

Goethe's Theory of Colors from the Perspective of Modern Physics

Johannes Grebe-Ellis and Oliver Passon

"Of mine they can destroy nothing," writes Goethe in his *Scientific Notebooks* (Hefte *Zur Naturwissenschaft*) of the opponents to his *Farbenlehre*, "for I have built nothing; rather I have sown, and so wide in the world that they cannot taint the seeds."¹ What is the situation today—roughly 200 years later—regarding Goethe's 'optical seeds'? The influence of his color studies on the development of technical, artistic, and scientific aspects of color research up to the present day is undeniable. But what about his physical contributions to color research? Here, the shift in the assessment of Goethe's scientific studies—brought about by Hermann von Helmholtz in the second half of the nineteenth century—and the 'seeds of thought' sown within them are instructive. In his 1892 lecture *Goethe's Premonitions Concerning Coming Natural Scientific Ideas*, Helmholtz revised his judgment from 1853 that claimed the *Farbenlehre* was a 'failure,' and, with a comparison with Faraday and Kirchhoff, gave Goethe a place in the community of physicists.² The case of 'Goethe contra Newton' has since stirred up many minds; there is hardly a scientific controversy about which more has been written.³ The efforts of notable twentieth-century physicists to recognize Goethe as a pioneer of a holistic view of nature do not, however, change the fact that, from the perspective of physics, the *Farbenlehre* was considered to be a settled matter.⁴

This consensus has been called into question in the last few years by new historical, philosophical, and experimental investigations. Against the background of a few remarks on the problematic reception of the *Farbenlehre*, along with an outline of the status of historical and philosophical research, this essay presents the results of experimental research done over the last decade that has led to a new assessment of Goethe's contributions to physics through his *Farbenlehre*.⁵

Newton or Goethe—Who Is Right?

Whoever takes up the topic of Goethe's *Farbenlehre* comes to experience that it is nearly impossible to speak on the strictly physical part of it without at the same time taking a position on the 'Goethe contra Newton' controversy. The question "Who is right?" is valid. This has a long tradition that ultimately goes back to Goethe himself, who, even though he later came to regret it, initiated the debate with his polemic against Newton's *Opticks*. However, the history of the reception of the *Farbenlehre* has shown that an undue emphasis on this question leads to an impasse. From a modern perspective, the suspicion arises that the debate on the *Farbenlehre*, together with its relevance for physical optics, has gone astray because it has remained limited to three positions: 1) "pro Newton," mainly advocated by physi-

1 Anterior introduction (probably early 1815), in LA, Bd. 18, pp. 182–83.

2 See for example Hermann von Helmholtz, "Über Goethes naturwissenschaftliche Arbeiten" (On Goethe's Scientific Works), in *Vorträge und Reden*, vol. 1 (Braunschweig, 1896), pp. 1–40; "Goethes Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen" (Goethe's Premonitions Concerning Coming Natural Scientific Ideas), in *Vorträge und Reden*, vol. 2 (Braunschweig, 1896), pp. 335–61; for the shift in Helmholtz's opinion, see Friedrich Steinle, "'Das Nächste ans Nächste reihen': Goethe, Newton und das Experiment," *Philosophia Naturalis* 39 (2002), pp. 141–72.

3 For the history of the reception of Goethe's *Farbenlehre*, see the relevant commentary in the LA. For further information, see Manfred Wenzel, *Goethe Handbuch: Supplemente 2: Naturwissenschaften* (Stuttgart, 2012). A useful overview is also given in Volkmar Schüller, "Goethe versus Newton. Zum 250. Geburtstag von Johann Wolfgang von Goethe," *Physikalische Blätter* 55 (1999), pp. 62–66.

4 See for example Max Born, "Betrachtungen zur Farbenlehre," *Die Naturwissenschaften* 50 (1963), pp. 29–39; Werner Heisenberg, "Die Goethesche und die Newtonsche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik," in *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft* (Stuttgart, 1959), pp. 85–106; "Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt," *Goethe-Jahrbuch* 29 (1967), pp. 27–42; Arnold Sommerfeld, "Goethes Farbenlehre im Urteile der Zeit," *Deutsche Revue* 42 (1917), pp. 100–06; Carl Friedrich von Weizsäcker, "Einige Begriffe aus Goethes Naturwissenschaft," in *Gesammelte Werke*, vol. 13 (1989), pp. 539–55.

5 Sections of this article have already been published in Johannes Grebe-Ellis "Goethes Farbenlehre im Lichte neuer Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene," in Gernot Böhme, *Goethes Naturwissenschaft: Schriften der Darmstädter Goethe-Gesellschaft*, vol. 7 (2017) pp. 39–58; Matthias Rang et al., "Optische Komplementarität: Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene," *Physik Journal* 16 (2017), pp. 43–49; idem and Matthias Rang, "Power Area Density in Inverse Spectra," *Journal for General Philosophy of Science*, March 2018, <https://doi.org/10.1007/s10838-017-9394-8> (accessed July 20, 2018).

6 Olaf Müller, *Mehr Licht! Goethe mit Newton im Streit um die Farben* (Munich, 2015).

Goethes Farbenlehre aus Sicht der heutigen Physik

Johannes Grebe-Ellis und Oliver Passon

1 Ältere Einleitung (vermutl. Anfang 1815), veröffentlicht in den Naturwissenschaftlichen Heften, 4. Heft des ersten Bandes (1817–1822), in: LA, Bd. 18, S. 182f.

2 Hermann von Helmholtz (1853), »Über Goethes naturwissenschaftliche Arbeiten«, Vortrag vor der Deutschen Gesellschaft in Königsberg, in: *Vorträge und Reden*, Braunschweig 1896. Bd. 1, S. 1–40; ders., »Goethes Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen«, Rede, gehalten in der Generalversammlung der Goethe-Gesellschaft in Weimar, 11. Juni 1892, in: ebd., Bd. 2, S. 335–361. Vgl. auch die Nachzeichnung des Wandels im Urteil von Helmholtz in: Friedrich Steinle, »Das Nächste ans Nächste reihen: Goethe, Newton und das Experiment«, in: *Philosophia Naturalis*, 39, 2002, S. 141–172.

3 Zur Rezeptionsgeschichte der *Farbenlehre* Goethes vgl. die entsprechenden Kommentare in der LA. Vgl. ferner *Goethe Handbuch*, Supplemente 2: Naturwissenschaften, hrsg. von Manfred Wenzel, Stuttgart und Weimar 2012. Einen lesenswerten Überblick gibt Volkmar Schüller: »Goethe versus Newton. Zum 250. Geburtstag von Johann Wolfgang von Goethe«, in: *Physikalische Blätter*, 55, 12, Dezember 1999, S. 62–66.

4 Vgl. z. B. Max Born, »Betrachtungen zur Farbenlehre«, in: *Die Naturwissenschaften*, 50, 2, Januar 1963, S. 29–39; Werner Heisenberg (1941), »Die Goethesche und die Newtonsche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik«, in: ders., *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, Stuttgart 1959, S. 85–106; ders., »Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt«, Vortrag auf der Hauptversammlung der Goethe-Gesellschaft in Weimar am 21. Mai 1967, in: *Goethe-Jahrbuch*, 29, 1967, S. 27–42; Arnold Sommerfeld, »Goethes Farbenlehre im Urteile der Zeit«, in: *Deutsche Revue*, 42, 3, 1917, S. 100–106; Carl Friedrich von Weizsäcker, »Einige Begriffe aus Goethes Naturwissenschaft«, in: HA, Bd. 13, S. 539–555.

5 Einige Teile des vorliegenden Aufsatzes wurden bereits veröffentlicht in: Johannes Grebe-Ellis, »Goethes Farbenlehre im Lichte neuer Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene«, in: Gernot Böhme (Hrsg.), *Goethes Naturwissenschaft (Schriften der Darmstädter Goethe-Gesellschaft, 7)*, Bielefeld 2017, S. 39–58; Johannes Grebe-Ellis u. a., »Optische Komplementarität. Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene«, in: *Physik Journal*,

»Mir aber können sie nichts zerstören«, schreibt Goethe in den Heften *Zur Naturwissenschaft* über die Gegner seiner *Farbenlehre* und fährt fort: »denn ich habe nicht gebaut; aber gesäet habe ich und so weit in die Welt hinaus, dass sie die Saat nicht verderben können [...]«. ¹ Wie ist es heute – rund 200 Jahre später – um die »optische Saat« Goethes bestellt? Der Einfluss, den seine Farbforschungen auf die Entwicklung technischer, künstlerischer und wissenschaftlicher Aspekte der Farbenlehre bis heute gehabt haben, ist unstrittig. Wie steht es aber um die physikalischen Beiträge zur Farbenlehre? Aufschlussreich ist der Wandel, den die Beurteilung der naturwissenschaftlichen Arbeiten Goethes und der in ihnen gesäten »Gedankenkeime« durch Hermann von Helmholtz in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erfahren hat. In seiner Rede von 1892 über *Goethes Vorahnungen kommender naturwissenschaftlicher Ideen* revidierte Helmholtz sein Urteil von 1853 über das »Scheitern« der *Farbenlehre* und nahm Goethe durch den Vergleich mit Faraday und Kirchhoff in die Gemeinschaft der Physiker auf. ² Der Fall »Goethe contra Newton« hat seither viele Gemüter erregt; über kaum eine wissenschaftliche Kontroverse ist mehr geschrieben worden. ³ Die Bemühungen namhafter Physiker des 20. Jahrhunderts um eine Würdigung Goethes als Wegbereiter einer ganzheitlichen Naturanschauung änderten indessen nichts daran, dass die *Farbenlehre* aus physikalischer Sicht als erledigt gilt. ⁴

Dieser Konsens wird seit einigen Jahren durch neuere historische, wissenschaftsphilosophische und experimentelle Untersuchungen infrage gestellt. Vor dem Hintergrund einiger Anmerkungen zur Rezeptionsproblematik und zum Stand der historischen und wissenschaftsphilosophischen Forschung zur *Farbenlehre* werden im Folgenden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen vorgestellt, die in den letzten Jahren zu einer Neubewertung der physikalischen Beiträge Goethes in der *Farbenlehre* geführt haben. ⁵

Goethe, Newton – wer hat Recht?

Wer zum Thema »Goethes Farbenlehre« das Wort ergreift, macht die Erfahrung, dass es nahezu unmöglich ist, über 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?« ist berechtigt. Sie hat eine lange Tradition, und schließlich war es Goethe selbst, der sie mit seiner Polemik gegen die *Opticks* Newtons einführte, auch wenn er dies später bedauerte. Andererseits zeigt die Rezeptionsgeschichte der *Farbenlehre*, dass diese Frage in eine Sackgasse geführt hat. Es entsteht der Eindruck, dass die Debatte über die *Farbenlehre* und ihre Bedeutung für die physikalische Optik deshalb weitgehend unfruchtbar verlaufen ist, weil sie 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

cists; 2) “pro Goethe,” mainly advocated by philosophers; and 3) “both are right,” advocated by philosophical physicists such as Werner Heisenberg and Carl Friedrich von Weizsäcker, who attempted to ‘save’ Goethe by advocating the thesis that the *Farbenlehre* presents a purely subjective, aesthetic view of reality, which can be granted its own domain of validity that is independent of the objective, physical reality described in Newton’s *Opticks*.

If one studies the argumentation of the positions mentioned above, one comes to the surprising conclusion that Olaf Müller, a Berlin-based philosopher of science, emphasizes in the following claim:⁶ Goethe’s *Farbenlehre*⁷ has only been thoroughly studied by a few people, his discovery of the symmetry of spectral phenomena⁸ has been overlooked, and serious experimentation to investigate the complementarity of inverse optical spectra has not been carried out. “It [the *Farbenlehre*] is very hard to communicate, ... for, as you know, it requires not only to be read and studied, but to be done, and this is difficult.” Goethe informed Eckermann a few months before his death.⁹ None of the mentioned physicists have heeded Goethe’s request to not only study the *Farbenlehre* theoretically, but also to test it experimentally—a request that Goethe was justified in making, as he himself had done with respect to Newton’s *Opticks* by carrying out countless experiments over his forty years of color research.

The question of the results that can be obtained by attempting to physically refine Goethe’s argument for symmetry and investigate it experimentally not only provides an escape from the impasse described above; it also leads into an area of research which, by drawing on Goethe’s research method, has led to a series of investigations in the last decade that can be understood as contributions to an image-based or phenomenological exploration of optical phenomena.¹⁰ Experimental developments are also part of this area of research and will be described below.

Goethe’s Method in the Context of His Time

“Goethe’s color research can hardly be understood from the perspective of the history of science if it is not taken seriously as a whole and placed in the context of its time.” In the 2016 study¹¹ *Goethe and the Color Research of his Time (Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit)*, Friedrich Steinle, a historian of science in Berlin, points out the astonishing fact that so far hardly anyone has taken Goethe’s aspiration seriously to contribute to the science of his time with his theory of colors. “To this day,” remarks Steinle, “we are lacking a picture of how Goethe’s *Farbenlehre* from 1810 is to be evaluated in the context of contemporary color research.”

On the basis of an investigation spanning many years into the status of color research at the end of the eighteenth century, Steinle comes to the conclusion that Goethe’s work in the field of color appears “in no way as an exotic undertaking”; rather it “is situated squarely within the research questions of its time.” Steinle shows that Goethe had taken up the most important strands of contemporary research and had convincingly and successfully further developed a number of them. It would

7 The work consists of three parts: the *Didactic Part* comprises 920 paragraphs in which Goethe undertakes a systematic arrangement of diverse classes of chromatic phenomena. The *Polemic Part* is dedicated to a critique of Newton’s *Opticks*; in 680 paragraphs Goethe presents his critical commentary and documents the results of his analysis of Newton’s experiments. The *Historical Part* is still the most comprehensive history of thought and research on color since 1800.

8 From his research on ‘colored after-images’ (successive contrast) and the phenomenon of ‘colored shadows’ (chromatic adaptation), Goethe was already aware of the relation of complementary color pairs. In this context, he spoke of “opposing” (entgegengesetzt) and “mutually demanding” colors (wechselweise sich fordernd), and characterized the relationship between a color and its opposite color (Gegenfarbe) as a “totality” (*Didactic Part*, §§ 48–80). In connection with a key insight (“prismatic aperçu”) in May 1791, described at the end of the *Historical Part* of the *Farbenlehre* under the title *Confession of the Author*, Goethe discovered that the principle of ‘complementary color’ could also be found in the context of ‘prismatic colors’ (ibid., §§ 195–247, 309–40). See the system of Goethe’s subjective and objective experiments with optical contrasts in the second section of the *Didactic Part (Physical Colors)* and their summary in the fourth section (*General Introspective Observations*). LA I, vol. 4. In a supplement to the *Farbenlehre* in the first notebook of the fourth volume of the *Scientific Notebooks* (1817–22), under the title *Complementary Colors (Komplementäre Farben)*, Goethe notes that “just as with light and darkness, so too do colors immediately demand their opposite, so that, namely in thesis and antithesis, all are always contained. Therefore, the demanded color has been called complementary ...” LA I, vol. 8, p. 190. In modern colorimetry, pairs of visual color sensations are named ‘compensative’ when they lie on a line that passes through the achromatic point of the CIE chromaticity diagram and their additive mixture is achromatic. On the other hand, color pairs are named ‘complementary’ when their color stimulus functions can be added to yield white. Complementary colors are therefore always compensative, but that does not hold for the reverse. Moreover, complementary colors must be distinguished from contrast colors, which, as color and opposite color, appear in the context of optical contrast perception and chromatic adaptation, and whose relation depends on the fact that they mutually ‘demand’ each other in the act of perception. There are, nevertheless, indications that additive-mixing complementary colors become more like contrast colors when desaturated (such as with the Abney effect and Bezold-Brücke effect). See for example Sebastian Hümbert-Schnurr, *Farbe im Spannungsfeld zwischen Wahrnehmung und Messung* (Berlin, 2018).

16, 3, März 2017, S. 43–49; ders. und Matthias Rang, »Power Area Density in Inverse Spectra«, *Journal for General Philosophy of Science*, März 2018, <https://doi.org/10.1007/s10838-017-9394-8> (Stand: 20.07.2018).

⁶ Olaf L. Müller, *Mehr Licht. Goethe mit Newton im Streit um die Farben*, München 2015.

⁷ Das Werk besteht aus drei Teilen: 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 *Opticks* gewidmet; Goethe legt in 680 Paragraphen seine kritische Lektüre vor und dokumentiert die Ergebnisse seiner Analyse der Experimente Newtons. Der *Historische Teil* stellt die bis heute umfassendste Geschichte der Farbenlehre bis 1800 dar.

⁸ Aus seinen Untersuchungen zu »farbigen Nachbildern« (Sukzessivkontrast) und zum Phänomen des »farbigen Schattens« (chromatische Adaption) war Goethe die Beziehung sich ergänzender Farbpaares bereits bekannt. Er spricht in diesem Zusammenhang von »entgegengesetzten« bzw. sich »wechselweise fordernden« Farben und charakterisiert die Beziehung zwischen Farbe und Gegenfarbe als »Totalität« (*Didaktischer Teil*, §§ 48–80). 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 Schlüsselerebnis (»Prismenaperçu«) im Mai 1791, das er am Ende der *Geschichte der Farbenlehre* unter dem Titel *Konfession des Verfassers* beschreibt. Vgl. die Systematik der subjektiven und objektiven Experimente Goethes an entgegengesetzten optischen Kontrasten in der 2. Abteilung des *Didaktischen Teils (Physische Farben)* sowie deren Zusammenfassung in der 4. Abteilung (*Allgemeine Ansichten nach innen*), LA, Bd. I 4. In einem *Komplementäre Farben* überschriebenen Nachtrag zur *Farbenlehre* im ersten Heft des 4. Bandes der *Naturwissenschaftlichen Hefte* (1817–1822) fasst Goethe 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 [sic!] genannt [...]«. LA, Bd. I 8, S. 190. – In der heutigen Farbmeterik werden Paare visueller Farbempfindungen als »kompensativ« bezeichnet, die sich in der CIE-Normtafel auf einer Geraden durch den Unbuntpunkt gegenüber liegen und aus denen man additiv Unbunt ermiscen kann. Im Unterschied dazu bezeichnet man Farbpaares als »komplementär«, wenn sich ihre Farbreizfunktionen additiv zu Weiß ergänzen. Komplementärfarben sind also stets auch kompensativ, aber nicht umgekehrt. Ferner sind Komplementärfarben von Kontrastfarben zu unterscheiden, die als Farben und Gegenfarben im Kontext der optischen Kontrastwahrnehmung und chromatischen Adaption auftreten.

Physikern wie zum Beispiel Werner Heisenberg oder Carl Friedrich von Weizsäcker, die Goethe zu »retten« versuchten, indem sie die These vertraten, die *Farbenlehre* handele 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.

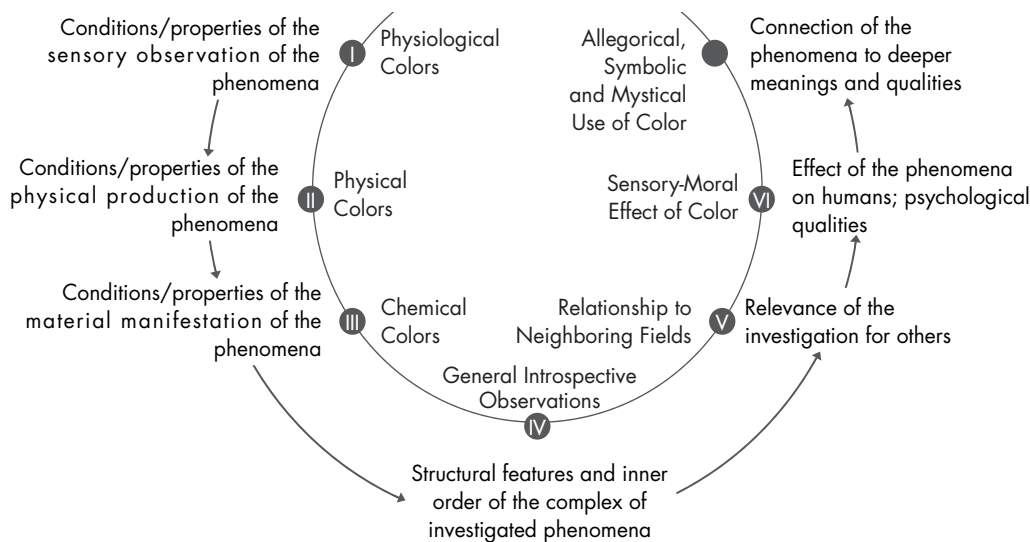
Studiert man die Begründungen der genannten Positionen, gelangt man zu einem überraschenden Ergebnis, das der Berliner Wissenschaftsphilosoph Olaf Müller auf die Feststellung⁶ zuspitzt: Die *Farbenlehre*⁷ Goethes wurde nur von wenigen gründlich studiert, Goethes Entdeckung⁸ der Symmetrie spektraler Phänomene blieb unbeachtet, und erst zu nehmende Versuche, die Komplementarität inverser optischer Spektren experimentell zu untersuchen, haben nicht stattgefunden. »Sie [die *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.⁹ Keiner der genannten Physiker ist der Aufforderung Goethes gefolgt, 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 40 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 die Anknüpfung an die Forschungsmethode Goethes in den letzten Jahrzehnten zu einer Reihe von Arbeiten geführt hat, die sich als Beiträge zu einer bildoptischen beziehungsweise phänomenologischen Erschließung optischer Phänomene verstehen.¹⁰ Diesem Forschungsfeld sind auch die experimentellen Entwicklungen zuzurechnen, von denen weiter unten berichtet wird.

Goethes Arbeitsweise im Kontext seiner Zeit

»Goethes Farbenforschung kann wissenschaftshistorisch nicht verstanden werden, ohne dass sie in ihrer Breite ernst genommen und in den Kontext ihrer Zeit gesetzt wird.« In einer Studie¹¹ von 2016 über *Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit* verweist der Berliner Wissenschaftshistoriker Friedrich Steinle auf die erstaunliche Tatsache, dass in der umfangreichen Forschungsliteratur zu Goethes *Farbenlehre* bisher kaum jemand Goethes Anspruch ernst genommen hat, mit seiner *Farbenlehre* einen Beitrag zur Wissenschaft seiner Zeit zu liefern. »Bis heute«, so Steinle, »fehlt uns ein Bild davon, wie Goethes *Farbenlehre* von 1810 in der zeitgenössischen Farbenforschung einzuschätzen ist«.

Auf der Grundlage langjähriger Untersuchungen zur Situation der Farbenforschung am Ende des 18. Jahrhunderts kommt Steinle zu dem Ergebnis, dass sich Goethes Arbeit auf dem Feld der *Farbenlehre* »keinesfalls als exotische Unternehmung, sondern als mitten in den Forschungsfragen seiner Zeit befindlich darstellt«. Steinle kann zeigen, dass Goethe die wichtigsten Stränge der zeitgenössischen Forschung aufgegriffen und in mehreren Bereichen überzeugend und erfolgreich weitergeführt hat. Offenbar ging es Goethe bei der Konzep-



1 The structure of the *Didactic Part* of the *Farbenlehre* as an outline of a genetic, multiperspective approach to research. Inner part: The six sections of the *Didactic Part* with the addition of Rang and Kühl's suggested section *Allegorical, Symbolic and Mystical Use of Color*. Outer part: Generalized formulation of the respective research perspective based on Rang and Kühl (2014, pp. 162–63).

appear that Goethe, in conceiving his *Farbenlehre*, was attempting nothing less than to bring the technical and artistic practical knowledge and the extensive scientific color research of his time “under an encompassing approach that unified all the individual areas under a single principle.”¹² In view of this primary goal, “the polemical dispute with the dominant physical theories of light and color” was of secondary importance, a means to an end. To bring color in its relation to the eye, as the result of physical conditions and a property of bodies, “under a common principle, which is most prominently expressed in the color circle, was his central intention¹³—far more important than the polemic” (see figure 1).

A further aspect of Goethe's scientific research that, even though it has been partly investigated, has so far scarcely been viewed in a historical context: it is his own research method. In connection with his chromatic studies, Goethe develops his own reflections on phenomena, theories, and experimentation, i.e., the way that theoretical conclusions are drawn from observations and experiments. The methodological writings that appear in this context show that he had greater concerns than just critically reflecting on his own methodology and demarcating it from Newton's. They present an outline of a general method of experimental research, which contains considerations that are still relevant today on the conditions and possibilities for acquiring knowledge based on experimental data.¹⁴

How Goethe's philosophical reflections relate to his own scientific practice and fit into the historical context of the French Enlightenment has been investigated by Steinle in the comprehensive study “*Experience of a Higher Kind*”: *Goethe, Experimental Method and the French Enlightenment* (“*Erfahrung der höhern Art*”: *Goethe, die experimentelle Methode und die französische Aufklärung*).¹⁵ On the basis of Goethe's key methodological text *The Experiment as Mediator between Object and Subject*, Steinle reconstructs Goethe's epistemological critique of stand-

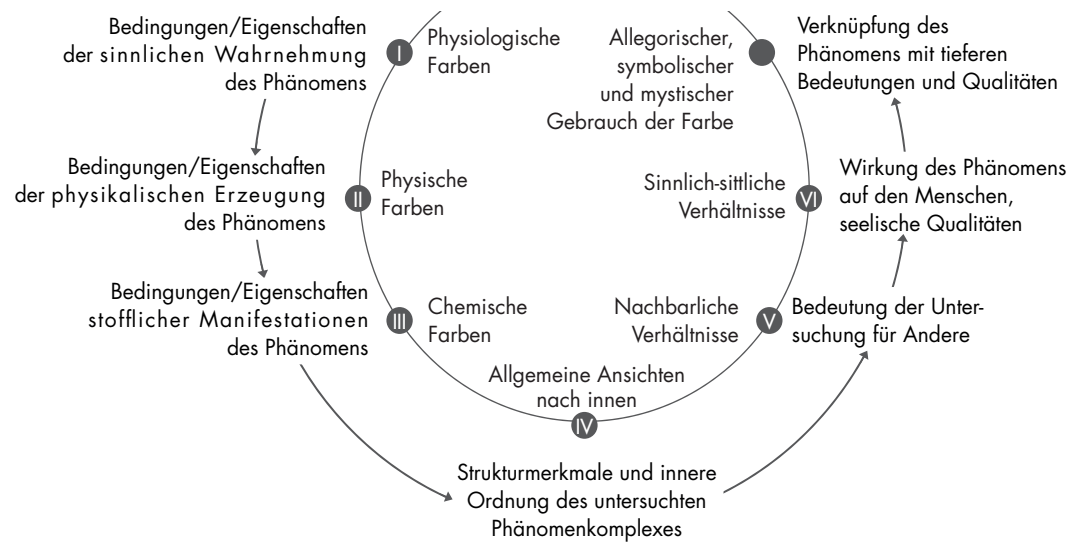
9 *Conversations of Goethe with Eckermann and Soret*, trans. John Oxenford (London, 1850), vol. 2, p. 410.

10 See for example the contributions to phenomenological optics in the book series *Phänomenologie in der Naturwissenschaft* (Berlin). This draws upon, among others, Gernot Böhme's concept of the “phenomenology of nature” as found in “Ist Goethes *Farbenlehre* Wissenschaft?” *Studia Leibnitiana* 9 (1977), pp. 27–54; Böhme and Gregor Schiemann, *Phänomenologie der Natur* (Berlin, 1997); see also the ‘image optical’ writings of Georg Maier, who explicitly builds on Rudolf Steiner's studies of Goethe in Maier, *Optik der Bilder* (Dürna, 1986); Maier, *blicken – sehen – schauen*, ed. Johannes Grebe-Ellis (Dürna 2004).

11 Friedrich Steinle, “Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit,” in *Die Farben der Klassik*, ed. Martin Dönike et al. (Göttingen, 2016), pp. 255–89.

12 In an investigation of the structure of the *Didactic Part* of the *Farbenlehre*, Rang und Kühl have shown that the order of its six sections is not arbitrarily chosen, but rather follows a compositional principle that was called a “model for physical research” by Schiller in a letter to Goethe, and can be understood as a generalizable program of an interdisciplinary, multi-perspective approach to research. See Johannes Kühl and Matthias Rang, “ein Muster..., wie man physikalische Forschung behandeln soll...,” *Elemente der Naturwissenschaft* 100 (2014), pp. 152–71. In this connection, it is interesting that, as a text from 1793 with the title *A Few General Propositions* (*Einige allgemeine Sätze*) demonstrates, Goethe originally had the idea of involving “a community of diverse men” in his *Farbenlehre* by working with various specific areas of research—

1 Der Aufbau des *Didaktischen Teils der Farbenlehre* als Entwurf eines genetisch angelegten, multiperspektivischen Forschungsansatzes. Innen: Die sechs Abteilungen des Didaktischen Teils, ergänzt nach einem Vorschlag von Rang und Kühl durch den Abschnitt *Allegorischer, symbolischer und mystischer Gebrauch der Farbe*. Außen: Verallgemeinerte Formulierung der jeweiligen Forschungsperspektive, angelehnt an Rang und Kühl (2014, S. 162 f.).



ten und deren Beziehung darauf beruht, dass sie sich im Sehakt gegenseitig »fordern«. Es gibt allerdings Hinweise darauf, dass die additiv mischenden Komplementärfarben unter Entsättigung den Kontrastfarben ähnlicher werden (Abney-Effekt und Bezold-Brücke-Effekt), vgl. Sebastian Hübner-Schnurr, *Farbe im Spannungsfeld zwischen Wahrnehmung und Messung*, Berlin 2018.

9 Johann Peter Eckermann, *Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens 1823-1832*, Gespräch vom 21. Dezember 1831, FA, Bd. 39, S. 490 ff.

10 Vgl. z. B. die Beiträge zur Phänomenologischen Optik in der Buchreihe *Phänomenologie in der Naturwissenschaft*, die ihr programmatisches Selbstverständnis u. a. auf Gernot Böhmes Konzept der »Phänomenologie der Natur« bezieht: Gernot Böhme, »Ist Goethes Farbenlehre Wissenschaft?«, in: *Studia Leibnitiana*, 9, 1, 1977, S. 27–54; ders. und Gregor Schiemann (Hrsg.), *Phänomenologie der Natur*, Berlin 1997. Vgl. ferner die bildoptischen Schriften Georg Maiers, der explizit an Rudolf Steiners Goethe-Arbeiten anknüpft: Georg Maier, *Optik der Bilder*, Dürna 1986; ders., *blicken – sehen – schauen*, hrsg. von Johannes Grebe-Ellis, Dürna 2004.

11 Friedrich Steinle, »Goethe und die Farbenforschung seiner Zeit«, in: *Die Farben der Klassik (Schriftenreihe des Zentrums für Klassikforschung, 3)*, hrsg. von Martin Dönike u. a., Göttingen 2016, S. 255–289.

12 Rang und Kühl haben in einer strukturellen Untersuchung zum Aufbau des *Didaktischen Teils der Farbenlehre* gezeigt, dass die Anordnung der sechs Abteilungen nicht willkürlich gewählt ist, sondern einem Kompositionsprinzip folgt, das von Schiller in einem Brief an Goethe als »Muster physikalischer

tion der *Farbenlehre* um nichts Geringeres als den Versuch, das technische und künstlerische Praxiswissen sowie die weitverzweigten naturwissenschaftlichen Farbforschungen seiner Zeit »zu einem umfassenden, alle einzelnen Bereiche unter einem gemeinsamen Prinzip vereinigenden Ansatz¹² zusammenzubinden«. In Hinblick auf dieses übergeordnete Ziel war »die polemische Auseinandersetzung mit der vorherrschenden physikalischen Licht- und Farbentheorie« von untergeordneter Bedeutung, nur Mittel zum Zweck. Farbe in ihrer Beziehung zum Auge, als Folge physikalischer Bedingungen und als Eigenschaft von Körpern »unter ein gemeinsames Prinzip zu stellen, das im Farbkreis seinen markantesten Ausdruck fand, war ihm das zentrale Anliegen¹³ – weit wichtiger als die Polemik« (vgl. Abb. 1).

Ein weiterer Aspekt der naturwissenschaftlichen Forschung Goethes, der zwar punktuell untersucht, bisher aber kaum im historischen Kontext betrachtet wurde, betrifft seine eigene Forschungsmethode. Im Zusammenhang mit seinen Farbstudien entwickelte Goethe eigene Überlegungen zum Verhältnis von Phänomen, Theorie und Experiment, das heißt zu der Art und Weise, wie aus Beobachtungen und Experimenten theoretische Schlussfolgerungen gezogen werden. Die methodischen Schriften, die in diesem Zusammenhang entstanden, zeigen, dass es ihm dabei um mehr ging, als nur die eigene Arbeitspraxis kritisch zu reflektieren und gegen das Vorgehen Newtons abzugrenzen. Sie stellen den Entwurf einer allgemeinen Methodik der Experimentalforschung dar, die auch heute noch gültige Überlegungen zu den Bedingungen und Möglichkeiten der Erkenntnisgewinnung auf der Basis experimentell gewonnener Daten enthält.¹⁴

Wie sich diese wissenschaftstheoretischen Überlegungen Goethes zu seiner eigenen Forschungspraxis verhalten und sich in den historischen Kontext der französischen Aufklärung einfügen, ist von Steinle in einer umfassenden Studie von 2014 über »*Erfahrung der höhern Art*« – *Goethe, die experimentelle Methode und die französische Aufklärung* untersucht worden.¹⁵ Auf der Grundlage des methodischen Schlüsseltextes *Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt* rekonstruiert Steinle Goethes epistemologische Kritik am

alone experiments and sketches a method of “manifolding” them through the systematic variation of the parameters in the experimental setup: “According to Goethe’s general thesis, the basis for theorizing first appears in the form of a series of experiments adjacent to one another.” For it is only in varying the individual observations that the functional relations of an observational context can become visible. This leads, following the example of the “mathematical method,”¹⁶ to a kind of experience composed of many others, which Goethe therefore called “an experience of a higher kind.” Only this “experience of a higher kind,” which Goethe also sometimes referred to as “pure phenomenon” or “archetypal phenomenon,” can present the basis of empirical rules and generalizing conclusions. By drawing a connection¹⁷ to the French encyclopedists d’Alembert and Diderot, Steinle was able to show that Goethe’s methodological considerations are “in no way as exotic as sometimes presented.” Regarding considerations of this kind, the question of whether there were, in addition to the editors of the *Encyclopédie*, other parallels or possible exemplars cannot be conclusively answered at present. However, it is already “clear that Goethe, with his reflections on experimental practice and reasoning, was employing a practice that is encountered far more widely in science than has been assumed so far, and therefore deserves a prominent place in a yet to be written history of the philosophy of experiment.”

New Experiments Confirming the Symmetry of Spectral Phenomena

In view of new historical and philosophical investigations on Goethe’s *Farbenlehre*, let us return to the initial question of how the ‘optical seeds’ fare today from the perspective of modern physics. The answer is given by experimental developments that have been elaborated in the last ten years by the physicist Matthias Rang.¹⁸ These developments relate to Goethe’s investigations in the third section of the *Didactic Part*,—the more strictly physical part of the *Farbenlehre*—which was the most important part for Goethe, and which also suffered the harshest rejection by physicists. Using technical optics, Rang shows how the unity of complementary spectral phenomena, which was discovered by Goethe but remained neglected in optics, can be framed in terms of physics and demonstrated to be a fundamental condition of these phenomena.

The results of Rang’s experiments can be summarized as follows: Goethe discovered complementarity as a symmetric property of spectral phenomena. According to modern physics, complementary and inverse spectral states result from the conservation of energy of the optical system. Complementary spectra arise simultaneously from a mirrored slit aperture and are functionally dependent on each other, like with the transmission and reflection of a filter. The experiments represent symmetrical extensions and generalizations of Newton’s experiments.

How did Goethe arrive at the idea of the symmetry of spectral phenomena? He searched for the observable conditions for the appearance of color. For him, the most fundamental of these conditions seemed to be that color only appears at

today one would say, forming a scientific research cooperation. He had in mind a chemist, physicist, mathematician, engineer, natural historian, painter, historian, critic, anatomist, and philosopher (LA I, vol. 3, pp. 130–36).

13 This enumeration refers to the first four sections of the *Didactic Part*: 1) *Psychological Colors*, 2) *Physical Colors*, 3) *Chemical Colors*, 4) *General Introspective Observations*.

14 Beside dispersed methodological remarks in *Contributions to Optics (Beiträge zur Optik)* from 1791–92 and in the *Farbenlehre* from 1810, two articles in particular are worth mentioning as key philosophical texts: first, *The Experiment as Mediator between Object and Subject (Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt)*, *Naturwissenschaftliche Hefte* (1792), LA, vol. I 8, pp. 305–15; second, *The Pure Phenomenon (Das reine Phänomen)* (1798), LA, vol. I 3, pp. 306–08, or LA, vol. I 11, pp. 39–40. For Goethe’s understanding of science, see also Rudolf Steiner, *Nature’s Open Secret: Introductions to Goethe’s Scientific Writings* (New York, 1910). This volume contains introductions and commentary on Goethe’s scientific writings, as edited by Steiner 1884–97, in the context of the Kürschner-Ausgabe. See especially Chapter XVI: “Goethe As Thinker and Researcher.” See Michael Mandelartz, “Goethe, Newton und die Wissenschaftstheorie: Zur Wissenschaftskritik und zur Methodologie der Farbenlehre,” in *Goethe, Kleist* (Berlin, 2011), pp. 240–81.

15 Friedrich Steinle, “‘Erfahrung der höhern Art’: Goethe, die experimentelle Methode und die französische Aufklärung,” in *Heikle Balancen: Die Weimarer Klassik im Prozess der Moderne*, ed. Thorsten Valk (Göttingen, 2014), pp. 221–49; see also Friedrich Steinle, “‘Das Nächste ans Nächste reihen’: Goethe, Newton und das Experiment,” *Philosophia Naturalis* 39 (2002), pp. 141–72.

16 In the aforementioned article *The Experiment as Mediator between Object and Subject*, one finds, “From the mathematician we must learn the meticulous care required to connect things in unbroken succession, or rather, to derive things step by step. Even where we do not venture to apply mathematics we must always work as though we had to satisfy the strictest of geometers. In the mathematical method (emphasis added by Johannes Grebe-Ellis) we find an approach which by its deliberate and pure nature instantly exposes every leap in an assertion”: Douglas Miller, *Scientific Studies* (New York, 1988), p. 16. See also “Relationship to Mathematics,” *Didactic Part* §§ 722–29; Wolfgang Krohn, “Goethes Versuch über den Versuch,” in *Goethe und die Verzeitlichung der Natur*, ed. Peter Matussek (Munich, 1998), pp. 399–413.

17 In an 1826 text from the archive, *On Mathematics and its Abuse*, Goethe cites d’Alembert from the *Encyclopédie*, and thus he himself gives an indication of the methodical parallels between his

Forschung« bezeichnet wurde und das sich als verallgemeinerbares Programm eines interdisziplinären und multiperspektiven Forschungsansatzes lesen lässt. Vgl. Johannes Kühl und Matthias Rang, »ein Muster..., wie man physikalische Forschung behandeln soll...« Eine Betrachtung zum »goetheanistischen Vorgehen in der Physik am Beispiel von Goethes Farbenlehre«, in: *Elemente der Naturwissenschaft*, 100, 2014, S. 152–172. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass Goethe, wie ein mit *Einige allgemeine Sätze* überschriebener Text von 1793 belegt, ursprünglich die Idee hatte, »eine Gesellschaft verschiedenartiger Männer« an seiner *Farbenlehre* durch Übertragung einzelner Fachgebiete zu beteiligen – heute würde man sagen: eine wissenschaftliche Forschungskoooperation zu bilden. Er dachte dabei an Chemiker, Physiker, Mathematiker, Mechaniker, Naturhistoriker, Maler, Historiker, Kritiker, Anatom, Philosoph (LA, Bd. I 3, S. 130–136).

13 Gemeint sind mit dieser Aufzählung die ersten vier Abteilungen des *Didaktischen Teils*: 1. *Physiologische Farben*, 2. *Physische Farben*, 3. *Chemische Farben*, 4. *Allgemeine Ansichten nach innen*.

14 Neben verstreuten methodischen Anmerkungen in den *Beiträgen zur Optik* von 1791/92 und in dem *Entwurf einer Farbenlehre* von 1810 sind als wissenschaftsphilosophische Schlüsseltexte Goethes insbesondere zwei Aufsätze zu nennen: 1. *Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt* (1792), *Naturwissenschaftliche Hefte*. LA, Bd. I 8, S. 305–315; 2. *Das reine Phänomen* (1798), LA, Bd. I 3, S. 306–308 oder LA, Bd. I 11, S. 39–40. Vgl. zum Wissenschaftsverständnis Goethes auch Rudolf Steiner, *Einleitungen zu Goethes Naturwissenschaftlichen Schriften* (Einleitungen und Kommentare zu den 1884–1897 von Steiner herausgegebenen naturwissenschaftlichen Schriften Goethes im Rahmen der Kürschner-Ausgabe), Dornach 1987, insbes. Kap. XVI: »Goethe als Denker und Forscher«, S. 258–301. Vgl. ferner Michael Mandelartz, »Goethe, Newton und die Wissenschaftstheorie. Zur Wissenschaftskritik und zur Methodologie der Farbenlehre«, in: ders., *Goethe, Kleist. Literatur, Politik und Wissenschaft um 1800*, Berlin 2011, S. 240–281.

15 Friedrich Steinle, »Erfahrung der höhern Art. Goethe, die experimentelle Methode und die französische Aufklärung«, in: *Heikle Balancen. Die Weimarer Klassik im Prozess der Moderne*, hrsg. von Thorsten Valk Göttingen 2014, S. 221–249; vgl. auch ders., »Das Nächste ans Nächste reihen: Goethe, Newton und das Experiment«, in: *Philosophia Naturalis*, 39, 1, 2002, S. 141–172.

16 In dem o. g. Aufsatz *Der Versuch als Vermittler von Objekt und Subjekt* heißt es u. a. »Diese Bedächtlichkeit nur das Nächste ans Nächste zu reihen, oder vielmehr das Nächste aus dem Nächsten zu folgern, haben wir von den Mathematikern zu lernen, und selbst da, wo wir uns keiner Rechnung

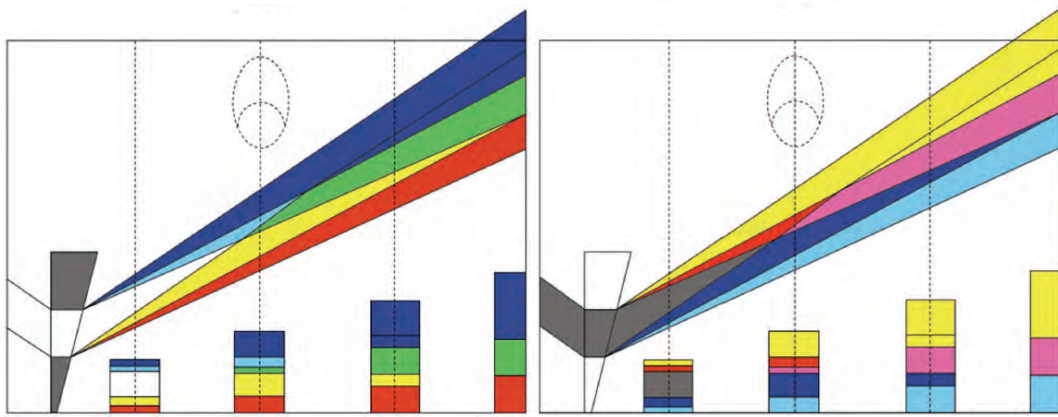
Einzelexperiment und skizziert seine Methode der »Vermannigfaltigung« von Experimenten durch systematische Variation der Parameter im experimentellen Aufbau. »Erst in Form einer Reihe von aneinander grenzenden Versuchen, so Goethes Generalthese, taugte die Erfahrung als Grundlage des Theoretisierens.« Denn erst die »Vermannigfaltigung« einzelner Beobachtungen lasse die funktionalen Verknüpfungen eines Beobachtungszusammenhangs sichtbar werden. Sie führe nach dem Vorbild der »mathematischen Methode«¹⁶ zu einer Art von Erfahrung, die aus mehreren anderen besteht und die Goethe deshalb »Erfahrungen der höhern Art« genannt hat. Erst diese »Erfahrungen der höhern Art«, von Goethe gelegentlich auch als »reine Phänomene« oder »Urphänomene« bezeichnet, können den Ausgangspunkt empirischer Regeln und verallgemeinernder Schlussfolgerungen darstellen. – Durch den Bezug¹⁷ auf die französischen Enzyklopädisten d’Alembert und Diderot gelingt es Steinle, zu zeigen, dass Goethes methodologische Überlegungen »keineswegs so exotisch waren wie bisweilen dargestellt«. Die Frage, ob es zu dieser Art von Überlegungen neben den Herausgebern der *Encyclopédie* weitere Parallelen oder mögliche Vorbilder gibt, kann heute nicht abschließend beantwortet werden. Schon jetzt ist aber »deutlich, dass Goethe mit seinen Reflexionen zum experimentellen Arbeiten und Schließen eine in der Naturwissenschaft viel breiter anzutreffende Arbeitsweise erfasst hat als bislang angenommen und damit in einer (erst noch zu schreibenden) Geschichte der Philosophie des Experiments einen markanten Platz verdient«.

Neue Experimente bestätigen die Symmetrie spektraler Phänomene

Vor dem Hintergrund der Ausblicke auf neuere historische und wissenschaftsphilosophische Untersuchungen zu Goethes *Farbenlehre* kommen wir zurück auf die eingangs gestellte Frage, wie es heute aus der Sicht der Physik um die »optische Saat« Goethes bestellt ist? Die Antwort darauf geben experimentelle Entwicklungen, die in den letzten zehn Jahren von dem Physiker Matthias Rang ausgearbeitet wurden.¹⁸ Sie beziehen sich auf Goethes Untersuchungen in der dritten Abteilung des *Didaktischen Teils*, das heißt auf den im engeren Sinne physikalischen Teil der *Farbenlehre*, der Goethe am wichtigsten war – und der zugleich von den Physikern die schärfste Ablehnung erfuhr. Rang zeigt mit den Mitteln der technischen Optik, wie sich die von Goethe entdeckte, aber in der Optik bisher vernachlässigte Eigenschaft der Zusammengehörigkeit komplementärer Spektralphenomene in eine physikalische Problemstellung übersetzen und als fundamentale Bedingung solcher Phänomene nachweisen lässt.

Die Ergebnisse der Experimente Rangs lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Goethe entdeckte die Komplementarität als Symmetrieeigenschaft spektraler Phänomene. Komplementäre und inverse spektrale Zustände folgen nach heutigem Verständnis aus der Energieerhaltung des optischen Systems. Komplementäre Spektren entstehen simultan an einer verspiegelten Spaltblende und bedingen sich funktionell wie Transmission und Reflexion an einem Filter. Die entsprechenden Experimente stellen symmetrisierte Erweiterungen und Verallgemeinerungen der Experimente Newtons dar.

Auf welchem Weg gelangte Goethe zu der Auffassung von der Symmetrie spektraler Farbphenomene? Er suchte nach den beobachtbaren Bedingungen der Farbentstehung.



optical contrasts, i.e., at the limits of light and darkness. By systematically varying and inverting these contrast conditions, Goethe arrived at the realization that producing images by passing inverse optical contrasts through a prism always results in isomorphic, complementary spectra. Against the background of the representation he had found in Newton's *Opticks*, this was an unexpected discovery. In light of the symmetrical conditions of appearance, it seemed consistent to Goethe to view the complementary spectrum as the equal counterpart to Newton's spectrum, and to emphasize that the spectra belong together (see figure 2). It is therefore immediately understandable why Goethe could also see, in the organizational schema of the color circle, an adequate representation of the lawfulness he found with respect to the complementarity and mixing of color.

It seemed obvious to Goethe to expect a theory of spectral phenomena to take into account the symmetry that the phenomena show. Because of this, he insisted on the observation that, for color to arise, an interaction of light and darkness is always necessary. Newton's limitation by the slit spectrum awoke in him the impression of an arbitrary interference with empirical data, an interference that resulted in the suppression of a whole class of phenomena and with it a structural feature of spectral phenomena, which could be observed in other areas such as atmospheric and polarized colors and therefore seemed of general significance.

Goethe could only provide qualitative and rudimentary experimental verifications of optical complementarity as a symmetrical property of spectral phenomena. Nevertheless, with his experimentation and representation of the formation of color at inverse optical contrasts, Goethe sketched the methodological path that should, in principle, lead to such verification. It was the Norwegian André Bjerke who, in the 1950s, symmetrized spectral phenomena through systematic inversion, i.e., turned the interchange of light and darkness in Newton's most important experiments into a research program.¹⁹ The decisive breakthrough that led to the success of this program was first made by Matthias Rang, who built on Torger Holtsmark's work with the introduction of a mirrored slit aperture and the concept of an optical light room (see figures 3, 4, and 5).

2 Goethe's Darstellung zur Entstehung komplementärer Vollspektren durch sukzessive Überlagerung komplementärer Kantenspektren als Funktion des Abstands vom Prisma. Links: Spalt-spektrum, rechts der symmetrische Fall des Steg-spektrums, bei dem der Spalt durch einen Steg bzw. das Lichtbündel in dunkler Umgebung durch ein Schattenbündel in heller Umgebung ersetzt ist. | Goethe's representation of the formation of complementary complete spectra by successive overlapping of complementary edge spectra as a function of the distance from prism. Left: slit spectrum. Right: the complementary case of the bar spectrum in which the slit is replaced by a bar, i.e., the light rays in a dark environment are replaced by a shadow in a light environment.

method of "manifolding" (Vermannigfaltigung) and mathematics. See Steiner's footnote to the d'Alembert quote: "The first proposition in mathematics is for Goethe an experience of a higher kind in science. The way that d'Alembert also thinks of this manifolding of the proposition is completely analogous to what Goethe says about the relation between experience of a higher kind and normal empirical experience." Goethe, *Naturwissenschaftliche Schriften*, vol. 2 (1982), ed. Rudolf Steiner. Photomechanical reproduction of the first edition (1884–97). 4th Edition (Dornach, 1982), p. 47.

¹⁸ Matthias Rang, *Phänomenologie komplementärer Spektren* (Berlin, 2015); Johannes Grebe-Ellis and Matthias Rang, "Komplementäre Spektren – Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende," *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)* 62 (2009), pp. 227–31; Johannes Grebe-Ellis et al., "Optische Komplementarität: Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene," *Physik Journal* 16 (2017), pp. 43–49.

¹⁹ With his suggestion of constructing a mechanical inversion of Newton's fundamental experiment, Goethe was able to give a perspicuous presentation of his discovery of the symmetry of complementary spectra. From a modern perspective, however, the impression arises that with this example of inversion, Goethe also helped foster an incomplete, mechanical understanding of inversion. In the twentieth century, this resulted in a tradition of attempts at inversion that were to remain ineffective so long as it was not recognized that the inversion problem is in principle not mechanically but optically soluble. It is nevertheless worth mentioning the work of Kirschmann, who in 1917 was the first to show that the inverted spectrum can in principle be used spectroscopically in the same way as the slit spectrum. See August Kirschmann, "Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse," *Physikalische*

bedienen, müssen wir immer so zu Werke gehen, als wenn wir dem strengsten Geometer Rechenschaft zu geben schuldig wären. Denn eigentlich ist es die mathematische Methode [Hervorhebung J. G-E], welche wegen ihrer Bedächtlichkeit und Reinheit gleich jeden Sprung in der Assertion offenbart [...].« S. ferner *Verhältnis zur Mathematik, Didaktischer Teil* § 722–729. Vgl. dazu Wolfgang Krohn, »Goethes Versuch über den Versuch«, in: *Goethe und die Verzeitlichung der Natur*, hrsg. von Peter Matussek, München 1998, S. 399–413.

17 In dem Nachlasstext *Über Mathematik und deren Missbrauch* (1826) zitiert Goethe d’Alembert aus der *Encyclopédie* und liefert auf diese Weise selbst den Hinweis auf die methodische Parallele seines Verfahrens der »Vermannichfaltigung« zur Mathematik. Vgl. die Fußnote Steiners zu Goethes d’Alembert-Zitat: »Die erste Proposition ist in der Mathematik das, was für Goethe in der Naturwissenschaft eine Erfahrung der höhern Art ist. Auch die Art, wie d’Alembert sich die Vermannichfaltigung dieser Proposition denkt, ist vollkommen dem analog, was Goethe über den Zusammenhang der Erfahrung der höhern Art und der gewöhnlichen empirischen sagt.« Johann Wolfgang von Goethe, *Naturwissenschaftliche Schriften*, hrsg. und eingeleitet von Rudolf Steiner, fotomechanischer Nachdruck der Erstauflage (1884–1897), Bd. 2, 4. Aufl., Dornach 1982, S. 47.

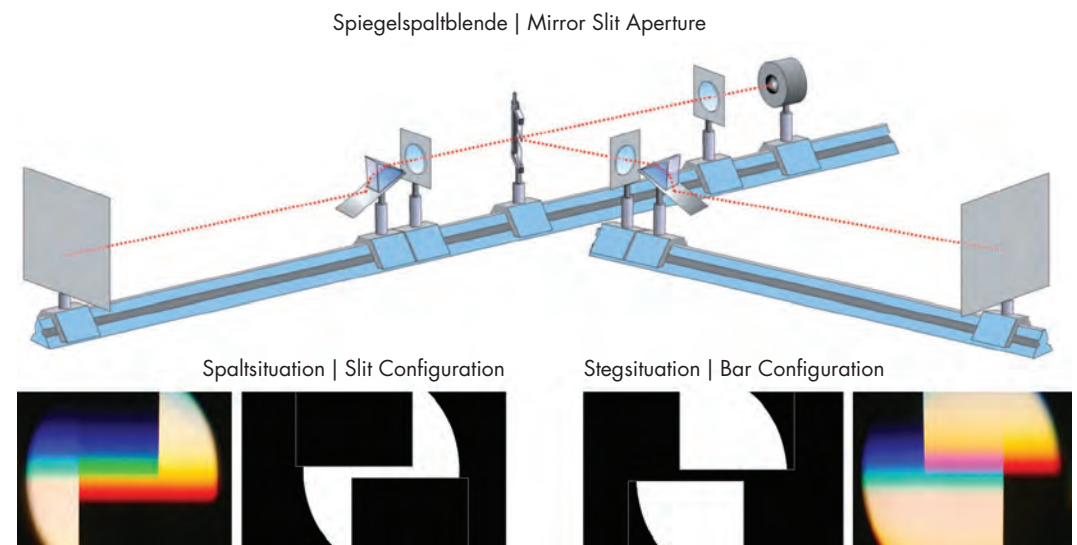
18 Matthias Rang, *Phänomenologie komplementärer Spektren* (*Phänomenologie in der Naturwissenschaft*, 9), Berlin 2015; Johannes Grebe-Ellis und Matthias Rang, »Komplementäre Spektren – Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende«, in: *Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)*, 62, 4 2009, S. 227–231; Johannes Grebe-Ellis, u. a., »Optische Komplementarität. Experimente zur Symmetrie spektraler Phänomene«, in: *Physik Journal*, 16, 3, 2017, S. 43–49.

3 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.
The simultaneous production of complementary spectra using a mirror slit aperture. The optical transmission path (left) and reflection path (right) are constructed to be reflectionally symmetrical with respect to the plane of the mirror aperture. Without the prism, the mirrored aperture appears as a slit in the transmission path and as a bar in the reflection path. Photos: M. Rang.

Die grundlegendste dieser Bedingungen zeigte sich ihm darin, dass Farben stets an optischen Kontrasten, das heißt an Hell-Dunkel-Grenzen entstehen. Durch die systematische Variation und Umkehrung dieser Kontrastbedingung gelangte Goethe zu der Feststellung, dass die Abbildung zueinander inverser optischer Kontraste durch ein Prisma stets zu isomorphen und komplementären Spektren führt. Vor dem Hintergrund der Darstellung, die er in Newtons *Opticks* gefunden hatte, war dies eine unerwartete Entdeckung. Angesichts der symmetrischen Entstehungsbedingungen erschien es ihm nur folgerichtig, das komplementäre Spektrum als gleichwertiges Gegenstück zu Newtons Spektrum anzusehen und die Zusammengehörigkeit der Spektren hervorzuheben (Abb. 2). Und es ist unmittelbar nachvollziehbar, weshalb Goethe in dem Ordnungsschema des Farbkreises auch für die Entstehung der »prismatischen Farben« eine angemessene Darstellung der gefundenen Regelmäßigkeiten hinsichtlich der Ergänzungs- und Mischungsverhältnisse der Farben sehen konnte.

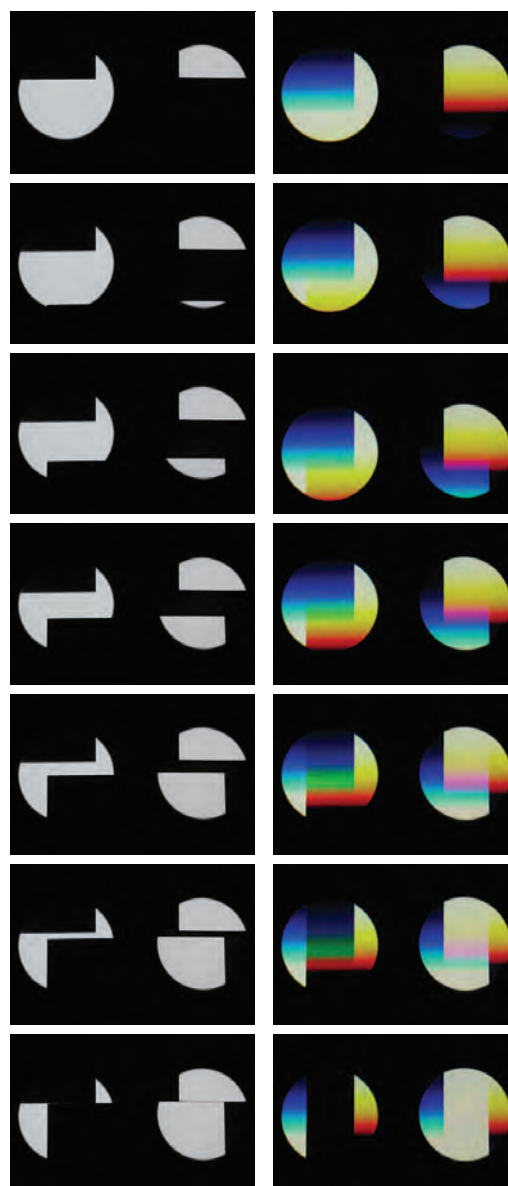
Es erschien Goethe selbstverständlich, von einer Theorie spektraler Phänomene eine Berücksichtigung der Symmetrieverhältnisse zu erwarten, die die Phänomene zeigten. Aus diesem Grunde beharrte er auf der Beobachtung, dass es zur Entstehung von Farbe stets des Zusammenwirkens von Hell und Dunkel bedürfe. 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 zum Beispiel bei den atmosphärischen Farben oder den Polarisationsfarben zu beobachten war und insofern von allgemeinerer Bedeutung zu sein schien.

Den experimentellen Nachweis der optischen Komplementarität als Symmetrieeigenschaft spektraler Farbphänomene konnte Goethe nur qualitativ und ansatzweise liefern. Mit seinen Experimenten und Darstellungen zur Farbentstehung an inversen optischen Kontrasten skizzierte er immerhin den methodischen Weg, auf dem sich dieser Nachweis im Prinzip führen lassen sollte. Es war der Norweger André Bjerke, der in den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts die Symmetrisierung der spektralen Farbphänomene durch systematisches Invertie-



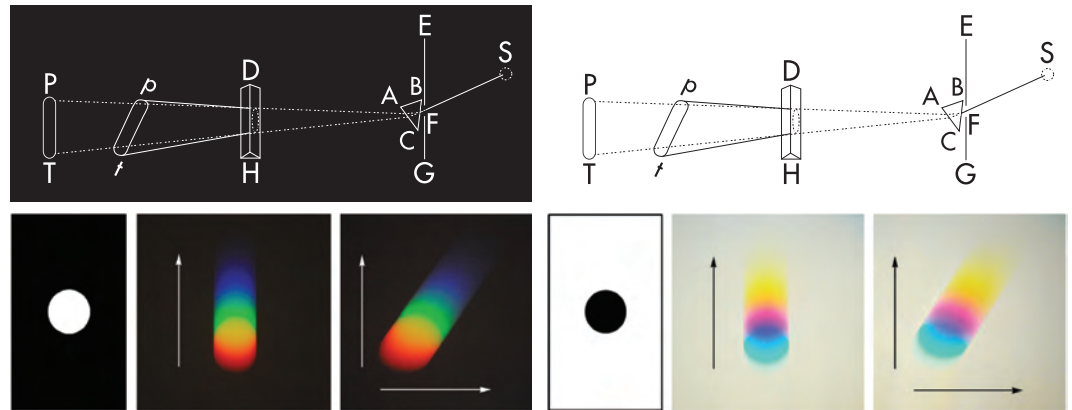
Within this framework, Rang has been able to show in the last few years that, in principle, all of Newton's experiments can be inverted in the sense of Goethe's idea of polarity. Optical complementarity, as a property of chromatic phenomena that are produced by a strictly inverse setup, is obtained when energy is preserved in the observed optical system. This is especially valid for the various versions of the *experimentum crucis*, an experiment that Newton conceived to prove the purity of spectral colors, which essentially consists of two consecutively placed prisms (figure 5 shows a variant of this experiment). Rang concluded that this results in a generalization of the concept of monochromaticity, which relates the behavior of a selected spectral area when tested for spectral purity in the context of its production: whether a color behaves in a spectrally pure manner depends on whether it is investigated in the environment in which it was produced.

Zeitschrift, XVIII (1917), pp. 195–205; "Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse," *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, XLIV (1924), pp. 173–75. Significant preliminary work on overcoming the mechanical image of inversion was carried out towards the end of the 1950s by Bjerke and his group in Oslo. See André Bjerke, *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre* (Stuttgart, 1961). This led to Holtsmark's suggestion on the generalization of the *experimentum crucis*, which was realized experimentally by Sällström at the end of the 1970s. See Torger Holtsmark, "Newton's Experimentum Crucis Reconsidered," *American Journal of Physics* 38 (1970), pp. 1229–35; *Colour and Image: Phenomenology of Visual Experience*, ed. Johannes Grebe-Ellis (Berlin, 2012); Pehr Sällström, *Monochromatic Shadow Rays*, experimental film, ed. Johannes Grebe-Ellis (Gerlingen, 2010).



4 Phasen simultan erzeugter komplementärer Spektren einer Xenon-Höchstdrucklampe bei schrittweisem Schließen der Spiegelspaltblende. In der linken Spalte ist die Blendsituation gezeigt, rechts die jeweiligen Spektren. Fotos: J. Grebe-Ellis & Sebastian Hümbert-Schnurr. Phases of the simultaneously produced complementary spectra of a high pressure xenon lamp with decreasing aperture. The left column shows the aperture and the right the corresponding spectra. Photos: J. Grebe-Ellis and S. Hümbert-Schnurr.

5 Newtons *Experimentum Crucis* mit gekreuzten Prismen (links) und invertierte Version (rechts). Untere Zeile: Erzeugung (Mitte) und Analyse (rechts) des Spektrums einer sonnenähnlichen Lichtquelle in dunkler Umgebung (links) bzw. des komplementären Spektrums einer »schwarzen Sonne« in heller Umgebung. Die Pfeile geben die jeweilige Brechungsrichtung der Prismen an. Fotos: M. Rang. | Newton's *experimentum crucis* with crossed prisms (left) and the inverted version (right). Bottom row: The production (center) and analysis (right) of the spectrum of a light source similar to the sun with a dark background (left), together with the complementary spectrum of a 'dark sun' with a light background. The arrows indicate the prisms' direction of refraction. Photos: M. Rang.



19 Goethe konnte mit seinem Vorschlag, die Invertierung des Newtonschen 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. Vgl. August Kirschmann, »Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse«, in: *Physikalische Zeitschrift*, 18, 1917, S. 195–205; ders., »Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse«, in: *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 44, 1924, S. 173–175. Maßgebliche Vorarbeiten zur Überwindung der mechanischen Invertierungsvorstellung wurden Ende der 50er-Jahre des 20. Jahrhunderts in der Osloer Arbeitsgruppe um Bjerke geleistet, vgl. André Bjerke, *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre*, Stuttgart 1961. Sie führten zu einem Vorschlag zur Verallgemeinerung des *Experimentum Crucis* von Holtsmark, der Ende der 70er-Jahre erstmals von Sällström experimentell realisiert wurde, s. Torger Holtsmark, »Newton's Experimentum Crucis reconsidered«, in: *American Journal of Physics*, 38, 10, 1970, S. 1229–1235 und *Colour and Image. Phenomenology of Visual Experience*, Hrsg. von Johannes Grebe-Ellis, Berlin 2012; Pehr Sällström, *Monochromatic Shadow Rays*, Experimentalfilm, Hrsg. von Johannes Grebe-Ellis, Gerlingen 2010.

ren, das heißt Vertauschen von Hell und Dunkel in den wichtigsten Experimenten Newtons zum Programm erhob.¹⁹ Der entscheidende Durchbruch zur erfolgreichen Ausführung dieses Programms gelang allerdings erst Matthias Rang in Anknüpfung an Torger Holtsmark durch die Einführung verspiegelter Spaltblenden und das Konzept des optischen Hellraums (Abb. 3, 4 und 5).

Auf dieser Grundlage konnte Rang in den letzten Jahren zeigen, dass im Prinzip alle Experimente Newtons im Sinne der Polaritätsidee Goethes invertiert werden können: Die optische Komplementarität als Eigenschaft von Farbphänomenen, die mit streng inversen experimentellen Aufbauten erzeugt werden, ist erhalten, wenn die Energie in dem betrachteten optischen System erhalten ist. Dies gilt insbesondere auch für die verschiedenen Varianten des *Experimentum Crucis*, ein Experiment, das Newton zum Nachweis der Reinheit der Spektralfarben entwarf und das im Wesentlichen aus zwei hintereinander geschalteten Prismen besteht (Abb. 5 zeigt eine Variante dieses Experiments). Für Rang ergab sich daraus eine Verallgemeinerung des Monochromatizitätsbegriffs, die das Verhalten eines ausgewählten Spektralbereichs gegenüber dem Test auf spektrale Reinheit auf den Kontext seiner Erzeugung bezieht: Ob sich eine Farbe spektral rein verhält oder nicht, hängt davon ab, ob sie in dem Umfeld untersucht wird, in dem sie erzeugt wurde.

Diese Ergebnisse gehen weit über den historischen Kontext der *Farbenlehre* Goethes hinaus. Sie ergeben sich aus erweiterten, modifizierten und verallgemeinerten Varianten der Experimente Newtons und bestätigen Goethes Beobachtungen hinsichtlich der Bedeutung der Komplementarität spektraler Phänomene. Dass sich die Symmetrie komplementärer Spektralphenomene nicht auf den Bereich des im engeren Sinne optischen Teils des elektromagnetischen Spektrums beschränkt, sondern allgemein als Eigenschaft der Strahlungsenergie auch für die angrenzenden Spektralbereiche des Ultraviolett (UV) und Infrarot (IR) nachgewiesen werden kann, haben Rang und Grebe-Ellis durch die Vermessung komplementärer Spektren einer Xenon-Höchstdrucklampe gezeigt (Abb. 6).²⁰ Vor diesem Hintergrund kann von den UV- und IR-Bereichen im gewöhnlichen Spektrum korrespondierenden Bereichen Ultra-Yellow (UY) und Infra-Cyan (IC) im komplementären Spektrum gesprochen werden. Ob

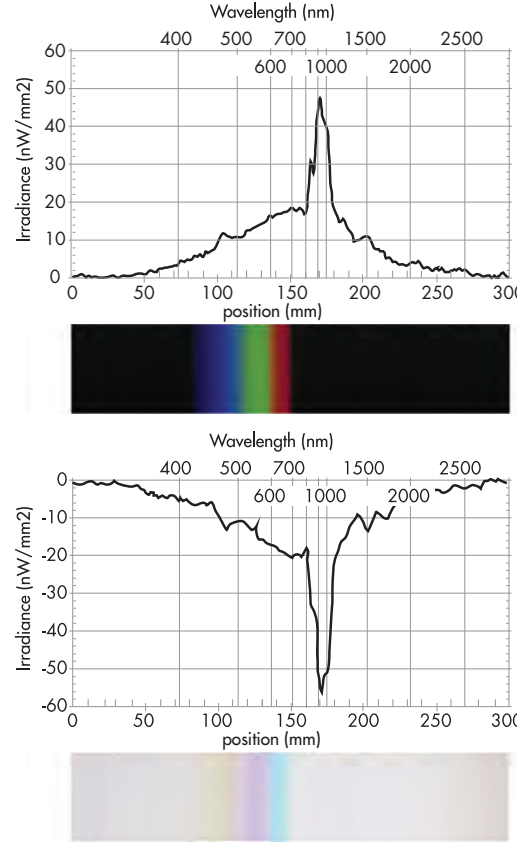
These results go far beyond the historical context of Goethe's *Farbenlehre*. They result from extended, modified, and generalized variants of Newton's experiments and confirm Goethe's observations regarding the importance of the complementarity of spectral phenomena. The symmetry of complementary spectral phenomena is not limited to the strictly optical part of the electromagnetic spectrum. Being a general property of radiation energy, it can also be demonstrated in the neighboring ultraviolet (UV) and infrared (IR) spectral regions. This has been done by Rang and Grebe-Ellis in their measuring of the complementary spectra of a high-pressure xenon lamp (see figure 6).²⁰ In light of this research, one can speak of ultra-yellow (UY) and infra-cyan (IC) regions of the complementary spectrum that correspond to the UV and IR regions of the normal spectrum. It remains to be seen whether, on the basis of Rang's techniques, spectroscopic applications can be developed that have advantages in specific cases over established methods.

This presentation of recent historical, philosophical, and physical investigations of Goethe's theory of colors shows that the image of Goethe as a scientist and color researcher has been reanimated in recent years. Research on the *Farbenlehre* is in no way finished. On the contrary, the studies presented above clearly show that we are in many ways at the beginning—and that this beginning is promising.

20 Johannes Grebe-Ellis and Matthias Rang, "Power Area Density in Inverse Spectra", *Journal for General Philosophy of Science*, March 2018, <https://doi.org/10.1007/s10838-017-9394-8> (accessed July 20, 2018).

6 Bestrahlungsstärke im Spaltspektrum (oben) und im komplementären Stegspektrum (unten) einer Xenon-Höchstdrucklampe. Fotos: M. Rang und J. Grebe-Ellis.

The Intensity of irradiation in the slit spectrum (top) and the complementary bar spectrum (below) of a high-pressure xenon lamp. Photos: M. Rang and J. Grebe-Ellis.



sich auf der Grundlage von Rangs Techniken spektroskopische Anwendungen realisieren lassen, die in speziellen Fällen Vorteile gegenüber etablierten Verfahren haben, bleibt abzuwarten.

Der hiermit vorgestellte Blick auf neuere historische, wissenschaftsphilosophische und physikalische Untersuchungen zu Goethes Farbenlehre zeigt, dass das Bild Goethes als Naturwissenschaftler und Farbenforscher in den letzten Jahren neu in Bewegung gekommen ist. Die Forschung zur *Farbenlehre* ist keineswegs abgeschlossen, im Gegenteil. Die vorgestellten Arbeiten machen deutlich, dass man noch vielfach am Anfang steht – und sie zeigen, dass dieser Anfang ein vielversprechender ist.

20 Johannes Grebe-Ellis und Matthias Rang, »Power Area Density in Inverse Spectra«, *Journal for General Philosophy of Science*, März 2018, <https://doi.org/10.1007/s10838-017-9394-8> (Stand: 20.07.2018).