

# Optische Komplementarität

Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene

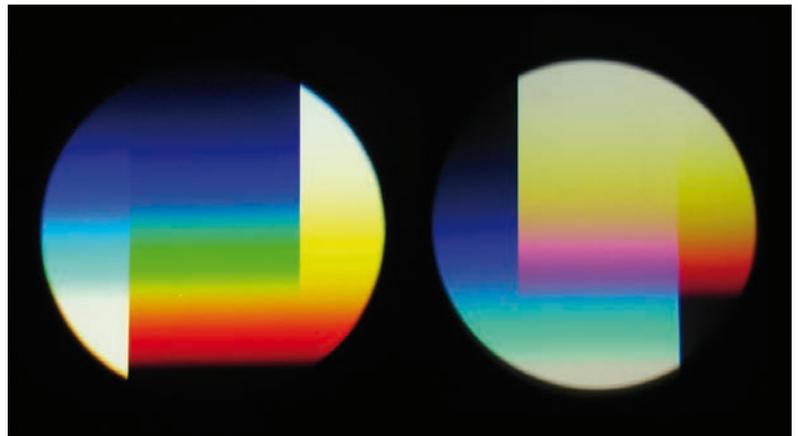
Matthias Rang, Oliver Passon und Johannes Grebe-Ellis

Goethes Blick durch das Prisma bildete den Auftakt für eine Beschreibung optischer Spektren als Komplementärphänomene. Doch was bedeutet Komplementarität für optische Spektren eigentlich? Nach physikalischen Präzisierungen und experimentellen Untersuchungen dieser Frage sucht man in der Literatur vergebens. Unter welchen Bedingungen sich spektrale Zustände als Komplementärzustände darstellen lassen, ist aber auch unabhängig vom historischen Kontext eine interessante Frage.

Newton's optische Experimente gehören bis heute zu den bedeutendsten Errungenschaften der Optik. Das hat Goethe nicht davon abgehalten, in seiner Farbenlehre Newtons Argumentation als einseitig und methodisch irreführend zu bezeichnen. Am Ende seines Lebens relativierte der Dichter sein literarisches Werk gegenüber der Bedeutung, die er seinem Beitrag zur Wissenschaft der Farbe zuerkannt wissen wollte. Doch obwohl sich namhafte Physiker um eine Würdigung Goethes als Wegbereiter einer ganzheitlichen Naturwissenschaft bemüht haben, ließen sie keinen Zweifel daran, dass seine Farbenlehre aus physikalischer Sicht ein hoffnungsloser Fall ist [1].

Doch nur wenige haben die Farbenlehre Goethes gründlich studiert, sein Hinweis auf die Symmetrie spektraler Phänomene blieb unbeachtet, und ernstzunehmende Versuche, die Komplementarität inverser Spektren experimentell zu untersuchen, haben nicht stattgefunden [2]. Was aber besagt Goethes Symmetrieargument? Lässt sich die Symmetrie komplementärfarbiger Spektren so übersetzen, dass die Bedingungen, unter denen die spektralen Zustände eines optischen Systems als „Komplementärzustände“ auftreten, experimentell überprüfbar werden? Eine aktuelle Studie zeigt, dass Komplementarität als Symmetrieeigenschaft inverser optischer Zustände vorliegt, wenn sich das optische System als konservatives System betrachten lässt [3]. Das Konzept des konservativen Systems ist in der Optik unüblich, obwohl sich die Annahme der Abgeschlossenheit eines physikalischen Systems bei mechanischen oder thermodynamischen Experimenten als überaus erfolgreich erwiesen hat.

Goethes Schriften zur Farbenlehre bilden einen mehr als tausendseitigen Werkkomplex, der aus einer über 50 Jahre dauernden Beschäftigung mit dem Thema Farbe hervorgegangen ist.<sup>1)</sup> Ursprünglich auf der



Die komplementären Spektren einer Xenon-Höchstdrucklampe wurden simultan erzeugt mit einer verspiegelten Spaltblende.

Suche nach einer Farbenlehre für Künstler versuchte Goethe, das technische und künstlerische Praxiswissen sowie die weitverzweigten naturwissenschaftlichen Farbforschungen seiner Zeit zu einer umfassenden Farbwissenschaft zusammenzuführen [4]. Das Bild von Goethe als einsamem Newton-Kritiker wird dieser Unternehmung nicht gerecht und durch neuere wissenschaftshistorische Untersuchungen relativiert [5, 6]. Diese zeigen ferner, dass der explorative Stil der Goetheschen Forschungsmethode in der Naturwissenschaft und namentlich der Physik wesentlich verbreiteter war, als zuvor angenommen.

Um exemplarisch Goethes Widerspruch zu verdeutlichen, seien im Folgenden zwei Punkte angerissen, auf die er seine Kritik zugespitzt hat und die Gelegenheit geben, in die Frage nach einer physikalischen Definition der optischen Komplementarität einzuführen. Goethe stellte nicht nur infrage, was Newton mit

1) Die „Farbenlehre“ erschien 1810 in drei Teilen: Im Didaktischen Teil klassifiziert Goethe systematisch verschiedene Klassen von Farbphänomenen. Der Polemische Teil ist der Kritik an Newtons „Opticks“ gewidmet. Der Historische Teil stellt die umfassendste Geschichte der Farbenlehre bis 1800 dar.

## KOMPAKT

- Goethe entdeckte die Komplementarität als Symmetrieeigenschaft spektraler Phänomene.
- Komplementäre und inverse spektrale Zustände folgen aus der Energieerhaltung des optischen Systems.
- Komplementäre Spektren entstehen simultan an einer verspiegelten Spaltblende und bedingen sich funktionell wie Transmission und Reflexion an einem Interferenzfilter.
- Die entsprechenden Experimente stellen symmetrisierte Verallgemeinerungen der Experimente Newtons dar.

Dr. Matthias Rang, Dr. Oliver Passon und Prof. Dr. Johannes Grebe-Ellis, AG Physik und ihre Didaktik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal

der „Zerlegung des Lichts im Prisma“ gezeigt haben wollte, nämlich dass Licht „aus farbigen Lichtern zusammengesetzt“ sei. Er bestritt auch den Anspruch Newtons, die Heterogenität des Lichts experimentell nachgewiesen zu haben. Die Auffassung, eine Theorie lasse sich im Experiment „beweisen“, hielt Goethe 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.“

Newtons Frage nach der Substanz des Lichtes und daraus ableitbaren, quasimechanischen Eigenschaften [7] erschien Goethe spekulativ und aufgrund der Unsichtbarkeit von Licht im Experiment nicht beantwortbar. Er fragte stattdessen nach den *beobachtbaren Bedingungen* der Farbentstehung. Die grundlegendste dieser Bedingungen besteht darin, dass Farben in Form von sog. Kantenspektren stets an optischen Kontrasten, d. h. an Hell-Dunkel-Grenzen entstehen (Abb. 1). 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.

Für Goethe war unerwartet, dass er ein zu Newtons Spektrum symmetrisch entstehendes komplementäres Spektrum fand (Abb. 2). Die abbildungsoptische Identität dieser Spektren veranlasste ihn zu einem Argument, das exemplarisch die empirische Unterbestimmtheit

von Theorien zeigt [2]: 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 er die Rede von zerlegbaren Finsternisstrahlen für ebenso abwegig hielt wie die von zerlegbaren Lichtstrahlen. Von einer Theorie spektraler Phänomene erwartete er, dass diese die beobachtbaren Symmetrieverhältnisse der Phänomene berücksichtigt. Daher beharrte er darauf, dass Farben nur entstehen, wenn Hell und Dunkel zusammenwirken. Newtons Beschränkung auf das Spaltspektrum empfand er als willkürlichen Eingriff in die Empirie mit der Folge, dass eine Klasse von Phänomenen und damit ein fundamentales Strukturmerkmal spektraler Phänomene unterdrückt wird.

Da Goethe Newtons „experimentelle Beweise“ nicht gelten ließ, konnte er für seine eigenen Befunde ebenso wenig Beweiskraft beanspruchen. Dessen war er sich bewusst: „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 [2, 6, 8]. Newtons epistemologische Überzeugungen in den „Opticks“ spiegeln die Forderung der reduktionistischen Naturphilosophie seiner Zeit wider, die Phänomene auf mechanische Ursachen zurückzuführen. Die Geschichte der Optik hat Newton recht gegeben. Zwar ist heute der Einfluss, den Goethes Forschungen auf die Entwicklung technischer, künstlerischer und wissenschaftlicher Aspekte der Farbenlehre gehabt haben, unstrittig. Seine physikalischen Beiträge waren dagegen lange nur von wissenschaftshistorischem und philosophischem Interesse. Sie werden aber zunehmend neu entdeckt [2, 3].

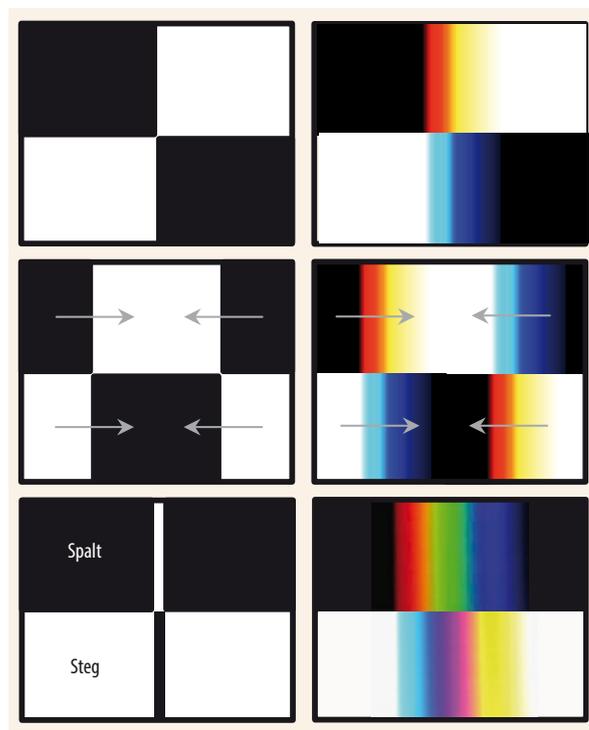
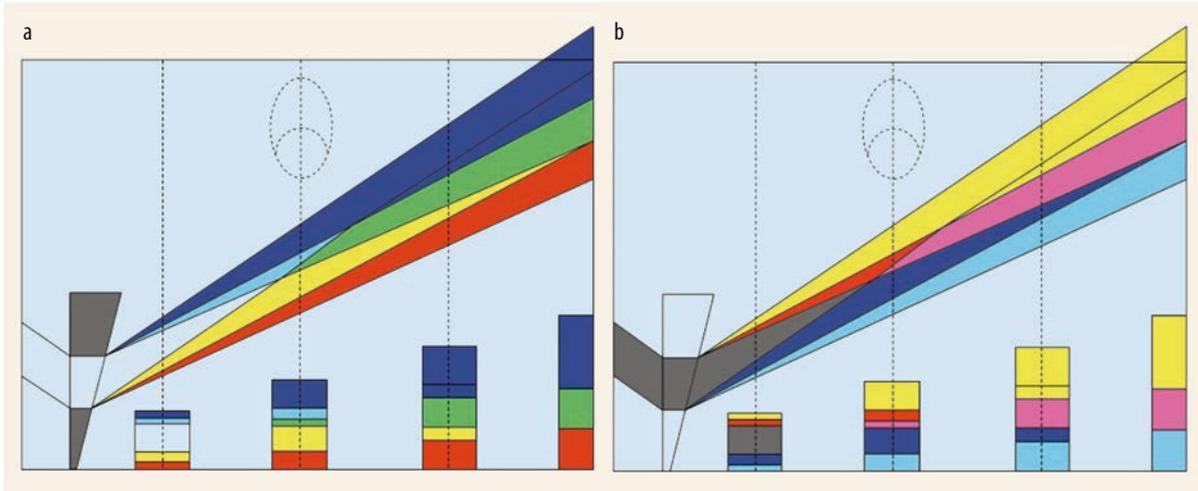


Abb. 1 An den Kontrastgrenzen zwischen Hell und Dunkel (links) erscheinen im Blick durchs Prisma Kantenspektren (rechts: oben und Mitte). Kantenspektren inverser optischer Kontraste sind komplementär. Kombiniert man sie (Mitte, unten), entstehen komplementäre und isomorphe Vollspektren. Das Spaltspektrum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

### Goethes komplementäre Spektren

Goethes Invertierung beruhte auf einer systematischen Umkehrung des optischen Kontrasts unter Invarianz der Abbildungsgeometrie. Er hatte durch Beobachtungen mit dem Prisma entdeckt, dass an inversen optischen Kontrasten komplementäre Farbpaare entstehen (Abb. 1). In der Farbmeterik heißen Paare visueller Farbempfindungen komplementär, deren Farbreizfunktionen sich additiv zu Weiß ergänzen.

Goethe war nach seinen Versuchen überzeugt, dass Komplementarität ein intrinsisches Symmetriemerkmal spektraler Phänomene ist. Die Beziehung sich wechselseitig fordernder und ergänzender Farbpaare war ihm aus seinen Untersuchungen zu farbigen Nachbildern und farbigen Schatten bekannt [9]. In einem Nachtrag zur Farbenlehre schreibt er, „dass ebenso wie Hell und Dunkel auch die Farben sich ihrem Gegensatz nach unmittelbar fordern, so dass, nämlich im Satz



aus [9], Tafel V und VI

**Abb. 2.** Goethes Darstellung der Genese komplementärer Spektren durch sukzessive Überlagerung komplementärer Kantenspektren als Funktion des Abstands vom Prisma. a) zeigt den Fall des Spaltspektrums, b) den symmetrischen Fall des Stegspektrums, bei dem der Spalt durch einen Steg bzw. das Lichtbündel

durch ein Schattenbündel ersetzt ist (mechanische Invertierung).

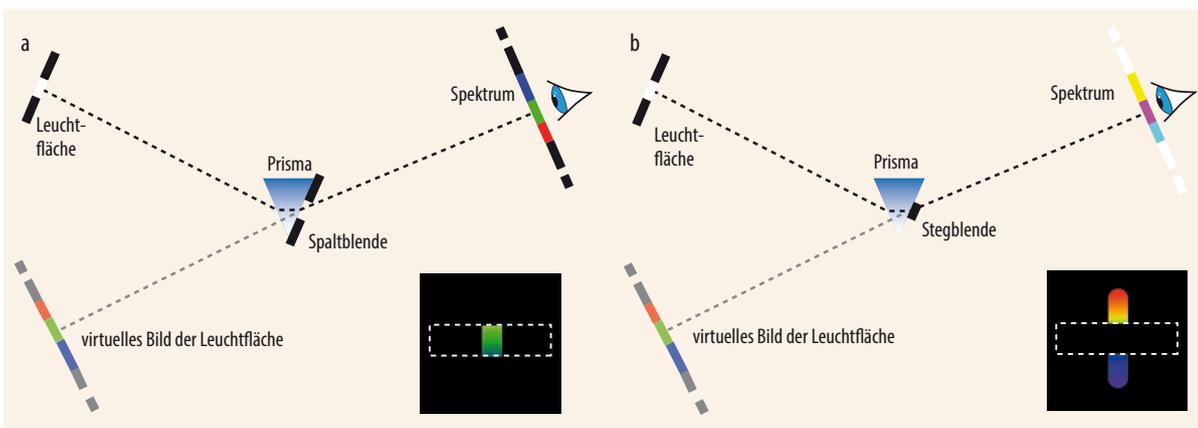
und Gegensatz, alle immer zugleich enthalten sind. Deswegen hat man auch die geforderten Farben *komplementäre* genannt...“ [10].

Um Newtons Grundexperiment zu invertieren, ersetzte Goethe den Spalt durch einen Steg (Abb. 2). Auf den ersten Blick erscheint damit die Komplementarität der Spektren auf Basis inverser Anordnungen auch in Newtons modifiziertem Grundexperiment gegeben zu sein. Eine genauere Analyse zeigt aber, dass das nicht der Fall ist. Untersucht man vom Ort des jeweiligen Spektrums aus die Beleuchtungsbedingungen, zeigt sich sofort, dass die Situation nicht symmetrisch ist (Abb. 3): Bedingt durch die inversen Blenden sieht man 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 Lichtquelle (Abb. 3a), verdeckt der Spalt das Spektrum der Lichtquelle bis auf Grün. Das ist ein Indiz dafür, dass dieses Grün im Durchgang durch ein zweites Prisma erhalten bleibt und damit spektral rein ist. Blickt man dagegen

vom selben Ort im komplementären Spektrum, d. h. vom Magenta des Stegspektrums, in Richtung Lichtquelle (Abb. 3b), sieht man genau denjenigen Teil des Spektrums, der im Fall des Spaltes verdeckt war, d. h. das gesamte Spektrum bis auf Grün, das nun vom Steg verdeckt wird. Das bedeutet aber, dass das Magenta dieses Stegspektrums nicht etwa durch eine magentafarbige (virtuelle) Lichtquelle entsteht, sondern durch additive Mischung aller Spektralfarben bis auf Grün. Daher ist es nicht spektral rein und wird beim Durchgang durch ein zweites Prisma in eben diese Farben wieder zerfallen.

Vor diesem Hintergrund wird klar, dass Goethes Invertierung zwar seine Entdeckung der Symmetrie komplementärer Spektren illustriert (Abb. 2), tatsächlich aber nicht symmetriehaltend ist (Abb. 3). Dies wurde in der Tradition mechanischer Invertierungsversuche nach Goethe nicht erkannt.<sup>2)</sup> Denn die Lösung des Invertierungsproblems gelingt nicht mechanisch, sondern optisch.

2) 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 [11].



**Abb. 3** Experiment zur Projektion des Spektrums einer Leuchfläche mit Spaltblende und Prisma (a). Das Inset zeigt die Ansicht eines Beobachters, der aus dem grünen Bereich des Spektrums

durch das Prisma auf das virtuell abgebildete und zum Spektrum transformierte Leuchflächenbild blickt. In Goethes Invertierung ersetzt eine Stegblende den Spalt (b). Das Inset zeigt die

Ansicht eines Beobachters, der aus dem magentafarbenen Bereich des Spektrums durch das Prisma auf das virtuell abgebildete Leuchflächenbild blickt. Die beiden Ansichten sind nicht komplementär.

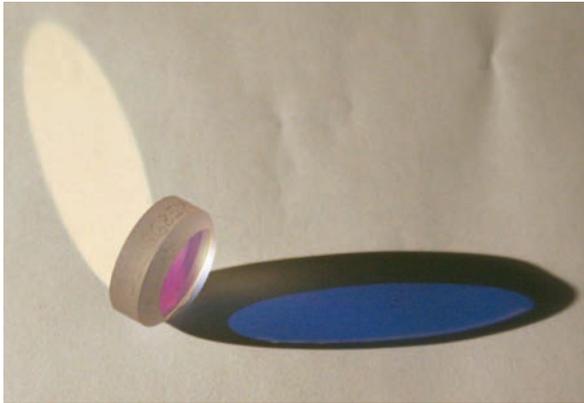


Abb. 4 Der Interferenzfilter erscheint in Transmission blau, seine Reflexion dazu komplementär gelb (links).

### Komplementarität als optisches Konzept

Die Quantenmechanik bezeichnet Observable als komplementär, für die eine Unbestimmtheitsrelation gilt. In der Optik dagegen fehlt eine Definition der Komplementarität. Dies liegt nicht daran, dass sich optische Komplementarität nicht als physikalische Eigenschaft exakt definieren und quantifizieren ließe, sondern hat vermutlich eher historische Gründe. Für eine allgemeine Definition gehen wir von einem absorptionsfreien Interferenzfilter aus, bei dem sich Reflexions- und Transmissionsgrad zu 1 ergänzen:  $\sigma(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$ . Der Filter wirkt als Strahlteiler, der die

einfallende Strahlung einer weißen Lichtquelle in zwei komplementäre Spektralverteilungen zerlegt (Abb. 4). Angewendet auf komplementäre Spektren bedeutet dies, dass sie sich 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. So ergänzen sich beispielsweise inverse Spektren des Natrium-D-Dubletts nicht zu weiß, sondern zu gelb. 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. Unter der zusätzlichen Bedingung einer kontinuierlichen Spektralverteilung, die mindestens den sichtbaren Spektralbereich einschließt, liegt auch Komplementarität vor. Experimente, die diese Bedingungen erfüllen, sind erst in den letzten Jahren realisiert worden [3, 12, 13].

### Inverse Spektroskopie

Wenn die Inversion optischer Spektren aus der Energieerhaltung folgt, könnte man fragen, warum in einem gewöhnlichen Spektroskop keine inversen Spektren zu beobachten sind. Tatsächlich ist dort die Strahlungsenergie nicht erhalten. Zwar kann man dies für den Fall idealisierter Bauteile für den inneren Aufbau zwischen Eintrittsspalt und Detektorfläche näherungsweise annehmen, doch der Eintrittsspalt ist meist eine geschwärtzte Blende, an der ein Großteil der Strahlungsenergie absorbiert wird.

Dient stattdessen eine verspiegelte Spaltblende, an der im Idealfall keine Absorption stattfindet, als Eintrittsspalt, so bleibt im optischen Gesamtsystem die Strahlungsenergie erhalten. Die Bedingungen zur Erzeugung inverser Spektren sind mit dieser „selbstinvertierenden“ Spiegelspaltblende erfüllt: Sie wirkt wie ein Strahlteiler, in dessen Reflexionsstrahlengang der inverse Kontrast zum Spaltbild des Transmissionsstrahlengangs abgebildet wird (Abb. 5) [13, 14]. Ein identischer Aufbau im Reflexionsstrahlengang erzeugt das inverse Spektrum zu dem Spektrum des Transmissionsstrahlengangs. Damit wird eine Klasse spektraler Phänomene sichtbar, die zwar der Möglichkeit nach stets miterzeugt wird, aber durch Absorption im herkömmlichen Aufbau verlorengelht. Die Invertierung des Spalts erfolgt hier also nicht *mechanisch*, sondern *optisch*: Die spiegelnden Blendenteile wirken wie eine Spaltblende aus Licht. Sie erzeugen simultan zum Spalt in Transmission den zum Spalt inversen Blendenkontrast in Reflexion. Die so 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 neben der kontinuierlichen Spektralverteilung und der Energieerhaltung zudem antisymmetrische

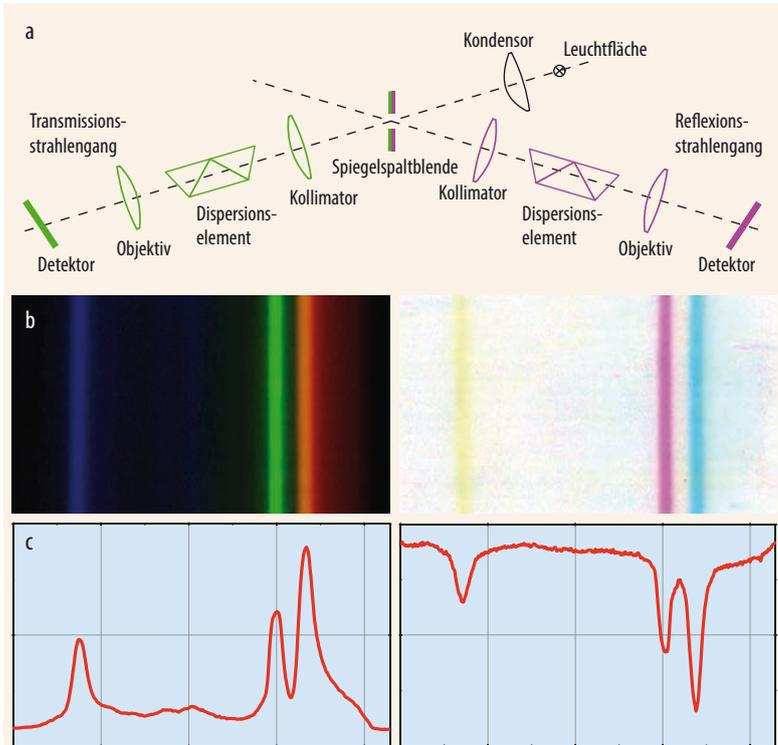
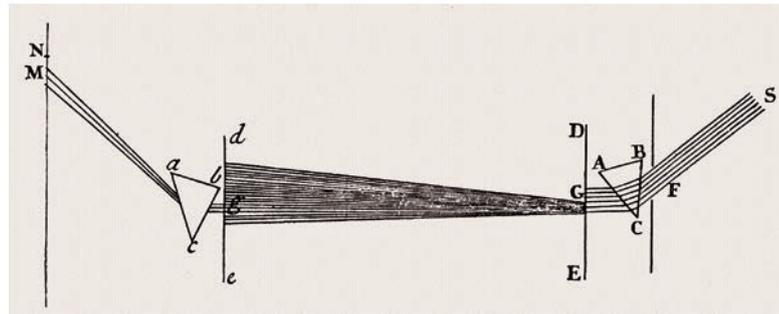


Abb. 5 Die Beleuchtungseinheit im Experiment besteht aus der Leuchfläche und dem Kondensator. Das Spektrometer (a) besitzt eine Spiegelspaltblende, an welcher der Reflexions- und der Transmissionsstrahlengang entstehen. Beide

sind spiegelsymmetrisch zueinander und erlauben es, simultan komplementäre, linienverbreiterte Spektren einer Quecksilberhochdrucklampe zu erzeugen (b, c).



**Abb. 6** Newtons *Experimentum crucis*: Aus dem mittels 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.

Energieverteilungen in den Spektren. 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. 5c). Für die Spektroskopie kann es daher in bestimmten Fällen vorteilhaft sein, beide Spektren simultan zu messen und damit einen Faktor zwei in der spektralen Sensitivität zu gewinnen [3]. Dass sich antisymmetrische Energiedichten inverser Spektren auch außerhalb des sichtbaren Bereichs im nahen IR und UV nachweisen lassen, wurde kürzlich für inverse Spektren einer Xenon-Höchstdrucklampe gezeigt [15].

spiegelte, d. h. annähernd dissipationsfreie Blenden und beleuchtet die sekundäre Blende genauso wie die primäre, erweisen sich auch die Linien des komplementären Spektrums als spektral rein: Der mit der zweiten Blende selektierte Spektralbereich zerfällt nicht, sondern bleibt unzerlegt erhalten, solange 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. 7b, c).

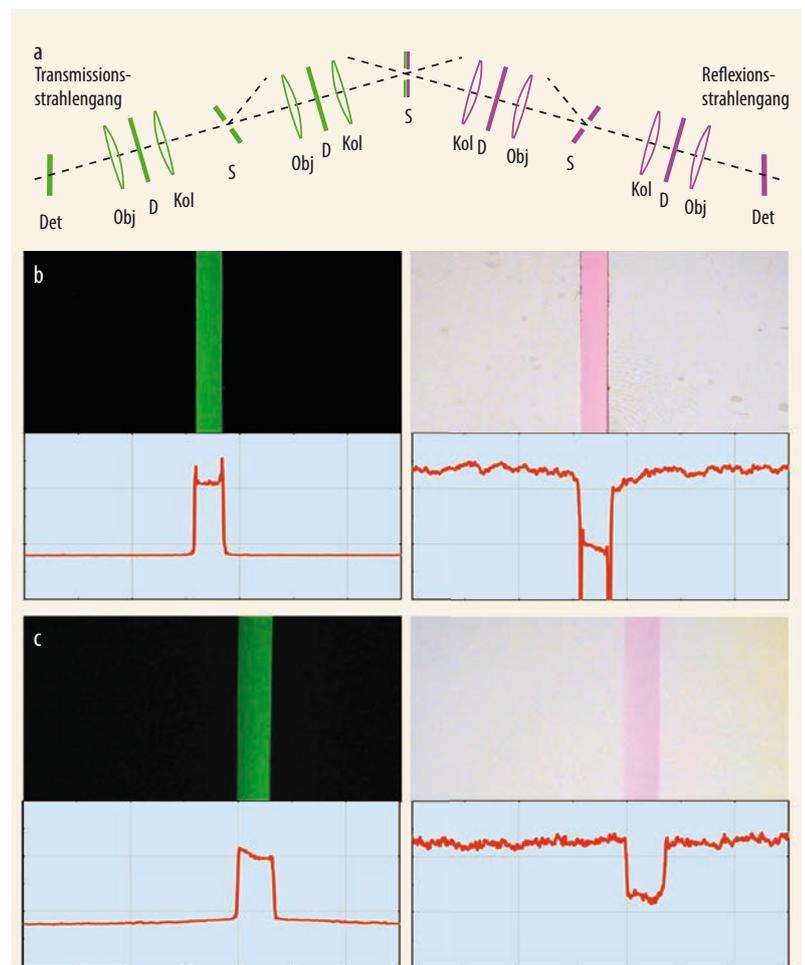
Dieses Ergebnis lässt sich folgendermaßen deuten und verallgemeinern: Wenn Komplementarität eine

### Ein entscheidendes Experiment

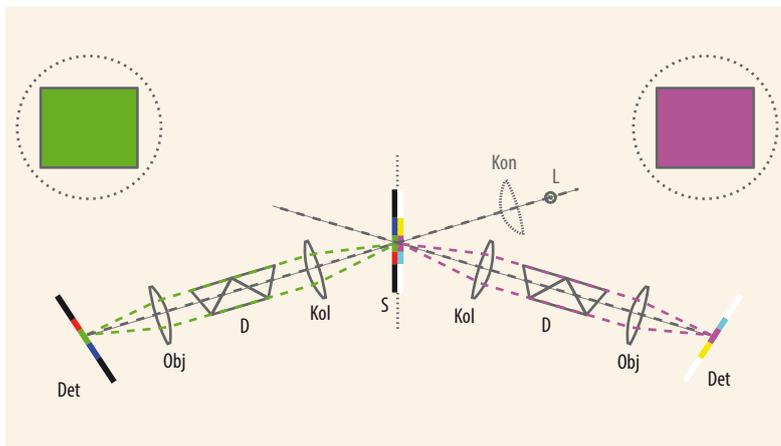
Die antisymmetrischen Spektralprofile erlauben eine interessante Folgerung: Monochromatischen Spektrallinien des gewöhnlichen Spektrums entsprechen „monochromatische“ Linien im komplementären Spektrum. Wie verhalten sich diese inversen Spektrallinien unter wiederholter Dispersion und Abbildung? Experimentell lässt sich dies mit einem entsprechend modifizierten Doppelmonochromator untersuchen, der eine moderne und symmetrisierte Form von Newtons *Experimentum crucis* darstellt.

Newton entwarf dieses Experiment zum Nachweis der Reinheit der Spektralfarben und betrachtete es als Experiment mit besonderer Beweiskraft [16]. Aus dem 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, gilt der selektierte Spektralbereich als spektral rein. Im Unterschied dazu zerfallen die Linien des komplementären Spektrums unter dem Einfluss der zweiten Dispersion in die monochromatischen Bestandteile des Spaltspektrums. Wie sieht nun die strenge Invertierung dieses *Experimentum crucis* aus?

Dem Vorbild Newtons folgend enthält der erste Abschnitt unseres Doppelmonochromators anstelle des Detektors einen Austrittsspalt, der einen Spektralbereich selektiert, bevor dieser im zweiten Abschnitt des Aufbaus erneut durch ein Dispersionselement abgebildet wird (Abb. 7a). Ersetzt man nun die Spaltblenden des Doppelmonochromators durch ver-



**Abb. 7** Das *Experimentum crucis* lässt sich in Form eines Doppelmonochromators mit spiegelsymmetrischem Transmissions- und Reflexionsstrahlengang verallgemeinern (a). In den sekundären Spiegelblenden werden monochromatische Spektrenausschnitte mit Intensitätsprofilen selektiert (b). Die in den Detektorebenen der nachgeschalteten Monochromatoren zum zweiten Mal dispergierten Spektrenausschnitte verhalten sich nahezu monochromatisch (c).



**Abb. 8** Die Spiegelspaltblende S wurde in diesem Spektrometeraufbau 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 durch die Objektive und Prismen auf die zu Spektren transformierten virtuellen Bilder der Spiegelspaltblende blickt. In beiden Fällen erscheint der als Rechteck gezeichnete Prismenquerschnitt monochromatisch durchleuchtet.

Folge der Energieerhaltung ist, sollten komplementäre Zustände in allen weiteren dissipationsfreien Abbildungen – einschließlich der wiederholten Anwendung von dispersiven Elementen – komplementär bleiben. Daraus folgt, dass monochromatische Bereiche beider Spektren unter Anwendung dieser optischen Operationen nicht zerfallen. Bezogen auf ihre Referenzumgebung sind sie also spektral rein. Beschreibt man die Wirkung des dispersiven Elements – bezogen auf eine gegebene Referenzumgebung – durch einen „Spektraloperator“, lässt sich der genannte Sachverhalt folgendermaßen ausdrücken: Ein Beleuchtungszustand erweist sich unter Anwendung des Spektraloperators als spektral rein, wenn er dessen Eigenzustand ist. Andernfalls zerfällt er in die Summe der Eigenzustände, aus denen er durch Mischung erzeugt wird [3]. Farben bzw. ihre spektralen Verteilungen sind demnach nicht „Bestandteile des Lichts“, sondern Eigenzustände des Spektraloperators.

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 [3]. Zudem lassen sich Missverständnisse vermeiden, die mit den fachlich unbefriedigenden Ontologisierungen des weißen Lichts als „zusammengesetzt aus farbigen Lichtern“ verbunden sind. Licht „besteht“ ebenso wenig aus Farben wie ein Vektor aus seinen Komponenten, die von der Wahl der Darstellung abhängen.

### Vollständig invertiert

Die genannten Experimente erfüllen die Definition komplementärer Zustände lokal, d. h. für die Bereiche der optischen Abbildung (**Abb. 8**): Blickt man beispielsweise von der Magentalinie des Stegspektrums

in Richtung Lichtquelle, sieht man dort Magenta und nicht Blau und Rot wie bei der mechanischen Invertierung. In diesem Fall beschränkt sich die Invertierung aber auf den Bereich der optischen Abbildung. Eine genauere Analyse zeigt, dass sich diese Beschränkung aufheben lässt, indem man den optischen Gesamt-raum vollständig invertiert [3]. Der Beweis verlangt neben der Energieerhaltung die Anwendung des Reziprozitätstheorems der Optik [17]. Für Experimente, die nichtlineare und magneto-optische Elemente einschließen, ist Komplementarität noch nicht 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 Experimente mit Prismen, sondern umfasst darüber hinaus Phänomene der Streuung, Beugung und Interferenz, solange diese sich mit absorptionsfreien Elementen realisieren lassen. Dennoch bleibt sie eine Idealisierung, wie dies bei vergleichbaren Beziehungen und insbesondere bei Erhaltungssätzen der Fall ist. Denn die Annahme nicht-dissipativer Elemente ist, gerade im Falle von Dispersionselementen, nur beschränkt zulässig.

### 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 Komplementarität als Symmetrieeigenschaft eines nicht-dissipativen optischen Systems resultiert. Damit gelang es, eine von Goethe entdeckte, aber in der Optik bisher vernachlässigte Eigenschaft spektraler Phänomene nachzuweisen. Die beschriebenen Experimente stellen symmetrisierte Verallgemeinerungen der Experimente Newtons dar. Sie zeigen, 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 so als Teilphänomene *eines* experimentellen Bedingungs-zusammenhangs. Die Kontroverse „Goethe kontra Newton“ wurde in der Vergangenheit meist theoretisch geführt. Das Beispiel der optischen Komplementarität zeigt aber, auf welche Weise sich die wissenschaftlichen Leistungen Goethes und Newtons produktiv verknüpfen lassen.

### Literatur

- [1] W. Heisenberg, in: Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft. Stuttgart, Hirzel (1959); C. F. von Weizsäcker, in: Hamburger Ausgabe, Bd. 13: Naturwissenschaftliche Schriften I,

C. H. Beck, München (1981); *M. Born*, Die Naturwissenschaften **50**, 29 (1963)

[2] *O. Müller*, Mehr Licht! Goethe mit Newton im Streit um die Farben, Fischer, München (2015)

[3] *M. Rang*, Phänomenologie komplementärer Spektren, Logos, Berlin (2015)

[4] *F. Steinle*, in: *M. Dönike, J. Müller-Tamm, F. Steinle* (Hrsg.), Die Farben der Klassik, Wallstein Verlag, Göttingen (2016), S. 255

[5] Siehe z. B. *V. Schüller*, Goethe versus Newton. Zum 250. Geburtstag von J. W. von Goethe. Phys. Blätter, Dezember 1999, S. 62; *W. Heisenberg*, Das Naturbild Goethes und die technischnaturwissenschaftliche Welt, Goethe-Jahrbuch **29**, 27 (1967)

[6] *F. Steinle*, in: *T. Valk* (Hrsg.), Heikle Balancen. Die Weimarer Klassik im Prozess der Moderne, Wallstein Verlag, Göttingen (2014), S. 221

[7] *I. Newton*, Philos. Trans. of the Royal Soc. **80**, 3075 (1672)

[8] *M. Mandelartz*, in: Goethe, Kleist, Erich Schmidt, Berlin (2011), S. 240

[9] *J. W. von Goethe*, in: Goethe, Die Schriften zur Naturwissenschaft. LA I, Bd. 4, hrsg. von *R. Matthaei*, Böhlau Nachflg., Weimar (1987)

[10] *J. W. von Goethe*, in: Goethe, Die Schriften zur Naturwissenschaft. LA I, Bd. 8, hrsg. von *R. Matthaei*, Böhlau Nachflg., Weimar (1962), S. 190

[11] *A. Kirschmann*, Physikalische Zeitschrift XVIII, 195 (1917) und Zeitschrift für Instrumentenkunde XLIV, 173 (1924)

[12] *M. Rang*, Elemente der Naturwissenschaft **90**, 46 (2009); in: *V. Nordmeier, H. Grötzebauch* (Hrsg.): Didaktik der Physik. Frühjahrstagung der DPG in Bochum (2009)

[13] *M. Rang* und *J. Grebe-Ellis*, MNU **62**, 227 (2009)

[14] *T. Holtsmark*, American Journal of Physics **38**, 1229 (1970); *P. Sällström*, Monochromatic Shadow Rays, Drucktuell, Gerlingen (2010)

[15] *M. Rang* und *J. Grebe-Ellis*, Power Area Density in Inverse

Spectra. Eingereicht

[16] *I. Newton*, Opticks, Or, a treatise of the Reflexions, Refractions, Inflections and Colours of Light, Smith & Walford, London (1704)

[17] *R. J. Potton*, Reports on Progress in Physics **67**, 717 (2004)

## DIE AUTOREN

**Matthias Rang** (FV Didaktik der Physik) studierte Physik in Freiburg und Berlin. Nach einem Forschungsaufenthalt an der University of Washington in Seattle promovierte er an der Uni Wuppertal. Seit 2007 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Goetheanum in Dornach (Schweiz).



**Oliver Passon** (FV Didaktik der Physik) studierte Physik, Mathematik, Philosophie und Erziehungswissenschaften an der Uni Wuppertal. Nach seiner Promotion 2002 am CERN war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am FZ Jülich. Er arbeitete fünf Jahre als Lehrer und ist seit 2013 Akademischer Rat der Uni Wuppertal.



**Johannes Grebe-Ellis** (FV Didaktik der Physik) studierte Physik und Philosophie in Tübingen. Nach der Promotion 2005 an der HU Berlin und mehrjähriger Tätigkeit als Lehrer verwaltete er von 2008 bis 2011 eine Professur für Physikdidaktik an der Uni Lüneburg. Seit 2011 ist er Professor an der Uni Wuppertal und leitet seit 2015 den FV Didaktik der Physik.

