft, den hypothetischen bzw. metaphysischen Charakter der klassischen Physik als Problem anzuerkennen, die Voraussetzung für eine ernsthafte Würdigung eines Wissenschaftsansatzes entstand, den HELMHOLTZ in dem methodischen Vorgehen Goethes, aber auch bei FARADAY, KIRCHHOFF und Alexander VON HUMBOLDT repräsentiert sah.¹¹

3.3 Besinnung auf die Observablen

Bemerkenswert für den Zusammenhang einer Phänomenologie der Polarisation ist die Tatsache, dass sich der hypothetische Charakter der klassischen Optik innerhalb ihrer Entwicklung bereits zu einem Zeitpunkt als Hindernis erwies, der ihrer Identifikation als Teil der Strahlungstheorie durch MAXWELL noch vorausging, und dass der Anlass für die auftretende Schwierigkeit mit den Versuchen FRESNELS verbunden war, den Einfluss der

¹¹ Auf den bemerkenswerten, jedoch weitgehend unbeachtet gebliebenen Wandel im Urteil von HELMHOLTZ über GOETHE hat STEINLE aufmerksam gemacht (Steinle 2002a, S. 156).

Polarisationseigenschaften der Lichtquelle in den von YOUNG durchgeführten Interferenzexperimenten zu bestimmen (Nachweis der Transversalität des Lichtwellenfeldes). COLLETT hat darauf hingewiesen, wie sich für FRESNEL bei dem Versuch, eine mathematische Formulierung seiner vier Interferenzgesetze zu finden, die überraschende Situation ergab, dass ihm dies nur für denjenigen Teil seiner Versuche gelang, bei dem er von einer vollständig polarisierten Lichtquelle ausgehen konnte.

„Fresnel's wave theory was an amplitude description of light and was completely successful in describing completely polarized light, that is, elliptically polarized light and its degenerate states, linearly and circularly polarized light.“ Für die Beschreibung einer teil- bzw. unpolarisierten Lichtquelle hingegen stand ihm im Rahmen der Amplitudendarstellung kein Ausdruck zur Verfügung. „It appeared that unpolarized light, as well as so-called partially polarized light, could not be described within the framework of the wave theory of light, which would be a crisis indeed“ (Collett 1993, S. xiv).

Damit war vielleicht zum erstenmal und gewissermaßen aus der physikalischen Optik selbst heraus ihr hypothetischer Charakter in Frage gestellt. Und zugleich war damit ein Problem berührt, dessen Tragweite erst im Zusammenhang mit der grundsätzlichen Frage nach den Bedingungen der prinzipiellen Beobachtbarkeit physikalischer Größen im Rahmen der Quantentheorie sichtbar wurde, d.h. mit der Frage, welche der physikalischen Größen prinzipiell hypothetisch, d.h. unbeobachtbar und welche tatsächlich Observablen sind (Heisenberg 1925, S. 879; von Weizsäcker 1941, S. 83ff).

„Classical optics is not based on empirical laws but on a hypothesis, i.e., the wave theory. Since electric and magnetic fields of a light beam, its frequency and phase are *unobservable quantities*, the wave theory is not a logical foundation of optics“ (Mueller 1948, S. 661).

Diese Feststellung wurde in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zum Ausgangspunkt für verschiedene Versuche, das quantenmechanische Konzept der mathematischen Beschreibung eines Systems durch die Beschreibung seiner beobachtbaren Zustände auf die Optik zu übertragen (Mueller 1948; Parke 1948; Jones 1941).¹² Auf eine Objektivierung von quasimechanischen Vorgängen mit ‹Licht› im Sinne einer ontologischen Fixierung unabhängig von den Bedingungen der Beobachtbarkeit, die für den naiven Realismus der klassischen Optik gerade kennzeichnend gewesen war, kann in diesem Zusammenhang verzichtet werden. Als entscheidend für den von MUELLER & PARKE entwickelten Ansatz einer „Phänomenologischen Theorie der Optik“ („Matrix optics“) sollte sich ein Ansatz erweisen, den STOKES im Jahre 1852, also bereits 35 Jahre nach der Entdeckung des

¹² Vgl. die umfassenden und durch zahlreiche Originalarbeiten belegten Darstellungen dieser Entwicklung von SHURCLIFF (1962), COLLETT (1993) und BROUSSEAU (1998).

beschriebenen Problems durch FRESNEL mit seiner Arbeit *On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources* vorgelegt hatte (Stokes 1852). STOKES hatte sich darin die mathematische Beschreibung unpolarisierter bzw. teilpolarisierter Lichtbündel zum Ziel gesetzt. Dies war ihm durch die Einführung von vier Parametern gelungen, die als lineare Funktionen der Intensität der jeweils untersuchten Lichtquelle echte Observablen waren.¹³ In der Regel werden bei der Ableitung der Stokes-Parameter Erwartungswerte des elektrischen Feldes zugrunde gelegt (Collett 1993, Brosseau 1998).

Eine streng *operationale* Definition, die sich ausschließlich auf geordnete Beobachtungshandlungen bzw. Differenzmessungen stützt und bei der auf eine im Prinzip mögliche formale Beziehung zur Wellenmathematik verzichtet wird, ist in (Grebe-Ellis 2005, S. 219-244) als Ausblick skizziert.

3.4 Das Experiment als Mittel der Beweisführung

Was Experimente sind und welche Stellung dem experimentierenden Handeln unter den erkenntnistheoretischen Voraussetzungen zukommt, die im letzten Abschnitt skizziert wurden, kann am besten an Beispielen experimentellen Vorgehens selbst abgelesen werden. Dabei ist es zweckmäßig, die Beispiele aus dem Zusammenhang der für die Polarisation bedeutsamen Entwicklungen zu wählen. Auch hier werden indessen historische Bezüge nur hergestellt, um an ihnen einen in der physikalischen Optik besonders ausgeprägten *Typus experimentierenden Arbeitens* sichtbar werden zu lassen, insofern dieser auch heute das Selbstverständnis theoriegeleiteten Experimentierens in der physikalischen Optik bestimmt.¹⁴

Bei HUYGENS ist das Experiment ein Verfahren, in dem die theoretische Ableitbarkeit experimentell fixierter Effekte aus vorher formulierten

¹³ Diese *experimentelle Definition* des Polarisationszustandes einer Lichtquelle war aber lange unbeachtet und unerkannt geblieben. Mitte des 19. Jahrhunderts hatte die Erfolgsgeschichte der Wellentheorie mit YOUNG und FRESNEL erst an ihrem Beginn gestanden, nachdem die Ideen von HUYGENS unter dem Gewicht des NEWTONSCHEN Dogmas über hundert Jahre hinweg nur wenige Anhänger gefunden hatten. Wiederentdeckt wurde der Ansatz von STOKES in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts von S. CHANDRASEKHAR (1960, S. 24ff). Die Arbeit mit Stokes-Parametern hat seither in verschiedensten Zweigen der Physik weite Verbreitung und Weiterentwicklung gefunden (Walker 1954; Azzam & Bashara 1987; Collett 1993; Brosseau 1998).

¹⁴ Zur Charakterisierung verschiedener Typen experimentellen Arbeitens mit besonderer Rücksicht auf den Unterschied zwischen einem eher theoriegeleiteten und einem mehr auf breite Empirie und funktionale Zusammenhänge beobachtbarer Größen ausgelegten Stil „explorativen Experimentierens“ siehe die Arbeiten von STEINLE bzw. STEINLE & RIBE (2002a,b; 2004; 2002).

Annahmen (Hypothesen) überprüft bzw. nachgewiesen wird. Besonders deutlich tritt dies in seinen Untersuchungen zur Doppelbrechung hervor, die im 5. Kapitel seiner „Abhandlung über das Licht“ beschrieben sind (Huygens 1690, S. 49). Er knüpft in diesem Kapitel an die Vorarbeiten von BARTHOLINUS an, dem die Entdeckung der Doppelbrechung verdankt wird. HUYGENS macht jedoch deutlich, dass er sich mit dem methodischen Vorgehen, das er bei BARTHOLINUS vorfindet, nicht zufrieden geben kann. BARTHOLINUS teilt eine Entdeckung mit. Er gibt ein Beispiel vorurteilsfreier Empirie, indem er die Erscheinungen am Doppelspat in ihren gegenseitigen Bezügen untersucht, zusammenstellt und dabei auf eine mechanistische Erklärung verzichtet.¹⁵ Die Frage nach «Erklärungen» im Sinne eines Rückbezuges seiner Beobachtungen auf hinter den Erscheinungen liegende Ursachen spielt bei ihm eine untergeordnete Rolle. Er verzichtet sogar weitgehend darauf, seine Beobachtungen von vornherein auf die abgelöste Perspektive der Seitenansicht zu beziehen. Stattdessen beschreibt er unmittelbar die Ansichten, die sich ihm im Durchblick durch den Doppelspat unter verschiedenen Bedingungen ergeben und spricht von *Bildern* und *Bildverdopplung*, wo HUYGENS von *Strahlenverläufen* und *Strahlteilung* spricht.

HUYGENS Ansatz ist ein ganz anderer. Ihm geht es nicht um die Erscheinungen als solche, schon gar nicht um breite Empirie. Diese kann in seinen Augen nur wiederholen und variieren, was schon der Einzelfall zeigt, und dabei stehen bleiben hieße, auf eine Erklärung zu verzichten, die nur durch die Angabe einer mechanischen Ursache gegeben werden kann. Diese zu ersinnen, so dass eine möglichst große Anzahl verschiedener Erscheinungen daraus folgerichtig ableitbar und sogar vorhersagbar wird, darin besteht sein Erkenntnisziel, und das Mittel zur Prüfung der Richtigkeit seiner Annahmen ist das Experiment. Unter Umständen genügt dazu schon ein einziger Versuch, ein *experimentum crucis*, wie es von NEWTON für den Nachweis der Spektralzerlegung des Lichts angegeben wurde.¹⁶ Die Kunst in der Herstellung eines solchen experimentellen Beweises besteht darin, die Versuchsbedingungen so einzurichten, dass die Ergebnisse als Wirkungen der angenommenen Lichtwellenvorgänge betrachtet und im Rahmen der Wellentheorie geometrisch beschrieben werden können.¹⁷

¹⁵ Im Lichte der Gesichtspunkte, die von STEINLE für einen „explorativen“ Stil experimentellen Arbeitens angegeben werden, können die *Versuche mit dem doppelbrechenden isländischen Kristall* von BARTHOLINUS als weiteres Beispiel „explorativen Experimentierens“ betrachtet werden.

¹⁶ *Optik*, Erstes Buch, Teil 1, 6. Versuch (Newton 1996, S. 31).

¹⁷ Der Einwand, dass schon geringfügige Variationen der geometrischen Bedingungen (Blendengröße, Abstände zwischen Blende Prisma und Schirm) in diesem *experimentum crucis* die theoretischen Schlussfolgerung, die Newton zu

Dementsprechend enthalten die Erörterungen von HUYGENS kaum Beschreibungen von unmittelbar nachvollziehbaren Beobachtungen. In den meisten Darstellungen sind die Beobachtungen bereits auf den Verlauf von ausgezeichneten Lichtstrahlen bzw. die Lage von kugelförmigen und sphäroidischen Wellenfronten bezogen und gehen unmittelbar in geometrische Überlegungen über, die aus den theoretischen Annahmen folgen. Die einzige Beschreibung direkter Ansichten des Doppelspats gibt HUYGENS für eine Erscheinung, die sich seiner Meinung nach aus den beiden unterschiedlichen Brechungsverhältnissen am Kalkspat ergeben müsste. Es handelt sich also zugleich um ein Beispiel für die *theoriegestützte Voraussage eines Effektes*. Allerdings lässt sich dieser Effekt in der Beobachtung nicht nachvollziehen; er steht darüber hinaus im Widerspruch zu anderen Beobachtungen, die bei BARTHOLINUS beschrieben sind.¹⁸

HUYGENS Interesse galt nicht der Entdeckung des BARTHOLINUS als solcher. Im Sinne des letzteren verlangten die Versuche am Spat eine Verbreiterung in Bereiche verwandter Phänomene: Welche Mineralien zeigten die Doppelbrechung noch und in welchen Modifikationen? Die Kriterien, nach denen eine solche Empirie zu leiten gewesen wäre, ergeben sich aus einer genauen Durchmusterung der Phänomene selbst, aus den in ihrem Erscheinen selbst zutage tretenden Ordnungen und Symmetrieeigenschaften: So stellt sich z.B. vor dem Hintergrund der Vertauschbarkeit der Eigenschaften von ordentlichem und außerordentlichem Doppelbild durch eine Änderung der Betrachtungsrichtung die Frage, ob es Mineralien gibt, welche diese Vertauschbarkeit in umgekehrter Richtung, also gewissermaßen gespiegelt, aufweisen. Dies hätte auf eine Unterscheidung der Mineralien geführt, der heute durch die Vorzeicheneigenschaft der Doppelbrechung Rechnung getragen wird.

Der Grund für HUYGENS, sich der Doppelbrechung zuzuwenden, war ein ganz anderer. Ihn trieb die Sorge, dass die Erklärungsmächtigkeit seiner Wellentheorie, die sich zuvor in der Aufklärung von Brechung und Reflexion

ziehen wünschte, nicht mehr ohne weiteres zuließ, ist vielfach erhoben worden, so etwa von Anthony LUCAS, einem frühen Kritiker NEWTONS. Dieser entgegnete knapp, dass man sich auf das *experimentum crucis* beschränken solle: Wozu viele Versuche anstellen, wenn dieser eine den Beweis gestatte? (Newton 1958, S. 174).

¹⁸ In §39 folgert HUYGENS aus der Verschiedenheit der Brechungsverhältnisse eine „eigentümliche Wirkung des Kristalls“, die darin bestehen soll, dass der sichtbare Höhenunterschied zwischen den Doppelbildern eines Schriftzugs davon abhängig sei, wie die Beobachtungsebene zum Hauptschnitt des Spats liegt (Huygens 1996, S. 70). Daraus müsste man folgern können, dass sich eines der Doppelbilder unter Drehungen des Spats *hebt* bzw. *senkt*. Dies ist nicht der Fall. Eine solche Beobachtung stünde ferner im Widerspruch zu allen anderen Beobachtungen, die in diesem Zusammenhang gemacht werden können (vgl. Grebe-Ellis 2005, S. 99)).

als so erfolgreich erwiesen hatte, durch die Doppelbrechung in Frage gestellt sein könnte. „Ich war gewissermaßen sogar gezwungen, diese Untersuchung anzustellen, weil die Brechungen in diesem Kristall meine vorstehende Erklärung der regelmäßigen Brechung umzustürzen schienen“ (Huygens 1996, S. 49). Und darin bestand denn auch seine eigentliche, für den Typus theoriegeleiteten Experimentierens beispielhafte Leistung: seinen bisherigen Erklärungsansatz durch zusätzliche Annahmen (zwei unterschiedliche Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts, kugelförmige *und sphäroidische* Wellen) so zu modifizieren, dass dieser seine für die Brechung und Reflexion bewiesene Gültigkeit behielt und darüber hinaus die Folgerungen von Vorgängen gestattete, in denen die Ursache für die „außergewöhnliche Brechung“ des Spats gesehen werden konnte. In ähnlicher Weise gelang es zu Beginn des 19. Jahrhunderts YOUNG und FRESNEL, das Verschwinden der Interferenzerscheinungen bei Überlagerung orthogonal polarisierter Lichtbündel durch die Annahme *transversaler* Lichtwellen zu erklären. Diese und verwandte Versuche zur „Polarisation des Lichts“ werden bis heute als besonders schlagende experimentelle Beweise für die Wellennatur des Lichtes angesehen und stellen deshalb herausragende Beispiele für den Typus theoriegeleiteten Experimentierens dar.

Der Typus des theoriegeleiteten Experimentierens ist im Lauf der Geschichte mehr oder weniger zum Standard physikalischer Erkenntnisgewinnung geworden. Er hat als „Fortsetzung des Theoretisierens mit anderen Mitteln“ durch die Wissenschaftstheorie des 20. Jahrhunderts vor anderen, im Sinne STEINLES eher „explorativen“ Vorgehensweisen, eine deutliche Favorisierung erfahren (Popper 1959). Erst neuere Untersuchungen, für die hier stellvertretend die Arbeiten STEINLES zu Formen „Explorativen Experimentierens“ bei DUFAY, GOETHE, FARADAY, OERSTED u.a. genannt seien, haben gezeigt, dass sich einer differenzierteren Sicht Typen nicht theoriegeleiteter Arbeitsweisen erschließen, die bisher der Aufmerksamkeit weitgehend entgangen sind (Steinle 2002b).

4. Vom Sehen absehen – „Optik ohne Auge“ als Problem der Didaktik

4.1 Worum geht es?

Im Folgenden wird der Versuch gemacht, einige didaktisch relevante Konsequenzen zu bedenken, die sich aus einer *Behandlung der Optik in mechanischen Bildern* und einer *theoriegeleiteten Experimentierpraxis* in dem oben angedeuteten Sinne für den Naturzugang von Schülern auf dem Weg des Optikunterrichts ergeben. In welchem Sinne das gemeint ist, wird an einem Beispiel verdeutlicht. Zunächst soll jedoch ausdrücklich hervorgehoben werden, dass durch die im Folgenden zuweilen kritische

Erörterung die Berechtigung und historische Folgerichtigkeit der physikalischen Optik als solcher keineswegs in Zweifel gezogen wird. Kritik könnte allenfalls da ansetzen, wo aus dem Selbstverständnis der physikalischen Optik heraus anders orientierten, aber darum nicht weniger systematischen bzw. wissenschaftlichen Zugängen zu den Erscheinungen des Sehfeldes die Berechtigung abgesprochen wird, nur weil sie sich nicht dem Dogma des Reduktionismus unterwerfen (Planck 1990).

Stattdessen geht es hier darum, zu fragen, wie sich die erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Voraussetzungen der physikalischen Optik beim *Erlernen* derselben geltend machen: Inwiefern führen gerade Gütemerkmale der physikalischen Optik: die Abstraktion vom Auge, vom Beobachter überhaupt sowie der hypothetische Charakter von Erklärungen etc. zu spezifisch didaktischen Problemen? Im Anschluss an ein Beispiel, in dem die hiermit angestrebte Blickrichtung verdeutlicht wird, werden besonders kennzeichnenden Merkmalen der physikalischen Optik verschiedene kritische Positionen gegenübergestellt, die das Problemfeld beleuchten. Abschließend wird an einem Beispiel aus der aktuellen Debatte über neue Bildungsstandards gezeigt, inwiefern mit einer Berücksichtigung der aufgezeigten Probleme bei Neuformulierungen des paradigmatischen Rahmens für den Physikunterricht gerechnet werden kann.

Jeder Optikunterricht handelt zunächst von Optik. Indessen wird den Schülern durch die Art, *wie* dies geschieht, d.h. durch die Sprache, durch die Form der Urteile und die Rolle, die Experimente spielen können, kurz: durch den ganzen implizit mitgelieferten paradigmatischen Zusammenhang, in dem sich der Lehrer mehr oder weniger bewusst bewegt, zugleich ein ganz bestimmter Weltzugang nahegelegt. Solches geschieht bereits mit der gerne gestellten Frage <was ist Licht?>, mit der immer wieder interessante Diskussionen in Gang gebracht werden, durch deren *Form* aber zugleich implizit mitgeteilt wird, dass es sich bei Licht um etwas handelt, demgegenüber es Sinn macht, von einem <Was>, also einem Ding zu sprechen.

Dass im Stellen dieser Frage bereits das entscheidende Urteil liegt, zeigt sich in der Regel aber erst später – durch die Probleme, zu denen naiv-realistisch aufgefasste Lichtmodelle spätestens in der Quantenphysik führen (von Mackensen 1990; Bader 1996; 2000). Zunächst schafft man sich mit dem Stellen dieser Frage die Legitimation, Licht als klassisches Objekt einzuführen und es nach und nach mit Eigenschaften auszustatten, auch wenn sich all das, von dem dann die Rede ist, der unmittelbaren Beobachtung der Schüler entzieht. Sie sehen keine Strahlbrechung, sondern abknickende Schattenkanten und gehobene Ansichten, sie sehen keine Überlagerung von Elementarwellen, sondern Strahlenkränze und vervielfachte Ansichten kleiner kontrastreicher Leuchten; sie sehen keine Reflexion als Zurückgeworfenwerden von Licht, sondern sie blicken durch den Spiegel wie

durch ein Fenster in einen Spiegelraum, der dem vor dem Spiegel gelegenen Raum *optisch* völlig gleichwertig ist; sie sehen keine Lichtausbreitung, sondern sie sehen, dass es hell ist, und wie hell es ist, hängt von der Leuchtstärke und der gesehenen Größe der Leuchte ab etc. – Die Konditionierung der Schüler auf den Verzicht, sich das, wovon die Rede ist, durch eigene Beobachtungen erschließen zu können („subjektive Beobachtungen sind täuschungsbehaftet“) und auf die Bereitschaft, anstelle dessen den Beweis für die Richtigkeit der Hypothesen von mehr oder weniger geglückten Experimenten entgegenzunehmen, stellt ein weiteres Beispiel dafür dar, wie Schüler durch den in Sprache, Urteilsform und Experimentgebrauch implizit anwesenden paradigmatischen Kontext des Lehrers wirksam auf einen bestimmten Modus von Weltzugang (hier: metaphysischer Realismus) festgelegt werden, ohne dass dieser Modus selbst thematisiert würde.¹⁹

Um die Wendung, die mit dem Anliegen der phänomenologischen Optik verbunden ist, an dieser Stelle vorwegzunehmen: Wie könnte die Frage <Was ist Licht?> so abgewandelt werden, dass sie ihren impliziten Vorurteilscharakter verliert? Wenn man fragt <Was *sehen* wir?> und <Welche sind die *Bedingungen unseres Sehens*?>, wird das Urteil über den <Was>-Charakter des Lichtes offen gehalten. Zugleich wird der Blick auf Erscheinungen gelenkt, die <wir> sehen, d.h. <wir> kommen vor! – es wird mit der subjektiven Erfahrungs- und Beobachtungsfähigkeit der Schüler gerechnet und ihnen gestattet, sich selbst als Ausgangspunkt eines selbständig gebildeten und verantworteten Erkenntnisurteils ernst zu nehmen.²⁰

Die bekanntlich größten Schwierigkeiten des Physikunterrichts: Fehlen oder Abnahme von Motivation und Interesse bei Schülern, insbesondere aber bei Schülerinnen sind vielfach untersucht worden.²¹ Hinweise auf Probleme, die sich mit der Sprache, mit der Abstraktheit der Inhalte, mit dem Fehlen lebensweltlicher Bezüge oder dem unpersönlichen, instrumentellen Charakter physikalischen Wissens als „Verfügungswissen“ befassen, haben Eingang in neue Unterrichtskonzeptionen gefunden, die sich durch verstärkten

¹⁹ Eine Übersicht über Elementarisierungen der Polarisation in aktuellen Kursstrukturplänen und gängigen Lehrbüchern, die sich durch besonders drastische Analogien zur Mechanik auszeichnen, gibt RIECK in (2003, S. 26ff).

²⁰ Das heißt selbstverständlich nicht, dass Schüler keine Lichtmodelle bzw. reduktionistischen Urteilsformen überhaupt kennen lernen sollen. Es ist aber ein Unterschied, ob dieses Kennenlernen unter pädagogisch-didaktischen Gesichtspunkten geschieht oder in der Art einer unbewussten ideologischen Konditionierung der Schüler durch den Unterricht (Leisner 2005).

²¹ Siehe z.B. (Häußler 1983; 1992; Kubli 1987) und die kritische Analyse dazu in (Muckenfuß 1995).

Alltagsbezug, besondere Berücksichtigung geschlechterspezifischer Kontexte und Interessenlagen, Hervorhebung der historischen, technischen und gesellschaftlichen Bedeutung der Physik auszeichnen.

4.2 Die „unpädagogische Dimension“ der Physik

Der konzeptionelle Handlungsspielraum solcher Versuche, den empirischen Befunden Rechnung zu tragen, ist klar begrenzt: Der Physikunterricht soll Physikunterricht bleiben (Muckenfuß 1995, S. 34f). Was heißt das? Der Unterricht soll im Kern dem paradigmatischen Charakter der Physik Rechnung tragen. Die erlebnisbetonte, alltags- bzw. praxisbezogene Hinführung darf nicht Selbstzweck werden. Sie darf letztlich nicht darüber hinwegtäuschen, dass physikalisches Wissen aus Urteilsformen hervorgeht, die den systematischen und objektiven Charakter der Physik begründen, d.h. aber zugleich: in denen „Natur als Erscheinung“ und der einzelne Mensch mit seinen identitätsstiftenden Bezügen nicht nur nicht vorkommen, sondern programmatisch ausgeschlossen werden. Daraus könnte gefolgert werden, dass diejenigen Probleme, die sich nachweislich aus dem paradigmatischen Charakter der Physik *als solcher* für ihr Erlernen im Unterricht ergeben, von den genannten Lösungsvorschlägen unberührt bleiben. Aufschlussreich ist in diesem Zusammenhang der Hinweis von MUCKENFUß, dass in der Analyse WAGENSCHAINS zur Resistenz des Unterrichts gegen die von ihm zeitlebens angestrebten Änderungen mit Blick auf die „pädagogische Dimension der Physik“ die „schulfachimmanenten Ideologien, die quasi aus dem Verborgenen heraus – aber keineswegs versehentlich – ihre Wirkung entfalten“, unberücksichtigt blieben. (Muckenfuß 1995, S. 89). MUCKENFUß:

„Die Wirkungen hat Wagenschein zwar stets gesehen und bekämpft, aber nicht konstitutiv für das Fach Physik eingeordnet. Er hat sie für die Folgen missverständlicher Naturwissenschaft gehalten, für unerwünschte Nebenwirkungen, deren Ursache keinesfalls in der Physik selbst zu suchen sei. Dies könnte sich als folgenschwerer Irrtum erweisen: Möglicherweise impliziert ja die Physik eine „unpädagogische Dimension“. Dann aber muss der Hebel zur Überwindung negativer pädagogischer Wirkungen auch am Gegenstandsfeld selbst und nicht nur an den Randbedingungen des Lehrens und Lernens angesetzt werden. Schule kann natürlich nicht die Physik verändern. Aber wenn die metaphysischen oder ideologischen Voraussetzungen der Wissenschaft differenziert wahrgenommen, reflektiert und im pädagogischen Prozess gezielt didaktisch bearbeitet werden, besteht möglicherweise mehr Aussicht auf Erfolg, als wenn man darin nur Missverständnisse und Nebenwirkungen sieht“ (Muckenfuß 1995, S. 182).

Zu den Versuchen, dem angedeuteten Problem Rechnung zu tragen, gehört u.a. die Hervorhebung des „Aspektcharakters der Physik“, verbunden allerdings mit dem klaren Bekenntnis: „In der physikalischen Betrachtung wird die phänomenologisch gegebene Wirklichkeit grundsätzlich transzendiert“ (ebd., S. 182).

Das würde aber bedeuten, dass diesen Problemen nur dadurch wirksam begegnet werden kann, dass die Physik selbst eine andere wird – oder diejenigen, die Physik unterrichten, feststellen, dass dies längst der Fall ist, ohne dass sie dies bemerkt haben.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass es gerade dieser paradigmatische Charakter der Physik ist, der im Laufe des 20. Jahrhunderts Gegenstand zahlreicher historisch-erkenntniskritischer, naturphilosophischer und nicht zuletzt aus dem Umfeld der modernen Physik selbst stammender selbstkritischer Studien geworden ist, in denen nachdrücklich auf die Unhaltbarkeit eines subjektfreien Erkenntnisbegriffs hingewiesen und die problematischen Folgen eines auf Beherrschung, Instrumentalisierung und Vernutzung orientierten Denkansatzes für Mensch und Natur gekennzeichnet wurde. (Siehe z.B. (Heisenberg 1947 S. 64f; Heitler 1966; von Weizsäcker 1947, S. 182; 1978, S. 47ff; Chargaff 1991, S. 355ff; Böhme 2002).) VON WEIZSÄCKER kennzeichnet die Grenze zwischen klassischer und moderner Physik hinsichtlich der veränderten Rolle des Subjektes folgendermaßen:

„Für die Gründer der Wissenschaft war die Natur eine vorhandene Wirklichkeit, die der Mensch nur kennen zu lernen braucht. Der Sachverhalt, den der Kantsche Richter ermitteln will, steht vor der Ermittlung <an sich> fest. Das Naturgesetz gibt an, was objektiv, ohne unser Zutun, in der Natur geschieht; es ist ein Gesetz des Seienden. Für uns ist es ein Gesetz des Möglichen. [...] ein Gesetz unserer Fähigkeit, Phänomene hervorzubringen. Auch dieses Gesetz ist objektiv, denn mit bestimmten Mitteln lassen sich auch nur bestimmte Phänomene erzeugen. Aber was hier objektiv geregelt ist, ist nicht mehr ein Sein, sondern ein Wechselspiel von Handeln und Wahrnehmen. Von Objekten dürfen wir nur reden, insofern sie mögliche Objekte eines Subjekts sind. [...] Die metaphysische Hoffnung der klassischen Physiker, durch ihre Wissenschaft den Halt am an sich Seienden zu gewinnen, fällt dahin. Die heutige Physik zwingt den Physiker zur Besinnung auf sich selbst als Subjekt“ (von Weizsäcker 1947, S. 173f).

Die Zerschlagung der „Welt als Erscheinung“ als Voraussetzung ihrer Rekonstruktion in der so genannten „objektiven Erkenntnis“ bei KANT²² spiegelt sich gewissermaßen in der sukzessiven Verödung von Um- und Innenwelt als Begleiterscheinung der naturwissenschaftlich-technischen Zivilisation.

Die in diesem Zusammenhang geltend gemachten Gesichtspunkte für eine kritische und differenziertere Sicht auf das, was physikalische Forschung als experimentelle Wissenschaft war, ist und sein soll, werden im Kontext der Physikdidaktik zwar vereinzelt berücksichtigt (Muckenfuß 1995). In

²² Vgl. das Zitat über die „Natur im Zeugenstand“ aus der Vorrede zur *Kritik der reinen Vernunft*, zitiert in der Fußnote Nr. 10 auf S. Fehler! Textmarke nicht definiert. Vgl. dazu auch die kritischen Anmerkungen BÖHMES zu KANTS Erkenntnistheorie in (Böhme 1993, S. 64f).

didaktische Konzeptionen von Physikunterricht haben sie aber bisher wenig oder keinen Eingang gefunden. Ein Blick in aktuelle Ausarbeitungen zum paradigmatischen Charakter der Physik, wie er zukünftig in der Schule vermittelt werden soll, zeigt, dass das Selbstverständnis des Physikers ausdrücklich im Denkhorizont des 19. Jahrhunderts fortgeschrieben wird (Fischer u.a. 2004, S. 149, 152; s. Zitat unten). Dabei wird vor dem Hintergrund neuerer Untersuchungen zu naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen, deren Relevanz für die Entwicklung der Physik bisher unterschätzt bzw. wenig beachtet wurde, gerade deutlich, dass das Festhalten am Paradigma der klassischen Physik gegenüber der modernen Physik selbst, aber auch gegenüber ihrer eigenen Geschichte eine einseitige Festlegung darstellt, die genau genommen keine überprüfbaren historischen bzw. auf die Praxis physikalischer Forschung bezogenen Referenzen mehr aufweist, sondern selbst ein wissenschaftstheoretisches Konstrukt darstellt (Steinle 2002b).

4.3 Zusammenfassung: Abstraktion vom Sehen – „Optik für Blinde“

Einer kritischen Beleuchtung aus didaktischer Sicht vorausgehend werden hier die wesentlichen erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Momente des klassischen Paradigmas noch einmal schlagwortartig zusammengefasst, soweit sie auch für die physikalische Optik charakteristisch sind: Abstraktion von den sekundären und Reduktion auf die primären Qualitäten: die Ursachen der Erscheinungen sind nicht direkt erkennbar; sie liegen hinter den Erscheinungen verborgen und werden in nur indirekt beweisbaren Vorgängen gesehen, die im Falle der Optik prinzipiell hypothetischer Natur sind. Physikalisch relevant wird eine Größe in dem Maße ihrer Abstrahierbarkeit aus dem Kontext ihres sinnlichen Erscheinens und durch ihre Abbildbarkeit auf von diesem Kontext unabhängige, einheitliche Skalen (Beispiel: Farbe → Wellenlänge) (von Weizsäcker 1941, S. 81). Die Optik als Teilgebiet der Elektrodynamik handelt per Definition von Vorgängen, die außerhalb und unabhängig vom sehenden Auge verlaufen: Die „objektiven Gesetze der Wechselwirkung von Licht und Materie“ werden ausdrücklich unter Ausschluss der menschlichen Sehfähigkeit gewonnen. Diese wird als fehlerbehaftet, täuschungsanfällig und deshalb als ungeeignet angesehen, die Grundlage für eine physikalische Optik abzugeben. Insofern kann diese auch als „Optik ohne Auge“ bezeichnet werden (Planck 1919, S. 66). Experimente dienen der Überprüfung bzw. dem Nachweis theoretischer Annahmen durch geschicktes Isolieren von Effekten. Ziel ist die vollständige apparative Kontrolle solcher

Effekte zur Optimierung der Konvergenz zwischen Modell und empirischen Daten²³.

Was bedeutet dies für den Kontext von Unterricht bzw. wie wirkt der paradigmatische Rahmen der Physik im Falle der physikalischen Optik, wenn er in den Physikunterricht transferiert wird? Schüler lernen, indem sie physikalische Optik lernen, *vom Sehen abzusehen*. Sie lernen eine *Optik für Blinde*. Sie gewöhnen sich an die Vorstellung, dass es für sie einen unmittelbaren, auf ihre eigenes Sehen gestützten Zugang zu den *Gesetzmäßigkeiten* der sich ihnen im Sehfeld zeigenden Erscheinungen nicht gibt. Die konzeptionelle Abwertung der so genannten „subjektiven Wahrnehmung“ im „Modus des Physiktreibens“ (Muckenfuß 1995, S. 112f) als prinzipiell kontingenzbehaftet und der Ausschluss alles dessen, was der Einzelne als *Teilnehmer* an den Erscheinungen des Sehfeldes an Erlebnissen entwickeln könnte, zieht tiefgreifende Verunsicherungen nach sich hinsichtlich der Frage, welchen Sinn die Wahrnehmungs- und Empfindungsnatur des Menschen denn haben soll, wenn diese nur subjektiv verzerrte Bilder einer an sich unerkennbaren Welt vermitteln. Unter der Voraussetzung der Getrenntheit von Subjekt und Objekt als etwas für alles Fragen nach den Bedingungen der Möglichkeit menschlicher Erkenntnis Ursprüngliches macht es auch gar keinen Sinn, eine Schulung der Wahrnehmung überhaupt anzustreben. Die Ausbildung und Pflege des Sehens (die Kunst der genauen Beobachtung) als pädagogische Aufgabe stellt sich nicht. Folgen sind mangelndes Selbstvertrauen, Misstrauen gegenüber dem eigenen Sehen, das unentwickelt bleibt, Fehlen selbst erworbener, sinnlicher Bezüge, die identitätsstiftend wirken.

In der Regel lernen Schüler die Erscheinungen der Optik aus der Perspektive des *externen Beobachters* kennen: bearbeitet werden optische Fragestellungen grundsätzlich in *Seitenansichten*, d.h. „von außen“. Oftmals sind Lehrmittel schon von vornherein so konzipiert, dass sie gar keine andere als die abgelöste Perspektive zulassen.²⁴ Das gilt insbesondere für die

²³ Ein systematischere Reduktionismuskritik, wie sie beispielsweise von MUCKENFUß entwickelt wird, unterscheidet folgende Dimensionen des Reduktionismus: 1. *Spaltung von Subjekt und Objekt*, 2. *Quantifizierung* (Standardisierung und Normierung), 3. *Beherrschung* (von Natur im Gegensatz zu *Naturerkenntnis*), 4. *Entindividualisierung* (Muckenfuß 1995, S. 110).

²⁴ Vgl. die kritische Erörterung zu „Didaktischen Reduktionismen im unterrichtlichen Objektfeld“ von MUCKENFUß in (Muckenfuß 1995, S. 148ff). Dort heißt es u.a. um standardisierten Experiment: „Das künstlich hervorgebrachte physikalische Phänomen in Form eines standardisierten Experiments gehört nicht zur Welt des Naturgegebenen, sondern ist der Theorie über die Natur zuzuschlagen. Wo dies verschleiert wird, entsteht Wissenschaftsgläubigkeit anstelle kritischen Bewusstseins und methodologischer Einsicht“ (ebd., S. 154).

bekanntesten Experimente zur Demonstration optischer Strahlverläufe. Die experimentellen Bedingungen werden so manipuliert, dass die Natur gar nicht anders kann, als sich so zu zeigen, wie man sie sich als externer Beobachter vorstellt. Was im Experiment erscheint, ist demnach gar nicht mehr Naturphänomen, sondern künstlich erzeugter Effekt; darauf wird aber in der Regel nicht hingewiesen. Vielmehr wird gerade die Künstlichkeit des apparativen Arrangements (eng gezogene Blenden, parallelisierte Strahlverläufe etc.) mit der Absicht begründet, Bedingungen herstellen zu wollen, unter denen das theoretisch vorweggenommene Funktionieren des Effektes, so wie man es in den Seitenansichten auf Strahlenverläufe, Teilchenbahnen oder Wellenzüge vorstellen lernt, möglichst anschaulich herbeidemonstriert wird. Ziel ist in diesem Sinne die möglichst komplikationslose Theoriebestätigung („man sieht <es> ja“); es wird sozusagen „experimentell theoretisiert“.

4.4 Was folgt daraus?

Schüler bekommen durch den paradigmatischen Rahmen der physikalischen Optik einen Naturzugang vermittelt, aus dem derjenige, der diesen Naturzugang tätig, erlebend und sich in Schritten selbständiger Erkenntnis *als Mensch bildend*, herstellt: nämlich er selbst, zugunsten der Objektivität und Einheitlichkeit des Naturbildes ausgeschlossen werden muss. Die Sätze der klassischen Physik stellen einen Wissenskomplex in Form von Urteilen dar, deren Gültigkeit maßgeblich dadurch gesichert ist, dass sie ohne Bezug auf ein beobachtendes oder erkennendes Subjekt, d.h. subjektfrei formuliert sind (von Weizsäcker 1941, S. 87ff). Dieses Wissensideal als eine charakteristische, historisch interessante Ausprägung des menschlichen Erkenntnistrebens kennen zu lernen kann unter gegebenen Umständen pädagogisch wertvoll sein. Als nicht reflektierte und vom Schüler vertrauensvoll angenommene weltanschauliche Konditionierung jedoch wirkt es möglicherweise verheerend. *Welches Interesse sollten Schüler haben, sich mit einer Welt zu befassen, die angeblich nur unter der Bedingung verstehbar wird, dass sie nicht vorkommen?*

Die außerordentliche Leistungsfähigkeit der vereinheitlichenden und reduktionistischen Betrachtungsweise der klassischen Physik, hier für den Fall der Optik betrachtet, an deren historischer Berechtigung und Größe nicht gezweifelt werden soll, wandelt sich, wenn sie als unreflektierte ideologische Konditionierung im Unterricht wirksam wird, zur Voraussetzung möglicherweise verhängnisvoller Folgen für die geistige Entwicklung von Heranwachsenden („Individualität in den Mahlsteinen des Reduktionismus“ (Muckenfuß 1995, S. 157ff)). „Wer den Menschen in dem Vertrauen zur Echtheit und Wahrheit seiner Sinneseindrücke wankend macht, der rührt an die Grundlagen seiner sittlichen Existenz“ (Litt 1955, S. 47).

4.5 Ist ein Wandel in Sicht?

Ungeachtet der vielfach geäußerten, grundlegenden Kritik an der „unpädagogischen Dimension der Physik“ in ihrer Wirkung auf das Bild, was Schüler von physikalischer Arbeitsweise und Erkenntnisgewinnung im Physikunterricht erhalten, werden gerade die oben skizzierten Eigenschaften des klassischen Reduktionismus immer erneut geltend gemacht. Ein Beispiel dafür aus der aktuellen Debatte um neue Bildungsstandards gibt das in (Fischer u. a. 2004) beschriebene „Kerncurriculum Physik“. Es wurde von einer aus Physikdidaktikern bestehenden Expertenkommission als Empfehlung für die inhaltliche und methodische Gestaltung des Physikunterrichts in der gymnasialen Oberstufe vorgelegt. Darin heißt es zur „Physik als paradigmatischer Naturwissenschaft“ als einem von vier zentralen „Grundbereichen physikalischer Bildung“: „Die physikalische Welt erwächst nicht kontinuierlich aus der alltäglichen Erfahrung, etwa durch genaueres Hinsehen oder die Verwendung hoch entwickelter Messgeräte. Erforderlich ist vielmehr ein Perspektivwechsel, ein Überschreiten der Grenzen zwischen Lebenswelt und Wissenschaft. Die Welt ist in der Sichtweise der Physik nach einer begrenzten Anzahl universell gültiger Gesetze konstruiert. Ihre Formulierung erfolgt in der Sprache der Mathematik. Diese Sprache ermöglicht die quantitative Vorhersagbarkeit von Prozessen.

In dieser Hinsicht sehen Physiker also die *wahre Ordnung* der Dinge *hinter* der Anfass- und Vorzeigerealität. Um den Kriterien der Reproduzierbarkeit und Prognosefähigkeit gerecht zu werden, schaffen Physiker in den Laboren entlang eines theoretischen Entwurfs eine speziell präparierte Realität. Der große Erfolg der Physik liegt wesentlich darin begründet, dass sie die Komplexität von Phänomenen stark reduziert (Modellbildung), um diese dann mit den Mitteln der Mathematik beschreiben zu können.

Im Grad der Reduktion und in der Konsequenz der Mathematisierung unterscheidet sich die Wissenschaft Physik von anderen Naturwissenschaften. Wohl gemerkt: Wir sprechen hier von der *Wissenschaft* Physik. *Physikunterricht* soll dem nicht durchgängig folgen. Er soll z.B. mehr Lebensweltbezüge herstellen, als diese in der Forschung präsent sind. Aber er muss den Schülern Einblicke in den speziellen Charakter der Physik eröffnen.“ (Fischer u. a. 2004, S. 149, Hervorheb. i.O.).

Zum Curriculum der „Physik als paradigmatische Naturwissenschaft“ werden als Charakteristika der physikalischen Weltsicht u.a. folgende Punkte festgehalten: „Überzeugung von der <Einfachheit> der Zusammenhänge in der Natur, deren <wahres> Wesen sich zeigt, wenn man die Vielfalt und Komplexität von Phänomenen der Anfass- und Vorzeigerealität anhand eines theoretischen Entwurfs einem Abstraktionsprozess unterwirft; Streben nach der Vereinheitlichung und Integration physikalischer Theorien;

Strukturierung komplexer Sachverhalte mit mathematischen Modellen, insbesondere für die Prognose von Prozessverläufen.“ Zur Methodik der Erkenntnisgewinnung heißt es unter anderem ferner: „Physikalische Erkenntnisgewinnung erfolgt theoriegeleitet: Beobachtungen und Experimente geben Anstöße für theoretische Reflexion oder dienen der Überprüfung von theoretischen Vorhersagen“ (ebd., S. 152).

Das Beispiel als Ganzes verdeutlicht, dass zwar versucht wird, der modernen Physik *inhaltlich* Rechnung zu tragen, dass man dabei aber hinsichtlich der dem eigenen Urteil zugrunde liegenden erkenntnistheoretischen Orientierung im paradigmatischen Kontext der Physik des 19. Jahrhunderts verharrt. Besonders klar wird das an der ausdrücklichen Hervorhebung des „Perspektivwechsels“, der vorausgesetzt wird, um von der Lebenswelt, der so genannten „Anfass- und Vorzeigerealität“ zu der hinter dieser liegenden „wahren Ordnung der Dinge“ zu gelangen. Diese ist „nach einer begrenzten Anzahl universell gültiger Gesetze konstruiert“, deren Formulierung in der Sprache der Mathematik erfolgt...

Damit ist „Physik als paradigmatische Naturwissenschaft“ weiterhin und insbesondere für ihr Erscheinungsbild im Kontext des Physikunterrichts mit den ideologischen bzw. metaphysischen Voraussetzungen der klassischen Physik belastet.²⁵ Der Reduktionismus wird gewissermaßen im konzeptionellen Selbstverständnis der Physik wirksam, indem diese sich, ungeachtet des Widerspruchs, in den sie mit ihrer eigenen Praxis und Geschichte gerät, auf ein vollständig theoriezentriertes, im metaphysischen Realismus des 19. Jahrhunderts verhaftetes Selbstbild festlegt.

5. „Optische“ Optik oder – „Optik der Bilder“

5.1 Vorüberlegung

Den Voraussetzungen, die in den letzten Abschnitten für das erkenntnistheoretische und experimentiermethodische Selbstverständnis der physikalischen Optik geltend gemacht wurden, werden im Folgenden die Gesichtspunkte einer phänomenologischen Optik als „Optik der Bilder“ (Maier 2003; 2004) gegenüber gestellt. Die Wendung, auf die es dabei ankommt, soll durch die folgende Überlegung bereits angedeutet werden; ihre Tragfähigkeit erweist sie aber erst in der praktischen Ausführung.

²⁵ Vgl. den Wortlaut des im Kapitel *Optik im Bild quasimechanischer Vorgänge* gegebenen Zitats aus einem Vortrag von PLANCK über *Positivismus und reale Außenwelt*, in dem der reduktionistische und metaphysische Charakter der klassischen Physik nachdrücklich hervorgehoben und begründet wird (Planck 1990, S. 126).

Wenn man sich eingehend mit physikalischer Optik befasst und darüber hinaus die Bedingungen der dabei eingeübten Urteilsbildung klar überschaubar, so kann man sich sagen: Wie ich vorgehen muss, um die Erscheinungen der Optik im Bild quasimechanischer bzw. elektromagnetischer Vorgänge zu behandeln, habe ich durchschaut. – Je deutlicher einem dabei die Festlegung des Erkenntnisgegenstands durch die in diesem Vorgehen wirksamen Voraussetzungen ist, desto näher liegt die Frage: Was würde es bedeuten, die Erscheinungen der Optik nicht als quasimechanisches bzw. elektromagnetisches Problem, sondern – als *optisches Problem* zu behandeln? Was hieße es, in diesem Sinne nach einer „optischen Optik“ zu fragen?

Die optischen Erscheinungen müssten gewissermaßen so angeschaut werden, dass sie eines Rückbezuges auf jenseits ihres Erscheinens vorgestellte Ursachenzusammenhänge nicht bedürfen, sondern stattdessen durch sich selbst erklärt werden könnten. Man müsste mit Gesetzmäßigkeiten rechnen können, die sich im Kontext des Erscheinens selbst als *Bedingungen des Erscheinens* zeigen. Diese wären dann zugleich *Bedingungen des Sehens*. Es ginge in diesem Sinne nicht um die Frage <was ist Licht?> und <mit welchen Eigenschaften muss Licht als Gegenstand ausgestattet gedacht werden, damit die Beleuchtungssituation z.B. einer Landschaft bei Sonnenaufgang als Ergebnis einer vom Licht vermittelten Wirkung erklärbar wird?> Es ginge eher darum, dass ich erkunde, unter welchen Bedingungen es in meiner Umgebung hell wird. <Gegenlicht>, <Querlicht> und <Mitlicht> ergäben sich als charakteristische *Weisen der Beleuchtung*, die in Flächigkeit, Plastizität, Kontrastreichtum etc. stark unterschiedene Ansichten hervorrufen. Sie wären als <Gegensicht>, <Quersicht> und <Mitsicht> zugleich *Weisen des Sichtbarwerdens*, die sich durch unterschiedliche Blickrichtungen innerhalb der beleuchteten Szenerie auszeichnen.

Anstelle der abstrakten Deutung einer isolierten Flächenhelligkeit als Wirkung des von der Sonne emittierten Photonenstroms stünde beispielsweise ein Urteil der Form: *Hell ist es dort, von wo aus ich Helles sehen kann*. Beleuchtungsbeziehungen setzen Sichtbeziehungen voraus. Zum Beispiel: Eine Leuchte hat jeweils die beleuchtende Wirkung, welche ihrer gesehenen Größe im sichtbaren Umkreis zukommt. Diese nimmt ab mit dem Quadrat der Entfernung (vgl. Maier 2003, S. 118ff). – Das Hellwerden der Welt würde in diesem Sinne nicht extern beobachtet, sondern teilnehmend erfahren. Es ginge um konkrete Erscheinungszusammenhänge, die – kartesisch gesprochen – weder in die Ordnung der *res extensa* noch in die Ordnung der *res cogitans* gehören, die folglich weder etwas Objektives noch etwas Subjektives darstellen. Es wären vielmehr die objektiven und subjektiven Bedingungen ins Auge zu fassen, die mit ihrem aktuellen Gegebensein auf durchschaubare Weise verknüpft sind. Das oben genannte Urteil verdeutlicht, dass ein Phänomen keine *Konstruktion* darstellt, sondern

sich *konstituiert* aus dem Ineinanderarbeiten der sinnlich aufgefassten Außenseite der Natur mit ihrem daran entwickelten begrifflichen Inhalt.

5.2 Optik der Bilder als eine Kultur des Sehens

Die vorstehende Überlegung verdeutlicht, dass man von der physikalischen Optik zu einer „Optik der Bilder“ nur gelangt, wenn man die *Wendung*, auf die es ankommt, innerhalb der erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Voraussetzungen *praktisch*, d.h. ausübend vollzieht. Dies gelingt nicht auf Anhieb: Widerstände machen sich geltend, die ihren Ursprung in der hypothesengeleiteten Konditionierung des Sehens und Urteilens haben. Und zugleich verbindet sich damit der didaktische Grundzug der „Optik der Bilder“: Mit dem Beobachter wird nicht nur theoretisch gerechnet, vielmehr geht es zuallererst und hauptsächlich darum, *dabei zu sein*: mit den Erscheinungen durch Übung und immer erneute Hinwendung vertraut zu werden, an ihrem sich nach und nach entfaltenden Reichtum an Feinheiten, Gesten, Nuancierungen und Qualitäten den eigenen Blick zu schulen. – Es geht um eine *Kultur des Sehens*. Ein anderer Ausgangspunkt als die besonderen Erscheinungsformen des Sichtbaren, wie sie in der konkreten Anschauung des Einzelnen gegeben sind, kommt im Zusammenhang der „Optik der Bilder“ nicht in Frage.

Im Folgenden werden erkenntnistheoretische, experimentiermethodische und didaktische Aspekte einer phänomenologischen Optik im Sinne der „Optik der Bilder“ MAIERS bzw. der „Modellfreien Optik“ VON MACKENSENS skizziert. Zum einen wird dabei an das *methodische* Vorbild GOETHE²⁶ angeknüpft, das an seinem Vorgehen in der Farbenlehre abgelesen und seinen methodischen Arbeiten entnommen werden kann. Zum anderen werden die von MAIER und VON MACKENSEN geltend gemachten Gesichtspunkte für eine Weiterentwicklung der Methode GOETHE berücksichtigt, die sich insbesondere durch konzeptionelle Bezüge auf die moderne Physik auszeichnen.

5.3 Hypothesenfreie Naturwissenschaft – modellfreie Optik

GOETHE geht vom Sehen und von den sichtbaren Tatsachen aus. Hell, dunkel und Farben existieren für ihn nur als Modi des Sichtbaren, d.h. relativ zum

²⁶ Eine umfassende Darstellung des methodischen Ansatzes bei GOETHE, für die insbesondere die Einleitungen zu seinen naturwissenschaftlichen Schriften von STEINER zu berücksichtigen wären, kann im Zusammenhang dieser Arbeit nicht gegeben werden. Siehe dazu den Aufsatz GOETHE *Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt* von 1792, ursprünglich mit *Kautelen des Beobachters* betitelt (Goethe 1887, S. 10ff) und ferner (Steiner 1883-97; Gögelein 1970; Zajonc 1976; 1994; Maier 1986; Böhme 1993; 1997; Bortoft 1996; Steinle 2002a; b).

Sinn des Auges. Eine Veranlassung dafür, die Erscheinungen des Sehfeldes auf mechanische Kategorien eines Tastraums abzubilden, ist für ihn nicht gegeben. Im Gegenteil, ihm geht es darum, „die Data der Beurteilung nicht aus sich, sondern aus dem Kreis der Dinge zu nehmen, die er betrachtet“ (Goethe 1887, S. 11). Durch den metaphysischen Rekurs vom Gegebenen auf ein Nichtgegebenes ist für GOETHE nichts gewonnen. Die Gesetzmäßigkeiten und Ordnungen, nach denen er fragt, erschließen sich aus den Bedingungen der Erscheinungen im Erscheinungszusammenhang selbst; das sind zum einen die gesetzmäßigen Bedingungen des Hervortretens der Phänomene und zum anderen ihr gesetzmäßiger Zusammenhang untereinander. Solche *Erscheinungsordnungen* erschließen sich im Aufstieg vom *empirischen* über das *wissenschaftliche* zum *reinen Phänomen*.²⁷ Phänomenreihen entstehen in der systematischen Variation der jeweils wirksamen Bedingungen. In ihnen zeigt sich unmittelbar, wie Phänomene untereinander zusammenhängen, wie sie ineinander übergehen. Sie stellen geordneten Mannigfaltigkeiten dar, in deren Zusammenschau schließlich Grundtatsachen oder Urphänomene als das im Wandel Beständige anschaulich werden, die den Charakter empirischer Axiome haben: sie sind „ideal: als das letzte Erkennbare; real, als erkannt; symbolisch, weil es alle Fälle begreift; identisch, mit allen Fällen“ (Goethe 1897, S. 370).

Mit der Bezeichnung „Modellfreie Optik“, die VON MACKENSEN eingeführt wurde (von Mackensen & Ohlendorf 1998), wird dem konsequenten Verzicht auf Lichtmodelle bzw. auf hypothetische Größen jeder Art Rechnung getragen: Es wird in diesem Sinne nicht nach hinter den Erscheinungen liegenden Ursachen gefragt. Die Kausalrelation kennzeichnet einen durch Wechselwirkung vermittelten Bezug auf Gegenständliches, das selbst zwar nicht in den Bereich des Phänomenalen eintritt, diesem aber als verursachend zugrunde liegend gedacht wird. Weil auf diesen Rückbezug verzichtet wird, ist das Kausalprinzip als allgemeines Schema für den Aufbau eines systematischen Wissens im Bereich der sinnlich gegebenen Phänomene nicht zu gebrauchen (Böhme 1993, S. 148). Hier geht es vielmehr darum, die im gegenseitigen Zusammenhang der Phänomene selbst wirksamen

²⁷ In einem an SCHILLER gerichteten Aufsatz von 1798 mit dem Titel *Erfahrung und Wissenschaft* unterscheidet GOETHE drei Stufen: „1. Das *empirische* Phänomen, das jeder Mensch in der Natur gewahr wird und das nachher 2. zum *wissenschaftlichen* Phänomen erhoben wird, indem man es unter anderen Umständen und Bedingungen als es zuerst bekannt gewesen und in einer mehr oder weniger glücklichen Folge darstellt. 3. 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“ (Goethe 1897, S. 594).

Gesetzmäßigkeiten durch Angabe der Bedingungen zu formulieren, die für den jeweiligen Erscheinungszusammenhang maßgeblich sind.²⁸

Die Unterscheidung zwischen beobachtbaren und prinzipiell unbeobachtbaren Größen und der ausdrückliche Verzicht auf einen quasimechanischen Lichtbegriff kennzeichnet die Abgrenzung der phänomenologischen Optik gegenüber dem naiv realistischen Objektbegriff der klassischen Physik. Sie stellen zugleich eine konzeptionelle Nähe zum Zustandsbegriff der Quantenmechanik her. Aus phänomenologischer Sicht hat auf diese Tatsache insbesondere MAIER aufmerksam gemacht:

„Nur wenige haben bemerkt, dass die einschneidende Revolution des Lichtbegriffs, welche das 20. Jahrhundert brachte, es unmöglich macht, ein unterwegs im Zwischenraum befindlich gedachtes Licht festzumachen. Denn jede Messung, die innerhalb des durchsichtigen Zwischenraums erfolgt, die also Kenntnisse über den Weg eines Photons vermitteln würde, muss den Zusammenhang aufheben, welcher der Bilderzeugung dient. [...] Die Deutlichkeit des Bildes wird gesteigert, wenn eine große Linsenfläche zur Abbildung herangezogen wird, wenn es offen bleibt, wo das Photon durch diese Fläche hindurchgeht. [...] Ein unterwegs festgestelltes Photon fällt aus dem Zusammenhang der Gesetzmäßigkeit, welche Abbildungen schafft. Entweder verzichtet man auf irgendwelche Vorstellungen über die Wege von sich <unterwegs> befindenden Photonen, oder man verzichtet darauf, dass sie sich an der Erzeugung von Bildern beteiligen (Unschärferelation). [...] Durch die moderne Physik werden wir belehrt: Unwissen über die Vorgänge in den Zwischenräumen ist die Voraussetzung für ein deutliches Sichtbarwerden der Welt am Licht“ (Maier 1996, S. 331ff; 1993).

Aus der Sicht der Quantenmechanik und in enger Anlehnung an die von BOHR hervorgehobene Nichtseparabilität bzw. „Ganzheit des Quantenphänomens“ (Meyer-Abich 1965) hat insbesondere WEIZSÄCKER die erkenntnistheoretischen Bedingungen der Beschreibung komplementärer Erscheinungen beleuchtet (von Weizsäcker 1941, 1947). Die klassische Physik geht von der Hypothese aus, auch alles Nichtwahrgenommene müsse im Prinzip dieselben Eigenschaften haben wie das Wahrgenommene. Diese Hypothese wird im Zusammenhang der modernen Physik falsch:

²⁸ Ein klassisches Beispiel für eine Konditionalrelation, die im Sinne der Hypothesenfreiheit ausschließlich beobachtbare Größen in Beziehung setzt, gibt GALILEI mit den beiden Theoremen, in denen er das Fallgesetz formuliert: „Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten“ (Galilei 1985, S. 389). In diesem Theorem wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen Strecken und Zeiten hergestellt. Von Kräften als Ursachen, aus deren verborgenem Wirken das empirische Gegebensein der Proportion $s_1/s_2 \sim (t_1/t_2)^2$ gefolgert werden könnte, ist nicht die Rede (vgl. dazu (Grebe-Ellis 2005, S. 32f)).

„Die Erfahrung zeigt zwar sowohl Lokalisations- als auch Interferenzeffekte der Elektronen. [...] Der Widerspruch besteht aber nicht zwischen den tatsächlich beobachteten Eigenschaften des Elektrons; er tritt nur auf, wenn man annimmt, diese Eigenschaften kämen dem Elektron *auch dann zu, wenn man darauf verzichtet, sie zu beobachten.*“ Diese Situation führt zu dem für den quantenmechanischen Zustandbegriff charakteristischen „Verzicht darauf, den anschaulichen Bestimmungsstücken der Natur einen vom jeweiligen Beobachtungszusammenhang unabhängigen <objektiven> Sinn zuschreiben“ zu wollen (von Weizsäcker 1941, S. 84f).²⁹

Mit dieser Erkenntnis ist weder für den Phänomenologen noch für den Quantenphysiker die Bedeutung der Hypothesenbildung als Instrument physikalischer Erkenntnisgewinnung in Frage gestellt. Dagegen ist die Veranlassung gegeben, daran zu erinnern, dass sich Hypothesen nicht auf allgemeine Prinzipien erstrecken können, die eine Objektivierung einzelner Größen und Vorgänge im Sinne einer ontologischen Fixierung unabhängig von den Bedingungen ihrer Beobachtbarkeit gestatten sollen. Zum Gegenstand von Hypothesen kann etwas werden, das unter den bisherigen experimentellen Bedingungen nur über seine Wirkungen erschlossen werden konnte; das aber durch Herbeiführen geeigneter Umstände selbst in den Bereich des Beobachtbaren und Messbaren eintreten kann. „Die Hypothese kann zwar nicht Wahrgenommenes, sie muss aber Wahrnehmbares voraussetzen. Nur Hypothesen, die aufhören können, es zu sein, haben eine Berechtigung“ (Steiner 1887, S. XLIIIf).

5.4 Emanzipation des Sehens gegenüber dem Tasten

Mit dem Verzicht auf den metaphysischen Rekurs der Hypothesenbildung stellt sich in der Folge die Frage, als was die Erscheinungen der Optik denn angeschaut werden sollen, wenn ihnen der Nachweis modellgestützter Annahmen nicht mehr abverlangt wird. Was sind optische Erscheinungen *für sich selbst* genommen? Ein Hinweis darauf ergibt sich, wenn man berücksichtigt, dass mit dem Verzicht auf ein gegenständlich gedachtes Lichtmodell auch der Bezug des Gesehenen auf denjenigen Sinnesbereich wegfällt, in dem die primären Qualitäten: räumliche Lage, Gestalt und Bewegungsmodus erfahren werden; gemeint ist der Bereich der

²⁹ „Ontologisch bedeutet dies, dass der Begriff des Objekts nicht mehr ohne Bezugnahme auf das Subjekt der Erkenntnis verwendet werden kann“ (von Weizsäcker 1941, S. 83ff). „Von Objekten dürfen wir nur reden, sofern sie mögliche Objekte eines Subjekts sind“ (von Weizsäcker 1947, S. 173). Die Form der Urteile über Objekte lässt rein logisch nicht mehr zu, in ihnen stillschweigend davon abzusehen, dass sie jeweils von einem Subjekt ausgesprochen werden. „Die *metaphysische Hoffnung* der klassischen Physiker, durch ihre Wissenschaft den Halt am an sich Seienden zu gewinnen, fällt dahin. Die heutige Physik zwingt den Physiker zur Besinnung auf sich selbst als Subjekt“ (ebd., S. 173f).

Tastwahrnehmung. Durch den Abgleich des Gesehenen am Bezugssystem der körperlichen Tasterfahrung ist die physikalische Optik wesentlich die „Lehre von der Täuschbarkeit des menschlichen Auges“. An Redewendungen wie die folgenden hat man sich in diesem Zusammenhang gewöhnt: <Dass der Stock da an der Wasseroberfläche einen Knick hat, ist optische Täuschung. In Wirklichkeit ist er gerade.> Oder: <Wir unterscheiden zwischen der scheinbaren und der wirklichen Tiefe eines wassergefüllten Troges>. In ähnlicher Weise gelten Spiegelbilder als Inbegriff des Unwirklichen.

Die Reihe solcher Beispiele für die Abwertung der Gesichtswahrnehmung als „Täuschung“ und „scheinbar“ gegenüber dem, „wie es wirklich (der Tastwahrnehmung entsprechend) ist“, könnte beliebig fortgesetzt werden. Indessen kann für jeden einzelnen Fall gezeigt werden, dass die vermeintliche Sinnestäuschung auf der objektiven Inkohärenz des richtig Gesehenen mit dem Tastraum beruht. Der hinter einem Spiegel sich auftuende Raum ist nur solange Fiktion, als ihm neben den optischen auch diejenigen Eigenschaften abverlangt werden, welche den Tastraum auszeichnen. Als *optischer* Raum, d.h. als *Sehraum* ist der Spiegelraum dem nicht gespiegelten Sehraum, der unserer Gewohnheit entsprechend mit dem Tastraum zusammenfällt, völlig gleichwertig: in ihn kann wie durch ein Fenster hineingeblickt werden, man kann in ihm messen, gespiegelte Leuchten und Schattengeber sind den nicht gespiegelten optisch gleichwertig. Eine Autofokuskamera, im Abstand von vier Metern vor einen Spiegel gehalten, fokussiert auf ihr eigenes Spiegelbild in der optischen Entfernung von acht Metern.³⁰

Es ist das Verdienst MAIERS und VON MACKENSENS, für alle wesentlichen Erscheinungsformen der *Inkohärenz* von Seh- und Tastraum³¹ gezeigt zu haben, dass die Erfahrungen im Sehfeld neben denjenigen, die man im Bereich der Tastwahrnehmung gewinnen kann, einen eigenständigen, vollgültigen Phänomenbereich darstellen. Den entscheidenden Anknüpfungspunkt für die Unterscheidung von Seh- und Tastraum liefert BERKELEY in seinem 1709 in erster Auflage erschienenen *Essay toward a New Theory of Vision* (Berkeley 1912). Auf ihn bezieht sich MAIER, wenn er

³⁰ Vgl. zum Spiegelraum als Sehraum (Maier 2003, S. 62-80; von Mackensen 1978; 1992, S. 76-89; 1998, S. 31ff).

³¹ Neben dem Spiegelraum sind weitere Beispiele der Inkohärenz von Seh- und Tastraum: Hebung am Trog (Einblick) bzw. am Prisma und an der Linse (Durchblick), Doppelbrechung, Beugung (Maier 2004; von Mackensen 1992, 1998).

von der „Natur der Sehdinge“ und von einer „Optik der Bilder“ spricht (Maier 1977; 1996; 2003).³²

Das Konzept vom Seh- und Tastraum wird möglich durch den Verzicht auf quasimechanische Lichtmodelle aller Art; es ist gewissermaßen Ausdruck einer *Emanzipation des Sehens gegenüber dem Primat³³ des Tastens*. Es gehört damit zu den zentralen Ideen der modellfreien Optik und hat sich als solche in den Unterrichtsentwürfen VON MACKENSENS und in Anknüpfung an diesen in zahlreichen weiteren vielfach bewährt. Dass sich mit diesem Konzept auch anspruchsvolle optische Anordnungen analysieren und beschreiben lassen, zeigt die von THEILMANN und MAIER durchgeführte modellfreie Darstellung des Drehspiegelversuchs nach FOUCAULT (Theilmann & Maier 2004).

5.5 „Das Nächste ans Nächste reihen“

Welche Rolle dem Experiment zukommen kann, wenn darauf verzichtet wird, es auf den Nachweis theoretischer Annahmen im kontrollierten Effekt hin zu konzipieren, und welcher Stil experimentierenden Arbeitens an die Stelle der klassischen „Verhörsituation“ treten kann, wenn mit der „Würde der Erscheinungen“ gerechnet wird, ist im vorangegangenen Abschnitt bereits mehrfach angedeutet worden. In Anlehnung an STEINLE, der mit besonderer Rücksicht auf GOETHE, aber auch auf FARADAY, DUFAY, OERSTED u.a. die Merkmale eines nicht theoriegeleiteten, sondern phänomenologischen bzw. „explorativen Experimentierens“ herausgearbeitet hat, werden im Folgenden die wesentlichen Aspekte eines solchen Vorgehens zusammengestellt. Dabei werden ferner die Gesichtspunkte berücksichtigt, die von BÖHME hinsichtlich der immer wieder gestellten, grundsätzlichen Frage entwickelt wurden, inwiefern das Vorgehen GOETHES in der Farbenlehre im engeren Sinne auch als Wissenschaft bezeichnet werden kann. Im Anschluss daran werden die *objektive* und die *subjektive* Form der Durchführung von Versuchen als gleichwertige und hinsichtlich der Rolle des Beobachters komplementäre Modi des Experimentierens erörtert. Ein Beispiel aus der Schattenlehre verdeutlicht das Gemeinte.

³² Der Begriff <Sehdinge> (ideas of sight) stammt von BERKELEY (1732). Sehdinge sind für ihn gleichen Ranges wie die Tastdinge. Zur Erläuterung weist er in §44 darauf hin, dass das Sehding Mond für ihn verschwinden wird, wenn er zum Mond reist. So haben die Sehdinge nicht einen körperlichen Abstand, sondern sie haben je ein ihnen eigenes Aussehen. Vgl. auch die umfassende Bezugnahme auf BERKELEY bei MACKENSEN in (von Mackensen 1998, S. 7ff).

³³ Vgl. hierzu auch DAHLMANN (1998).

*Merkmale explorativen Experimentierens*³⁴

- Systematisches Variieren einer großen Zahl verschiedener experimenteller Parameter: Anlegen von Phänomenreihen.
- Aufstellen stabiler empirischer Regeln in der Form von Konditionalsätzen: *Wenn* bestimmte Bedingungen gegeben sind, *dann* tritt dieses oder jenes Phänomen auf.
- Ermitteln, welche der experimentellen Bedingungen für das Auftreten des Phänomens notwendig sind und welche es nur modifizieren.
- Entwickeln experimenteller Anordnungen, die nur noch die notwendigen Bedingungen enthalten und damit die allgemeine Regel mit besonderer Klarheit zum Ausdruck bringen. Die entsprechenden Phänomene werden als einfach, elementar, allgemein, rein oder als Urphänomene bezeichnet.
- Auffinden und Entwickeln angemessener Darstellungssysteme und Begriffe, durch die sich die empirischen Regeln möglichst allgemein formulieren lassen (Beispiel: der Farbenkreis GOETHES) (Steinle 2002a, S. 152; b, S. 229f).³⁵

„Wissenschaftlich“ kann die durch diese Merkmale gekennzeichnete, phänomenologische Vorgehensweise genannt werden, insofern es sich um eine methodisch vorgehende Erkenntnisunternehmung handelt, die

- auf systematische Ordnung ihres Gegenstandsbereichs zielt,
- erlaubt, die Phänomene aus Prinzipien und empirischen Grundsätzen abzuleiten und gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen den Phänomenen anzugeben.

Im Gegensatz zum reduktionistischen Vorgehen

- sind ihre Erklärungen nicht kausal,
- bedarf sie zur Sicherung der Intersubjektivität ihrer empirischen „Daten“ keiner apparativen bzw. quantitativen Feststellung derselben.

In folgenden Punkten lassen sich nach BÖHME funktionale Äquivalenzen zwischen dem reduktionistischen und dem phänomenologischen Vorgehen angeben (Böhme 1993, S. 149):

- Der apparativen Manipulation von Effekten und der Variation von Parametern gemäß einer Hypothese entspricht die Variation der im jeweiligen Erscheinungszusammenhang wirksamen Bedingungen und

³⁴ Die Zusammenstellung ist angelehnt an bzw. teilweise übernommen von STEINLE (2002a, b).

³⁵ Weitere Beispiele für ein experimentierendes Arbeiten, das dem durch diese Merkmale gekennzeichneten verwandt ist, geben BARTHOLINUS mit seinen Versuchen zum Doppelspat und insbesondere HAIDINGER durch seine umfassenden, aus einer Vielzahl geordneter Einzelbeobachtungen bestehenden Untersuchungen zu dem nach ihm benannten „Lichtpolarisationsbüschel“.

die vollständige Durchmusterung des Konkreten entlang der natürlichen Ordnung der Phänomene.

- Dem Gesetz als funktionaler Beziehung quantitativer Daten entspricht das Gesetz als strukturelle Beziehung zwischen Phänomenen.
- Der Erklärung als Angabe von Ursachen für Wirkungen entspricht die Erklärung als Angabe von Anlässen und Bedingungen für das Hervortreten von Phänomenen.
- Der theoretischen Herstellung der Einheit gegebener Daten durch Reduktion auf zugrundeliegende Entitäten (Atome, Moleküle etc.) entspricht die theoretische Einheit im Urphänomen.

5.6 Eingebundene und abgelöste Versuche als komplementäre Modi des Experimentierens

Im Kontext des phänomenologischen Experimentierens wird den sogenannten «subjektiven» Versuchen neben den «objektiven» ein besonderer Stellenwert eingeräumt. Dies gilt insbesondere für die Optik. Bei subjektiven Versuchen steht der Beobachter im Versuchsaufbau; er ist Teil desselben und insofern wesentlich Teilnehmer. Er blickt in Richtung der optischen Achse. Inhalt seiner Beobachtungen sind unmittelbar die Zustände des Phänomens selbst: Er erfährt die Bedingungen der Erscheinung als Bedingungen seiner Beobachtung.

Die entsprechenden objektiven Versuche ergeben sich, wenn das Auge gegen eine Lampe oder eine Optik mit Schirm vertauscht wird; der Teilnehmer tritt zurück, emanzipiert sich gewissermaßen aus der Einbindung in die Versuchsbedingungen und wird zum externen Beobachter: er überblickt den Versuchsaufbau typischerweise von der Seite, quer zur optischen Achse.

Die letztere, objektive Perspektive ist die historisch etablierte: Beobachtungsergebnisse gelten im allgemeinen erst dann als gesichert bzw. objektiv, wenn sie sich von ihrem Bezug auf den Beobachter, vom Kontext im weitesten Sinne ablösen lassen. Indessen lässt sich gerade an den Erscheinungen der Optik zeigen, dass die aus der subjektiven Perspektive formulierbaren Aussagen über Bedingungen von Erscheinungen – zumindest der Möglichkeit nach – nicht minder objektiv sind in dem Sinne, dass sie im Prinzip verallgemeinerbare, reproduzierbare und voraussagbare Sachverhalte und Strukturmerkmale von Erscheinungszusammenhängen betreffen.

Der Herabsetzung des subjektiven Standpunktes gegenüber dem objektiven wird im Zusammenhang der phänomenologischen Optik ferner aus didaktischen Gründen entgegengewirkt: In der Möglichkeit, gegenüber einem physikalischen Sachverhalt sowohl den einen als auch den anderen Standpunkt einnehmen und zwischen beiden wechseln zu können, wird ein geeignetes Mittel gesehen, dem Grundbedürfnis nach Teilnahme (subjektiv) und Betrachtung (objektiv) als zunächst gleichwertigen, komplementären

Formen des menschlichen Weltbezuges zu entsprechen. Zu diesem Zweck liegt es nahe, die Bezeichnungen <subjektiv> und <objektiv> wegen ihrer historisch bedingten Konnotationen zu ersetzen. Ich folge dem Vorschlag VON MACKENSENS, an der Stelle von <subjektiven> von eingebundenen und an der Stelle von <objektiven> von abgelösten Versuchen zu sprechen.

5.7 Ein Beispiel aus der Schattenlehre

Der Schatten eines Stuhls an einer Wand in der Beleuchtung durch eine Stablampe. Von der Wand aus gesehen, d.h. aus der eingebundenen Perspektive des Teilnehmers ergeben sich Ansichten der aus Stuhl, Lampe und Hintergrund bestehenden Szenerie, in denen der Stuhl je nach Standpunkt die Stablampe zu kleineren, größeren Teilen oder ganz verdeckt. Je nach Verdecktsituation ist es unterschiedlich hell. Am dunkelsten ist es an Orten vor der Wand, von wo aus gesehen die Stablampe voll verdeckt ist; ein quer zur Beleuchtungsrichtung stehender, abgelöster Beobachter sieht das Gesicht des Teilnehmers im Vollschaten. Teilschattengebiete ergeben sich für Bereiche der Wand, von wo aus der Teilnehmer nur Teile der Stablampe durch den Stuhl verdeckt sieht, wobei der Übergang von: <Stablampe voll verdeckt> zu <Stablampe unverdeckt> in Längsrichtung der Lampe vom Teilnehmer eine wesentlich größere Ortsveränderung verlangt als quer dazu. Dementsprechend sind die Schattengrenzen von Stuhlkanten aus der Sicht des abgelösten Beobachters parallel zur Längsrichtung der Stablampe unscharf bzw. breit verschmiert und quer dazu vergleichsweise schmal bzw. scharf.

Worauf es offenbar ankommt: Indem sich der Teilnehmer vor der Wand mit Blick auf die Lampe quer zur Blickrichtung hin und her bewegt, verschieben sich für ihn die Sehdinge Lampe und Stuhl gegeneinander nach Maßgabe ihres Abstands vom Auge (Parallaxe): Entferntere Dinge verändern ihren Ort im Gesichtsfeld gegenüber dem bewegten Auge langsamer als näher liegende. Die räumliche Abstandsordnung von Dingen als Tastdingen, die aus der seitlichen Perspektive des abgelösten Beobachters in den Blick kommt, macht sich für den eingebundenen Teilnehmer im Grad des Mitgehens bzw. Zurückbleibens der Dinge als Sehdinge geltend.³⁶ Daraus ergeben sich charakteristische Verdecktsituationen. Insbesondere gilt: Die beständigeren (entfernteren) Sehdinge des Gesichtsfeldes werden von den unbeständigeren (näheren) verdeckt.

Von der allgemeinen Feststellung: <Je größer die Leuchte, desto unschärfer der Schatten>, könnte man weitergehen und verschieden geformte Lampen

³⁶ So bleibt der Mond während eines Abendspaziergangs, der durch das Kommen und Gehen immer neuer Ansichten und Szenerien in der nahen Umgebung abwechslungsreich bleibt, ständiger Begleiter.

ausprobieren. Es ist überraschend, wie unterschiedlich die sich dabei ergebenden Schattenbilder desselben Gegenstands bei sonst gleichbleibenden Umständen sind. Daran wird deutlich, wie stark sich im Schattenbild des Stuhls das von der Wand aus gesehene Bild der Leuchte geltend macht – gewissermaßen so, als sei der Umriss des Stuhls mit einem Stift gezeichnet, dessen Spitze die Form der Leuchte hat. Die Frage danach, welches der beiden im Schattenbild sich verbindenden Bilder stärker hervortritt führt zur Variation der Abstände zwischen Stuhl und Wand bzw. Stuhl und Leuchte: Je näher der Stuhl bei der Wand steht, desto größer ist er von der Wand aus gesehen im Vergleich zur Leuchte und desto kleiner werden die Bereiche, in denen die Lampe teilverdeckt gesehen wird. Das Schattenbild nähert sich folglich einer Projektion des Stuhlumrisses, das Bild der Lampe tritt zurück. Zieht man dagegen den Stuhl von der Wand fort in Richtung der Leuchte, so verschwimmt der Schattenriss des Stuhls zusehends und im Stil des Verschwimmens macht sich die Lampenform geltend. Steht der Stuhl zufällig so, dass einzelne Teile beispielsweise der Lehne in der Sicht von der Wand einen kleinen Ausschnitt begrenzen, durch den immer nur ganz geringe Teile der Leuchte zu sehen sind, so entmischen sich hier Teilansichten der Leuchte bezüglich des Ortes auf der Wand, von denen aus sie zugleich gesehen werden können, in besonders hohem Grad und man erkennt auf der Wand das helle Abbild der Leuchte. Damit sind bereits Voraussetzungen für ein Verständnis die Bildentstehung bei der Lochkamera geschaffen.

Das Beispiel macht deutlich: Die für den eingebundenen Teilnehmer sich ergebende geordnete Folge von Verdeckungen stellt eine Beschreibung der Bedingungen für die Entstehung von Teil- und Vollschatten in Abhängigkeit von der Form der Leuchte dar, die ausschließlich mit „Sehdingen“ operiert und hinsichtlich der Exaktheit und Verallgemeinerbarkeit der üblichen Definition durch Lichtstrahlenkonstruktion von der Seite etc. völlig gleichwertig ist. Die Erfahrung zeigt ferner, dass so verhältnismäßig komplizierte Schattenerscheinungen wie das „Beulenziehen“ oder der „helle Schatten“ sogar leichter zu durchschauen sind, wenn sie in der eingebundenen Perspektive analysiert werden.³⁷ Zudem macht man die Erfahrung, dass man sich durch ein einmaliges gründliches Durcharbeiten eines solchen Phänomens in der eingebundenen Perspektive die Voraussetzungen schaffen kann, es künftig überall da, wo die erforderlichen Bedingungen in mannigfaltigsten Modifikationen gegeben sind, spontan wieder zu entdecken und in den Bedingungen seines Auftretens zu durchschauen: auf einem Spaziergang im Wald, beim Blick aus der S-Bahn –

³⁷ Das von MAIER so genannte „Beulenziehen“ entsteht, wenn sich im Gesichtsfeld des eingebundenen Beobachters Sehdinge relativ zur Leuchte überholen. Vgl. zum „Beulenziehen“ und zum „hellen Schatten“ (von Mackensen & Ohlendorf 1998, S. 24-27; Maier 2003, S. 144-148, S. 154).

überall, wo man Gelegenheit hat, bewegte Schatten relativ zu feststehenden zu verfolgen. Denn die eingebundene Perspektive ist ja die, in der man die Welt zunächst und fortwährend wahrnimmt.

5.8 Bedingungen der Erscheinungen als Bedingungen der Beobachtung

Der geschilderte Versuch kann gerade wegen seiner Einfachheit als paradigmatisch für das experimentierende Vorgehen im Kontext der Optik der Bilder angesehen werden. Die entscheidende Wendung liegt im Übergang zum eingebundenen Teilnehmer: Ich erschließe mir die Bedingungen und Zustände eines gegebenen Erscheinungszusammenhangs (Schattenbildung), indem ich sie als Bedingungen und Zustände meiner beobachtenden Teilnahme an ihnen selbst aufsuche und denkend in Zusammenhang bringe: Beleuchtungsbeziehungen werden als Sichtbeziehungen untersucht. Je sicherer man sich in der eingebundenen Perspektive bewegt, desto deutlicher wird, dass das Problem des abgelösten Beobachters: sich die Entstehung des Schattens als Wirkung eines von der Lampe ausgehenden und durch den Schattenwerfer modifizierten Lichtstroms herzuleiten, wesentlich aus den impliziten Eigenschaften seiner Perspektive resultiert. Indem man sich aus der eingebundenen Perspektive in die Seitenansicht des Versuchsaufbaus begibt, fallen Lampe und Stuhl aus ihrer Beziehung als Seditinge heraus und in räumlich getrennte Gegenstände auseinander. Was in der eingebundenen Perspektive Grundbedingung der Beobachtbarkeit von Phasen der Verdeckung war: die unsichtbare Durchsichtigkeit des Zwischenraums zwischen Wand, Stuhl und Lampe, macht sich in der abgelösten Seitenansicht als räumliche Abstandsfolge geltend. Diese entsteht sozusagen als charakteristische Eigenschaft der abgelösten Perspektive – und fordert dazu heraus, durch Angabe eines Zusammenhang stiftenden Prinzips wieder aufgehoben zu werden. Dieses wird dann gewöhnlich in einem körperlich vermittelten Ursache-Wirkung-Zusammenhang zwischen Lampe, Stuhl und Schattenbild gesucht („so wie man trocken bleibt, wenn man mit dem Schirm in den Regen geht, so bleibt es dunkel, wo kein Licht hinfällt“). Dabei ist die Beziehung zwischen den beobachtbaren Komponenten des Erscheinungszusammenhangs „Schattenbildung“ rein *gedanklicher* Art! Wird dies durchschaut, kann man die Vorzüge der abgelösten Perspektive zu Messzwecken etc. unbefangen nutzen.

5.9 Stufen der Einbindung

Vergleicht man verschiedene Situationen eingebundenen Experimentierens, so stellt man fest, dass man als Teilnehmer im einen Fall stärker eingebunden ist als im anderen. Beim Blick in einen wassergefüllten Trog ist die gehobene Ansicht des Trogbodens immer dem Beobachter zugeneigt. Dagegen ist es eine wesentliche Voraussetzung für die Erschließung der Bedingungen bei

der Schattenbildung, dass die räumliche Ordnung der einzelnen Komponenten gegenüber dem beobachtenden Teilnehmer fest bleibt. – In letzteren Fall experimentiert man zwar in der eingebundenen Perspektive; aber man ist insgesamt abgelöster vom Versuchszusammenhang als es beim Blick in den Trog der Fall ist. Offensichtlich können *Grade der Einbindung* unterschieden werden, möglicherweise sogar *Arten der Einbindung*, was wiederum charakteristisch für den jeweils durchgeführten Versuch ist, weil die Bedingungen der Beobachtung mit den Bedingungen der Erscheinung unmittelbar verknüpft sind. Dies wird hier auch angemerkt, um einer starren Dialektik der Modi <eingebunden> und <abgelöst> entgegenzuwirken, die im Einzelfall den Blick für aufschlussreiche Eigenarten und Unterschiede u.U. verstellt. Berücksichtigt man dies, so lassen sich an entsprechenden Versuchen innerhalb der eingebundenen Perspektive Stufen der Einbindung herausarbeiten, die ein ganzes Spektrum zwischen „eingebundenen eingebundenen“ und „abgelösten eingebundenen“ Versuchen aufspannen. Die dabei sich ergebende Struktur ist ein weiteres Beispiel für eine im Kontext der Erscheinungen selbst liegende so genannte *Erscheinungsordnung*. Ein Beispiel dafür, wie sich innerhalb der eingebundenen Perspektive drei charakteristische Grade der Einbindung unterscheiden lassen, wird im zweiten Teil der vorliegenden Studie hinsichtlich der Bedingungen gegeben, unter denen Polarisation auftritt.

6. Die Einbindung des Beobachters als didaktisches Mittel

Das zentrale didaktische Moment der *phänomenologischen* Optik liegt darin, dass sie einen Erkenntniszugang zu den Erscheinungen der Optik eröffnet, bei dem der Erkennende sich nicht selbst ausschließen muss, sondern in Anknüpfung an seine sinnliche Erkenntnisbefähigung als ganzer Mensch eingebunden wird. Das oben angegebene Beispiel aus der Schattenlehre zeigt, in welchem Sinne dieses Einbinden gemeint ist. Ein weiteres Beispiel, in dem auf didaktische Einzelheiten eingegangen wird, wird weiter unten angeführt.

Im Unterschied zu dem „bestallten Richter“ KANTS, der die Natur in den Zeugenstand ruft, um sie zur Antwort auf die Fragen zu nötigen, welche er ihr vorlegt, handelt es sich für den Phänomenologen zunächst darum, jede Art von Urteilsbefangenheit gegenüber den Erscheinungen abzulegen. Der Maßstab seiner Erkenntnis liegt in den Objekten seiner Beobachtung.³⁸ Dies

³⁸ Die erkenntnistheoretische Begründung für die damit verbundene These, dass ein erkennender Zugang zu einem solchen in den Objekten der Erkenntnis liegenden Maßstab überhaupt möglich ist, übersteigt den Rahmen dieser Studie. Auf die Idee zu einer solchen Begründung sei aber mit dem Folgenden hingewiesen: Wenn man sich klarmacht, dass die für das wissenschaftliche Selbstverständnis der Neuzeit konstitutive Spaltung von Objekt und Subjekt durch ein philosophisches Urteil

verlangt von ihm *Selbstlosigkeit als Technik*, d.h. die Fähigkeit, abzuwarten und vorschnelle Deutungen zurückzuhalten; es handelt sich für ihn eben nicht um Objektbewältigung mit den vorausgesetzten Mittel des rechnenden Verstandes, sondern im Kern um eine ganz andere *Haltung* – um liebevolle Hinwendung an das, „was vor den Augen liegt“. Den Erscheinungen – und damit letztlich auch sich selbst – wird eine eigene Würde und eine eigene Sprache zugestanden.

Die didaktische Dimension dieser Haltung ist zugleich eine pädagogische, indem Schüler die Art der Naturbetrachtung im Unterricht dadurch kennen lernen, dass sie diese an sich selbst erfahren. Ihnen wird im Unterricht ja nicht nur Optik vermittelt, sondern durch die Art, wie dies geschieht, zugleich ein ganz bestimmter Weltzugang nahegelegt. Dieser sollte nicht von grundsätzlichem Misstrauen in die Sinne und damit in einen selbstständigen Erkenntniszugang zur Welt und zu sich selbst geprägt sein. Die Bedeutung der Sinneserfahrung für die Erkenntnis und den Erkennenden wird allzu oft immer noch unterschätzt (Basfeld 2002). Dass Wissensformen, in denen der Schöpfer des Wissens und seine Bezüge zur Welt nicht vorkommen, gerade bei jungen Menschen auf Dauer kein Interesse wecken, kann nicht verwundern. Wird doch gerade das Ziel jedes Interesses: die Erweiterung des eigenen Wesens durch die Berührung mit Welt aus dem Horizont des dem Einzelnen Erreichbaren herausgerückt. Ein im Sinne der Phänomenologie eröffneter Weltzugang ist stets Zugang eines einzelnen Menschen; er fordert die leibliche Anwesenheit, das Selbsthinsehen, den Mut, die eigenen Sinne zu gebrauchen; Sinnesschulung ist gefragt.

Das *Erleben der Physik* wird damit zum Motto einer Unterrichtsgestaltung erhoben, die mit dem Bedürfnis der Schüler nach einer geistvollen, differenziert erlebenden und tätig beobachtenden Teilnahme an den Erscheinungen der Natur rechnet. *Physik erleben* meint also nicht vordergründigen Spaß und oberflächliche Begeisterung im Physikunterricht. *Naturphänomene erlebend verstehen* (vgl. Buck & von Mackensen 2006) steht für eine Unterrichtsform, in der der Schüler in tätiger Auseinandersetzung mit Phänomenen erlebt, dass er selbst in der Lage ist, komplexe Vorgänge in seiner Umwelt denkend zu durchdringen, d.h. sie zu ordnen und mit bereits Bekanntem zu verknüpfen. Nicht die Inhalte machen den erlebnisorientierten Unterricht aus, sondern die Art der

hervorgebracht wird, kann der Urteilende selbst der Kategorie des Subjekts nicht unterworfen werden; er bringt sie ja gerade selbst erst hervor. Demnach kann man annehmen, dass die Einheit, die im Vollzug des betreffenden Urteils als „Welt“ und „Ich“ auseinander fällt, im Urteilenden selbst noch existiert. Damit eröffnet sich aber die Perspektive, das „unbekannte Gesetzliche im Objekt“ dadurch aufzudecken, dass es als „unbekanntes Gesetzliches im Subjekt“ identifiziert wird.

Auseinandersetzung mit ihnen. Für die Physik formuliert SCHÖN dies so:
„Wenn es physikalisch ...

- ... um Bewegung im Raum geht, sollten sich die Schüler im Raum bewegen können,
- ... um Kraft und Energie geht, sollten sie körperlich tätig werden und <sich anstrengen müssen>,
- ... um Licht und Sehen geht, sollten die Schüler sehr bewusst und unmittelbar mit ihren Augen beobachten, und
- ... um Wärme und Temperatur geht, sollte unser Wärmesinn nicht vorzeitig diskreditiert, sondern gezielt genutzt und untersucht werden.“ (Schön 1995, S. 4ff).

Weitere Hinweise dafür, wodurch sich ein unter solchen Gesichtspunkten gestalteter Physikunterricht konkret auszeichnet, hat in Anknüpfung an WAGENSCHNEIN, MACKENSEN, KÜKELHAUS u.a. SCHÖN gegeben (Schön 1995).³⁹ Sie können für die Bedeutung des phänomenologischen Ansatzes innerhalb der fachdidaktischen Diskussion als paradigmatisch angesehen werden.

³⁹ Vgl. in diesem Themenheft mit dem Titel *Physik erleben* auch die phänomenorientierten Erschließungen der Optik an der Entstehung von Schatten (HEINZERLING), der Auftriebsmechanik an Erfahrungen mit Luft und Wasser (SCHÖN), der Dynamik mit Stoß und Zug beim Schieben eines Güterwaggons (BOCKEMÜHL) und der Statik an Versuchen zum Brückenbau (SCHÖN). Weitere Beispiele für einen „erlebnisorientierten Unterricht“ geben die Mondbeobachtungen von ERB und die Himmelsbeobachtung am Abend von VORNHOLZ. Das Heft enthält außerdem eine von SCHÖN zusammengestellte, kommentierte Bibliographie, die einen Überblick über im weiteren Sinne phänomenorientierte Unterrichtsansätze und -vorschläge enthält. Darin wird auch auf verschiedene science-Zentren hingewiesen: die „Phänomenta“ in Flensburg (FIESSER) und das „Erfahrungsfeld der Sinne“ nach KÜKELHAUS. Auf die umfassenden Unterrichtsmaterialien und Anregungen Martin WAGENSCHNEINS wird hier nicht im einzelnen verwiesen. Die Darstellungen MACKENSENS zum Physikunterricht der Mittelstufe an Waldorfschulen sind in die meisten der oben genannten Ausarbeitungen eingeflossen. Sie enthalten Unterrichtskonzeptionen und zahlreiche Versuchsbeschreibungen zu Akustik, Optik, Wärme, Elektrizität, Magnetismus, Elektromagnetismus, Mechanik, Hydraulik und Aeromechanik (von Mackensen 1992; Buck & von Mackensen 2006).

Literatur

- AZZAM, R. M. A. & N. M. BASHARA (1987): *Ellipsometry and polarized light*. Amsterdam: North-Holland
- BADER, Franz (1996): *Eine Quantenwelt ohne Dualismus*. Hannover: Schroedel
- BADER, Franz (2000): Quantenmechanik macht Schule. *Physikalische Blätter* 10, S. 65-67
- BASFELD, Martin (1992): *Erkenntnis des Geistes an der Materie. Der Entwicklungsursprung der Physik*. Bd. 12 in der Reihe: *Beiträge zur Bewusstseinsgeschichte*. Hrsg.: Martin DIETZ. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben
- BASFELD, Martin (1997): *Phänomen – Element – Atmosphäre. Zur Phänomenologie der Wärme*. In: BÖHME, G. & G. SCHIEMANN (Hrsg.): *Phänomenologie der Natur*. Frankfurt am Main: Suhrkamp
- BASFELD, Martin & Thomas KRACHT (Hrsg.) (2002): *Subjekt und Wahrnehmung. Beiträge zu einer Anthropologie der Sinneserfahrung*. Basel: Schwabe
- BERKELEY, George (1912): *Versuch einer neuen Theorie der Gesichtswahrnehmung*. Hrsg. von Raymund SCHMIDT. Leipzig: Felix Meiner
- BÖHME, Gernot (1993): *Alternativen der Wissenschaft*. Frankfurt am Main: Suhrkamp
- BÖHME, Gernot & Gregor SCHIEMANN (Hrsg.) (1997): *Phänomenologie der Natur*. Frankfurt am Main: Suhrkamp
- BÖHME, Gernot (2002): *Die Natur vor uns. Naturphilosophie in pragmatischer Hinsicht*. Die Graue Edition Bd. 33, Zug/Schweiz: Prof. Dr. Alfred Schmidt Stiftung
- BORTOFT, Henri (1996): *The Wholeness of Nature – Goethe’s Way of Science*. New York: Lindisfarne Press
- BROSSEAU, Christian (1998): *Fundamentals of polarized light. A statistical optics approach*. New York: John Wiley
- BUCK, Peter & VON MACKENSEN, Manfred (2006): *Naturphänomene erlebend verstehen*. 7. Auflage. Köln: Aulis Verlag Deubner & Co KG

- BUCK, Peter. (2006): Auf dem Weg zu einer phänomenologisch fundierten Naturwissenschaftsdidaktik. In: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 27: HÖTTECKE, D. (Hrsg): *Jahrestagung in Bern: Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*. Münster: LIT-Verlag
- CHANDRASEKHAR, S. (1960): *Radiative Transfer*. New York: Dover Publications
- CHARGAFF, Erwin (1991): *Erforschung der Natur und Denaturierung des Menschen*. In: *Geist und Natur*. Hrsg. von Hans Peter DÜRR und Walther Ch. ZIMMERLI. Bern: Scherz, S. 355-368
- COLLETT, Edward (1993): *Polarized light - fundamentals and applications*. New York: Marcel Dekker
- DAHLMANN, Wolfgang (1998): Wie die Fußspur eines Vogels im Schnee, Teil III: Zur Deutung der Attraktivität mechanisch-materieller Modelle für (vermeintliches) Verstehen. In: *chimica didactica*, Jg. 24, S. 4-26
- DIJKSTERHUIS, E. J. (1956): *Die Mechanisierung des Weltbildes*. Übers. von Helga HABICHT. Berlin: Springer
- FISCHER, Hans E., Horst SCHECKER & Helmut WIESNER (2004): Kerncurriculum Physik. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht* 57 (Heft 3), S. 147-154
- GALILEI, Galileo (1985): *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*. Dt. von Arthur von OETTINGEN. In: GALILEI, G.: *Schriften, Briefe, Dokumente*. Hrsg. von Anna MUDRY. Bd. 1: *Schriften*. Berlin: Rütten & Loewing
- GOETHE, Johann Wolfgang von (1887): *Naturwissenschaftliche Schriften*. Hrsg. von Rudolf STEINER in fünf Bänden. Fotomechanischer Nachdruck der Erstauflage in „Deutsche National-Litteratur“ 1883-1897. Dornach: Rudolf Steiner Verlag, 1982. Bd. II (1887): *Zur Naturwissenschaft im Allgemeinen*. Darin: Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt, S. 10-21.
- GOETHE, Johann Wolfgang von (1897): *Naturwissenschaftliche Schriften*, Bd. V: *Entoptische Farben*. GOETHES umfangreiche Versuche zur Polarisation mit ausführlichen Anmerkungen des Herausgebers s. S. 165-229.
- GÖGELEIN, Christoph (1970): *Zu Goethes Begriff von Wissenschaft auf dem Wege der Methodik seiner Farbstudien*. Dissertation bei Carl Friedrich VON WEIZSÄCKER. München: Carl Hanser
- GREBE-ELLIS, Johannes, Wilfried SOMMER & Jürgen VOGT (2002): *Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisaton*.

- Materialien für einen modellfreien Optikunterricht im Grund- und Leistungskurs Physik. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle
- GREBE-ELLIS, Johannes (2005): *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*. Berlin: Logos
- GREBE-ELLIS, Johannes (2006): *Von der Optik im Tastraum zu einer Optik des Sehens*. In: Grebe-Ellis, J. & F. Theilmann (Hrsg.): *open eyes 2005 – Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Tagungsband*. Berlin: Logos
- HAAS, Erwin: *Goetheanistische Naturwissenschaft*. Fortlaufend aktualisierte Bibliographie ab 1921. www.forschungsinstitut.ch/669.html.
- HÄUBLER, Peter et al. (1983): Physikalische Bildung für heute und morgen. Ergebnisse einer curricularen Delphi-Studie. Beilage zu den Zeitschriften *Naturwissenschaften im Unterricht* (Physik/Chemie) und *Praxis der Naturwissenschaften* 1983 (Heft 12). Kiel: IPN
- HÄUBLER, Peter (1992): *Physikalische Bildung als Menschenbildung: Wunsch und Wirklichkeit*. In: HÄUBLER, Peter (Hrsg.): *Physikunterricht und Menschenbildung*. Kiel: IPN
- HEISENBERG, Werner (1925): Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik* 33, S. 879-893
- HEISENBERG, Werner (1947): *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*. 7. Auflage. Leipzig: S. Hirzel
- HEITLER, Walter (1966): *Der Mensch und die naturwissenschaftliche Erkenntnis*. 4. Auflage. Braunschweig: Vieweg
- HEITHECKER, Boris (2006): *Phänomenologie der Krafterscheinungen*. Berlin: Logos
- HELMHOLTZ, Hermann von (1932): Goethes Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen. Rede gehalten in der Generalversammlung der Goethe-Gesellschaft zu Weimar am 11. Juni 1892. Veröffentlicht in: *Die Naturwissenschaften* 13, S. 213-223
- HUYGENS, Christian (1996): *Abhandlung über das Licht*. Hrsg. von E. LOMMEL, in zweiter Aufl. durchgesehen und berichtigt von A. J. VON OETTINGEN als Bd. 20 in der Reihe „Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften“. 4. Auflage. Frankfurt am Main: Harri Deutsch

- JONES, Clark (1941): A new calculus for the treatment of optical systems I: Description and discussion of the calculus. *Journal of the Optical Society of America* 31, S. 488-493
- JOOS, Georg (1959): *Theoretische Physik*, Fünftes Buch: *Theorie der Wärme*. Phänomenologischer Teil. 6. Auflage. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler KG
- KANT, Immanuel (1787): *Kritik der reinen Vernunft*. Leipzig: Insel,
- KÖNIG, W. (1928): *Elektromagnetische Lichttheorie*. In: *Handbuch der Physik*, Bd. XX: *Licht als Wellenbewegung*. Hrsg. von H. GEIGER & K. SCHEEL. Leipzig.: Akademische Verlagsgesellschaft, S. 141-262
- KUBLI, Fritz (1987): *Interesse und Verstehen in Physik und Chemie*. Mit Beiträgen von Jeanette BOSSI und Mario RISCH. Köln
- LEISNER, Antje (2005): *Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht*. Berlin: Logos
- LITT, Theodor (1955): *Das Bildungsideal der deutschen Klassik und die moderne Arbeitswelt*. Schriftenreihe der deutschen Bundeszentrale für Heimatdienst. Bonn
- MACKENSEN, Manfred von (1978): Der ebene Spiegel. Optik der Bilder statt Strahlen – Methodisches zum Physikunterricht der 7. und 12. Klasse. *Erziehungskunst* 42 Jg. Nr. 5, S. 248-261, Nr. 6/7, S. 297-307
- MACKENSEN, Manfred von (1990): Wohin führt modellorientierter naturwissenschaftlicher Unterricht? (I). *Erziehungskunst* 54 (1), S. 12-21; Objektive Wissenschaft, subjektive Schülerseele. Zur Problematik des modellorientierten naturwissenschaftlichen Unterrichts (II). ebd. 54 (2), S. 97-103
- MACKENSEN, Manfred von (1992): *Klang, Helligkeit und Wärme*. Phänomenologischer Physikunterricht aus Praxis und Theorie der Waldorfschule. 4. Auflage. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle
- MACKENSEN, Manfred von & OHLENDORF, Heinz-Christian (1998): *Modellfreie Optik*. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle
- MAIER, Georg (1977): Von der Natur der Sehdinge. *Das Goetheanum*. 56 Jg.9, S. 68-69. Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004).
- MAIER, Georg (1986): Hypothesenfreie Erkenntnis der unorganischen Natur. *Elemente der Naturwissenschaft* 45 (2), S. 8-26. Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004).

- MAIER, Georg (1986): Eine Stufenfolge optischer Grundsätze. *Elemente der Naturwissenschaft* 49 (2), S. 96-106. Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004).
- MAIER, Georg (1993): Gedanken zur Komplementarität. *Elemente der Naturwissenschaft* 58, S. 64-75. Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004).
- MAIER, Georg (1996): Das Licht im Gestrüpp von Missverständnissen. *Erziehungskunst* 60 Jg. 1, S. 15-27. Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004).
- MAIER, Georg (2003): *Optik der Bilder*. 5. Auflage. Dürna: Kooperative Dürna
- MAIER, Georg (2004): *blicken – sehen – schauen. Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft*. Hrsg. von Johannes GREBE-ELLIS. Dürna: Kooperative Dürna
- MEYER-ABICH, Klaus Michael (1965): *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität*. Studien zur Geistesgeschichte der Quantentheorie in den Beiträgen Niels Bohrs. Wiesbaden: F. Steiner
- MIKELSKIS, Helmut (1990): *Goethes Farbenlehre heute – Betrachtungen zur Zeitgemäßheit einer vermeintlich veralteten Naturauffassung*. Goethe Gesellschaft Kiel
- MUCKENFUß, Heinz (1995): *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- MUELLER, Hans (1948): The Foundations of optics. *Journal of the Optical Society of America* 38, S. 661
- NEWTON, Isaac (1958): In: I. B. COHEN: *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents*. Cambridge Mass.: Harvard Univ. Press
- NEWTON, Isaac (1999): *Die mathematischen Prinzipien der Physik*. Übers. und hrsg. von Volkmar SCHÜLLER. Berlin, New York: de Gruyter
- NEWTON, Isaac (1996): *Optik*. Übers. und hrsg. von W. ABENDROTH als Bd. 96 in der Reihe „Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften“. 2. Auflage. Frankfurt am Main: Harri Deutsch
- PARKE, Nathan Grier (1948): *Matrix Optics*. Diss. bei H. MUELLER am MIT
- PLANCK, Max (1990): *Vom Wesen der Willensfreiheit* und andere Vorträge. Eingeleitet und hrsg. von Armin HERMANN. Frankfurt am Main: Fischer

- PÖRKSEN, Bernhard (2002): *Die Gewissheit der Ungewissheit*. Gespräche zum Konstruktivismus. Bonn: Carl-Auer-Systeme
- POPPER, Karl R. (1959): *The logic of scientific discovery*. New York: Basic Book
- REDEKER, Bruno (1995): Martin Wagenschein phänomenologisch gelesen. Weinheim: Deutscher Studienverlag
- RIECK, Karen (2003): *Polarisation von Licht im Physikunterricht. Ein Elementarisierungsansatz zur Einführung in quantentheoretische Begriffe und Prinzipien*. Dissertation, Universität Kassel
- ROSENBERGER, Ferdinand (1978): *Isaac Newton und seine Physikalischen Principien – Ein Hauptstück aus der Entwicklungsgeschichte der modernen Physik*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1895. Unveränderter Nachdruck: Walluf, Nendeln: Dr. Martin Sändig GmbH
- SCHIEMANN, Gregor (1997): *Phänomenologie versus Naturwissenschaft. Zum Verhältnis zweier Erkenntnisweisen*. In: BÖHME, Gernot & Gregor SCHIEMANN (Hrsg.): *Phänomenologie der Natur*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, S. 213-231
- SCHÖN, Lutz-Helmut (1995) (Hrsg): *Physik erleben*. Themenheft zu phänomenorientierten Unterrichtszugängen im Fach Physik. *Naturwissenschaften im Unterricht*. Jg. 43, Heft 29. Darin von SCHÖN: Physik erleben! S. 4-7, Wasser in Wasser wiegt nichts! S. 8-10; Wir bauen eine Brücke! S. 28-32; Physik erleben – eine kommentierte Bibliographie, S. 34-38
- SEIPP, Hanspeter (2002): Die Grundversuchsordnung für die Lichtbeugung an Kanten. *Elemente der Naturwissenschaft* 76, S. 35-50
- SHURCLIFF, William A. (1962): *Polarized light*. Cambridge, Massachusetts: Harvard Univ. Press. Bis heute eine der umfassendsten Monografien zur Polarisation mit über 500 Literaturhinweisen.
- SOMMER, Wilfried, Johannes GREBE-ELLIS & Jürgen VOGT (2004): Zur Beugung. Von einfachen Freihandversuchen über die Laue-Kegel zum reziproken Gitter und zur Ewald-Kugel. *Phydid* 2/3, S. 67-86
- SOMMER, Wilfried (2005): *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege*. Berlin: Logos
- STEINER, Rudolf (1883-1897): *Einleitungen zu den Naturwissenschaftlichen Schriften Goethes*. Vgl. (Goethe 1887).

- STEINLE, Friedrich & Neil RIBE (2002): Exploratory Experimentation: Goethe, Land, and Color Theory. *Physics Today* 7, S. 43-49
- STEINLE, Friedrich (2002a): Das Nächste ans Nächste reihen: Goethe, Newton und das Experiment. *Philosophia Naturalis* 39: 141-172 .
- STEINLE, Friedrich (2002b): *Die Vielfalt experimenteller Erfahrung: Neue Perspektiven*. In: HAMPE, Michael & Maria-Sibylla LOTTER (Hrsg.): *Die Erfahrungen, die wir machen, sprechen gegen die Erfahrungen, die wir haben. Über Formen der Erfahrung in den Wissenschaften*. Berlin: Duncker & Humblot, S. 211-233
- STEINLE, Friedrich (2004): Exploratives Experimentieren. Charles Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten. *Physik Journal* 3 (Nr. 6), S. 47-52
- STOKES, Sir George Gabriel (1852): On the coposition and resolution of streams of polarized light from different sources. *Trans. Camb. Phil. Soc.* 9, S. 399; Wiederabdruck in: *Mathematical and physical papers* (New York: Johnson Reprint Corp.) 3, S. 233-258 (1966)
- THEILMANN, Florian & Georg MAIER (2004): Zur Rolle der Lichtgeschwindigkeit in der modellfreien Optik. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht* 57/7, S. 413-419
- VERHULST, Jos (1994): *Der Glanz von Kopenhagen. Geistige Perspektiven der modernen Physik*. Aus dem niederländischen Manuskript übersetzt von Georg KNIEBE. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben
- WAGENSCHNEIN, Martin (1976): *Die pädagogische Dimension der Physik*. 4. Auflage. Braunschweig: Westermann
- WAGENSCHNEIN, Martin (1995): *Naturphänomene sehen und verstehen: genetische Lehrgänge*. Hrsg. von Hans Christoph BERG. 3. Auflage. Stuttgart: Ernst Klett
- WALKER, M. J. (1954): Matrix calculus and the Stokes Parameters of polarized radiation. *American Journal of Physics* 22, S. 179
- WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von (1941): Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants. *Die Tatwelt* 17, S. 66-98. Wiederabdruck in und zitiert nach (von Weizsäcker 1990, S. 80-117)
- WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von (1947): Das Experiment. *Studium generale* 1, S. 3-9. Wiederabdruck in und zitiert nach (von Weizsäcker 1990, S. 169-183)

- WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von (1978): *Der Garten des Menschlichen*. 5. Auflage. München: Carl Hanser
- WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von (1981): *Einige Begriffe aus Goethes Naturwissenschaft*. Kommentar in: GOETHE, J. W. von: *Werke*, Bd. 13: *Naturwissenschaftliche Schriften I*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, S. 539-555
- ZAJONC, Arthur C. (1976): Goethe's theory of colour and scientific intention. *American Journal of Physics* 44, S. 372-333
- ZAJONC, Arthur C. (1994): *Die gemeinsame Geschichte von Licht und Bewusstsein*. Übers. von Hainer KOBER. Reinbek: Rowohlt