

**OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN**

**Band 20**

Reprint der Bände 205 und 20

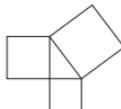
**Versuche mit dem  
doppeltbrechenden isländischen Kristall,  
die zur Entdeckung einer wunderbaren und  
außergewöhnlichen Brechung führten  
(1669)**

**Erasmus Bartholinus**

**Abhandlung über das Licht  
Worin die Ursachen der Vorgänge bei seiner Zurückwerfung  
und Brechung und besonders bei der eigentümlichen Brechung  
des isländischen Spates dargelegt sind  
(1678)**

**Christian Huygens**

Einleitung  
**Johannes Grebe-Ellis**



Verlag Harri Deutsch

*Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

**ISBN 978-3-8171-3423-6**

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Die Druckvorlage wurde freundlicherweise von der Bibliothek des Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften der Universität Frankfurt/M. zur Verfügung gestellt.

© Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH,  
Frankfurt am Main, 2011

1. Auflage 2011

Druck: Rosch - Buch Druckerei GmbH, Scheßlitz  
Printed in Germany

# **Bild und Strahl – Perspektiven der Optik bei Bartholinus und Huygens**

Johannes Grebe-Ellis

I. Einleitung. . . . .	IX
II. Bild und Strahl in der <i>Optik</i> Newtons . . . . .	XII
III. Bild und Strahl bei Bartholinus und Huygens. . . . .	XVIII
1. Ein Blick auf Bartholinus' <i>Versuche</i> . . . . .	XX
2. Ein Blick auf Huygens' <i>Abhandlung</i> . . . . .	XXVI
IV. Das <i>phénomène merveilleux</i> . . . . .	XXVIII
1. Doppelbilder . . . . .	XXX
2. Doppelbilder von Doppelbildern . . . . .	XXXII
3. Die Verallgemeinerung des <i>phénomène merveilleux</i> . . . . .	XXXVIII
V. Das Lichtspurenvierseit . . . . .	XXXIX



## I. Einleitung

Die erste und bisher einzige deutsche Übersetzung der *Versuche mit dem doppelbrechenden isländischen Kristall* von Erasmus Bartholinus aus dem 1669 in Kopenhagen veröffentlichten lateinischen Original wurde von Karl Mieleitner angefertigt und erschien 1922 als Band 205 in der Reihe der Ostwalds Klassiker. Das Büchlein ist seit langem vergriffen und die Frage nach einer Neuauflage veranlasste den Verlag zu dem Vorschlag, den Text des Bartholinus, eine aus siebzehn Versuchsbeschreibungen und zehn Lehrsätzen bestehende Untersuchung, mit der berühmten *Abhandlung über das Licht* seines Freundes Christian Huygens zu einem Doppelband zusammenzufassen.<sup>1</sup> Dieser wird hiermit vorgelegt. Die editorische Verknüpfung der Texte liegt aus verschiedenen Gründen nahe: Sie sind in der zweiten Hälfte eines Jahrhunderts entstanden, an dessen Beginn die optischen Schriften Keplers stehen, in dessen erster Hälfte Descartes seine *Dioptrik* verfasst und an dessen Ende Newton das Erscheinen seiner *Optik* vorbereitet. Das umfangreichste Kapitel, den Glanz- und Mittelpunkt seiner *Abhandlung* widmet Huygens der Entdeckung des Bartholinus. Er erhebt die „eigentümliche Brechung des isländischen Spats“ zum methodischen Prüfstein seiner in den vorangehenden Kapiteln der *Abhandlung* entwickelten Wellentheorie des Lichts: „Ich war gewissermaßen gezwungen, diese Untersuchung anzustellen,“ schreibt er zu Beginn des Kapitels, „weil die Brechungen in diesem Kristall meine vorstehende Erklärung der regelmäßigen Brechung umzustürzen schienen.“ Damit ist die thematische Gemeinsamkeit der Texte, ihre methodische Beziehung und zugleich ihr Unterschied bereits gekennzeichnet. Es handelt sich um Grün-

---

<sup>1</sup> Die *Abhandlung über das Licht*, im französischen Originaltitel *Traité de la Lumière*, von Huygens 1678 verfasst und 1690 in Leiden veröffentlicht, erschien erstmals in deutscher Übersetzung von Rudolf Mewes und mit Anmerkungen von Ernst Lommel 1890 als Band 20 in der Reihe Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften bei Engelmann, Leipzig; 4. Auflage 1996.

dungsdokumente der physikalischen Optik, die sich in gewisser Weise zueinander verhalten wie Experiment und Theorie, wie Beobachtung und Begriff. Als Texte haben sie darüber hinaus den Rang zeitlos gültiger Zeugnisse der europäischen Wissenskultur erlangt. Die methodische Klarheit und die Schönheit ihrer begrifflichen und sprachlichen Form sind von einer Prägnanz, die nicht nur den Historiker oder den historisch interessierten Physiker, sondern auch denjenigen begeistern kann, der sich für Stile naturwissenschaftlicher Erkenntnis unter wissenschaftsphilosophischen und didaktischen Gesichtspunkten interessiert.

Eine angemessene historische Einordnung<sup>2</sup> der beiden Texte in die Optik des 17. Jahrhunderts und eine Darstellung ihrer wechselvollen Wirkungsgeschichte kann im Rahmen dieser Einführung nicht gegeben werden.<sup>3</sup> Stattdessen möchte ich die Texte unter einem systematischen Gesichtspunkt der Optik betrachten. Dieser betrifft eine charakteristische Verschiedenheit von Bartholinus und Huygens im methodischen Vorgehen bei der Beschreibung der phänomenologischen Befunde. Während Bartholinus von der unmittelbaren Anschauung ausgeht und vorwiegend von *Bildern* spricht, die im Durchblick durch den Spat verdoppelt und verschieden stark *gehoben* gesehen werden, bezieht Huygens seine Beobachtungen von vornherein auf eine explizit wellen- und stoß-

---

2 Siehe z.B. Dijksterhuis (2004, 140–176), die Einleitung von Buchwald & Pedersen in Bartholinus (1991, 9–24), ferner Sabra (1981, 221–229), Frankel (1974), Garboe (1954, 33–42).

3 „Habent sua fata!“ schreibt Lohne über die Texte in seinem Kommentar zu dem Manuskript der *Versuche* von Bartholinus, das er in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts in der Dänischen Königlichen Bibliothek zu Kopenhagen entdeckte. „Before they came to full fruition the discoveries of Bartholin and Huygens were doomed to a very long period of incubation...“ (Lohne 1977, 147). Das Manuskript der *Versuche* weist gegenüber der gedruckten Version von 1669 eine etwas andere Reihung der Experimente auf; die zehn Propositionen mit den dazugehörigen Erläuterungen fehlen ganz. Der Text erschien 1977 mit einer englischen Übersetzung von Lohne und aufschlussreichen Anmerkungen von ihm zu historischen und experimentellen Details.

mechanische Lichtvorstellung. Er spricht von *Lichtstrahlen*, die sich mit hoher Geschwindigkeit ausbreiten, an optischen Grenzflächen gebrochen und reflektiert werden und die sich beim Eintritt in den Doppelspat in zwei verschieden stark gebrochene Teilstrahlen aufspalten. – Die erste Perspektive bleibt näher am beobachtbaren Phänomen und fragt nach den geometrischen Bedingungen der Bildverdopplung; sie wird im Folgenden als *bildoptisch* bezeichnet. Demgegenüber abstrahiert die zweite, *strahlenoptisch* genannte Perspektive stärker von der Phänomenologie der Bildentstehung; sie reduziert den Rahmen der Beschreibung auf vorgestellte Strahlverläufe, die typischerweise in Seitenansichten dargestellt und als Wirkungen der in Analogie zum Schall kugelwellenförmig angenommenen Lichtausbreitung betrachtet werden.

Ein markantes Beispiel für die Verwendung der genannten Perspektiven geben die experimentellen Darlegungen und theoretischen Erörterungen Newtons im ersten Buch der *Optik*. Dadurch, dass Newton zwischen bild- und strahlenoptischer Argumentation mehrfach wechselt und den genannten Perspektiven unterschiedliche erkenntnistheoretische Bedeutungen zuweist, treten deren Merkmale besonders prägnant hervor. Ich beginne deshalb mit einer Beschreibung der bild- und strahlenoptischen Betrachtungsweise Newtons in der *Optik* und beziehe die daran gewonnene Unterscheidung im Folgenden auf die *Versuche* von Bartholinus und die *Abhandlung* von Huygens.

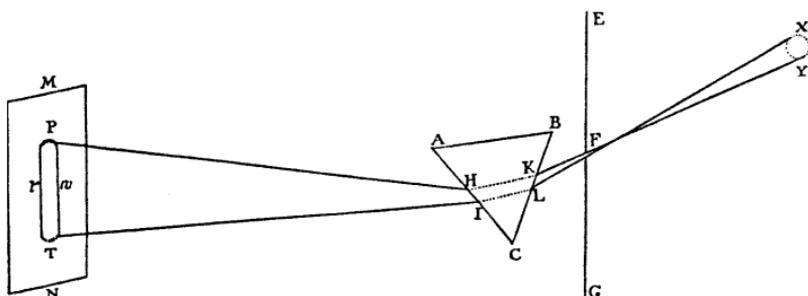
Vor diesem Hintergrund möchte ich in einem weiteren Schritt auf eine Entdeckung eingehen, die Huygens am Doppelspat gelang und die ihn auf die Spur der optischen Polarisation brachte: Nachdem er seine Theorie der Lichtbrechung durch die Annahme einer rotationselliptischen Ausbreitung des Lichtes im doppelbrechenden Medium so modifiziert hatte, dass sie nicht nur den Verlauf des ordentlichen, sondern auch den des außerordentlichen Strahls vorherzusagen gestattete, berichtet er von einer ihm unerklärlichen Erscheinung, dem *phénomène merveilleux*. Dieses besteht in der überraschenden Tatsache, dass der ordentliche und der außerordentliche Strahl, in die sich ein Lichtstrahl beim Durchgang durch einen Doppelspat zerlegt, einen *zweiten* Doppelspat durchlaufen

können, ohne sich, wie Huygens zunächst erwartet hatte, ein weiteres Mal zu zerlegen. Dies ist nur dann der Fall, wenn die Hauptschnitte der Kristalle nicht in derselben Ebene liegen, sondern gegeneinander verdreht werden. Die dabei auftretenden vier Strahlen durchlaufen paarweise verschiedene Stadien der Sichtbarkeit, die in Abhängigkeit des Drehwinkels zwischen Erscheinung und Auslöschung schwankt. – Weshalb Bartholinus diese Entdeckung bei seiner ansonsten umfassenden Untersuchung des Spats entging, ist rätselhaft; auf die Beobachtung von Doppelbildern eines Urbildes durch einen zweiten Spat findet sich jedenfalls bei ihm kein Hinweis. Dies hat indessen zur Folge, dass man das genannte *phénomène merveilleux*, eine Art *experimentum crucis* der Polarisation, nur in der strahlenoptischen Perspektive und zudem in einer Knappheit vorgestellt bekommt, die der Schönheit, vor allem aber der Bedeutung des Phänomens für die Polarisations-eigenschaften der Doppelbilder nicht gerecht wird. Es erhebt sich deshalb die Frage nach einer Beschreibung des *phénomène merveilleux* aus der bildoptischen Perspektive des Bartholinus. Eine solche ist erstmals 1964 von Howald-Haller skizziert worden (Howald-Haller 1964). Ich werde sie als Ergänzung der Darlegung zum *phénomène merveilleux* von Huygens in dieser Einführung vorstellen und um einige polarisationsoptische Aspekte erweitern.

Howald-Haller ist bei seinen Untersuchungen am Doppelspat selbst auf ein bisher nicht beschriebenes Phänomen gestoßen, in dem sich bild- und strahlenoptische Aspekte der Betrachtung in gewisser Weise experimentell verschränken. Es handelt sich um das so genannte *Lichtspurenvierseit*. Die Beschreibung dieses Phänomens wird den Abschluss der vorliegenden Einführung bilden.

## II. Bild und Strahl in der „Optik“ Newtons

An den Beschreibungen der Versuche, mit denen Newton im ersten Buch seiner *Optik* die Grundlage für die Dispersionstheorie der physikalischen Optik legt, fällt auf, dass er wiederholt und unvermittelt zwischen zwei Ebenen der Betrachtung wechselt: einer



**Bild 1:** Newtons schematische Darstellung der Grundanordnung zur Erzeugung des Sonnenspektrums (Fig. 13, 3. Versuch zum Beweis von Prop. II im ersten Buch der *Optik*). Im Unterschied zu anderen Darstellungen (vgl. Bild 2) sind hier die *abbildungsoptischen* Verhältnisse eingezeichnet, welche die abbildende Funktion der Blende *EFG* hervorheben und verdeutlichen, dass es sich beim Sonnenspektrum *PT* um das (vom Prisma *ABC* umgelenkte und gestreckte) punktsymmetrisch gespiegelte Bild der Sonne *XY* handelt. Begibt man sich an den Ort des Prismas, kennzeichnen *LFX* und *KFY* Visierlinien, welche den Raumbereich begrenzen, von dem aus die Sonne sichtbar ist. Sie geben folglich den Verlauf der Schattengrenzen hinter der Blende *EFG* in Bezug auf den optischen Kontrast der Sonne an. Ihr Schnittpunkt vor *F* wirkt als Projektionszentrum für das Sonnenbild *PT*.

bildoptisch-geometrischen und einer mechanistisch-physikalischen. Erstere beherrscht die Abschnitte, in denen die experimentellen Verhältnisse und Operationen sowie die zu beobachtenden Phänomene in ihren geometrischen Eigenschaften dargestellt werden. Im Wesentlichen geht es dabei um die abbildungsoptischen Bedingungen, unter denen die Lochkameraabbildung der Sonne zustande kommt, d.h. um den funktionalen Zusammenhang zwischen scheinbarem Sonnendurchmesser, Blendenweite, Geometrie des verwendeten Prismas, dem Abstand zwischen Blende und Prisma zur Wand und der Größe des Sonnenbildes (vgl. Bild 1). Die zentralen Begriffe in diesem Zusammenhang sind *Bild der Sonne*, *Bild der Öffnung*, *Kreisbild*, *kreisrundes*, *farbiges*, *längliches*, *abgelenktes*, *gebrochenes Sonnenbild*, *Farbenspektrum der*

*Sonne, scheinbarer Durchmesser der Öffnung, Sonnenscheibe.* Newton entwickelt mit diesen Begriffen eine bildoptische Beschreibung der Dispersionsphänomene, die alle Ansprüche an eine phänomenologische Theorie erfüllt: Der funktionale Zusammenhang zwischen den in Frage kommenden Observablen wird durch exakte Beobachtung und Messung aufgeklärt, geometrisch beschrieben und rechnerisch überprüft. Die untersuchten Phänomene sind im Experiment reproduzierbar, manipulierbar und vorhersagbar. – Das auffälligste Merkmal dieses Vorgehens, mit dem Newton in der Tradition der geometrischen Optik steht, besteht indes in dem darin, dass keine expliziten Annahmen über die Natur des Lichts gemacht werden. Eine Abbildung der beobachtbaren Phänomene auf selbst nicht beobachtbare, quasi-mechanische Ursachen mit dem Ziel einer physikalischen Erklärung kommt erst im Wechsel von der bild- zur strahlenoptischen Betrachtung ins Spiel.<sup>4</sup>

In diesem Zusammenhang spricht Newton von *Lichtstrahlen*, die sich *ausbreiten*, die aus *verschieden brechbaren Strahlen zusammengesetzt* sind, *ein- und austreten*, *vermischt*, *zerstreut*, *gespalten*, *gebrochen*, *abgelenkt* oder *reflektiert* werden, d.h. die verschiedenen mechanisch vorgestellte Wechselwirkungen erfahren. Diese sind allerdings, wie die Lichtstrahlen selbst, nicht direkt beobachtbar. Sie werden von Newton aber auch nicht, wie etwa von Kepler, vorwiegend als geometrische Operatoren verwendet. Vielmehr wird ihnen durch die Formulierungen, mit denen sie zu den Observablen in Beziehung gesetzt werden, selbst ein quasi-empirischer Status zugesprochen. Gleichzeitig lässt Newton keinen Zweifel daran, dass Lichtstrahlen als die zugrundeliegenden, ursächlichen Bestandteile des Bildes anzusehen sind. Im Axiom 7 heißt es: „Wo immer die von allen Punkten eines Objekts kommenden Strahlen, nachdem sie durch Reflexion oder Brechung

---

4 Der Wechsel zwischen *Bild* und *Lichtstrahl* durchzieht große Teile des ersten Buchs der *Optik*. Besonders aufschlussreich sind u.a. die folgenden Passagen: Axiom 7 und 8, die Versuche 3–6 sowie Aufgabe 1 zu Proposition IV.

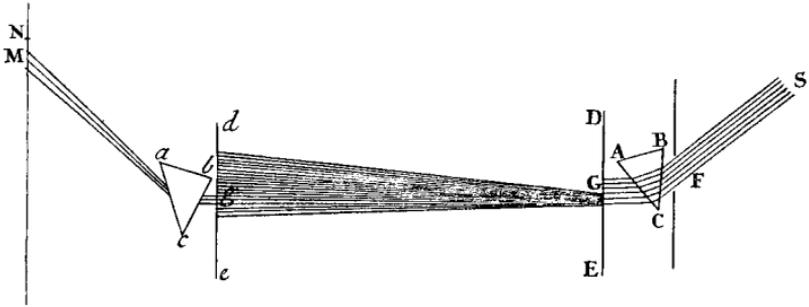
konvergent gemacht sind, in ebenso vielen Punkten zusammen treffen, da erzeugen sie auf einem weißen Körper, auf den sie fallen, ein Bild des Objekts.“ „Unter Lichtstrahlen“, so Newton in der ersten Definition des ersten Buches der *Optik*, „verstehe ich die kleinsten Teilchen des Lichts... [...] Das kleinste Licht oder Lichtteilchen, welches getrennt von dem übrigen Lichte für sich allein aufgefangen oder ausgesandt werden kann, oder allein etwas tut oder erleidet, was das übrige Licht nicht tut, noch erleidet, – dies nenne ich einen Lichtstrahl.“<sup>5</sup>

Diesen Lichtstrahl über die funktionale Beziehung zwischen seiner Farbe und seinen Brechungseigenschaften als nicht weiter zerlegbaren Bestandteil des Sonnenlichts zu identifizieren und messbar zu machen, ist das erklärte Ziel Newtons im ersten Buch der *Optik* (vgl. Bild 2). Inwiefern ihm vorgehalten werden kann, seiner ausdrücklichen „Absicht, in diesem Buche die Eigenschaften des Lichts [nicht] durch Hypothesen zu erklären, sondern nur, sie anzugeben und durch Rechnung und Experiment zu bestätigen“, nicht konsequent genug gefolgt zu sein, ist verschiedentlich kritisch erörtert worden.<sup>6</sup> In einer Nebenbemerkung zur zweiten Definition über die Brechungseigenschaften der Lichtstrahlen grenzt er sich gegen die „Mathematiker“ ab – gemeint sind die

---

5 Newton (1996, 5). Eine weiterführende Definition beginnt Newton im zweiten Teil des ersten Buchs mit dem Hinweis, dass seine Rede von „Lichtstrahlen als farbigen oder gefärbten Strahlen“ nicht wissenschaftlich, sondern als volkstümlicher Ausdruck zu verstehen sei (Newton 1996, 81). Im Folgenden werden – gemäß der Lehre von den *primären* und *sekundären Qualitäten* – alle wahrnehmungsbezogenen Aspekte des Lichtstrahlkonzepts auf selbst nicht wahrnehmbare Bewegungen zurückgeführt. „Denn ebenso wie der Schall einer Glocke oder Saite [...] nichts anderes ist, als eine zitternde Bewegung des Körpers [...], so sind die Farben an den Objekten nichts anderes, als die Fähigkeit, diese oder jene Strahlenart reichlicher zu reflektieren als die anderen, und in den Strahlen nichts anderes als ihre Fähigkeit, diese Bewegung bis in unser Empfindungsorgan zu verbreiten, und im letzteren die Empfindung dieser Bewegungen in Gestalt von Farben.“(ebd.)

6 Vgl. z.B. Dijksterhuis (1956), Sabra (1981, 273–297).



**Bild 2:** Newtons Skizze zum *experimentum crucis*, mit dem die unterschiedliche Brechbarkeit verschiedenfarbiger Strahlen nachgewiesen wird (Fig. 18, 6. Versuch zum Beweis von Prop. II). Im Gegensatz zu Bild 1 hat Newton hier nicht die Abbildungsoptik dargestellt, die durch die räumlichen Verhältnisse der Blendenanordnung relativ zum scheinbaren Sonnendurchmesser festgelegt ist. Vielmehr hat er Strahlen eingezeichnet, die andeuten sollen, dass sich die Sonne in großer Entfernung befindet (paralleler Einfall) und wie man sich die Selektion (Blende *dge*) aus dem entwickelten Spektrum und die Analyse der selektierten Strahlen durch das zweite Prisma *abc* bei Drehung des ersten Prismas *ABC* vereinfacht vorstellen kann. Unklar ist, weshalb das von rechts einfallende Strahlenbündel durch das erste Prisma zwar eine Ablenkung aber keine Aufspaltung erfährt, wie es wegen der unterschiedlichen Brechbarkeit der Sonnenstrahlen zu erwarten wäre. Ebenso fraglich ist der Bruch in der Strahendarstellung an der Blendenöffnung *G*: In der Divergenz des von dort aus sich in Richtung der zweiten Blende entfaltenden Spektrums macht sich die Raumwinkelgröße des scheinbaren Sonnendurchmessers geltend, die aber in der Darstellung des Lichteinfalls durch parallele Strahlen gerade unterdrückt ist. Abbildungsoptisch betrachtet, entwirft die Lochblende *DGE* auf der Blende *dge* ein farbiges und in die Länge gezogenes Lochkamerabild der Sonne (Sonnenspektrum). Für die Selektionslochblende *g* wirkt die Abbildungslochblende *G* wie eine Punktlichtquelle, so dass auf dem Schirm in *MN* ein einigermaßen scharfes und je nach Blendenöffnung *g* einfarbiges Schattenbild der Selektionsblende zu erwarten ist.

Vertreter der geometrischen Optik in der Tradition Euklids und Alhazens: Diese würden gewöhnlich die Lichtstrahlen als Linien betrachten, die vom leuchtenden Körper bis zum erleuchteten reichen; insbesondere würden sie annehmen, dass „die Ausbreitung des Lichts eine augenblickliche ist.“ 1676 hatte Ole Rømer, ein Schüler des Bartholinus, seine Zeitvergleiche über die Verfinsternung der Jupitermonde veröffentlicht und damit den ersten experimentellen Nachweis für die Endlichkeit der Geschwindigkeit erbracht, mit der sich Licht ausbreitet. Dieser für die Entwicklung der physikalischen Optik eminent wichtigen Entdeckung wollte Newton mit einer möglichst allgemeinen Definition des Lichtes Rechnung tragen: „Deshalb habe ich für gut befunden, Lichtstrahlen und Brechungen so allgemein zu definieren, dass sie auf das Licht in jedem Falle passen.“<sup>7</sup>

Mit seinem Vorgehen, Phänomene durch Mechanisierung einer mathematischen Behandlung zugänglich zu machen, prägte Newton in methodischer Hinsicht ein Erkenntnisverfahren, das weit über die Begründung der physikalischen Optik hinaus zum Vorbild erfahrungsbasierter Erkenntnisgewinnung schlechthin werden sollte.<sup>8</sup>

Dass er dieses Vorgehen an der Optik exemplifizierte, indem er die bildoptischen Erkenntnisse seiner Zeit unter das vereinheitlichende Regime quasi-mechanischer Begriffe stellte, war indessen für die spätere Entwicklung der Optik nicht nur von Vorteil. Zum Einen blieb sie dem Vorbehalt ausgesetzt, kein auf empirisch di-

---

7 Aufschlussreich für die Entwicklung von Newtons Vorstellungen über die Natur des Lichts sind seine begrifflich tastenden Ausführungen in der Abhandlung *A new Theory about Light and Colours* von 1672. Er bezieht dort den Verlauf der Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch ein Prisma auf die Bedingungen, unter denen die Flugbahn eines Tennisballs nicht geradlinig, sondern gekrümmt verläuft und erwägt als Ursache für die Ablenkung der Lichtstrahlen unter der Annahme, dass diese „aus kugelförmigen Körperchen bestehen“ (Newton 1978, 50), eine Art optischen Magnuseffekt.

8 Vgl. z.B. Planck (1919, 903ff), Weizsäcker (1990, 11ff und 80ff).

rekt überprüfbareren Sätzen aufgebauter Zweig der Physik zu sein.<sup>9</sup> Durch die physikalische Vereinheitlichung des Lichtstrahlmodells blieben zum Anderen, gerade auf dem Gebiet der Dispersionsoptik, die in *abbildungsoptischer* Hinsicht sich ergebenden Klassen geometrisch isomorpher Spektralphänomene auf einen Spezialfall beschränkt: das klassische Spaltspektrum im Dunkelfeld – eine Verzeichnung der tatsächlichen, experimentell überprüfbareren und hochsymmetrischen Struktur spektraler Phänomene, die bis in heutige Lehrbuchdarstellungen überlebt hat.<sup>10</sup>

### III. Bild und Strahl bei Bartholinus und Huygens

Ein Vergleich der *Versuche* von Bartholinus und der *Abhandlung* von Huygens in Bezug auf den methodischen Gesichtspunkt, der im vorangegangenen Abschnitt an dem Vorgehen Newtons in der *Optik* entwickelt wurde, muss zuerst berücksichtigen, dass die Intentionen der Texte und damit auch ihr Aufbau verschieden ist. Bartholinus' Ziel ist es, die Schritte seiner experimentellen Untersuchungen mitzuteilen und seinen phänomenologischen Ergebnissen eine Form zu geben, die ermöglicht, eine theoretische, d.h. me-

---

9 Daran änderte sich auch nichts durch die Neuformulierung der physikalischen Optik im Rahmen der Maxwellschen Strahlungstheorie. „Classical optics is not based on empirical laws but on a hypothesis, i.e., the wave theory. Since electric and magnetic fields of a light beam, its frequency and phase are unobservable quantities, the wave theory is not a logical foundation of optics.“ (Mueller 1948, 661), vgl. auch Collett (1993, xiv). Als observablenbasierte Beschreibung von Polarisationszuständen haben seit ihrer Wiederentdeckung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die 1850 von Stokes entwickelten Parameter Bedeutung erlangt, vgl. auch die *Matrix-Optik* von Mueller und Jones (s. z.B. Collett 1993; Brousseau 1998).

10 Zur kritischen Würdigung und zur abbildungsoptischen Verallgemeinerung des *experimentum crucis* Newtons siehe Holtmark (1970) und Rang (2009).

chanistische Erklärung der Doppelbrechung daran anzuknüpfen.<sup>11</sup> Zwar fasst er seine Beobachtungen, dem mathematischen Vorbild folgend, abschließend in eine Folge von Lehrsätzen zusammen, zu deren Beweis er unter Bezugnahme auf die *Dioptrik* des Descartes von zwei Hypothesen Gebrauch macht. Ferner stellt er einige Mutmaßungen darüber an, weshalb ihm der Doppelspat geeignet erscheint, die Hypothesen der Korpuskulartheorie zu bestätigen. Er ist sich aber bewusst, dass damit noch keine Erklärung im Sinne einer erfolgreichen Deduzierbarkeit der Phänomene aus Annahmen über die Natur des Lichts gegeben ist.

Demgegenüber ist Huygens' Anliegen in der *Abhandlung* kein vorrangig experimentelles, sondern ein explizit theoretisches. Sein Ziel ist es, die grundlegenden, bisher nur geometrisch beschriebenen Eigenschaften des Lichts: Ausbreitung, Reflexion und Brechung auf eine mathematisch ausformulierte quasi-mechanische Theorie des Lichts zurückzuführen. Der argumentative Weg, den er dabei verfolgt, indem er die Lichtausbreitung in Analogie zur Schallausbreitung denkt, und die wiederholte Reflexion auf die erkenntnistheoretische Struktur seiner Argumentation zwischen empirischem Faktum, geometrischer Deutung, Hypothese und Prüfung derselben am konkreten Fall machen die *Abhandlung* zu einem frühen Vorbild für das Erkenntnisverfahren der mathematischen Physik.

Mit Rücksicht auf die damit angedeutete Verschiedenheit der beiden Texte möchte ich im Folgenden auf die Frage eingehen, inwiefern das methodische Vorgehen von Bartholinus als *bildoptisch* bezeichnet werden kann und welche Ausprägung der *strahlenoptische*, auf physikalische Vereinheitlichung zielende Denkansatz im Vorgehen von Huygens erfährt.

---

11 Vgl. die „Beobachtungen zum Beweis des Vorhergehenden“ in Bartholinus (1922, 26f)

## 1. Ein Blick auf Bartholinus' „Versuche“

Am auffälligsten an Bartholinus' Text, im Vergleich mit der *Abhandlung*, ist der durchgängige Gebrauch des Begriffes Bild (*imago, speciem*). Alle Versuche (7–17), in denen die doppelbrechende, d. h. zwei Bilder eines gemeinsamen Objektpunkts hervorbringende Eigenschaft des Spats beschrieben wird, handeln von gesehenen Bildern, die in Bezug auf ihr Verhalten unter verschiedenen Operationen mit dem Spat als ruhend und bewegt unterschieden und dementsprechend der regelmäßigen und unregelmäßigen Brechung zugeordnet werden. Dies bedeutet nicht, dass im Zusammenhang mit Beschreibungen zur Bildentstehung nicht gelegentlich auch von Strahlen die Rede ist. Die Propositionen, in denen Bartholinus abschließend seine Beobachtungen zusammenfasst und in der Struktur von Satz und Beweis, mit Bezug auf seine vorangegangenen Experimente erläutert, handeln indessen von Bildern, sie lesen sich wie Axiome einer Bildoptik des Doppelspats.<sup>12</sup> Dort heißt es u.a.: *Die Bilder erscheinen doppelt* (1. Satz). *Die Bilder erscheinen von schwächerer Farbe* (2. Satz). *Ein Bild scheint tiefer zu liegen als das andere* (4. Satz). *Das bewegliche Bild muss notwendig immer in Richtung gegen denjenigen Teil des Prismas liegen, der gegen die Tischfläche hin geneigt ist* (7 Satz). – Jeder, der die Gelegenheit hat, sich ein Exemplar des Spats in ausreichender Größe und Reinheit zu beschaffen, kann die mit diesen Sätzen aufgestellte Phänomenologie des Doppelspats gewissermaßen parallel zur Lektüre des Texts selbst unmittelbar und Schritt für Schritt nachvollziehen und überprüfen.

Dieser ersten Lektüre, die der methodischen Perspektive der *Versuche* gilt, soll nun eine zweite, eingehendere folgen, die sich von der Frage leiten lässt: Was genau bezeichnet Bartholinus als Bild, wie unterscheidet er Bild und Strahl (*linea ab oculo, linea ab obiectum, radius visualis*) und welchen geometrischen Ort weist er den Doppelbildern eines durch den Spat gesehenen Objektpunktes zu?

---

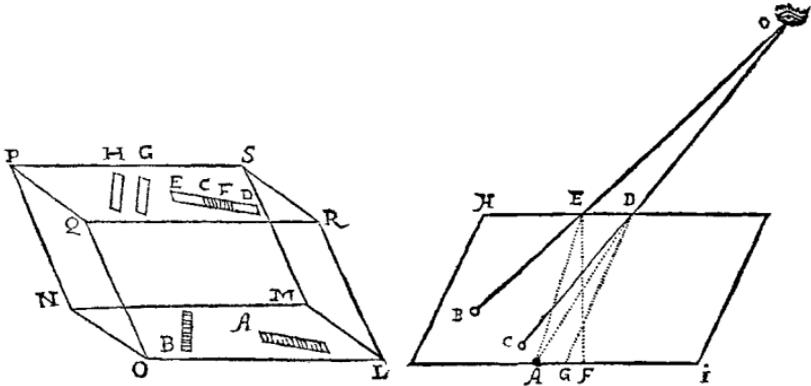
12 Bartholinus (1922, 29–35)

Prüft man daraufhin die entsprechenden Erörterungen mit den jeweils zugehörigen Figuren und berücksichtigt dabei auch das Manuskript (Lohne 1977), so gelangt man zu der Feststellung, dass eine genauere Definition des Bildbegriffes fehlt. Dieser wird von Bartholinus zwar durchgehend gebraucht, aber mit wechselnden Zuordnungen, so dass die Lage konstruktiv bedingter Punkte der Strahlgeometrie mit den tatsächlich beobachtbaren Orten der Doppelbilder vermischt wird und der Eindruck entsteht, dass Bartholinus von Bildern spricht, aber strahlenoptisch denkt. Die Entstehung der Bilder, der Ort, an dem sie dem Auge erscheinen und der Weg, auf dem sie ins Auge gelangen, wird stets im Konzept der Strahlbrechung beschrieben („gebrochenes Bild“). Es fehlt gewissermaßen das Konzept der optischen Hebung und damit die Möglichkeit, die gehoben erscheinenden Doppelbilder eines durch den Doppelspat fixierten Objektpunktes mit der Brechung des zugehörigen Strahlverlaufs, nach den von Snellius und Descartes angegebenen Konstruktionsregeln, geometrisch zu verknüpfen.

Stattdessen verlegt Bartholinus die Lage der Doppelbilder wiederholt auf die Oberfläche<sup>13</sup> des Doppelspats (Bild 3, links). Er identifiziert sie mit den geometrischen Einblickpunkten, die sich im Zusammenhang mit der Konstruktion der beiden vom Objekt ausgehenden und an der Grenzfläche zum Auge hin abknickenden Strahlen ergeben, die aber selbst nicht beobachtbar, sondern nur konstruktiv ermittelbar sind.

---

13 Siehe Fig. 4 (hier in Bild 3, links wiedergegeben), Fig. 7–11, Fig. 13 und Fig. 16. In Versuch 7 heißt es mit Verweis auf Figur 4: „Durch andere durchsichtige Körper [...] hindurch wird nun die Gestalt eines Gegenstandes gleich und einfach wiedergegeben, während man hier jeden derselben in doppeltem Bilde auf der Oberfläche *RSPQ* erblickt, nämlich *B* in *G* und in *H*.“ Vgl. ähnliche Formulierungen auch bereits in Bezug auf die regelmäßige Brechung in den Versuchen 9 und 13. „Weil man nun lediglich die Bilder des Punktes *A* auf der Oberfläche wahrnimmt, so kann seine wirkliche Lage nur schwer angegeben werden...“ heißt es in Versuch 16 mit Verweis auf Figur 11 zum Problem, dass die tatsächliche Lage des durch einen Spat angeblickten Objektpunktes *A* durch jenen verdeckt wird.



**Bild 3:** Darstellung der Doppelbilder von A (H und G) und B (EF und CD) auf der Oberfläche des Spats in Fig. 4 zum 7. Versuch (links). Fig. 5 aus dem 9. Versuch (rechts) zeigt den Hauptschnitt des Spats mit der Konstruktion der unterschiedlich gehobenen Bildorte B und C für den Blick von O im Verhältnis zur Lage der Einblickpunkte E und D und des Objektpunkts A.<sup>14</sup>

Abweichend von den genannten Äußerungen zur Lage der Doppelbilder auf der Spatoberfläche, steht die im 9. Versuch beschriebene Beobachtung: „Bei genauer Beobachtung erscheint von diesen beiden Bildern das eine etwas erhöht gegen das andere.“<sup>15</sup> Auf die näheren Umstände dieser bedeutsamen Beobachtung geht Bartholinus nicht weiter ein.<sup>16</sup> Er geht stattdessen zur Erläuterung einer geometrischen Darstellung (Bild 3, rechts) über, die den Spat im Hauptschnitt zeigt und in der die Orte B und C der verschieden stark gehobenen Doppelbilder in der rückwärtigen Verlängerung der beiden zwischen Grenzfläche und Auge verlaufenden Strahl-

14 Die in Bild 3 verwendeten Zeichnungen entstammen dem Manuskript und sind dort als Fig. 2 zu Versuch 6 und Fig. 10 zu Versuch 17 aufgeführt (Lohne 1977, 114 und 132).

15 Im lateinischen Original des Manuskripts heißt es: „Animum et aciem oculorum probé intendentibus apparet una ex duabus hisce imaginibus altera elevatior; estqve fixa illa qvae situ altiori conspicitur.“ (Lohne 1977, 132)

abschnitte  $EO$  und  $DO$  angegeben sind. Folgt man der Erläuterung, die im 4. Satz gegeben ist, so „erscheint  $B$ “ (das höhere, ordentliche) „gleichsam durch einen Körper hindurch, dessen Dicke von der Senkrechten der gewöhnlichen Brechung  $EF$  gemessen wird,  $C$  hingegen“ (das tiefere, außerordentliche) erscheint gewissermaßen durch einen Körper hindurch, dessen Dicke von  $DG$  dargestellt wird, der Parallelen“ (zur Neigung des Spats), „zu der hin die außergewöhnliche Brechung gerichtet ist.“ Bartholinus überträgt also die Dicke des Spats auf die Entfernung des ordentlichen Bildes vom zugehörigen Einblickpunkt  $E$ .<sup>17</sup> Entsprechend verfährt er für das außerordentliche Bild, wobei er als Referenz der außerordentlichen Brechung die Neigung des Kristalls annimmt. Die sich daraus ergebenden geometrischen Orte der Doppelbilder stehen aber nicht nur im Widerspruch mit der Beobachtung; bereits die Angabe der gesehenen Lage des ordentlichen Bildes widerspricht der Konstruktion nach Snellius. Folgt man dieser, indem man den Strahlabschnitt  $EA$  in Bild 3 mit dem Kehrwert 3:5 des von Bartholinus für die ordentliche Brechung bestimmten Brechungsverhältnisses gewichtet, ergibt sich ein Bildort, der senkrecht über dem

---

16 Wie gut diese Beobachtung gelingt, hängt von der Größe und insbesondere von der Reinheit des verfügbaren Kristalls ab. Je dicker das durchblickte Spatvolumen ist, desto stärker erscheinen die Doppelbilder eines unter dem Spat liegenden Objekts getrennt und gehoben und desto besser ist ihre relative Höhendifferenz zu sehen. Im 17. Versuch gibt Bartholinus die Dicke seiner Exemplare des Spats mit „kaum zwei Daumen“ an. Geht man von 40 mm Dicke aus, dann verhält sich bei senkrechtem Blick auf den Spat die gesehene Entfernung des ordentlichen Bildes von der Spatoberfläche zur Spatdicke wie 3:5 (genauer:  $1/n_o = 1/1,65$ ). Das ordentliche Bild erscheint folglich um etwa 15 mm gehoben und der horizontale Abstand zwischen den Mittelpunkten der Doppelbilder beträgt etwa 4,3 mm.

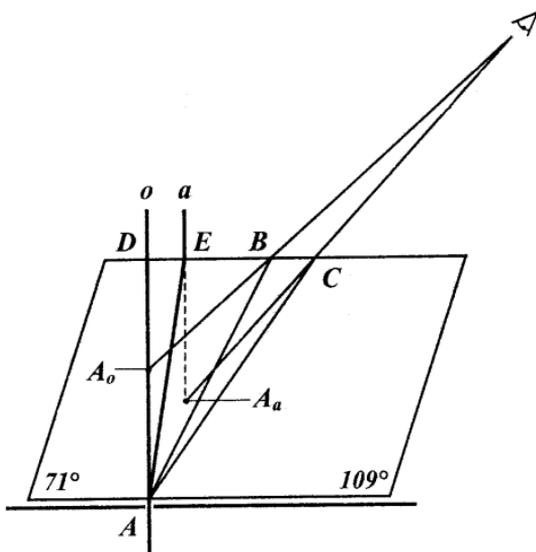
17 Vgl. Bild 3, rechts: Es gilt  $EF = EB$  und  $DG = DC$  (vgl. Lohne 1977, 133); tatsächlich ist  $DG$  etwas kürzer gezeichnet als  $DC$ . Aus der Begründung in Satz 4 müsste geschlossen werden können, dass im Falle eines senkrechten Blicks auf den Spat das ordentliche Bild mit dem Urbild zusammenfällt und demnach überhaupt keine Hebung erfährt.

Objekt *A* liegt. Dort wird er auch gesehen, und zwar unabhängig vom Blickwinkel; von diesem hängt lediglich ab, wie stark das orientliche Bild von *A* gehoben erscheint.<sup>18</sup>

Einen Überblick über die Lage der Doppelbilder im Verhältnis zu den Einblickpunkten auf der Oberfläche des Spats, wie sie aus der Brechungskonstruktion nach Snellius für einen gegebenen Blickwinkel folgt, gibt Bild 4. Als Ergänzung ist dort der Fall eingezeichnet, dass der Objektpunkt *A* als kleine Lochblende ausgeführt ist, die von einer starken Lampe senkrecht durchleuchtet wird. Das so präparierte Lichtbündel spaltet sich an der Grundfläche des Spats in zwei Teilstrahlen auf, die an der Oberfläche des Spats mit einem gegenseitigen Abstand, der von der durchlaufenen Spatdicke abhängt, parallel austreten. Ist die Lampe hell genug, werden die Austrittspunkte als helle Flecken *D* und *E* auf der Oberfläche des Spats sichtbar.<sup>19</sup>

---

18 Für eine detailliertere Betrachtung zur Hebung sind die astigmatischen Bedingungen der Bildentstehung zu berücksichtigen (vgl. z.B. Bartlett & Lucero 1984; Nassar 1994). Bei zweiäugiger Beobachtung stellt die Beschränkung auf das sagittale Bild eine gute Annäherung dar. Zum konzeptionellen Zusammenhang zwischen Hebung und Brechung vgl. Grebe-Ellis *et al.* (2009). Bei Kepler heißt es mit Bezug auf Euklid: „Der wirkliche Ort des Bildes ist [...] der Punkt, in dem sich die Verlängerungen der Sehstrahlen beider Augen über ihre Brechungspunkte [...] hinaus schneiden. [...] Da sich also der Ort des Bildes im Schnittpunkt der Sehestrahlen befindet, so wird er [...] auch im Schnitt der Ebenen der Brechung [...] von beiden Augen liegen. Und da diese beiden Ebenen [...] senkrecht stehen auf der brechenden [...] Oberfläche und sich gegenseitig schneiden, so wird [...] dieser gemeinschaftliche Schnitt senkrecht zu derselben brechenden [...] Oberfläche sein. Deshalb werden sich wiederum alle Bilder des gesehenen Gegenstandes in der Senkrechten befinden, die vom Gegenstand nach der brechenden [...] Oberfläche gezogen wird...“ (Kepler 2008, 119f). Vgl. auch die Zeichnung einer unter verschiedenen Winkeln gehoben gesehenen Bodenlinie von Johann Georg Brengger in einem Brief vom 23. 12. 1604 an Kepler, abgedruckt in der Einführung von R. Rieker (Kepler 2008, 69).



**Bild 4:** Der Hauptschnitt des Doppelspats mit dem Objektpunkt  $A$ , dessen ordentliches Bild von dem eingezeichneten Auge in  $A_o$  und dessen außerordentliches Bild in  $A_a$  gesehen wird.  $B$  und  $C$  sind die zugehörigen Einblickpunkte. Es gilt:  $BA:BA_o = 1,65$  und  $CA/CA_a = 1,48$ . Ein paralleles Lichtbündel, das durch eine kleine Lochblende in  $A$  eintritt, spaltet sich in die Teilstrahlen  $o$  und  $a$ , die unter einem Winkel von  $6,2^\circ$  im Spat auseinanderlaufen und in  $D$  und  $E$  parallel austreten.

Der Blick auf die *Versuche* des Bartholinus hinsichtlich der Frage nach der Rolle des Bildbegriffs und nach der gesehenen Lage der Doppelbilder hat zu einigen Anmerkungen geführt, die ich so zusammenfassen möchte: Es scheint, als habe Bartholinus zunächst eine bildoptische Phänomenologie des Doppelspats angestrebt, weil diese ihm die Möglichkeit bot, das ungewohnte und komplexe Verhalten des außerordentlichen Bildes relativ zu seinem ordentlichen Zwilling in derjenigen Perspektive darzustellen und geometrisch zu analysieren, in der sich die Bilder dem Auge

---

19 Huygens erzeugt diese Situation im 9. Versuch des 5. Kapitels seiner *Abhandlung* mit Sonnenlicht, das auf eine feine Lochblende auf der Spatoberfläche fällt.

tatsächlich darbieten. Um diese Phänomenologie konsequent auszuführen und mit der abgelösten Perspektive der herkömmlichen Strahldarstellung zu verknüpfen, hätte es indessen des konzeptionellen Zusammenhangs zwischen *Bildhebung* und *Strahlbrechung* bedurft, durch den der perspektivische Übergang zwischen der Beschreibung beobachtbarer Bilder und der Konstruktion vorgestellter Strahlverläufe geometrisch konsistent und in der Erfahrung überprüfbar geworden wäre.<sup>20</sup>

Von dieser Kritik unberührt bleibt die für die Entwicklung der Optik fundamentale Bedeutung der Entdeckung, dass es sich bei dem zweiten Bild nicht um eine innere Spiegelung, sondern um die Folge einer modifizierten Brechung handelt. Indem Bartholinus die Bedingungen fand, unter denen sich das Verhalten der Doppelbilder unter Drehungen des Spats durch geeignete Schnitte relativ zu seiner Hauptachse *vertauscht*, hatte er sozusagen den bildoptischen Beweis für ihre Wesensverwandtschaft erbracht.

## 2. Ein Blick auf Huygens' „Abhandlung“

Huygens Kunstgriff in der *Abhandlung* besteht in einer konzeptionellen Übertragungsleistung, die ein besonders lehrreiches Beispiel dafür darstellt, was in Anknüpfung an Descartes zum bestimmenden Merkmal physikalischer Theoriebildung werden sollte: Reduktion auf die primären Qualitäten und begriffliche Vereinheitlichung. Er behandelt die Optik nach dem Vorbild der Schallausbreitung, d.h. als mechanisches Problem, indem er die bekannten Begriffe der Wellen- und Stoßmechanik auf die Ausbreitung des Lichts und seine Wechselwirkungen mit Materie überträgt. Die Tatsache, dass in den strahlgeometrischen Eigenschaften optischer Phänomene solche der Schallausbreitung wiedererkannt werden

---

20 Anknüpfungen an die *Versuche* des Bartholinus, die den genannten Zusammenhang zwischen bild- und strahlenoptischer Konzeptualisierung in Beiträgen zu einer bildoptischen Phänomenologie des Doppelspats systematisch ausarbeiten und beleuchten, finden sich bei Howald-Haller (1964) und Grebe-Ellis (2005, 95–160).

können, gestattet es ihm, von der Verschiedenartigkeit optischer und akustischer Phänomene in Bezug auf die Bedingungen ihrer Entstehung abzusehen und Licht so wie Schall ursächlich als *Bewegung* zu denken. Huygens verfolgt damit ein ganz ähnliches Ziel wie Newton. Während dieser aber von der Zerlegbarkeit des weißen Lichtstrahls auf die Frage nach der physikalischen Natur des Lichts als Kompositum geführt wird, gelangt Huygens durch den stoßmechanischen Analogieschluss zu einer *Kinematik des Lichts*, deren mathematisch-geometrische Seite ihn mehr interessiert als die Frage, woraus Licht als Stoff besteht.

Vor diesem Hintergrund ist auch der Strahlbegriff zu sehen, den Huygens in der *Abhandlung* verwendet: Lichtstrahlen werden experimentell durch die Präparation paralleler Lichtbündel realisiert. Als geometrischer Operator kennzeichnen sie indessen kein materielles Kontinuum und auch nicht die Spur vorgestellter Transmissionsvorgänge, sondern Richtungen im Raum, in denen sich zeitliche Folgen von Bewegungszuständen durch einen vermittelnden Äther mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Die strahlenoptische Argumentation durchzieht die gesamte *Abhandlung*. Lediglich in den Erörterungen des 5. Kapitels, das der Untersuchung der Doppelbrechung gewidmet ist, finden sich Passagen, in denen Huygens auf die „Erhebung“ von „Bildern“ eingeht und explizit den Zusammenhang zwischen Licht und Sicht, d.h. zwischen gebrochenem Beleuchtungsstrahlengang und gehobenem Bild darstellt. Anknüpfend an Bartholinus' Beobachtungen konstatiert er die unterschiedlich starke Hebung der Doppelbilder und die Tatsache, dass das stärker gehobene, ordentliche Bild unter Drehungen des Spates ruht, während das schwächer gehobene und nach der Seite verschobene außerordentliche Bild um das ruhende mitrotiert. In einer Reihe von Skizzen, die den Abschnitten 39 bis 43 beigegeben sind, konstruiert Huygens die gesehenen Orte des ordentlichen und außerordentlichen Bildes für das zweiäugige Sehen. Die Bilder ergeben sich durch die Konstruktion nach Snellius als Schnittpunkte der beiden symmetrisch zur Grenzfläche liegenden und ins Medium hinein verlängerten Gesichtslinien.

Das Ziel, die unordentliche Brechung als Modifikation der ordentlichen nachzuweisen und zu zeigen, wie daraus nach den bekannten Regeln der Refraktionsoptik die gesehenen Orte der Doppelbilder abgeleitet werden können, hatte Huygens damit erreicht.

#### IV. Das „*phénomène merveilleux*“

Am Ende des 5. Kapitels berichtet Huygens von einer „wunderbaren Erscheinung“, auf die er erst aufmerksam wurde, nachdem er die vorangegangenen Ausführungen bereits niedergeschrieben hatte. Das Phänomen, mit dessen Entdeckung er als Erster die Polarisierungseigenschaften der Doppelbilder zu enthüllen beginnt, zeigt sich bei dem Versuch, *Doppelbilder von Doppelbildern* zu erzeugen, indem man die Doppelbilder eines Objekts, beispielsweise eines Buchstabens, durch eine zweiten Spat anschaut. Die Erwartung, es würden sich vier Bilder zeigen, erweist sich als voreilig, zumindest wenn der zweite Spat dieselbe Orientierung hat wie der erste bzw. wenn die Hauptschnitte der Spate in einer Ebene liegen. Die aus dem ersten Kristall austretenden Strahlen erfahren im zweiten nur eine ihnen jeweils entsprechende Brechung. Huygens vermutet zunächst, dass die Strahlen durch ihre Zerlegung im ersten Spat die „Fähigkeit“ verloren haben, im zweiten diejenige „Materie zu bewegen“, welche die jeweils andere Brechung bedingt. Dann orientiert er die Spate jedoch überkreuz, so dass ihre Hauptschnitte in orthogonalen Ebenen liegen, und stellt fest, dass das Brechungsverhalten der Strahlen nun vertauscht erscheint: Der ordentliche Strahl des ersten Spats wird vom zweiten außerordentlich gebrochen – und umgekehrt. In allen anderen Stellungen, die von der Parallel- und Kreuzstellung abweichen, zerteilen sich die Strahlen des ersten Spats an der Oberfläche des zweiten von neuem in zwei, „so dass aus dem einzigen Strahl *AB* deren vier entstehen, bald von gleicher Helligkeit, bald von sehr verschiedener, je nach der verschiedenen gegenseitigen Lage der Kristalle, jedoch so, dass sie alle anscheinend nicht mehr Licht enthalten als der eine Strahl *AB*.“<sup>21</sup>

So knapp diese Darstellung des *phénomène merveilleux* ist, so kennzeichnet sie doch bereits wesentliche Bedingungen und Merkmale, welche die Entstehung, Zerlegung und Auslöschung orthogonal polarisierter Strahlen im Zusammenwirken zweier einachsigen doppelbrechender Kristalle auszeichnen. Huygens belässt es bei dieser Darstellung. Mit der Vermutung, dass die Strahlen im Durchgang durch den ersten Spat eine „gewisse Gestalt oder Anordnung erlangen“, von deren relativer Orientierung zum zweiten Spat abhängt, ob und in welchem Grade die beiden Brechungsarten wirksam werden, kommt er einem geometrischen Verständnis der Polarisation sehr nahe. Er führt seine Vermutung aber nicht weiter aus, sondern schließt den betreffenden Absatz mit dem Eingeständnis, keine ihn befriedigende Erklärung gefunden zu haben.<sup>22</sup>

Vor dem Hintergrund der methodischen Unterscheidung zwischen bild- und strahlenoptischer Argumentation, die in den vorangegangenen Betrachtungen leitend war, und mit Rücksicht auf die Tatsache, dass Huygens' Beschreibung des *phénomène merveilleux* sehr knapp ausfällt, kann man auf den Gedanken kommen, sich dafür zu interessieren, wie die Beschreibung des Phänomens

---

21 Huygens (1996, 80), vgl. z.B. die Beschreibung und Abbildungsreihe bei Niedrig *et al.* (2004, 541f).

22 Newton befasst sich mit den *Versuchen* und dem 5. Kapitel der *Abhandlung* in den *Queries* 25–29 am Ende des dritten Buches der *Optik*. Er nutzt die Gelegenheit, um seine Einwände gegen die Modifikationstheorie Huygens' vorzubringen und postuliert an den korpuskularen Lichtstrahlen vier verschiedene „Seiten, von denen zwei einander gegenüberliegende den Strahl befähigen, ungewöhnlich gebrochen zu werden, sobald eine von ihnen gegen die Seite der ungewöhnlichen Brechung gekehrt ist, die beiden anderen bei derselben Lage ihm keine andere, als die gewöhnliche Brechung gestatten.“ In den Erörterungen zur Frage 29 denkt er über das Zusammenwirken der Lichtteilchen mit den Kristallteilchen nach und vermutet, dass diese mit jenen etwa in der Art „sympathisieren“, wie die Pole zweier Magnete – ein Vergleich, auf den sich 100 Jahre später Malus beziehen sollte, als er für die mit „Seitlichkeit“ bezeichnete Eigenschaft der Lichtstrahlen den Begriff der „Polarisation“ einführte, vgl. hierzu Frankel (1974).

ausfallen würde, wenn man sie gewissermaßen nach Bartholinus als bildoptische Phänomenologie entwickelte. Wie sieht in diesem Sinne der Bildwechsel aus, der sich ergibt, wenn man einen optischen Kontrast, beispielsweise einen schwarzen Kreis auf weißem Grund, durch zwei Spate betrachtet, deren relative Orientierung variiert wird? Zur Beantwortung dieser Frage werde ich im Folgenden eine kleine Phänomenologie des *phénomène merveilleux* skizzieren.<sup>23</sup>

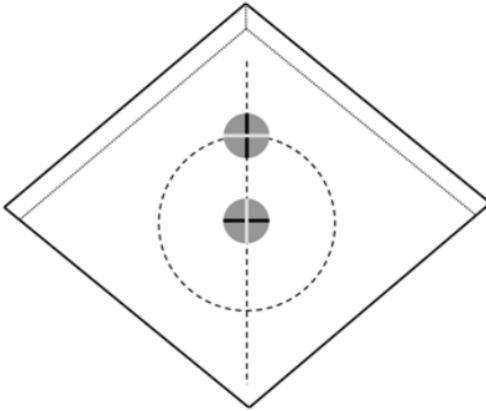
## 1. Doppelbilder

Zur Vorbereitung seien die Verhältnisse der Bildverdopplung vergegenwärtigt, welche sich im senkrechten Durchblick durch einen Spat auf eine kleine schwarze Kreisscheibe ergeben (Bild 5).<sup>24</sup> Diese erscheint in zwei gleichermaßen aufgehellten Bildern, von denen das stärker gehobene senkrecht über der Kreisscheibe gesehen wird und unter Drehungen des Spates ruht (ordentliches Bild), während das schwächer gehobene in Richtung der Neigung des Spats verschoben erscheint und der Drehung des Spats folgt (außerordentliches Bild). Bei genauerer Beobachtung entdeckt man am Rand des beweglichen Bildes zarte farbige Säume, die diesem aber nicht starr anhaften, sondern die unter Drehung des Spats das bewegliche Bild umwandern und so stets auf das ruhende Bild verweisen: Der diesem zugewandte Rand zeigt einen bläulichen, der abgewandte einen rötlichen Saum.<sup>25</sup> Eine weitere, erstmals von

---

23 Ausführliche Darstellungen sind bei Howald-Haller (1964) und in Anknüpfung daran bei Grebe-Ellis (2005, 95–153) gegeben.

24 Es erscheinen natürlich nicht nur die Bilder der Kreisscheibe gehoben, sondern die gesamte durch den Spat gesehene helle Umgebung derselben. Je klarer das Exemplar ist, desto leichter ist es, die verdoppelnde Wirkung bereits an der Innenansicht der Spatkanten zu studieren: Man blickt in zwei relativ zum tastbaren Maß des Kristalls verschieden stark gestauchte und gegeneinander verschobene Volumina, die nur die jeweils durchblickte Grenzfläche gemeinsam haben: Der Doppelspat erscheint gewissermaßen wie „zwei Spate in einem“.



**Bild 5:** Ruhendes und bewegliches Bild einer schwarzen Kreisscheibe auf weißem Grund. Die orthogonalen Orientierungen der jeweils zugehörigen Haidinger-Büschel sind durch einen hellen (Gelbrichtung) und einen dunklen (Blaurichtung) Strich gekennzeichnet. Letzterer gibt die Polarisationsrichtung der Bilder an. In der dargestellten Lage des außerordentlichen Bildes weist der obere Rand einen rötlichen, der untere einen bläulichen Saum auf.

Howald-Haller gemachte Beobachtung sei hier angefügt, die allerdings einige Übung erfordert. Sie wird am besten am komplementären Kontrast, d. h. an einer hell durchleuchteten Lochblende ausgeführt. Lässt man den Blick mehrmals zwischen den beiden Bildern hin- und herwandern, so zeigt sich das helle Grau der Bilder von einer schwachen Färbung gegliedert, die aufleuchtet und dann verklingt und in fortgesetztem Wechsel immer aufs Neue hervorgerufen werden kann. Wer bereits durch anderweitige Be-

---

25 Es handelt sich um Ansätze zu Kantenspektren, die auch am ordentlichen Bild beobachtet werden können, wenn man nicht senkrecht auf die Spatoberfläche blickt und dadurch Blickrichtung und Hebungsrichtung auseinander fallen (Prisma). An dem beweglichen Bild erscheinen sie so, dass man sich dieses durch eine optische Verrückung (Hebung/Brechung) aus dem ruhenden hervorgegangen denken kann. Die Reihenfolge der Farben relativ zur Lage des ruhenden Bildes kehrt sich um, wenn der optische Kontrast invertiert wird.

obachtungen mit dem *Haidinger-Büschel*<sup>26</sup> vertraut ist, der erkennt es hier wieder: Das ruhende Bild zeigt eine stets parallel zum Hauptschnitt des Spats verlaufende, gelblich abgeschattete Garbe, die sich nach der Mitte verjüngt und beidseitig einer bläulich-violetten Färbung Raum gibt. Im beweglichen Bild gewahrt man die gleiche Figur, aber zur ersten gekreuzt, so dass im wechselnden Anblick der Bilder die Gelbrichtung des einen der Blaurichtung des anderen folgt: Die Bilder erscheinen komplementär.

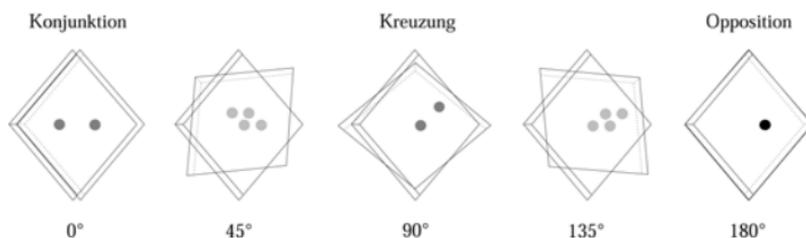
## 2. Doppelbilder von Doppelbildern

Im Folgenden werden die Doppelbilder  $o_1$  und  $a_1$  der schwarzen Kreisscheibe durch einen zweiten, etwa gleich großen Spat betrachtet und es erscheint folgerichtig anzunehmen, dass *Doppelbilder von Doppelbildern*, also insgesamt vier Bilder der Scheibe zu sehen sein werden. Setzt man den zweiten Spat so auf den ersten, dass er dessen Neigung fortsetzt, zeigen sich aber überraschenderweise nur zwei Bilder:  $o_2$  und  $a_2$ , deren gegenseitiger Abstand etwa doppelt so groß ist wie der zwischen  $o_1$  und  $a_1$ . Dass dies in Einklang steht mit den bisherigen Beobachtungen, ergibt sich aus der leicht überprüfaren Tatsache, dass der Abstand der Doppelbilder mit der Dicke des Spats zunimmt und folglich die beiden gleich orientierten Spate wie *ein* Spat mit doppelter Dicke angesehen werden können.

Die Situation ändert sich indessen schlagartig, wenn man den oberen Spat aus der Konjunktion mit dem unteren schrittweise her-

---

26 Das *Haidinger-Büschel*, benannt nach seinem Entdecker, dem österreichischen Mineralogen Wilhelm Karl Haidinger (1795–1871), ist ein komplementärfarbiges Kontrastphänomen, mit dem das menschliche Auge auf Beleuchtung mit linear polarisiertem Licht antwortet. Am leichtesten gelingt die Beobachtung im Durchblick durch handelsübliche Polarisationsfolie. Die Blaurichtung der Büschelfigur stimmt mit der Schwingungsrichtung des elektrischen Feldstärkevektors der einfallenden Strahlung überein, vgl. Haidinger (1844); Mission (1993); Grebe-Ellis (2005, 72–85).



**Bild 6:** Bildfolge des *phénomène merveilleux* für senkrechten Aufblick während einer Drehung des oberen Spats um 180° in 45°-Schritten. Die räumliche Lage der schwarzen Kreisscheibe ist identisch mit der des rechten Doppelbildes bei 0° bzw. mit der des einfachen Bildes bei 180°.

ausdreht: Wie aus dem Nichts tritt symmetrisch zu dem vorhandenen Bildpaar ein zweites, dessen Sichtbarkeit mit fortgesetzter Drehung zunimmt, während das vorhandene sichtlich verblasst, bis nach einer Drehung von 45° alle Bilder etwa gleich aufgehellt erscheinen und in einem Geviert angeordnet sind (Bild 6). Die Fortsetzung der Drehung bis in die Kreuzstellung von 90° bewirkt, dass das erste Bildpaar weiter verblasst und schließlich ganz verschwindet, während das zweite an Deutlichkeit und Kontraststärke gewinnt. Dreht man weiter, so erscheint das erste Bildpaar erneut und bildet mit dem zweiten, wieder verblassenden bei 135° ein weiteres Geviert gleich heller Bilder. In der Opposition der Spate bei 180° scheinen die ursprünglichen Doppelbilder in einem schwarzen Bild zusammen zu fallen: Die räumliche Kompensation der Neigungen der Spate findet gewissermaßen ihren Ausdruck in der Tatsache, dass die gegenseitige Verschiebung von ordentlichem und außerordentlichem Bild aufgehoben ist und das Ensemble der Spate sich scheinbar wie ein optisch isotropes Medium verhält.

Die Fortsetzung der Drehung führt über eine spiegelbildliche Folge wechselnder Ansichten zur Ausgangsstellung zurück. Bezogen auf die gegenläufigen *Phasen der Sichtbarkeit*, d.h. des Erscheinens und Verschwindens der Bildpaare, weist der damit durchlaufene Gesamtzyklus eine vierzählige Symmetrie auf: In den Parallel- und Kreuzstellungen der Spate ist jeweils nur ein Bildpaar zu sehen, in den Diagonalstellungen zwei, d.h. jedes Bild-

paar, bestehend aus einem ruhenden und einem beweglichen Bild, durchläuft den Grundzyklus seines Erscheinens und Verschwindens im Verlauf des Gesamtzyklus zweimal.

Eine genauere Zuordnung der Bilder, ihre relativen Lagen und die Bedingungen des beschriebenen Phasenwechsels sollen sich aus einem erneuten Durchgang durch den halben Grundzyklus ( $\Delta\varphi = 90^\circ$ ) ergeben. Dreht man dazu den oberen Spat aus der Konjunktion mit dem unteren langsam heraus, folgt das tiefer liegende Bild  $a_2$  der Drehung, aber nicht um das ruhende Bild  $o_2$ , wie man mit Rücksicht auf die Verhältnisse am einfachen Spat zunächst annehmen könnte, sondern auf einer Kreisbahn um ein weiteres ruhendes Bild, das genau auf der Hälfte zwischen  $a_2$  und  $o_2$  infolge der Drehung eben erst erkennbar wird und aus dem zugleich ein weiteres, gleichermaßen zunehmendes Bild hervorgeht, das die ausgeführte Drehung auf einer Kreisbahn um  $o_2$  mit vollzieht. In Bild 7 sind die Verhältnisse dieses verschränkten Phasenwechsels der beiden Bildpaare nach einer Drehung des oberen Spats um  $45^\circ$  dargestellt. Die ruhenden, umkreisten Bilder befinden sich stets in gegenläufiger Phase zu ihren Trabanten; das jeweils ruhende Bild verschwindet zwar, bleibt aber als Bezugspunkt des vorhandenen beweglichen wirksam und umgekehrt.

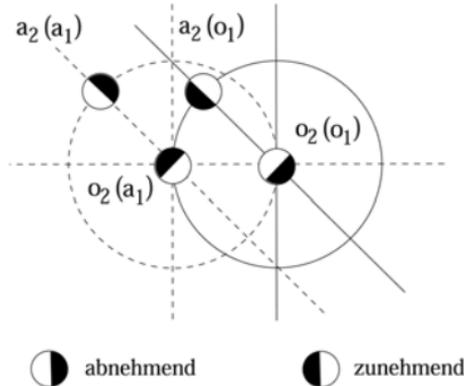
Bezieht man die beiden Bildpaare auf die Doppelbilder  $o_1$  und  $a_1$  des einfachen Spats, ergibt sich die folgende Zuordnung:

**$o_2(o_1)$**  ist das ruhende Doppelbild  $o_2$  des ruhenden Doppelbildes  $o_1$ . Es erscheint bezüglich der Lage des Urbildes unverrückt und weist folglich keine farbigen Ränder auf.

**$o_2(a_1)$**  ist das ruhende Doppelbild  $o_2$  des beweglichen Doppelbildes  $a_1$ . Es erscheint bezüglich des Urbildes um den Abstand von  $o_1$  zu  $a_1$  verrückt und weist entsprechende farbige Ränder gleich bleibender Stärke auf.

**$a_2(o_1)$**  ist das bewegliche Doppelbild  $a_2$  des ruhenden Doppelbildes  $o_1$ . Es umkreist  $o_2(o_1)$  und weist entsprechende farbige Ränder auf, welche die gleiche Stärke haben wie die von  $o_2(a_1)$ .

**$a_2(a_1)$**  ist das bewegliche Doppelbild  $a_2$  des beweglichen Doppelbildes  $a_1$ . Es umkreist  $o_2(a_1)$  auf einer Kreisbahn durch  $o_2(o_1)$ . Entsprechend ist das Maß der Verrückung von  $a_2(a_1)$  bezüglich  $o_2(o_1)$



**Bild 7:** Die vier Bilder in ihrer gegenseitigen Lagebeziehung nach einer Drehung des oberen Spats um  $45^\circ$ . Der Mittelpunkt des rechten (durchgezogenen) Kreises kennzeichnet die Lage der Kreischeibe. Zur Kennzeichnung der *Phasen der Sichtbarkeit* wurde die Phasennotation des Mondes übernommen: In der dargestellten Situation befinden sich die ungemischten Bilder  $a_2(a_1)$  und  $o_2(o_1)$  in abnehmender und die gemischten Bilder  $a_2(o_1)$  und  $o_2(a_1)$  in zunehmender Phase. Die jeweilige Blaurichtung (Polarisationsrichtung) der Bilder ist durch die Lage der Trennlinie zwischen dunklem und hellem Halbreis angegeben. Daran ist erkennbar, dass die Blaurichtungen der beweglichen Bilder stets radial, d.h. auf das von ihnen umkreiste ruhende Bild orientiert sind.

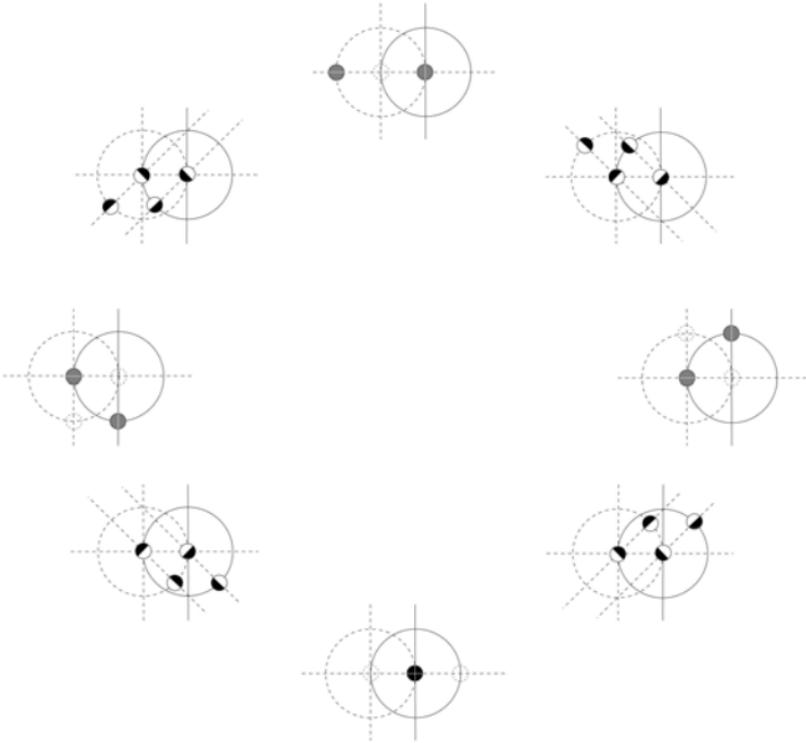
in der Konjunktion der Spate doppelt so stark wie beim einfachen Spat; in der Opposition hingegen ist die Verrückung vollständig aufgehoben. Augenscheinlich wird das veränderliche Maß des Richtungsbezugs von  $a_2(a_1)$  auf  $o_2(o_1)$  durch eine Zu- bzw. Abnahme der farbigen Ränder von  $a_2(a_1)$ .

Betrachtet man die genannten vier Bilder unter verschiedenen Aufblickswinkeln auf die Oberfläche des oberen Spats, kann man bemerken, dass alle vier verschieden stark gehoben erscheinen: Die *gemischten* Bilder  $o_2(a_1)$  und  $a_2(o_1)$  liegen zwischen den *un-gemischten*, d.h. höher als  $a_2(a_1)$  und tiefer als  $o_2(o_1)$ ; ferner liegt  $o_2(a_1)$  höher als  $a_2(o_1)$ . Für die Opposition der Spate bei  $180^\circ$  entdeckt man insbesondere, dass die für lotrechten Aufblick in das einfache und unverrückte Bild scheinbar zusammenfallenden Bilder  $a_2(a_1)$  und  $o_2(o_1)$  tatsächlich räumlich getrennt bleiben: Das er-

heblich tiefer liegende Bild  $a_2(a_1)$  wird durch das senkrecht darüber schwebende Bild  $o_2(o_1)$  gesehen und ergänzt sich mit diesem zum ursprünglichen Kontrast der schwarzen Kreisscheibe.

Zur Frage nach den Bedingungen des Phasenwechsels in Bezug auf die relative räumliche Orientierung der Spate stellt man fest, dass das ungemischte Bildpaar  $o_2(o_1)$  und  $a_2(a_1)$  in den *Parallelstellungen* der Spate ( $0^\circ$  und  $180^\circ$ ), das gemischte  $o_2(a_1)$  und  $a_2(o_1)$  dagegen in den *Kreuzstellungen* der Spate ( $90^\circ$  und  $270^\circ$ ) erhalten ist. Diese Verknüpfung der Bedingungen, unter denen die Bildpaare sichtbar bzw. ausgelöscht sind, mit orthogonalen Orientierungen der Spate weist darauf hin, dass sich in dem beschriebenen Bildwechsel des *phénomène merveilleux* eine Eigenschaft der Bilder geltend macht, bezüglich der sich die am einzelnen Spat erscheinenden Doppelbilder orthogonal zueinander verhalten. Eine solche Richtungseigenschaft, die bekanntermaßen als Polarisation bezeichnet und mit der transversalen Schwingungsrichtung des elektrischen Feldstärkevektors identifiziert wird, wurde oben als charakteristisches Orientierungsmerkmal der Haidinger-Büschel hervorgehoben, die in den Doppelbildern der hellen Kreisblende beobachtet wurden: Das in dem beweglichen Bild  $a_1$  erscheinende Büschel war so orientiert, dass die Blaurichtung (Polarisationsrichtung) mit dem Hauptschnitt des Spates zusammenfiel; die Blaurichtung des in dem ruhenden Bild  $o_1$  erscheinenden Büschels lag senkrecht dazu.

Geht man zu *Doppelbildern von Doppelbildern* über, wird der Phasenwechsel der orthogonal polarisierten Doppelbilder lesbar als Funktion der räumlichen Beziehung der Spate (Bild 8). Sichtbar sind in diesem Sinne immer die Bilder  $o_2$  und  $a_2$ , in denen die Blaurichtung der Bilder  $o_1$  und  $a_1$  *erhalten* bleibt. Dies ist in der Parallelstellung für die ungemischten Bilder  $o_2(o_1)$  und  $a_2(a_2)$  und in der Kreuzstellung für die gemischten  $o_2(a_1)$  und  $a_2(o_1)$  der Fall. Die Auslöschungsbedingung lautet folglich: Ausgelöscht sind immer die Bilder  $o_2$  und  $a_2$ , deren Blaurichtung zu der von  $o_1$  und  $a_1$  *gekreuzt* ist. Dies ist in der Parallelstellung für die gemischten Doppelbilder  $o_2(a_1)$  und  $a_2(o_1)$  und in der Kreuzstellung für die ungemischten  $o_2(o_1)$  und  $a_2(a_2)$  der Fall.



**Bild 8:** Der Gesamtzyklus des *phénomène merveilleux*: Ansichtsfolge im senkrechten Durchblick durch zwei Spate auf eine kleine schwarze Kreisscheibe auf weißem Grund bei einer Drehung des oberen Spats im Uhrzeigersinn in Schritten von  $45^\circ$ . Die schwach punktierten Kreise geben die Orte der jeweils ausgelöschten Bilder an; in der Konjunktion ( $0^\circ$ ) fallen diese zusammen. Das helle Kreuz in dem einfachen Bild bei  $180^\circ$  soll darauf hinweisen, dass das obere Bild  $o_2(o_1)$  eine vertikale und das tiefer liegende, verdeckte Bild  $a_2(a_1)$  eine horizontale Blaurichtung (Polarisationsrichtung) aufweist. Befindet sich eine Phasenplatte zwischen den Spaten (Verallgemeinerung des *phénomène merveilleux*), so ist an den Orten der punktierten Kreise das ohne Phasenplatte jeweils ausgelöschte Bildpaar ebenfalls zu sehen.

Die damit beschriebene funktionale Beziehung zwischen der Sichtbarkeit  $S$  der Bilder  $o_{2,1}$  und  $a_{2,1}$  und dem Winkel  $\varphi$  ihrer jeweiligen Blaurichtungen weist die Eigenschaften des Skalarprodukts auf. Dieses lässt sich durch Quadrieren an die Symmetrieeigenschaften des *phénomène merveilleux* anpassen, so dass sich in formaler Analogie zum Malus-Gesetz für die Sichtbarkeit der ungemischten bzw. gemischten Bildpaare ergibt:

$$\text{ungemischt: } S \sim \cos^2 \varphi, \text{ gemischt: } S \sim \sin^2 \varphi$$

### 3. Die Verallgemeinerung des „*phénomène merveilleux*“

Eine Steigerung erfährt die Bildfolge des *phénomène merveilleux*, wenn zwischen die Spate eine optische Phasenplatte eingefügt wird. Diese kann z.B. aus einem Glimmerblatt oder einem Stück gewöhnlicher Verpackungsfolie<sup>27</sup> bestehen. Orientiert man diese Phasenplatte so, dass ihre Hauptachse diagonal zur Hauptachse des unteren Spats liegt, so bleiben während einer vollen Drehung des oberen Spats alle vier Bilder sichtbar: Der charakteristische Wechsel von Erscheinung (Parallelrelation) und Auslöschung (Kreuzrelation) der Bildpaare ist aufgehoben. An seine Stelle tritt eine komplementäre Färbung der beiden Bildpaare, die in den Parallel- und Kreuzstellungen der Spate intensiv aufleuchtet und in den dazwischen liegenden Diagonalstellungen verblasst bzw. wechselt.

Welche Farben in den Bildern auftreten und wie stark die Bildhelligkeit unter Drehungen des oberen Spats schwankt, hängt von der Dicke der Phasenplatte und ihrer Orientierung bzw. von der Anzahl der Folienschichten ab. In dem zur Situation ohne Phasenplatte ( $I \sim \cos^2 \varphi$ ) polaren Sonderfall hinsichtlich der Bildhelligkeit

---

27 Handelsübliche Verpackungs- und Haushaltsfolien sowie Tesafilmstreifen u.ä. sind herstellungsbedingt gestreckt und dadurch optisch anisotrop. Die Streckrichtung ist hinsichtlich der optischen Symmetrieeigenschaften der Kunststoffe zwischen gekreuzten Polarisatoren der kristallographischen Hauptachse einachsigt doppelbrechender Kristalle vergleichbar.

zeigt sich diese *invariant* unter Drehungen des oberen Spats ( $I = \text{const.}$ ). Eine systematische Variation der Schichtdicke führt auf eine Serie von Bildzyklen, die selbst eine zyklische Funktion der Schichtdicke ist: Bildzyklen, die einer  $\cos^2\varphi$ -Charakteristik folgen, wechseln sich ab mit solchen, deren Bildhelligkeit gegenüber Drehungen des oberen Spats invariant bleibt. Dazwischen liegen Zyklen, die mehr oder weniger starke Schwankungen der Bildhelligkeit zeigen. Liest man das Verhalten der Bildhelligkeit  $I$  gegenüber der Drehanalyse  $\varphi$  durch den oberen Spat für eine gegebene Schichtdicke  $d$  in einfarbiger Beleuchtung  $\lambda$  als operationale Charakteristik des jeweiligen Polarisationszustands  $P$ , erweisen sich die beiden betrachteten Fälle: 1.  $I \sim \cos^2\varphi$  (*linear*) und 2.  $I = \text{const.}$  (*zirkular*) als Sonderfälle eines verallgemeinerten (*elliptischen*) Polarisationszustands  $P(\delta_\lambda)$ , dessen Phase  $\delta_\lambda$  eine zyklische Funktion der Schichtdicke der Phasenplatte und ihrer Doppelbrechung ist:  $\delta_\lambda = 2\pi d (|n_o - n_a|) / \lambda$ .

Das Zusammenspiel zwischen den Doppelspaten und einem dritten, als Zustandstransformator wirksamen doppelbrechenden Medium, ist damit nur angedeutet. Es ist nicht nur von einer außergewöhnlichen ästhetischen Anmutung, sondern eröffnet ein Untersuchungsfeld, das vielfältige Möglichkeiten bietet, die Eigenschaften und Symmetriemerkmale von Polarisationszuständen als Bildzustände zu studieren und zu veranschaulichen.<sup>28</sup>

## V. Das Lichtspurenvierseit

Howald-Haller ist bei seinen Untersuchungen des Doppelspats auf ein Phänomen gestoßen, in dem sich bild- und strahlenoptische Aspekte auf überraschende Weise verschränken und das deshalb zum Schluss dieser Einführung erwähnt werden soll: das *Lichtspurenvierseit* (Howald-Haller 1964, 14). Man durchstrahlt dazu den

---

28 Wie die operationale Zustandsdefinition auf die mathematische Darstellung der Polarisationszustände (Poincaré-Kugel) bezogen werden kann, wird in Grebe-Ellis (2005, 219ff) skizziert.

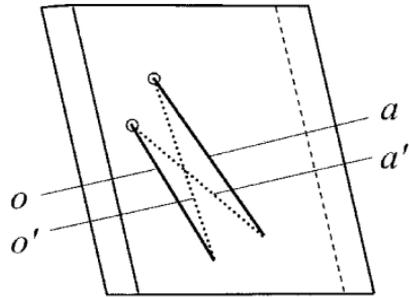
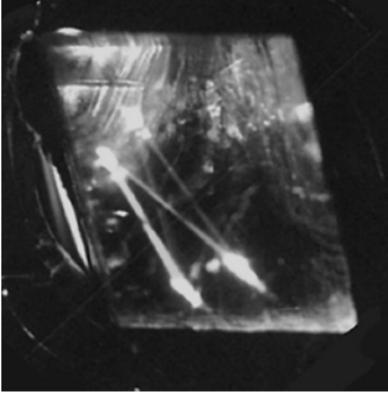
Spat mit einem schmalen, extrem intensiven Lichtbündel.<sup>29</sup> Blickt man dann von der Austrittsseite ins Innere des Spats, erkennt man zunächst zwei parallele Lichtspuren, die von den Doppelbildern des Punkts ausgehen, in dem das Lichtbündel auf der abgewandten Seite des Spats eintritt und die in der Hauptebene des Spats liegen. Der stärkeren Hebung des ordentlichen Bildes entsprechend ist die ordentliche Spur kürzer als die außerordentliche. Ist das Lichtbündel intensiv genug, erkennt man zwei weitere Spuren, die mit den beiden erstgenannten in der Hauptebene des Spats liegen und ein Kreuz bilden, indem sie die Fußpunkte der Parallels Spuren mit den Austrittspunkten derselben verbinden (Bild 9).

Die Herkunft dieser sich kreuzenden Lichtspuren wird verständlich, wenn man bedenkt, dass der Spat im stark durchleuchteten Gebiet der Spuren o und a durch Streuung selbst sichtbar wird: Feinste Trübungen leuchten hell auf, so dass *Durchleuchten* in *Anleuchten* übergeht. Gemäß der Anfangsbeobachtungen am Spat kann man für jeden durch den Spat angeblickten optischen Kontrast ein ordentliches und ein in Richtung der Hauptachse verschobenes außerordentliches Bild erwarten. Dies gilt gleichermaßen für Kontraste, beispielsweise Trübungen, welche im Inneren des Spats liegen. Mit der Entfernung einer solchen Trübung von der dem Betrachter zugewandten Seite, d.h. mit der jeweils durchblickten Spatstärke, wächst auch der gesehene Abstand zwischen den zugehörigen Doppelbildern. So erscheint die Spur o von der durchblickten Spatseite aus mit Richtung auf den Fußpunkt der Spur a in der Spur o' verdoppelt. Das Bild a' der Spur a hingegen erscheint entgegengesetzt verschoben mit Richtung auf den Fußpunkt der Spur o.<sup>30</sup>

Das Ziel der vorliegenden Einführung war, bild- und strahlenoptische Aspekte der Betrachtungsweisen von Bartholinus in den

---

29 Es empfiehlt sich dazu, die Leuchtfläche eines lichtstarken OH-Projektors mit einer dunklen Pappe abzudecken, in die man ein 1–2 mm großes Loch hineinsticht. Noch besser geht es mit einem leistungsstarken Laserpointer, gegen den man sich aber wegen unbeabsichtigter Reflexe an den Spatflächen mit einer Brille schützen sollte.



**Bild 9:** Das Lichtspurenvierseit. Beleuchtet wurde mit Sonnenlicht von links oben hinten nach rechts unten vorne. Foto: Franke (2003)

*Versuchen* und von Huygens in der *Abhandlung in Augenschein* zu nehmen und das *phénomène merveilleux* durch eine bildoptische Phänomenologie als eine Art von *experimentum crucis* der Polarisation zu würdigen. Das Lichtspurenvierseit wird für den methodischen Gesichtspunkt dieser Einführung zum Symbol, indem es zeigt, wie sich Bild und Strahl im Experiment verschränken.

---

30 Bezogen auf die Darstellung des Hauptschnitts in Bild 4 bedeutet dies: Das Doppelbild des ordentlichen Spurabschnitts  $A_oD$  erscheint zwischen  $A_a$  und  $D$ ; dasjenige des außerordentlichen Spurabschnitts  $A_aE$  zwischen  $A_o$  und  $E$ . Für eine detailliertere Analyse der Polarisierungseigenschaften des Lichtspurenvierseits siehe Franke (2003) und Grebe-Ellis (2005, 138ff).

## Literatur

- Bartholinus, Erasmus (1922): *Versuche mit dem doppeltbrechenden isländischen Kristall, die zur Entdeckung einer wunderbaren und außergewöhnlichen Brechung führten*. Deutsch von Karl Mieleitner als Bd. 205 der Reihe *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft. Lateinische Erstausgabe (1669): *Experimenta Crystalli Islandici Disdiaclastici Quibus mira & insolita Refractio detegitur*. Hafniae: Daniel Paullus, Reg. Bibl.
- Bartholinus, Erasmus (1991): *Experiments on birefringent Icelandic Crystal*. Übersetzt von Th. Archibald. Einleitung von Jed Z. Buchwald and Kurt M. Pedersen, Kopenhagen: The Danish Library of Science and Medicine
- Bartlett, A.; Lucero, R. (1984): Note on a common virtual image. *American Journal of Physics* 52 (7): 640–643
- Brosseau, Christian (1998): *Fundamentals of Polarized Light: A statistical Optics Approach*. New York: John Wiley
- Collett, Edward (1993): *Polarized Light: Fundamentals and Applications*. New York: Marcel Dekker
- Dijksterhuis, Eduard Jan (1956): *Die Mechanisierung des Weltbildes*. Deutsch von Helga Habicht. Berlin: Springer
- Dijksterhuis, Fokko Jan (2004): *Lenses and Waves. Christian Huygens and the Mathematical Science in the Seventeenth Century*. Archimedes – New Studies in the History of Science and Technology, Vol. 9, Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers
- Franke, Matthias (2003): *Untersuchung von Lichtspuren am Doppelspat*. Staatsexamensarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin
- Frankel, Eugene (1974): The Search for a Corpuscular Theory of Double Refraction: Malus, Laplace and the Price Competition of 1808. *Centaurus* 18/3: 223–245
- Garboe, Axel (1954): *Nicolaus Steno and Erasmus Bartholinus. Two 17th Century Danish Scientists and the Foundation of exact Geology and Crystallography*. Kopenhagen: C.A. Reitzel

- Grebe-Ellis, Johannes (2005): *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*. Berlin: Logos Verlag
- Grebe-Ellis, J.; Theilmann, F.; Rang, M. (2008): Lichtspuren im Wasser. Ein Experiment zum Verhältnis von Hebung und Brechung. *PhyDid* 3/8: 86–91
- Haidinger, Wilhelm Karl (1844): Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. *Poggendorf Annalen* 63: 29–39
- Holtzmark, Torger (1970): Newton's Experimentum Crucis Reconsidered. *American Journal of Physics* 38 (10): 1229–1235
- Howald-Haller, Mario (1064): Doppelspat und Polarisation. *Elemente der Naturwissenschaft* 1, (1): 12–24
- Huygens, Christian (1996): *Abhandlung über das Licht*. Bd. 20 in der Reihe *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Frankfurt/M: Harri Deutsch Verlag. Deutsch von R. Mewes und mit Anmerkungen von E. Lommel 1890 als Bd. 20 in der Reihe *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften* bei Engelmann, Leipzig; 4. Auflage 1996. Französische Erstausgabe (1690): *Traité de la Lumière*, par C. H. D. Z., Leiden
- Kepler, Johannes (2008): *Schriften zur Optik*. Eingeführt und ergänzt von Rolf Riekher. Bd. 198 in der Reihe *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Frankfurt/M: Harri Deutsch Verlag
- Lohne, Johannes (1977): Nova experimenta crystalli islandici di-diaclastici. *Centaurus* 21: 106–148
- Mission, G. P. (1993): Form and behaviour of Haidinger's brushes. *Ophthalmic and Physiological Optics* 13: 392–396
- Mueller, Hans (1948): The Foundations of Optics. *Journal of the Optical Society of America* 38: 661
- Nassar, A. B. (1994): Apparent Depth. *The Physics Teacher* 32, (9): 526–529
- Newton, Isaac (1996): *Optik*. Übersetzt und hrgs. von W. Abendroth. Bd. 96 und 97 in der Reihe *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Frankfurt/M: Harri Deutsch Verlag
- Newton, Isaac (1978): A new Theory of Light and Colours. In I. B. Cohen und R. Schofield (Hg.): *Isaac Newton's papers and*

- letters on natural philosophy and related documents*. Cambridge, Mass. and London: Harvard University Press
- Niedrig, H.; Eichler, H.-J.; Bergmann, L.; Schaefer, C. (2004): *Optik. Wellen- und Teilchenoptik* (Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 3), 10. Aufl., Berlin: de Gruyter
- Planck, Max (1919): Vom Wesen des Lichts. *Die Naturwissenschaften* 7: 903–909
- Rang, Matthias (2009): Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. *Elemente der Naturwissenschaft* 90: 46–79
- Sabra, Abdelhamid. I. (1981): *Theories of Light, from Descartes to Newton*. Cambridge: Camb. Univ. Press
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (1990): *Zum Weltbild der Physik*. 13. Aufl. Stuttgart: Hirzel. Darin insbesondere die Aufsätze: *Die Physik der Gegenwart und das physikalische Weltbild* und *Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants*.