

Phänomenologische Optik: eine „Optik der Bilder“

Teil 2: Polarisisation sehen

von

Johannes Grebe-Ellis

Humboldt-Universität zu Berlin

Zusammenfassung

Im ersten Teil wurde die methodische Blickrichtung einer *Optik der Bilder* charakterisiert. Als Nachtrag dazu werden im vorliegenden zweiten Teil zunächst drei zentrale Ideen der *Optik der Bilder* dargestellt. Anschließend wird die beschriebene Methodik im Phänomenbereich der *optischen Polarisisation* exemplarisch gezeigt. Den Ausgangspunkt dafür bildet das menschliche Polarisationssehen. Unter Berücksichtigung des so genannten *Haidinger-Büschels* werden systematisch die Bedingungen untersucht, unter denen Polarisisation als *Eigenschaft von Ansichten* auftritt. Dabei gliedert sich das Erscheinungsgebiet der Polarisisation in drei charakteristisch unterschiedene Phänomenbereiche, die in Teil III ausführlicher dargestellt werden. Die Skizze eines kleinen Beobachtungskurses zur Polarisisation soll exemplarisch zeigen, welcher Stil des Vorgehens sich für die angestrebte phänomenologische Blickrichtung konkret ergibt. Ein Überblick über die Bedingungen, unter denen das Haidinger-Büschel im menschlichen Auge entsteht, ist als Anhang beigelegt.

Abstract

The first part of this study aimed on the methodological standpoint of phenomenological optics as an *optics of vision*. In addition to this the hereby presented second part introduces the basic concepts of phenomenological optics and shows than how the abovementioned treatment works in the section of *polarization optics*. The starting point is our ability to see polarization as evidenced by the phenomenon of *Haidinger's brush*. Using this I systematically examine the conditions under which polarization appears as a characteristic of sight. The more comprehensive viewpoint categories of elevation and reflection divide polarization into three characteristically differentiated contexts, which are successively examined in the third part of the study. As an example of the phenomenological style of observation the concept of an experimental course is described. The appendix gives a brief statement to physiological aspects of the Haidinger's brush.

1. Optik der Bilder – Basiskonzepte

Im ersten Teil der vorliegenden Studie wurden erkenntnistheoretische und experimentiermethodische Gesichtspunkte einer «Optik der Bilder» an entsprechenden Merkmalen der physikalischen Optik kontrastiert. Wesentlich

war dabei u.a. zu sehen, welche didaktischen Konsequenzen sich aus der Natur des jeweiligen Vorgehens in Hinblick auf spezifische Probleme des Physikunterrichts ergeben. Die dargestellten Gesichtspunkte wurden an einigen Beispielen illustriert. – Welche Gestalt bekommt nun eine Optik, die nicht mehr die Struktur der bekannten Wechselwirkungstypen von «Licht mit Materie» abbildet, sondern die vom Sehen ausgeht und dadurch wesentlich mit Ansichten der Welt zu tun hat, die also «Optik der Bilder» ist?

Eine Darstellung der inzwischen modellfrei¹ erschlossenen bzw. durchgearbeiteten Erscheinungsfelder übersteigt den hier gegebenen Rahmen. Ein Gesamteindruck davon, zu welcher Art von Anschauungsbegriffen man auf dem Weg der *Optik der Bilder* gelangen kann, ist am ehesten dem gleichnamigen Buch von MAIER (Maier 1986) und den in (Maier 2004) zusammengefassten Beiträgen zur Optik sowie dem Unterrichtsleitfaden VON MACKENSENS (von Mackensen & Ohlendorf 1998) und den entsprechenden Kapiteln in (von Mackensen 1992) zu entnehmen.²

Als Abschluss der allgemeineren Darstellung zum methodischen Ansatz der «Optik der Bilder» im ersten Teil sollen hier indessen drei zentrale Grundideen bzw. Basiskonzepte dieses Ansatzes genannt werden. An Beispielen wird gezeigt, wie diese Konzepte im Bedingungsgefüge konkreter optischer Erscheinungszusammenhänge identifiziert werden können. Damit werden zugleich die Voraussetzungen geschaffen, um eine phänomenologische Beschreibung der Polarisation ins Auge zu fassen.

¹ «Modellfrei» wird hier synonym mit «phänomenologisch» verwendet. Der Begriff «Modellfreiheit» wurde von VON MACKENSEN als Arbeitsbegriff eingeführt um darauf aufmerksam zu machen, dass die Beschreibung optischer Gesetzmäßigkeiten keiner quasimechanischer Lichtmodelle bedarf, auch wenn sie historisch – etwa durch HUYGENS und NEWTON – mit mechanischen Analogien begründet wurde (von Mackensen & Ohlendorf 1998). Für eine weitergehende Verständigung erweist sich der Begriff «modellfrei» indessen als ungeeignet, weil erfahrungsgemäß durch eine «Modelldebatte» das Problem, dass zur Frage nach einer phänomenologischen Optik führt, verdeckt wird. Dieses Problem besteht – wie in Teil I der vorliegenden Studie ausgeführt wurde – darin, dass optische Phänomene in der Regel mit dem Verweis auf nichtobservable Größen und Vorgänge erklärt werden. Demgegenüber ist das Ziel einer phänomenologischen Optik im Sinne einer «Optik der Bilder», die Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten optischer Phänomene als *Bedingungen ihres Erscheinens* aufzuweisen. In (Grebe-Ellis 2006 a) habe ich versucht, die Genese der «quasimechanischen Optik» bei HUYGENS ansatzweise nachzuvollziehen.

² Vgl. auch (Julius 1984) und die entsprechenden Kapitel in (Baravalle 1993).

1.1 Seh- und Tastraum

Die Unterscheidung zwischen Seh- und Tastraum ist der Hebel an jegliche Metaphysik in der Optik. Sie stellt den wesentlichen Schritt zur Emanzipation des Sehens gegenüber den primären Qualitäten des Tastraums dar. Sie eröffnet die Möglichkeit, das Reich der «Sehdinge» als einen eigenständigen Phänomenbereich zu erschließen, der keiner weiteren Begründung durch den Rekurs auf Kategorien bedarf, die sich auf Erfahrungen in anderen Sinnesgebieten beziehen und die im Analogieschluss auf die Optik zu hypothetischen bzw. metaphysischen Konstrukten werden.

Wo zeigt sich der Sehraum als reiner Sehraum und wo wird demnach die angesprochene Unterscheidung erforderlich? Dies ist der Fall bei Schatten- und Spiegelbildern, bei den gehobenen und verzogenen Ansichten am Wassertrog, bei Beugungsbildern – überall da, wo optische und haptische Erfahrung auseinander gehen. In der Bildverdopplung am Doppelspat wird das Phänomen selbst für die *Inkohärenz von Seh- und Tastraum* gewissermaßen paradigmatisch (von Mackensen & Ohlendorf 1998, S. 14f).

Die angegebenen Phänomenbereiche unterscheiden sich hinsichtlich der Relation zwischen Seh- und Tastraum, d.h. die *Art*, wie Seh- und Tastraum jeweils auseinander gehen, ist von Fall zu Fall verschieden. Beim Spiegelraum fallen sie auseinander und bleiben durch die Spiegelebene zugleich aufeinander bezogen. Beim Einblick in bzw. bei der Durchsicht durch optisch klare Medien wird das Maß der Inkohärenz von verschiedenen Bedingungen festgelegt wie optische Dichte des Mediums, Blickwinkel bzw. optische Weglänge innerhalb des Mediums etc. Beim Beugungsbild einer Kerzenflamme hat man es mit vervielfachten Ansichten der Flamme zu tun, deren Eigenschaften von der räumlichen Konfiguration des den Blick modifizierenden Spaltes oder Gitters und den Eigenschaften der Lampe (Farbe) abhängt. Solche hier nur angedeuteten unterschiedlichen *Phasen der Inkohärenz* kennzeichnen in hohem Grade das Charakteristische des jeweiligen Erscheinungszusammenhangs. Dies kommt nicht zuletzt in den geometrischen Formulierungen zum Ausdruck, mit denen die Verhältnisse innerhalb des Sehraums zu denjenigen des Tastraums in Beziehung gesetzt werden (Beleuchtungsgesetz, Spiegelungsgesetz, Brechungsgesetz, Fermat-Prinzip).

Ein Beispiel: Der Spiegelraum

Am Spiegel fallen Seh- und Tastraum auseinander. Die unsichtbare Fläche des Spiegels wird zum *Fenster* in einen Raum, der *als Sehraum* dem uns vertrauten, in dem Sehdinge zugleich Tastdinge sind, gleichwertig ist. Die Sicherheit dieses Urteils stützt sich wesentlich auf die Beobachtung, dass sich die Eigenschaften der Sehdinge *vor* dem Spiegel (wo sie noch mit den

Tastdingen zusammenfallen) bruchlos in den Spiegelraum fortsetzen. Dies gilt insbesondere für die Gesetzmäßigkeiten der Parallaxe, durch die räumliche Entfernungen von Tastdingen zum bewegten Auge in Grade der Beständigkeit von Sehdingen im Gesichtsfeld übersetzt werden.³ Die Frage, was der Blick in den Spiegelraum von einem gegebenen Standpunkt aus eigentlich zeigt bzw. wie die Ansicht, die er eröffnet, auf die Welt vor dem Spiegel zu beziehen ist, kann nach einem Vorschlag MAIERS dahingehend beantwortet werden, dass man sich klarmacht: *Was ich als vor dem Spiegel Stehender im Spiegelraum sehe, entspricht genau dem, was mein Spiegelbild im Spiegelraum in dem Raum vor dem Spiegel sieht.*⁴ Die geometrische Formulierung dieser spiegelbildlichen Bedingungsrelation liefert das Spiegelgesetz.

Ein Beispiel dafür, wie weit das «Konzept Spiegelraum» trägt, haben THEILMANN und MAIER mit ihrer modellfreien Analyse des Drehspiegelversuchs nach FOUCAULT zur Messung der Lichtgeschwindigkeit gegeben (Theilmann & Maier 2004). Die konsequente Behandlung aller in dem entsprechenden Versuchsaufbau vorkommenden Komponenten (Lampe, Blende, halbdurchlässiger Spiegel, Drehspiegel, Linse, Endspiegel) gemäß ihrer *optischen* Funktion führt zunächst auf eine Umschreibung des Versuchsaufbaus im Tastraum auf den Sehraum. Das heißt insbesondere: Drehspiegel und Endspiegel sind Fenster in Spiegelräume. Auf diese Weise ergibt sich eine Konfiguration optischer Funktionen entlang der Sichtgeraden von der Lampe aus, deren Länge gerade dem «Laufweg des Lichts» durch den Versuchsaufbau entspricht. Man blickt sozusagen von der Lampe aus auf sein eigenes Spiegelbild in einem (doppelt) gespiegelten Raum. Die Eigenschaften dieser Sichtbeziehung erfahren charakteristische Veränderungen, wenn der Drehspiegel und mit ihm die Spiegelräume zu rotieren beginnen. Es wird gezeigt, dass die modellfreie Deutung dieser Veränderungen bzw. Messergebnisse der üblichen kinematischen Deutung formal äquivalent ist und demnach auf die

³ «Entferntes geht mit, Nahes bleibt zurück.» Vgl. das Erkunden von Verdeckungsordnungen am Beispiel zur Schattenbildung in Teil I dieser Studie, *chim. etc. did.* Nr. 97, S. 115f.

⁴ Vgl. die Hinweise MAIERS und VON MACKENSENS auf die Darstellungen von Spiegelbildern in der Malerei. VON MACKENSEN: „Konrad WITZ (1400-1445), der erste europäische Landschaftsmaler der europäischen Tradition, lässt auf seinem Gemälde *Christopherus* ein derartiges Spiegelgesetz auffindbar werden [...] Die im Wasser gespiegelte Kapelle stellt die Sicht dar, die der vom mitgemalten Mönch aus im Wasserspiegel erblickte Konrad WITZ haben würde, wenn er von unter dem See, wo ihn der Mönch gespiegelt sieht, nach schräg oben auf das Gebäude blicken könnte“ (von Mackensen 1992, S. 86f). Vgl. auch die ausführlichere Besprechung in (Maier 1986, S. 64f).

Vorstellung eines den Raum durcheilenden Lichtes zum Verständnis des Versuchs verzichtet werden kann.

1.2 Zeitliche und räumliche Natur des Sichtbaren

Die Beispiele zur modellfreien Beschreibung der Verhältnisse am Spiegel, bei der Entstehung von Schatten oder innerhalb eines einfachen Beleuchtungszusammenhangs zeigen, dass die jeweiligen Gesetzmäßigkeiten wesentlich *räumlicher* Natur sind. Dies gilt auch für die Bereiche der optischen Abbildung, der Beugung und Interferenz – überall hat man es mit den Eigenschaften strukturierter Räumlichkeit zu tun, die sich geometrisch fassen und mathematisch beschreiben lassen. Die Vorstellung eines von einer Lichtquelle ausgehenden und in den Raum expandierenden Lichtstroms entspricht nicht nur nicht den beobachtbaren Tatsachen; sie geht insbesondere über den spezifisch räumlichen Charakter des Sichtbaren in den genannten Erscheinungen hinweg, indem sie den *Zusammenhang* der Einzelercheinungen nicht als *Begriff* von Licht fasst, sondern durch einen physischen *Prozess* vermittelt sein lässt. Besonders deutlich tritt dies in der Formulierung des *Fermat-Prinzips* als Prinzip *zeitlicher* Optimierung auf («das Licht nimmt den Weg, für den es am wenigsten *Zeit* braucht»). Dabei zeigt gerade die Verallgemeinerung des Prinzips vom Minimal- zum Extremalprinzip, worauf es eigentlich ankommt: auf die Entstehung von Feldern benachbarter Verbindungsstrecken *gleicher optischer Länge*. Diese wird minimal bei der Spiegelung am Wellenberg (Wölbspiegel), maximal bei der Spiegelung am Wellental (Hohlspiegel) (Maier 1975; 1984, S. 163f).

Die *zeitliche Natur des Sichtbaren* kommt in den Blick, wenn man sich von dem Beleuchtungszusammenhang, den z.B. eine Kerze mit den Wänden eines Raums herstellt, abwendet und die Kerze selbst ins Auge fasst. Mit Leuchtvorgängen kommen Stoff- und Energieumsatz in Betracht. «Jede Helligkeit lässt sich zurückverfolgen auf stoffliche oder kosmische Prozesse, von denen sie getragen wird. Wenn wir uns vom Widerschein zur Glut, von der geringeren Helligkeit zum starken Leuchten wenden, gelangen wir in der Tat zu einer Erscheinung, welche nicht auf ihre Beziehung zum sichtbaren Umkreis hindeutet. Der unmittelbare Anblick des Leuchtenden weist uns hin auf Prozesse, welche sich in dessen Erscheinung offenbaren» (Maier 1988, S. 224). MAIER nennt vier typische Eigenschaften solcher Prozesse:

- *«In der Eigenhelligkeit eines glühenden Körpers drückt sich nach Maßgabe seiner Beschaffenheit sein gegenwärtiger Wärmezustand aus.*
- *Völlig schwarze und damit undurchsichtige Körper leuchten in völlig einheitlicher Art bei gleichem Wärmezustand. Im Übergang*

von dunkler Rotglut bis zur blendenden Weißglut machen sie eine Verwandlung ihres Aussehens durch.

- *Die spezifische chemische Beschaffenheit nicht vollkommen durchsichtiger Körper äußert sich in einem unvollständigen Leuchtvermögen.*
- *Eigenleuchten und völlige Durchsichtigkeit schließen einander aus»* (ebd., S. 225).

Die Unterscheidung der zeitlichen von der räumlichen Natur des Sichtbaren hat sich MAIER mit Rücksicht auf die Eigenarten der im jeweiligen Kontext sich zeigenden Erscheinungen ergeben. Er hat ferner darauf hingewiesen, dass die räumlichen Eigenschaften des Sichtbaren (z.B. bei der optischen Abbildung) zu ihrer Beschreibung Gedankenformen verlangen, die Strukturgesetzmäßigkeiten des Raums erfassen (Wellen- bzw. Feldaspekt), wogegen die zeitliche Natur des Sichtbaren (z.B. spektroskopische Fragestellungen) Begriffe verlangt, welche lokalen Prozessen mit Stoff- und Energieumsatz gerecht werden (Quantenaspekt). Damit ist ein weiterer Hinweis darauf gegeben, welcher Art die konzeptionellen Bezüge sind, die zwischen den Ergebnissen der «Optik der Bilder» einerseits und Begriffen der modernen Physik andererseits gefunden werden können.

1.3 Stufen der Bildentstehung

MAIER hat in (Maier 1986 b) Aspekte einer hypothesenfreien Erkenntnis der unorganischen Natur aufgezeigt, die das einzelne Phänomen aus dem Urphänomen ableitet, wie in der Mathematik Sätze aus Axiomen abgeleitet werden. Er bezieht sich dabei auf den strukturellen Aufbau der *Elemente* EUKLIDS und weist darauf hin, dass der axiomatische Aufbau als Darstellungsform u. a. auch in SPINOZAS *Ethik* und in NEWTONS *Optik* verwendet wurde. Im Unterschied zu NEWTON, der seiner Optik zwar den äußeren Anschein einer empirischen Axiomatik gibt, das damit vorgeschriebene methodische Prinzip aber durchgängig durchbricht, arbeitet MAIER heraus, dass gerade ein konsequent hypothesenfreies Vorgehen im Bereich des Unorganischen zu einem System empirischer Grundsätze führt, das insofern einen axiomatischen Charakter aufweist, als jedes noch so verwickelte Phänomen auf elementare, nicht weiter auflösbare Grundtatsachen (Urphänomene) zurückgeführt werden kann.

Wie ein solches *System von Urphänomenen* im Einzelnen zu entwickeln ist, zeigt MAIER in (Maier 1988) am Beispiel der optischen Abbildung als *Stufenfolge optischer Grundsätze*. Diese wird hier skizziert, weil daran die systematische Strukturierung eines klassischen Abgrenzungen übergreifenden

Phänomenbereichs nach Maßgabe in diesem selbst vorgefundener, aufeinander aufbauender Prinzipien exemplarisch deutlich wird.

1. Leuchten als Prozess

Die erste Stufe bildet das Leuchten als rein zeitlicher Vorgang ohne Bezug auf eine räumliche Umgebung (z.B. Anblick einer Kerzenflamme).

2. Leuchtendes und Beleuchtetes – Widerschein

Die zweite Stufe bilden Beleuchtungsbeziehungen einander zugewandter Flächen im Raum. Wechselseitig gilt: Von jedem Ort der einen Fläche ist die Gesamtansicht der anderen Fläche möglich. Für die Beleuchtungsbeziehung zwischen einer Leuchte und der von ihr beleuchteten Fläche kommen der Abstand zwischen beiden und der Grad der gegenseitigen Zuwendung in Betracht. Es gilt: *«Die sichtbare Größe und Helligkeit einer Leuchte, gesehen vom beleuchteten Ort aus, bestimmt ihre Beleuchtungswirkung zusammen mit der sichtbaren Größe der zu beleuchtenden Fläche vom Ort der Leuchte aus»* (ebd.)

3. Das Lochkamerabild als Schattenbild

Die dritte Stufe ergibt sich aus der vorangegangenen als *Steigerung*, indem die Gesamtheit der möglichen Sichtbeziehungen zwischen zwei einander zugewandten Flächen *vermindert* wird: *«Undurchsichtige Körper vor der beleuchtenden Umgebung beschatten die von dieser beleuchtete Fläche. Es kann ein Schattenbild entstehen, welches seinem Umriss nach auf den Schattengeber hinweist. Je mehr eine Fläche sich dunklen Rückseiten zuwendet, umso tiefer werden diese Schatten. Es entsteht ein Innenraum, in welchen die Außenwelt in Schattenbildern eindringt (Höhlengleichnis von Platon). Die Umrisse der Schatten werden mit zunehmendem Abstand des Schattenwerfers unscharf. Der Kernschatten ist von einem Halbschattengebiet umgeben. In diesem tritt die sichtbare Umgebung als Abbild auf der Fläche in Erscheinung auf Kosten des Schattenwerfers»* (ebd.)

Das Lochkamerabild zeigt die sichtbare Umgebung in gleichmäßiger Schärfe; diese nimmt zu, je kleiner die vom Ort des Bildes sichtbaren Ausschnitte der Umgebung werden. Es «entmischen» sich sozusagen unterschiedliche Sichtinhalte bezüglich der Orte im Innenraum, von denen aus sie gesehen werden, je strenger das Kriterium «Auslöschung von Sichtbeziehungen» wirksam wird. Gleichzeitig wird das Schattenbild aber immer dunkler.

4. Sehen auf Abstand – das reelle Bild

Die vierte Stufe ergibt sich, wenn man die Eigenschaften der Sicht- bzw. Beleuchtungsbeziehung, die von der Lochkamerablende zwischen Bildflecken im Außenraum und solchen im Innenraum vermittelt wird, für Blendenöffnungen mit ausgedehntem Querschnitt fordert. Das Prinzip einheitlicher optischer Abstände führt auf die Gestalt der Linse: man gelangt von der *camera obscura* zum Modell des Auges. *«Das fürs Auge aufgefundene Urphänomen des Zustandekommens optischer Beziehungen innerhalb von Raumwinkeln einheitlichen optischen Abstands kann ergänzt werden durch das zugehörige Ausschließungsprinzip: Keine Sichtbeziehung kommt zustande außerhalb der Beziehungen einheitlichen optischen Abstands»* (ebd.) Dementsprechend wird das von einer Lochkamera mit eingesetzter Konvexlinse vermittelte Bild um so deutlicher, intensiver und detailreicher, je größer der Durchmesser der Linse gewählt wird. Es ist zudem auf ganz bestimmte, von der Linsenform abhängige Abstände spezialisiert. Die Linse greift sozusagen aus in den Raum, indem sie zwischen Bildpunkten bestimmten Abstands vermittelt: Das Abbildungsprinzip Punkt-Punkt macht die Kammer leistungsfähig und zugleich abhängig von einer nun erforderlich werdenden Einstellung auf verschiedene Gegenstandsweiten.

5. Transformation in den Richtungsraum – das Beugungsbild

Die fünfte Stufe ergibt sich durch weitere charakteristische Modifikationen der Bedingungen von Sicht: Das durch einen engezogenen Spalt gesehene Flammenbild erscheint unscharf und von weiteren, sich regelmäßig wiederholenden Flammenbildern in Richtung der Spaltbreite begleitet. Diese Bilder werden zu den Seiten der Erscheinung schwächer und immer mehr farbig verbreitert. Die Bedingung für die ausschließende Wirkung, auf welcher die deutliche Abbildung durch die Linse beruht, ist offensichtlich nicht mehr gegeben. Diese setzt eine genügend weite Pupille voraus. Im Übergang vom Durchblick zum *Anblick* des Spalts in nächster Nähe erscheint die Spaltöffnung als klare Begrenzung des nach Umstellung des Auges geweiteten Scheins der Flamme. Die Augenlinse hat das ausgebreitete Beugungsbild in eine andere Erscheinungsform, in das *«Dingbild»* verwandelt. *«Beim Durchblick durch fein gegliederte Blenden auf eine punktförmige Leuchte erscheint deren Beugungsbild. Dieses ist ein reines Sehding und besteht als eine selbständige Erscheinungsform einer räumlichen Gestalt in einem reinen Richtungsraum. Zwischen beiden Erscheinungsformen kann aktuell transformiert werden, indem vom Durchblicken zum Anblicken übergegangen wird. Dann erscheint am Profil der Blende Helligkeit, auch wenn die Blende die direkte Sicht auf die Leuchte verdeckt.*

Mit Hilfe der geeigneten Transformation (explizit der Fouriertransformation) und dem Übergang zum reellen, positiven \langle Erwartungswert \rangle , sowie schließlich der Berücksichtigung der Orientierung des gewonnenen Richtungsraumgebildes und der spektralen Eigenschaft der Punktlampe (Ewald-Kugel), kann das Sehding Beugungsbild aus den Bedingungen seines Entstehens berechnet werden.⁵

Die einzelnen Stufen dieser Folge (vgl. die grafische Darstellung in Abb. 1) und die Übergänge zwischen ihnen lassen sich in Reihen darstellen und vermannigfaltigen. Dies ist für den Übergang zwischen der zweiten und der dritten Stufe mit dem Beispiel aus der Schattenlehre oben skizziert worden. Bei der hier dargestellten Stufenfolge kommt es indessen weniger auf die \langle horizontale \rangle Entwicklung von Funktionszusammenhängen als vielmehr darauf an, dass Prinzipien *aufeinander aufbauen*: bereits bekannte Phänomene erweisen sich als \langle Werkzeuge \rangle , welche weitere Phänomene erschließen (Maier 2005).

1.4 Zusammenfassung

Mit den Hinweisen auf das Konzept \langle Seh- und Tastraum \rangle , auf die \langle zeitliche und räumliche Natur des Sichtbaren \rangle und auf die skizzierte \langle Stufenfolge optischer Grundsätze \rangle sollten Ideen dargestellt werden, die für die \langle Optik der Bilder \rangle , wie sie von MAIER und MACKENSEN entwickelt worden ist, eine zentrale Rolle spielen.

Die Ansätze der genannten Autoren haben insbesondere in der Physikdidaktik eine zunehmende Verbreitung gefunden. Sie sind verschiedentlich fortgeführt, abgewandelt und weiter entwickelt worden. Ein vollständiger Überblick über Arbeiten, die in diesem Zusammenhang zu nennen wären, kann hier indessen nicht gegeben werden. Hingewiesen sei aber auf die Ausarbeitungen zur Hebung und zur Beugung von SOMMER, SEIPP und VOGT, sowie zur Lichtgeschwindigkeit im Kontext der modellfreien Optik von THEILMANN, die sich in ihrem methodischen Vorgehen relativ eng an den oben dargestellten Charakter der \langle Optik der Bilder \rangle anschließen.⁶

⁵ Die Zitate sind dem Artikel *Eine Stufenfolge optischer Grundsätze* entnommen (Maier 1988); vgl. zur 5. Stufe (Beugungsbild) auch (Maier 1981; 1984; Sommer et al. 2004).

⁶ (Seipp 2002; Grebe-Ellis 2002 a; Sommer et al. 2004; Sommer 2005; Theilmann & Maier 2004).

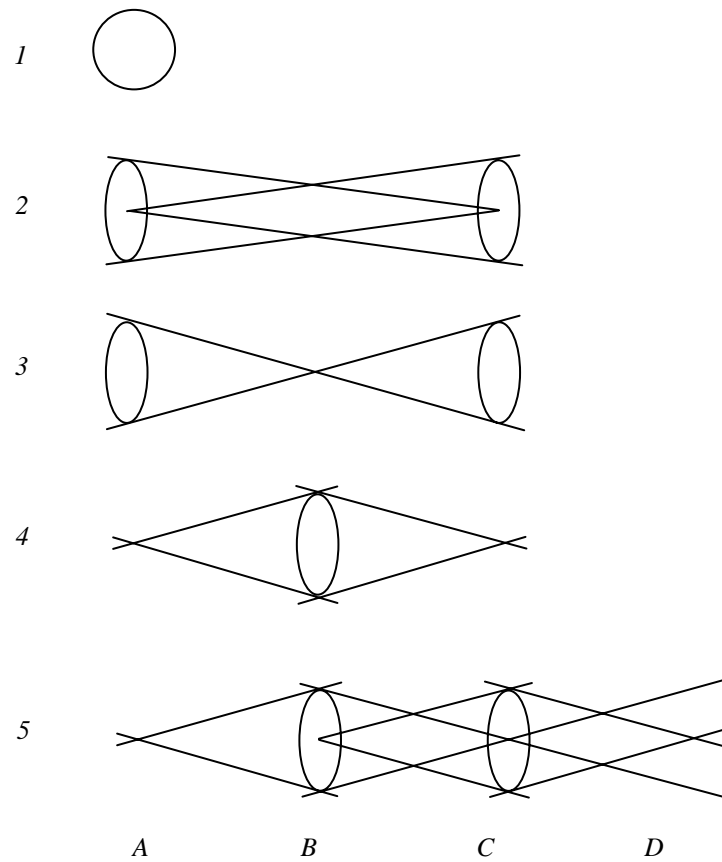
Fünf Stufen der Bildentstehung:

Abb. 1: 1. Unmittelbar angeblickte Fläche. 2. Beleuchtungsbeziehung zwischen zwei Flächen. 3. Lochkamera mit Blende bei B vermittelt zwischen den Raumwinkeln nach A und C. 4. Reelle Abbildung Punkt A – Punkt C über die Konvexlinse in B, deren kreisrunder Querschnitt als Ellipse dargestellt ist. 5. Entstehung und Rücktransformation des Beugungsbildes einer Blende vor B: Punktlampe in A, Konvexlinse in B, reelles Bild der Punktlampe zum Beugungsbild der Blende verwandelt in C. Die Konvexlinse in C transformiert den Ausschnitt des Beugungsbildes auf ihrem als Ellipse dargestellten Querschnitt in ein dementsprechend scharfes reelles Bild der Blende in D.

Innerhalb der Physikdidaktik ist der Ansatz der phänomenologischen Optik am nachhaltigsten und methodisch konsequentesten von SCHÖN und Mitarbeitern aufgegriffen und mit verschiedenen curricularen Schwerpunkten für den Unterricht weiter entwickelt worden.⁷ «Vom Sehen zur Optik» kennzeichnet einen curricularen Rahmen, der von der phänomenorientierten Anfangsoptik bis in die Quantenoptik reicht. Konzeptionelle Schwerpunkte bilden der auf FEYNMAN zurückgehende Zeigerformalismus und das von SCHÖN und ERB entwickelte Lichtwegkonzept, das auf dem Fermat-Prinzip aufbaut.⁸ Gemeinsam ist diesen Konzepten das Bestreben, die einseitige Festlegung der Erklärung optischer Phänomene auf das Wellenmodell des Lichts zu vermeiden und an die Stelle hypothetischer Größen operationale Begriffe (Zeiger, Lichtweg) zu setzen. Die Vorzüge solcher Begriffe werden zum einen darin gesehen, dass sie ein stärker phänomenorientiertes Vorgehen gestatten. Zum anderen können sie «mitwachsen» und verlieren gerade am Übergang von klassischer Physik zu Atom- und Quantenphysik nicht ihre Gültigkeit. Darauf wird insbesondere im Interesse eines vertikal vernetzten Unterrichts immer stärker geachtet (Weber 2003).

1.5 Polarisation im Kontext der «Optik der Bilder»

Zu den Erscheinungen, die für den Zusammenhang der «Optik der Bilder» noch am wenigsten erschlossen sind, gehört die Polarisation. Die phänomenologischen Studien von LOBECK, HOWALD-HALLER und PRÖBSTL enthalten eine Reihe wesentlicher Hinweise und Anregungen. Darüber hinaus bilden die Arbeiten HAIDINGERS zu dem nach ihm benannten Haidinger-Büschel insofern die Grundlage für den Ausgangspunkt einer Phänomenologie der Polarisation, als in ihnen Polarisation als unvermitteltes Gesichtspänomen erschlossen ist. Umfangreiches Beobachtungsmaterial zu nahezu allen wesentlichen Teilbereichen der Polarisation und eine hypothesenfreie Systematisierung desselben findet sich ferner in den naturwissenschaftlichen Schriften GOETHES.

Der Versuch, den im Bereich der Polarisation auftretenden *Typus von Erscheinung* im erkenntnistheoretischen und experimentiermethodischen Kontext der phänomenologischen Optik herauszuarbeiten und den *Gesamtzusammenhang* der Polarisationserscheinungen als einen typischerweise zahl-

⁷ (Schön 1993; 1994; Weber 1999; 2000; 2003; Guderian 2004).

⁸ (Werner 2000), vgl. auch zur Anwendung des Zeigerformalismus in der Oberstufe (Bader 1996). Zum Lichtwegkonzept von SCHÖN und ERB siehe (Erb 1992; 1994; 1995).

reiche Erscheinungsbereiche der Optik *übergreifenden* Phänomenbereich zu charakterisieren, ist indessen bisher nicht unternommen worden.⁹

Fragen, die sich an die Unternehmung eines solchen Versuchs zunächst stellen, sind z.B. folgende: Welche Gesichtspunkte kommen für die Entwicklung einer *Phänomenologie der Polarisation* im Kontext der modellfreien Optik in Betracht? Inwiefern spielen die oben entwickelten Anschauungsbegriffe: «Unterscheidung von Seh- und Tastraum», «zeitliche und räumliche Natur des Sichtbaren» auch im Zusammenhang der Polarisationserscheinungen eine Rolle? Inwiefern können auch hier Bedingungen der Erscheinungen als Bedingungen der Beobachtung erschlossen werden? Welche typischen Beobachtungssituationen ergeben sich bzw. welche Stufen der Einbindung des Beobachters lassen sich unterscheiden? – Als was stellen sich Polarisationsphänomene überhaupt dar, wenn sie nicht zum Nachweis für die transversale Struktur des hypothetischen Lichtwellenfeldes benutzt werden? Was ist im Bereich Polarisation zu *sehen*?

Den Verzicht auf unbeobachtbare Größen auch im Bereich der Polarisation konsequent zu leisten fällt zunächst deshalb besonders schwer, weil die betreffenden Phänomene die Wellennatur des Lichts besonders evident zu zeigen scheinen. Denkt man beispielsweise an das Erlöschen der Durchsicht beim Übergang von parallelen zu gekreuzten «Polarisationsfiltern», so ist die «Sache» doch eigentlich klar: Absorptions- und Durchlassrichtungen der Filter, Schwingungsrichtung des Lichtes – bei Kreuzung «kommt nichts mehr durch». Dass es sich bei dieser Vorstellungsart nicht nur im didaktischen, sondern streng genommen auch im physikalischen Sinne eher um eine Verschleierung als um eine Aufklärung der für das Phänomen in Frage kommenden Bedingungen und Tatsachen handelt, macht man sich in der Regel nicht bewusst. Indessen reichen die angegebenen Begriffe aus, um den Effekt «Auslöschung» physikalisch kontrollieren und technisch nutzen zu können.

In welcher Beziehung das geschilderte Einzelphänomen zu anderen, unter verwandten Bedingungen sich zeigenden Phänomenen steht und welche Gesichtspunkte sich daraus für seine Beschreibung und Einordnung in den größeren Zusammenhang eines bestimmten Typus von Erscheinungen ergibt, bleibt jedoch dunkel. Zu einem gewissen Grad wird dies im Beispiel der gekreuzten Folien von diesen selbst nahegelegt: Die Polarisationsfolie stellt selbst schon das Ergebnis einer kunstvollen Manipulation dar, insofern sie eins der beiden Bilder, die – wie weiter unten gezeigt wird – stets mit dem

⁹ Einzelne Aspekte zu einer solchen «Phänomenologie der Polarisation» wurden bereits in (GREBE-ELLIS 2001 a; 2001 b; 2002 a; 2002 b; 2002 c; 2003; 2005) veröffentlicht.

Auftreten von Polarisation verbunden sind, von vornherein unterdrückt. Mit Rücksicht auf diese Tatsache, auf die der aufmerksame Beobachter nur durch die Abschattung der Durchsicht durch die Folie hingewiesen wird, kann die Folie auch *Doppelbildtrenner* genannt werden. Auch das herkömmliche Nicol-Prisma ist in dieser Hinsicht ein Doppelbildtrenner: das ordentliche der beiden Doppelbilder, die man im Durchblick durch den Doppelspat gewahrt, wird an der nur für das ordentliche Bild vollspiegelnden Kittfläche zwischen den beiden Prismenhälften aus dem Gesichtsfeld herausgespiegelt. Für das andere Doppelbild ist die Fläche durchsichtig. Ursprünglich hat man in diesem Sinne von *zwei* und im optischen Zusammenhang zweier Nicols bzw. Polarisationsfolien folglich von *vier* Bildern auszugehen (vgl. Grebe-Ellis 2005, S. 95-153).

Zunächst wäre also ein Erscheinungszusammenhang aufzusuchen, der diese vier Bilder in ihren urphänomenalen Bezügen zeigt. Von da ausgehend könnte dann nach Bedingungen gefragt werden, unter denen sich einzelne dieser Bilder isolieren lassen, z.B. um Phänomene studieren zu können, die sich in der Beziehung zweier solcher unabhängig von einander isolierter Doppelbilder in besonderer Reinheit zeigen. Man wäre damit bei der klassischen Situation von *Polarisator* und *Analysator* angekommen. Und es wäre deutlich, in wie hohem Maße diese Versuchssituation eben keine elementare, sondern eine bereits abgeleitete und in gewisser Weise künstliche ist.

Statt der einzelnen Folie eine optische Kammstruktur und Filterfunktion bzw. ein «Briefkastenverhalten»¹⁰ anzudichten und mit «Seilwellenanalogen» zu hantieren, um den Nachweis der Wellenhypothese plausibel zu machen, hätte man sich durch die Übersicht über einen größeren Phänomenzusammenhang die Voraussetzungen erworben, für jedes einzelne Phänomen innerhalb dieses Zusammenhangs die Bedingungen seines Erscheinens und seiner Beobachtbarkeit exakt anzugeben.

Damit ist die methodische Blickrichtung der vorliegenden Studie zur phänomenologischen Beschreibung der Polarisation im Kontext der «Optik der Bilder» gekennzeichnet.

¹⁰ Die Analogie soll transportieren: «Briefe nur in Schlitzrichtung einwerfbar.» Vgl. z.B. das Kapitel über Reflexion und Polarisation in *Optik für die Sekundarstufe I* von JUNG (Jung 1979), ferner die Übersicht über Elementarisierungen der Polarisation durch mechanische Analogien in (Rieck 2003, 75ff).

2. Polarisation sehen

2.1 Einleitung

Im Jahre 1844 erschien in den von J.C. POGGENDORF herausgegebenen *Annalen der Physik und Chemie* eine Arbeit mit dem Titel «Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts und der Lage der Polarisationsebene». Darin wurde die Entdeckung eines so genannten *Lichtpolarisationsbüschels* mitgeteilt. Der Autor, Wilhelm Karl HAIDINGER (1795-1871), Mineraloge und Begründer der Geologischen Reichsanstalt in Wien, war bei Untersuchungen zum Pleochroismus von Kristallen auf eine farbige, büschelartige Erscheinung aufmerksam geworden, die sich beim Blick durch dünne Andalusit- und Turmalinplatten erhaschen ließ. In den Doppelbildern des Kalkspats zeigte sich dieses Lichtpolarisationsbüschel ebenfalls. Bemerkenswert erschien dabei, dass die Büschelrichtungen nicht gleich orientiert waren. Sie standen vielmehr *senkrecht* zueinander und zeichneten auf diese Weise die beiden Teilbilder, in denen sie gesehen wurden, durch eine *Richtungseigenschaft* aus. Diese konnte, wie HAIDINGER nachwies, mit der Lage der Polarisationsebene in Zusammenhang gebracht werden (Haidinger 1844).

Mit der Entdeckung HAIDINGERS war eine Erscheinung ins Blickfeld der Optik gerückt, die noch vor jeder Aufklärung ihrer Entstehungsbedingungen anschaubar werden ließ, worauf HUYGENS und NEWTON in ihren Untersuchungen zum Doppelspat mit Begriffen wie «Disposition der Lichtwellen» und «Seitlichkeit der Lichtstrahlen» hingewiesen hatten. Es wäre allerdings zu einfach gewesen, das Lichtpolarisationsbüschel lediglich als Bestätigung für die Transversalität des Lichtwellenfeldes zu verwenden. Vielmehr zeigte sich, dass mit der Beobachtung des *Haidinger-Büschels* ein neues Forschungsfeld eröffnet war. Die weiteren Arbeiten HAIDINGERS wiesen einen empirischen Reichtum auf, der jedem, der bereit war, sich unbefangen darauf einzulassen, einen neuartigen Zugang zu Erscheinungen der Polarisation in Aussicht stellte.¹¹

So ist es verständlich, dass dem Haidinger-Büschel im Kontext einer *Phänomenologie der Polarisation* besondere Bedeutung zukommt. Im Anschluss an einen Überblick über phänomenologische Studien zum Haidinger-Büschel werden das Phänomen selbst und die Umstände

¹¹ HAIDINGERS Beschäftigung mit der Erscheinung des Lichtpolarisationsbüschels währte ein Jahrzehnt. Es erschienen zahlreiche weitere Arbeiten von ihm mit ergänzenden Beobachtungen und anfänglichen Erklärungsversuchen. Die Vielfalt seiner Beobachtungen und Entdeckungen verdient eine gesonderte Würdigung, die hier aber nicht gegeben werden kann. Indessen wird auf einzelne Beobachtungen HAIDINGERS im Folgenden immer wieder Bezug genommen.

beschrieben, unter denen es erscheint. Diese *Bedingungen der Beobachtung* stellen insofern eine zentrale Referenz dar, als sie implizit Erscheinungskontexte erschließen, in denen nach entsprechenden *Bedingungen des Erscheinens* gefragt werden kann. Diese werden explizit in Teil III der vorliegenden Studie beschrieben. Die Bedingungen des Erscheinens spiegeln sich gewissermaßen in denen der Beobachtung, indem das Haidinger-Büschel für die Orientierung innerhalb der sich eröffnenden Topographie von Phänomenkomplexen zu einer Art von «Kompass» wird. Die Bezeichnungen «Festkörperbüschel», «Oberflächen- und «Atmosphärenbüschel» verweisen auf charakteristische Eigenschaften dieser Kontexte, die sich mit Rücksicht auf die jeweiligen Erscheinungsbedingungen des Büschels herausgliedern und ordnen. Dabei ergeben sich auch Gesichtspunkte hinsichtlich der Frage, inwiefern das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen angesehen werden kann.

Mit den vielfältigen physiologischen Bedingungen, die zur Entstehung des Haidinger-Büschels als Kontrastphänomen im Auge führen, hat sich seit den Hinweisen von VON HELMHOLTZ ausführlich die Ophthalmologie beschäftigt. Im Bereich der Augenheilkunde hat das Haidinger-Büschel als Untersuchungs- und Therapiemittel sogar praktische Anwendungen gefunden. In der Physik und insbesondere in der physikalischen Optik hingegen ist das Phänomen immer noch weitgehend unbekannt. Ein knapper Überblick über den Forschungsstand der Ophthalmologie zeigt indessen, dass bei der Entstehung des Haidinger-Büschels im Auge alle für die Polarisationsoptik wesentlichen Elemente zusammenwirken: *Das Haidinger-Büschel erweist sich selbst als Polarisationsphänomen.*

2.2 Polarisationssehen beim Menschen

Von entscheidender Bedeutung für den Ausgangspunkt einer *Phänomenologie der Polarisation* ist die Tatsache, dass das menschliche Auge «Polarisation wahrnehmen» kann. Dass dieses Vermögen in unterschiedlichen Ausprägungen bei Tieren auftritt, ist spätestens seit den Untersuchungen von VON FRISCH bekannt, der die Bedeutung der atmosphärischen Polarisation als Orientierungsfaktor bei den Tänzchen der Bienen nachwies (von Frisch 1949). WATERMAN hat in einer Arbeit von 1975 107 polarisationssensitive Spezies aufgeführt (Waterman 1975). 36 davon – dazu gehören die Bienen – nutzen die Polarisation des blauen Himmels als eine Art «Himmelskompass». Zu den jüngsten Arbeiten auf diesem Gebiet gehören die Untersuchungen von WEHNER zum Polarisationssehen der *Cataglyphis bombycinus*, einer Wüstenameise der Sahara, die sich bei ihren über Hunderte von Metern durch strukturloses Gelände führenden Jagdzügen offenbar an dem mit dem augenblicklichen Sonnenstand verknüpften Polarisationsmuster des blauen

Himmels orientiert (Wehner 1998; 2001). Dass die extrem schwache Polarisation des Nachthimmels in der Beleuchtung durch den Mond bei der Orientierung von Insekten eine Rolle spielen kann, hat eine Gruppe von schwedischen und südafrikanischen Biologen mit einer Untersuchung an einem afrikanischen Mistkäfer, *Scarabeus Zambesianus*, nachgewiesen.¹²

Dass auch dem menschlichen Auge die Fähigkeit des «Polarisationssehens» in einem geringen Maße gegeben ist, wird in den gängigen Lehrbüchern der Optik immer noch vernachlässigt.¹³ In Übersichtswerken zu optischen Phänomenen in der Natur wie beispielsweise den reichhaltigen Sammlungen von MINNAERT (Minnaert 1992) und LYNCH (Lynch & Livingston 1995) bzw. in Nachschlagewerken zur Optik finden sich dagegen zunehmend Hinweise auf die Erscheinung des Haidinger-Büschels. Auch im Kontext der Physikdidaktik wird das Phänomen inzwischen anfänglich aufgegriffen (Rieck 1999, 2003, S. 75ff; Franke 2003).

Erforscht wurde das menschliche «Polarisationssehen» in Anknüpfung an die bis heute wegweisenden Thesen von VON HELMHOLTZ in der Ophthalmologie. Innerhalb des Spektrums entoptischer Eigenschaften, die im menschlichen Auge gefunden wurden, ist die Polarisations sensitivität Teil einer funktionellen Zentralisation der Netzhaut im Bereich der Netzhautgrube (*Fovea centralis*), die für das menschliche Sehen (Fixation) überhaupt von entscheidender Bedeutung ist.¹⁴ Dies hat u.a. dazu geführt, dass das Haidinger-Büschel seit fünf Jahrzehnten mit eigens dazu entwickelten Geräten in quantitativen Korrespondenz- und Fixationsprüfungen sowie in Untersuchungen

¹² Der Käfer beginnt seine Futtersuche bei Sonnenuntergang. Ist er fündig geworden, so formt er mit den Vorderbeinen und seinem Kopf einen Ball aus Dung. Diesen rollt er auf geradem Wege zu seinem Bau. Er orientiert sich dabei an dem Polarisationsmuster des Himmels. Dieses verblasst, je tiefer die Sonne unter den Horizont sinkt. Bei 18° unterhalb des Horizonts ist praktisch keine Polarisation des Himmels durch die Sonne mehr nachweisbar. In mond hellen Nächten – so das Ergebnis der Studie – setzt der Käfer seine Futtersuche mit demselben Orientierungsverhalten fort. (Dacke et al. 2003, S. 33).

¹³ (Hecht 1999), (Gerthsen 1995), (Bergmann-Schäfer 1993), PÉREZ, PEDROTTI et al. Ausnahmen bilden ältere Lehrbücher. So finden sich beispielsweise in *Progress in Optics* (Fiorentini 1966, S. 264) und im *Handbuch der Physik* (Jensen 1928, XIX, S. 105; Szivessy 1928, XX, S. 85) Fußnoten, welche auf das Haidinger-Büschel und diesbezüglich weiterführende Literatur hinweisen. Eine vergleichsweise ausführliche Darstellung ist im *Handbuch für Experimentalphysik*, (Bottlinger et al. 1928, XVIII, S. 418f), enthalten.

¹⁴ Ferner sind insbesondere zu nennen das *Makulachagrin* und die Netzhautschattenfigur (Comberg 1972, S. 367ff) sowie der *Maxwellsche Fleck* (von Helmholtz 1896, S. 568f) und das so genannte *periphere Polarisationsbüschel* (Boehm 1940, S. 143ff).

zur Funktion der Netzhaut im Bereich der *Macula* genutzt wird (Goldschmidt 1950; Comberg 1972; Alexandridis et al. 1995).

Die größte Hürde beim ersten Versuch, das Haidinger-Büschel zu sehen, besteht erfahrungsgemäß in einer der Zartheit der Erscheinung unangemessenen Erwartung und ferner darin, dass es hervorgerufen werden muss, um beobachtet werden zu können. Einige Übung in der Herstellung der erforderlichen Bedingungen und besonders die Erfahrung der spezifischen Kontraststärke, mit der das Büschel erscheint, lassen den Umgang damit bald sicherer werden. Bereits STOKES hat sich mit der relativen Sichtbarkeit des Büschels in verschiedenen farbigen Beleuchtungen beschäftigt und darauf hingewiesen, dass die Erscheinung durch blaue Gläser am deutlichsten beobachtet wird, wogegen sie durch gelbe Gläser kaum mehr auszumachen ist (Stokes 1850, S. 362). Quantitative Untersuchungen bestätigen dies: Nach DE VRIES ist die Sichtbarkeit des Büschels bei einer Beleuchtung mit $\lambda = 460$ nm am besten (de Vries et al. 1953). Weiterhin bedingt ist die Deutlichkeit der Erscheinung von dem Polarisationsgrad der stimulierenden Ansicht: Je höher dieser ist, desto klarer tritt das Büschel hervor. Die untere Grenze liegt nach Messungen von COMBERG bei einem relativen Polarisationsgrad von 50% (Comberg 1972).

2.3 Phänomenologische Studien zum Haidinger-Büschel

Besondere Berücksichtigung hat die Erscheinung des Haidinger-Büschels im Bereich phänomenologischer Forschung erfahren. Hier sind insbesondere die Arbeiten von LOBECK, HOWALD-HALLER und PRÖBSTL zu nennen.

Fritz Lobeck

LOBECK widmet dem Haidinger-Büschel in seinem Buch «Farben anders gesehen» ein eigenes Kapitel (Lobeck 1954, S. 34ff). Er interessiert sich für die Erscheinung im Zusammenhang seiner Untersuchungen zur Farbenlehre GOETHES. Er zeigt, wie sich das Haidinger-Büschel in Hinblick auf seine Farbigkeit und die Bedingungen seines Erscheinens einfügt in die Gesetzmäßigkeiten, die für die Farbentstehung überhaupt zu berücksichtigen sind. Besondere Bedeutung kommt dabei der Helles und Dunkles vermittelnden Trübe zu: Farbe entsteht, wo solche Vermittlung der Fall ist. «Die Farbenlehre kann an der Atmosphäre abgelesen werden.» (Lobeck 1954, S. 34). Der Himmel zeigt die orthogonalen Relationen *seitlich erhellte Trübe vor Dunkel* (Blau) und *beschattete Trübe vor Hell* (Gelb) in allen Variationen sowie mit allen Zwischenstufen. Von der Beobachtung, dass die Himmelsbläue umso tiefer und reiner wird, je weniger trüb die Luft ist, wird LOBECK dazu angeregt, die in der Trübe wirksame Bedingung so zu fassen, dass auch und gerade das völlig *klare* optische Medium als «trüb» angesehen

werden kann. Die Trübe modifiziert demnach die Ansicht dadurch, dass in ihr *Erhellung* und *Beschattung* zugleich gegeben sind. Dies findet LOBECK realisiert im Festen, Flüssigen, Gasigen und im Wärmeartigen, d.h. in den charakteristischen Zuständen des Stofflichen: Als Grundtypen klarer Medien gibt er also an:

klare Flamme

klarste Luft

klarstes Wasser

klarster Kristall

Jedes dieser Medien trübt, d.h. *erhell*t und *beschattet* die Sicht, indem es unter geeigneten Umständen spiegelt und zugleich Durchsicht gewährt. «Die vier Elemente Wärme, Luft, Wasser, Kristall haben die Eigenschaft, *Spiegel* und *Fenster* zugleich zu sein» (Lobeck 1954, S. 61).¹⁵ Dieser Hinweis erweist sich in mehrfacher Hinsicht für die innere Struktur einer *Phänomenologie der Polarisation* von entscheidender Bedeutung. Zum einen ist mit dem Bedingungskomplex «Spiegel und Fenster zugleich» ein exaktes Kriterium für die Polarisation von Ansichten gegeben. Zu zeigen ist hier, wie dieses Kriterium im jeweiligen Zusammenhang wirksam ist. D.h. es ist nach dem gleichzeitigen Auftreten von *Bildern* zu fragen, hier eben *Spiegel-* und *Fensterbildern*, in denen «Erhellung und Beschattung» Dispositionen bewirken, auf welche das menschliche Auge mit orthogonalen Haidinger-Büscheln antwortet. Zum anderen zeigt sich, dass das Gesamtgebiet der Polarisationserscheinungen («Bilder des Stoffs») eine innere Struktur aufweist, die sich aus den verschiedenen Erscheinungsformen des Stofflichen und in Zusammenhang damit durch charakteristisch verschiedene Stellungen des Beobachters bzw. Teilnehmers im Erscheinungszusammenhang auszeichnet. Auf einzelne Beobachtungshinweise LOBECKS zum Haidinger-Büschel gehe ich weiter unten gesondert ein.

Mario Howald-Haller

HOWALD-HALLER wurde durch die oben erwähnte Arbeit von LOBECK auf das Haidinger-Büschel aufmerksam. Seine eigenen Beobachtungen veröffentlichte er in einer phänomenologischen Studie zum Doppelspat

¹⁵ «Man entzünde Spiritus, und die Flamme wird das schönste Blau zeigen. Gegen das Tageslicht gehalten sieht man von der Flamme nichts, nur ein Zittern dahinter befindlicher Gegenstände. Die Flamme ist vollkommen durchsichtig. Luftspiegelungen, welche in Wirklichkeit Spiegelungen in der Wärme sind (vgl. (ebd. S. 11)) gehören zur Kategorie Flamme-Luft. Zum Wasser sind zu zählen auch ölige Substanzen. Zum Kristall (Quarz, Gips, Glimmer, Kalkspat usw.) der Diamant, jedoch auch Glas, insbesondere Flintglas. Und Eis.» (Ebd. S. 61).

(Howald-Haller 1964 a), vgl. (Grebe-Ellis 2005, S. 101f), und in einem längeren Essay mit dem Titel «Licht und Stoff» (Howald-Haller 1964 b). Er griff darin die von LOBECK skizzierten Gesichtspunkte auf und erweiterte den Kreis der betrachteten Erscheinungen. Insbesondere unterschied der drei im Polarisationszustand latente «Phasen des Zusammenwirkens von Licht und Stoff», die sich als Modifikationen des «Schattenden» im Spannungsfeld zwischen Dunkelheit und Farbe ergeben. Im Haidinger-Büschel wirken diese Phasen gleichzeitig. Es erwies sich dadurch für HOWALD-HALLER als eine Art von *sichtbarem Symbol*, d.h. als eine Erscheinung, in der das Verwandtschaftsprinzip einer ganzen Reihe von Erscheinungen selbst anschaulich wird. Er bezeichnete das Haidinger-Büschel deshalb als «Urphänomen der Polarisationserscheinungen».¹⁶

Albert Pröbstl

PRÖBSTL nahm die Bezeichnung des Haidinger-Büschels als «Urphänomen der Polarisationserscheinungen» durch HOWALD-HALLER zum Anlass für eine weit ausgreifende und anfänglich systematisierende Beschreibung der Bedingungen, unter denen das Haidinger-Büschel beobachtet werden kann (Pröbstl 1998). Er hat damit die bisher umfangreichste Übersichtsarbeit zum Haidinger-Büschel vorgelegt. Leitender Gesichtspunkt bei der Anordnung der verschiedenen Erscheinungsbedingungen ist die von LOBECK und HOWALD-HALLER geltend gemachte Tatsache, dass es verschiedene Zustände des Stofflichen sind: gasförmige, flüssige und feste, die das Haidinger-Büschel im menschlichen Auge hervorrufen. Durch die Breite und Ausführlichkeit der Darstellung wird dabei eine wesentliche methodische Eigenart des phänomenologischen Beschreibungsansatzes noch deutlicher als bei HOWALD-HALLER. Sie betrifft die Rolle der *Einheitlichkeit*, die im Rahmen der Wellenoptik *Einheitlichkeit des Begriffs* ist in dem Sinne, dass eine Einheitlichkeit der Erklärung angestrebt wird. Diese ist das Ergebnis einer Reduktion der Erscheinungen auf wellenmechanische Kategorien: Absorption, Doppelbrechung, Reflexion und Streuung kennzeichnen verschiedene Wechselwirkungsformen desselben mechanischen Systems. Demgegenüber liegt der Ausgangspunkt und zugleich das Ziel eines modellfreien Vorgehens in der *Einheitlichkeit der Erscheinung*. Wie PRÖBSTL am Beispiel des Haidinger-Büschels zeigt, ist es *eine* Erscheinung, die in der kontinuier-

¹⁶ Er legt dabei die folgende Definition des Urphänomens von GOETHE zugrunde (Goethe 1897, S. 370): «*Urphänomen: Ideal = real = symbolisch = identisch*
Ideal, als das letzte Erkennbare;
real, als erkannt;
symbolisch, weil es alle Fälle begreift;
identisch, mit allen Fällen.»

lichen Abwandlung ihrer Bedingungen nach allen Seiten hin untersucht und dargestellt wird. Die dabei entstehende Topographie von Bedingungen gliedert sich in die den Elementen verwandte Kontexte: fest, flüssig, und gasförmig.¹⁷ Diese stellen jeweils für sich genommen bereits Phänomenkomplexe dar, innerhalb derer das Haidinger-Büschel als Urphänomen bzw. als «höhere Erfahrung in der Erfahrung» auftritt.

2.4 Das Haidinger-Büschel

Das Haidinger-Büschel ist, ähnlich den farbigen Nachbildern, ein Kontrastphänomen. Es erscheint als Antwort des Auges auf den Anblick einer «linear polarisierten Ansicht»¹⁸ in der Mitte des aktuellen Gesichtsfeldes und hat dort eine Ausdehnung von 2-4°. Nach einer mittleren Verweildauer von mehreren Sekunden (Lokaladaption der Netzhaut) verblasst es und kann durch künstliches Flackern der Ansicht oder eine Änderung der relativen Orientierung zwischen Netzhaut und Polarisationsfolie erneut hervorgerufen werden. Entsprechend der Kreuzsymmetrie der Büschelfigur ist der Kontrast und damit die Deutlichkeit der Erscheinung bei einer relativen Drehung um 90° am stärksten. Blickt man, anstatt den Kontrast durch Drehen der Folie zu erneuern, gegen eine helle Wand und lässt das Auge «ausruhen», so erscheint als *Nachbild* des zuletzt hervorgerufenen und inzwischen verklungenen

¹⁷ Der «Licht-Wärme-Kontext» kommt bei PRÖBSTL nicht vor. LOBECK weist zwar darauf hin, dass auch die Flamme «Spiegel und Fenster zugleich» sei. Offen bleibt aber bei ihm, ob die *Art*, in der diese Bedingung im Licht-Wärme-Kontext gegeben ist, ausreicht, um die Erscheinung des Haidinger-Büschels hervorzurufen, so wie es für die Kontexte des Gasigen, Flüssigen und Festen gezeigt werden kann. Entsprechende Beobachtungen werden jedenfalls weder bei ihm noch bei PRÖBSTL genannt. Es wird aber auch kein Grund angegeben, warum eine solche Beobachtung prinzipiell nicht möglich sein sollte. Ein Hinweis zu dieser Frage wird in Teil III dieser Studie im Abschnitt *Bedingungen des Erscheinens* gegeben. Dort wird herausgearbeitet, dass das Kriterium «Spiegel und Fenster zugleich» in der Art seines Gegebenseins Modifikationen aufweist, je nach dem, um welchen Kontext es sich handelt. Dabei wird im Übergang vom Festen zum Flüssigen und schließlich zum Luftartigen u.a. eine Tendenz zur *Abschwächung* des Kriteriums sichtbar. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welchem Kontext die Polarisationserscheinungen selbst als «Bilder des Stoffes» zuzuordnen sind. PRÖBSTL befasst sich in diesem Zusammenhang mit einem Hinweis STEINERS, der aus den Relationen zwischen den Bereichen des so genannten «Spektrums der Natur» auf ein noch unter dem Gebiet des Festen liegendes, so genanntes «unterfestes» Gebiet schließt, dem er insbesondere die Erscheinungen der Polarisation zuordnet (Steiner 1972, S. 140f), siehe hierzu auch (Auerbach 1998).

¹⁸ Unter einer «linear polarisierten Ansicht» wird hier die Ansicht der Umgebung beim Blick durch ein Nicolprisma oder eine Polarisationsfolie verstanden.

Büschels wiederum ein um 90° dazu gedrehtes. – Bereits beim anfänglichen Versuch, die Erscheinung des Haidinger-Büschels ihrer Form und Farbigkeit nach zu bestimmen, fällt zweierlei auf: Zum einen lässt sich die Erscheinung kaum von den Bedingungen ihres aktuellen Erscheinens trennen. Genau genommen existiert das Haidinger-Büschel immer nur in den Modi des Entstehens und Vergehens. Zum anderen und im Gegensatz dazu steht die Komplexität der Erscheinung hinsichtlich ihrer Farbigkeit und Form und die Beständigkeit derselben bezüglich wechselnder Erscheinungsbedingungen. Die erstgenannten Eigenschaften kennzeichnen das Büschel als *physiologisches*, die letztgenannten als *physikalisches* Phänomen. Eine Vollständigkeit der Beschreibung kann sich nur unter Berücksichtigung beider Gesichtspunkte ergeben. Diese wird hier jedoch bewusst nicht angestrebt. Vielmehr beschränkt sich die folgende, z.T. an PRÖBSTL angelehnte Beschreibung auf Farbe, Farbhelligkeit, Form und Symmetrieeigenschaften der Büschelgestalt.

Die Haidinger-Figur erscheint annähernd kreisförmig und ist in vier etwa gleich große Sektoren gegliedert. Je zwei gegenüber liegende Sektoren erscheinen in *leuchtendem* Blau-Violett, die beiden anderen in *abgeschattetem* Gelb. Die gelben Sektoren haben die Tendenz, sich nach der Mitte zu verjüngen und zu einer Garbe bzw. einem Büschel zusammen zu schließen, das sich nach außen jeweils weitet. Die blauen Sektoren zeigen die polare Tendenz; nach außen zu scheinen sie sich hantelförmig abzuschließen. HAIDINGER spricht von «blauen Räumen». Man könnte auch von zwei gelben und blauen Fächern oder einer «mattgelben Eieruhr» sprechen, die senkrecht zu einer «lichtblauen Hantel» steht. Für die Angabe der Büschellage bezüglich verschiedener Ansichten wird im Folgenden die Richtung der gelben Garbe als *Gelbrichtung* bezeichnet; senkrecht dazu liegt die *Blaurichtung*.

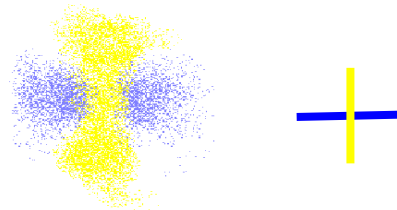


Abb. 2: Das Haidinger-Büschel. Von dem nebenstehenden Richtungsschema mit Gelb- und Blaurichtung wird in den folgenden Abbildungen Gebrauch gemacht.

2.5 Bedingungen der Beobachtung

Das Haidinger-Büschel erscheint als Antwort des Auges auf den Anblick einer stimulierenden Ansicht. Unter welchen Bedingungen sind solche Ansichten anzutreffen? Mit der Beschreibung der folgenden Beobachtungssituationen wird zugleich auf drei für das Erscheinungsgebiet der Polarisation charakteristische Kontexte hingewiesen, mit denen man durch das Haidinger-Büschel bekannt gemacht wird. Die Verwandtschaft dieser Kontexte beruht auf der Gleichartigkeit der Ansichten, die in ihnen aufgesucht werden können und die jeweils zur Erscheinung des Haidinger-Büschels führen. Sie unterscheiden sich aber einerseits durch den jeweils wirksamen *Modus des Stofflichen* und andererseits durch die Art, wie man als Beobachter in den Erscheinungszusammenhang eingebunden ist. Eine ausführliche Darstellung der Kontexte hinsichtlich dieser Gesichtspunkte wird in Teil III dieser Studie im Abschnitt *Bedingungen des Erscheinens* gegeben.

Das «Atmosphärenbüschel»

Das «Atmosphärenbüschel» lässt sich am blauen Himmel erhaschen. Am deutlichsten erscheint es im seitlichen Widerschein der Sonne, d.h. quer zum augenblicklichen Sonnenstand.¹⁹ In diesem Bereich ist das Himmelsblau am dunkelsten und dies umso mehr, je klarer die Atmosphäre ist. Diese Beobachtung sollte vorausgehen: Wie sieht eigentlich der Himmel aus? Am besten legt man sich dazu an einem Ort auf den Rücken, von dem aus man möglichst die ganze Sphäre bis zum Horizont als *ein* Bild im Überblick hat. Steht die Sonne am Horizont und liegt man mit dem Kopf zur Sonne, so gliedert sich die Himmelsansicht etwa folgendermaßen: Über Kopf Richtung Sonne sowie entgegengesetzt über den Füßen ist der Himmel am hellsten und im Vergleich zum übrigen horizontnahen Bereich am stärksten ins Gelbrötliche gehend gefärbt. *Senkrecht* dazu findet man das dunkelste und tiefste Blau direkt über sich im Zenit. Man liegt sozusagen in der Hauptachse eines «atmosphärischen Dichroiten» (Haidinger), der durch seine Symmetrieeigenschaften und komplementäre Farbigkeit selbst ein Abbild des Haidinger-Büschels ist. – Je klarer die Atmosphäre ist, desto dunkler, zuweilen auch grauer erscheint das Blau und desto weiter zieht es sich in einem breiten Band nach rechts und links hinunter bis knapp über den Horizont, wo es vom Dunst aufgehellt wird. Erfahrungsgemäß lässt sich das Haidinger-Büschel im Verlauf solcher und ähnlicher Betrachtungen, also

¹⁹ Von LOBECK stammt der Hinweis, dass die Atmosphäre, den seitlichen Widerschein der Sonne und das dahinterliegende Dunkel im Blau vermittelnd, *Spiegel* und *Fenster zugleich* ist: «Nachts ist die Atmosphäre ausschließlich Fenster» (Lobeck 1954, S. 39, 61).

eher beiläufig, leichter erhaschen, als wenn man zum Aufruf der Erscheinung die gegenüber der einzelnen Himmelsansicht erforderliche Änderung der Netzhautorientierung anstrebt. Dazu neigt man den Kopf abwechselnd und mit Pausen nach links und rechts zur Seite. Für die nötige Kontrastierung genügt in der Regel auch schon der Ansichtswechsel, der sich für den frei wandernden Blick von selbst ergibt.²⁰ Auffallend ist die Deutlichkeit der Erscheinung während der Morgen- und Abenddämmerung, d.h. vor Aufgang und nach Untergang der Sonne. Gewahrt man das Büschel zunehmend sicherer, so erweist es sich als «Himmelskompass»: *Das Atmosphärenbüschel erscheint stets so, dass seine Gelbrichtung auf die Sonne zeigt.*

Das «Oberflächenbüschel»

Das «Oberflächenbüschel» zeigt sich dem schrägen Blick auf die Oberfläche optischer Medien, die *spiegeln* und zugleich *durchsichtig* sind. Jede Pfütze bietet die Gelegenheit dazu. Günstig ist trüber Himmel als Hintergrund im Spiegelbild. Man vergegenwärtige sich, wie sich der Ansicht des Pfützengrundes das abgeschattete Spiegelbild z.B. eines Fassadenausschnitts überlagert, indem man den Akkommodationswechsel zwischen den Ansichten wiederholt. Dies kann wiederum eine den Aufruf des Haidinger-Büschels begleitende und begünstigende Beobachtung sein, der durch Hin- und Herneigen des Kopfes nachgeholfen werden mag. Vom Ufer eines Sees aus erscheint die Figur in einem Bereich, der sich als Halbbogen um den Standpunkt des Beobachters legt. Die Gelbrichtung des Büschels ist dabei stets auf das Auge des Betrachters orientiert. Mit etwas Übung ist es möglich, die Erscheinung im Schrägblick über den ganzen Bogen um den eigenen Standpunkt hinweg zu führen.²¹

²⁰ HAIDINGER schlägt folgende Beobachtung vor: «Sehr schön und lebhaft beobachtet man das Büschel dann auch im Zenit. Man stelle sich mit dem Rücken zur Sonne, blicke fest auf das Zenit und drehe den ganzen Körper, ohne das Zenit aus dem Auge zu verlieren, um 90° oder rechtwinklig herum. Das Büschel bleibt fest in der Richtung der Polarisationssebene durch die Sonne. [...] Die Erscheinung ist bei dieser Beobachtung so lebhaft, dass man fast das Gefühl hat, als bohre man mit den Augen ein Loch in den heiteren Himmel» (Haidinger 1846, S. 75f). HAIDINGER schildert ferner die Beobachtung des Büschels am Regenbogen sowie am Nebelbogen, der den eigenen Schatten auf stark beleuchtetem Wasserdampf umgibt: «Die Büschel erscheinen radial im Bogen, tangential außerhalb oder innerhalb desselben» (ebd. S. 78). Vgl. für Details zur Orientierung des Atmosphärenbüschels die Beobachtungen VON TSCHERMAK-SEYSENEGGS (von Tschermak-Seysenegg 1951).

²¹ LOBECK hat darauf hingewiesen, dass sich im abwechselnden Blick auf die Seiten eines rechtwinkligen Prismas, das man waagrecht von sich weg unter das Auge hält, senkrecht zueinander stehende Büschel hervorrufen lassen. Entscheidend ist dabei,

Das «Festkörperbüschel»

Das «Festkörperbüschel» lässt sich im wechselnden Anblick der Doppelbilder eines Kalkspats hervorrufen. Hierzu ist indessen einige Übung erforderlich. Es erscheint insbesondere auch im Durchblick durch dichroitische Mineralien, beispielsweise dünne Turmalin- oder Andalusitscheiben.²²

Die Ansicht der Umgebung durch eine solche Scheibe erscheint, je nach Varietät, gleichmäßig *gefärbt* und zugleich *abgeschattet*. Dreht man die Scheibe, während man sie unmittelbar vor die Augen hält und gegen einen gleichmäßig hellen Grund blickt, um 90° und verharrt einen Moment, so erscheint das Büschel geradezu leuchtend für einige Sekunden, bevor es matter wird und schließlich wieder verschwindet. Erneutes Drehen bringt die Erscheinung erneut hervor. Man hat die Sache gewissermaßen «in der Hand».

Besonders geeignet für diese Beobachtungen erweisen sich Stücke der gängigen Polarisationsfolie. Mit etwas Übung findet man die Geschwindigkeit, mit der man die Folie drehen muss, damit sich im Durchblick der Kontrast und damit die Erscheinung des Büschels fortwährend erhalten lässt. Dann stellt man fest, dass die Orientierung des «Festkörperbüschels» mit derjenigen der Folie fest verbunden ist: Dreht man die Folie, so dreht sich das Büschel mit.²³ Wie bei den natürlichen Dichroiten steht dabei die

eine Blickrichtung zu finden, unter der die innere Basisfläche des Prismas nicht mehr voll spiegelt, sondern von einem *Grauschleier* überzogen ist. «Dieser tritt dann ein, wenn sie nicht nur spiegelt, sondern gleichzeitig durchsichtig wird, das heißt, wenn das Prisma Spiegel und Fenster zugleich ist. [...] Im *Grau* wird das Haidinger-Büschel augenscheinlich. An jeder Prismenhälfte einmal. Das eine steht senkrecht zum andern» (Lobeck 1954, S. 39).

²² HAIDINGER entdeckte das Büschel bei Untersuchungen an dünnen, senkrecht zur Hauptachse der Kristalle geschnittenen Andalusit- und Turmalinplatten und in den Doppelbildern des Kalkspats (Haidinger 1844, S. 29ff). Dabei zeigte sich, dass die Gelbrichtung des durch die Turmalinscheibe gesehenen Büschels senkrecht zur Hauptachse des Kristalls verläuft. Die Gelbrichtung des im Durchblick durch eine Andalusitscheibe sich zeigenden Büschels liegt dagegen senkrecht dazu, d.h. parallel zur Hauptachse des Kristalls. Damit weisen Turmalin und Andalusit *zusammen genommen* die Polarität der orthogonalen Büschelstellungen in den Doppelbildern des Kalkspats auf: Der Turmalin zeigt die Stellung des außerordentlichen Bildes, Andalusit diejenige des ordentlichen Bildes, vgl. (Grebe-Ellis 2005, S. 119f).

²³ Diese Tatsache ist der Konstruktion von Geräten (*Synoptophor/Synoptometer, Koordinator* nach CÜPPERS u.a.) zugrunde gelegt, mit deren Hilfe Augenärzte Fixationsprüfungen und –therapien am menschlichen Auge durchführen bzw. das monokulare Blickfeld vermessen. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Polarisationsfolie, die vor einer blauen Beleuchtung rotiert und deren Drehfrequenz so gewählt wird, dass der Patient ein gleichbleibend deutliches Haidinger-Büschel rotieren sieht (Cüppers 1956; Johanning 2000).

Orientierung des Büschels in einer Beziehung zur inneren Struktur der Polarisationsfolie: Die Gelbrichtung des Büschels fällt mit der Hauptachse der Folie zusammen, die durch Strecken der Folie bei ihrer Herstellung entsteht.²⁴

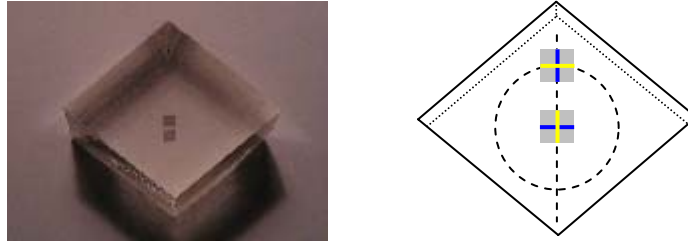


Abb. 3: Aufgehellte Doppelbilder eines schwarzen Quadrats (links); schematische Darstellung der orthogonalen Bündelorientierungen in den Doppelbildern relativ zur Hauptachse des Spats (rechts): Die Gelbrichtung im unverrückt gesehenen (ordentlichen) Doppelbild liegt parallel zum Hauptschnitt, diejenige des verrückt gesehenen (außerordentlichen) Doppelbildes senkrecht dazu.

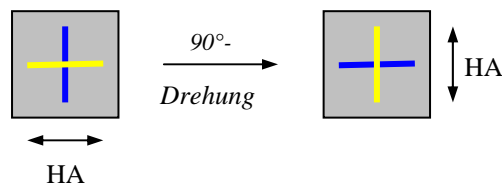


Abb. 4: Das «Festkörperbüschel» im Durchblick durch eine Polarisationsfolie. HA kennzeichnet die Hauptachsenlage (Streckrichtung) der Folie.

Das «Beziehungsbüschel»

HAIDINGER beschreibt eine weitere charakteristische Beobachtung (Haidinger 1844, S. 34f), die folgendermaßen nachvollzogen werden kann: Hält man zwischen sich und ein Stück Polarisationsfolie ein doppelbrechendes Mittel, etwa ein dünnes Glimmerblatt, und dreht dieses senkrecht zur Blickrichtung,

²⁴ HAIDINGER folgte dem Augenschein und bezeichnete die Gelbrichtung als Polarisationsrichtung. Im Rahmen des Wellenmodells ist die Polarisationsrichtung hingegen senkrecht dazu definiert, d.h. parallel zur Blaurichtung des Büschels (vgl. die Lage des «Oberflächenbüschels» relativ zur spiegelnden Fläche).

während die Orientierung der Polarisationsfolie fest bleibt, so erscheint ein Büschel, das der ausgeführten Drehbewegung *vorausleilt* (Abb. 5a). Hält man dagegen das Glimmerblatt fest und dreht stattdessen die dahinter liegende Polarisationsfolie, so dreht sich das erscheinende Büschel in entgegengesetzter Richtung (Abb. 5b). Nach mehrmaligem Probieren stellt man fest, dass das Büschel nach einer Drehung des Glimmerblatts um 90° bereits seine Ausgangsstellung wieder erreicht hat. Dasselbe gilt für die Drehung der Polarisationsfolie mit dem Unterschied, dass das Büschel nicht *doppelt so schnell vorausleilt* sondern *gleichschnell entgegenläuft*.

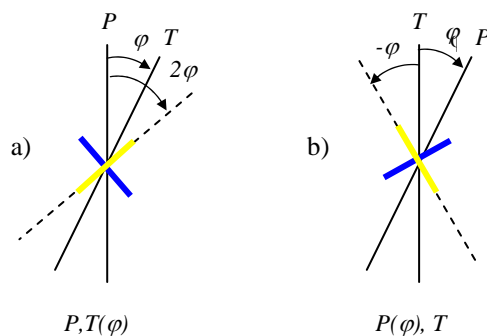


Abb. 5: Das «doppeldrehende» Haidinger-Büschel. P kennzeichnet die Streckrichtung der Polarisationsfolie, T eine Hauptachse des Glimmerblatts.

Das Glimmerblatt, an dessen Stelle auch ein Stück Overhead-Folie oder auch einfache Haushaltsfolie benutzt werden kann, zeigt für sich genommen kein Büschel. Dieses tritt erst auf, wenn durch das doppelbrechende Mittel hindurch auf die dahinterliegende Polarisationsfolie geblickt wird. Dann gilt: Der Winkelabstand zwischen dem «Festkörperbüschel» der Polarisationsfolie und demjenigen Büschel, welches beim Blick durch das Ensemble Glimmerblatt-Polarisationsfolie gesehen wird, ist stets *doppelt so groß wie der ausgeführte Drehwinkel*. Das doppeldrehende Büschel ist also nur noch mittelbar korreliert mit der räumlichen Orientierung *eines* Festkörpers. Es ist vielmehr eine sichtbare Funktion der *Beziehung* zwischen den räumlichen Orientierungen *zweier* Festkörper (hier Glimmerplatte und Polarisationsfolie). Aus diesem Grund wurde der zunächst etwas fremd klingende Name «Beziehungsbüschel» vorgeschlagen.

Eine weitere Beobachtung betrifft die unterschiedliche *Sichtbarkeit* des Büschels. Diese hängt von der Dicke des jeweils gewählten doppelbrechenden Mediums ab. Unter guten Beobachtungsbedingungen (z.B. Blick aus

einem eher dunklen Raum an einen hellgrauen Himmel) kann man ferner bemerken, dass die Intensität des Beziehungsbüschels während seiner Drehung schwankt: Besonders leuchtend tritt es in den Diagonalstellungen der Hauptachsen hervor; eher blass ist es dagegen in den Kreuz- bzw. Parallelstellungen.²⁵

Die geschilderten Situationen geben Beispiele für die Beobachtung des Haidinger-Büschels.²⁶ Gleichzeitig werden mit ihnen implizit drei Phänomenbereiche vorgestellt, welche das gesamte Gebiet der Polarisations-

²⁵ Hier entsteht die Frage, ob die beschriebenen Unterschiede in der Sichtbarkeit des Büschels durch das doppelbrechende Medium auf einen *Verlust* oder eine *Modifikation* des in der Ansicht wirksamen Polarisationszustandes hindeuten. Die Schwankungen in der Sichtbarkeit des Büschels bei *einer* gegebenen Folienstärke für unterschiedliche Orientierungen spricht dafür, dass es sich um eine Modifikation handelt. – Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Polarisationszuständen wird erforderlich (vgl. die operationale Definition linearer, elliptischer und zirkularer Polarisationszustände in (Grebe-Ellis 2005, S. 201-224)).

²⁶ Zu nennen ist ferner insbesondere die Drehung des Büschels durch optisch aktive Stoffe wie z.B. Quarz (Pröbstl 1998, S. 14f). SHURCLIFF hat die Identifikation *zirkularer* Polarisationszustände mit Hilfe des Haidinger-Büschels beschrieben (Shurcliff 1955, S. 399). Demnach soll im Blick durch einen Rechtszirkularpolarisator ein Büschel hervorgerufen werden können, dessen Gelbrichtung von links unten nach rechts oben zeigt und das diese Orientierung unter Drehungen des Polarisators beibehält. Es ist mir nicht gelungen, diese Beobachtungen zu reproduzieren bzw. ihre Bestätigung in der Literatur zu finden. Meine eigenen Beobachtungen habe ich mit einer Kombination aus Polarisator und $\lambda/4$ -Phasenplatte durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass man die optische Wirksamkeit der Phasenplatte durch Veränderung ihrer relativen Orientierung zum Polarisator variieren und so die Elliptizität des Polarisationszustandes zwischen *linear* (Parallel- bzw. Kreuzstellung) und *zirkular* (Diagonalstellung) stufenlos einstellen kann (der *zirkulare* Polarisationszustand einer Ansicht zeichnet sich dadurch aus, dass deren Helligkeit invariant unter Drehungen eines Linearanalysators bleibt). Das Ergebnis der Beobachtungen mit dieser Anordnung war, dass mit zunehmendem Winkel zwischen der Polarisationsrichtung (Blaurichtung) des Polarisators und der Hauptachse der Phasenplatte, d.h. mit zunehmender Elliptizität, das erscheinende Festkörperbüschel zwar mitdrehte, aber immer schlechter sichtbar war. In der beidseitigen Umgebung der Diagonalstellung (*zirkular*) war es schließlich überhaupt nicht mehr zu sehen. Mit verdoppelter Phasenplatte ($\lambda/2$) ließ sich dagegen in der Diagonalstellung ein gut sichtbares Büschel hervorrufen, dessen Orientierung allerdings gegenüber dem Festkörperbüschel des Polarisators um 90° *gedreht* war, was auch zu erwarten ist, da die $\lambda/2$ -Phasenplatte den linearen Ausgangszustand in den gekreuzt linearen transformiert. Zu diesen Ergebnissen ist auch SHUTE gekommen, der die entsprechenden Versuche mit hundert Probanden durchgeführt hat (Shute 1974, S. 163f). Er hat insbesondere noch die transformierende Wirkung der Hornhaut mit berücksichtigt und durch optische Kompensation mit verschieden dicken Phasenplatten bestimmen können.

erscheinungen exemplarisch charakterisieren: Atmosphärische Trübe, Oberflächen durchsichtiger Medien, dichroitische und doppelbrechende Medien. Die unterschiedlichen Bezeichnungen des Haidinger-Büschels sollen darauf hinweisen. Inwiefern diese Bereiche aus verschiedenen Zuständen des Stofflichen hervorgehen und sich mit Rücksicht darauf durch die Phänomenkomplexe *gasig*, *flüssig*²⁷ und *fest* beschreiben lassen, wird in einer Erörterung der jeweiligen Bedingungen und ihrer geometrischen Eigenschaften im folgenden Abschnitt herausgearbeitet. Das dort Entwickelte vorwegnehmend könnte man zusammenfassend sagen: *Die Erscheinungsbedingungen des Haidinger-Büschels zeigen sich in drei Modifikationen: als Eigenschaft des Gasigen, des Flüssigen und des Festen.*

Jeder Erscheinungszusammenhang, in dem die Voraussetzungen für die Erscheinung des Haidinger-Büschels gegeben sind, lässt sich mehr oder weniger eindeutig mit einem dieser drei Phänomenbereiche identifizieren: Jedes Haidinger-Büschel ist entweder Festkörper- oder Oberflächen- oder Atmosphärenbüschel. – Das *doppeldrehende Beziehungsbüschel* geht aus den genannten drei Büscheltypen durch Modifikation der jeweiligen Ansicht hervor. Die oben beschriebene Erzeugung durch die Modifikation einer Ansicht, die für sich genommen ein Festkörperbüschel zeigt, ist in diesem Sinne nur eine von drei Möglichkeiten – diejenige, welche am stärksten *abgelöst* ist. Sie wurde zunächst gewählt, weil hier die Beobachtung des Beziehungsbüschels am leichtesten gelingt und die geometrischen Bedingungen der Doppeldrehung einfach zu überschauen und zu handhaben sind.

²⁷ Die Bedingung «Spiegel und Fenster zugleich» ist natürlich auch an den Grenzflächen fester Medien realisierbar, wie das Beispiel von LOBECK mit dem Prisma zeigt. Die Zuordnung «flüssig» wird verständlich, wenn man sich klarmacht, dass im Phänomenkontext des Flüssigen die Grenzfläche als Niveaufläche im Schwerfeld der Erde das einzige sich von selbst einstellende Gestaltmerkmal ist. Der Festkörper hat bis auf die Kugel immer mehrere Flächen; er schließt ein eigenes Volumen gegen seine Umgebung ab. Insofern ist das charakteristische Gestaltmerkmal des Festen die Abgeschlossenheit und Absonderung gegenüber der Umgebung. Die Flüssigkeit nimmt in der Ausbildung ihrer Niveaufläche Bezug zum Ganzen der Erde auf. Der Abschluss zu einem eigenen Volumen ergibt sich hier über die Gesamtheit des Flüssigen auf der Erde. Im konkreten Erscheinungszusammenhang des Flüssigen ist das charakteristische Gestaltmerkmal aber nicht dieser Abschluss, sondern die annähernd ebene Niveaufläche bzw. Grenzfläche. In diesem Sinne befindet man sich auch gegenüber einem Festkörper im Kontext des Flüssigen, wenn man die Betrachtung auf eine seiner Grenzflächen beschränkt. Auf den Phänomenkomplex «Grenzfläche», der in optischer Hinsicht durch die *Proportion* zweier Stoffe festgelegt ist, kommt es bei der Beobachtung des Oberflächenbüschels aber gerade an. – Zur Aktualisierung der aristotelischen Elementlehre im Kontext der Phänomenologie siehe (Steiner 1972, Maier 1970; Böhme & Böhme 1997).

Etwas mehr Übung erfordert es dagegen, das Beziehungsbüschel aus der Modifikation von Ansichten hervorgehen zu lassen, die für sich genommen ein Oberflächen- bzw. ein Atmosphärenbüschel zeigen.

3. Kleiner Beobachtungskurs zur Polarisierung

Material: Stücke von Polarisationsfolie²⁸, Fensterglas und schwarzer Pappe, alle ca. 10 x 10 cm

3.1 Vorbemerkung

Im Folgenden wird ein kleiner Experimentalkurs skizziert, der mit der «Entdeckung» des Haidinger-Büschels beginnt. Der Kurs stellt eine von mehreren Möglichkeiten²⁹ dar, das Thema Polarisierung phänomenologisch zu behandeln. Als besonders geeignet hat er sich zur *Einführung* in das Gebiet erwiesen – unabhängig davon, ob es sich bei der Zielgruppe um Oberstufenschüler, Lehramtsstudenten oder Lehrer im Rahmen einer Fortbildung handelte. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass für den Kurs kein Vorwissen erforderlich ist. Im Gegenteil: erfahrungsgemäß erweist sich das Vorwissen, das Schüler, Studenten oder Lehrer über Polarisierung mitbringen, eher als Hindernis, die für eine genaue und vorurteilslose Beobachtung erforderliche Unbefangenheit aufzubringen.

Der Kurs ermöglicht eine hohe Selbstbeteiligung: Die Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten, die sich aus den Bedingungen und Verwandtschaftsverhältnissen der betrachteten Phänomene herauslesen lassen, werden nur dann als evident und tragfähig erlebt, wenn die sie stützenden Beobachtungen *selbst* gemacht wurden. Daran schließt sich ein weiteres methodisches Merkmal des Kurses an: die Nähe zu den Phänomenen. Damit ist weniger gemeint, dass viel experimentiert und beobachtet wird, dies wird vorausgesetzt; vielmehr ist auf eine *Denkhaltung* gedeutet, die sich durch Sensibilität für die Unterscheidung zwischen Beobachtbarem und Hinzugedachtem auszeichnet. Alles Spekulieren über hinter den Phänomenen anzunehmende Ursachen wird in diesem Sinne als Entfernen von den Phänomenen verstanden.

Ein weiterer Aspekt, der von manchem vielleicht als Nachteil, möglicherweise sogar als grundsätzliches Hindernis gegen die Durchführbarkeit des Kurses geltend gemacht wird, betrifft die Geduld, die erforderlich wird und

²⁸ Ich beziehe Polarisationsfolie mit den Maßen 60 x 80 cm bei Peter Wenger (www.wenger-lehrmittel.de) und schneide mir daraus die benötigten Stücke zurecht.

²⁹ Andere Zugänge beispielsweise über eine Untersuchung des Doppelspats oder über die Transformation von Polarisationszuständen sind in (Grebe-Ellis 2005) und (Grebe-Ellis 2006 b) dargestellt.

damit den Zeitaufwand: In dem Moment, in dem nicht mehr nur theoretisch antizipiert, sondern von jedem selbst praktisch getan werden darf, treten neben den kognitiven auch die affektiven und handlungsbezogenen Dispositionen der Beteiligten zutage und die unterscheiden sich oft signifikant. Unterschiede in der Geschicklichkeit und der sinnlichen Auffassungsgabe machen Übphasen erforderlich; erfahrungsgemäß ist damit aber auch eine Voraussetzung gegeben, tiefergehend mit Phänomenen vertraut zu werden, diese auch *miterlebend* zu verstehen. Derjenige, der in der Berücksichtigung und Förderung solcher Aspekte von Lernen ein didaktisches Ziel sehen kann, wird die Berechtigung eines dafür erforderlichen größeren Zeitaufwands nicht in Frage stellen.

3.2 Schritte ins Gebiet der Polarisierung

1. Schritt: Jeder bekommt ein Stück Polarisationsfolie. Die Beteiligten werden aufgefordert, durch die Folie an den hellen Himmel, an eine weiße Wand oder gegen einen andersartigen hellen Grund zu schauen und mit der Folie rasche Drehungen um jeweils 90° auszuführen. Nach jeder Drehung möge eine kurze Pause erfolgen, dann werden die ersten auf eine gelbe «Hantel» oder «Acht» aufmerksam geworden sein, die infolge der Foliendrehung in ihrem Gesichtsfeld erscheint und im Verlauf der Pause zwischen zwei Drehungen wieder verklingt. In der Regel dauert es nicht lange, bis alle Beteiligten das Haidinger-Büschel zum erstenmal erhascht und anfängliche Sicherheit im Hervorrufen desselben gewonnen haben. Der Verständigung über Farben und Formen, die nicht zu endgültigen Einigungen führen muss, kann die Frage nach der Orientierung der Figur folgen. In diesem Zuge wird es erforderlich, Bezeichnungen und Sprechweisen einzuführen: Garbe, Büschel, Gelbrichtung, Blaurichtung etc. Die Antworten auf die Frage nach der Orientierung solcher Richtungen stiften zunächst Verwirrung. Dies kann zu dem Vorschlag führen, die Drehgeschwindigkeit der Folie der Abklinggeschwindigkeit der Erscheinung anzupassen, d.h. gerade so schnell zu drehen, dass die Erscheinung fortwährend im Gesichtsfeld erhalten bleibt. Wem dies gelingt, für den ist sofort evident: die Figur dreht sich mit. Ihre Orientierung ist offenbar fest mit derjenigen der Folie verbunden. Dies führt dazu, dass «Gelbrichtung» und «Blaurichtung» als Eigenschaften der Folie betrachtet werden können und es erhebt sich die Frage, um was für eine Folie es sich überhaupt handelt? Die Frage soll hier aber nicht wie üblich durch Verweise auf Vorstellungen beantwortet werden, deren tatsächlicher Bezug auf die vorliegenden Beobachtungen dunkel bleibt, sondern operational, d. h. durch diejenigen beobachtbaren Veränderungen, welche sich im Durchblick

durch die Folie an verschiedenen Ansichten im weiteren Verlauf ergeben.³⁰ Dies führt auf die nächste Beobachtung.

2. *Schritt*: Die Beteiligten werden aufgefordert, sich paarweise einander zuzuwenden, sich durch ihre Folienstücke anzuschauen und dabei die Orientierung ihrer Folie zu ändern. Sie erfahren dabei, wie sich in Abhängigkeit von der relativen Orientierung ihrer Folien die Durchsicht durch diese verdunkelt, aufhellt – ja sich für eine bestimmte, ausgezeichnete Stellung der Folien zueinander sogar vollständig auslöschen lässt, so dass das Ensemble der beiden halbtransparenten Folien wie ein *undurchsichtiger Körper* wirkt. Die Überraschung über diese einfache und zugleich abgründige, fast unheimlich anmutende Erscheinung ist erfahrungsgemäß groß und es ist nicht leicht, den sich geltend machenden Erklärungsreflexen mit Begriffen wie Schwingungs- und Durchlassrichtung etc. zugunsten des Phänomens standzuhalten. Dies gelingt am besten dadurch, dass man nach den geometrischen Bedingungen fragt, unter denen sich die Durchsichtigkeit des Ensembles zweier Folien wandelt. Als Verständigungshilfe bieten sich die Orientierungen der je zugehörigen Haidinger-Büschel an. Dies kann dann zu der folgenden Regel führen: Sind die Haidinger-Büschel der beiden Folien *parallel*, ist mit Rücksicht auf die doppelte Abschattung des Gesichtsfeldes die Durchsichtigkeit des Ensembles *maximal*. Sind dagegen die Haidinger-Büschel der beiden Folien *überkreuz*, so ist die Durchsichtigkeit des Ensembles vollständig *aufgehoben*. Zwischenstellungen ergeben Zwischenstufen in der Durchsichtigkeit

3. *Schritt*: Es erhebt sich die Frage, ob und wenn wo es weitere Ansichten in unserer Umgebung gibt, auf die unser Auge mit dem Haidinger-Büschel antwortet. Mit Rücksicht auf den 2. *Schritt* können wir auch nach Ansichten fragen, die, wenn sie durch eine Polarisationsfolie betrachtet werden, in Abhängigkeit von der Stellung derselben Helligkeitsänderungen zeigen, also gewissermaßen empfindlich sind bezüglich der Orientierung unserer «Prüffolie». Wir sehen uns also um, begeben uns auf einen Spaziergang, auf

³⁰ Der Einstieg mit einem Satz Polarisationsfolien ist einfach und deshalb für den Anfang mit einer Gruppe geeigneter als der Einstieg mit einem einzelnen Nicolprisma, das herumgereicht werden muss und zudem das Gesichtsfeld vergleichsweise stark einschränkt. Gegen die Polarisationsfolie spricht allerdings aus didaktischer Sicht, dass sie verbirgt, was am Nicolprisma noch unmittelbar nachvollzogen werden kann: dass man es ursprünglich mit zwei Bildern: Doppelbildern eines Urbildes zu tun hat, die erst getrennt werden müssen, bevor man zu Beobachtungen der beschriebenen Art übergehen kann. Dies wird hier in Kauf genommen. Wie in Anknüpfung an die im Folgenden vorgestellten Beobachtungen das Urphänomen der Bildverdopplung als Voraussetzung von Polarisation entwickeln werden kann, wurde exemplarisch in (Grebe-Ellis 2005; 2006 b) dargestellt.

dem wir die verschiedensten Ansichten unserer Umgebung unter Ausführung unserer Prüfbeobachtung (Drehen der Prüffolie) erkunden. Wir bemerken auf diesem Wege z. B., dass sich die Spiegelungen in den Fensterscheiben des gegenüber liegenden Hauses zum Verschwinden bringen lassen und wir so ungehindert durch die Fenster ins Hausinnere blicken können. Lassen wir dabei unseren Blick auch noch eine horizontale Fensterreihe entlang schweifen, so dass wir zwischen flacheren und steileren Blickwinkeln auf die Fensterscheiben variieren, so kommen wir zu der Feststellung, dass sich die Spiegelbilder nicht unter allen Blickwinkeln gleich gut zum Verschwinden bringen lassen, dass es vielmehr einen bestimmten Winkel mäßiger Schräge gibt, unter dem die Auslöschung der Spiegelungen maximal erscheint. Geht man von diesem Winkel zu flacheren bzw. steileren über, nimmt die Auslöschbarkeit der Spiegelbilder unter Drehungen der Folie ab. Was ist das für ein Winkel? Wovon hängt er ab? Mit ihm kommt offenbar eine geometrische Bedingung ins Spiel, die den *Grad der Auslöschbarkeit* bestimmt. Weitergehende Beobachtungen dazu könnten z. B. zu einer genaueren Untersuchung dieses Winkels führen im Vergleich von Glas und Wasser als Spiegelfläche etc. Eine andere Spur, die man verfolgen könnte, hat sich vielleicht durch die eher beiläufig gemachte Entdeckung eröffnet, dass auch der polierte Betonboden, eine hölzerne Tischfläche, ein Buchrücken aus Leder und selbst die eigene Handfläche im schrägen Aufblick ein Schein, Glänzen oder Schimmern zeigen, das sich gegenüber Drehungen der durchblickten Prüffolie als auslöschbar erweist.

4. *Schritt*: Wenn sich die Spiegelansichten in spiegelnden und zugleich durchsichtigen Grenzflächen wie Glasscheiben oder Wasserflächen gegenüber unserer Prüffolie verhalten wie die Durchsicht durch eine Polarisationsfolie, so müssten wir erwarten dürfen, dass auch die Spiegelansicht unter Berücksichtigung der Winkelbedingung in der Lage ist, in unserem Auge ein Haidinger-Büschel hervorzurufen. Die Überprüfung dieser Vermutung erscheint zunächst etwas umständlich: müssen wir doch die Drehung, der es bei der Folie bedurfte, um unser Auge zur Erzeugung der Büschelerscheinung zu reizen, jetzt gegenüber der ruhigen Wasserfläche eines Teiches, an dessen Ufer wir uns beispielsweise begeben haben, selbst ausführen. Wir neigen dazu den Kopf von links nach rechts und zurück und blicken dabei unter einem Winkel mäßiger Schräge ins Spiegelbild einer gleichmäßig hellen Wolke. Wer sich zu dieser Beobachtung genauer der Lage des bevorzugten Winkels versichern will, kann dies mithilfe der Prüffolie tun und die Blickrichtung suchen, unter der sich das Spiegelbild der hellen Wolke ganz auslöschen lässt. In der Zwischenzeit wird anderen bereits das Hervorrufen des Haidinger-Büschels gelungen sein; die Freude darüber, dieser zarten und flüchtigen Erscheinung unter neuen und ganz anderen Bedingungen so zuverlässig wieder ansichtig zu werden, kann einen selbst überraschen.

Sogleich aber erhebt sich die Frage nach der Orientierung dieses «Oberflächenbüschels». Diese zeigt sich schwankend und im Mittel so, dass die Gelbrichtung auf den Betrachter weist und folglich die Blaurichtung parallel zur Wasserfläche erscheint. Dies haben wiederum jene zu prognostizieren gewagt, die sich der Winkelbedingung mit der Prüffolie versicherten, indem sie feststellten, dass das «Festkörperbüschel» der Prüffolie im Falle maximaler Auslöschung des Spiegelbildes eine zur Wasserfläche parallele Gelbrichtung zeigte. Sollte auch hier die für die Relation zwischen Polarisationsfolien aufgestellte Regel der Auslöschung des Bildes für orthogonale Haidinger-Büschel gelten (2. Schritt), so war die gefundene Lage des zur Spiegelansicht des Himmels gehörenden Oberflächenbüschels auch zu erwarten.

5. *Schritt*: Die nächste Überraschung zeigt sich im Blick durch die Prüffolie in den blauen Himmel. Auch hier erzeugen wir durch geeignete Drehung der Prüffolie eine Abdunkelung der Ansichten. Der Empfindlichkeitsgrad verschiedener Himmelsansichten bezüglich solcher Foliendrehungen ist allerdings nicht überall gleich groß. Das ganze Himmelsgewölbe ist also zu untersuchen und alsbald zeigt sich, wie mit der Beleuchtungsrichtung der Sonne eine an das Haidinger-Büschel selbst erinnernde Symmetrie in diese Gesamtansicht kommt: die Abdunkelbarkeit der Ansichten nimmt mit zunehmendem Winkelabstand von der Sonne zu, bis sie bei 90° , also quer zur Sonne geblickt, maximal wird. An manchen Tagen hat es den Anschein, als würde es gelingen, in diesem Bereich, in dem das Himmelsblau bei genügendem Abstand vom Horizont am tiefsten und dunkelsten wird, die Ansicht durch Drehung der Prüffolie vollständig auszulöschen. Vergrößert man den Winkelabstand zur Sonne über die Querbeziehung zur Beleuchtungsrichtung hinaus, so nimmt die Empfindlichkeit der Himmelsansichten gegenüber der Prüffolie wieder ab.

6. *Schritt*: Wie im 4. Schritt gegenüber den Spiegelansichten vermuten wir auch gegenüber den Himmelsansichten, dass die Verwandtschaft, welche diese bezüglich ihrer Abdunkelbarkeit durch eine Prüffolie mit der Ansicht durch eine Polarisationsfolie (1. Schritt) zeigen, zu der Annahme berechtigen, dass auch sie ein Haidinger-Büschel im Auge hervorrufen können. Diese Beobachtung ist erfahrungsgemäß zunächst nicht leicht. Sie erfordert wieder die bereits bewährte Kopfeigetechnik. Quer zur Sonne zeigt sich das «Atmosphärenbüschel» am leuchtendsten und umso intensiver, je niedriger die Sonne steht. Am leichtesten gewahrt man es, wenn man den Blick vor Sonnenauf- und nach Sonnenuntergang frei über den wolkenlosen Himmel wandern lässt. Die Feststellung, dass die Blaurichtung der Prüffolie in der Stellung maximaler Abdunkelung der Himmelsansicht stets zur Sonne zeigt, legt unter der Voraussetzung, dass auch hier die Regel: maximale Abdunkelung in Kreuzrelation der jeweiligen Haidinger-Büschel, gilt, die Vermu-

tung nahe, dass die «Atmosphärenbüschel» wie «Himmelskompass» mit ihrer Gelbrichtung auf Großkreisen durch die Sonne liegen. Dies wird durch entsprechende Beobachtungen bestätigt und mancher wird dadurch an Berichte über die Fähigkeit von Bienen und bestimmten Ameisen erinnert, eine Art von Polarisationsmuster am Himmel zu sehen, das die räumliche Orientierung gestattet.

7. *Schritt*: Ob auf dem bisherigen Weg alle Arten von Ansichten bekannt geworden sind, auf welche das menschliche Auge mit der Erscheinung des Haidinger-Büschels antwortet, oder ob es mehr als diese drei gibt: Durchblicke durch Folien, Spiegelbilder und Ansichten der quer durchleuchteten Atmosphäre, soll zunächst offen bleiben. Möglicherweise ergeben weitere Beobachtungen Hinweise darauf, dass die genannten Ansichtstypen sich zu einer charakteristischen *Gesamtheit* von Bedingungen zusammenschließen, unter denen Ansichten der gekennzeichneten Art überhaupt anzutreffen sind.

Hier soll zunächst der bisher eingeschlagene Weg fortgesetzt werden: die Möglichkeiten, in Beziehungen von Phänomenen und deren Erscheinungsbedingungen zu denken und nach deren Realisierbarkeit zu fragen, sind noch nicht ausgeschöpft.

Wenn sich eine Spiegelansicht unter entsprechend schrägem Blickwinkel empfindlich gegenüber unserer Prüfbeobachtung erweist, gilt das auch umgekehrt: indem wir das Spiegelbild der Polarisationsfolie betrachten und den Spiegel, beispielsweise ein Stück Fensterglas, unter Beibehaltung des ausgezeichneten Winkels drehen, wird das Glas zum Prüfmittel gegenüber der Durchsicht durch die Polarisationsfolie. Die Rolle von Prüfmittel und zu prüfender Ansicht bzw. von Analysator und Polarisator sind also vertauschbar.

Zur Untersuchung gibt man z. B. Stücke von Fensterglas und schwarze Pappe zu ihrer Hinterlegung oder Schwarzglas aus; die Durchfärbung dieses Glases bewirkt eine Abschattung der Durchsicht, so dass die Spiegelung umso besser zu sehen ist. Die Durchführung der Prüfbeobachtung mit diesem neuen Prüfmittel erweist sich dann als wesentlich schwieriger, weil man sich erst einmal klar machen muss, wie man das Glasstück relativ zu der zu untersuchenden Ansicht drehen muss, damit die Winkelbedingung zwischen Glasoberfläche und Ansicht erhalten bleibt.

8. *Schritt*: Wenn sich die beschriebene Spiegelansicht einer Polarisationsfolie verhält, wie die Durchsicht durch diese Polarisationsfolie zu ihresgleichen, dann müsste sich, äquivalent zu dieser «Ansicht einer Ansicht», das Auslöschungsphänomen in Kreuzrelation der maßgeblichen Achsen auch durch die Konfiguration «Spiegelbild eines Spiegelbildes» realisieren lassen. Damit wird es nun aber kompliziert; wem es indessen gelingt, in der Variation der räumlichen Beziehung zweier Glasscheiben unter Beibehaltung

der erforderlichen Winkelbeziehung zwischen den Scheiben den Übergang von Auslöschung und Aufhellung des «Spiegelbildes eines Spiegelbildes» zu erzeugen, der hat die hier wirksamen geometrischen Verhältnisse wirklich erfahren und verstanden

9. Schritt: Dieselbe Überlegung, die zur Untersuchung der «Spiegelansicht einer Spiegelansicht» geführt hat, können wir auch gegenüber dem dritten Ansichtstypus: dem blauen Himmel im Bereich senkrecht zum aktuellen Sonnenstand anstellen. Zum einen ist aber nicht klar, wie die «Himmelsansicht einer Himmelsansicht» realisiert werden sollte. Zum anderen könnte auch wegen der nicht vollständigen Abdunkelbarkeit der Himmelsansichten mit einer Polarisationsfolie (5. Schritt) nicht erwartet werden, dass die Kreuzrelation solcher Ansichten hinsichtlich der ihnen zugeordneten Haidinger-Büschel vollständige Auslöschung liefern.

Stattdessen könnte der Vorschlag kommen: Wie wäre es, sich den blauen Himmel dort, wo das Atmosphärenbüschel besonders leuchtend und intensiv zu sehen ist, im Spiegel eines ruhigen Gewässers, etwa eines Teiches, anzuschauen? Wir würden damit das Oberflächenbüschel der Spiegelansicht (hier mit *horizontaler* Blaurichtung) auf das Atmosphärenbüschel der direkten Himmelsansicht beziehen und dürften für die Kreuzrelation derselben eine Auslöschung der Himmelsansicht erwarten: ein «Loch im Spiegelbild des Himmels». Dieses Phänomen, auch «Polarisationsschatten» genannt, ist bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang, wenn das Atmosphärenbüschel hoch über dem südlichen Horizont eine *vertikale* Blaurichtung zeigt, auch tatsächlich beobachtbar (Grebe 2001 a).

3.3 Nachbemerkung

Polarisation wird im Kontext des geschilderten Kurses als Disposition ausgezeichneter Ansichten in Bezug auf das menschliche Auge und gegenüber Prüfmitteln erkundet, deren Eignung darauf beruht, dass sie die durch sie zu prüfenden Ansichten selbst erzeugen. Gegenüber den vielen Fragen, die offen geblieben sind und durch Vertiefung und Erweiterung der geschilderten Beobachtungen zu verfolgen wären, kann als Ergebnis festgehalten werden:

Wir haben in dem Haidinger-Büschel eine Antwort unserer Augen auf einen Typus von Ansichten in unsrer Umgebung kennen gelernt, der in einer dreifältigen Ausprägung auftritt: Im Durchblick durch Polarisationsfolien (Festkörperbüschel), in Spiegelbildern an spiegelnden und zugleich durchsichtigen Grenzflächen (Oberflächenbüschel) und in Ansichten des blauen Himmels (Atmosphärenbüschel). Die Kreuzsymmetrie des Haidinger-Büschels zeichnet die jeweils erzeugende Ansicht mit Richtungseigenschaften aus: Die Gelbrichtung des Festkörperbüschels ist mit der Folienorientierung starr

verbunden und deutet vermutlich auf eine für die optische Anisotropie der Folie herstellungsbedingt wichtige Achse. Die Gelbrichtung des Oberflächenbüschels ist an die Beobachtungsrichtung gebunden; sie weist im Mittel auf den Betrachter. Die Gelbrichtung des Atmosphärenbüschels schließlich weist stets auf die Sonne. Die mit dieser Richtungsinformation jeweils verbundenen geometrischen Eigenschaften und Symmetriemerkmale der Ansichten bzw. der sie bedingenden Umstände könnten im Kurs noch weiter vertieft werden.

Für die Beziehung der charakterisierten Ansichten und das in Abhängigkeit ihrer geometrischen Relation sich zeigende Auslöschungsphänomen gilt die oben aufgestellte Regel, welche die Ansichtshelligkeit in Beziehung zum Winkel zwischen den in Frage kommenden Blau- oder Gelbrichtungen setzt (Malus-Gesetz). Für die Realisierung dieses Auslöschungsphänomens als *Relationsphänomen* kommen nach den bisherigen Beobachtungen im Prinzip 9 Möglichkeiten infrage. Einige dieser Möglichkeiten haben wir kennen gelernt, zuletzt den Polarisationschatten; bei einigen Relationen muss offen bleiben, ob sich durch weitere Beobachtungen Hinweise auf eine Realisierbarkeit ergeben.

4 Anhang: Zur Entstehung des Haidinger-Büschels im Auge

Die Frage, welche Eigenschaften der Netzhaut und des Linsenkomplexes am menschlichen Auge die Entstehung des Haidinger-Büschels bedingen, führt weit in Spezialgebiete der Ophthalmologie hinein. Für einen knappen Überblick über den Forschungsstand hinsichtlich der physikalischen³¹ Aspekte des Phänomens sei auf die Arbeiten von ZHEVANDROV (Zhevandrov 1995) und MISSION (Mission 1993) verwiesen. Mit besonderer Rücksicht auf die dort referierten Untersuchungen von BOEHM (Boehm 1940), CORDS (Cords 1947), DE VRIES (de Vries et al. 1950; 1953) und HALLDEN (Hallden 1957) kann das für die Form und Farbigkeit des Büschels Wesentliche folgendermaßen zusammengefasst werden: Die Netzhaut weist zwei besondere und in ihrer Funktionsweise polare Strukturelemente auf: den blinden und den Gelben Fleck (*Papilla nervi optici* und *Macula lutea*). Die Existenz des blinden Flecks folgt aus der Inversion der Netzhaut beim Auge des Wirbeltieres. Neben den damit für die Sehleistung verbundenen Vorteilen entsteht der Nachteil, dass die Nervenfasern innen abgehen und die Sinneszellschicht irgendwo durchbrechen müssen, um das Auge verlassen zu

³¹ Als physikalische Aspekte werden hier im engeren Sinne verstanden: Form, Größe, Ort im Gesichtsfeld, Farbe und Kontrastschwankungen des Büschels. Von den zeitlichen bzw. physiologischen Aspekten der Erscheinung wurde in diesem Zusammenhang ganz abgesehen.

können. An dieser Stelle ist das Auge blind. Demgegenüber erreicht die Netzhaut in der *Macularegion*, wo sich die Retina zur Netzhautgrube (*Fovea centralis*) einsenkt, ihre strukturelle und funktionelle Kulmination. Hier ist die Stelle des schärfsten und farbintensivsten Sehens. Man spricht auch vom «Zapfensehen», weil in diesem Bereich ausschließlich Zapfen vorhanden sind (*photopisches* System für Tages- und Farbsehen)³²; Stäbchen fehlen ganz. Die *Fovea* kann man sich wie mit dem Daumen eingedrückt entstanden denken, so dass alle Schichten, mit Ausnahme der Sinneszellschicht, nach der Seite verschoben sind; die Sinneszellschicht wird in diesem Bereich folglich direkt beleuchtet. Die menschliche *Macula* hat ungefähr einen Durchmesser von 2 bis 2,5 mm, die *Fovea* von 0,5 bis 1 mm. Die zitronengelbe Färbung kommt durch einen in den Optikusganglien abgelagertes Carotinoid (Xanthophyll) zustande (Rohen 1972, S. 37f).

4.1 Der Gelbe Fleck – ein «Radialanalysator»

Die folgenden Ergebnisse haben zur Bestätigung der Annahme geführt, dass die *Macula* für die Polarisations sensitivität des menschlichen Auges eine von zwei wesentlichen Komponenten darstellt (von Helmholtz 1896, S. 566ff; Hemenger 1987; Zhevandrow 1995, S. 1152ff;):

- Der Gelbe Fleck ist der Ort auf der Netzhaut, auf den die Mitte des Gesichtsfeldes abgebildet wird. Dort wird das Haidinger-Büschel gesehen. Die Verbindungsgerade von der *Fovea* zur Gesichtsfeldmitte kennzeichnet die Fixationsachse des Auges.³³
- Die Ausdehnung der *Fovea* entspricht recht genau der gesehenen Größe des Haidinger-Büschels. Für eine mittlere Augenlänge von 25 mm ergibt sich mit dem *Fovea*-Durchmesser von 1 mm eine Winkelausdehnung der Erscheinung von rund 3°.
- Die Nervenfasern der Zapfen im Bereich der *Fovea* breiten sich, ausgehend von der Mitte der Netzhautgrube, annähernd radialsymmetrisch aus und laufen im blinden Fleck wieder zusammen. Der in diesen radialsymmetrischen Faserverlauf eingelagerte Farbstoff bewirkt, dass das Gewebe vor der lichtempfindlichen Netzhaut mit radialer

³² Ein kleines Objekt wie beispielsweise eine Lerche im blauen Himmel muss man lange suchen, bis man sie gefunden – das heißt: auf die *Fovea* abgebildet hat. In Bezug auf das Stäbchensehen (*skotopisches* System für Dämmerungssehen) bildet die *Fovea* eine Art blinden Fleck. Vgl. z.B. die Versuche zum *zentralen Skotom* in (von Campenhausen 1993, S. 137).

³³ Dass man in der Gesichtsfeldmitte (Fixationspunkt) durch geeignete Geräte die Erscheinung des Haidinger-Büschels anbieten kann, ist für die Therapie der exzentrischen Fixation (Schielen) von Bedeutung (Cüppers 1956; Johanning 2000).

Vorzugsrichtung selektiv absorbiert.³⁴ Damit wirkt der Gelbe Fleck wie ein *radialsymmetrischer Dichroit* bzw. *Analysator*.

4.2 Die Hornhaut – eine «optische Phasenplatte»

Die zweite, für die Farbigkeit des Haidinger-Büschels ausschlaggebende Komponente des Auges ist die Hornhaut. Ihr kommt im Zusammenhang der für die optische Abbildung relevanten Komponenten im Vorderauge eine besondere Stellung zu: Zum einen schließt sie den Linsenkomplex nach außen schützend ab und ist damit in der Reihenfolge der einzelnen Komplexbestandteile zugleich das erste optisch wirksame Medium. Zum anderen stellt sie die am stärksten doppelbrechende Komponente dieses Komplexes dar. Ihre strukturellen Eigenschaften entsprechen denen eines konvexen, zweiachsig-doppelbrechenden Kristalls (van Blokland & Verhelst 1987, S. 86). Das zeigen Interferenzfiguren, die sich abzeichnen, wenn das isolierte Hornhautpräparat zwischen gekreuzte Nicols gebracht wird (Stanworth & Naylor 1950, S. 205). Figuren dieser Art, die wegen ihrer leuchtenden Farben und der strengen Geometrie ihrer Formen als besonders ansprechend empfunden werden, sind aus der Kristalloptik bekannt, wo ein- und zweiachsig-doppelbrechende Kristalle konvergent durchleuchtet werden.³⁵

³⁴ Das Maximum der spektralen Absorption von kristallinem Xanthophyll liegt bei $\lambda = 460$ nm. Die Sichtbarkeit des Haidinger-Büschels ist in diesem Spektralbereich am besten (de Vries et al. 1953, S. 429, 431).

³⁵ Unter den besonderen Bedingungen *konoskopischer* Anordnungen werden in solchen Interferenzfiguren die inneren Symmetriemerkmale des Kristallbaus sichtbar. In der Regel überlagern sich zwei charakteristische Formelemente: eine Serie konzentrischer und in weißer Beleuchtung verschieden farbiger Ringe (Isochromaten) und ein dieses Ringsystem überdeckendes Kreuz (Isogyren), das auch in nicht-konvergenter Beleuchtung erscheint. Im Übergang von gekreuzten zu parallelen Nicols gehen die Figuren in ihr Komplement über. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang auch die Erscheinungen, die isotrope nichtkristalline Stoffe wie z.B. Glas oder Kunststoff bei Symmetrieverringung durch elastische Deformation oder schnelles Abkühlen zeigen, wenn sie zwischen gekreuzte oder parallele Nicols gehalten werden (Spannungsdoppelbrechung). Auf die Ähnlichkeit dieser Figuren mit den *Chladnischen Klangfiguren* ist verschiedentlich hingewiesen worden (Goethe 1897, S. 211f).

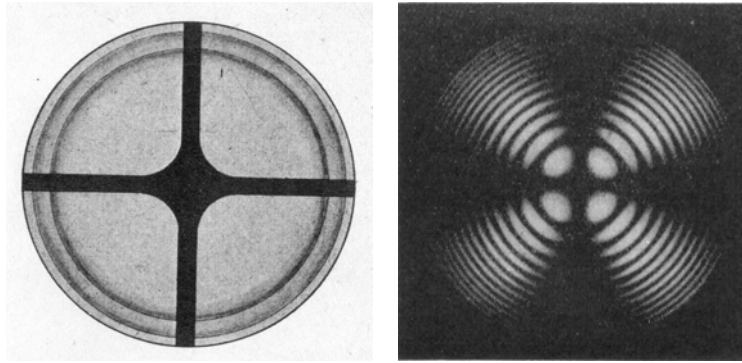


Abb. 7: Links: Interferenzfigur der Hornhaut einer Katze zwischen gekreuzten Nicols, aus (Stanworth & Naylor 1950, S. 205). Rechts: Im Vergleich die Interferenzfigur eines einachsig doppelbrechenden Kristalls, aus (Beljankin & Petrow 1954, S. 99).

Der mittlere Bereich der Hornhaut um die optische Achse wird in Modellrechnungen und Simulationen vereinfacht als ebene Phasenplatte betrachtet, deren n_y -Achse senkrecht zur Oberfläche der Platte steht; die n_x -Achse ist um etwa 30° von der Horizontalen gegen die Nase geneigt (van Blokland & Verhelst 1987, S. 89; Mission 1993, S. 395). Die optische Dicke einer Phasenplatte lässt sich u.a. bestimmen, indem man ihre Wirkung auf einen linearen Polarisationszustand kompensiert. Dazu benutzt man unterschiedlich dicke Kunststoff-Folien, deren optische Eigenschaften bekannt sind. Mit dieser Methode untersuchte SHUTE die Augen von rund 100 Probanden und fand heraus, dass die Phasenverschiebung durch die Hornhaut in blauer Beleuchtung annähernd $\lambda/10$ (48 nm) beträgt (Shute 1974, S. 163f). Messungen der Doppelbrechung von isolierten Hornhautpräparaten im Bereich der optischen Achse haben $\Delta n = 0,0028$ ergeben (Stanworth & Naylor 1953). (Die mittlere Brechzahl der Hornhaut liegt bei $n = 1,376$.)³⁶

Den unter bestimmten Bedingungen auftretenden Schwankungen in der Sichtbarkeit bzw. im Kontrast des Haidinger-Büschels ist MISSION mit Rücksicht auf die Vorarbeiten von BOEHM und SHUTE nachgegangen (Mission 1993). Die Hinweise auf entsprechende Beobachtungen sind in der Literatur sehr spärlich. Lediglich von BREWSTER und HELMHOLTZ sind

³⁶ Aufnahmen von der menschlichen Augenlinse zwischen gekreuzten Nicols zeigen ebenfalls ein allerdings wesentlich schwächer und unschärfer ausgeprägtes Isogyrenkreuz (Pierscionek 1993). Die akkommodationsabhängige Doppelbrechung der Linse liegt nach Messungen von WEALE im Bereich von 10^{-5} - 10^{-6} (Weale 1979).

Beobachtungen bekannt, die sich als Hinweise auf die hier gemeinte Kontrastschwankung deuten lassen. Wie im Zusammenhang mit dem doppel-drehenden Beziehungsbüschel beschrieben, sind solche Schwankungen besonders deutlich zu beobachten, wenn zwischen Auge und Polarisationsfolie eine doppelbrechende Folie gedreht wird. Je nach Foliendicke ist die Schwankung deutlicher zu sehen bzw. die Sichtbarkeit des Büschels insgesamt herabgesetzt. Die Maxima der Sichtbarkeit liegen in der Regel da, wo die Streckrichtung der gedrehten Folie diagonal zur Polarisationsrichtung steht.³⁷ Das doppel-drehende Büschel scheint sich weniger gleichmäßig schnell zu drehen als vielmehr zwischen orthogonalen Stellungen zu springen.

Einmal darauf aufmerksam geworden, bemerkt man solche Schwankungen auch ohne Manipulation durch eine doppelbrechende Folie. Diese sind ein Hinweis auf die Doppelbrechung der Hornhaut, die für sich schon als Phasenplatte betrachtet werden kann. MISSION hat eine Simulation programmiert, die neben den Winkeln zwischen den Hauptachsen der beteiligten Medien die Phasenverschiebung Δ der Hornhaut selbst als Variable enthält. Das Ergebnis sind quantitative Abschätzungen des Kontrasts, die mit den beobachtbaren Eigenschaften des Haidinger-Büschels gut übereinstimmen (Mission 1993).

4.3 Zusammenfassung

Der knappe Überblick über ophthalmologische Forschungsergebnisse zum Haidinger-Büschel macht deutlich, dass die für das physikalische Verständnis des Haidinger-Büschels wesentlichen Komponenten des Auges durch den Gelben Fleck und die Hornhaut gegeben sind. Der Gelbe Fleck wirkt vereinfacht gesagt als radialsymmetrischer Analysator, die Hornhaut als vorgeschaltete Phasenplatte. Gemeinsam bilden sie ein optisches Ensemble, das wesentliche polarisationsoptische Eigenschaften aufweist. *Das Haidinger-Büschel ist demnach selbst ein Polarisationsphänomen: Polarisation wird so durch Polarisation wahrgenommen.*

Betrachtet man das aus radial angeordneten Polarisationsfoliensegmenten hergestellte Modell eines solchen Analysators durch eine Polarisationsfolie in natürlicher Beleuchtung, so zeigt sich eine farblose Helligkeitsverteilung, deren kreuzsymmetrische Form eine auffällige Ähnlichkeit mit der Form des Haidinger-Büschels aufweist (vgl. Abb. 8, links). Werden die Segmente unter Berücksichtigung der «Diagonalitätsbedingung» außerdem noch mit schwach doppelbrechendem Material, beispielsweise gewöhnlicher Haushalts- oder

³⁷ Die Erörterung dieser *Diagonalitätsbedingung* übersteigt den vorliegenden Rahmen. Sie ist z. B. in (Grebe-Ellis 2005) oder auch in (Grebe-Ellis 2006a) gegeben.

Verpackungsfolie belegt, so ergibt sich eine komplementärfarbige Anordnung, deren Farbenpaar von der optischen Dicke der «Phasenfolie» abhängt.

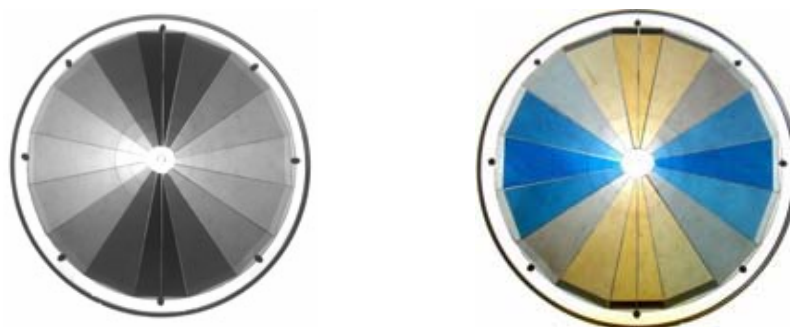


Abb. 8: Radialsymmetrische Anordnung, bestehend aus 16 Segmenten gewöhnlicher Polarisationsfolie mit radialer Blaurichtung. Links: Betrachtung der Anordnung durch eine Polarisationsfolie mit horizontaler Blaurichtung. Rechts: Jedes Segment ist zusätzlich mit einem Stück volltransparenter Verpackungsfolie (Niederegger Marzipan) belegt, und zwar so, dass die Streckrichtung der Folie diagonal zur Blaurichtung des darunter liegenden Segments verläuft. Die Segmente überdecken sich außen nicht ganz, so dass der Bezug zur Situation ohne Verpackungsfolie (links) sichtbar ist: die ohne diese Folie dunklen Bereiche erscheinen gelb, die hellen blau.

Literatur

- ALEXANDRIDIS, Evangelos et al. (1995), *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*, Hrsg. von W. STRAUB, P. KROLL & H. J. KÜCHLE. 2. Aufl. Stuttgart: Enke, S. 596-603
- AUERBACH, David (1998), Das fünfte – das neue – Element. *Elemente der Naturwissenschaft* 69, Heft 2, S. 27-44
- AUTRUM, H. & STUMPF, H. (1950), Das Bienenaugen als Analysator für polarisiertes Licht, *Zeitschrift für Naturforschung* 5, S. 116
- BADER, Franz (1996), *Eine Quantenwelt ohne Dualismus*. Hannover: Schroedel
- BARAVALLE, Hermann (1996), *Physik als reine Phänomenologie*. Bd. 2: Magnetismus und Elektrizität, Akustik, Optik und Astrophysik, hrsg. von G. KNEBE, Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben
- BELJANKIN, D. S. & PETROW, W. P. (1954), *Kristalloptik*, übers. von H. WERNER, dt. Red. W. KLEBER, Berlin: VEB Verlag Technik
- BERGMANN, L. & SCHÄFER, C. (1993), *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 3: *Optik*. Hrsg. von H. NIEDRIG. Berlin, New York: Walter de Gruyter
- VAN BLOKLAND, G. J. & VERHELST, S. C. (1987), Corneal polarization in the living human eye explained with a biaxial model. *Journal of the Optical Society of America (A)* 4: 82-90

- BOEHM, Gundo (1940), Über maculare (Haidinger'sche) Polarisationsbüschel und über einen polarisationsoptischen Fehler des Auges, *Acta Ophthalmologica*, 18, S. 109-142, Über ein neues entoptisches Phänomen im polarisierten Licht – «periphere Polarisationsbüschel», ebd. S. 143-169
- BÖHME, Gernot & BÖHME, Hartmut (1997), *Feuer, Wasser, Erde, Luft. Eine Kulturgeschichte der Elemente*, München: C.H. Beck
- BOTTLINGER, K. F., LADENBURG, R., VON LAUE, M. & SCHULZ, H. (1928), *Wellenoptik und Polarisation*, in *Handbuch der Experimentalphysik*, Bd. XVIII, hrsg. von W. WIEN & F. HARMS, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft
- CAMPENHAUSEN, Christoph von (1993), *Die Sinne des Menschen. Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung*, Stuttgart: Georg Thieme Verlag
- COMBERG, Dietrich W. & EHRICH, Wulf (1972), *Die Funktionsprüfung bei dichten Medientrübnungen des Auges*, in *Der Augenarzt*, Bd. II, hrsg. von Karl VELHAGEN, Leipzig: Thieme., S. 349-390
- CORDS, Otto (1947), Das Haidingersche Büschel und seine Erklärung als Beitrag für eine physikalische Deutung des Sehvorganges, *Optik 2*, S. 423-433
- CÜPPERS, C. (1956), Moderne Schielbehandlung, *Klinisches Mitteilungsblatt der Augenheilkunde* 129, S. 579-604
- DACKE, M., NILSSON, D., SCHOLTZ, C. H., MYRNE, M. & WARRANT, E. J. (2003), Insect orientation to polarized moonlight, *Nature* 424, S. 33
- ERB, Roger (1992), Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip, *Physik in der Schule* 30, Nr. 9, S. 291-295
- ERB, Roger (1994), *Optik mit Lichtwegen – das Fermatprinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*, Bochum: Westarp-Wissenschaften
- ERB, Roger (1995), Berechnung von Beugungsbildern, *MNU* 48, Nr. 5, S. 281-284
- FIorentini, Adriana (1966), *Dynamic characteristic of visual processes*, in WOLFF, E. (Hrsg.), *Optic in Progress*, Bd. 1, Amsterdam: North-Holland, S. 255-290
- FRANKE, Matthias (2003), *Untersuchung von Lichtspuren am Doppelspat. Ein Beitrag zur Entwicklung eines phänomenologischen Zugangs zur Polarisation des Lichts*. Staatsexamensarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin
- FRISCH, Karl von (1949), Die Polarisation des Himmelslichts als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen, *Experientia* 5, S. 142-148
- GERTHSEN, Ch. & VOGEL, H. (1995), *Physik*, 18. Aufl. Berlin: Springer
- GOETHE, Johann Wolfgang von (1897), *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. V: *Entoptische Farben*.
- GOLDSCHMIDT, Max (1950), A new test for function of the macula lutea, *Archives of Ophthalmology* 44, S. 129-135
- GREBE, J. (2001 a), Vom Polarisations Schatten *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht* 54, Nr. 8, S. 452-454
- GREBE, J. (2001 b), Doppeldrehung und Polarisation. *Elemente der Naturwissenschaft* 75, Heft 2, S. 13-32
- GREBE-ELLIS, J., SOMMER, W. & VOGT, J. (2002 a), *Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation. Materialien für einen modellfreien Optikunterricht im Grund- und Leistungskurs Physik*, Kassel: Pädagogische Forschungsstelle

- GREBE-ELLIS, J. (2002 b), Zur Phänomenologie der Polarisation, in BRECHEL, R. (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge der GDGP-Tagung 28 in Dortmund, 2001*, Bd. 22, S. 254, Berlin: Leuchtturm
- GREBE-ELLIS, J. (2002 c), Zum Haidinger-Büschel, in DPG (Hrsg.), *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG in Leipzig 2002*
- GREBE-ELLIS, J. (2003), Exakte Phänomenologie der Polarisation, in DPG (Hrsg.), *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG in Augsburg 2003*
- GREBE-ELLIS, J. (2005), *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*, Berlin: Logos
- GREBE-ELLIS, J. (2006 a), *Von der Optik im Tastraum zu einer Optik des Sehens*, in GREBE-ELLIS, J. & THEILMANN, F. (Hrsg.), *open eyes 2005 – Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Tagungsband*, Berlin: Logos, S. 235-245
- GREBE-ELLIS, J. (2006 b), *Bildverdopplung und Polarisation*, in GREBE-ELLIS, J. & THEILMANN, F. (Hrsg.), *open eyes 2005 – Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Tagungsband*, Berlin: Logos, S. 47-75
- GUDERIAN, Pascal (2004), Von der Spiegelwelt zu den Planetenbahnen, in NÖRDMEIER, V. & OBERLÄNDER, A. (Hrsg.), *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG – Düsseldorf, 2004*
- HAIDINGER, Wilhelm Karl (1844), Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts, *Annalen der Physik und Chemie (Poggendorf Annalen)* 63, S. 29-39
- HAIDINGER, Wilhelm Karl (1846), Beobachtung des Lichtpolarisationsbüschels in geradlinig polarisiertem Lichte. *Ebd.* 68, S. 73-87
- HALLDEN, Ulf (1957), An explanation of Haidinger's brushes, *Archives of Ophthalmology* 57, S. 393-399
- HECHT, Eugene (1999), *Optik*, dt. von F. SIEMSEN, 2. Aufl. München: Oldenbourg
- HELMHOLTZ, Hermann von (1896), *Handbuch der physiologischen Optik*, 2. Aufl. Hamburg: Leopold Voss
- HEMINGER, R. P. (1987), Dichroism of the macula pigment and Haidinger's brushes, *Journal of the Optical Society of America* 72, S. 734-737
- HOWALD-HALLER, Mario (1964 a), Doppelspat und Polarisation, *Elemente der Naturwissenschaft* 1, Heft 1, S. 12-24
- HOWALD-HALLER, Mario (1964 b), *Licht und Stoff*, in *Naturwissenschaftliche Grundfragen*, Dornach: Philosophisch-Anthroposophischer Verlag am Goetheanum
- JENSEN, C. (1928), *Die Himmelsstrahlung*, in *Handbuch der Physik*, Bd. XIX, *Herstellung und Messung des Lichts*, hrsg. von H. GEIGER und K. SCHEEL, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, S. 70-152
- JOHANNING, Camilla Bernadette (2000), *Ergebnisse der Untersuchungen auf Fixation bei Dunkeladaptation und Helladaptation*, Diss. bei W. HAASE
- JULIUS, Frits (1984), *Entwurf einer Optik. Zur Phänomenologie des Lichts*, hrsg. von J. KÜHL, Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben
- JUNG, Walter (1979), *Optik für die Sekundarstufe I*, Frankfurt am Main: Moritz Diesterweg
- LOBECK, Fritz (1954), *Farben anders gesehen*, Basel: Verlag die Pforte
- LYNCH, David. K. & LIVINGSTON, William (1995), *Color and Light in Nature*, Cambridge, England: Cambridge University Press

- MACKENSEN, Manfred von (1992), *Klang, Helligkeit und Wärme. Phänomenologischer Physikunterricht aus Praxis und Theorie der Waldorfschule*, 4. Aufl. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle
- MACKENSEN, Manfred von & OHLENDORF, Heinz-Christian (1998), *Modellfreie Optik*, Kassel: Pädagogische Forschungsstelle
- MAIER, Georg (1970), Die Elemente als Stufen der Naturbetrachtung *Elemente der Naturwissenschaft* 13, Heft 2, S. 1-9, Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004)
- MAIER, Georg (1975), Ein verformbarer Hohl-Wölb-Spiegel, *Ebd.* 22, Heft 1, S. 33-43, Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004)
- MAIER, Georg (1984), Über die Natur der Beugungserscheinungen II – Der Übergang vom Strahlen- zum Feldbegriff, *Ebd.* 40, S. 42-52, Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004)
- MAIER, Georg (1986 a), *Optik der Bilder*, Dürnau: Kooperative Dürnau
- MAIER, Georg (1986 b), Hypothesenfreie Erkenntnis der unorganischen Natur, *Elemente der Naturwissenschaft* 45, Heft 2, S. 8-26, Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004)
- MAIER, Georg (1988), Eine Stufenfolge optischer Grundsätze. *Ebd.* 49, Heft 2, S. 96-106, Wiederabdruck in u. zit. nach (Maier 2004)
- MAIER, Georg (2004), *blicken – sehen – schauen. Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft*, hrsg. von J. GREBE-ELLIS, Dürnau: Kooperative Dürnau
- MAIER, Georg (2005), Wodurch zeichnet sich Goethes Methode gegenüber dem konventionellen Vorgehen aus? *Physikerrundbrief*, hrsg. von Florian THEILMANN, Sonderheft Januar-Tagung 2005, S. 5-11
- MINNAERT, Marcel (1992), *Licht und Farbe in der Natur*, Basel
- MISSION, G. P. (1993), Form and behaviour of Haidinger's brushes, *Ophthal. Physiol. Opt.* 13, S. 392-396
- PIERSCIONEK, Barbara K. (1993), Explanation of isogyre formation by the eye lens, *Ophthal. Physiol. Opt.* 13, S. 91-94
- PRÖBSTL, Albert (1993), Der kolloidale Zustand von Mistelsaft und seine Wirkung auf das Licht, *Jahresbericht 1993 des Carl Gustav Carus-Instituts*, Öschelbronn
- PRÖBSTL, Albert (1998), Das Haidinger-Büschel als Urphänomen der Polarisationserscheinungen. *Elemente der Naturwissenschaft* 69, Heft 2, S. 1-26
- RIECK, Karen (1998), Polarisation wahrnehmen, in BRECHEL, R. (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge der GDGP-Tagung in Essen*, Berlin: Leuchtturm, S. 283-285
- RIECK, Karen (2003): *Polarisation von Licht im Physikunterricht. Ein Elementarisierungsansatz zur Einführung in quantentheoretische Begriffe und Prinzipien*. www.physik.uni-kassel.de/diss/riECK/diss.pdf
- ROHEN, Johannes (1972), *Morphologie*, in *Der Augenarzt*, Bd. I, hrsg. von Karl VELHAGEN, Leipzig: Thieme, S. 10-168
- SCHÖN, Lutz-Helmut (1993): *Vom Sehen zur Optik – Ein Curriculum für die Mittel- und Oberstufe*, in BEHRENDT, H. (Hrsg.), *Zur Didaktik der Chemie und Physik – Vorträge der GDGP-Tagung in Erfurt 1992*, Bd. 13, Berlin: Leuchtturm
- SCHÖN, Lutz-Helmut (1994), Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik, *Physik in der Schule* 32, Nr. 1, S. 2-5

- SEIPP, Hanspeter (2002): Die Grundversuchsanordnung für die Lichtbeugung an Kanten. *Elemente der Naturwissenschaft* 76, S. 35-50
- SHURCLIFF, William A. (1955), Haidinger's brushes and circularly polarized light, *Journal of the Optical Society of America* 45, S. 399
- SHUTE, C. C. D. (1974), Haidinger's brushes and predominant orientation of collagen in corneal stroma, *Nature* 250, S. 163-164
- SHUTE, C. C. D. (1978), Haidinger's brushes, *Vision Research* 18, S. 1467
- 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
- STANWORTH, A. & NAYLOR, E. J. (1950), The polarization optics of the isolated cornea, *British Journal of Ophthalmology* 34, S. 201-211; Haidinger's brushes and the retinal receptors. With a note on the Stiles-Crawford effect, *ibid.* S. 282-291.
- STANWORTH, A. & NAYLOR, E. J. (1953), Polarized light studies of the cornea, *The Journal of Experimental Biology* 30, S. 160-169
- STANWORTH, A. & NAYLOR, E. J. (1955), The measurement and clinical significance of the Haidinger effect, *Trans. Ophthalmol. Soc. UK* 75, S. 67-79
- STEINER, Rudolf (1972), *Zweiter Naturwissenschaftlicher Kurs: Die Wärme auf der Grenze zwischen positiver und negativer Materialität*. Vierzehn Vorträge, 1.-14. März 1920 in Stuttgart. Vom Vortragenden nicht durchgesehene Nachschriften, hrsg. von der Rudolf Steiner Nachlassverwaltung, Dornach: Rudolf Steiner Verlag
- STOKES, Sir George Gabriel (1850), On Haidinger's brushes, Wiederabdruck in *Mathematical and physical papers*, Cambridge, England: Camb. Univ. Press 2, S. 362-364
- SZIVESSY, G. (1928), *Polarisation*, in *Handbuch der Physik*, Bd. XX: *Licht als Wellenbewegung*, hrsg. von H. GEIGER & K. SCHEEL, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, S. 83-120
- THEILMANN, Florian & MAIER, Georg (2004), Zur Rolle der Lichtgeschwindigkeit in der modellfreien Optik. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht* 57/7, S. 413-419
- TSCHERMAK-SEYSENEGG, Armin von (1951), Die Polarisation des Himmelslichtes, ihr Sinn und ihre Bedeutung *Documenta Ophthalmologica* 5-6, S. 104-117
- DE VRIES, H., JIELOF, R. & SPOOR, A. (1950), Properties of the human eye with respect to linearly and circularly polarized light, *Nature* 166, S. 958
- DE VRIES, H., JIELOF, R. & SPOOR, A. (1953), Properties of the eye with respect to polarized light, *Physica* 19, S. 419-432
- WATERMAN, T. H. (1975), *Natural Polarized Light and e-Vector Discrimination by Vertebrates in Light as an Ecological Factor II*, hrsg. von G. C. EVANS, Rainbridge: Blackwell Scientific, S. 305-335
- WEALE, R. A. (1979), Sex, age and birefringence of the human crystalline lens, *Exp. Eye Res.* 29, S. 449-461
- WEBER, Thomas (1999), Das Loch in der Seifenblase. *Physik in der Schule* 37, Heft 1, S. 34-36

- WEBER, Thomas & SCHÖN, Lutz-Helmut (2000), Spiegelwelt statt Reflexionsgesetz – Vorschläge zum Anfangsunterricht über Optik, *Naturwissenschaften im Unterricht* 11, Nr. 60, S. 30-36
- WEBER, Thomas (2003), *Kumulatives Lernen im Physikunterricht*, Berlin: Logos
- WEHNER, Rüdiger (1998), Der Himmelskompass der Wüstenameisen, *Spektrum der Wissenschaft* 11, S. 56-67
- WEHNER, Rüdiger (2001), Polarization vision – a uniform sensory capacity? *Journal of Experimental Biology* 204, S. 2589-2596
- WERNER, Johannes (2000), *Vom Licht zum Atom. Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeiger-Modells*, Berlin: Logos
- ZHEVANDROV, N. D. (1995), Polarisation physiological optics, *Physics Uspekhi* 38, Nr. 10, S. 1147-1167