

Optische Komplementarität

Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene¹

Matthias Rang, Oliver Passon und Johannes Grebe-Ellis
AG Physik und ihre Didaktik, Bergische Universität Wuppertal

Zusammenfassung

Goethes Blick durch das Prisma bildete den Auftakt für eine Beschreibung optischer Spektren als Komplementärphänomene. Als komplementär werden üblicherweise Farben bezeichnet, die sich additiv zu Weiß ergänzen. Nach physikalischen Präzisierungen und experimentellen Untersuchungen der Komplementaritätseigenschaften optischer Spektren sucht man in der Literatur indessen vergebens. Unter welchen Bedingungen eine verallgemeinerte Darstellung spektraler Zustände als Komplementärzustände möglich ist, stellt auch unabhängig vom historischen Kontext der Farbenlehre Goethes eine interessante Frage dar. Im vorliegenden Artikel wird ein optisches Inversionskonzept vorgestellt, das Komplementarität als Symmetrieeigenschaft spektraler Zustände in einem nicht-dissipativen optischen System definiert.

Einleitung

Newtons optische Experimente gehören bis heute zu den bedeutendsten Errungenschaften der physikalischen Optik. Dies hat Goethe nicht davon abgehalten, in seiner „Farbenlehre“ gegen Newtons Argumentation zu polemisieren und sie als einseitig und methodisch irreführend zu bezeichnen. Am Ende seines Lebens relativierte der Dichter sein gesamtes literarisches Werk gegenüber der Bedeutung, die er seinem Beitrag zur Wissenschaft der Farbe zuerkannt wissen wollte. Der Fall „Goethe contra Newton“ hat seitdem viele Gemüter erregt; über kaum eine wissenschaftliche Kontroverse ist mehr geschrieben worden. Und auch wenn sich namhafte Physiker immer wieder um eine Würdigung Goethes als Wegbereiter einer ganzheitlichen Naturwissenschaft bemüht haben², so ließen sie doch letztlich keinen Zweifel daran, dass Goethes Farbenlehre aus physikalischer Sicht ein hoffnungsloser Fall und zu Recht seit langem erledigt sei.

Studiert man die physikalische Rezeptionsgeschichte der „Farbenlehre“ Goethes genauer, gelangt man allerdings zu einem überraschenden Ergebnis, das der Berliner Wissenschaftsphilosoph Olaf Müller auf die folgende Feststellung zuspitzt: Die Farbenlehre Goethes wurde nur von wenigen gründlich studiert, Goethes Hinweis auf die Symmetrie spektraler Phänomene blieb unbeachtet und ernst zu nehmende Versuche, die Komplementarität inverser Spektren experimentell zu untersuchen, haben nicht stattgefunden (Müller 2015).

Was besagt das Symmetrieargument Goethes? Lässt sich die phänomenologische Symmetrie komplementärfarbiger Spektren in eine physikalische Problemstellung übersetzen, so dass die Frage, unter welchen Bedingungen die spektralen Zustände eines optischen Systems als „Komplementärzustände“ auftreten, experimentell überprüfbar wird? Dies ist keine historische, sondern eine physikalische Frage, die auch unabhängig vom historischen Kontext von Interesse ist. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Phänomenologie komplementärer Spektren ist eine umfassende Studie entstanden, die zeigt, dass Komplementarität als Symmetrieeigenschaft inverser optischer Zustände vorliegt, wenn das optische System als konservatives System betrachtet werden kann (Rang 2015). Welche experimentellen Konsequenzen das hat, wird hier im Anschluss an eine kritische Würdigung der Invertierungsversuche Goethes am klassischen Spektroskop und an einer modernen, erweiterten Form von Newtons *Experimentum Crucis*, einem Doppelmonochromator gezeigt.

¹ Eine redaktionell bearbeitete Version des Manuskripts ist im Physik-Journal 16 (2017) Nr. 3: 43-49 erschienen.

² Siehe z.B. Heisenberg, W.: Die Goethesche und die Newtonsche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik. In: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*. Stuttgart: Hirzel, 1959; Weizsäcker, C. F. von: Einige Begriffe aus Goethes Naturwissenschaft. In: Hamburger Ausgabe, Bd.13: Naturwissenschaftliche Schriften I, München: C. H. Beck, 1981; Born, M.: Betrachtungen zur Farbenlehre. *Die Naturwissenschaften* 50/2: 29-39 (1963).

Goethes Farbenlehre – im Widerspruch mit Newtons Optik

Was bezeichnet man heute als „Goethes Farbenlehre“, wie lautete Goethes Kritik an Newtons Optik und wie wird diese Kritik heute bewertet? – Goethes Schriften zur Farbenlehre bestehen aus einem mehr als 1000 Seiten umfassenden Werkkomplex, der aus einer über 50jährigen Beschäftigung mit dem Thema Farbe hervorgegangen ist und dessen zusammenhängender Kernbestandteil 1810 unter dem Titel „Zur Farbenlehre“ erschien.³ Ursprünglich auf der Suche nach einer brauchbaren Farbenlehre für Künstler unternahm Goethe den groß angelegten Versuch, das technische und künstlerische Praxiswissen sowie die weitverzweigten naturwissenschaftlichen Farbforschungen seiner Zeit zu einer umfassenden Farbwissenschaft zusammenzuführen (Steinle 2016).

Eine angemessene Darstellung davon können wir hier nicht geben. Dies betrifft insbesondere auch Goethes Kritik an Newton und die unter dem Schlagwort „Goethe contra Newton – wer hat Recht?“ in die Rezeptionsgeschichte der „Farbenlehre“ eingegangene Kontroverse.⁴ Neuere wissenschaftshistorische Untersuchungen relativieren das Bild von Goethe als einsamem Newton-Kritiker, indem sie Goethes Äußerungen im Kontext der Wirkungsgeschichte von Newtons Optik verorten (Steinle 2014) und nachweisen, dass der explorative Stil der Goetheschen Forschungsmethode in der Naturwissenschaft und namentlich der Physik wesentlich verbreiteter war, als lange angenommen wurde (Steinle 2004).

Um exemplarisch zu zeigen, welcher Art Goethes Widerspruch war, werden im Folgenden zwei Punkte angerissen, auf die er seine Kritik an Newtons Optik zugespitzt hat und die gleichzeitig Gelegenheit geben, in die Frage nach einer physikalischen Definition der optischen Komplementarität einzuführen.

Goethe stellte nicht nur in Frage, was Newton mit der „Zerlegung des Lichts im Prisma“ gezeigt haben wollte, nämlich dass Licht „aus farbigen Lichtern zusammengesetzt“ sei. Er bestritt darüber hinaus den Anspruch Newtons, die Heterogenität des Lichts im Experiment nachgewiesen zu haben. Dies war dabei keine Kritik an den besonderen Experimenten Newtons. Vielmehr hielt er die Auffassung, eine Theorie lasse sich im Experiment „beweisen“, für verfehlt und behauptete, „dass ein Versuch, ja mehrere Versuche in Verbindung nichts beweisen, ja dass nichts gefährlicher sei, als irgendeinen Satz unmittelbar durch Versuche bestätigen zu wollen.“ Goethe warnte davor, das im einzelnen Experiment isolierte Phänomen zu rasch zu verallgemeinern: „Kein Phänomen erklärt sich an und aus sich selbst; nur viele zusammen überschaut, methodisch geordnet, geben zuletzt etwas, was für Theorie gelten könnte.“ Er warf Newton vor, Hypothesen als Tatsachen auszugeben und empfahl: „Man suche nur nichts hinter den Phänomenen; sie selbst sind die Lehre.“

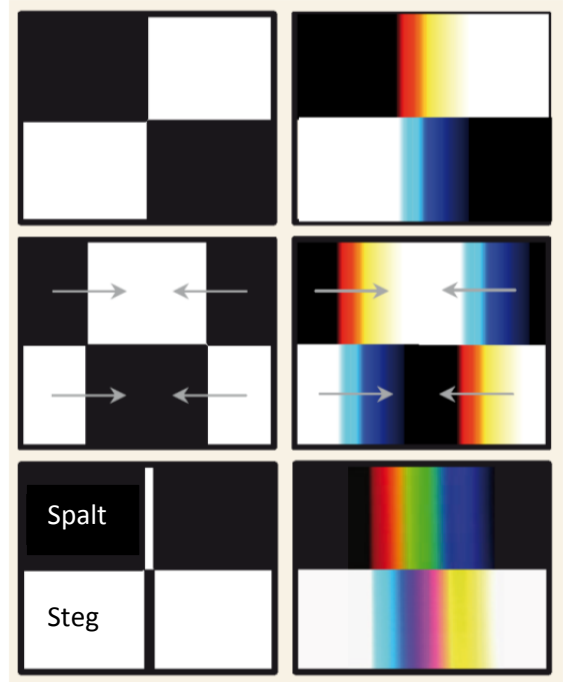


Abb. 1: An den Kontrastgrenzen zwischen Hell und Dunkel (linke Spalte) erscheinen im Blick durchs Prisma Kantenspektren (rechts: oben und Mitte). Kantenspektren inverser optischer Kontraste sind komplementär. Kombiniert man sie (Mitte, unten), entstehen komplementäre und isomorphe Vollspektren. Das Spaltspektrum zeigt Lichtfarben in dunkler Umgebung, die additiv mischen. Das Stegspektrum zeigt Schattenfarben in heller Umgebung, die subtraktiv mischen.

³ Das Werk hat drei Teile: Der „Didaktische Teil“ umfasst 920 Paragraphen, in denen Goethe eine systematische Anordnung verschiedener Klassen von Farbphänomenen unternimmt. Der „Polemische Teil“ ist der Kritik an Newtons Optik gewidmet; Goethe legt in 680 Paragraphen seine kritische Lektüre der „Opticks“ vor und dokumentiert die Ergebnisse seiner Analyse der Experimente Newtons. Der „Historische Teil“ stellt die bis heute umfassendste Geschichte der Farbenlehre bis 1800 dar. Darüber hinaus hat Goethe einige wissenschaftsphilosophische Schriften verfasst, die um eine Bestimmung des Verhältnisses von Phänomen, Theorie und Experiment kreisen und in denen er sich, angeregt durch die kritische Ermunterung Schillers, Rechenschaft über sein forschungsmethodisches Vorgehen gibt, vgl. insbesondere den Aufsatz „Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt“ der als methodischer und wissenschaftsphilosophischer Schlüsseltext Goethes angesehen wird (Goethe 1951; Mandelartz 2011; Steinle 2014). – Den umfassendsten Überblick über Werk und Rezeptionsgeschichte der „Farbenlehre“ gibt die seit 2011 abgeschlossene, historisch-kritische Ausgabe sämtlicher Schriften Goethes zur Farbenlehre in der Leopoldina-Ausgabe: „Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft.“ (Goethe 1947-2011)

⁴ Siehe z.B. die lesenwerten Darstellungen von Volkmar Schüller: Goethe versus Newton. Zum 250. Geburtstag von Johann Wolfgang von Goethe. *Physikalische Blätter* 55 (12): 62-66 (1999) sowie von Werner Heisenberg: Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt. *Goethe-Jahrbuch* 29: 27-42 (1967).

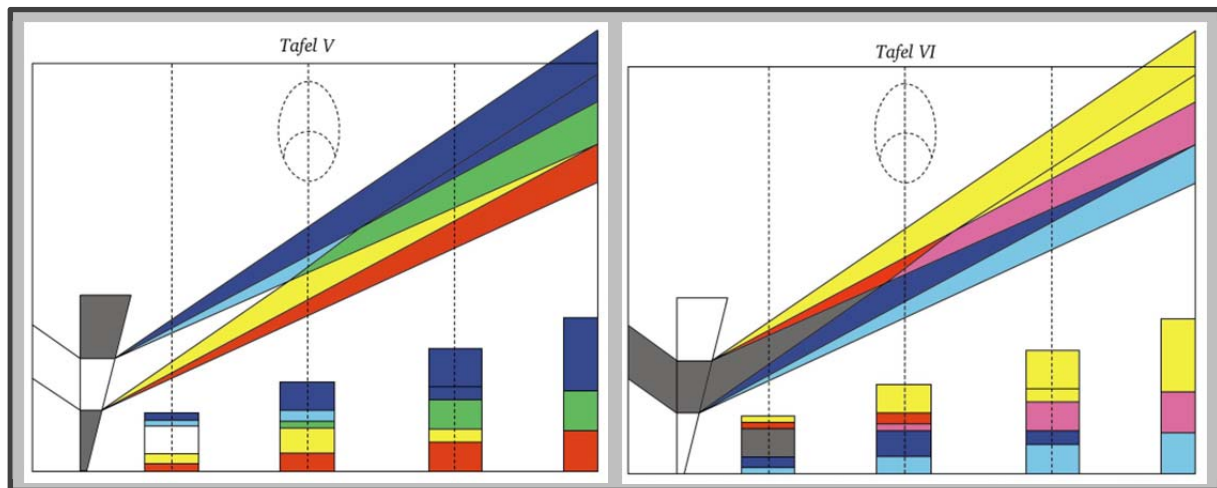


Abb.2: Goethes Darstellung zur Entstehung komplementärer Spektren durch sukzessive Überlagerung der Kantenspektren als Funktion des Abstands vom Prisma. Goethes Darstellung zur Entstehung komplementärer Spektren durch sukzessive Überlagerung komplementärer Kantenspektren als Funktion des Abstands vom 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).

Newtons Frage nach der Substanz des Lichtes und daraus ableitbaren, quasimechanischen Eigenschaften (Newton 1672) erschien Goethe spekulativ und mit Rücksicht auf die Unsichtbarkeit von Licht im Experiment nicht beantwortbar. Er fragte stattdessen nach den *beobachtbaren Bedingungen* der Farbentstehung. Die grundlegendste dieser Bedingungen besteht darin, dass Farben stets an optischen Kontrasten, d.h. an Hell-Dunkel-Grenzen entstehen (vgl. Abb.1). Durch die systematische Variation dieser *Kontrastbedingung* gelangte Goethe zu der Feststellung, dass die Abbildung inverser optischer Kontraste durch ein dispersives Element stets zu isomorphen und komplementären Spektren führt. Vor dem Hintergrund der Darstellung, die er in Newtons „Opticks“ gefunden hatte, war dies für Goethe eine verblüffende Entdeckung, dass er ein zu Newtons Spektrum symmetrisch entstehendes und daher als gleichwertig anzusehendes, komplementäres Spektrum fand (Abb. 2). Die abbildungsoptische Identität dieser beiden Spektren veranlasste ihn zu einem Argument, mit dem er das in der Wissenschaftstheorie des 20. Jahrhunderts diskutierte Problem der empirischen Unterbestimmtheit von Theorien vorwegnahm (Müller 2015): 'Mit demselben Recht, mit dem Newton auf der Grundlage seines Spektrums die Heterogenität des Lichts postulierte, könnte auf der Grundlage des komplementären Spektrums die Heterogenität der Finsternis postuliert werden. Beide Theorien wären formal äquivalent.' Goethe ließ keinen Zweifel daran, dass es sich dabei um ein epistemologisches und kein physikalisches Argument handelte und er die Rede von „zerlegbaren Finsternisstrahlen“ für ebenso abwegig hielt wie die von zerlegbaren Lichtstrahlen. Es erschien ihm selbstverständlich, von einer Theorie spektraler Phänomene eine Berücksichtigung der Symmetrieverhältnisse zu erwarten, die die Phänomene zeigten. Aus diesem Grunde beharrte er auf der Beobachtung, dass es zur Entstehung von Farbe stets des Zusammenwirkens von Hell und Dunkel bedürfe. Newtons Beschränkung auf das Spaltspektrum weckte bei ihm den Eindruck eines willkürlichen Eingriffs in die Empirie, der die Unterdrückung einer ganzen Klasse von Phänomenen und damit eines Strukturmerkmals spektraler Phänomene zufolge hatte, das auch in anderen Bereichen wie z.B. bei den atmosphärischen Farben oder den Polarisationsfarben zu beobachten war und insofern von allgemeinerer Bedeutung zu sein schien.

Da Goethe Newtons „experimentelle Beweise“ nicht gelten ließ, konnte er für seine eigenen Befunde ebenso wenig Beweiskraft beanspruchen. Dessen war er sich bewusst, wenn er schrieb: „Wir bilden uns also keineswegs ein, zu beweisen, dass Newton unrecht habe [...]“ In der Art und Weise, wie aus Beobachtungen und Experimenten theoretische Schlussfolgerungen gezogen werden, wird heute überwiegend der kontroverse Kern von Goethes Kritik an Newtons Optik gesehen (Böhme 1977; Steinle 2002; Mandelartz 2011, Müller 2015). Newtons epistemologische Überzeugungen in den „Opticks“ spiegeln die Forderung der reduktionistischen Naturphilosophie seiner Zeit wider, die Phänomene auf mechanische Ursachen zurückzuführen. Die Geschichte der physikalischen Optik hat Newton recht gegeben, insofern der Reduktionismus zum beherrschenden Paradigma nicht nur der Optik, sondern der Physik insgesamt wurde. Der Einfluss, den Goethes Farbforschungen auf die Entwicklung technischer, künstlerischer und wissenschaftlicher Aspekte der Farbenlehre gehabt haben,

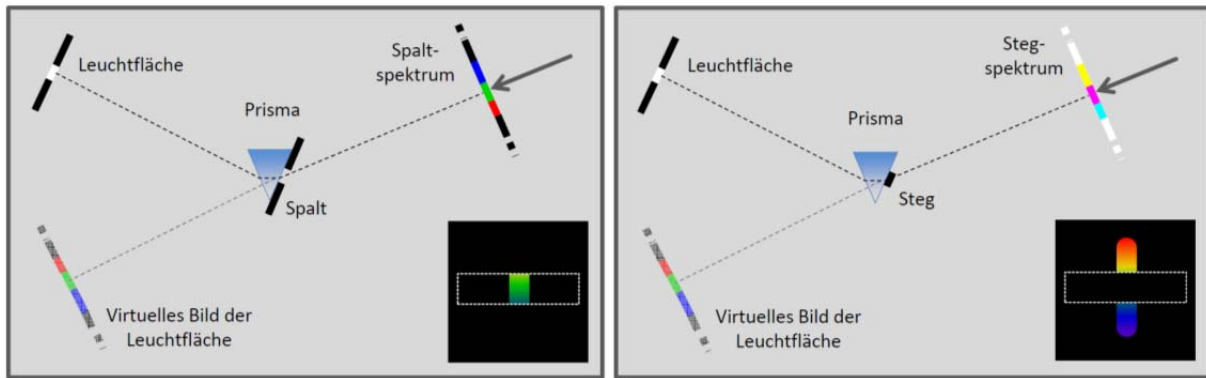


Abb. 3: Experiment zur Projektion des Spektrums einer Leuchtfläche mit Spalt und Prisma (links, vgl. Tafel V, Abb. 2). Das Inset zeigt die Ansicht eines Beobachters, der aus dem grünen Bereich des Spektrums (Pfeil) durch das Prisma auf das virtuelle, zum Spektrum transformierte Leuchtflächenbild blickt, das – bis auf den grünen Bereich – von der Spaltblende verdeckt wird. In Goethes Invertierung des Experiments (vgl. Tafel VI, Abb. 2) ersetzt eine Stegblende den Spalt (rechts). Das Inset zeigt die Ansicht eines Beobachters, der aus dem magentafarbenen Bereich des Spektrums (Pfeil) durch das Prisma auf das virtuelle, zum Spektrum transformierte Leuchtflächenbild sieht, das – bis auf den grünen Bereich – von der Stegblende nicht verdeckt wird.

ist heute unstrittig. Seine physikalischen Beiträge zur Farbe waren dagegen lange nur von wissenschaftshistorischem und philosophischem Interesse. Sie werden in den letzten Jahren zunehmend neu entdeckt (Holtsmark 2012; Müller 2015; Rang 2015). Ein Beispiel dafür, dass sich Goethes Argumente bei genauerer Betrachtung in eine physikalisch sinnvolle Problemstellung übersetzen und mit den Mitteln der Newtonschen Optik produktiv ausführen lassen, geben wir im Folgenden.

Goethes Phänomenologie komplementärer Spektren

Goethes Invertierung beruhte auf einer systematischen Umkehrung des optischen Kontrasts, d.h. einer Vertauschung von Hell und Dunkel im Experiment unter Invarianz der Abbildungsgeometrie. Er hatte in subjektiven Experimenten mit dem Prisma entdeckt, dass an inversen optischen Kontrasten komplementäre Farbpaaere entstehen (Abb.1). Diese Beobachtung hatte ihn zu der Überzeugung geführt, dass Komplementarität ein intrinsisches Symmetriemerkmal spektraler Phänomene ist.⁵

Wie Goethe die Invertierung im objektiven Experiment realisierte, zeigen seine Tafeln V und VI aus dem Didaktischen Teil der Farbenlehre (Abb. 2). Tafel V zeigt die Genese eines Spaltspektrums, Tafel VI den symmetrischen Fall des komplementären Stegspektrums, der sich durch mechanische Invertierung, d.h. Ersetzung der Spaltblende durch einen gleich dimensionierten Steg ergibt. Goethe klebte einfach ein entsprechend geformtes Pappstück auf das Prisma, so dass in genau dem Bereich des Prismas, den im ersten Fall ein Lichtbündel in dunkler Umgebung durchsetzte, nun ein exakt gleich dimensioniertes Schattenbündel in heller Umgebung verlief (Abb. 2, unten). Auf den ersten Blick scheint damit die Komplementarität der Spektren auf der Basis inverser Anordnungen auch im objektiven Experiment gegeben zu sein.

Eine genauere Analyse zeigt, dass dies nicht der Fall ist. Untersucht man vom Ort des jeweiligen Spektrums aus die Beleuchtungsbedingungen (Abb. 3), 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 Spaltspektrums aus in Richtung

⁵ Im Zusammenhang mit Untersuchungen zu farbigen Nachbildern (Sukzessivkontrast) und zum farbigen Schatten (Simultankontrast) spricht Goethe von „entgegengesetzten“ bzw. sich „wechselweise fordernden“ Farben und charakterisiert die Beziehung zwischen Farbe und Gegenfarbe („Dualität“) als „Totalität“ (Didaktischer Teil, §§ 48-80). Dieses Prinzip der Gegenfarbigkeit indentifiziert er auch im Kontext der „prismatischen Farben“ an inversen optischen Kontrasten (§§ 195-247, 309-340) und trägt ihm ferner im Farbenkreis Rechnung, in dem die komplementären Gegenfarbpaaere einander gegenüber stehen (§§ 696-709) (Goethe 1987). 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...“ (Goethe 1962). Andere Stellen, an denen Goethe den Begriff „Komplementarität“ benutzt, haben wir nicht gefunden.

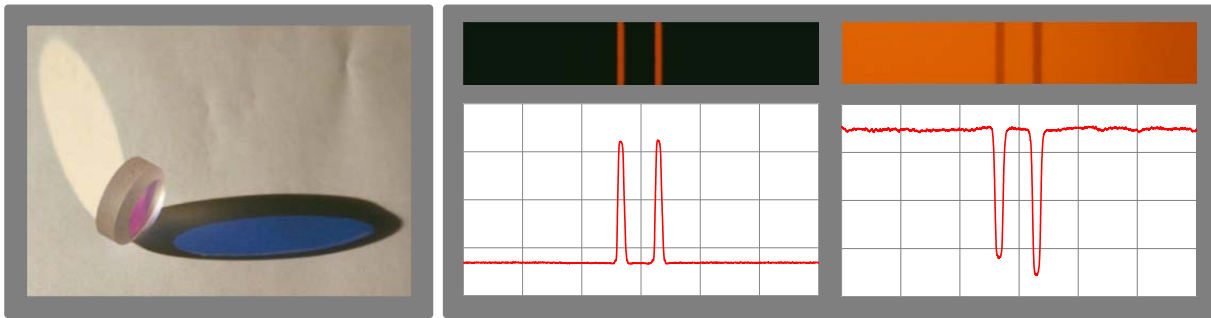


Abb. 4: Seitlich beleuchteter Interferenzfilter (links), dessen Transmission blau und dessen Reflexion komplementär dazu gelblich erscheint. Inverse Spektren des Natrium-D-Dubletts (rechts).

Lichtquelle (Abb. 3, links), 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 des Stegspektrums in Richtung Lichtquelle (Abb. 3, rechts), 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.

Vor diesem Hintergrund entsteht der Eindruck, dass das mit den Tafeln in Abbildung 2 gegebene Invertierungsvorbild zwar Goethes Entdeckung der Symmetrie komplementärer Spektren illustriert, gleichzeitig aber einem unvollständigen, mechanischen Invertierungsverständnis Vorschub leistet. Dies hat zu einer Tradition von letztlich wirkungslos gebliebenen Invertierungsversuchen geführt.⁶ Dass sich das Invertierungsproblem prinzipiell nicht mechanisch, sondern nur optisch lösen lässt und welche Anforderungen an die vollständige, d.h. symmetriehaltende Invertierung eines optischen Systems zu stellen sind, wird im Folgenden erläutert.

Komplementarität als optisches Konzept

Während Komplementarität in der Quantenmechanik eindeutig definiert⁷ ist, fehlt eine solche Definition in der Optik. Dies liegt nicht daran, dass sich optische Komplementarität nicht als physikalische Eigenschaft exakt definieren und quantifizieren ließe, sondern hat vermutlich eher historische Gründe.

In der Farbmimetrik werden Farben des Spektralfarbenzugs als *kompensativ* bezeichnet, aus denen man additiv einen unbunten Farbeindruck ermischen kann, weil ihre Farborte sich in der CIE-Normtafel auf einer Geraden durch den Unbuntpunkt gegenüber liegen. Im Allgemeinen besteht die Reizfunktion einer Farbe indessen aus einer Summe spektraler Farbreize. Farbpaare, deren Farbreizfunktionen sich additiv zu Unbunt (Weiß) ergänzen, werden *komplementär* genannt (Lang 2004). Dies trifft z.B. auf die Farbpaare zu, die an einem absorptionsfreien Interferenzfilter entstehen (Abb. 4, links), für den im sichtbaren Spektralbereich näherungsweise angenommen werden kann, dass sich die reflektierten und transmittierten Spektralanteile zu 1 ergänzen: $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$. Der Filter wirkt wie ein Strahlteiler, der die einfallende Strahlung einer weißen Lichtquelle in zwei komplementäre Spektralverteilungen zerlegt.

Für eine allgemeine Definition der optischen Komplementarität gehen wir von der Beobachtung aus, dass sich komplementäre Spektren in Überlagerung zu einem kontrastlosen, wellenlängenunabhängigen und weißen Intensitätsnormal ergänzen. Im Unterschied dazu ergänzen sich *inverse* Spektren zwar zu einem wellenlängenunabhängigen, im Allgemeinen aber nicht weißen Intensitätsnormal (z.B. die inversen Spektren des Natrium-D-Dubletts, Abb. 4 rechts, aufgenommen mit dem in Abb. 5 gezeigten Aufbau). Komplementäre Spektren sind also stets invers – aber nicht umgekehrt. Die Inversion eines optischen Systems bezeichnet damit eine Symmetrieeigenschaft spektraler Zustände, die aus der Energieerhaltung folgt. Experimente, die diese Definition erfüllen, sind erstmals in den letzten Jahren realisiert worden (Rang 2009; Rang & Grebe-Ellis 2009; Rang 2015). Zwei mögliche Anwendungen werden im Folgenden vorgestellt.

⁶ 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 (Kirschmann 1917; 1924).

⁷ Nach üblichem Verständnis werden Observable als komplementär bezeichnet, für die eine Unbestimmtheitsrelation gilt – deren Werte also nicht gemeinsam scharf definiert werden können.

Inverse Spektroskopie

Wenn die Inversion optischer Spektren aus der Energieerhaltung folgt, stellt sich die Frage, warum man in einem gewöhnlichen Spektroskop nicht inverse Spektren beobachtet? Tatsächlich macht die Frage darauf aufmerksam, dass in einem Spektroskop herkömmlicher Bauart die Strahlungsenergie prinzipiell nicht erhalten ist. Zwar kann man dies für den Fall idealisierter Bauteile für den inneren Aufbau zwischen Eintrittsspalt und Detektorfläche näherungsweise annehmen, doch der Eintrittsspalt selbst ist in der Regel eine geschwärtzte Blende, an der ein Großteil der Strahlungsenergie absorbiert und in thermische Energie umgewandelt wird.

Wird in das Spektroskop als Eintrittsspalt stattdessen eine verspiegelte Spaltblende eingebaut, an der im Idealfall keine Absorption stattfindet, so bleibt im optischen Gesamtsystem die Strahlungsenergie erhalten. Die Bedingungen zur Erzeugung inverser Spektren sind mit dieser „selbstinvertierenden“ Spiegelspaltblende bereits erfüllt: Sie wirkt wie ein Strahlteiler, in dessen Reflexionsstrahlengang der inverse Kontrast zum Spaltbild des Transmissionsstrahlengangs abgebildet wird (Abb. 5, oben) (Holtsmark 1970; Rang & Grebe-Ellis 2009). Ein identischer Aufbau aus Kollimator, Dispersionselement und Objektiv im Reflexionsstrahlengang realisiert das inverse Spektrum zu dem Spektrum des Transmissionsstrahlengangs und macht damit eine Klasse spektraler Phänomene sichtbar, die zwar der Möglichkeit nach stets miterzeugt wird, aber durch Absorption im herkömmlichen Aufbau verlorengeht. Die Invertierung des Spalts erfolgt hier also nicht *mechanisch*, sondern *optisch*: Die spiegelnden Blendenteile wirken wie eine Spaltblende aus Licht und erzeugen simultan zum Spalt in Transmission den zum Spalt inversen Blendenkontrast in Reflexion. Die auf diese Weise erzeugten Spektren sind im strengen Sinne invers, weil sie sich funktionell bedingen wie Transmission und Reflexion an einem absorptionsfreien optischen Element.

Die Definition der optischen Komplementarität fordert aber neben der Energieerhaltung auch antisymmetrische Energieverteilungen in den Spektren, die empirisch nachgewiesen werden können. Das bedeutet insbesondere, dass die spektrometrische Information in beiden Spektren identisch ist. Bis auf das Vorzeichen entsprechen sich die Spektralprofile und Intensitäten komplementärer Spektren exakt (Abb. 5, unten). Für die Spektroskopie könnte es daher in bestimmten Fällen von Vorteil sein, beide Spektren simultan zu messen und damit einen Faktor zwei in der spektralen Sensitivität des optischen Aufbaus zu gewinnen (Rang 2015). Da die optische Intensität in radiometrischen Einheiten eine Leistungsflächendichte ist, darf erwartet werden, dass auch die Energiedichten inverser Spektren eine Inversionsgleichung erfüllen. Dass sich antisymmetrische Energiedichten inverser Spektren auch außerhalb des sichtbaren Bereichs im nahen IR (bzw. *Infracyan*) und UV (bzw. *Ultragebl*) nachweisen lassen, konnte kürzlich für inverse Spektren einer Xenon-Höchstdrucklampe gezeigt werden (Rang & Grebe-Ellis 2017).

Inverse Monochromasie

Die antisymmetrischen Spektralprofile erlauben eine interessante Folgerung: Monochromatischen Spektrallinien des gewöhnlichen Spektrums entsprechende „monochromatische“ Linien im komplementären Spektrum. Wie verhalten sich diese inversen Spektrallinien unter wiederholter Dispersion und Abbildung? Experimentell

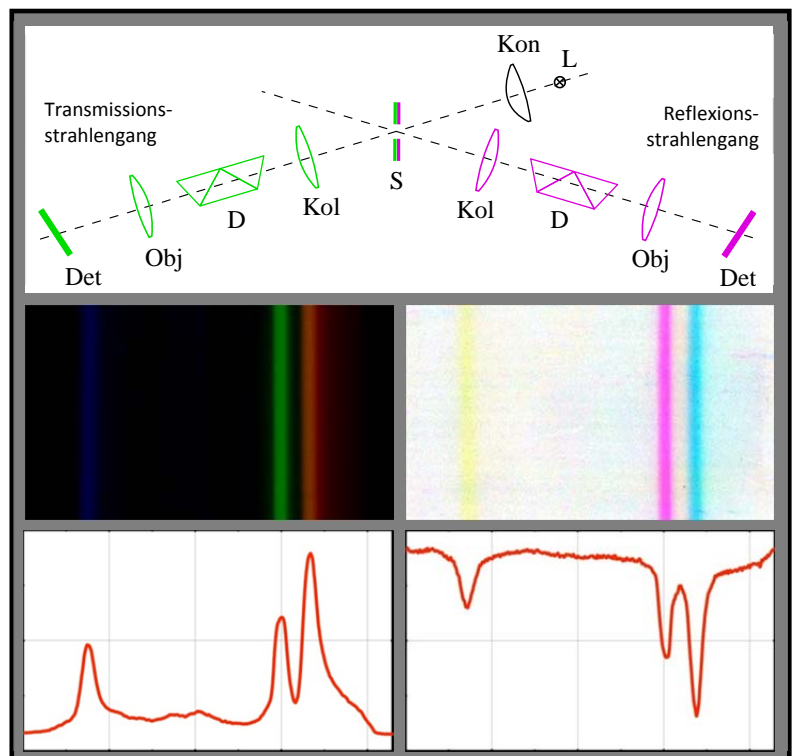


Abb. 5: Spektrometer mit Spiegelspaltblende S (oben), an der simultan komplementäre, linierverbreiterte Spektren einer Quecksilberhochdrucklampe erzeugt werden (Mitte, unten). Der Reflexionsstrahlengang (R) ist mit Kollimator (Kol), Dispersionselement (D), Objektiv (Obj) und Detektor (Det) spiegelsymmetrisch zum Transmissionsstrahlengang. Die Beleuchtungseinheit ist durch die Leuchtfläche (L) und den Kondensator (Kon) angegeben.

kann dies mit einem entsprechend modifizierten Doppelmonochromator untersucht werden, der eine moderne Form des Newtonschen *Experimentum crucis* darstellt.

Newton entwarf dieses Experiment zum Nachweis der Reinheit der Spektralfarben und bezeichnete es als *Experimentum crucis* im Sinne eines Entscheidungsexperiments mit besonderer Beweiskraft (Newton 1704). Aus dem entwickelten Spaltspektrum einer weißen Lichtquelle werden dazu einzelne Spektralbereiche selektiert und durch ein zweites dispersives Element analysiert (Abb. 6). Wird der selektierte Spektralbereich auch in der zweiten Dispersion unverändert abgebildet und ist der jeweilige Ablenkungsgrad erhalten, kann der selektierte Spektralbereich als spektral rein betrachtet werden. Im Unterschied dazu zerfallen die Linien des komplementären Spektrums unter dem Einfluss der zweiten Dispersion in die monochromatischen Bestandteile des Spaltspektrums – eine Beobachtung, die als Beleg der spektralen Unreinheit der Linien des komplementären Spektrums angesehen wird. Wie sieht nun die strenge Invertierung des *Experimentum Crucis* aus?

Dem Vorbild Newtons folgend enthält der erste Abschnitt unseres Doppelmonochromators anstelle des Detektors einen Austrittsspalt, durch den ein Spektralbereich selektiert werden kann, bevor dieser im zweiten Abschnitt des Aufbaus erneut durch ein Dispersionselement abgebildet wird (Abb. 7, oben). Ersetzt man nun die Spaltblenden des Doppelmonochromators durch verspiegelte, d.h. annähernd dissipationsfreie Blenden und beleuchtet die sekundäre Blende genau so wie die primäre, dann erweisen sich auch die Linien des komplementären Spektrums, bezogen auf ihre Referenzumgebung, als spektral rein: Der mit der zweiten Blende selektierte Spektralbereich zerfällt nicht, sondern bleibt unzerlegt erhalten, wenn er in der Beleuchtung analysiert wird, in der er auch erzeugt wurde. In dieser neuen Form gelingt damit auch für das komplementäre Spektrum der Nachweis spektraler Reinheit (Abb. 7, Mitte und unten).

Dieses Ergebnis lässt sich folgendermaßen deuten und verallgemeinern: Wenn Komplementarität eine Folge der Energieerhaltung ist, dann sollten komplementäre Zustände in allen weiteren dissipationsfreien Abbildungen – einschließlich der wiederholten Anwendung von dispersiven Elementen – komplementär bleiben. Daraus ergibt sich, dass monochromatische Bereiche beider Spektren unter Anwendung dieser optischen Operationen nicht zerfallen, d.h. bezogen auf ihre Referenzumgebung spektral rein sind. Beschreibt man die Wirkung des dispersiven Elements, bezogen auf eine gegebene Referenzumgebung, durch einen „Spektraloperator“, lässt sich der genannte Sachverhalt auch folgendermaßen ausdrücken: Ein Beleuchtungszustand erweist sich unter Anwendung des Spektraloperators als spektral rein, wenn er Eigenzustand des Spektraloperators ist. Andernfalls zerfällt er in die Summe der Eigenzustände, aus denen er durch Mischung erzeugt werden kann (Rang 2015). Farben bzw. ihre spektralen Verteilungen sind demnach nicht „Bestandteile des Lichts“, sondern Eigenzustände des Spektraloperators.

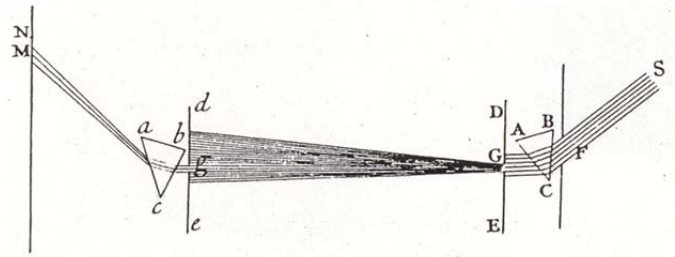


Abb. 6: Newtons *Experimentum crucis* aus *Opticks* Teil I, 6. Versuch (Newton 1704). Aus dem mithilfe des Prismas ABC und der Blende DE auf dem Schirm entworfenen Spektrum selektiert die Blende g einen schmalen Spektralbereich, der durch das zweite Prisma abc auf den Schirm in NM abgebildet wird.

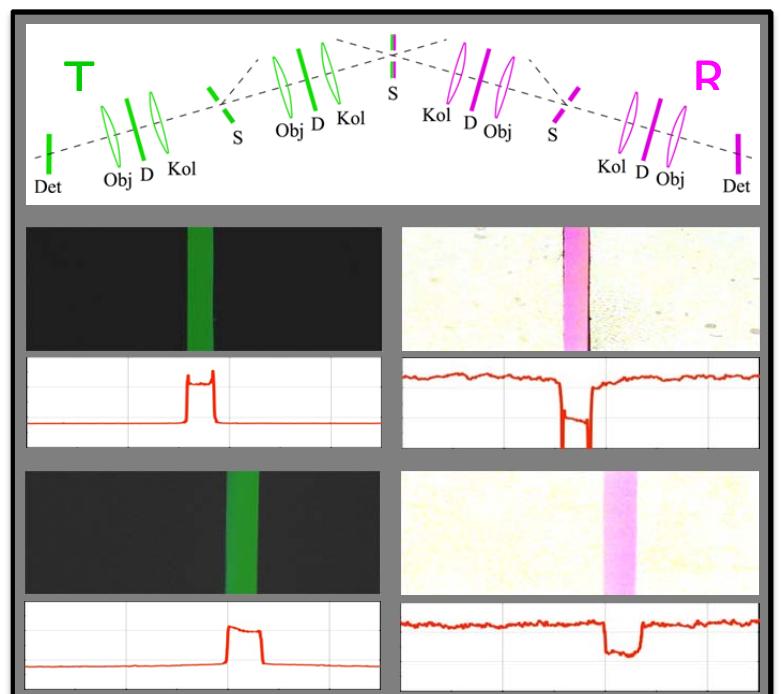


Abb. 7: Oben: Verallgemeinertes *Experimentum crucis* in der Form eines Doppelmonochromators mit spiegelsymmetrischem Transmissions- (T) und Reflexionsstrahlengang (R). Mitte: In den sekundären Spiegelblenden S selektierte monochromatische Spektrenausschnitte mit Intensitätsprofilen. Unten: In den Detektorebenen der beiden nachgeschalteten Monochromatoren zum zweiten Mal dispersierte Spektrenausschnitte, die sich beide annähernd monochromatisch verhalten.

Diese Formulierung als Eigenwertproblem trägt der verallgemeinerbaren Kontextabhängigkeit spektraler Zustände Rechnung: Ob sich ein gegebener Zustand als spektral rein erweist, hängt davon ab, ob er in dem Kontext analysiert wird, in dem er erzeugt wurde (Rang 2015). Zudem lassen sich Missverständnisse vermeiden, die mit den zwar eingängigen, fachlich aber unbefriedigenden Ontologisierungen des weißen Lichts als „zusammengesetzt aus farbigen Lichtern“ verbunden ist; Licht „besteht“ ebenso wenig aus Farben wie ein Vektor aus seinen Komponenten, die von der Wahl der Darstellung abhängen.

Vollständige Inversion und optische Symmetriebeziehungen

Die genannten Experimente erfüllen die Definition komplementärer Zustände lokal, d.h. für die Bereiche der optischen Abbildung (Abb. 8): Blickt man z.B. von der Magentalinie des Stegpektrums in Richtung Lichtquelle, so sieht man dort Magenta und nicht etwa Blau und Rot, wie im Falle der mechanischen Invertierung Goethes (Abb. 3).

In diesem Falle ist die Invertierung beschränkt auf den Bereich der optischen Abbildung. Eine genauere Analyse zeigt, dass diese Beschränkung durch vollständige Invertierung des optischen Gesamttraums aufgehoben werden kann (Rang 2015). Der entsprechende Beweis verlangt neben der Energieerhaltung⁸ auch die Anwendung des Reziprozitätstheorems der Optik, das in einem engen Zusammenhang zur Zeitumkehrbarkeit reversibler Prozesse steht (Potton 2004). Weitere Annahmen sind für den Beweis nicht erforderlich. Für Experimente, die nichtlineare und magnetooptische Elemente einschließen, ist Komplementarität bisher weder experimentell noch theoretisch gezeigt worden.

Die optische Komplementarität erlangt vor diesem Hintergrund eine physikalische Fundierung und Anwendbarkeit, die ihr bisher versagt geblieben ist. Ihr Geltungsbereich beschränkt sich nicht auf prismatische Experimente, sondern umfasst ebenso Phänomene der Streuung, Beugung und Interferenz, solange diese mit absorptionsfreien Elementen realisiert werden können. Dennoch bleibt sie eine Idealisierung, wie dies bei vergleichbaren Beziehungen und insbesondere bei Erhaltungssätzen der Fall ist, da die Annahme nicht-dissipativer Elemente, gerade im Falle von Dispersionselementen, nur beschränkt zulässig ist.

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. 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 Spaltpektrum 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 Teil-

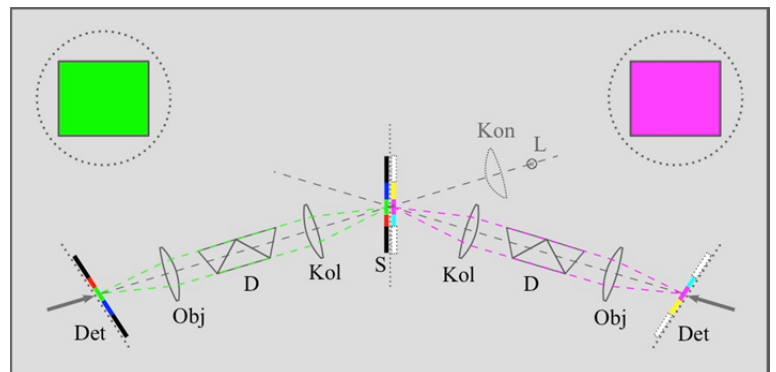


Abb. 8: Spektrometersaufbau aus Abb. 5. Die Spiegelspaltblende S wurde hier durch die virtuellen Spektren des Transmissions- und Reflexionsstrahlengangs ersetzt, die als reelle Bilder in den Detektorebenen (Det) abgebildet werden. Die Insets zeigen die Ansichten eines Beobachters, der aus den Spektren (Pfeile) durch die Objektive (gestrichelte Kreislinien) und Prismen auf die zu Spektren transformierten virtuellen Bilder der Spiegelspaltblende blickt. In beiden Fällen erscheint der als Rechteck gezeichnete Prismenquerschnitt monochromatisch durchleuchtet (vgl. im Unterschied dazu Abb. 3).

⁸ Es ist interessant, dass die Beschreibung eines optischen Systems als konservatives System in der Optik unüblich ist, obgleich sich die Annahme der Abgeschlossenheit eines physikalischen Systems bei der Behandlung von mechanischen oder thermodynamischen Experimenten als außerordentlich erfolgreich erwiesen hat. Die Frage der Komplementarität optischer Spektren legt nahe, dass der Begriff des konservativen Systems auch in der Optik sinnvoll angewendet werden kann.

phänomene *eines* experimentellen Bedingungszusammenhangs. Mit Rücksicht auf die Kontroverse „Goethe contra Newton“, die in der Vergangenheit weitgehend theoretisch geführt wurde, zeigt das Beispiel des von Goethe angeregten und von uns untersuchten Problems der optischen Komplementarität, auf welche Weise die wissenschaftlichen Leistungen Goethes und Newtons produktiv verknüpft werden können.

Literatur

- Böhme, Gernot (1977): Ist Goethes Farbenlehre Wissenschaft? *Studia Leibnitiana* 9(1): 27-54
- Goethe, Johann Wolfgang von (1947-2011): *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. 21 Bde. Im Auftrag der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina begr. v. Karl Lothar Wolf u. Wilhelm Troll. Hg. v. Dorothea Kuhn, Wolf von Engelhardt u. Irmgard Müller. Weimar 1947-2011. Im Folgenden LA abgekürzt.
- Goethe, Johann Wolfgang von (1951): Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt. LA I, Bd. 3: *Beiträge zur Optik und Anfänge der Farbenlehre 1790-1808*. Hg. v. Rupprecht Matthaei. Weimar 1951, S.285-295 oder LA I, 8, S. 305-315; zur Entstehung und Entwicklung vgl. den Kommentar in LA II, 3, S. 311-314 oder LA II, I B, S. 1319-1333
- Goethe, Johann Wolfgang von (1962): Naturwissenschaftliche Hefte. In: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. LA I, Bd. 8, hrsg. von R. Matthaei. Weimar: Böhlau Nachflg., S. 190.
- Goethe, Johann Wolfgang von (1987): Zur Farbenlehre. Widmung, Vorwort und Didaktischer Teil. In: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft*. LA I, Bd. 4, hrsg. von R. Matthaei. 2. Aufl. Weimar: Böhlau Nachflg.
- Holtmark, Torger (1970): Newton's Experimentum Crucis reconsidered. *American Journal of Physics* 38 (10): 1229-1235. Vgl. auch Sällström, Pehr (2010): *Monochromatic Shadow Rays*. Drucktuell, Gerlingen.
- Holtmark, Torger (2012): *Image and Colour. Phenomenology of Visual Experience*. Hg. Von J. Grebe-Ellis. Berlin: Logos
- Kirschmann, August (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.
- Lang, H. (2004): Farbmeterik. In: Niedrig, H. (Hrsg.): *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd 3: Optik. Wellen- und Teilchenoptik. 10. Aufl. Berlin: de Gruyter.
- Mandelartz, Michael (2011): *Goethe, Newton und die Wissenschaftstheorie. Zur Wissenschaftskritik und zur Methodologie der Farbenlehre*. In: Goethe, Kleist. Berlin: Erich Schmidt, S. 240-281.
- Müller, Olaf (2015): *Mehr Licht! Goethe mit Newton im Streit um die Farben*. München: Fischer.
- Newton, Isaac (1672): A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his New Theory about Light and Colors. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 80: 3075-3087, S. 3085.
- Newton, Isaac (1704): *Opticks: Or, a treatise of the Reflexions, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London: Smith & Walford.
- Potton, R. J. (2004): Reciprocity in Optics. *Reports on Progress in Physics*, 67/5: 717-754.
- Rang, Matthias (2009): Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. *Elemente der Naturwissenschaft* 90: 46-79; (2009): Mehrfachanwendung von Spiegelspaltblenden 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.
- Rang, Matthias & Grebe-Ellis, Johannes: Komplementäre Spektren – Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende. *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)* 62 (4): 227-231.
- Rang, Matthias (2015): *Phänomenologie komplementärer Spektren*, Berlin: Logos.
- Rang, Matthias & Grebe-Ellis, Johannes (2017): Power Area Density in Inverse Spectra. Im Druck (*Journal of General Philosophy of Science*).

- Steinle, Friedrich (2002): 'Das Nächste ans Nächste reihen': Goethe, Newton und das Experiment. *Philosophia Naturalis* 39: 141-172.
- Steinle, Friedrich (2004): Exploratives Experimentieren. Charles Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten. *Physik-Journal* 3, Nr. 6: 47-52.
- Steinle, Friedrich (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 Verlag.
- Steinle, Friedrich (2016): Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit. In: Dönike, M., Müller-Tamm, J., Steinle, F. (Hg.): *Die Farben der Klassik*. Göttingen, Wallstein Verlag, S. 255-289.