

Olaf L. Müller

**Newton, Goethe und die Entdeckung neuer Farbspektren
am Ende des Zwanzigsten Jahrhunderts**

I Newtons Heterogenität des weißen Lichtes

In *Abbildung 1* sehen Sie eine Ikone der neuzeitlichen Naturwissenschaft – das newtonische Vollspektrum; es wurde vom Wiener Künstler und Farbexperimentator Ingo Nussbaumer photographiert. Wie sind die abgebildeten Farben entstanden?

Sir Isaac Newton hatte solche Farben zum ersten Mal im Jahr 1666 aus einem Sonnenstrahl hervorgezaubert, den er durch ein enges Loch in seine Dunkelkammer fallen ließ und dort mithilfe eines Prismas in seine regenbogenbunten Bestandteile zerlegte (*Abb. 2*). Die Farben der *Abbildung 1* sind im Prinzip genauso entstanden, wenn auch mit etwas modernerer Technik. Nussbaumer macht sich von den Zufälligkeiten des Wetters und von den Sonnenbewegungen am Himmel unabhängig, indem er anstelle der Sonne die 250-Watt-Halogenlampe eines Diaprojektors der Marke Kindermann einsetzt. Das Dia, das Nussbaumer in den Projektor gespannt hat, ist noch frei von Farben. Es ist ein sog. Spaltdia und wird von zwei undurchsichtigen Rechtecken aus feingeschliffenem Eisen gebildet, die einander im Diarahmen fast berühren – und zwar so, dass sie in dessen Mitte einen schmalen, scharfkantigen waagerechten Spalt von 0,21 mm Breite freilassen (siehe *Abb. 3*). Anstelle von Newtons rundem Fensterladenloch haben wir also einen länglichen Spalt, aber dieser winzige geometrische Unterschied tut fast nichts zur Sache.²

Würde das Spaltdia auf die gegenüberliegende Wand projiziert, so sähe man einen fingerbreiten weißen Lichtbalken in pechschwarzer Umgebung (*Abb. 4*).

Doch Nussbaumer hat ein mit Wasser gefülltes Hohlprisma vor dem Objektiv des Projektors angebracht – mit der spitzen, brechenden Kante nach unten (*Abb. 5*), genau wie in Newtons Experiment (*Abb. 2*). Das weiße, flach geschnittene Licht des Diaprojektors muss durchs Wasserprisma hindurch, wobei es vom geraden Weg abgelenkt und nach oben gebrochen wird. Dramatischer als der Richtungswechsel des Lichts beim Weg durchs Prisma sind zwei andere Effekte, die das Photo in *Abbildung 1* deutlich zeigt. Erstens ist aus dem ehemals fingerbreiten Lichtbalken ein weitaus breiteres Band geworden, und zweitens ist dies Band nicht mehr weiß, sondern bunt (vor schwarzem Hintergrund):

»Die seit einem Jahrhundert herrschende Newtonische Theorie hingegen gründete sich auf einen beschränkten Fall und bevorteilte alle die übrigen Erscheinungen um ihre Rechte, in welche wir sie durch unsern Entwurf wieder einzusetzen getrachtet. Dieses war nötig, wenn wir die hypothetische Verzerrung so vieler herrlichen und erfreulichen Naturphänomene wieder ins Gleiche bringen wollten.«

*Johann Wolfgang Goethe*¹

- 1| Johann Wolfgang von Goethe: Die Schriften zur Naturwissenschaft. 25 Bde. Begr. v. Karl Lothar Wolf. Hg. v. Rupprecht Matthaei, Dorothea Kuhn u. a. Weimar 1947–2011. Hier Abt. I Bd. 7, S. 7. (Ab jetzt verweise ich auf die verschiedenen Bände dieser «Leopoldina-Ausgabe» nach folgendem Schema: LA I 7, S. 7).
- 2| Fast: Anstelle der prismatisch entfalteten Farben des runden Sonnenbildes (bei Newton) wird es jetzt um die prismatische Entfaltung der Farben eines rechteckigen, schmalen Lichtbalkens gehen.



Abb. 1. Newtons Vollspektrum. Von oben nach unten sieht man Blau, Türkis, Grün, Gelb, Rot, mit fließenden Übergängen. (Photo von Ingo Nussbaumer, zugeschnitten von Matthias Herder).

| NEWTONS VOLLSPKTRUM |
|---------------------|
| [S: Schwarz] |
| B: Blau |
| T: Türkis |
| G: Grün |
| Y: Gelb |
| R: Rot |
| [S: Schwarz] |

Warum diese Farben? Auf diese Frage hat die orthodoxe Optik, die auf Newton zurückgeht, eine bestechende Antwort.³ Das ursprüngliche – weiße – Projektionslicht (das sich ohne zwischengeschaltetes Wasserprisma zeigt) besteht aus mehreren überblendeten Lichtern verschiedener Farbe – blauen, türkisen, grünen, gelben und roten. Jedem Licht einer bestimmten Farbe kommt beim Weg durchs Prisma ein spezielles Brechungsverhalten zu: Blaues Licht ändert seine Richtung beim Weg durchs Prisma am stärksten, rotes Licht am wenigsten. Kurzum, das Wasserprisma lockt aus dem weißen Licht der Projektorlampe alle Farben heraus, die sich darin verstecken. Und dieselbe Erklärung liegt dem newtonischen Experiment aus *Abbildung 2* zugrunde.

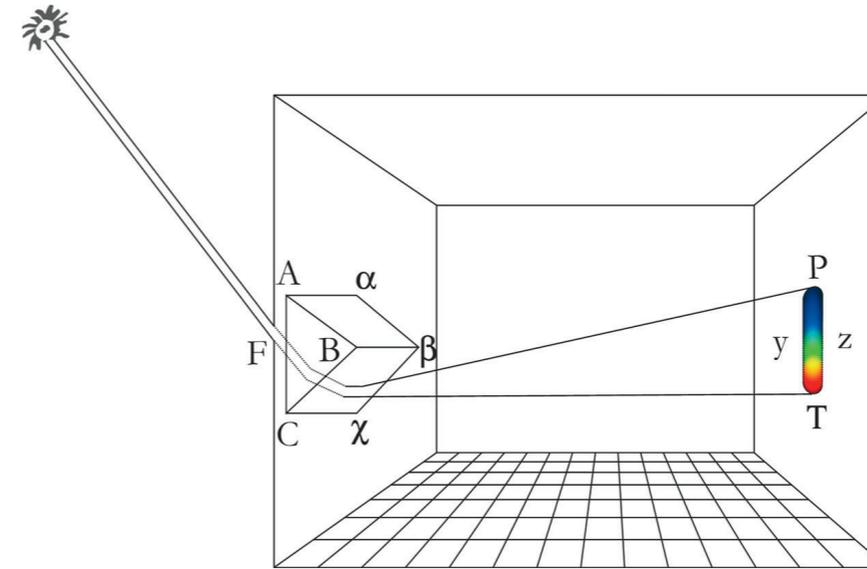
Auf den ersten Blick enthält Newtons Theorie also zwei Behauptungen. Einerseits die These von der Heterogenität des weißen Lichts:

(H)^w Weißes Licht (W) ist heterogen; es besteht aus blauen, türkisen, grünen, gelben und roten homogenen Lichtstrahlen: $W = B + T + G + Y + R$.

Andererseits hängen laut Newton die Farben homogener Lichtstrahlen so eng mit ihren Brechungseigenschaften zusammen, dass man von einer Äquivalenz zwischen Farbe und Refrangibilität sprechen kann:

(Ä)^w Jeder Farbe eines homogenen Lichtstrahls (Blau B, Türkis T, Grün G, Gelb Y, Rot R) entspricht eine eigene Refrangibilität ρ , d.h. ein eigenes Maß dafür, wie stark der fragliche Lichtstrahl beim Weg durchs Prisma abgelenkt wird: $\rho_B > \rho_T > \rho_G > \rho_Y > \rho_R$.

(Warum ich dem Namen der Äquivalenzthese ein hochgestelltes W – für Weiß – angehängt habe, wird sich später herausstellen; hier nur so viel: Die These betrifft alle Farben, die laut Newton im *weißen* Licht enthalten sind).



II

Goethe wirft mehr Licht auf eine unbewiesene Voraussetzung Newtons

Newton hat in seinen *Opticks* aus dem Jahr 1704 eine Vielzahl von Experimenten aufgeboten, um optische Behauptungen wie (H)^w und (Ä)^w zu beweisen; die bislang betrachteten Experimente bieten nur die Spitze eines gigantischen empirischen Eisbergs.

Heutzutage mag fast kein Wissenschaftsphilosoph daran glauben, dass sich physikalische Theorien eindeutig aus Experimenten *beweisen* lassen.⁴ Nichtsdestoweniger sind sich fast alle einig: Newtons Experimente bieten überwältigende Evidenz zugunsten seiner Theorie. Diesen Konsens versuchte Johann Wolfgang von Goethe vor zweihundert Jahren mithilfe eigener Experimente zu erschüttern; und vor kurzem hat Ingo Nussbaumer neue Experimente veröffentlicht, die in dieselbe Richtung weisen.

Um keine falschen Erwartungen zu wecken: Keines dieser Experimente hat die Kraft, Newtons Theorie zu widerlegen; seine Theorie kann alle neuen Experimente mit links erklären. Die subversive Kraft der Experimente Goethes und Nussbaumers liegt anderswo: Sie bringen uns auf neue Gedanken, liefern Alternativen zur newtonischen Theorie, die ebenfalls mit allen Experimenten spielend fertig werden – nicht schlechter als Newtons Theorie. Das ist der philosophische Witz der bevorstehenden Exerzitien: Die Gesamtheit der prisma-

◀ **Abb. 2. Newtons Weißanalyse (1672).** Ein Sonnenstrahl wird durchs Fensterladenloch F in ein Prisma geschickt, wobei er vom geraden Weg nach oben abgelenkt (gebrochen) und in seine kunterbunten Bestandteile zerlegt wird. (Farbgraphik von Matthias Herder und Ingo Nussbaumer nach einer Schwarz/Weiß-Zeichnung aus Newtons Vorlesungsmanuskript, siehe Isaac Newton: The unpublished first version of Isaac Newton's Cambridge lectures on optics 1670–1672. Cambridge 1973, S. 3, figure 2).

3 | Siehe Isaac Newton: A new theory about light and colors. In: Philosophical Transactions 6 (1671/2), S. 3075-3087. Siehe auch Isaac Newton: Opticks. In: Ders.: Opera quae extant omnia. Commentariis illustrabat Samuel Horsley. Tom. IV. Stuttgart-Bad Cannstadt 1964, S. 1-264, hier Book I.

4 | Einen locus classicus für den Konsens bietet Karl Popper: Logik der Forschung. Tübingen 9. Aufl. 1989, IV. Kapitel. Mit Blick auf Newtons Theorie widerspricht diesem Konsens Timm Lampert: Newton vs. Goethe: Farben aus Sicht der Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte. In: Hanspeter Bieri u. Sara Margarita Zwahlen (Hg.): «Trinkt, O Augen, was die Wimper hält...». Farbe und Farben in Wissenschaft und Kunst. Bern, Stuttgart, Wien 2008, S. 259-284, hier S. 264-269. Siehe auch Timm Lampert: Zur Wissenschaftstheorie der Farbenlehre. Aufgaben, Texte, Lösungen. Bern 2000, S. 91-95 und S. 99-109.



Abb. 3. Spaltdia. Zwei scharfgeschliffene Eisenplatten lassen in der Mitte des Dias einen horizontalen Spalt von 0,21 mm frei. (Ingo Nussbaumer, Moritz Foessel, Wolfgang Gratzl, 2010, Eisen 5 x 5 cm).

tischen Phänomene, die Sie kennenlernen werden, lässt sich von mehreren gleichberechtigten Theorien erklären!

Bevor ich auf die neuen Experimente eingehe, will ich eine entscheidende Annahme aus Newtons Theorie nennen, die Newton überall voraussetzt, ohne sie zu begründen. Er baut seine Experimente in der finsternen Umgebung seiner Dunkelkammer auf und sendet dort einen schmalen weißen Lichtstrahl durchs Prisma, das abgesehen davon nicht beleuchtet ist. Warum arbeitet Newton immer im Dunkeln? Weil er annimmt, dass seine Experimente nur unter diesen künstlichen Bedingungen keinen Störeinflüssen ausgesetzt seien.⁵ Diese Annahme läuft auf folgende Kausalbehauptung hinaus:

(K)^w Dunkelheit und Schwärze spielen bei den prismatischen Versuchen keine eigene kausale Rolle. (These der kausalen Unwirksamkeit des Gegenteils von Weiß).

Ob Goethe am Ende seines Lebens *Mehr Licht!* gemurmelt hat, ist strittig. Aber dass er die Dunkelheit aus Newtons Experimenten verabscheute, steht fest. Hier der Anfang einer seiner zahmen Xenien:

Warnung
eigentlich und symbolisch zu nehmen

Freunde, flieht die dunkle Kammer
Wo man euch das Licht verzwickt,
Und mit kümmerlichstem Jammer
Sich verschrobnen Bilden bückt [...]⁶

Goethes Protest gegen Newton entsprang keiner poetischen Grille. Nein, der Dichter hatte (wie fast niemand vor ihm) verstanden, dass Newton die Behauptung (K)^w voraussetzen muss, ohne sie begründen zu können.⁷

In seiner *Farbenlehre* aus dem Jahr 1810 hat sich Goethe nicht destruktiv damit begnügt, auf die Beweislücke bei Newton hinzuweisen. Vielmehr hat er Experimente aufgebaut, in denen er die Lücke auf überraschende Weise ins Zentrum der Aufmerksamkeit rückte. Wie das? Einfach: Er vertauschte in Newtons Experiment die Rollen von Licht und Finsternis. Wo bei Newton Licht durchs Prisma fiel, ließ er Schatten hindurchfallen; und wo Newtons Prisma abgeschattet war, beleuchtete Goethe das Prisma.⁸

Ingo Nussbaumer hat das mit moderneren Mitteln nachvollzogen. An die Stelle des *Spaltdias* (Abb. 3) setzt er ein sogenanntes *Stegdia* in den Diaprojekt-



Abb. 4. Projektion des Spaltdias. Horizontaler weißer Balken vor schwarzem Grund. (Graphik von Matthias Herder).

tor ein – das ist ein leerer Diarahmen, in dessen Mitte ein waagerechter Eisensteg von 0,21 mm Breite eingespannt ist (Abb. 6). Rein geometrisch bietet das *Stegdia* ein Gegenteil des *Spaltdias*; sein Bild ist ein schmaler schwarzer Strich vor weißem Hintergrund (Abb. 7). Den Rest des Versuchsaufbaus lässt Nussbaumer unverändert.

In *Abbildung 8* sehen Sie das Resultat dieser Umkehrung des ursprünglichen Experiments: ein neues Farbenspektrum, das genauso groß und bunt und vielfältig leuchtet wie Newtons Vollspektrum – aber in was für Farben! Achten Sie besonders auf den hellen, purpurnen Farbton P in der Mitte des neuen Vollspektrums. Das ist eine völlig neue Farbe, die in Newtons Vollspektrum fehlt. Sie scheint bei Goethe dort auf, wo sich bei Newton ein grünes Farbfeld G gezeigt hat.⁹

Die beiden Farbfelder (G *versus* P) sind genau komplementär zueinander. Und dies Verhältnis beherrscht nicht nur die Zentren der beiden Vollspektren; vielmehr gilt allgemein: Die Farbe jedes Punktes im Newtonspektrum spiegelt sich an exakt derselben Stelle im neuen Spektrum als Komplementärfarbe wider (Abb. 9). Die jeweils fünf deutlichsten Farben der beiden Spektren stehen einander in diesem Schema gegenüber:

| NEWTONS VOLLSTRAHL | GOETHES VOLLSTRAHL |
|--------------------|--------------------|
| Blau B | Gelb Y |
| Türkis T | Rot R |
| Grün G | Purpur P |
| Gelb Y | Blau B |
| Rot R | Türkis T |

Angesichts dieser perfekt symmetrischen Situation kann sich Goethe den wohlfeilen Spott über die Schule der Newtonianer nicht verkneifen:

Diese Phänomene gingen mir also völlig parallel. Was bei Erklärung des einen recht war, schien bei dem andern billig; und ich machte daher die Folgerung, daß wenn die Schule behaupten könne, das weiße Bild auf schwarzem Grunde werde durch die Brechung in Farben aufgelöst, getrennt, zerstreut, sie eben so gut sagen könne und müsse, daß das schwarze Bild durch Brechung gleichfalls aufgelöst, gespalten, zerstreut werde (LA I 7, S. 86).



Abb. 5. Goethes großes Wasserprisma. Ein hohles Prisma von 34 cm Höhe, das mit Wasser gefüllt wird. (Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Klassik Stiftung Weimar, Bestand Museen, Inventar-Nr.: GNF 0089).

- 5| Isaac Newton: A new theory about light and colors (Anm. 3), S. 3087; Isaac Newton: Opticks (Anm. 3), S. 17 (= Book I, Part I, Proposition I, Experiment 1).
- 6| Zahme Xenien VI. Abgedruckt und kommentiert in Albrecht Schöne: Goethes Farben-theologie. München 1987, S. 209–210.
- 7| LA I 5, §35.
- 8| LA I 4, §331f, §214f, LA I 7, S. 68f, 86; LA I 5, §132; LA I 6, S. 420. Goethe hatte das Experiment schon 1791 in den Beiträgen zur Optik aufgegeben, siehe LA I 3, S. 20 (§46).
- 9| Insgesamt zeigen beide Spektren dieselbe farbliche Vielfalt; ich spreche in beiden Fällen von einem *Vollspektrum*, um anzudeuten, dass die Farbenvielfalt dieser Spektren nicht weiter übertroffen werden kann. Wer hingegen einige Abmessungen der Experimente ändert, gewinnt dadurch andere Spektren, in denen weniger Farben aufscheinen als in den *Vollspektren*, siehe Abschnitt IV.

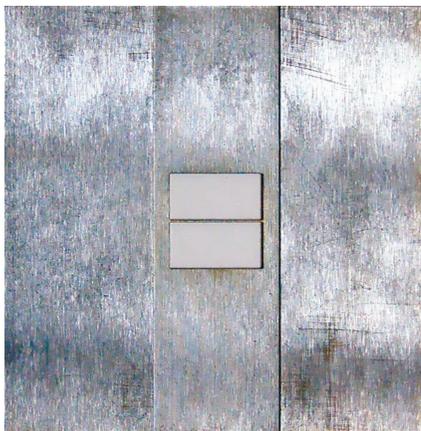


Abb. 6. Stegdia. Ein scharfgeschliffener Eisensteg von 0,21 mm Breite ist horizontal in die Mitte des Diarahmens eingespannt. (Ingo Nussbaumer, Moritz Foessel, Wolfgang Gratzl, 2010, Eisen 5 x 5 cm, Stegbreite 0,21 mm).

.....



Abb. 7. Projektion des Stegdias. Horizontaler schwarzer Balken vor weißem Grund. (Graphik von Matthias Herder).

Dass in Goethes Spott mehr als ein Fünkchen Weisheit steckt, werde ich in den kommenden Abschnitten demonstrieren.



Das neue Spektrum legt eine Ketzerei nahe

Angesichts der Gleichwertigkeit beider Spektren drängt sich eine neue Theorie prismatischer Farbphänomene auf – die Theorie von der Heterogenität des schwarzen Schattens. Goethe hat sie nicht in eigener Sache verfochten. Er nutzte sie nur, um Newtons Theorie zu verspotten. Hier die neue Theorie, die Goethe genauso grotesk fand wie Newtons Theorie:

(H)^S Schatten, Finsternis und Schwärze (S) sind heterogen und bestehen aus gelben, roten, purpurnen, blauen und türkisen Schattenstrahlen: $S = Y + R + P + B + T$.

(Ä)^S Jeder Farbe eines homogenen Schattenstrahls entspricht eine eigene Refrangibilität ρ , d.h. ein eigenes Maß dafür, wie stark der fragliche Schattenstrahl beim Weg durchs Prisma abgelenkt wird: $\rho_Y > \rho_R > \rho_P > \rho_B > \rho_T$.

Diese neue Theorie von der Heterogenität des Schattens mag sich aufdrängen; bewiesen wird sie von Goethes Versuchsergebnis nicht – sowenig wie Newtons Theorie von den vorausgegangenen Versuchsergebnissen bewiesen wurde. Während Newton den unbewiesenen Satz (K)^W voraussetzen muss, um seinen dunklen Experimenten etwas über die Natur des Hellen zu entnehmen, muss ein Anhänger der Heterogenität des Schattens ebenfalls einen unbewiesenen Satz voraussetzen:

(K)^S Farblose Helligkeit und Weiß spielen bei den prismatischen Versuchen keine eigene Rolle. (These der kausalen Unwirksamkeit des Gegenteils von Schatten).

Wer dies *nicht* voraussetzt, wer stattdessen Newtons Satz (K)^W voraussetzt, wird das neue Experiment anders interpretieren. Er wird sagen, dass das Goethespektrum nicht aus dem Schatten entsteht, der durchs Prisma fällt – sondern aus dem weißen Licht, das am Schattenwerfer des Stegdias vorbeiläuft.¹⁰ Dies

Licht (so die newtonische Orthodoxie) wird vom Prisma zerlegt, in die verschiedensten Richtungen abgelenkt und schließlich auf dem Schirm zu einem spektral komplizierten Muster gemischt: zum Goethespektrum. In der Tat, Newtons Theorie von der Heterogenität des weißen Lichts wird mit Goethes Versuchsergebnis spielend fertig.¹¹

Fein – aber umgekehrt geht's genauso; nach exakt demselben Strickmuster wird die Theorie von der Heterogenität des Schattens spielend mit Newtons Spektrum fertig. Dies Spektrum (so die ketzerische Idee) entsteht nicht etwa aus weißen Lichtstrahlen, die durch den Spalt aufs Prisma fallen, sondern aus Schattenstrahlen, die den dunklen Backen des Spaltdias entspringen, durch Newtons Prisma vom Weg abgelenkt werden und sich auf dem Schirm zu einem komplexen Muster mischen.¹²

Was ich eben angesichts zweier Experimente skizziert habe, gilt allgemein. Einerseits gibt es eine *theoretische* Dualität bei den optischen Erklärungen, Theorien und Beweisen:

(*) Zu jeder newtonischen Erklärung irgendeines prismatischen Experimentes mithilfe monochromatischer Lichtstrahlen existiert ein duales Gegenstück (das durch Vertauschung der komplementären Farben sowie der Rolle von Licht und Finsternis aus der ursprünglichen Erklärung hervorgeht – so wie z.B. die umgedrehte Äquivalenzthese (Ä)^S aus ihrem newtonischen Gegenstück (Ä)^W hervorging).

Andererseits ist das gesamte Gebiet der prismatischen Farbphänomene von einer *experimentellen* Dualität durchzogen:

(**) Zu jedem prismatischen Experiment aus Newtons *Opticks* (1704) gibt es ein duales Gegenstück (das durch Vertauschung der komplementären Farben sowie der Rolle von Schwarz und Weiß aus dem ursprünglichen Experiment hervorgeht).

Goethe hat das geahnt, konnte es aber nicht für alle Experimente Newtons durchexerzieren. Heute sind wir weiter. Zwar sind bislang längst nicht alle newtonischen Experimente umgedreht worden; aber zusammen mit Ingo Nussbaumer sowie den Physikern Matthias Rang und Johannes Grebe-Ellis bin ich mir einigermaßen sicher, dass es gehen muss. Insbesondere ist es gelungen, Newtons hochberühmtes – und hochkompliziertes – *«experimentum crucis»* umzudrehen.¹³ Und das ist immerhin sein wichtigstes Experiment; zeitweise hat er die-

10 Ähnlich schon Isaac Newton: *Opticks* (Anm. 3), S. 104 (= Book I, Part II, Proposition VIII, Problem III).

11 Details in Olaf Müller: Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma. In: Stefan Glasauer u. Jakob Steinbrenner (Hg.): *Farben*. Frankfurt a. M. 2007, S. 64–101, hier Abschnitt 7 sowie Farbtafel III (nach S. 190). Die Anhänger Newtons müssen z.B. behaupten: $P = B + T + Y + R = W - G$.

12 Details ebenda Abschnitt 8 sowie Farbtafel IV (nach S. 190). Wer diese unorthodoxe Theorie vertritt, muss z.B. behaupten: $G = Y + R + B + T = S - P$.

13 Siehe Matthias Rang u. Olaf Müller: Newton in Grönland. Das umgestülpte *«experimentum crucis»* in der Streulichtkammer. In: *philosophia naturalis* 46 (2009), S. 61–114. [Im Netz unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:11-100187051>]. Eine Version des dort beschriebenen Experiments wurde von Matthias Rang am 21.9.2010 vor dem Workshop *experimentum lucis* an der HU Berlin vorgeführt. Eine andere Variante hat Ingo Nussbaumer am 17.6.2009 in meinem wissenschaftsphilosophischen Kolloquium an der HU gezeigt. Verwandte Experimente bietet ein atemberaubender Experimentalfilm des schwedischen Physikers Sällström. Siehe Pehr Sällström: *Monochromatische Schattenstrahlen*. Ein Experimentalfilm. Kassel 2010 (dreisprachige DVD; Englisch, Deutsch, Schwedisch).



Abb. 8. Goethes Vollspektrum. Von oben nach unten sieht man Gelb, Rot, Purpur, Blau, Türkis, mit fließenden Übergängen. (Photo von Ingo Nussbaumer, zugeschnitten von Matthias Herder).

sem Experiment die gesamte Beweislast seiner Theorie aufgebürdet.¹⁴ Im kommenden Abschnitt werde ich weitere Experimente ansprechen, in denen sich die experimentelle Dualität zwischen Licht und Schatten bewahrheitet.

Doch zuvor will ich kurz einen Einwand beschwichtigen. Halten Sie es für ausgemacht, dass Finsternis nichts sei und dass die neue Theorie daher keine Chance habe, sich empirisch zu bewähren? Zu diesem weiten Feld wäre mehr zu sagen, als mir hier möglich ist. Jetzt nur eine Beruhigungsspielle. Aus heutiger Sicht ist der Einwand völlig berechtigt. Aber die heutige Sicht geht auf Newton zurück, und zu Newtons Zeit war es alles andere als ausgemacht, dass der Finsternis oder dem Dunklen oder dem Schatten keine eigene Rolle bei der Entstehung von Farben zugewiesen zu werden braucht. Natürlich bietet es (und bot es auch zu Newtons Tagen) starken Tobak zu sagen, dass die prismatischen Farben *nur* aus der Finsternis hervorgingen.¹⁵ Doch der damals von Newton angebotene Tobak bot ebenfalls eine Zumutung – eine Zumutung, an die wir uns bloß gewöhnt haben. Versuchen Sie es doch einmal mit einer Entwöhnungskur!

Dazu eine kleine Denksportübung. Was sollen dunkle Schattenstrahlen sein? Lösungsidee: Schattenstrahlen sind das Gegenteil von Lichtstrahlen. Lichtstrahlen lassen sich von undurchsichtigen Sachen unterbrechen, die einen schwarzen Schatten werfen – dunkle Schattenstrahlen lassen sich ebenfalls von undurchsichtigen Sachen unterbrechen, wodurch weiße Schatten entstehen.¹⁶

IV

Kantenspektren und Endspektren sind farbärmere Entwicklungsstufen des Newton- und Goethespektrums

Was ich im vorigen Abschnitt skizziert habe, ist in groben Umrissen seit zweihundert Jahren in der Welt. Obschon es den scharfsinnigsten und faszinierendsten Gedankenkreis der *Farbenlehre* Goethes bietet, wurde es von den meisten Lesern nicht beachtet. Sie konzentrierten sich auf irgendwelche anderen Aspekte der *Farbenlehre*, lobten einiges (zu recht oder unrecht) – und kritisierten allerlei (teilweise zu recht). Die notorischen Kantenspektren zum Beispiel sind Goethes Lesern stärker ins Auge gesprungen als das umgekehrte Spektrum nebst der darauf aufbauenden doppelten Dualität in der Welt der Farben.

Kantenspektren scheinen in Newtons Experiment bzw. in Goethes umgekehrtem Gegenexperiment dann auf, wenn man den Auffangschirm nicht weit

genug vom Prisma entfernt.¹⁷ In diesem Fall können sich die Farben des Lichts (bzw. die des Schattens) hinter dem Prisma nicht weit genug auseinanderbewegen, um ein Vollspektrum mit fünf verschiedenen Farben aufscheinen zu lassen. Stattdessen bleibt die Mitte der aufgefangenen Bilder farblos – weiß bei Newton, schwarz bei Goethe. Nur an den Rändern dieser unbunten Mittelzonen scheinen dann die ersten Farbsäume auf, die sogenannten Kantenspektren – Blau/Türkis oben und Gelb/Rot unten (bei Newton) bzw. in entgegengesetzter Reihenfolge (bei Goethe):

| ZWEI KANTENSPEKTREN NEWTONISCHE REIHENFOLGE | ZWEI KANTENSPEKTREN REIHENFOLGE À LA GOETHE |
|--|--|
| [Schwarz] | [Weiß] |
| Blau | Gelb |
| Türkis | Rot |
| Weiß | Schwarz |
| Gelb | Blau |
| Rot | Türkis |
| [Schwarz] | [Weiß] |

Die farbigen Streifen der beiden Kantenspektren sind zunächst sehr schmal, daher habe ich sie in kleiner Schrift gesetzt. Doch im Vergleich zu den beiden Vollspektren leuchten die Farben der Kantenspektren besonders deutlich, ja rein – insbesondere das Gelb und das Türkis.

Seine eigene optische Lehre vom Licht, der Finsternis und den Farben hat Goethe bei den Kantenspektren anfangen lassen; ohne viel Erfolg.¹⁸ Wer subversiv gesonnen ist, mag sich Goethe zuliebe daran versuchen, eine dritte Theorie zu konstruieren (der zufolge weder Newtons noch Goethes Vollspektrum, sondern die Kantenspektren grundlegend wären). Das ist nicht leicht; ich wüsste nicht, wie es gehen soll. Insbesondere fordert der subversive Plan eine Reaktion heraus, die Max Born auf den Punkt gebracht hat: Wie kann man, wie will Goethe mit kantenspektralen Ansätzen dem newtonischen <experimentum crucis> Rechnung tragen?¹⁹ Lassen wir das; ich möchte den Blick auf etwas anderes freibekommen.

Wer nämlich den Schirm in Newtons Experiment bzw. Goethes Gegenexperiment immer weiter zurückschiebt, der verringert am Ende ebenfalls die Farbenvielfalt der beiden Vollspektren (mit ihren jeweils fünf Farben). Bevor

14 Isaac Newton: A new theory about light and colors (Anm. 3), S. 3078f. Siehe auch Isaac Newton: The correspondence of Isaac Newton. Hg. von H. W. Turnbull. Cambridge 1959ff. Hier Bd. I, S. 187 sowie Bd. II, S. 79f.

15 Jede Art Tobak wurde irgendwann von irgendwem gern geschmaucht – in diesem Fall (kurz nach, aber unabhängig von Goethes Farbenlehre) von einem schottischen Naturforscher namens Joseph Reade, siehe Joseph Reade: Experimental outlines for a new theory of colours, light & vision: with critical remarks on Sir Isaac Newtons opinions, and some new experiments on radiant caloric. Volume 1. London 1816.

16 Details bei Georg Maier: Optik der Bilder. Dornach 1986, S. 148; Matthias Rang: Der helle Schatten. In: Johannes Kühl, Nora Löbe u. Matthias Rang (Hg.): Experiment Farbe. 200 Jahre Goethes Farbenlehre. Dornach 2010, S. 126-127; Matthias Rang: Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. In: Elemente der Naturwissenschaft 90 (2009), S. 46-79, hier S. 53 et passim.

17 LA I 4, §330, §214, §246; LA I 7, S. 48f, 63-65.

18 LA I 4, §§218-242, §§335-338, LA I 5, §109.

19 Max Born: Betrachtungen zur Farbenlehre. In: Die Naturwissenschaften 50 (1963), S. 29-39, hier S. 37. Genau genommen redet Born von Newtons Kreuzprismen-Experiment, aber auf diesen feinen Unterschied kommt es hier nicht an. Born hat übersehen, dass sein Einwand nichts gegen die von Goethes Experimenten gleichfalls nahegelegte (wenn auch von ihm nicht verfochtene) Theorie von der Heterogenität des Schattens ausrichtet; er hat also in seiner Kritik an Goethe dessen wirksamstes anti-newtonianisches Geschütz nicht bemerkt, obwohl es lediglich mit anderer Munition geladen wird als das kantenspektral geladene Geschütz, das Born bemerkt hat. Vergl. Fußnote 13.

Abb.9. Newtons und Goethes Vollspektren im Vergleich. Jeder Farbe des einen Spektrums entspricht – auf gleicher Höhe im Bild – die jeweilige Komplementärfarbe des anderen Spektrums. (Photos von Ingo Nussbaumer, zugeschnitten von Matthias Herder).



Abb.10. Newtons und Goethes Endspektren im Vergleich. Im newtonischen Endspektrum (links) sieht man von oben nach unten: Blau, Grün, Rot, mit wenigen Übergängen und Nuancen. Im goetheschen Endspektrum (rechts) sieht man von oben nach unten die jeweiligen Komplementärfarben: Gelb, Purpur, Türkis mit wenigen Übergängen und Nuancen. (Photos von Ingo Nussbaumer, zugeschnitten von Matthias Herder).

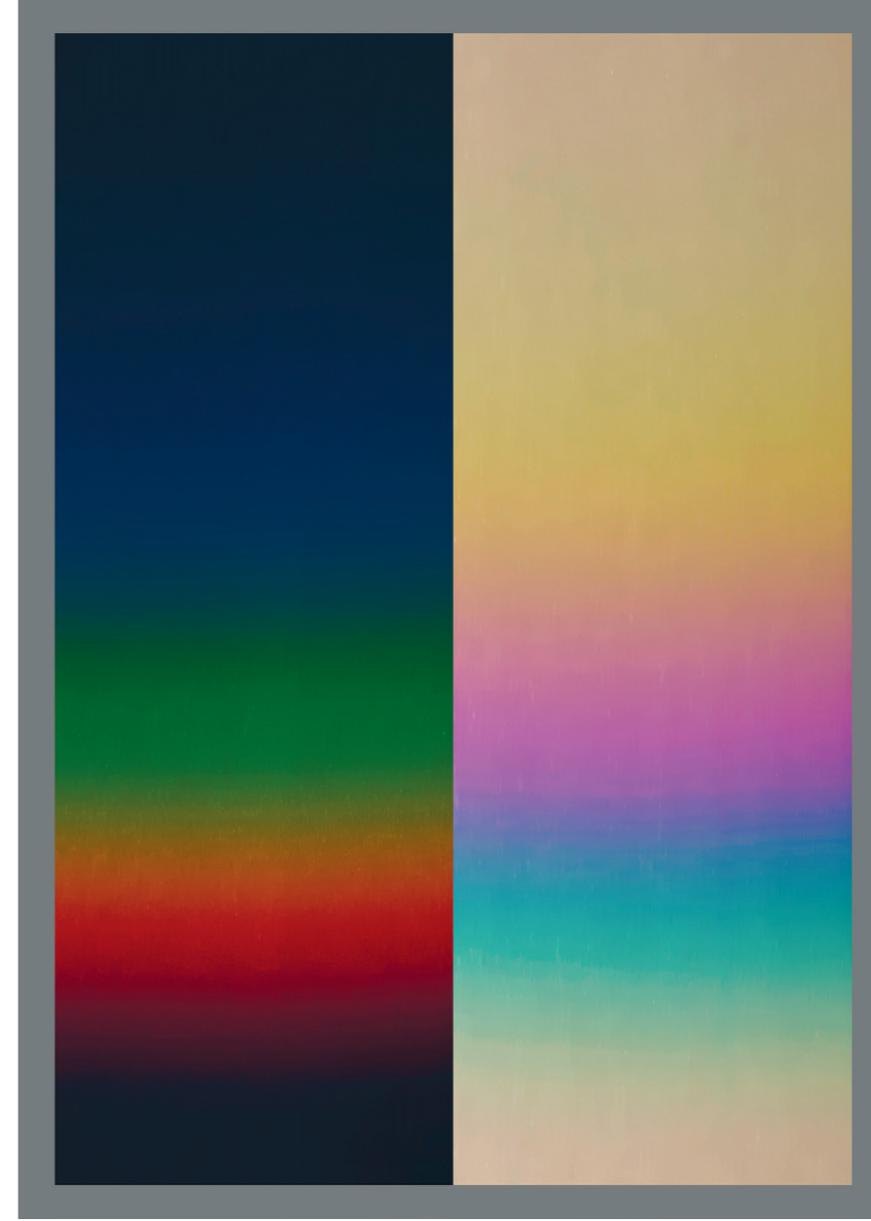
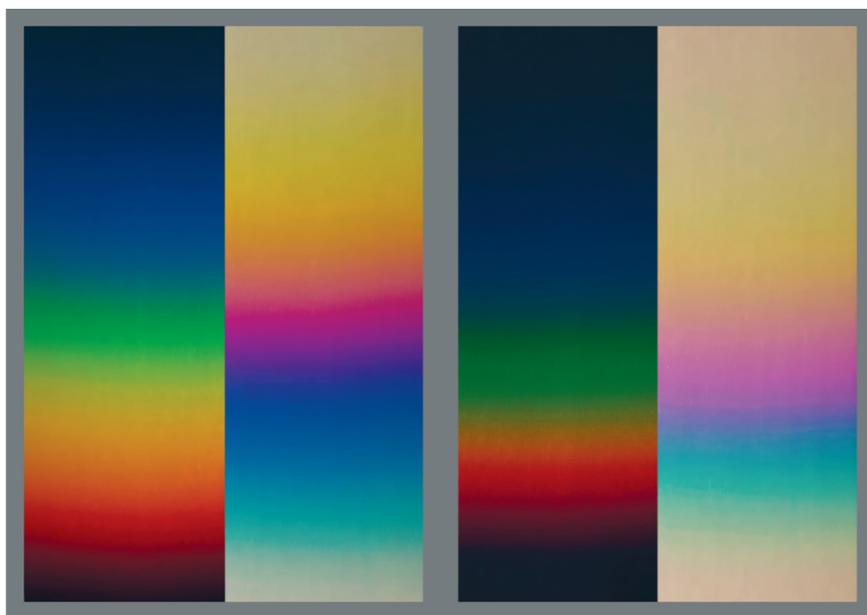


Abb. 11. Beide Voll- und Endspektren im Gesamtvergleich. Links Newtons und Goethes Vollspektrum, daneben die beiden Endspektren. (Photos von Ingo Nussbaumer, zugeschnitten von Matthias Herder).



20 | LA 14, S216, S244, S340.

21 | Mehr dazu in Olaf Müller: Fuchs, Du hast das Gelb gestohlen. Versuch über Goethes diebische Variation eines Experiments von Newton. In: Johannes Köhl, Nora Löbe u. Matthias Rang (Hg.): Experiment Farbe. 200 Jahre Goethes Farbenlehre. Dornach 2010, S. 38-53. [Im Netz unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:11-100183246>].

die Farben ganz im Finstern bzw. Hellen verschwinden, lassen sich nicht mehr fünf Farben blicken, sondern nur noch drei.²⁰ *Abbildung 10* zeigt die beiden Versuchsergebnisse im Vergleich (und *Abbildung 11* zeigt dies noch einmal im Vergleich zu den beiden Vollspektren von vorher). Wenn wir verschwommene Zwischentöne aus der Betrachtung ausgrenzen, ergeben sich diese Farben:

| ENDSPEKTRUM À LA NEWTON | ENDSPEKTRUM À LA GOETHE |
|-------------------------|-------------------------|
| [Schwarz] | [Weiß] |
| Blau | Gelb |
| Grün | Purpur |
| Rot | Türkis |
| [Schwarz] | [Weiß] |

Aus Newtons Vollspektrum verschwinden also die hellen Farben Türkis und Gelb; aus Goethes Vollspektrum verschwinden die dunklen Farben Rot und Blau. Es ist nicht leicht zu sagen, wieso in jedem dieser Endspektren so wenig Farben aufscheinen; meines Wissens bis heute ein ungelöstes Problem.²¹ Doch

da die Sache symmetrisch ist, braucht sie uns im Augenblick nicht zu beunruhigen. Alles was Newtonianer zur orthodoxen Erklärung der beiden Endspektren vorbringen mögen, wird sich im gewohnten Stil umdrehen lassen.

Um die Symmetrien der beiden Spektren in all ihren Entwicklungsstufen (von Kanten- über Voll- zu Endspektren) herauszustreichen, zeige ich Ihnen in *Abbildung 12* zwei Tafeln Goethes, in denen er die sich entfaltenden Spektren in Abhängigkeit vom Abstand des Auffangschirms wiedergibt.

V

Nussbaumer schickt bunte Kontraste durchs Prisma

Ingo Nussbaumer hat im Jahr 1995 eine Reihe weiterer prismatischer Farbphänomene entdeckt, die so sehr überraschen, dass sich die Frage nach einer Ordnung der Farbenwelt noch einmal neu stellt. Sie sind in seinem grandios illustrierten Buch *Zur Farbenlehre* (2008) ans Licht der Öffentlichkeit getreten.²² Newtons Spektrum kriegt abermals Konkurrenz, und diese Konkurrenz wirft einige Schatten auf die orthodoxe Theorie.

Doch keine Sorge, auch die neuen empirischen Erkenntnisse, die ich Ihnen gleich präsentieren werde, widerlegen weder Newtons Theorie noch deren moderne Nachfolger. Im Gegenteil, dem bevorstehenden Gedankengang kommt in nahezu allen Details dieselbe Struktur zu, die sich bislang gezeigt hat. Das bedeutet erstens: Alle neuen Experimente lassen sich mithilfe der herrschenden Lehre erklären; soweit die gute Nachricht für Newtons Gefolgsleute.²³ Zweitens bedeutet es aber, dass die neuen Experimente ebensogut für Alternativtheorien sprechen, die sich nicht mit Newtons Theorie vertragen. Das ist die frohe Nachricht für Goethes Gefolgsleute – genau wie Goethe wollen sie sich nicht dem Diktat der einen, objektiven Theorie beugen, die uns angeblich von der naturwissenschaftlichen Empirie aufgezwungen wird.²⁴

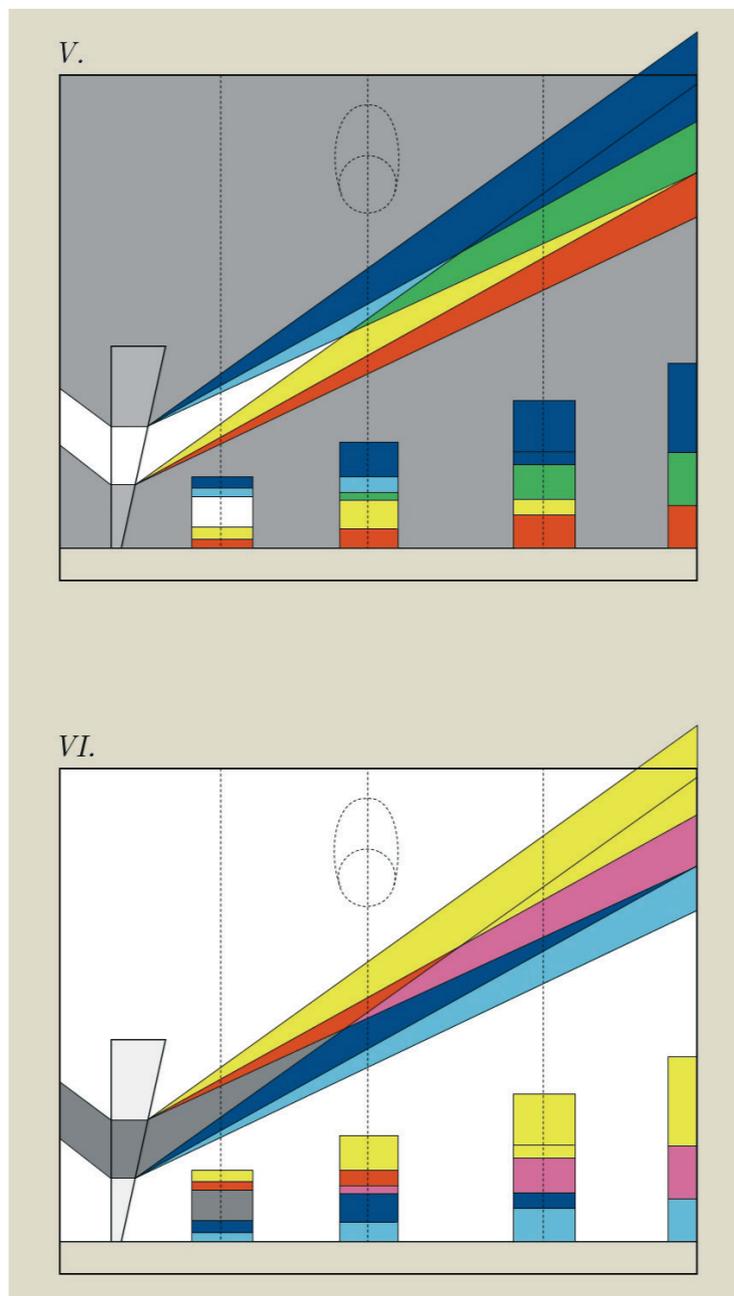
Hier die leitende Idee der neuen Experimente. Nachdem Goethe in Newtons ursprünglichem Experiment die Rollen von Finsternis und weißem Licht vertauscht hat, gibt es zwei Spektren, die zunächst einmal (vor aller Theorie) gleichwertig sind. Newtons Spektrum beruht auf dem Schwarz/Weiß/Schwarz-Kontrast (Spaltdia), Goethes Spektrum auf einem Weiß/Schwarz/Weiß-Kontrast (Stegdia). Nussbaumer wandelt auf Goethes Spuren und fragt: Wie ändern sich die Versuchsergebnisse, wenn wir (anstelle der unbunten Kontrastpaare aus Schwarz und Weiß) mit irgendwelchen bunten Kontrasten experimentieren?

22 | Siehe Ingo Nussbaumer: *Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren.* Wien 2008, S. 172-229.

23 | Mehr dazu in den letzten beiden Teilen meiner nächsten Monographie, die vielleicht den Titel *Goethe mit Newton am Prisma* (voraussichtlich 2014) tragen wird.

24 | Siehe z.B. LA 14, S. 5.

Abb. 12. Entwicklungsstufen der Spektren Newtons und Goethes bei wechselndem Abstand zwischen Prisma und Schirm. Die beiden Tafeln zeigen die Farbentwicklung nach prismatischer Brechung (in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Prisma und Schirm). Betrachten Sie zunächst die Position des Auffangschirms in der Mitte der jeweiligen Tafel, dort, wo ein gestricheltes Oval angedeutet ist. Dort liegt die Stelle, an der Newton und Goethe ihre Vollspektren aufgefangen haben, und dort zeigen sich besonders viele Farbnuancen. – Jetzt schauen Sie weiter links auf die gestrichelte Linie näher am Prisma. Dort reißt eine weiße (bzw. schwarze) Lücke auf, die sich bei sinkendem Abstand immer stärker spreizt; die Lücke ist oben und unten von farbigen Rändern bzw. Säumen eingerahmt, von den beiden Kantenspektren. Wo diese unbunte Lücke genau zum ersten Mal verschwindet, zeigt sich jeweils ein Kantendoppelspektrum. – Bei wieder vergrößertem Projektionsabstand (ganz rechts im Bild) fängt man das Endspektrum auf. Es besteht jeweils aus drei Farben. (Die Abbildung geht auf Goethes Tafeln V und VI zurück. Da die Farben der Goethe-Tafeln ausgebleicht sind, hat Matthias Herder die Tafeln neu gezeichnet. Er hat sie zudem gespiegelt und so gedreht, dass ihre Orientierung besser zu den anderen Abbildungen passt. Goethes Fassung der Tafeln und deren Erklärung finden sich in LA I 7, S. 63–69).



Durch diese allgemeine Frage tut sich ein weites Feld für Experimente auf. Damit wir uns im Wirrwarr der Ergebnisse nicht verlieren, werde ich mich auf die wichtigsten Experimente beschränken (die auch in Nussbauers Arbeit einen besonderen Platz einnehmen): auf Experimente mit Kontrasten aus Komplementärfarben. Das ist ein Spezialfall, in dem besonders aufregende und schöne Ergebnisse herauskommen.²⁵

Was ergibt sich, wenn wir in den prismatischen Versuchen – anstelle von Schwarz und Weiß, Dunkelheit und Sonnenlicht – bunte Komplementärfarben einsetzen? Wie sieht ein Purpur/Grün/Purpur-Kontrast oder ein Grün/Purpur/Grün-Kontrast nach der Reise durchs Prisma aus? Die Frage liegt seit langem in der Luft; schon Goethe scheint sie sich gestellt zu haben – was kein Wunder wäre angesichts der anarchischen Energie, mit der er systematisch nach neuen Phänomenen fahndete. So bittet Goethe die Leser, seine Tafel XII durchs Prisma anzusehen; sie bietet u.a. einen Purpur/Grün/Purpur-Kontrast beim grünen Treffzeichen am rechten Rand auf halber Höhe (Abb. 13). Doch zu Goethes Zeit wäre es schwierig geworden, den fraglichen Experimenten schlagende Beobachtungen zu entnehmen. Der Dichter wusste das und empfahl mehr Leuchtkraft, als seine Tafeln liefern konnten.²⁶ Wie seine Tafel hätte aussehen sollen, zeigt Abbildung 14. Das Experiment funktioniert besonders gut, wenn die Tafel aus eigener Kraft leuchtet – etwa auf dem Computerbildschirm. Und in der Tat, erst seit wir starke künstliche Lichtquellen haben, sind wir mit der Frage nach Brechungsergebnissen bunter Kontraste empirisch weitergekommen.²⁷ Es ist Nussbauers Verdienst, dass er die Frage aufgegriffen und durch sorgfältige Beobachtungen beantwortet hat.

VI

Ein unordentliches Spektrum und eine neue Theorie

Um den anvisierten Versuch vorzubereiten, erzeugt Nussbaumer eine schmale, grüne rechteckige Figur aus prismatischem Licht, die in ein breites Feld aus prismatischem Purpur eingebettet wird. Wie er das tut, erkläre ich in den kommenden beiden Abschnitten. Jedenfalls beginnt er anstelle der newtonischen Ausgangssituation:

²⁵ Dass Nussbaumer seine Arbeit nicht auf diesen Spezialfall beschränkt hat, zeigt z.B. seine Tafel XXVII (Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 139, 164).

²⁶ LA I 7, S. 98.

²⁷ Vergl. aber übernächste Fußnote.

Schwarz
Weiß
Schwarz

mit folgender Ausgangssituation (Abb. 15):

Purpur
Grün
Purpur.

Wer diese Konstellation durchs Prisma schickt, und zwar unter denselben Bedingungen, unter denen Newton in seinem ursprünglichen Experiment arbeitet, bekommt überraschenderweise ein neues Vollspektrum. Rein geometrisch gleicht es dem newtonischen Vollspektrum bis aufs Haar, doch seine Farben überraschen selbst gewiefte Fachleute. Daher kann man es mit Ingo Nussbaumer als *unordentliches* Vollspektrum bezeichnen:

| EIN UNORDENTLICHES VOLLSPKTRUM |
|-----------------------------------|
| [Purpur] |
| Rot |
| Gelb |
| <i>Weiß</i> |
| Türkis |
| Blau |
| [Purpur] |

Eingebettet ist dieses Spektrum in ein purpurnes Feld, das ich in meiner Übersicht eingeklammert habe und nicht immer eigens erwähnen werde (so wie ich auch beim Newtonspektrum nicht immer eigens erwähnt habe, dass sich dessen blaues und rotes Ende außen im Schwarzen verlieren; dies Schwarz wird nicht zum Newtonspektrum hinzugezählt).

Im neuen Spektrum begegnen uns einerseits altbekannte Spektralfarben, nämlich Rot, Gelb, Türkis und Blau. Andererseits taucht dort in der Mitte ganz deutlich eine neue Spektralfarbe auf, die wir bislang kaum als Spektralfarbe akzeptiert hätten: Weiß; ich habe das hervorgehoben.

Wie Nussbaumer nachgewiesen hat, können weiße und sogar schwarze Felder

an die Stelle *jeder* Farbe aus Newtons Spektrum treten (je nachdem, welchen bunten Komplementärkontrast wir durchs Prisma senden). Die beiden unbunten Farben lassen sich nach genau denselben Spielregeln mischen, trennen, homogenisieren, synthetisieren und analysieren wie ihre bunten Kollegen bei Newton.

Mit der letzten Feststellung habe ich angedeutet, auf welche ketzerischen Gedanken uns die neuen Experimente bringen können. Das Ergebnis der Brechung eines purpur/grün/purpurnen Kontrasts bedeutet offenbar, dass wir eine Heterogenität des Grüns behaupten könnten:

(H)^G Grün ist heterogen und besteht aus roten, gelben, *weißen*, türkisen und blauen G-Strahlen (mit beliebig vielen Zwischenstufen).

Warum das? Die Logik entspricht der Logik aus Newtons ursprünglichem Experiment. Newton hat weißes Licht (vor schwarzer Umgebung) durchs Prisma gesandt, das sich spektral in seine Bestandteile auffächerte; jetzt sendet Nussbaumer grünes Licht (vor purpurner Umgebung) durchs Prisma – nach derselben Logik fächert es sich in seine divers refrangiblen Bestandteile auf. Dieser neuen Doktrin zufolge herrscht abermals eine Äquivalenz zwischen Farbe und Refrangibilität – aber schon wieder eine andere:

(Ä)^G Jeder Farbe eines homogenen G-Strahls entspricht eine eigene Refrangibilität, d.h. ein eigenes Maß dafür, wie stark der fragliche G-Strahl beim Weg durchs Prisma abgelenkt wird: $\rho_R > \rho_Y > \rho_W > \rho_T > \rho_B$.

Und so, wie laut Newton die Schwärze aus der Umgebung des weißen Lichts keinen eigenen optischen Kausalfaktor darstellt, so stünde es nach der neuen Doktrin mit dem Purpur:

(K)^G Purpur spielt bei den prismatischen Versuchen keine eigene Rolle. (These der kausalen Unwirksamkeit des Gegenteils von Grün).

Newtons Experiment lieferte nur einen Anhaltspunkt zugunsten seiner Theorie – keinen Beweis, wie ich zu Beginn herausgestrichen habe. Analog auch hier: Das neue purpurn/grün/purpurne Experiment liefert ebenfalls keinen Beweis (diesmal zugunsten der Heterogenität des Grüns), sondern wieder nur einen Anhaltspunkt. Auch deshalb hat sich Ingo Nussbaumer gehütet, die Heterogenität des Grüns in eigenem Namen zu verfechten; ihm geht es zuallererst um die Phänomene, nicht um irgendwelche Theorien.

Abb. 13. «Newtonische Mucken und homogene Lichter». (Vorfassung von Goethes Tafel XII, musterhaft kolorierter Abzug. Radierung von Johann Christian Ernst Müller (1766–1824), mit Aquarellen koloriert von Karl Friedrich Christian Steiner (1774-1840); Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Klassik Stiftung Weimar, Bestand Museen, Inventar-Nr.: GFz 293. Datierung unklar: «1810/18/21/24/25». Die offizielle Version der Tafel nebst Goethes Erklärung findet sich in LA 17, S. 97-99).

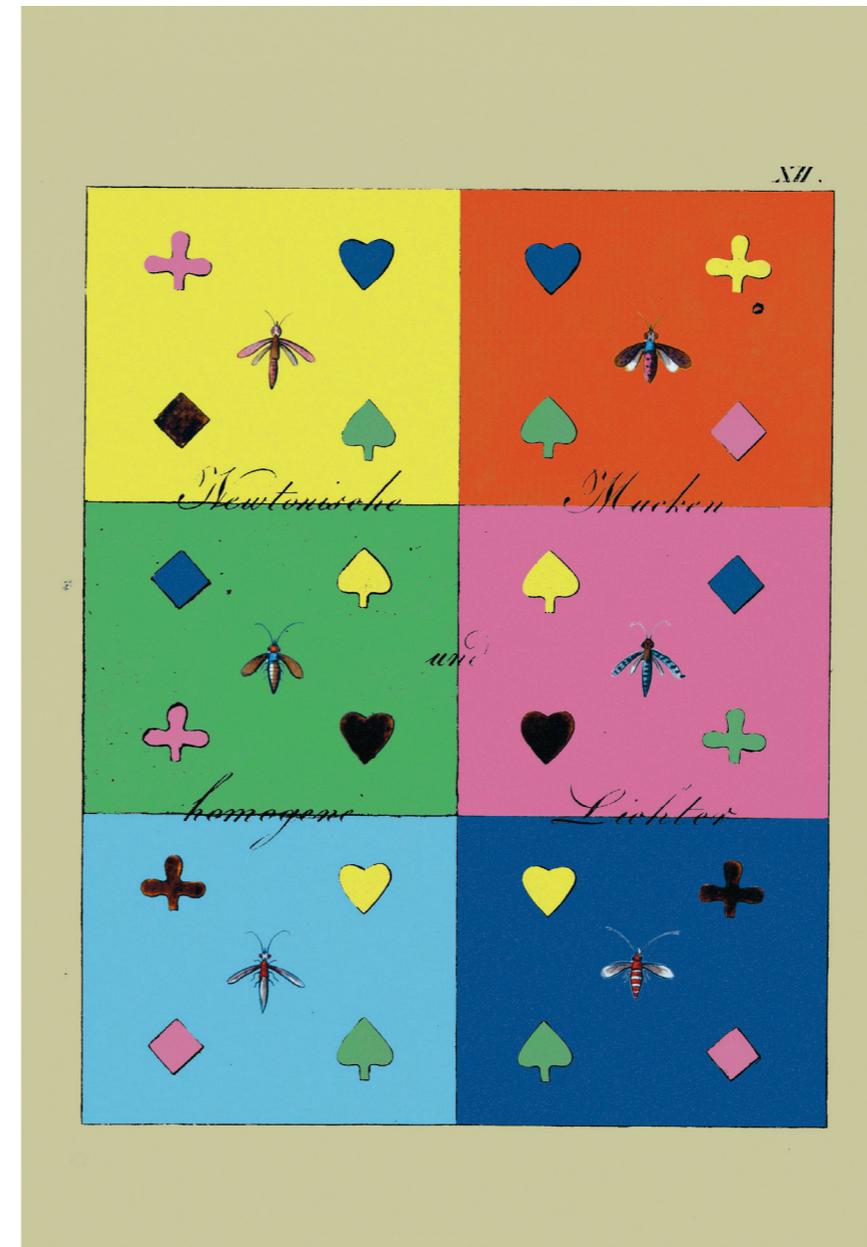
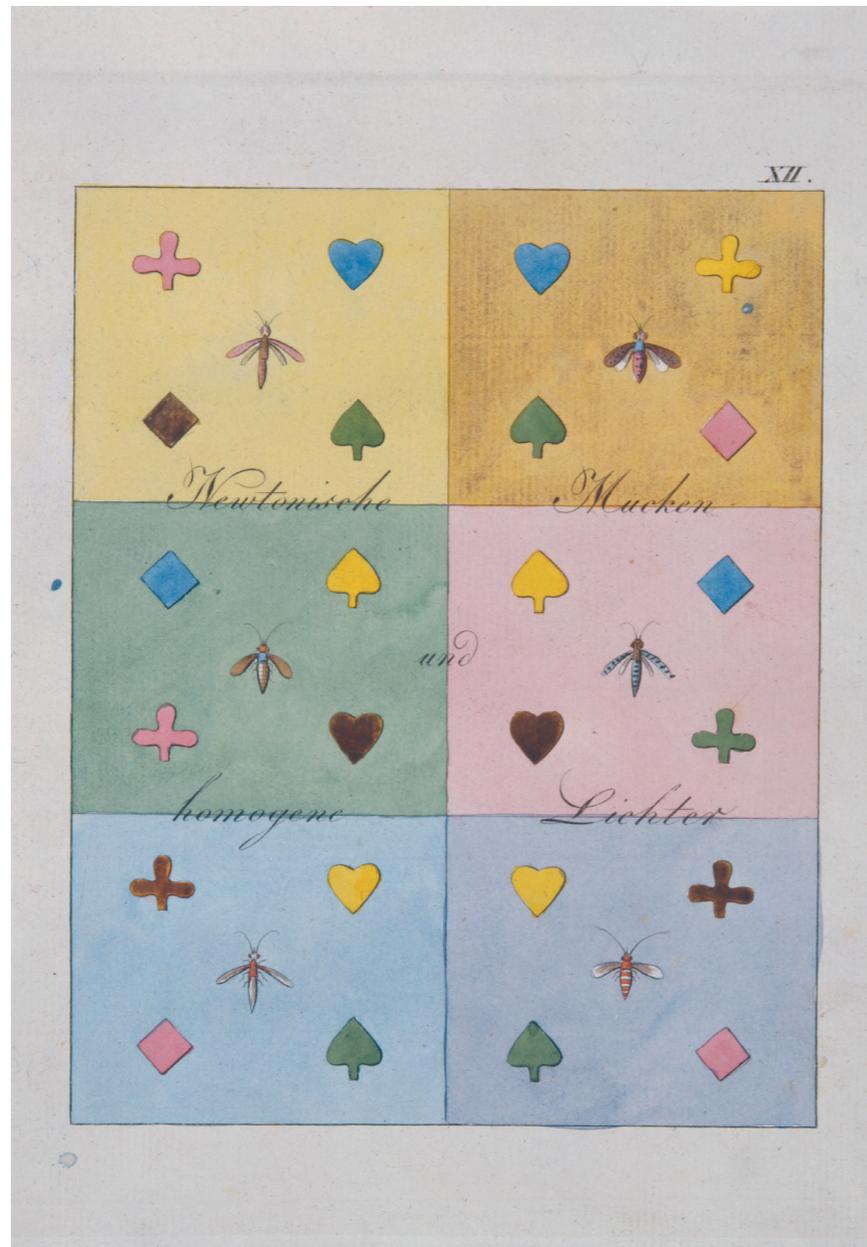


Abb. 14. Goethes Tafel XII in leuchtenderen Farben. Matthias Herder hat die Tafel aus Abbildung 13 neu eingefärbt, und zwar mit exakt den Grundfarben, die Ingo Nussbaumer für seine Experimente benutzt hat. Wer die Abbildung auf den Computerbildschirm bringt und durchs Prisma betrachtet, dem erscheint z.B. das grüne Treffzeichen vor purpurnem Grund (rechts in der Mitte) wie das unordentliche Spektrum aus Abschnitt VI. Hätte Goethe an dieser Stelle Karo statt Treff gespielt, ließe sich das unordentliche Spektrum noch besser erkennen.

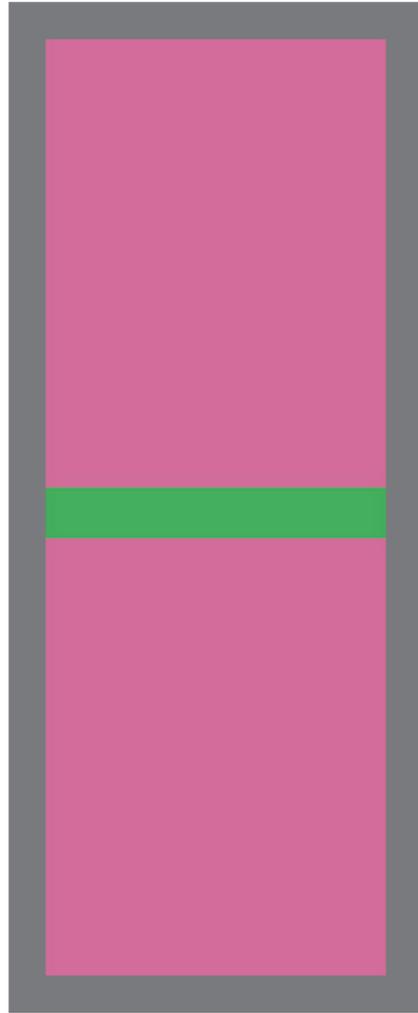


Abb. 15. Grüner Balken vor purpurnem Hintergrund.
(Graphik von Matthias Herder).

VII

Wie sich das neue Spektrum gewinnen lässt

Es gibt (genau wie bei Newtons und Goethes Spektren) subjektive und objektive Experimente zur Erzeugung der neuen Spektren. In den subjektiven Experimenten schaut der Experimentierende durchs Prisma auf den leuchtenden Kontrast, der jeweils analysiert werden soll; dabei werden die Spektren auf die Netzhaut des Betrachters geworfen. Bei den objektiven Experimenten fallen die Spektren auf einen Schirm, den sich mehrere Betrachter zugleich anschauen können. (Das ist die Versuchsanordnung der Experimente, die ich bislang beschrieben habe).

Die objektive Version solcher Experimente (etwa mit grünem Streifen in purpurner Umgebung) lässt sich nur unter großem Aufwand realisieren. Das wäre einfacher, wenn unsere Sonne grün leuchtete und wenn im Innern der verschlossenen Experimentierkammer wie von allein Purpur vorherrschte. (Oder wenn die Wände der Experimentierkammer mit purpurnen Leuchflächen bestückt wären; in freier Natur täte es vielleicht ein dünnwandiger Iglu, der vom pinken Abendrot bestrahlt würde – aber dann fehlte es immer noch an der grünen Sonne).

In der soeben ersonnenen, ungewohnt bunten Welt brauchte Nussbaumer das ursprüngliche Experiment Newtons nur Zug um Zug nachzuvollziehen: Ein grüner Sonnenstrahl würde durch eine kleine Öffnung in die Purpurkammer geleitet, träfe – vor purpurnem Hintergrund – aufs Prisma, würde vom Weg abgelenkt und dabei in seine diversen Bestandteile aufgespalten, die sich auf der gegenüberliegenden Wand auffangen ließen.

Da es in unserer Welt weniger psychedelisch und utopisch zugeht, als wir's uns eben ausgemalt haben, werde ich mich auf subjektive Versionen des anvisierten Experiments konzentrieren.

Am einfachsten erzeugt man die unordentlichen Spektren mit Prisma und Computerbildschirm. Dafür eignen sich die RGB-Röhrenmonitore aus den Windjammerzeiten der Computerei; sie eignen sich jedenfalls besser als viele der jetzt verbreiteten Flachbildschirme. Man definiere sich im Zeichenprogramm ein breites purpurnes Feld und setze in dessen Mitte einen schmalen horizontalen Streifen in Grün (siehe *Abb. 15*). Nun kneife man das linke Auge zu, hebe ein kleines Glasprisma vors rechte Auge und schaue hindurch aufs Bild am Monitor. Das Prisma könnte z.B. so gedreht sein, dass das Bild nach oben gehoben scheint. Dann sieht man bei geeignetem Abstand ein neues Endspektrum aus den Farben, die in *Abbildung 16* gezeigt werden:

| EIN UNORDENTLICHES ENDSPEKTRUM |
|-----------------------------------|
| [Purpur] |
| Rot |
| Weiß |
| Blau |
| [Purpur] |

Dass sich die neuen prismatischen Experimente so einfach mithilfe eines RGB-Monitors durchführen lassen, hat nicht nur Vorteile. Denn da die Farbenvielfalt solcher Monitore aus bloß drei Grundfarben (Rot, Grün und Blau) besteht, also (orthodox gesprochen) aus Lichtstrahlen, die dem rotwelligen, dem grünwelligen und dem blauwelligen Bereich elektromagnetischer Strahlung entspringen, fehlen in ihnen manche Lichtwellen aus dem Sonnenspektrum. Und so könnten die gewonnenen Spektren wie Resultate einer bloß künstlich erzeugten Situation wirken: Artefakte des Computerzeitalters, ohne Bedeutung für die Erforschung der Natur.

Es wäre am attraktivsten, die Experimente mit Sonnenlicht durchzuführen – oder zumindest mit dem Licht einer Lampe, das so ähnlich zusammengesetzt ist wie Sonnenlicht. Nussbaumer hat aus diesem Grund mit dem Licht von Diaprojektoren experimentiert, so wie bei der Wiederholung der Experimente Newtons und Goethes (Abschnitte I und II). Wenn Sie mögen, können Sie im nächsten Abschnitt sehen, wie genial, trickreich und verzwickelt Nussbaumer seinen Versuch aufbaut. Wer hingegen keine Freude am optischen Detail hat, kann den Abschnitt ohne Verluste überspringen. Ich habe mich entschlossen, den Versuch ausführlich zu beschreiben, weil nicht alle Leser Nussbauers die Sache so ohne weiteres nachzuvollziehen wussten.²⁸

VIII

Zwei Diaprojektoren und drei Prismen

Wie versprochen soll jetzt das Experiment aus dem vorigen Abschnitt mit sonnenähnlichem Licht wiederholt werden, mit dem Licht zweier Diaprojektoren.²⁹ Hierfür muss Nussbaumer ein purpurnes Feld erzeugen, das aus dem Licht des ersten Projektors hervorgeholt wird und in das dann ein schmaler

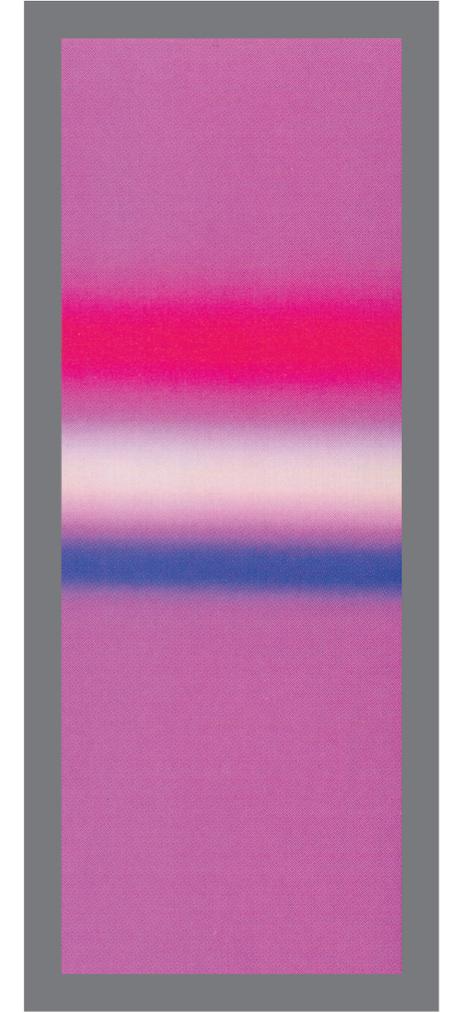


Abb. 16. Ein unordentliches Endspektrum. Blick durchs Prisma auf die Konfiguration aus Abbildung 15 am Computerbildschirm. Von oben nach unten sieht man Rot, Weiß, Blau. Die drei Farbfelder sind im Photo so weit voneinander entfernt, dass der purpurne Hintergrund durchscheint; bei anderen Abständen und Lichtquellen verschwindet dieser störende Effekt. (Photo aus Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 125, zugeschnitten von Matthias Herder).

- 28 | Z.B. Holger Helbig: Nussbaumer, Ingo: Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren (Rezension). In: Goethe-Jahrbuch 125 (2008), S. 340-342.
- 29 | Für das folgende siehe Abbildung 17 und Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 155f. Gäbe es zwei Sonnen, so ließe sich das Experiment auch ohne künstliches Licht durchführen. Durch geschickten Einsatz von Spiegeln hätte man wohl schon zu Goethes Zeit die Erfolge feiern können, die ich vorführen werde.

grüner Farbstreifen (aus dem Licht des zweiten Projektors) einzupflanzen ist. Das purpurne Feld wird in der rechten Hälfte des Experiments geschaffen, der grüne Streifen in der linken Hälfte (Abb. 17).

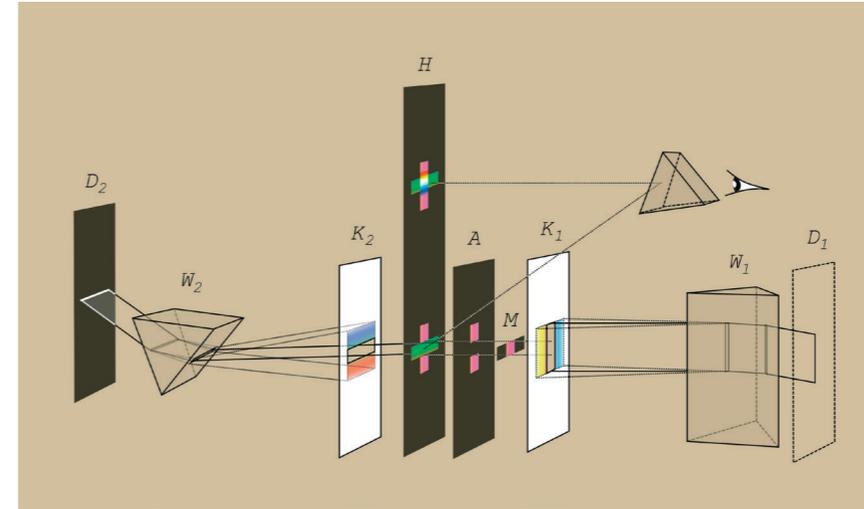
Zunächst zum purpurnen Feld. Für seine Erzeugung benutzt Nussbaumer wieder sein Stegdiagramm, das ganz rechts in Abbildung 17 zu sehen ist (D_1). Wird dem projizierten Licht hochkant ein Wasserprisma W_1 (etwas weiter links in Abb. 17) in den Weg gestellt, so fächert sich das Bild des Stegdiagramms auf und liefert ein Goethespektrum, das sich von rechts (Türkis) nach links (Gelb) entfaltet. In dessen Mitte findet sich ein purpurnes Feld.

Genauer gesagt hat Nussbaumer die Abmessungen des Experiments so eingestellt, dass das Purpur aus dem *Endspektrum* à la Goethe aufscheint (siehe Abschnitt IV). Es ist also nur eingerahmt von einem gelben Feld links und einem türkisen Feld rechts:

| | | |
|------|--------|--------|
| Gelb | Purpur | Türkis |

Ich habe in dieser Übersicht das horizontale Spektrum in fünf Zeilen aufmarschieren lassen, um anzudeuten, dass Ingo Nussbaumer in seinem Experiment aus dem Vollen schöpft und ein wirklich hohes Spektrum einsetzt. Er fängt mit großzügigen Spektren an, weil er es auf präzise abgezielte Ausschnitte aus ihnen abgesehen hat; wären diese Ausschnitte zu klein, so käme im endgültigen Experiment nichts Brauchbares heraus.

Da sich Nussbaumer nur für das Purpur interessiert, muss dessen andersfarbige Einrahmung beseitigt werden. Dafür stellt Nussbaumer vor den Auffang-



schirm A eine senkrecht geschlitzte Schablone aus weißem Karton K_1 . Sie ist so geschnitten, dass sie nur den purpurnen Anteil des Goethespektrums zum Auffangschirm A hindurchlässt, während sie dessen andersfarbige Teile abfängt:

| | | |
|------|--------|--------|
| Gelb | Purpur | Türkis |

Als nächstes braucht Nussbaumer einen grünen Streifen. Hierzu erzeugt er (links in Abb. 17) ein newtonisches Endspektrum (dessen grüne Mitte dann auszuson-

◀ **Abb. 17. Prismatische Herstellung eines Purpur/Grün/Purpur-Kontrasts aus dem Licht zweier Diaprojektoren nach Ingo Nussbaumer.** Links wird ein horizontaler Grünstreifen hergestellt (durch Aussonderung aus einem Endspektrum à la Newton), rechts ein vertikaler Purpurstreifen (durch Aussonderung aus einem Endspektrum à la Goethe). Beide werden so überblendet, dass unten auf dem halbtransparenten Schirm H der gewünschte purpur/grün/purpurne Kontrast vertikal aufscheint und mit einem dritten Prisma ins Auge gefasst werden kann. Bei geeignetem Abstand zwischen diesem dritten Prisma und dem Kontrast zeigt sich (oben auf H) das virtuelle Bild des unordentlichen Vollspektrums: Rot, Gelb, Weiß, Türkis, Blau, in purpurner Umgebung. (Nach Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 125, bearbeitet von Matthias Herder).

dern ist): In den zweiten Diaprojektor führt er ein zweites Dia D_2 ein – sein Spalt-dia. Dessen Spalt arrangiert Nussbaumer vertikal im zweiten Projektor – im Gegensatz zur horizontalen Ausrichtung des Stegdias D_1 im ersten Projektor.

Der eben erwähnte Unterschied in der Ausrichtung der beiden Dias ist fürs weitere entscheidend. Denn aus Gründen, die bald deutlich werden sollen, muss das jetzt erzeugte Spektrum senkrecht zum zuvor erzeugten Goethespektrum stehen. Also muss auch das Wasserprisma W_2 vor dem zweiten Diaprojektor anders ausgerichtet werden (nicht hochkant, sondern vertikal). Dann fächert sich Newtons Endspektrum der Höhe nach auf:

| | | |
|------|------|------|
| Blau | Blau | Blau |
| Grün | Grün | Grün |
| Rot | Rot | Rot |

Ich habe hier gleich drei identische Spalten nebeneinander gesetzt, um anzuzeigen, dass Nussbaumer auch diesmal aus dem Vollen schöpft; ein schlanke-res Farbenband böte ihm nicht genug Material, um in hinreichender Größe den Farbbereich zu gewinnen, mit dem er weiterarbeiten will.

Das geschieht schon im nächsten Schritt; durch eine quer geschlitzte Kartonschablone K_2 sondert Nussbaumer die grüne Mitte dieses Spektrums aus. Resultat – ein horizontaler grüner Streifen:

| | | |
|------|------|------|
| Blau | Blau | Blau |
| Grün | Grün | Grün |
| Rot | Rot | Rot |

Vorhin haben wir Nussbaumer bei der Aussonderung eines vertikalen Purpurfelds über die Schulter geschaut; jetzt bei der Erzeugung eines horizontalen Grünfelds. Der zuerst erzeugte Purpurstreifen steht also senkrecht zum jetzt erzeugten Grünstreifen.

Zum Abschluss müssen beide Farbstreifen in ein Bild integriert werden. Sie werden auf einem raffinierten *halbtransparenten* Schirm H (z.B. aus weißem Seidenpapier) aufeinander losgelassen – der grüne Streifen von links, der Purpurstreifen von rechts. Das Ergebnis ist ein grün/purpurnes Kreuz; wo sich die beiden Streifen schneiden, entsteht ein weißes Rechteck:

| | | |
|------|----------------------------|------|
| | Purpur | |
| | Purpur | |
| Grün | Grün + Purpur = Weiß | Grün |
| | Purpur | |
| | Purpur | |

(Grün und Purpur sind Komplementärfarben und löschen sich aus, wo sie aufeinandertreffen).

Das – jetzt noch weiße – Rechteck soll der Ort werden, an dem sich am Ende im Experiment ein grüner Fleck (in purpurner Umgebung) befindet. Um das zu bewirken, ist ein letzter Kniff nötig: Nussbaumer setzt einen horizontalen Steg M vor die Mitte des vertikalen verlaufenden Purpurstreifens. Da der Steg dieselbe Breite hat wie der grüne Streifen, schneidet der Steg aus dem Purpurstreifen genau die Stelle fort, die sich mit dem grünen Streifen gemischt und ausgelöscht hatte.

Jetzt ist auf dem halbtransparenten Schirm H die Ausgangskonfiguration fürs anvisierte Experiment komplett – ein vertikal verlaufender Purpurstreifen, der in der Mitte grün unterbrochen ist:

| | | |
|------|---------------------------------------|------|
| | Purpur | |
| | Purpur | |
| Grün | Grün + Purpur = Grün | Grün |
| | Purpur | |
| | Purpur | |

Diese Konfiguration fasst Nussbaumer durch ein drittes Prisma ins Auge. Dabei ignoriert er alle übrigen Bereiche des grünen Streifens, also die horizontal verlaufenden Arme des Kreuzes, die aus dessen vertikalem Teil herausragen; sie sind fürs Experiment irrelevant, ich habe sie daher klein gesetzt:

| | | |
|------|--------|------|
| | Purpur | |
| | Purpur | |
| Grün | Grün | Grün |
| | Purpur | |
| | Purpur | |

IX

Vier Entwicklungsstufen des unordentlichen Spektrums

Was sieht der Betrachter, der sein Auge mit einem Prisma bewaffnet und auf die purpur/grün/purpurne Konfiguration schaut, die im vorigen Abschnitt erzeugt wurde? Das kommt darauf an, wie weit er sich von ihr entfernt.

Nehmen wir an, dass sich der Betrachter in großer Entfernung vom Schirm aufstellt. Dann erblickt er das unordentliche Endspektrum, das ich schon beschrieben und in *Abb. 16* gezeigt habe:

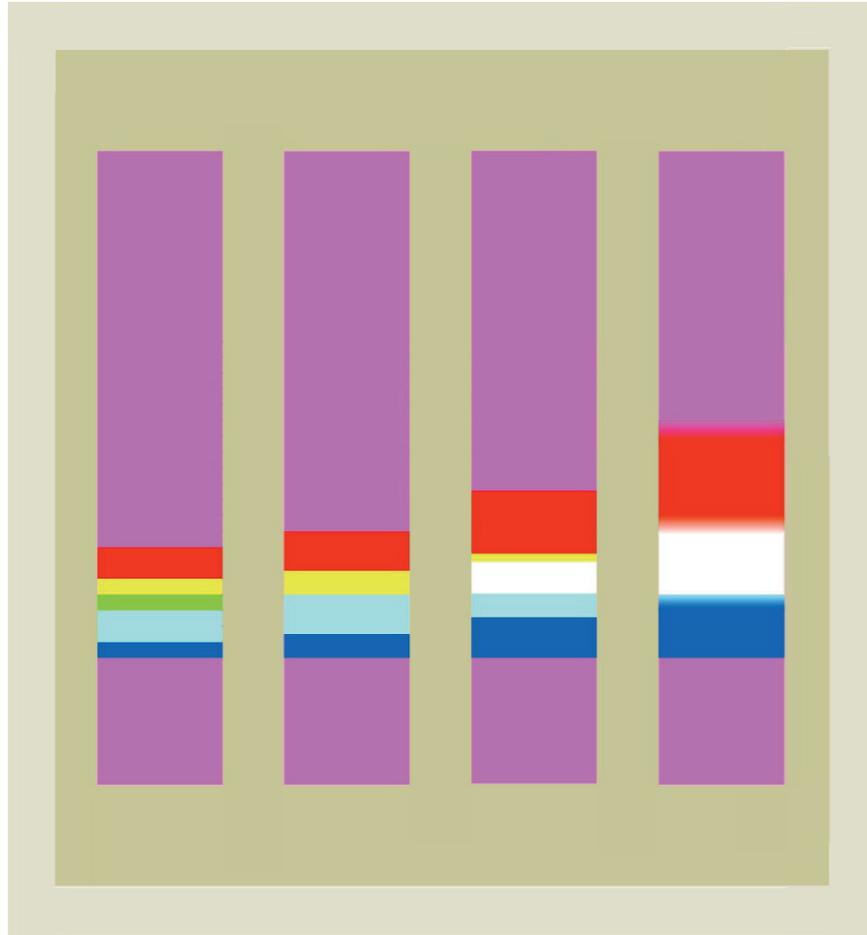
| EIN UNORDENTLICHES ENDSPEKTRUM |
|--------------------------------|
| [Purpur] |
| Rot |
| Weiß |
| Blau |
| [Purpur] |

Aber genau wie beim newtonischen Spektrum und bei seinem von Goethe entdeckten Komplement zeigen sich auch diesmal weitere Entwicklungsstufen; das Endspektrum ist abermals nicht der einzige Fall. Eine Übersicht über die verschiedenen Stufen bietet *Abbildung 18*.

Tritt der Betrachter ganz nah an den Schirm heran, so wird das Bild von der grünen Mitte des Ausgangskontrasts beherrscht. Nur an ihrem Rand wagen sich die ersten Farbsäume hervor – neue Farben, die im Ausgangskontrast nicht vorkommen und die zunächst nur ganz schwach aufscheinen; ich setze diese Farbsäume daher wieder kleiner als den vorherrschenden Rest des Resultats:

| ZWEI UNORDENTLICHE KANTENSPEKTREN |
|-----------------------------------|
| [Purpur] |
| Rot |
| Gelb |
| Grün |
| Türkis |
| Blau |
| [Purpur] |

Abb. 18. Vier Entwicklungsstufen eines unordentlichen Spektrums. Schematische Darstellung (von links nach rechts): Zwei Kantenspektren (getrennt durch grüne Mitte), Kantendoppelspektrum, Vollspektrum, Endspektrum; nur beim Endspektrum sind die verschwimmenden Übergänge zwischen den einzelnen Farbfeldern angedeutet, die sich auch bei den anderen spektralen Entwicklungsstufen zeigen. (Aus Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 130, bearbeitet von Matthias Herder).



30 | Überraschende Kleinigkeit: Dies Farbenmuster enthält genau dieselben Farben wie Newtons Vollspektrum – aber in entgegengesetzter Reihenfolge!

Das sind die zarten Anfänge zweier Kantenspektren.³⁰ Dies Paar von Kantenspektren gewinnt an Gewicht, wenn der Betrachter sich wieder gemachsam vom Schirm entfernt; und im selben Atemzug wird die grüne Mitte langsam kleiner (Abb. 18, ganz links). Schließlich verschwindet die grüne Mitte ganz. Wo sie war, stoßen nun die beiden Kantenspektren exakt aneinander und bilden ein Muster, das ich als *Kantendoppelspektrum* bezeichnen will. (Abb. 18, zweiter Balken von links):

| EIN UNORDENTLICHES KANTENDOPPELSPEKTRUM |
|---|
| [Purpur] |
| Rot |
| Gelb |
| Türkis |
| Blau |
| [Purpur] |

Dies Kantendoppelspektrum ist fragil; es zeigt sich immer nur bei einem einzigen Abstand zwischen dem Betrachter und dem purpur/grün/purpurnem Ausgangskontrast.³¹ Denn wenn der Betrachter noch weiter zurückgeht, so beginnt die gelbe Unterseite des einen Kantenspektrums die türkise Oberseite des anderen Kantenspektrums zu durchdringen und auszulöschen – es entsteht die weiße Mitte eines unordentlichen Vollspektrums (Abb. 18, dritter Balken von links). Das ist das Spektrum, das sich als virtuelles Bild auf dem Schirm H in *Abbildung 17* zeigt:

| EIN UNORDENTLICHES VOLLSTRAHL |
|-------------------------------|
| [Purpur] |
| Rot |
| Gelb |
| Weiß |
| Türkis |
| Blau |
| [Purpur] |

Wollen Sie die Experimente zuhause nachvollziehen? Kein Problem; Sie können das unordentliche Spektrum in allen Entwicklungsstufen mit einem Prisma aus dem Computerbildschirm herausholen – je nach Breite Ihrer Ausgangskonfiguration (gemäß Abb. 15) und je nach Abstand vom Bildschirm marschiert vor Ihr prismatisch bewaffnetes Auge die ganze spektrale Vielfalt, die ich in diesem Abschnitt aufgeboten habe.

31 | Genauso fragil ist das Kantendoppelspektrum in Newtons bzw. Goethes Versuchen, das ich bislang nicht erwähnt habe; es markiert jeweils den Punkt, in dem die Kantenspektren ins Vollspektrum umschlagen (siehe Abb. 12).

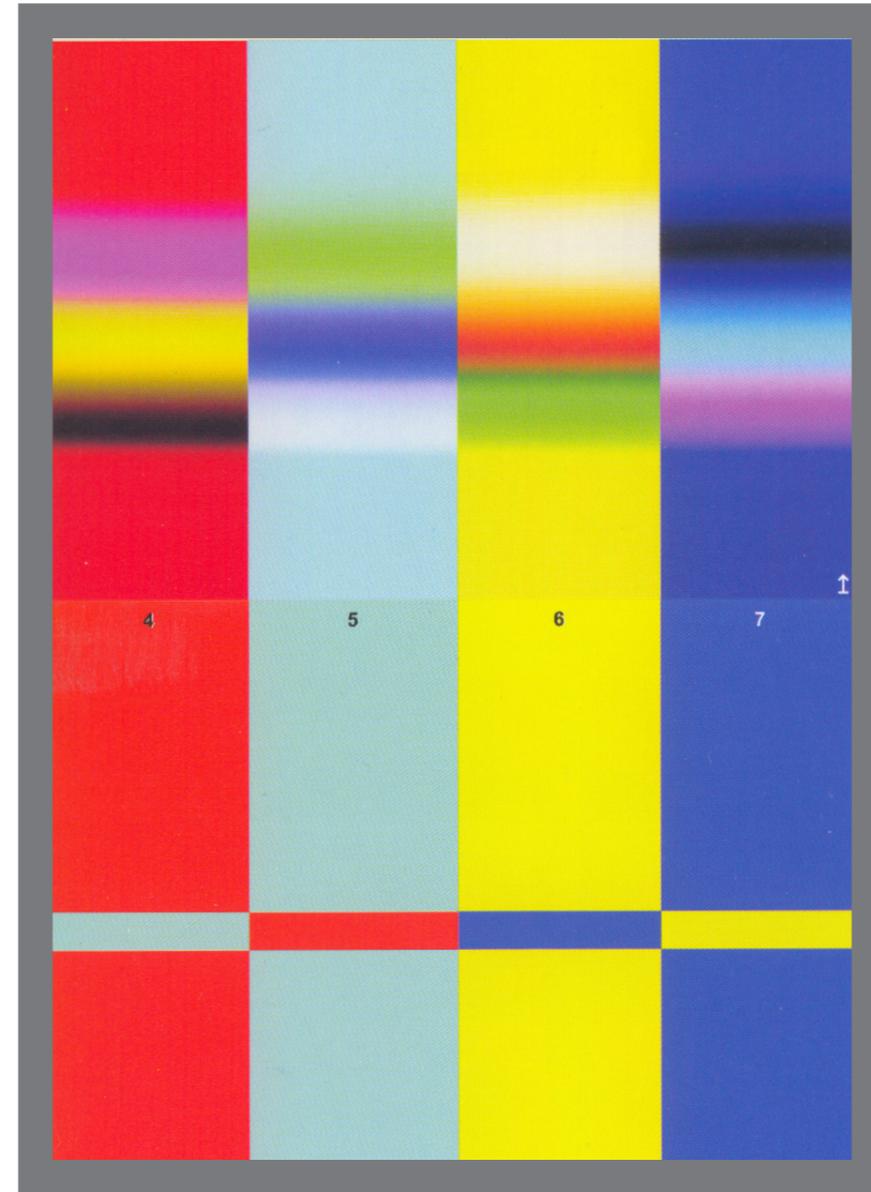
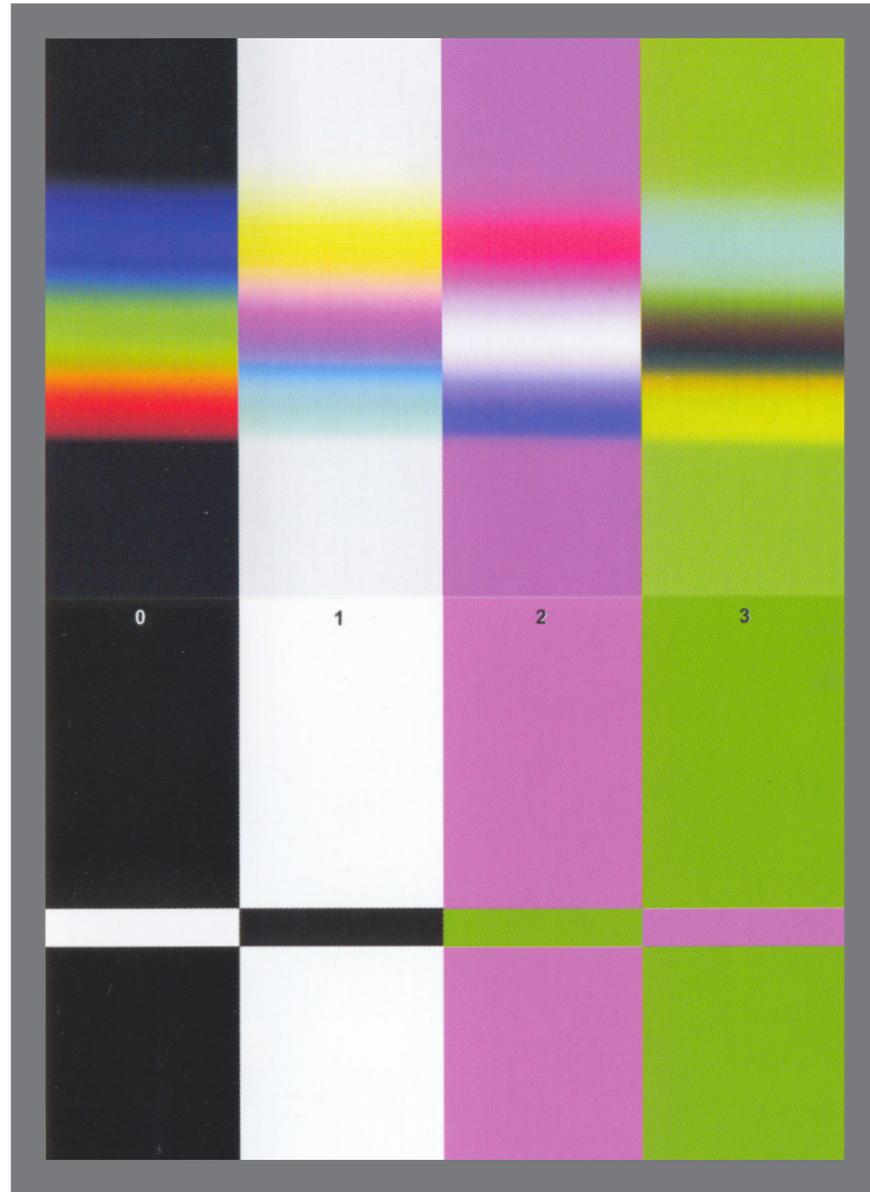
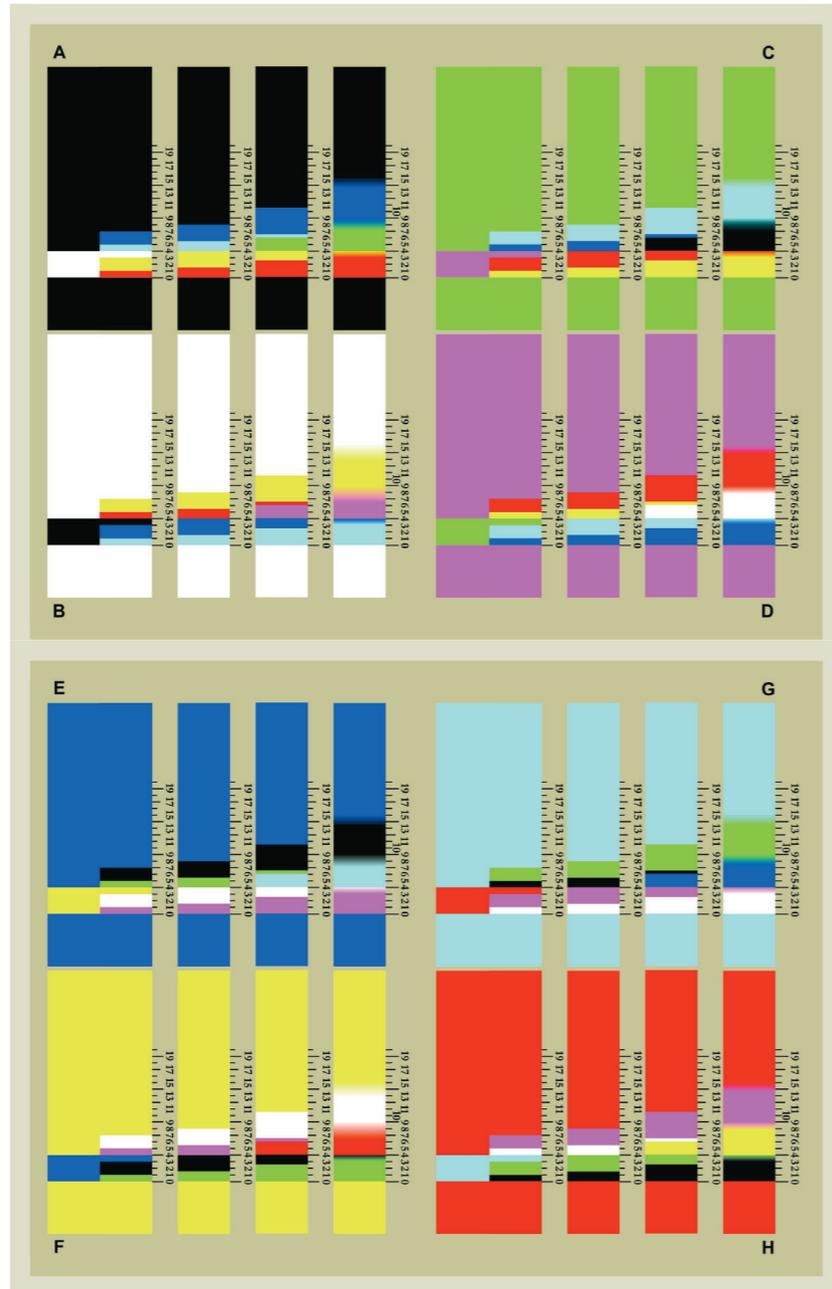


Abb. 19. Acht Endspektren mit ihren Ausgangskontrasten. Links Newtons und Goethes Endspektren, daneben ihre sechs unordentlichen Geschwister. Je zwei nebeneinanderstehende Spektren sind komplementär zueinander. (Photos aus Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre (Anm. 22), S. 132, bearbeitet von Matthias Herder).

Abb.20. Je vier Entwicklungsstufen aller acht Spektren. (Schematische Darstellungen aus Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren (Anm. 22), S. 130f, bearbeitet von Matthias Herder).



Damit ist ein Missbehagen zerstreut, das sich vorhin regte; anders als in Abschnitt VII befürchtet, sind die unordentlichen Spektren kein Artefakt des Computerzeitalters. Im Gegenteil, die unordentlichen Spektren sind ein robustes Phänomen – also ein Phänomen, das sich unter höchst unterschiedlichen Bedingungen blicken lässt. Einerlei, ob wir die fraglichen Ausgangskontraste am Computerbildschirm erzeugen oder aus dem sonnenähnlichen Licht zweier Diaprojektoren – stets zeigen die entstehenden Spektren dieselbe Ordnung, in all ihren Entwicklungsstufen.

X

Die Heterogenität des Purpurs – und so weiter bis in die Philosophie

In den vorigen Abschnitten habe ich diejenigen unordentlichen Spektren behandelt, die das Prisma aus einem grünen Streifen vor purpurnem Hintergrund hervorlockt. Was ergibt sich, wenn man in Nussbauers Experiment die Rollen von Purpur und Grün vertauscht? Es versteht sich von selbst, dass sich Nussbaumer diese Frage gestellt hat. Er hat sofort ausprobiert, was sich zeigt, wenn man einen Grün/Purpur/Grün-Kontrast durchs Prisma schiebt.

Dies Manöver entspricht strukturell genau dem, was Goethe mit Newtons Experiment angestellt hat – Vertauschung von Hintergrund und Vordergrund in der experimentellen Ausgangssituation (Abschnitt II). Wer das damalige Versuchsergebnis Goethes verinnerlicht hat, wird über das neue Versuchsergebnis kaum staunen. Hier wie da verwandelt sich jede Farbe des ursprünglichen Vollspektrums in ihr Gegenteil, in ihr Komplement; das zeigen die zweite und dritte Spalte von links in *Abbildung 19*.³² Hier ein schematischer Vergleich der bisherigen und der neuen Farben:

| UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM PURPUR/GRÜN/PURPUR | UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM GRÜN/PURPUR/GRÜN |
|--|--|
| Rot | Türkis |
| Gelb | Blau |
| Weiß | Schwarz |
| Türkis | Rot |
| Blau | Gelb |

32 | Entsprechend für die anderen Entwicklungsstufen der jeweiligen Spektren, siehe *Abbildung 20*, Feld C.

Nach der inzwischen altbekannten Logik legt dies Versuchsergebnis schon wieder eine neue Doktrin nahe – die Heterogenität des Purpurs (H)^P. Ihr zufolge besteht Purpur aus divers refrangiblen Strahlen verschiedener Farbe, während laut (K)^P das Grün keinen optisch wirksamen Kausalfaktor darstellt. Und die zugehörige Äquivalenzthese (Ä)^P lässt sich mühelos aus der rechten Spalte ablesen.

Und so geht es immer weiter und weiter. Nussbaumer hat auch die anderen Paare von Komplementärfarben (ebenfalls in allen Entwicklungsstufen) durchs Prisma gesandt. Dabei hat er unter anderem vier weitere Spektren entdeckt, wiederum in sämtlichen Entwicklungsstufen (von Kantenspektren über Kantendoppelspektren bis hin zu Voll- und Endspektren). Die vier neuen Endspektren sind oben in *Abbildung 19*, Spalten 4 bis 7 wiedergegeben. Hier ein Schema der zugehörigen Vollspektren:

| UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM ROT/TÜRKIS/ROT | UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM TÜRKIS/ROT/TÜRKIS |
|---|--|
| Purpur | Grün |
| Weiß | Schwarz |
| Gelb | Blau |
| Grün | Purpur |
| Schwarz | Weiß |

| UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM BLAU/GELB/BLAU | UNORDENTLICHES VOLLSPÉKTRUM GELB/BLAU/GELB |
|---|---|
| Schwarz | Weiß |
| Grün | Purpur |
| Türkis | Rot |
| Weiß | Schwarz |
| Purpur | Grün |

Alles das liefert das empirische Baumaterial für vier weitere Alternativtheorien zu Newtons Theorie:

- Heterogenität des Türkis: (H)^T & (Ä)^T & (K)^T.
- Heterogenität des Rots: (H)^R & (Ä)^R & (K)^R.
- Heterogenität des Gelbs: (H)^Y & (Ä)^Y & (K)^Y.
- Heterogenität des Blaus: (H)^B & (Ä)^B & (K)^B.

Wer gut aufgepasst hat, kann sich die hier nur benannten Sätze der fraglichen Theorien auf eigene Faust zusammenreimen; der Wahnsinn hat Methode. Und wer mitgezählt hat, weiß: Insgesamt existieren (neben Newtons Theorie) mindestens sieben genau gleich gebaute Theorien.

Um es zu wiederholen: Zwar widersprechen die neu formulierten *Theorien* eindeutig der newtonischen Theorie (ebenso wie deren modernen Nachfolgern); aber die *Versuchsergebnisse* lassen sich allesamt newtonisch erklären. Schön – nur lassen sie sich genauso gut siebenfach anders erklären. Ich finde das philosophisch interessant. Der amerikanische Philosoph W.V.O. Quine hat im Jahr 1975 die These von der Unterbestimmtheit der Theorie durch die Daten aufgestellt: Experimentelle Daten und Beobachtungen bestimmen demzufolge nicht eindeutig die naturwissenschaftliche Theorie, durch die sie beschrieben, erklärt oder vorhergesagt werden sollen.³³ Quine verzichtete darauf, seine These durch echte Beispiele zu illustrieren. Voilà, jetzt gibt es endlich ein siebenfaches, weitreichendes Beispiel, das eine der prominentesten Theorien aus der neuzeitlichen Wissenschaft betrifft.

Zum Abschluss noch eine praktische Konsequenz des Erreichten: Die von Ingo Nussbaumer entdeckten Ordnungsbeziehungen unter den prismatischen Farben eröffnen neue Einblicke ins Farbenmischen. Bislang waren zwei Arten von Mischungsregeln bekannt, die additive Farbmischung (die aus Newtons Versuchsaufbau hervorgeht) und die sog. subtraktive Farbmischung (die wir von übereinandergelagerten Farbfiltern ebenso wie vom Dreifarben-Druck kennen und deren Regeln sich aus Goethes Versuchsaufbau erschließen lassen). Jetzt kommen sechs neue Arten von Mischungsregeln dazu, siehe *Abbildung 21*.³⁴ Die neuen Regeln werfen vielleicht neues Licht auf die menschliche Farbwahrnehmung. Da wartet viel Arbeit auf die Sinnesphysiologen.³⁵ ■

33 | Willard Van Orman Quine: On empirically equivalent systems of the world. In: Erkenntnis 9 (1975), S. 313-328.

34 | Einige Details in Olaf Müller: Farbspektrale Kontrapunkte: Fallstudie zur ästhetischen Urteilskraft in den experimentellen Wissenschaften. In: Ingo Nussbaumer: Rücknahme und Eingriff: Malerei der Anordnung. Nürnberg 2010, S. 150-171. [Im Netz unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:11-100180136>].

35 | Dies ist die Ausarbeitung eines Vortrags, den ich am 7. Juli 2011 (mit mehr Bildern, anderen Worten, aber gleichen Ideen) bei der Tagung Erkenntniswert Farbe an der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften gehalten habe. Eine lockere Vorfassung erschien als Geleitwort zu Nussbaumers Buch (siehe Olaf Müller: Die Neuvermessung der Farbwelt durch Ingo Nussbaumer: Eine kleine Sensation. In: Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre: Entdeckung der unordentlichen Spektren. Wien 2008, S. 11-20. [Im Netz unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:11-10090241>]). Ich danke den Tagungsgästen für muntere Diskussionen nach dem Vortrag – ebenso wie meinen Mitstreiterinnen und Mitstreitern im wissenschaftsphilosophischen Kolloquium an der HU. Dank an Matthias Herder für endlose Geduld mit meinen Bilderwünschen, an Astrid Schomäcker für Endredaktion nebst Bibliographie, an Katharina Nagel für Hilfe bei der Fahnenkorrektur, an André Karliczek für wunderbaren Perfektionismus beim Satz des Textes – und an Ingo Nussbaumer für alles.

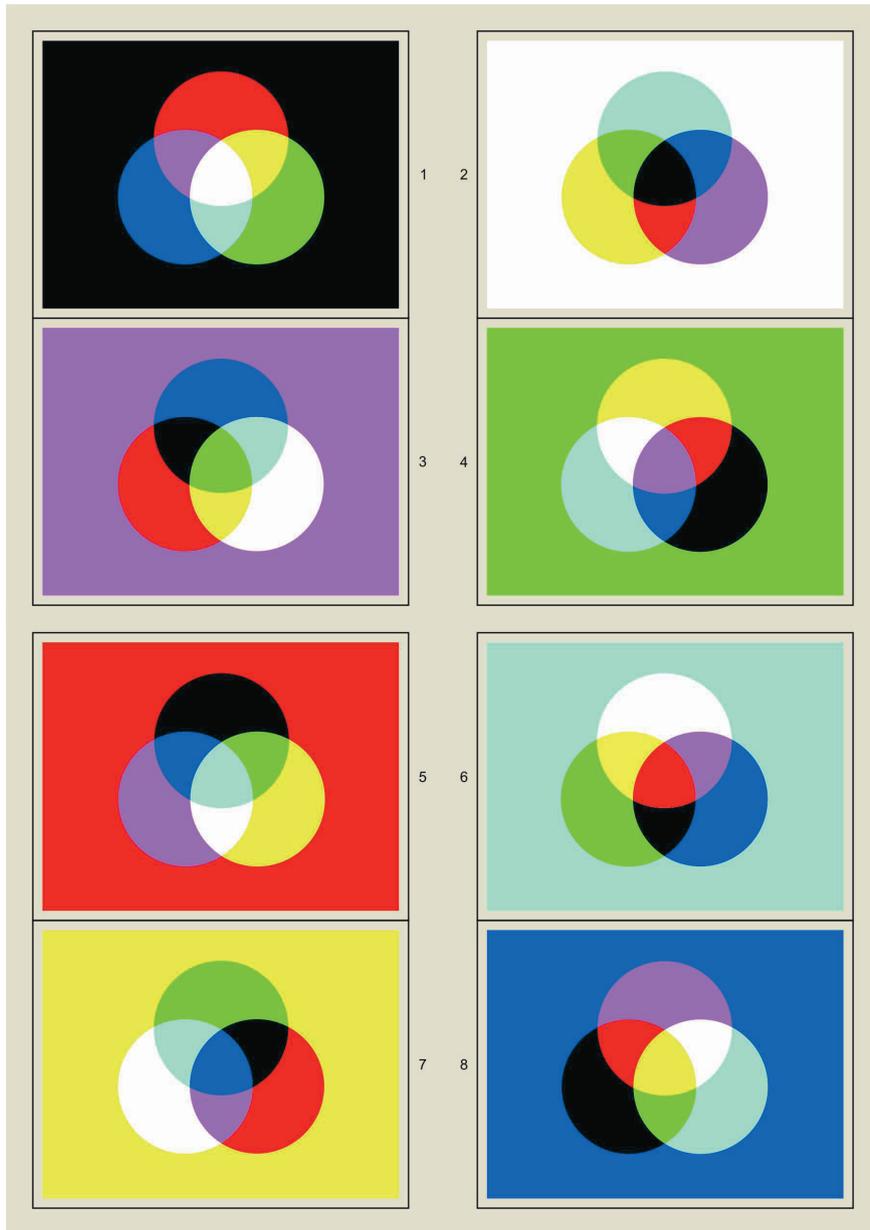


Abb. 21. Acht Mischungsregeln. Oben additive (links) bzw. sog. subtraktive Farbmischung (rechts). Je nach Farbe der Mischungsumgebung kommen noch sechs weitere Mischungsregeln hinzu. (Graphik aus Ingo Nussbaumer: Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren (Anm. 22), S. 133).