

Johannes Grebe-Ellis

Goethes Farbenlehre im Lichte neuer Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene¹

In der Schule haben wir gelernt, dass Newton gezeigt hat, wie man weißes Licht in verschiedenfarbige Lichter zerlegt und aus einer Überlagerung dieser Farben wieder zusammensetzen kann. Newtons Experimente gehören bis heute zu den bedeutendsten Errungenschaften der physikalischen Optik. Dies hat Goethe nicht davon abgehalten, in seiner *Farbenlehre* Newtons experimentellen Beweisansprüchen und seinen Schlussfolgerungen über die Natur des Lichts zu widersprechen und sie als einseitig und irreführend zu bezeichnen. Wiederholt bekannte der Dichter gegenüber Eckermann: „Auf alles, was ich als Poet geleistet habe, [...], bilde ich mir gar nichts ein. Es haben treffliche Dichter mit mir gelebt, es lebten noch trefflichere vor mir, und es werden ihrer nach mir sein. Dass ich aber in meinem Jahrhundert in der schwierigen Wissenschaft der Farbenlehre der einzige bin, der das Rechte weiß, darauf tue ich mir etwas zugute, und ich habe daher ein Bewusstsein der Superiorität über viele.“² Der Fall „Goethe contra Newton“ hat seither viele Gemüter erregt; über kaum eine wissenschaftliche Kontroverse ist mehr geschrieben worden.³ Und auch wenn sich namhafte Physiker des 20. Jahrhunderts um eine Würdigung Goethes als Wegbereiter einer ganzheitlichen Naturwissenschaft bemüht haben, so ließen sie doch letztlich keinen Zweifel daran, dass seine

-
- 1 Nachschrift eines Vortrags vom 16.02.2016 in der Goethe-Gesellschaft Darmstadt. Ich danke Gernot Böhme für die Einladung, mit dem vorliegenden Beitrag an einer Vortragsreihe zu Goethes Naturwissenschaft mitzuwirken.
 - 2 Gespräch vom 19. Februar 1829. Eckermann, J.P. (2011): *Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens*. Berlin: Deutscher Klassiker Verlag.
 - 3 Zur Rezeptionsgeschichte der *Farbenlehre* siehe die seit 2011 abgeschlossene, historisch-kritische Ausgabe sämtlicher Schriften Goethes zur Farbenlehre in der Leopoldina-Ausgabe: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. Siehe ferner Wenzel, M. (Hg.) (2012): *Goethe Handbuch. Supplemente Band 2: Naturwissenschaften*. Stuttgart/Weimar: J.B. Metzler. Einen lesenswerten Überblick gibt Schüller, V. (1999): Goethe versus Newton. Zum 250. Geburtstag von Johann Wolfgang von Goethe. *Physikalische Blätter* 55 (12): 62-66.

Farbenlehre aus physikalischer Sicht ein hoffnungsloser Fall und zu Recht erledigt sei.⁴

Seit einigen Jahren ist neue Bewegung in das Thema gekommen: Wissenschaftsphilosophische und historische Untersuchungen würdigen Goethes naturwissenschaftliche Methode im naturwissenschaftlichen Kontext seiner Zeit⁵ und weisen überraschende Lücken in der physikalischen Rezeptionsgeschichte der *Farbenlehre* nach. In diesem Zusammenhang wird Goethes Hinweis auf die Symmetrie komplementärer spektraler Phänomene neu entdeckt und nach der physikalischen Umsetzbarkeit dieses Hinweises im Sinne einer Erweiterung der Experimente Newtons mit den Mitteln der modernen Optik gefragt. Eine Zuspitzung erfährt diese Frage in dem Problem, das *Experimentum crucis* Newtons konsequent zu invertieren und damit die Bedingungen zu untersuchen, unter denen sich auch die Farben des zum Spaltspektrum Newtons komplementären „umgekehrten Spektrums“ als spektral rein, d. h. vollständig entmischt erweisen.⁶

-
- 4 Siehe z. B. Born, M. (1963): Betrachtungen zur Farbenlehre. *Die Naturwissenschaften* 50/2: 29-39; Heisenberg, W. (1959): Die Goethesche und die Newtonsche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik. In: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*. Stuttgart: Hirzel, S. 54-70; Sommerfeld, A. (1917): Goethes Farbenlehre im Urteile der Zeit. *Deutsche Revue* 42: 100f; Weizsäcker, C. F. von (1981): Einige Begriffe aus Goethes Naturwissenschaft. In: Goethe, J. W. von (1981): *Gesammelte Werke*. Hamburger Ausgabe, Bd. 13: *Naturwissenschaftliche Schriften I*, München: C. H. Beck, S. 539-555. Als Vorlagen für Urteile über die physikalischen Teile der „Farbenlehre“ dienten lange die pointierten Kritiken von Helmholtz (1853) und Du Bois-Reymond (1882).
- 5 Siehe z. B. Mandelartz, M. (2011): *Goethe, Newton und die Wissenschaftstheorie. Zur Wissenschaftskritik und zur Methodologie der Farbenlehre*. In: Goethe, Kleist. Berlin: Erich Schmidt, S. 240-281. Steinle, F. (2002): ‚Das Nächste ans Nächste reihen‘: Goethe, Newton und das Experiment. *Philosophia Naturalis* 39: 141-172; (2014): ‚Erfahrung der höhern Art‘. Goethe, die experimentelle Methode und die französische Aufklärung. In: Valk, Th. (Hg.): *Heikle Balancen. Die Weimarer Klassik im Prozess der Moderne*. Göttingen: Wallstein, S. 221-249; (2016): Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit. In: Dönike, M., Müller-Tamm, J., Steinle, F. (Hg.): *Die Farben der Klassik*. Göttingen: Wallstein, S. 255-289.
- 6 Vgl. Müller, O. (2007): Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma. In: Glasauer et al. (Hg.): *Farben*. Berlin: Suhrkamp, S. 64-101; Rang, M. & Müller, O. (2009): Newton in Grönland. Das umgestülpte *experimentum crucis* in der Streulichtkammer. *Philosophia naturalis* 46, Heft 1: 61-114; Müller, O. (2015): *Mehr Licht! Goethe mit Newton im Streit um die Farben*. München: Fischer.

In der Farbmetrik werden Paare visueller Farbempfindungen komplementär genannt, deren Farbreizfunktionen sich additiv zu Weiß ergänzen. Bekannte Beispiele solcher Farbpaare sind Cyan und Rot, Magenta und Grün, Gelb und Blau-Violett. Ähnliche Paare bilden Farben und „Gegenfarben“ im Kontext der optischen Kontrastwahrnehmung (Sukzessiv- und Simultankontrast), deren Beziehung darauf beruht, dass sie sich im Sehakt gegenseitig „fordern“.⁷

Ausgehend von einer Vergegenwärtigung einiger Grundexperimente Newtons werden im Folgenden ausgewählte Beobachtungen Goethes an einfachen optischen Kontrasten nachvollzogen. Goethes Entdeckung der Komplementarität optischer Spektren, die an entgegengesetzten (inversen) optischen Kontrasten entstehen, liefert für uns den Anknüpfungspunkt für die Frage, wie die Experimente Newtons erweitert werden müssten, um der Symmetrieeigenschaft spektraler Phänomene Rechnung zu tragen. Dazu wird das Symmetrieargument Goethes zu einer physikalischen Invertierungsvorschrift ausformuliert. Die Anwendung dieser Vorschrift hat in den letzten Jahren zu einer Reihe von Experimenten geführt, die als Verallgemeinerungen der Experimente Newtons angesehen werden können und eine Synthese von Newtons und Goethes Leistungen darstellen. Sie wurden von Matthias Rang entwickelt und zeigen, dass Komplementarität als Symmetrieeigenschaft inverser optischer Zustände vorliegt, wenn das optische System als konservatives System betrachtet werden kann.⁸ Dieses Ergebnis bestätigt Goethes Beobachtung von der Symmetrisierbarkeit spektraler Phänomene und steht zugleich im Einklang mit der Theorie Newtons.

7 So erscheint z. B. als Nachbild eines 20 Sekunden lang fixierten roten Quadrats auf weißem Grund ein cyanfarbenes Quadrat, das nach einigen Sekunden wieder verklingt. – Nach einer Definition der Komplementarität sucht man dagegen in der Optik selbst vergebens. Dies liegt nicht daran, dass sich optische Komplementarität nicht als physikalische Eigenschaft exakt definieren und quantifizieren ließe, sondern hat vermutlich eher historische Gründe, vgl. Rang, M., Passon, O. & Grebe-Ellis, J. (2017): Optische Komplementarität. Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene. *Physik Journal* 16 (3): 43-49.

8 Vgl. Rang, M. & Grebe-Ellis, J. (2009): Komplementäre Spektren – Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)* 62 (4): 227-231; Rang, M. (2015): *Phänomenologie komplementärer Spektren*, Berlin: Logos; (Rang, Passon & Grebe-Ellis, 2017).

Vorbemerkung zur Dialektik der „Goethe contra Newton“-Kontroverse

Die Erfahrung zeigt, dass es nahezu unmöglich ist, über Goethe und die im engeren Sinne physikalischen Teile seiner Farbenlehre zu sprechen, ohne sich gleichzeitig auf eine Position in der „Goethe contra Newton“-Kontroverse festlegen zu lassen. Die Frage „Wer hat Recht?“ erscheint einerseits berechtigt, weil sie eine lange Tradition hat. Schließlich war es Goethe selbst, der die Dialektik des „pro und contra“ mit seiner Polemik gegen die *Opticks* Newtons einführte. Andererseits zeigt die Rezeptionsgeschichte der *Farbenlehre*, dass diese Frage in eine diskursive Sackgasse geführt hat, und es drängt sich die Vermutung auf, dass die gesamte bisherige Debatte über Goethes Farbenlehre und ihre Bedeutung für die physikalische Optik deshalb weitgehend unfruchtbar verlaufen ist, weil sie in dieser Sackgasse geführt wurde und dadurch auf drei Positionen beschränkt geblieben ist: 1. „Pro Newton“, zumeist vertreten von Physikern; 2. „Pro Goethe“, zumeist vertreten von Philosophen und 3. „Beide haben Recht“, vertreten von philosophierenden Physikern wie z. B. Werner Heisenberg oder Carl Friedrich von Weizsäcker, die Goethe zu „retten“ versuchten, indem sie die These vertraten, die *Farbenlehre* handle von einer rein subjektiven, ästhetischen Schicht der Wirklichkeit, der unabhängig von der objektiven, in Newtons *Opticks* beschriebenen physikalischen Realität ein eigener, subjektbezogener Geltungsanspruch zugestanden werden könne. Studiert man die mit den genannten Positionen verknüpfte Literatur und fragt nach den jeweiligen Begründungen, so fällt auf, dass allen drei Positionen etwas gemeinsam ist: Goethes Hinweis⁹ auf die Symmetrie spektraler Phänomene blieb unbeachtet und ernst zu nehmende Versuche, die Komplementarität inverser Spektren experimentell zu untersuchen, haben nicht stattgefunden. „Meine Farbenlehre ist sehr schwer zu überliefern, denn sie will, wie Sie wissen, nicht bloß gelesen und studiert, sondern sie will getan sein, und das hat seine Schwierigkeit“, so Goethe zu Eckermann wenige Monate vor seinem Tod.¹⁰ Keiner der genannten Physiker ist der Aufforderung Goethes gefolgt,

9 Vgl. die Systematik der subjektiven und objektiven Experimente Goethes an entgegengesetzten optischen Kontrasten in der 2. Abtlg. des Didaktischen Teils (*Physische Farben*) sowie deren Zusammenfassung in der 4. Abtl. (*Allgemeine Ansichten nach Innen*). In: Goethe, J. W. von (1987): Zur Farbenlehre. Widmung, Vorwort und Didaktischer Teil. In: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. LA I, Bd. 4, hrsg. von R. Matthaeci. 2. Aufl. Weimar: Böhlau Nachflg.

10 Gespräch vom 21. Dezember 1831. Vgl. Fußnote 2.

die physikalischen Teile seiner *Farbenlehre* nicht nur theoretisch zu studieren, sondern sie im Experiment zu prüfen – eine Forderung, die Goethe zu Recht stellen konnte, nachdem er sie gegenüber der *Opticks* Newtons in seiner über 50 Jahre währenden Beschäftigung mit der Farbenlehre in zahllosen Experimenten selbst erfüllt hatte. Die Frage, zu welchen Ergebnissen man kommt, wenn man versucht, Goethes Symmetrieargument physikalisch zu präzisieren und experimentell zu untersuchen, eröffnet vor diesem Hintergrund nicht nur einen Ausweg aus der oben beschriebenen Sackgasse. Sie führt darüber hinaus in ein Forschungsfeld, in dem in den vergangenen Jahrzehnten die methodische Anknüpfung an Goethe unter Berücksichtigung weiterer phänomenologischer Entwicklungslinien in der Optik zu einer bildoptischen Erschließung nahezu aller klassischen Phänomenbereiche der Optik geführt hat.¹¹

Die Frage, unter welchen Bedingungen spektrale Phänomene als Komplementärphänomene beschrieben werden können, hat zunächst keinen unmittelbaren Bezug zu den aktuellen Forschungsgebieten der physikalischen Optik. Und die technischen Mittel, mit denen die genannte Frage in den hier dargestellten Experimenten beantwortet wird, sind im engeren Sinne der klassischen Optik zuzurechnen. Zwar ist denkbar, dass die im Folgenden vorgestellte experimentelle Technik zu spektroskopisch brauchbaren Anwendungen führt. Aber der Forschungszusammenhang, in dem diese Technik entwickelt wurde, ist im engeren Sinne der Physikdidaktik zuzurechnen. Es erscheint deshalb angemessen, vor der Beschreibung der Experimente zu klären, wer eigentlich die Frage nach solchen Experimenten stellt. Angenommen sie zeigen etwas Neues: Für wen können die Ergebnisse solcher Experimente bedeutsam sein? Es muss jedenfalls jemand sein, der Goethes Worte über die Notwendigkeit, die Farbenlehre nicht nur theoretisch zu erörtern, sondern sie praktisch auszuführen, ernster nimmt als die Physiker des 19. und 20. Jahrhunderts.

11 Vgl. die Beiträge zur Phänomenologischen Optik in der Buchreihe *Phänomenologie in der Naturwissenschaft* Berlin: Logos-Verlag, die ihr programmatisches Selbstverständnis u. a. auf Gernot Böhmes Konzept der „Phänomenologie der Natur“ bezieht: Böhme, G. (1977): Ist Goethes Farbenlehre Wissenschaft? *Studia Leibnitiana* 9 (1): 27-54; Böhme, G. & Schiemann, G. (Hg.) (1997): *Phänomenologie der Natur*. Berlin: Suhrkamp. Vgl. ferner die bildoptischen Schriften G. Maiers, der explizit an R. Steiners Goethe-Arbeiten anknüpft: Maier, G. (1986): *Optik der Bilder*. Dürnau: Kooperative Dürnau; (2004): *blicken – sehen – schauen*. Hg. von J. Grebe-Ellis. Dürnau: Kooperative Dürnau.

Jemand, der davon überzeugt ist, dass Goethes zentrale Entdeckung auf dem Gebiet der Farbenlehre immer noch ihrer experimentellen Untersuchung harrt, und der den Ausgang dieser Untersuchung für so vielversprechend hält, dass es ihm lohnenswert erscheint, dafür die Diskussion über die Bedeutung der Farbenlehre Goethes auf breiter Front neu zu eröffnen, ist der Berliner Philosoph Olaf Müller, der 2015 eine umfassende Studie mit dem Titel „Mehr Licht! Goethe mit Newton im Streit um die Farben“ vorgelegt hat. Müller rekonstruiert u. a. die Rezeption der *Farbenlehre* durch diejenigen Physiker, die sich – wie beispielsweise Max Born, Werner Heisenberg und Carl Friedrich von Weizsäcker – wiederholt und ausführlich zu Goethes *Farbenlehre* geäußert haben.¹² Auf dieser Grundlage adressiert er einen dreifachen Vorwurf: Die Physiker hätten versäumt, sich gründlich genug mit der *Farbenlehre* Goethes zu beschäftigen, sie hätten ferner die entscheidende methodische Idee Goethes nicht verstanden und seien schließlich eine experimentelle Überprüfung der Stichhaltigkeit und Tragweite dieser Idee bis heute schuldig geblieben.

Worin besteht diese Idee? Nach Müller besteht sie in der Entdeckung, dass Spektralphänomene notwendig Komplementärphänomene sind, was bedeutet, dass sich die Experimente Newtons durch Invertierung, d. h. durch Vertauschen von Hell und Dunkel, im Experiment symmetrisieren lassen müssten. Wenn sich, so Müllers These, das Programm dieser Invertierung, das Goethe selbst nur ansatzweise realisieren konnte, mit den Mitteln der modernen Optik ausführen und insbesondere auf das *Experimentum Crucis* Newtons anwenden lässt, ohne dass die von Goethe in subjektiven Experimenten gefundene Symmetrie der Phänomene verloren geht, dann ist Goethes Anspruch, mit dem Hinweis auf die optische Komplementarität ein physikalisch relevantes Merkmal spektraler Phänomene beschrieben zu haben, rehabilitiert.

12 Vgl. Fußnote 4. Aufschlussreich für seine Urteilsbildung zu Goethes *Farbenlehre* sind C. F. von Weizsäckers späte Reflexionen in *Goethes Farbentheologie – heute gesehen* von 1991, wo er seine frühere Lektüre von A. Schönes *Goethes Farbentheologie* nachvollzieht, sein Diktum von 1957 („Goethe irrte, weil er irren wollte“) bekräftigt und wo es zu Beginn heißt: „Mit Goethes Naturwissenschaft habe ich mich immer sympathetisch verbunden gefühlt, ohne sie jedoch je genau studiert zu haben.“ In: Weizsäcker, C. F. von (1991): *Goethes Farbentheologie – heute gesehen*. Nachrichten der Göttinger Akademie der Wissenschaften, Nr. 9 [ohne Seitenzahl]; Nachdruck in Weizsäcker, C. F. von (1992): *Zeit und Wissen*. München: Carl Hanser, S. 976-987.

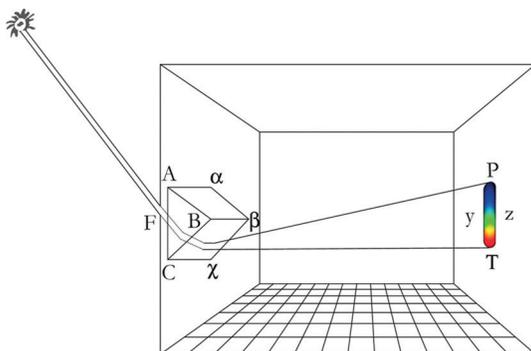


Abb. 1: Die Erzeugung des Sonnenspektrums im Grundversuch Newtons.
Nach einer Skizze Newtons von 1627.

1. In Newtons Dunkelkammer

Der Ausgangspunkt der folgenden Betrachtung sei das bekannte Grundexperiment Newtons, das er im ersten Buch seiner *Opticks* beschreibt und das bis heute die Grundlage für Lehrbuchdarstellungen zur „Zerlegbarkeit des Lichts“ bildet (Abb. 1). Ein so genannter „Lichtstrahl“ fällt durch ein kleines Loch im Fensterladen und erzeugt auf dem Boden der Kammer einen hellen Fleck. Im Durchgang durch ein Prisma ändert der Lichtstrahl durch zweimalige Brechung an den Prismenflächen seine Richtung und wird außerdem in verschiedene Farben zerlegt. Newton zog daraus den Schluss, dass das einfallende Sonnenlicht eine heterogene Mischung verschieden stark brechbarer, farbiger „Elementarlichter“ ist. Er hatte einen Weg gefunden, das Licht als aus elementaren Bestandteilen zusammengesetzt zu beschreiben und diese über den unterschiedlichen Grad ihrer Brechbarkeit zu quantifizieren. – So oder so ähnlich wird das Grundexperiment Newtons zur Dispersion des Lichts üblicherweise beschrieben. Eine genauere Lektüre der *Opticks* zeigt, dass diese Darstellung hinsichtlich der von Newton tatsächlich beobachteten Tatsachen und seiner Begriffsbildung stark entstellt, mindestens aber verkürzt ist und damit einer Reihe verbreiteter epistemologischer und ontologischer Verzeichnungen des Zusammenhangs von Empirie und theoretischer Schlussfolgerung Vorschub leistet.¹³

13 Vgl. Holtmark, T. (1970): Newton's Experimentum Crucis reconsidered. *American Journal of Physics* 38 (10): 1229-1235; ferner die Untersuchung zu

Tatsächlich handelt es sich bei Newtons Dunkelkammer um eine Camera obscura. Der helle Fleck auf dem Boden zeigt nicht, wie der Strahlverlauf in Abbildung 1 nahelegt, den Umriss des Loches im Fensterladen. Vielmehr handelt es sich um ein Lochkamerabild der Sonne, das umso schärfer, aber auch dunkler erscheint, je kleiner das Fensterladenloch ausgeführt ist. Im Allgemeinen handelt es sich, wie bei jedem einfachen Schattenbild und wenn man von Beugungseffekten absieht, um die Faltung¹⁴ der sichtbaren Ausdehnung der Lichtquelle mit der Form der abbildenden Blendenöffnung. Unter dem Einfluss des Prismas erscheint das Lochkamerabild der Sonne in Newtons Kammer umgelenkt und in Brechungsrichtung aufgefächert und gefärbt. Eine genauere Untersuchung zeigt, dass dieses „Spektrum“ als Summe sich überlagernder, verschiedenfarbiger und mit der Abbildungsgeometrie gefalteter Sonnenbilder entsteht (Abb. 2, Mitte).

Newton wusste dies. Er dachte darüber nach, wie man prüfen könnte, ob es sich bei den verschiedenfarbigen Sonnenbildern bereits um die elementaren Komponenten des weißen Sonnenbildes handelte. Zu diesem Zweck verwendete er ein zweites Prisma, das er senkrecht zum ersten in den Lichtweg einfügte, so dass das gesamte Spektrum senkrecht zur ersten Ablenkung ein weiteres Mal abgelenkt wurde – mit dem Ergebnis (Abb. 2, rechts), dass die Farben und mit ihnen die Morphologie des Spektrums erhalten blieben. Der diagonale Verlauf des Spektrums hinter dem zweiten Prisma ergab sich folgerichtig aus dem bereits im ersten Spektrum wirksamen unterschiedlichen Grad der Ablenkbarkeit der farbigen Sonnenbilder. Auf dieses *Experimentum Crucis* mit gekreuzten Prismen kommen wir später im Zusammenhang mit der Frage nach seiner Invertierbarkeit zurück.

Wie kommt man nun dazu, gegenüber der beschriebenen experimentellen Situation, die man sich auch durch ein modernes Spektroskop ersetz denken kann, nach der Symmetrie spektraler Phänomene zu fragen? Als

Newtons Schwanken zwischen bildoptischer Analyse und strahloptischer Deutung seiner Experimente im 1. Buch der *Opticks* in Grebe-Ellis, J.: Bild und Strahl – Perspektiven der Optik bei Bartholinus und Huygens. In: Grebe-Ellis, J. (Hg.) (2011): Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 20 [Reprint der Bände 20 und 205: Bartholinus, E.: *Versuche mit dem doppeltbrechenden isländischen Kristall*; Huygens, C.: *Abhandlung über das Licht*], Frankfurt/M.: Verlag Harri Deutsch, S. 9-44.

14 Mit „Faltung“ wird die Verknüpfung abbildender und abgebildeter Elemente im Bild bezeichnet: Jeder Punkt im Lochkamerabild wird mit der Ausdehnung der abbildenden Lochblende gewichtet und dadurch über einen charakteristischen „Unschärfekreis“ verschmiert.

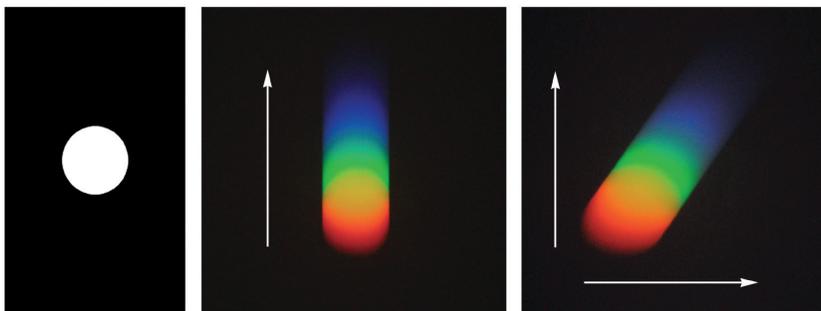


Abb. 2: *Experimentum Crucis* mit gekreuzten Prismen: Erzeugung (Mitte) und Analyse (rechts) des Spektrums einer sonnenähnlichen Lichtquelle in dunkler Umgebung (vgl. Newton: *Opticks*, Buch I, 5. Versuch). Die Pfeile geben die Brechungsrichtung der Prismen an. Fotos: M. Rang

Physiker, die in der optischen Tradition Newtons sozialisiert sind und sich auf dieser Grundlage praktisch mit der experimentellen Methode Goethes vertraut gemacht haben, sind wir zu einer veränderten Sicht auf dieses Experiment Newtons gelangt. Dabei haben wir eine überraschende Entdeckung gemacht: Dieses Experiment *zeigt* nicht nur, es *verbirgt* auch etwas. Das ist selbstverständlich, könnte man sagen, und liegt in der Natur der Sache: Wer den funktionalen Zusammenhang bestimmter Variablen isolieren will, muss dafür sorgen, dass der Einfluss anderer Variablen konstant gehalten oder unterdrückt wird. Im vorliegenden Fall verhält es sich indessen anders. Der Unterschied besteht darin, dass hier der gezeigte und der verborgene Anteil des Phänomens nicht unabhängig voneinander sind, sondern sich gegenseitig bedingen. Das bedeutet: Streng genommen handelt es sich bei dem von Newton gezeigten Spektrum um ein Teilphänomen, dessen Erzeugung der Möglichkeit nach stets die gleichzeitige Erzeugung seines komplementären Gegenstücks *bedingt*. Dass das komplementäre Spektrum üblicherweise nicht erscheint, liegt daran, dass es in herkömmlichen spektroskopischen Grundaufbauten durch Schwärzung des Eintrittspalters unterdrückt wird. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Newtons Experiment umgebaut werden müsste, damit das komplementäre Spektrum und seine Bedingtheit durch die Erzeugung des gewöhnlichen Spektrums sichtbar wird?

Die erste Version eines in diesem Sinne erweiterten, vollständig symmetrisierten Experiments wurde von Matthias Rang 2009 als *Experimentum Crucis* realisiert. Es zeigt, dass sich komplementäre Spektralzustände in ihrer

Erzeugung gegenseitig bedingen, wenn die Energie im optischen System erhalten ist, und dass der auf die jeweilige Referenzumgebung bezogene Nachweis der spektralen Reinheit simultan für das komplementäre Spektrenpaar erbracht werden kann. Auf welchem Weg die annähernde Realisierung eines spektroskopischen Aufbaus als energierhaltendes System gelingt, wird im Folgenden beschrieben, nachdem wir zuerst die Frage beantwortet haben, wie Goethe seinerseits dazu kam, die optische Komplementarität spektraler Phänomene als fundamentale Symmetrieeigenschaft derselben zu betrachten.

2. Der Blick durchs Prisma

Aus seinen Untersuchungen zu farbigen Nachbildern und zum Phänomen des farbigen Schattens war Goethe die Beziehung komplementärer Farbpaare bereits bekannt. Er spricht in diesem Zusammenhang von „entgegen-gesetzten“ bzw. sich „wechselweise fordernden“ Farben und charakterisiert die Beziehung zwischen Farbe und Gegenfarbe als „Totalität“ (*Didaktischer Teil*, §§ 48-80).¹⁵ Dass sich das Prinzip der Gegenfarbigkeit auch im Kontext der „prismatischen Farben“ auffinden lässt (ebd. §§ 195-247, 309-340), entdeckte Goethe in Anknüpfung an ein Schlüsselerlebnis im Mai 1791, das er am Ende der *Geschichte der Farbenlehre* unter dem Titel *Konfession des Verfassers* beschreibt und das hier verkürzt wiedergegeben wird: Goethe plante die Einrichtung eines optischen Labors in seinem Haus. Er hatte sich von einem Bekannten zu Studienzwecken einen Kasten mit optischem Gerät geliehen, war aber nicht dazu gekommen, die Studien in Angriff zu nehmen. Als der Bekannte seinen Boten schickte, um sein Gerät zurückzufordern, übergab Goethe den Kasten, nutzte jedoch die letzte Gelegenheit, indem er ein Prisma herausgriff und einen raschen Blick durch dasselbe gegen die weiße Wand richtete. „Aber wie verwundert war ich, als die durchs Prisma angeschaute weiße Wand nach wie vor weiß blieb, dass nur da, wo ein Dunkles dran stieß, sich eine mehr oder weniger entschiedene Farbe zeigte, dass zuletzt die Fensterstäbe am allerlebhaftesten farbig erschienen, indessen am lichtgrauen Himmel draußen keine Spur von Färbung zu sehen war. Es bedurfte keiner langen Überlegung, so erkannte ich, dass eine Grenze notwendig sei, um Farben hervorzubringen...“¹⁶

15 Vgl. (Goethe, 1987).

16 Vgl. Wenzel, M. (2010): „... ich sprach wie durch einen Instinkt sogleich vor mich laut aus, daß die Newtonische Lehre falsch sei.“ – Dokumente und Deutungen

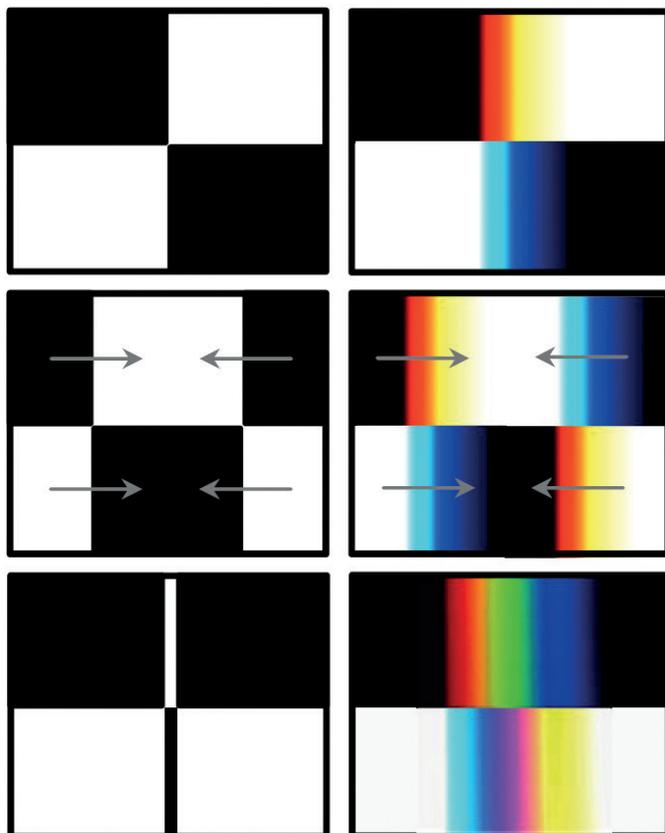


Abb. 3: An den Kontrastgrenzen zwischen Hell und Dunkel (*linke Spalte*) erscheinen im Blick durchs Prisma Kantenspektren (*rechts: oben und Mitte*). Kantenspektren inverser optischer Kontraste sind komplementär. Kombiniert man sie (*Mitte, unten*), entstehen komplementäre und isomorphe Vollspektren. Das Spaltspektrum zeigt Lichtfarben in dunkler Umgebung, die additiv mischen. Das Stegspelktrum zeigt Schattenfarben in heller Umgebung, die subtraktiv mischen.

Die Beobachtung, dass Farben stets an optischen Kontrasten, d. h. an Hell-Dunkel-Grenzen entstehen, wenn diese durch ein Prisma betrachtet werden,

zur Datierung von Goethes Prismenaperçu. In: Rimmel, Andreas & Rimmel, Paul (Hg.): *Liber amicorum. Katharina Mommsen zum 85. Geburtstag*. Bonn: Bernstein, S. 540-571.

sollte für Goethe zum Ausgangspunkt für umfassende Untersuchungen zur Entstehung der „prismatischen Farben“ werden (Abb. 3). Durch die systematische Variation dieser Kontrastbedingung gelangte er zu der Feststellung, dass die Abbildung inverser optischer Kontraste durch ein dispersives Element stets zu isomorphen und komplementären Spektren führt.¹⁷ Vor dem Hintergrund der Darstellung, die er in Newtons *Opticks* gefunden hatte, war dies für Goethe eine unerwartete Entdeckung, dass er ein zu Newtons Spektrum symmetrisch entstehendes und daher als gleichwertig anzusehendes, komplementäres Spektrum fand: Schattenfarben in heller Umgebung gegenüber dem gewöhnlichen Spektrum: Lichtfarben in dunkler Umgebung. Mit Rücksicht auf diese Beobachtungen ist nachvollziehbar, wie Goethe im Farbenkreis eine angemessene Darstellung der gefundenen Regelmäßigkeiten sehen konnte. Dieser stellt eine rationale Verknüpfung der Verwandtschaftsbeziehungen und Mischungseigenschaften komplementärer Spektren dar, die durch Fortsetzung der beschriebenen Experimente gefunden werden können.

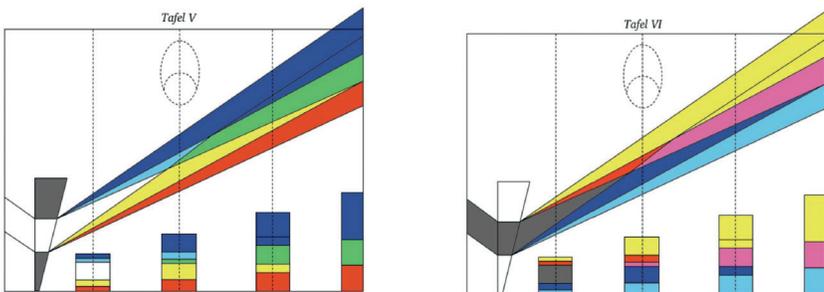


Abb. 4: Goethes Darstellung zur Entstehung komplementärer Spektren durch sukzessive Überlagerung komplementärer Kantenspektren als Funktion des Abstands vom Prisma. *Links*: Spaltspektrum, *rechts* der symmetrische Fall des Stegspektrums, bei dem der Spalt durch einen Steg bzw. das Lichtbündel durch ein Schattenbündel ersetzt ist (mechanische Invertierung).

17 In einem *Komplementäre Farben* überschriebenen Nachtrag zur *Farbenlehre* fasst Goethe später zusammen, „dass ebenso wie Hell und Dunkel auch die Farben sich ihrem Gegensatze nach unmittelbar fordern, so dass, nämlich im Satz und Gegensatz, alle immer zugleich enthalten sind. Deswegen hat man auch die geforderten Farben komplementäre genannt...“ In: Goethe, J.W. von (1962): *Naturwissenschaftliche Hefte*. In: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. LA I, Bd. 8, hrsg. von R. Matthaeci. Weimar: Böhlau Nachflg., S. 190.

Ein methodisches Merkmal des *Didaktischen Teils* der *Farbenlehre* ist die Parallelisierung sogenannter „subjektiver“ und „objektiver“ Versuche (ebd. §§ 195-247, 309-340). Bei den hier bisher beschriebenen Versuchen handelt es sich um den erstgenannten Typ, d.h. um Experimente, in denen das beobachtende Auge in die Entstehungsbedingungen des Phänomens unmittelbar eingebunden ist und die Spektren als virtuelle Bilder gesehen werden. Für Goethe erhob sich die Frage, ob die in subjektiven Versuchen gefundene Komplementarität spektraler Phänomene erhalten bleibt, wenn man zu objektiven Experimenten übergeht, in denen das menschliche Auge durch ein technisches Auge, bestehend aus einer Abbildungsoptik und einem Schirm, ersetzt ist. Dazu musste er das umgekehrte Spektrum objektiv abbilden und es in der Folge derselben Analyse unterwerfen, die Newton am gewöhnlichen Spektrum durchgeführt hatte. Die dazu erforderliche Invertierung des Newton'schen Grundversuchs gelang Goethe, indem er die Loch- bzw. Spaltblende durch eine gleichdimensionierte Kreis- bzw. Stegblende ersetzte. Dadurch wurden durchleuchtete und verschattete Bereiche (man könnte auch sagen: der „Lichtstrahl“ in dunkler Umgebung gegen einen „Schattenstrahl“ in heller Umgebung) unter Erhaltung der Geometrie im Experiment vertauscht.

Auf dem Weg dieser *mechanischen* Invertierung gelangte er zu einem inversen, d.h. dunklen Lochkamerabild der Sonne, das sich im Durchgang durch das Prisma mit den dominierenden Farben Cyan, Magenta und Gelb zum komplementären Gegenstück des gewöhnlichen Spektrums (Rot, Grün und Blau-Violett) entfaltete (Abb. 4).¹⁸ Der Vergleich mit diesem vermittelt zunächst den Eindruck, dass die Komplementarität der Spektren erhalten ist; bezüglich ihrer geometrischen Eigenschaften sind sie isomorph, d.h. die abbildungsoptischen Verhältnisse sind invariant unter der

18 In den Tafeln von Abbildung 4 befinden sich die kontrasterzeugenden inversen Blenden links außerhalb des jeweiligen Bildes. Dass die Lichtquelle eine endliche Ausdehnung und die Blende eine *abbildende* Funktion hat, wird durch die Parallelität der jeweils von links einfallenden Kontrastgrenzen verschleiert. Erwähnenswert ist dies, weil es sich zum einen um einen klassischen Fall der Darstellung „falscher“ Kantenspektren handelt und zum anderen deutlich macht, dass Goethes Invertierung im objektiven Experiment eine *Abbildungsinvertierung* darstellt, wogegen der Kontrastwechsel im entsprechenden subjektiven Versuch eine *Bildinvertierung* darstellt. Dass weder die Bild- noch die Abbildungsinvertierung die Anforderungen an eine vollständige Invertierung erfüllen, wird weiter unten besprochen (vgl. auch Rang, 2015; Rang, Passon & Grebe-Ellis, 2017).

Invertierungstransformation. Dass es sich dabei um notwendige, aber nicht hinreichende Kriterien handelt und die Komplementarität der Spektren bei genauerer Analyse, d. h. bezogen auf den Reinheitstest im *Experimentum Crucis*, jedoch tatsächlich *nicht* erhalten ist, wird im Folgenden ausgeführt.

3. Die Spiegelspaltblende: Simultane Erzeugung komplementärer Spektren

Goethe konnte mit seinem Vorschlag, die Invertierung des Newton'schen Grundversuchs mechanisch zu realisieren, zwar eine anschauliche Darstellung seiner Entdeckung der Symmetrie komplementärer Spektren geben. Aus heutiger Sicht entsteht jedoch der Eindruck, dass er mit diesem Invertierungsvorbild gleichzeitig einem unvollständigen, mechanischen Invertierungsverständnis Vorschub geleistet hat. Dies hat im 20. Jahrhundert zu einer Tradition von Invertierungsversuchen geführt, die so lange wirkungslos bleiben musste, als nicht erkannt wurde, dass das Invertierungsproblem prinzipiell nicht mechanisch, sondern nur optisch lösbar ist. Erwähnenswert sind allerdings die Arbeiten Kirschmanns, der 1917 als erster gezeigt hat, dass sich das umgekehrte Spektrum im Prinzip ebenso spektroskopisch nutzen lässt wie das Spaltspektrum.¹⁹ Maßgebliche Vorarbeiten zur Überwindung der mechanischen Invertierungsvorstellung wurden Ende der fünfziger Jahre in der Osloer Arbeitsgruppe um Bjerke geleistet. Sie führten zu einem Vorschlag zur Verallgemeinerung des *Experimentum Crucis* von Holtsmark, der Ende der siebziger Jahre erstmals von Sällström experimentell realisiert wurde. Ferner sind die Arbeiten von Nussbaumer zu nennen, der insbesondere mit farbigen Kontrasten experimentiert hat.²⁰ Alle in diesem Zusam-

19 Vgl. Kirschmann, A. (1917): Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse. *Physikalische Zeitschrift* XVIII: 195-205; (1924): Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* XLIV: 173-175.

20 Bjerke, A. (1961): Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben; Holtsmark, T. (1970): Newton's Experimentum Crucis reconsidered. *American Journal of Physics* 38 (10): 1229-1235 und (2012): *Colour and Image. Phenomenology of Visual Experience*. Hg. von J. Grebe-Ellis. Berlin: Logos Verlag; Sällström, P. (2010): *Monochromatic Shadow Rays*. Experimentalfilm. Hg. von J. Grebe-Ellis. Gerlingen: Drucktuell; Nussbaumer, I. (2008): *Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren*. Wien: Splitter.

menhang vorgestellten Invertierungsvarianten beschränken sich allerdings auf partielle Invertierungen, die entweder in der Abbildungs- oder in der Bildebene stattfinden und nur zu bedingt symmetrieehaltenden Anordnungen führen. Welche Anforderungen an eine vollständige, d. h. symmetrieehaltende Invertierung eines optischen Systems zu stellen sind, ist erstmals von Rang theoretisch beschrieben und experimentell vorgestellt worden.²¹ Ausgehend von einer kritischen Würdigung des Invertierungsvorschlags Goethes wird im Folgenden sein Ansatz zur Lösung des Invertierungsproblems erläutert.

Woran erkennt man, dass das umgekehrte Spektrum auf *Tafel VI* (Abb. 4, rechts) nicht im strengen Sinne komplementär zum gewöhnlichen Spektrum auf *Tafel V* ist, auch wenn ein visueller Vergleich der Spektren diesen Schluss zunächst nahelegt? Untersucht man vom Ort des jeweiligen Spektrums aus die Beleuchtungsbedingungen, indem man sich mit dem Auge in das Spektrum hineinbegibt, so wird sofort deutlich, dass man es nicht mit einer symmetrischen Situation zu tun hat: Man sieht, bedingt durch die inversen Blenden, sich ergänzende Ausschnitte desselben Spektrums der Lichtquelle, das im einen Fall vom Spalt, im anderen vom Steg teilverdeckt wird. Blickt man z. B. vom Grün des gewöhnlichen Spektrums aus in Richtung Lichtquelle, dann verdeckt der Spalt das Spektrum der Lichtquelle bis auf Grün – ein Indiz dafür, dass dieses Grün im Durchgang durch ein zweites Prisma erhalten bleibt, d. h. spektral rein ist. Blickt man dagegen vom selben Ort im komplementären Spektrum, d. h. vom Magenta in Richtung Lichtquelle, so zeigt sich mitnichten eine komplementäre Situation. Man erblickt vielmehr genau denjenigen Teil des Spektrums der Lichtquelle, der im Fall des Spaltes verdeckt war, d. h. das gesamte Spektrum bis auf Grün, das nun vom Steg verdeckt wird. Dies bedeutet aber, dass das Magenta des Stegspektrums keine spektral reine Farbe ist, sondern durch additive Mischung aller Spektralfarben bis auf Grün entsteht – und folglich im Durchgang durch ein zweites Prisma in eben diese Farben wieder zerfallen würde.

Wenn man sich überlegt, wie die Ansicht vom Ort des Magenta aus beschaffen sein müsste, um den zum Grün im gewöhnlichen Spektrum symmetrischen Fall herzustellen, wird deutlich, dass nicht nur die abbildende Blende (Spalt/Steg), sondern auch die Lichtquelle invertiert werden muss. Im Übergang von der Invertierung im zweidimensionalen Fall des subjektiven Versuchs zum dreidimensionalen objektiven Experiment darf die Invertierung nicht auf die Abbildungs- oder Bildebene beschränkt bleiben,

21 Vgl. (Rang, 2015).

sondern muss sich streng genommen auf den gesamten optischen Raum beziehen. Was offenbar benötigt wird, ist ein Hellraum mit „schwarzer Sonne“ und ein Spalt aus Licht.



Abb. 5: Schattenbild und Lichtbild bedingen sich:
Beleuchtung eines partiell spiegelnden Bistrotisches von links vorne.

Die Konstruktion eines solchen Hellraums ist physikalisch möglich, aber technisch sehr aufwendig. Als Schlüssel für die Realisierung eines partiellen Hellraums, d. h. von optischen Fenstern in einen solchen Hellraum und zugleich als optische Lösung des Invertierungsproblems hat sich der Einsatz verspiegelter Spaltblenden erwiesen.²² Worauf die prinzipielle Wirkungsweise dieser Blenden beruht, soll an der Fotografie in Abbildung 5 erläutert werden. Zu sehen ist ein von der Sonne beschienener Bistrotisch und sein Schattenbild an der weißen Wand dahinter. Auf den zweiten Blick bemerkt man oberhalb des Schattenbildes ein symmetrisch zur Tischfläche liegendes „Lichtbild“ der Tischfläche, das offenbar daher rührt, dass die lackierte Tischfläche zu einem gewissen Grad spiegelt. Die Tischfläche funktioniert offenbar gleichzeitig als Schattengeber und als Spiegel: Licht- und Schattenbild sind entgegengesetzt, existieren jedoch nur gemeinsam – vorausgesetzt, das Lichtbild wird nicht durch die Absorptionseigenschaften der Tischfläche „verschluckt“, d. h. in ein thermisches Phänomen umgewandelt. Wir stellen uns vor, dass in die Mitte

22 Vgl. (Holtmark, 1970; Rang & Grebe-Ellis, 2009).

des spiegelnden Tisches eine kreisförmige Blendenöffnung geschnitten werde mit der Folge, dass in der Mitte des Schattenbildes ein helles Bild dieser Öffnung entsteht. Gleichzeitig ist im Lichtbild ein dunkles Bild dieser Öffnung entstanden. Beide Bilder sind invers zueinander und bedingen sich in dem Sinne, dass es nicht möglich ist, das eine ohne das andere zu erzeugen. Darauf beruht das Konzept der dissipationsfreien Optik.

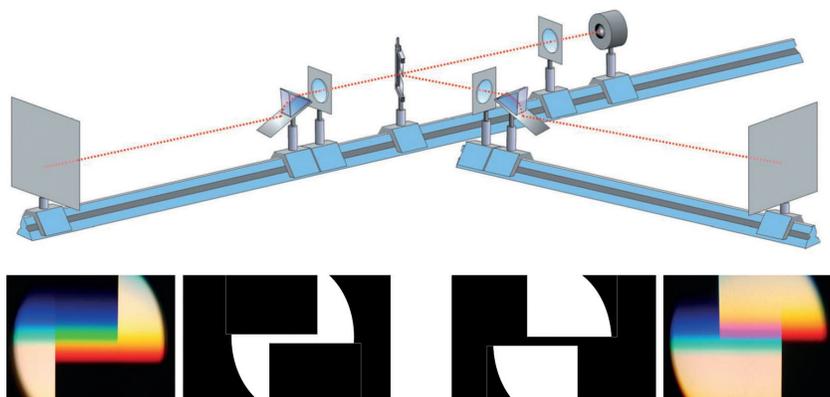


Abb. 6: Simultane Erzeugung komplementärer Spektren durch Verwendung einer verspiegelten Spaltblende. Transmissions- (*links*) und Reflexionsstrahlengang (*rechts*) sind, bezogen auf die Ebene der Spiegelblende, spiegelsymmetrisch zueinander aufgebaut. Ohne Prismen erscheint die Blende in Transmission als Spalt, in Reflexion als Steg abgebildet. Fotos: M. Rang

Was bedeutet dies für den klassischen Spektroskopaufbau? Wird in das Spektroskop anstelle des geschwärzten Eintrittsspalts eine verspiegelte Spaltblende eingebaut, an der im Idealfall keine Absorption stattfindet, so sind die Bedingungen zur simultanen Erzeugung komplementärer Spektren bereits erfüllt: Die Spiegelspaltblende wirkt wie ein Strahlteiler, in dessen Reflexionsstrahlengang der inverse Kontrast zum Spaltbild des Transmissionsstrahlengangs abgebildet wird (Abb. 6). Der zum gewöhnlichen Transmissionsstrahlengang neu hinzukommende, spiegelsymmetrische Reflexionsstrahlengang realisiert das komplementäre Spektrum und macht damit eine Klasse spektraler Phänomene sichtbar, die zwar im herkömmlichen Aufbau der Möglichkeit nach stets miterzeugt wird, aber durch Absorption verlorengeht. Die Invertierung des Spalts erfolgt hier also *optisch*,

nicht mechanisch. Die auf diese Weise erzeugten Spektren sind im strengen Sinne komplementär, weil sie sich funktionell bedingen wie Transmission und Reflexion an einem absorptionsfreien optischen Element. Die Anwendung der Prüfbeobachtung, die gegenüber Goethes mechanischem Invertierungsvorschlag zur Einsicht in die Unvollständigkeit dieses Vorschlags geführt hatte, zeigt für den vorliegenden Fall, dass die Symmetrie der Spektren hinsichtlich ihrer optischen Komplementarität auch für die Analyse der Beleuchtungsbedingungen vom Schirm aus erhalten ist: Begibt man sich an den Ort des Magenta und blickt man von dort in Richtung Lichtquelle, sieht man den gesamten Prismenquerschnitt erfüllt von Magenta.

4. Die Invertierung von Newtons *Experimentum crucis*

Wir erinnern uns an Newtons Analyse des Sonnenspektrums durch die Kombination zueinander gekreuzter Prismen im *Experimentum crucis* (Abb. 2). Nachdem uns mithilfe der verspiegelten Spaltblende für die Analyse der Beleuchtungsverhältnisse vom Schirm aus die Herstellung symmetrischer Verhältnisse gelungen ist, erwarten wir, dass sich die spektralen Anteile des umgekehrten Spektrums, bezogen auf seine helle Umgebung, gegenüber dem Test auf spektrale Reinheit im entsprechend invertierten *Experimentum Crucis* mit gekreuzten Prismen monochromatisch verhalten.

Als Spiegelblende verwenden wir in diesem Fall eine einfache Spiegelkachel, auf deren Rückseite wir auf einer Kreisfläche von 5 mm Durchmesser den Spiegelbelag mit einer Nadel weggekratzt haben, so dass man durch die Kachel hindurchsehen kann. Eingesetzt in den Aufbau von Abbildung 6 entsteht in Transmission ein scharfes Bild der ausgeleuchteten Lochblende, eine „künstliche Sonne“, und in Reflexion ein inverses Bild dieser Sonne: eine „schwarze Sonne“ in homogen ausgeleuchteter Umgebung. Fügt man in den Transmissionsstrahlengang gekreuzte Prismen ein, erhält man das bereits bekannte Ergebnis: das gewöhnliche Spektrum, bestehend im Wesentlichen aus Rot, Grün und Blau-Violett, bleibt erhalten (vgl. Abb. 2). Überraschend ist nun, dass das identische Vorgehen im Reflexionsstrahlengang zu einem symmetrischen Ergebnis führt: Auch das umgekehrte Spektrum, das durch Einsatz des ersten Prismas entsteht, bleibt bei der Abbildung durch das gekreuzte Prisma erhalten (Abb. 7). Unter streng inversen Bedingungen verhalten sich die Abbildungen komplementärer Spektren im *Experimentum Crucis* identisch.

Das Ergebnis dieses symmetrisierten *Experimentum Crucis* lässt sich folgendermaßen deuten und verallgemeinern: Wird eine Farbe in demjenigen

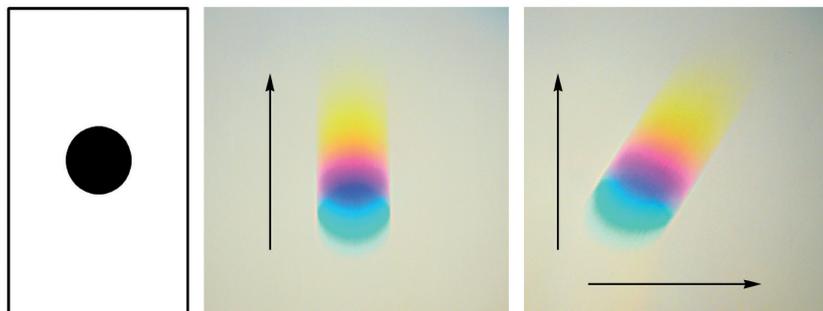


Abb. 7: Invertiertes *Experimentum Crucis* mit gekreuzten Prismen (vgl. Abb. 2): Erzeugung (*Mitte*) und Analyse (*rechts*) des Spektrums einer „schwarzen Sonne“ in heller Umgebung. Die Pfeile geben die Brechungsrichtung der Prismen an.

Fotos: M. Rang

Kontext analysiert, in dem sie erzeugt wurde, verhält sie sich spektral rein, d. h. invariant unter mehrmaliger Anwendung der Dispersion durch ein Prisma oder Gitter. Bezogen auf die helle Referenzumgebung, in der das Magenta erzeugt wird, verhält es sich in der Analyse so, wie sich Grün verhält, wenn es in dunkler Umgebung analysiert wird, in der es auch erzeugt wurde. Wird eine Farbe dagegen in einem Kontext analysiert, der sich vom Kontext ihrer Erzeugung *unterscheidet*, erscheint sie als Mischfarbe und zerfällt in der Analyse durch die zweite Dispersion in diejenigen Farben, die sich in Bezug auf den Kontext der Analyse spektral rein verhalten (d. h. „Eigenzustände“ dieses Kontextes sind). Bezogen auf den Kontext der dunklen Umgebung verhält sich Magenta demnach als Mischfarbe und zerfällt in Rot und Blau-Violett („Eigenzustände“ der dunklen Umgebung), während sich symmetrisch dazu Grün in heller Umgebung ebenfalls als Mischfarbe verhält und in die „Eigenzustände“ Cyan und Gelb der hellen Umgebung zerfällt.

Zum selben Ergebnis gelangt man, wenn man die entsprechende Symmetrisierung an der strengeren Variante des *Experimentum Crucis* Newtons durchführt, bei dem nicht das Spektrum als Ganzes analysiert wird, sondern erst mit Hilfe einer Blende einzelne Spektralbereiche isoliert und dann mit dem zweiten Prisma analysiert werden (*Opticks*, Buch I, 6. Versuch).²³

23 Vgl. Rang, M. (2009): Mehrfachanwendung von Spiegelpaltblenden und Prismen – eine moderne Form von Newtons *experimentum crucis*. In: Nordmeier, V., Grötzebauch, H. (Hg.): *Didaktik der Physik*. Frühjahrstagung der DPG in Bochum 2009. Berlin: Lehmanns Media.

5. Zusammenfassung

Wir haben die Frage untersucht, ob sich Goethes Beobachtung der Symmetrie komplementärer Spektren physikalisch ausbuchstabieren lässt. Vor dem Hintergrund einer kritischen Analyse seiner Invertierungsversuche wurden die physikalischen Bedingungen präzisiert, unter denen sich Komplementarität als Symmetrieeigenschaft eines nicht-dissipativen optischen Systems ergibt.²⁴ Als Schlüssel für die optische Lösung des Invertierungsproblems hat sich der Einsatz einer verspiegelten Spaltblende erwiesen. Damit konnte eine von Goethe entdeckte, aber in der Optik bisher vernachlässigte Eigenschaft spektraler Phänomene nachgewiesen werden. Die beschriebenen Experimente stellen symmetrisierte Verallgemeinerungen der Experimente Newtons dar. Sie zeigen insbesondere, dass es unter sehr allgemeinen Bedingungen nicht möglich ist, ein Spaltspektrum zu erzeugen, ohne simultan die Bedingungen für die Entstehung des komplementären Spektrums zu schaffen. Dieser Umstand bleibt buchstäblich verdunkelt, solange der Eintrittsspalt des Spektroskops geschwärzt ist und dadurch der Reflexionsstrahlengang unterdrückt wird. Zueinander komplementäre Spektren erweisen sich somit als Teilphänomene *eines* experimentellen Bedingungs-zusammenhangs.

24 Eine Beschreibung, die ausführlicher die Bedeutung der Energieerhaltung als Bedingung für optische Komplementarität thematisiert, ist gegeben in (Rang, Passon & Grebe-Ellis, 2017).