

# Komplementäre Spektren: Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende

Matthias Rang<sup>1</sup>, Johannes Grebe-Ellis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Forschungsinstitut am Goetheanum, CH-4143 Dornach, matthias.rang@goetheanum.ch

<sup>2</sup>Phänomenologie und Didaktik der Physik, Leuphana Universität Lüneburg, 21335 Lüneburg  
grebe-ellis@uni.leuphana.de

## Kurzfassung

Obwohl komplementäre Dispersionsspektren geometrisch isomorph sind, wird in der Regel nur das Spaltspektrum behandelt. Ein wesentlicher Grund dafür besteht in der Schwierigkeit, eine Stegblende mit beliebig variabler (schmalen) Stegbreite zu realisieren. Vor dem Hintergrund eines phänomenologischen Beschreibungsansatzes wurde eine einfache experimentelle Anordnung entwickelt, die zeigt, dass komplementäre Spektren Teilphänomene eines experimentellen Bedingungs-zusammenhangs sind. Dies ermöglicht zum einen, komplementäre Spektren gleich berechtigt im Unterricht zu studieren; zum anderen wird ein methodisches Kriterium sichtbar, das nicht nur für den Bereich der Dispersionsfarben, sondern für die Optik im Allgemeinen zu gelten scheint.

## 1. Einleitung

Mit einem an der Wissenschaftsmethode Goethes orientierten phänomenologischen Beschreibungsansatz wurden in den letzten Jahren nahezu alle Gebiete der Optik neu erarbeitet [1,2]. Es wurde ferner gezeigt, welchen didaktischen Wert eine solche qualitative aber dafür nicht weniger exakte Art der Naturanschauung haben kann. Dass das Gebiet der Spektren und Dispersionsfarben in diesem Zusammenhang bisher nur am Rande berücksichtigt wurde, obwohl Goethe seine Methode gerade auf diesem Feld exemplifizierte, hängt möglicherweise mit den ideologischen Verhärtungen im casus „Goethe contra Newton“ zusammen. Als Ausdruck davon wurden die experimentellen Voraussetzungen der Spalt- und Stegspektren (gelegentlich auch Newton- und Goethespektren genannt) häufig als Gegensätze dargestellt. Mithilfe einer überraschend einfachen experimentellen Anordnung können wir indessen zeigen, dass die genannten Spektren Teilphänomene eines experimentellen Bedingungs-zusammenhangs sind. Die Spektren schließen sich in ihrer Erscheinung nicht aus, sondern bedingen sich gegenseitig. Das zentrale optische Bauteil der Anordnung, die so genannte Spiegel-Spalt-Blende, gestattet insbesondere die Realisierung einer kontinuierlich variablen (beliebig schmalen) Stegbreite. Zum einen ist damit ein technisches Problem gelöst – eine unterrichtstaugliche Version der Blende geht demnächst in Serienfertigung, zum anderen ergibt sich die Möglichkeit, methodische Konventionen, die nicht nur die Farbenlehre, sondern mehr oder weniger die gesamte in der Schule behandelte Optik betreffen, kritisch zu beleuchten.

Das Gebiet der prismatischen Farben ist in der Vergangenheit sehr unterschiedlich bearbeitet worden. Die Namen Goethe und Newton stehen für naturwissenschaftliche Herangehensweisen, deren methodi-

sche Gegensätzlichkeit nicht nur die kritische Selbst-reflexion großer Physiker – von Helmholtz bis Heisenberg – bestimmt hat, sondern die bis in die jüngste Gegenwart hinein zum Gegenstand wissenschaftstheoretischer und historischer Erörterungen gemacht wird [3,4,5]. So unterschiedlich der newtonsche und der goethesche Ansatz indessen auch sein mögen, so zeigen sie doch auf der Ebene experimenteller Praxis eine wesentliche Gemeinsamkeit: beide bedürfen zur Erzeugung von Spektren einer Blende. In der Betrachtungsart der geometrischen Optik wird diese Bedingung als Lichtbündelbegrenzung bezeichnet. In der Betrachtungsart der phänomenologischen Optik sprechen wir von Bildkontrast. Weitere Bedingungen, wie etwa die Notwendigkeit bestimmter Abstände zwischen den optischen Elementen, sind in [6] formuliert worden. Sie sind indessen unabhängig von der jeweils verwendeten Blende, d. h. sie sind notwendig zur Erzeugung eines Spektrums, sie bestimmen aber nicht die in diesem Spektrum erscheinenden Farben. Im Unterschied dazu legt die Blende, von der im Zusammenhang des hier vorgestellten experimentellen Entwicklung Gebrauch gemacht wird, gemeinsam mit der verwendeten Beleuchtung die in den Spektren erscheinenden Farben fest.

## 2. Spalt- und Stegblende

Spalt- und Stegblende werden als invertierte oder auch komplementäre Blendenanordnungen bezeichnet. Gerechtfertigt ist diese Bezeichnung dadurch, dass an ihnen bei weißer Beleuchtung komplementärfarbige Spektren entstehen [7,8,9]. Auch die Bauform der Blenden legt diese Bezeichnung nahe. Eine Lochblende mit einer kreisförmigen Öffnung in einem undurchsichtigen Schirm stellt das räumliche Komplement zu einer gleich großen undurchsichtigen Kreisscheibe dar (fixiert z. B. auf einem durch-

sichtigen Schirm oder einer Glasscheibe). Gegensätzliche Blenden sind also auch gegensätzlich gebaut.

## 2.1 Das Problem der variablen Stegblende

Eine variable Spaltblende ist Bestandteil jeder physikalischen Schulsammlung. Mit ihr und einigen weiteren üblicherweise verfügbaren Komponenten wie Leuchte, Prisma und Linse, lässt sich das bekannte Spaltspektrum erzeugen. Dieses ist gelegentlich auch als Newtonspektrum oder als positives Spektrum bezeichnet worden. Mit dem entsprechenden Aufbau lassen sich so im abgelösten Versuch beliebig große Spektren realisieren. Deren Farbreinheit (bzw. Auflösungsvermögen) und Helligkeit kann durch Einstellen der Spaltbreite variiert werden.

Jeder, der dagegen einmal versucht hat, mit einem analog gestalteten Aufbau das zu dem am Spalt erzeugten Spektrum komplementäre Stegspektrum zu realisieren, kennt die Schwierigkeit, die Spaltblende variabler Breite gegen eine Stegblende variabler Dicke einzutauschen. Der Grund dafür, dass solche Stegblenden in kaum einer Physiksammlung zu finden sind und sich ungleich schwieriger als die Spaltblenden beschaffen lassen, ist nicht etwa im wissenschaftshistorischen Kontext zu suchen, also einem aus physikalischer Sicht möglicherweise verständlichen Desinteresse an einer solchen Blendenanordnung. Der Grund ist vielmehr schlicht die technische Unmöglichkeit, eine solche Stegblende praktisch herzustellen. Gegenüber der Frage, wie sie mechanisch beschaffen sein müsste, um eine variable Stegbreite von zumindest prinzipiell beliebig breit bis infinitesimal dünn zu ermöglichen, wird schnell klar, dass es hierfür keine mechanisch gangbare und zugleich optisch befriedigende Lösung gibt.

Wer sich im Optikunterricht mit dem Komplementärspektrum befassen will, muss folglich entweder auf die stufenlose Variabilität der Stegblende verzichten, oder zu entsprechenden eingebundenen Versuchen übergehen. Die damit gekennzeichnete Asymmetrie in der experimentellen Annäherung an das komplementäre Gegenstück zum Spaltspektrum macht eine experimentiermethodische Neuorientierung notwendig. Es scheint, als wäre das Stegspektrum im abgelösten Versuch nicht in gleicher Weise zugänglich, wie das Spaltspektrum.

## 2.2 Die Spiegel-Spalt-Blende

Stellt man eine Lochblende her, indem man aus einer undurchsichtigen Pappe eine Kreisscheibe ausschneidet, so stellt man damit gleichzeitig eine undurchsichtige Kreisblende her. Obgleich sich diese beiden Pappstücke wegen ihrer Bauform in ihrer gleichzeitigen Wirksamkeit als optische Blenden ausschließen, gehen sie als Komplemente bei der Herstellung auseinander hervor. Will man also eine Lochblende aus einem zuvor einheitlich undurchsichtigen Schirm herstellen, so bedingt dieser

Akt der Herstellung gleichzeitig die Herstellung einer undurchsichtigen Kreisblende. Beide Blenden bestehen in ihrer Eigenart aber erst durch ihre Trennung, die ihre gleichzeitige Wirksamkeit verhindert. Wie ist dies im Falle einer variablen Spaltblende, die aus zwei undurchsichtigen rechteckigen Flächen gebildet wird, so dass zwischen diesen Flächen ein Spalt entsteht, der aufgrund des beliebigen Abstands beider Flächen zueinander beliebige Spaltöffnungen realisierbar macht? Die komplementäre Anordnung dazu ist der gleichartig variable Steg, der aber nicht, wie oben, aus den Schnittresten der Spaltblende realisiert werden kann.

Dass der variable Steg dennoch mit dem variablen Spalt zugleich realisiert ist und zwar durch diesen selbst, wird deutlich, wenn man anstelle undurchsichtiger Flächen verspiegelte Flächen verwendet.<sup>1</sup> Wird eine solche einseitig verspiegelte Spaltblende von der verspiegelten Seite aus beleuchtet, so sieht man von dieser Seite in den Spiegeln die Beleuchtung, also Helles (Abb. 1). Zwischen den Spiegeln hingegen schaut man in den dahinter liegenden Raum. Ist dieser dunkel, so ergibt sich eine Ansicht wie in Abbildung 1, links unten, schematisch dargestellt. Von der anderen Seite, d. h. von der der Beleuchtung gegenüberliegenden Seite sieht man die Spaltblende wie gewohnt. Die Spiegel wirken hier als Schattengeber (bzw. Lichtbündelbegrenzungen) wie jede andere undurchsichtige Fläche. Die Ansicht der Blende von dieser Seite ist in Abbildung 1 rechts unten dargestellt.

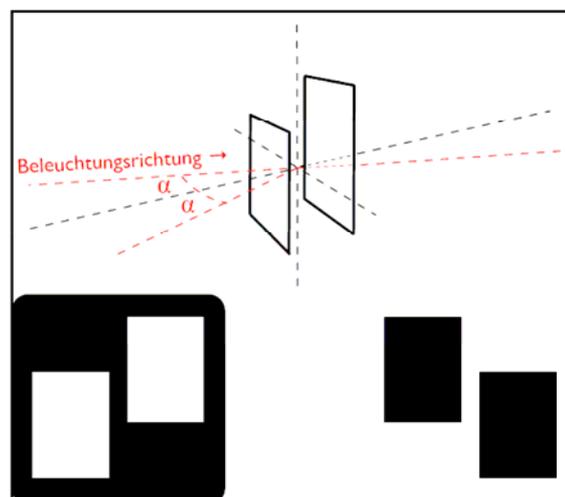


Abb. 1: Die Spiegel-Spalt-Blende von links beleuchtet. Oben ist eine perspektivische Ansicht der Anordnung gezeigt, links unten die Ansicht dieser Blende von links und rechts unten die Ansicht von rechts. Der Höhenversatz der beiden Flächen ist, wie weiter unten beschrieben, bei der Beurteilung der Spektren von Vorteil.

<sup>1</sup> Den einzigen Hinweis auf die Verwendung verspiegelter Aperturblenden haben wir in der lesenswerten Studie über *Newton's Experimentum Crucis Reconsidered* von Holtsmark gefunden [10].

Der Vergleich beider Ansichten macht deutlich, dass es sich tatsächlich um komplementäre Ansichten handelt, die hier aber an nur einer Blende optisch zugleich realisiert werden. Das Problem der variablen Stegblende ist damit gelöst. Gleichzeitig wird an dieser zunächst rein technischen Lösung sichtbar, dass es sich bei Steg- und Spaltblende zwar um komplementäre Blenden handelt, dies aber nicht bedeutet, dass sie nicht gleichzeitig an einer Blende optisch wirksam hervorgebracht werden können. Im Gegenteil, die Anordnung macht deutlich, dass die Realisierung einer dieser Blendenanordnungen stets mit der Realisierung der komplementären Anordnung untrennbar verbunden ist.

### 3. Der optische Aufbau um die Blende

Die komplementären Ansichten der Spiegel-Spalt-Blende ergeben sich aus entgegengesetzten Richtungen. Soll die Blende im abgelösten Versuch verwendet werden, bedarf es eines entsprechenden optischen Aufbaus. Wie dieser modifiziert werden muss, damit er nicht nur die Erzeugung des gewöhnlichen Spaltspektrums gestattet, sondern simultan das zugehörige Stegspektrum zeigt, wird im Folgenden erläutert.

Wie in Abbildung 2a dargestellt, wird die Spiegelblende mit einer Lichtquelle und einem Kondensator beleuchtet. Von der Blende aus gesehen befindet sich gegenüber der Lampe mit Kollimatorlinse, (Geradsicht-)Prisma und Objektivlinse eine optische Anordnung, die im Wesentlichen einem gewöhnlichen spektroskopischen Grundaufbau entspricht. Ungewöhnlich ist nun die Tatsache, dass dieser Grundaufbau ein zweites Mal aufgebaut werden muss, und zwar an dem Ort, an dem er im Spiegelraum der Spiegelblende erscheint (Abb. 2a)<sup>2</sup>[10]. Die Beleuchtung mit einer Kondensorlinse ist zwar durchaus üblich, sie wird hier aber anders verwendet: Das Lampenbild wird nicht auf die Blende, sondern ins Unendliche abgebildet. Dadurch steht, im Gegensatz zu anderen spektroskopischen Grundaufbauten, die Spiegelblende selbst in einem parallelen Strahlengang.

Der verflochtene Strahlengang, der auf diese Weise entsteht, ähnelt demjenigen, der bei der Köhlerschen Beleuchtungseinrichtung in der Mikroskopie eingesetzt wird. Er zeichnet sich dadurch aus, dass die Abstände der optischen Elemente immer der einfachen Brennweite der benachbarten Linse entsprechen (Abb. 2a).

Das Lampenbild wird durch die Kollimatorlinse in das Prisma abgebildet (Beleuchtungsstrahlengang, Abb. 2b). Dennoch befinden sich auch die Prismen in einem parallelen Strahlengang, wie es für einen spektroskopischen Grundaufbau erforderlich ist. Dies wird deutlich, wenn man von der Darstellung

<sup>2</sup> Ist die Spiegel-Spalt-Blende *beidseitig* verspiegelt, so kann man aus den geeigneten Raumrichtungen in den Spiegelflächen von der unbelichteten Seite der Blende aus diesen „Spiegelaufbau“ sehen.

des Beleuchtungsstrahlengangs zur Darstellung des Abbildungsstrahlengangs übergeht (Abb. 2c).

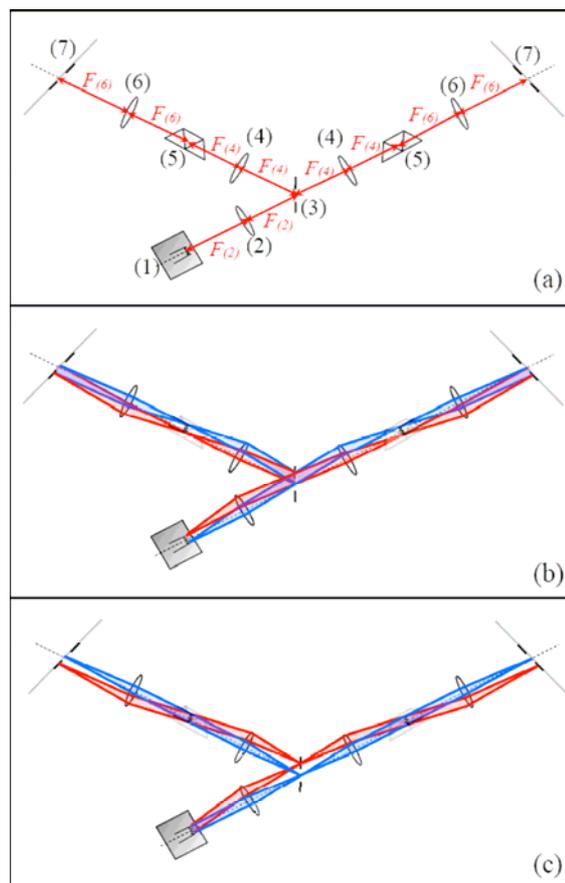


Abb. 2: Optischer Aufbau zur simultanen Darstellung von Spalt- und Stegspektren. (a) Optische Elemente mit den verwendeten Abständen; (1) Lampe, (2) Kondensator, (3) Spiegel-Spalt-Blende, (4) Kollimatoren, (5) Geradsichtprismen, (6) Objektivlinsen, (7) Projektionsschirm. (b) Beleuchtungs- und (c) Abbildungsstrahlengang. Die Strahlengänge sind der Übersichtlichkeit halber gezeichnet, wie sie ohne Prismen auftreten würden.

### 4. Komplementärspektren

An dem geschilderten Aufbau lassen sich nun Komplementärspektren studieren. Aus der Verwendung *einer* Blende zur simultanen Erzeugung *zweier* Spektren folgt, dass die Abmessungen der Spalt- und Stegblendenansichten bzw. der entsprechenden Spektren identisch sind. Jede Änderung an der Spiegel-Spalt-Blende wirkt sich auf beide Spektren simultan und gleichartig aus. Dadurch ist ihre Vergleichbarkeit gewährleistet.

Abbildung 3b zeigt exemplarisch Komplementärspektren, die mit einer Cadmium-Hochdruckbogenlampe erzeugt wurden. Von den Bildern der Spiegel-Spalt-Blende, die scharf auf den Beobachtungsschirmen abgebildet wird, ist nur der zentrale Bereich gezeigt (Abb. 3a). Ferner ist die Ansicht der Spiegel-Spalt-Blende gegenüber der Ansicht in

Abbildung 2 um  $90^\circ$  gedreht. D. h. die Geradsichtprismen werden so verwendet, dass die Dispersion in der vertikalen Ebene durch die optische Achse wirksam ist.

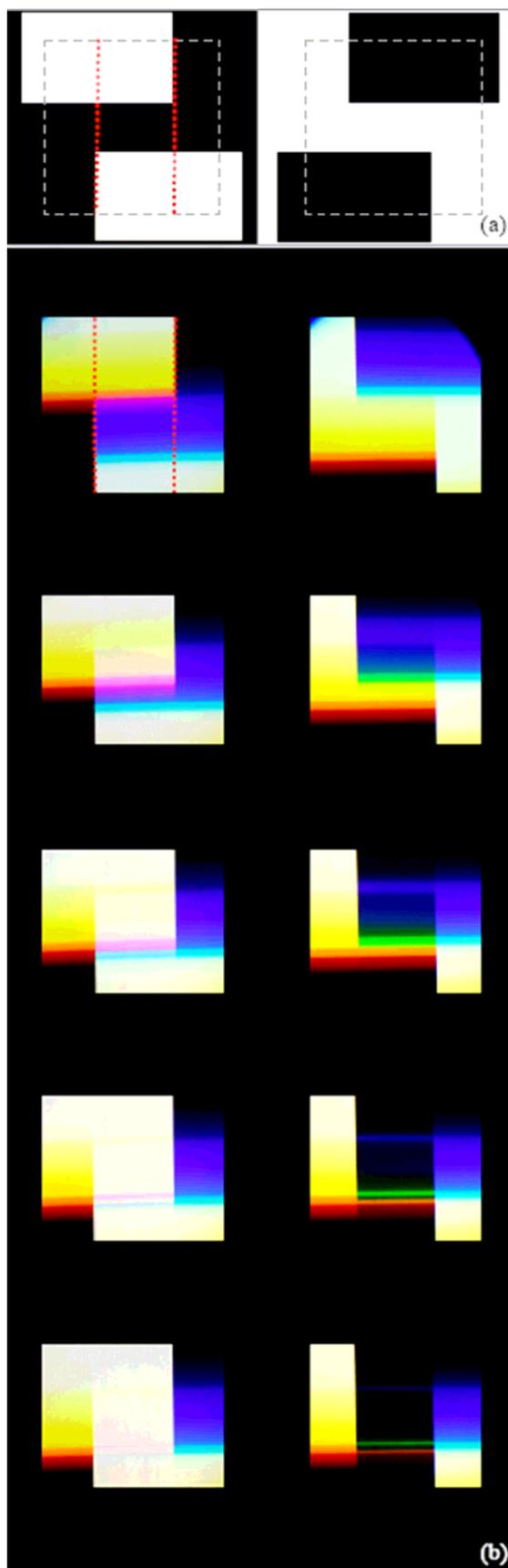
Der in Abbildung 3b gezeigten Bildsequenz liegen – von oben nach unten – abnehmende Spalt- bzw. Stegbreiten zugrunde. Die entsprechende Veränderung der erscheinenden Farbbereiche ist mehrfach beschrieben worden und wird hier deshalb nur kurz erläutert [8,9]. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt, der sich in drei Bereiche unterschiedlicher Blendenwirksamkeit einteilen lässt. Die Begrenzung dieser Bereiche ist links oben in Abbildung 3a und 3b durch rot gestrichelte Linien verdeutlicht. Der mittlere Bereich stellt den Steg- bzw. Spaltbereich dar. In den seitlichen Bereichen rechts und links davon ist jeweils nur eine der beiden rechteckigen Spiegel als Blende wirksam. Die in diesen Bereichen erscheinenden Farben sind daher auch unabhängig von der Position der beiden Spiegel zueinander, sie sind also unabhängig von der Steg- und Spaltbreite der Gesamtblende.

Dies gestattet, durch den Vergleich der genannten drei Bereiche ein Verständnis der *Genese* der Komplementärspektren zu gewinnen: Die beiden Randbereiche der Blendenanordnung zeigen für jedes Stadium der Verjüngung der Blende im Mittelbereich die beiden Kantenspektren in ihrer unveränderlich bleibenden geometrischen Struktur. Auf diese Weise *sieht* man, wie die Spektren im Mittelbereich durch das mit abnehmender Blendenweite zunehmende „Ineinandergreifen“ der beiden seitlich sichtbaren Kantenspektren entsteht.

Aus dem Vergleich der simultan erzeugten komplementären Ansichtspaare, wie sie in Abbildung 3 gezeigt sind, wird ferner deutlich, dass die jeweils zusammen gehörenden Ansichten bezüglich der Spektrengometrie identisch sind.

In Bezug auf die Farben und Helligkeitswerte der Flächen sind beide Spektren hingegen komplementär: Zu jeder Farbe in einem Spektrum findet sich die Komplementärfarbe am gleichen Ort im anderen Spektrum. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Ansichten der Spiegel-Spalt-Blende zueinander selbst spiegelverkehrt sind. Deutlich wird dies in den Abbildungen 1 und 3a. Der Grund dafür liegt darin, dass die beiden betrachteten Ansichten der Blende aus einander entgegengesetzten Richtungen gewonnen werden.

*Abb. 3: (a) Darstellung der Ansicht der Spiegel-Spalt-Blende ohne Prismen. (b) Ansicht der Blende durch die Prismen für verschiedene Spalt- bzw. Stegbreiten. Es sind nur die Ausschnitte gezeigt, die in (a) durch den grau und gestrichelt umrissenen Bereich angedeutet sind.*



## 5. Zusammenfassung

Die Beschäftigung mit der Frage, auf welche Weise eine Stegblende hergestellt werden kann, die den technischen und optischen Anforderungen an herkömmliche Spaltblenden mit variabler Breite entsprechen, hat zum einen zu einer methodischen Einsicht in die optische Natur des Problems und zum anderen zu einer praktischen Lösung desselben geführt. Es wurde deutlich, dass sich komplementäre Blenden nicht gegenseitig ausschließen, sondern gegenseitig bedingen. Dies gilt auch für die mit den Blenden erzeugten Spektren: *Um die Bedingungen für die Erscheinung eines Stegpektrums schaffen zu können, müssen gleichzeitig auch die Bedingungen für die Erscheinung des Spaltpektrums mit geschaffen werden und umgekehrt.* Die Verwendung von spiegelnden Flächen ist in diesem Zusammenhang kein Trick; die Verspiegelung macht die *Stegansicht* der Blende nur optisch wirksam. Durch die Verwendung geschwärtzter Flächen wird diese neben der Spaltansicht immer zugleich mögliche Stegansicht üblicherweise unterdrückt.

Die Symmetrie der auf dem geschilderten Wege nachvollziehbaren Entstehungsbedingungen komplementärer Spektren an komplementären Blendenansichten berechtigt vielmehr zu der Feststellung, dass das gekennzeichnete empirische Material selbst keinen physikalischen Gesichtspunkt liefert, der die Auszeichnung des Spaltpektrums gegenüber seinem komplementären Gegenstück nahelegt oder gar erzwingt.

Betrachtet man diesbezüglich das heutige optische Labormaterial, so fällt auf, dass es in vielen Bereichen geschwärtzt ist. Damit werden jeweils Ansichten unterdrückt, die eigentlich zu dem Gesamtkontext der jeweiligen optischen Anordnung dazugehören. Dieser Gesamtkontext bleibt, in dem er „halbiert“ wird, selbst unsichtbar und die Einzelphänomene treten scheinbar isoliert und unabhängig von einander auf. Demgegenüber haben wir mit der beschriebenen Blendenanordnung versucht, den Zusammenhang zwischen den Komplementärspektren wieder sichtbar werden zu lassen.

## 6. Literatur

- [1] G. MAIER: *Optik der Bilder.* - Dürnau: Kooperative Dürnau 1986.
- [2] J. GREBE-ELLIS: *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation.* - Berlin: Logos Verlag, 2005. Vgl. auch J. GREBE-ELLIS – F. THEILMANN: *open eyes 2005 – Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik.* - Berlin: Logos Verlag, 2006.
- [3] H. BORTOFT: *The Wholeness of Nature. Goethes Way of Science.* - New York: Lindisfarne Press 1998.
- [4] O. MÜLLER: *Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma.* - In: J. STEINBRENNER – S. GLASAUER (Hg.): *Farben. Betrachtungen aus Philosophie und*

*Naturwissenschaften.* - Frankfurt am Main: Suhrkamp, S. 64-101.

- [5] N.RIBE – F.STEINLE: *Exploratory Experimentation: Goethe, Land, and Color Theory.* - *Physics Today* **55** (2002) Nr.7, 43-49.
- [6] F. THEILMANN: *Wie verstehen wir die prismatischen Farben als optisches Phänomen (II).* - *Lehrerrundbrief* **87** (2006), 37-45.
- [7] A. KIRSCHMANN: *Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse.* - *Physikalische Zeitschrift* **18** (1917), 195-205.
- [8] M. BARTH: *Beiträge zur experimentellen Erweiterung von Goethes Farbenlehre.* Dornach: Versuchsraum für Goethes Farbenlehre 1944.
- [9] A. BJERKE: *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre.* Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben 1961.
- [10] T. HOLTSMARK: *Newton's Experimentum Crucis Reconsidered.* - *American Journal of Physics* **38** (1970) Nr. 10, 1229-1235.
- [11] J. GREBE-ELLIS – W. SOMMER – M. RANG – L.-H. SCHÖN: *Anwendungen des Spiegelraumkonzepts am Beispiel von optischer Rückkopplungssperre und Beugung am Raumgitter.* - In: V. NORDMEIER (Hg.): *Frühjahrstagung der DPG Berlin 2008.*

### Hinweis:

Eine einfache, an die gängigen Lehrmittelsysteme angepasste Ausführung der Spiegel-Spalt-Blende, die zur Demonstration der Komplementärspektren im Unterricht geeignet ist, wird demnächst in Kleinserie gefertigt. Auskünfte dazu erteilt Matthias Rang: [matthias.rang@gmail.com](mailto:matthias.rang@gmail.com)

### Autorennotiz:

*Dipl. Phys. Matthias Rang* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsinstitut am Goetheanum, Dornach (Schweiz) und promoviert bei Johannes Grebe-Ellis.

*Prof. Dr. rer. nat. Johannes Grebe-Ellis*, lehrt und forscht auf dem Gebiet der Didaktik der Physik an der Leuphana Universität Lüneburg, Arbeitsschwerpunkt: *Phänomenologische Optik.*  
[grebe-ellis@uni.leuphana.de](mailto:grebe-ellis@uni.leuphana.de)