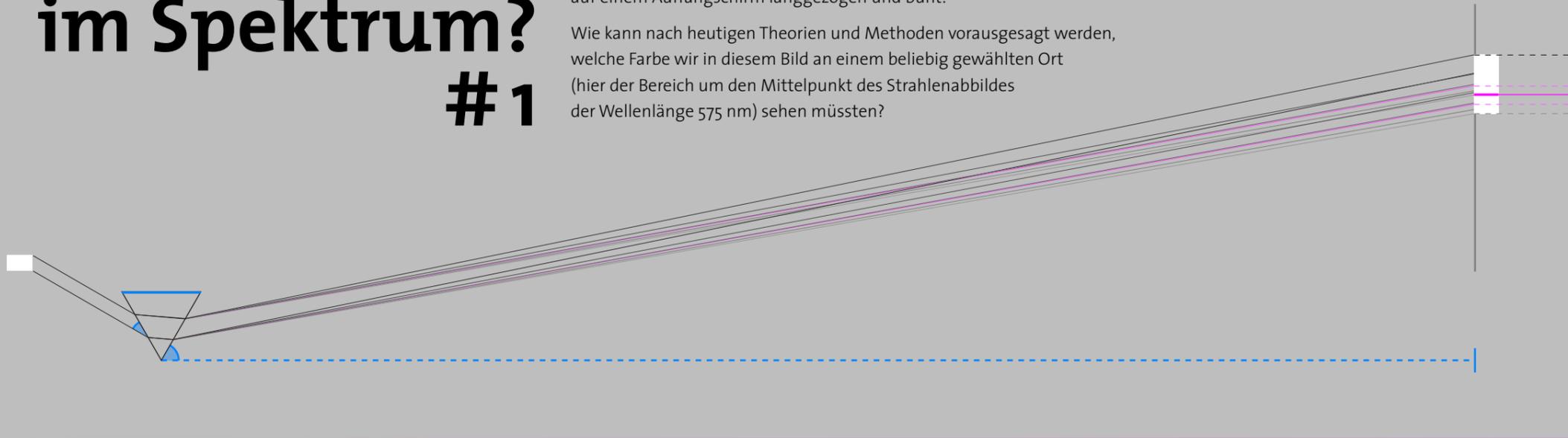


**Was sehen wir
im Spektrum?**

Was sehen wir im Spektrum? #1

Das Bild eines Lichtstrahls, der durch ein Prisma von seinem geradlinigen Strahlengang abgelenkt wird, erscheint in einem abgedunkelten Raum auf einem Auffangschirm langgezogen und bunt.

Wie kann nach heutigen Theorien und Methoden vorausgesagt werden, welche Farbe wir in diesem Bild an einem beliebig gewählten Ort (hier der Bereich um den Mittelpunkt des Strahlenabbildes der Wellenlänge 575 nm) sehen müssten?

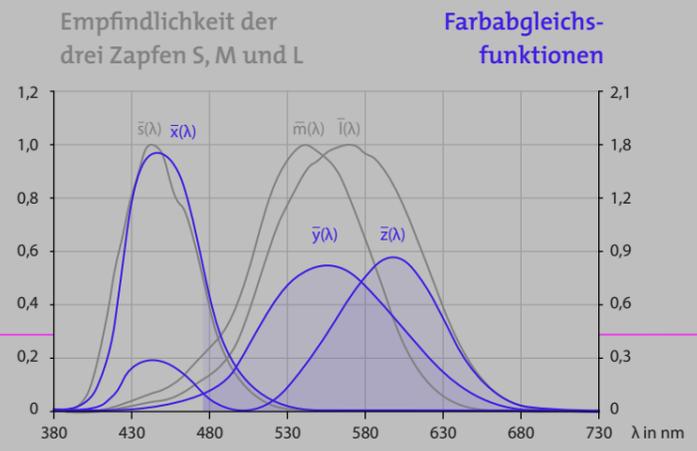
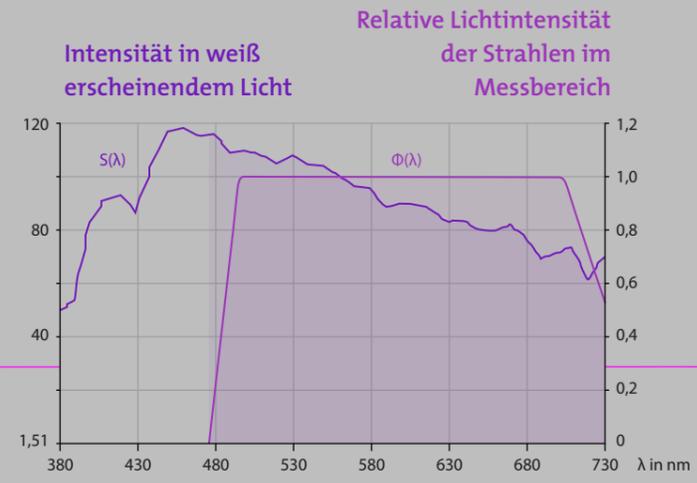
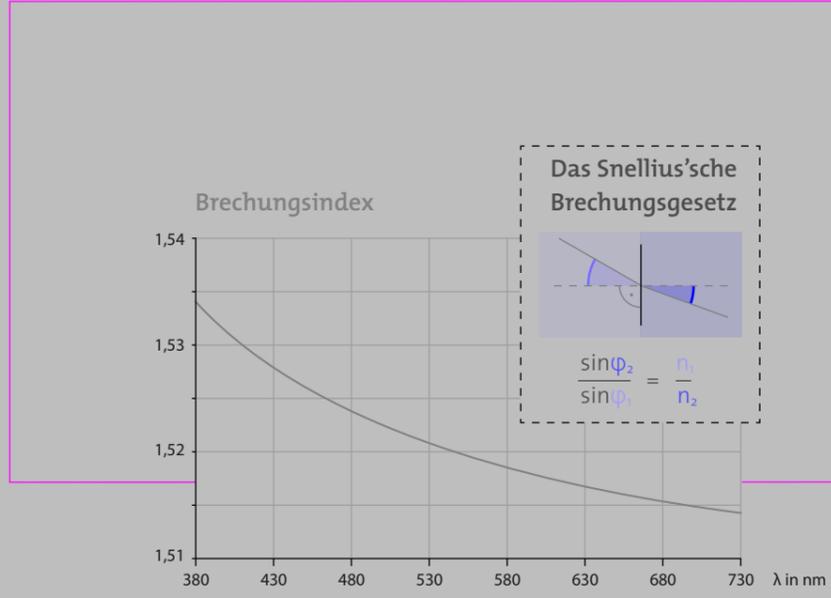


Breite des senkrechten Querschnitts des Lichtstrahls vor Eintritt ins Prisma 0,7 cm und auf dem Schirm 2,3* cm

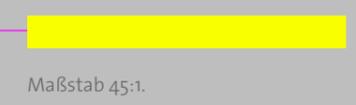
Kanten des Strahls der Wellenlänge 380 nm
 Kanten des Strahls der Wellenlänge 575 nm
 Kanten des Strahls der Wellenlänge 730 nm
 Breite des Messbereichs 0,1 cm

Abstand des Prismas zum Schirm 50 cm
 Seitenlänge des Prismas 3 cm
 Eintrittswinkel des Lichtstrahl ins Prisma 30°
 Winkel der Austrittskante des Prismas zum Schirm 60°

Die Darstellung des Strahlenverlaufs ist im Maßstab 1:2. Wer ein Prisma zur Hand hat, kann das Experiment mit den gegebenen Größen nachvollziehen. * Werte, die auf Basis der gegebenen Werte berechnet wurden.



Simulierte Voraussage der wahrgenommenen Farbe im Messbereich im sRGB-Farbraum
 R: 250* G: 255* B: 0*



Maßstab 45:1.

Der Winkel der Ablenkung eines Lichtstrahls einer bestimmten Wellenlänge im Prisma wird mit zweifacher Ausführung des Snellius'schen Brechungsgesetzes berechnet. n_1 und n_2 stehen für die entsprechenden Brechungsindizes. Der Brechungsindex in der Luft liegt für alle Wellenlängen etwa bei 1. In einem dichteren Medium variiert er je nach Wellenlänge.

Anhand des geometrischen Strahlengangs wird berechnet, wie viel Prozent des Abbildes eines Strahls einer bestimmten Wellenlänge sich mit dem Messbereich überschneidet. Der Maximalwert der Intensitätswerte wurde auf 1 normiert. Eine Lichtquelle sendet nicht zu gleichen Teilen Strahlen der Wellenlängen 380-730 nm aus. Daher muss $\Phi(\lambda)$ mit $S(\lambda)$, der Intensitätsverteilung der Lichtquelle, verrechnet werden.

Auf der Netzhaut unserer Augen befinden sich drei Rezeptoren (Zapfen). Die Empfindlichkeitskurven $\bar{s}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$ und $\bar{l}(\lambda)$ geben die Wahrscheinlichkeit für die Zapfen an, Licht einer bestimmten Wellenlänge zu absorbieren. Die Absorption löst einen Prozess aus, in dem die Reize der Zapfen auf neuronaler Ebene verarbeitet werden und der schließlich zur Farbwahrnehmung führt. Aus historischen Gründen wird in der Farbmeterik nicht mit den Empfindlichkeitskurven gerechnet,

sondern mit den abgebildeten Color Matching Functions (CMFs). Ihre Werte sind per linearer Abbildung ineinander überführbar. Für jede Wellenlänge werden die Intensitätswerte mit den \bar{x} -, \bar{y} - und \bar{z} -Werten der CMFs multipliziert. Aus der Summe der Produkte ergeben sich die XYZ-Werte. Diese können nun in die Werte beliebiger Farbräume überführt werden. Hier werden die RGB-Werte des sRGB-Farbraums berechnet.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{N} \begin{pmatrix} \int_{380}^{730} S(\lambda) \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{730} S(\lambda) \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int_{380}^{730} S(\lambda) \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{pmatrix} \quad N = \int_{380}^{730} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2404542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Brechungsindex: »Refractive Index.« Auf: <http://toolbox.lightcon.com/tools/refractiveindex/> (Stand Mai 2020), (Wähle BK7 Crown Glass).

Intensität weiß erscheinenden Lichts: »CIE Illuminant D65,« Empfindlichkeit der Zapfen: »10-deg fundamentals based on the Stiles & Burch 10-deg CMFs. Stockman & Sharpe,« Color Matching Functions: »CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs.« Auf: <http://www.cvrl.org/> (Stand Mai 2020).

XYZ zu RGB Matrix: »RGB/XYZ Matrices.« Auf: http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html (Stand Mai 2020) Für den genaueren Nachvollzug der Rechnung siehe: »Computing XYZ From Spectral Data.« Auf: <http://www.bruceindbloom.com/>, und János Schanda: »CIE Colorimetry.« In: COLORIMETRY. Understanding the CIE System. Hrsg. von dems. Hoboken/New Jersey: Wiley 2007.

Was sehen wir im Spektrum? # 2

Im realen Experiment lässt sich Folgendes beobachten:
Die wahrgenommene Breite der farbigen Streifen im Bild variiert mit dem Abstand. An der relativen Stelle im Bild, an der wir bei 50 cm Abstand sattes Gelb sehen, scheint das Gelb bei 100 cm im Roten und Grünen zu verschwinden.

Die berechneten RGB-Werte stimmen mit dieser Beobachtung überein.

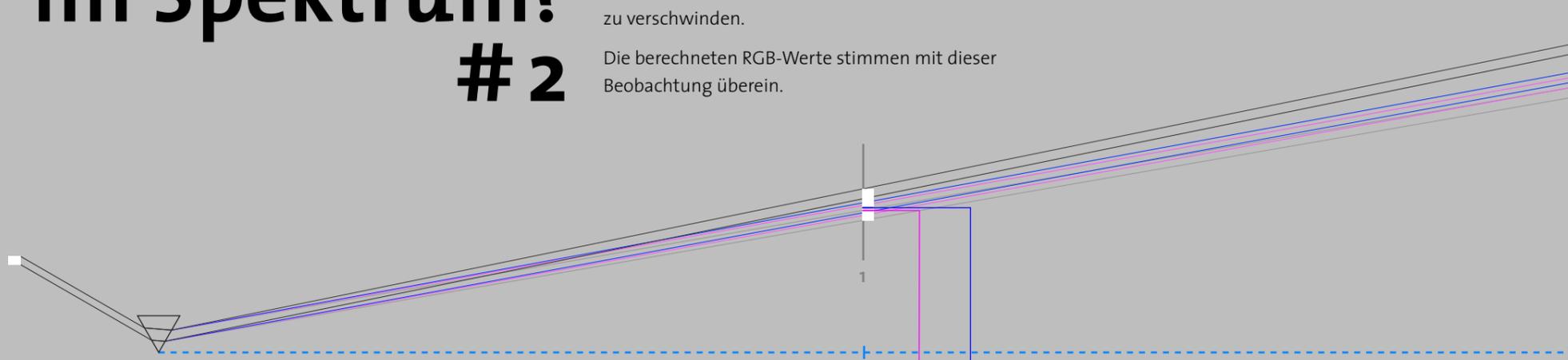
Breite des senkrechten Querschnitts des Lichtstrahls vor Eintritt ins Prisma 0,7 cm und auf Schirm 1 2,3* cm und auf Schirm 2 3,9* cm

Kanten des Strahls der Wellenlänge 575 nm
Messbereiche A_1, A_2 0,1 cm

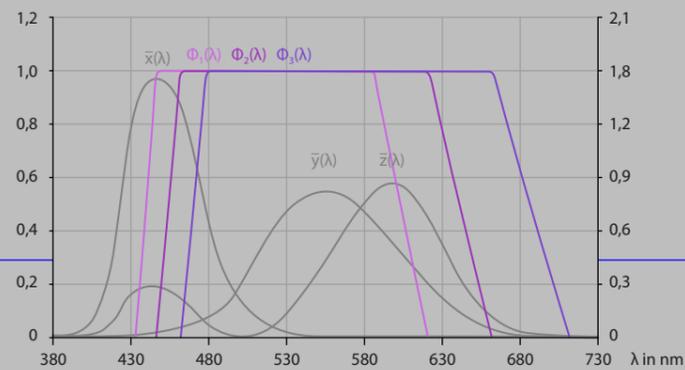
Kanten des Strahls der Wellenlänge 525 nm
Messbereiche A_1, A_2 0,1 cm

Abstand des Prismas zu Schirm 1 50 cm
Abstand des Prismas zu Schirm 2 100 cm

Die Darstellung des Strahlenverlaufs ist im Maßstab 1:4.
* Werte, die auf Basis der gegebenen Werte berechnet wurden.



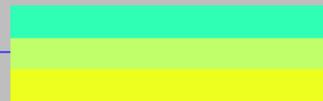
Farbgleich-funktionen
Relative Lichtintensität der Strahlen im Messbereich



Simulierte Voraussage der wahrgenommenen Farben im sRGB-Farbraum

B_1

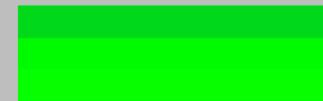
$\Phi_1(\lambda) \rightarrow$	R: 47*	G: 255*	B: 181*
$\Phi_2(\lambda) \rightarrow$	R: 192*	G: 255*	B: 105*
$\Phi_3(\lambda) \rightarrow$	R: 236*	G: 255*	B: 31*



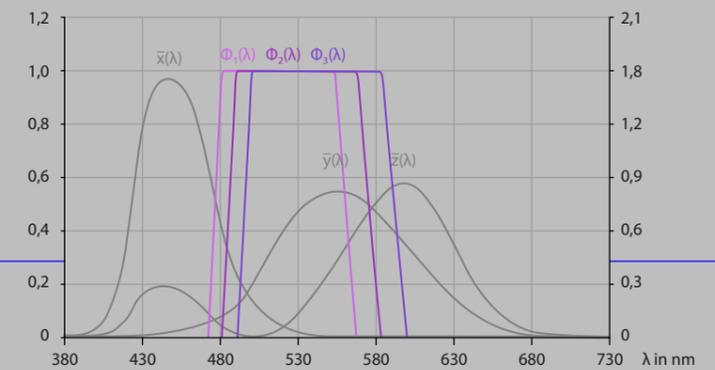
Simulierte Voraussage der wahrgenommenen Farben im sRGB-Farbraum

B_2

R: 0*	G: 217*	B: 25*	$\leftarrow \Phi_1(\lambda)$
R: 0*	G: 250*	B: 0*	$\leftarrow \Phi_2(\lambda)$
R: 6*	G: 255*	B: 0*	$\leftarrow \Phi_3(\lambda)$



Farbgleich-funktionen
Relative Lichtintensität der Strahlen im Messbereich



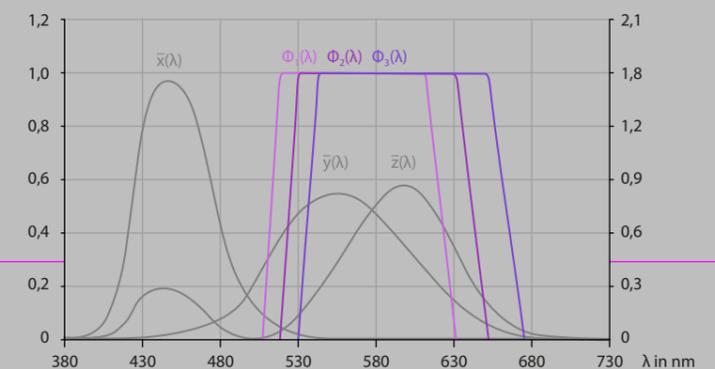
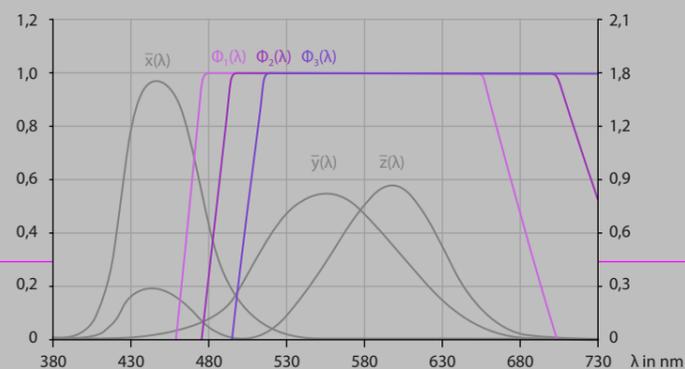
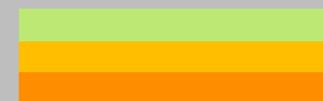
A_1

$\Phi_1(\lambda) \rightarrow$	R: 233*	G: 238*	B: 41*
$\Phi_2(\lambda) \rightarrow$	R: 250*	G: 255*	B: 0*
$\Phi_3(\lambda) \rightarrow$	R: 255*	G: 255*	B: 0*



A_2

R: 189*	G: 232*	B: 0*	$\leftarrow \Phi_1(\lambda)$
R: 255*	G: 191*	B: 0*	$\leftarrow \Phi_2(\lambda)$
R: 255*	G: 142*	B: 0*	$\leftarrow \Phi_3(\lambda)$



Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Philosophie

Hauptseminar: Polarität und Steigerung im Reich der Farben, 51077

Dozent: Prof. Olaf Müller

Wintersemester 2019/2020

(Abgegeben am 3.6.2020)

Über die Variation der Farbvielfalt im prismatischen Spektrum

Der Versuch einer grafischen Vermittlung
zwischen Phänomen und Theorie

Elisabeth Rädler

raedlere@hu-berlin.de

Studiengang: BA Philosophie/Mathematik, 583167

Ein weißer Lichtstrahl wird in einem abgedunkelten Raum durch ein Prisma von seinem geradlinigen Strahlengang abgelenkt. Sein Bild erscheint auf einem Auffangschirm langgezogen und bunt. Die Farbenvielfalt dieses Bildes variiert jedoch mit dem Abstand des Schirms zum Prisma: Steht der Schirm dicht hinter dem Prisma, ist das Bild fast unverändert weiß, nur die Ränder sind hellblau-türkis und dunkelblau bzw. gelb und rot gefärbt. Bewegen wir uns mit dem Schirm vom Prisma weg, verschwindet die weiße Mitte und wird durch eine grüne Mitte zwischen den Türkis- und Gelbtönen ersetzt. Vergrößern wir erneut den Abstand zum Prisma, verschwindet erst das Türkis, dann das Gelb, übrig bleiben ein blauer, ein grüner und ein roter Farbstreifen. [Abb. 1]

Wer sich auf die Suche nach Erklärungen dieses Farb-Phänomens macht, stößt schnell auf Grafiken, die Lichtstrahlen als farbige Linien darstellen oder die Nanometer-Skala im Bereich der sichtbaren elektromagnetischen Wellen mit dem klassischen Farbverlauf eines Blau-Türkis-Grün-Gelb-Rot-Spektrums unterlegen. [Abb. 2] Die qualitative konzeptuelle Anschauung, die in diesen Grafiken

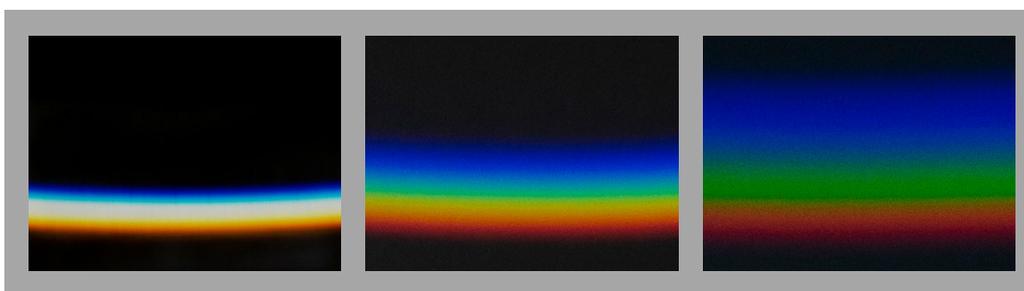


Abb. 1 (oben): *Variation des prismatischen Farbverlaufs*. Private Fotografie eines 0,5 cm breiten, von indirektem Tageslicht beleuchteten weißen Papier-Streifens auf schwarzem Untergrund durch ein Prisma der Seitenlänge 3 cm. Abstand des Prismas zum Untergrund von links nach rechts zunehmend.

Abb. 2 (unten): *Erste Zeile Suchergebnisse zu »Prisma Spektrum«*. Ausschnitt aus einem Bildschirmfoto vom 4.2.2020. Es zeigt die erste Zeile der Suchergebnisse zur Google-Bilder-Suchanfrage »Prisma Spektrum«.



Prisma, spektrum Clipart...
fotosearch.de



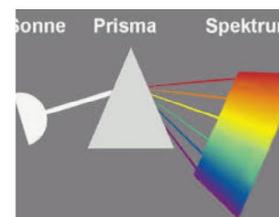
Datei:Spektrum.mit.Prisma.png ...
de.m.wikibooks.org



licht, spektrum, dispersion Clip Art ...
fotosearch.de · In stock



Prisma, Spektrum, dreieckig, Optik ...
alamy.de



Lichtbrechung und Spektralfarben
lehrerfortbildung-bw.de

vermittelt wird, ist schwer mit der variablen Farbenvielfalt des prismatischen Phänomens in Einklang zu bringen. Wie kann so vorausgesagt werden, welche Farbe wir in dem Farbverlauf an einem beliebig gewählten Ort sehen müssten? Ein anderer Ansatz wäre im Bereich der Physiologie nach einer Erklärung des prismatischen Phänomens zu suchen. Die einzige anschauliche Stütze sind hierbei die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten auf der Netzhaut unserer Augen. Wie sind diese angemessen auf das prismatische Spektrum anzuwenden? In einer eigenen Grafik versuche ich, den Transfer zwischen Phänomen und Theorie herzustellen und dabei sowohl die grundlegenden Annahmen der Optik als auch jene der Farbwahrnehmung zu berücksichtigen. Im Folgenden werde ich die grafische Unternehmung historisch motivieren, ihren narrativen Ablauf, sowie die Entwicklung ihrer technischen und gestalterischen Elemente skizzieren und abschließend den Ansatz einer Evaluation hinsichtlich ihrer wissenschaftlichen und philosophischen Relevanz anbieten.

Ein historischer Blick auf die Entwicklung der Theorien zur Optik und Farbwahrnehmung

Über die Wirkrichtung der Sehkraft bzw. des Lichts und den Ursprung der Farben gab es zu gleichen Epochen sehr unterschiedliche Ideen sowie zu weit auseinanderliegenden Epochen sehr ähnliche Ideen: Licht und Farben als von den Augen ausgehende Strahlen, als Schwingungen eines energiegefüllten Äthers oder auch als unterschiedlich schnell durch die Luft rollende Kügelchen. Hier sei nur die Erfolgsgeschichte der Ideen erzählt, die heute noch unsere Anschauung prägen. Die Charakterisierung von Licht als Strahlen, die geradlinig zwischen Auge und betrachtetem Gegenstand verlaufen, ist eine der ältesten erfolgreichen Ideen. So hat sich Euklids Methode, diesen Strahlenverlauf geometrisch zu beschreiben, bis heute durchgesetzt, auch wenn seine sonstigen Annahmen über Richtung und

Ursache der Strahlen verworfen wurden.¹ In der Sprache der Geometrie wurden durch die Jahrhunderte verschiedenste Lichtphänomene plausibel erklärt: der Schattenwurf, astronomische Beobachtungen, die Reflexion von Licht und auch die Brechung von Licht in Wasser oder Glas. Neben der geradlinigen Ausbreitung der Lichtstrahlen ist ein weiteres grundlegendes Gesetz der geometrischen Optik das Snellius'sche Brechungsgesetz. Es beschreibt den geometrischen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausfallswinkel eines Lichtstrahls, der in ein Medium einer anderen Dichte fällt, und wurde im 17. Jahrhundert gleich mehrfach auf unterschiedliche Weise hergeleitet, aber erstmals von Willebord Snell formuliert. Mit Isaac Newton zogen im selben Jahrhundert schließlich auch die Farberscheinungen, die die Brechungsphänomene in Medien wie Glas und Wasser begleiten, in die physikalische Welt der messbaren und berechenbaren Größen ein. In seinen Licht-Experimenten mit dem Glas-Prisma sah er den Beweis dafür, »that Light is not similar, or homogeneous, but consists of *difform* Rays, some of which are more refrangible than others«². Je nach Brechungsgrad könne den Strahlen eine eigene Farbe zugeordnet werden. Farben seien also nicht

»*Qualifications* of Light, derived from Refractions, or Reflections of natural Bodies, (as 'tis generally believed;) but *Original* and *Connate* properties, which in divers rays are divers«³.

Bei Newton taucht so zum ersten Mal das Konzept eines kontinuierlichen Spektrums an Strahlen unterschiedlicher Brechungsgrade und Farben auf.

Mithilfe dieser konzeptuellen Annahme gelang es Thomas Young Anfang des 19. Jahrhunderts, die Beugungsphänomene des Lichts rechnerisch herzuleiten, indem er den heterogenen Lichtstrahlen die Größe der Wellenlänge zuordnete. Young spekulierte außerdem, dass die Anzahl der Lichtrezeptoren auf unserer Netzhaut auf drei limitiert sei »and that each of the particles is capable of being

1 Zum historischen Einfluss von Euklids *Optica* siehe Theisen: »Liber de visu.« S. 50 ff.

2 Newton: »A letter of Mr. Isaac Newton.« S. 3081. Hervorhebungen im Original.

3 Ebd.

put in motion less or more forcibly, by undulations differing less or more from a perfect unison«⁴. Schließlich könne kaum angenommen werden, Newtons Lichtkontinuum würde von unendlich vielen Rezeptoren empfangen.⁵

Zu dieser Zeit gab es noch keine Möglichkeit, die Existenz dreier solcher Rezeptoren nachzuweisen, ihre Annahme erwies sich aber als fruchtbar für die mathematische Darstellung von Farben anhand von drei Werten. So baute James Clerk Maxwell auf diesen Gedanken auf, indem er erste Farbabgleichsexperimente sowohl mit Normalsichtigen als auch mit Farbenblinden durchführte, und feststellte, dass eine beliebige Test-Licht-Farbe mit nur drei primären Lichtquellen (rot, grün und blau) simuliert werden kann.⁶ In seinem *Handbuch der physiologischen Optik* versammelte Hermann von Helmholtz die Theorien und Beobachtungen über Licht und Farben aus den letzten Jahrhunderten und wagte eine erste Darstellung der Empfindlichkeitskurven der drei vermuteten Rezeptoren. [Abb. 3] Ende des 19. Jahrhunderts und im Laufe des 20. Jahrhunderts verteilte sich die weitere Forschung über Licht und Farbwahrnehmung zunehmend auf unterschiedliche Wissenschaftsbereiche. Die Physik kämpfte mit den vermeintlich konkurrierenden Anschauungen von Welle und Teilchen und brachte diese schließlich quantentheoretisch in einen mathematisch beschreibbaren Zusammenhang. Die Wahrnehmungspsychologie beschäftigte sich mit den ebenfalls vermeintlich konkurrierenden Anschauungen der Dreifarbentheorie und der Gegenfarbentheorie Ewald Herings. Diese finden sich heute konzeptuell im

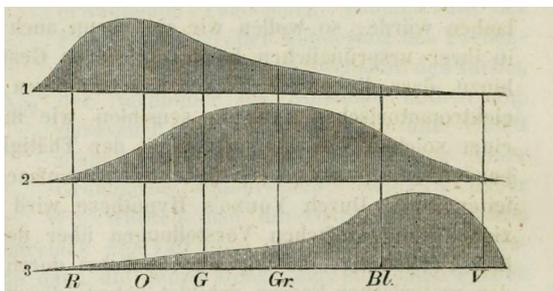


Abb. 3: »Curven [der] Erregungsstärke der drei Arten von Fasern«. In: Helmholtz: *Handbuch der physiologischen Optik*. S. 91, Fig. 119.

4 Thomas Young: »On the theory of light and colors.« S. 21.

5 Vgl. Ebd. S. 20 f.

6 Siehe dazu Maxwell: »On the Theory of Compound Colours.«

theoretischen Ansatz vereint, die weitere Verschaltung der drei Zapfensignale als Kontrast-Code zu verstehen.⁷

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) entwickelte auf konzeptueller Basis der Dreifarben­theorie ein Normfarbsystem zur Messung von Farb­werten. Quantitative Grundlage für ihre Standard-Farb­abgleichsfunktionen (CMFs) waren die Farb­abgleichsexperimente von James Guild und W. David Wright, die zu fast gleicher Zeit zu fast gleichen Ergebnissen kamen. [Abb. 4] Noch bevor die Absorptionsspektren der Pigmente selbst gemessen wurden, war es so anhand der linearen Umformung der CMFs möglich, die Empfindlichkeitskurven der Zapfen zu berechnen, denn »only cone sensitivities that predict equal absorptions for all measured matches can be consistent with the color-matching data«⁸. [Abb. 5]

Das prismatische Phänomen prägte entscheidend die Ausbildung unseres heutigen konzeptuellen und methodischen Wissens über Licht und Farb­wahrnehmung. In dieser erkenntnisfördernden Rolle hatte es spätestens Ende des 19. Jahrhunderts ausgedient. Nun müsste es ein Leichtes sein, erneut einen Blick auf das prismatische Phänomen zu werfen und dieses vor dem Hintergrund unserer Theorien zu interpretieren.

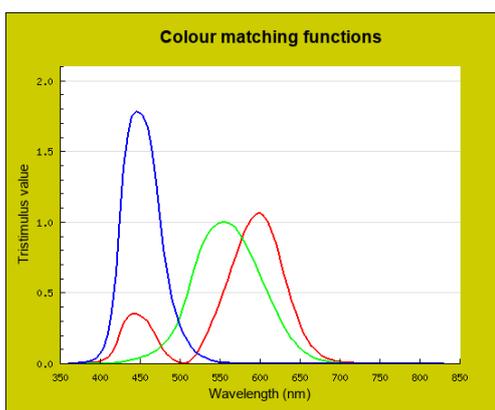


Abb. 4: CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs. Plot von: <http://www.cvrl.org/> (Stand Mai 2020).

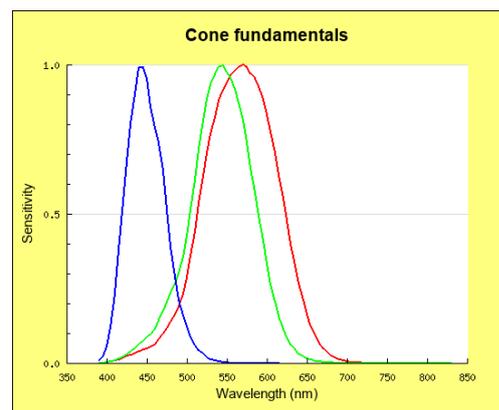


Abb. 5: 2-deg fundamentals based on the Stiles & Burch 10-deg CMFs (adjusted to 2-deg). Stockman & Sharpe (2000). Plot von: <http://www.cvrl.org/> (Stand Mai 2020).

7 Vgl. Brainard, Stockman: »Fundamentals of color vision I.« S. 48.

8 Ebd. S. 37.

Die Schwierigkeit der Transferaufgabe

Nach unserem heutigen Verständnis können Wellenlängen Farben zugeordnet werden, die wir entsprechend der Zapfenempfindlichkeit für die jeweilige Wellenlänge wahrnehmen. So können wir umgangssprachlich unter anderem von roten, orangenen, gelben, grünen, blauen und violetten Wellenlängen sprechen. Jeder Wellenlänge kommt außerdem ein eigener Brechungsindex zu, sodass ein Lichtstrahl bei Brechung am Prisma nach seinen Wellenlängen sortiert wird. Beim Blick durch das Prisma erwarten wir also die roten, orangenen, gelben, grünen, blauen und violetten Wellenlängen in einem kontinuierlichen Farbverlauf wiederzufinden, den Helmholtz auch genauso beschreibt als »vom Roth anfangend, zunächst Orange, dann Gelb, Grün, Blau, endlich Violett«⁹. Die in der Einleitung erwähnten zahlreichen schematischen Illustrationen suggerieren ebenfalls ein solches Bild. Im Experiment wird unsere Erwartung jedoch nur bedingt erfüllt. Nämlich nur, wenn sich das Prisma und der Schirm in einem ganz bestimmten Abstand zueinander befinden. Wie kommt es, dass der Farbverlauf bei zunehmendem Abstand zum Prisma in seiner Farbvielfalt abzunehmen scheint? Müssten die Zwischentöne im kontinuierlichen Verlauf nicht immer deutlicher werden?¹⁰

An welcher Stelle scheitert der Transfer von der Theorie auf das Phänomen? Viele schematische Illustrationen stellen den Lichtstrahl, der im Prisma gebrochen wird, mit einer einzelnen Linie dar. Diese Linie steht dann für eine geometrische Linie, also einen unendlich dünn gedachten Lichtstrahl. Rein theoretisch würde dieser bei Brechung am Prisma von Anfang an die Wellenlängen hübsch nebeneinander führen. Das prismatische Bild müsste dann dem klassischen Farbverlauf entsprechen. Dieses Bild haben aber weder Newton noch Helmholtz gesehen und wird auch nie irgendjemand sehen können.

9 Helmholtz: *Handbuch der physiologischen Optik*. S. 225.

10 Für eine ausführliche Beschreibung des Problems siehe auch Müller: »Fuchs, Du hast das Gelb gestohlen.«

Des nicht-idealen, also endlich breiten Lichtstrahls waren sich beide auch wohl bewusst, als sie die Farbenvielfalt des Spektrums beschrieben, sahen darin aber keine Schwierigkeit. Newton, dessen Lichtstrahl durch ein rundes Loch im Fensterladen geformt wird, schreibt:

»But if these Circles, whilst their Centers keep distances and positions, could be made less in Diameter, their interfering one with another and by consequence the mixture of the Heterogeneous Rays would be proportionally diminished.«¹¹

Newton konnte dabei noch nicht ahnen, dass die Veränderung des Brechungsindex nicht linear ist und sich seine Kreise bei genügendem Abstand also nicht brav Außenkante an Außenkante aufreihen würden. [Abb. 6] Helmholtz war das zwar bekannt,¹² aber auch er, dessen Lichtquelle ein schmaler Spalt ist, war überzeugt,

»dass man die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen [kann], dass sich nur noch solche Bilder decken, welche Farben angehören, für welche die Unterschiede der Brechbarkeit verschwindend klein sind.«¹³

Helmholtz hat sogar in einer solchen Variation der Breite seines Spalts, der ihm als Lichtquelle diente, das Phänomen selbst beobachtet, das uns hinsichtlich seiner eigenen Theorie verwirrt. Er kommentiert es folgendermaßen:

»Wenn man ein prismatisches Spectrum von geringer Länge betrachtet, so dass man das Ganze gleichzeitig vor Augen hat, so erscheint es nur aus vier Farbstreifen zusammengesetzt: Roth, Grün, Blau und Violett, während durch den Contrast mit diesen Hauptfarben ihre Uebergänge fast ganz verschwinden, höchstens

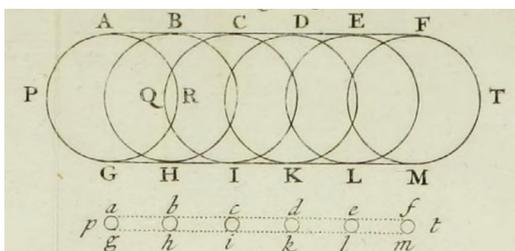


Abb. 6: »Circles [...] of Rays flowing from the same Disque of the Sun«. In: Newton: *Opticks*. Book I. Part I. Plate V.

11 Newton: *Opticks*. S. 45

12 Mit größer werdender Wellenlänge verlangsamt sich die Verkleinerung des Brechungsindex. Das wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts dank Fraunhofers Entdeckung der Absorptionslinien im Sonnenspektrum erkannt.

13 Helmholtz: *Handbuch der physiologischen Optik*. S. 225.

erkennt man noch, dass das Grün an der Seite des Roth gelblich wird. [...] Bei längeren Spectris gelingt es zwar eher die Uebergangsfarben zu erkennen, indessen wird doch immer der Eindruck im Auge durch die Nachbarschaft von so lebhaften und gesättigten Farben, wie sie das Spectrum zeigt, beträchtlich verändert, sodass die Uebergangsfarben nicht recht ungestört zur Erscheinung kommen.«¹⁴

Dieser Erklärungsversuch erscheint noch vor dem Hintergrund plausibel, dass Helmholtz anstatt den Abstand zu ändern, die Spaltbreite verringert hat. So wird das Bild ebenfalls schmaler und die Strahlen verschiedener Wellenlängen haben weniger Platz, um ihre Farbenfülle zu präsentieren. Wie lässt sich aber das Verschwinden der Übergänge erklären, wenn der Abstand des Auffangschirms zum Prisma und damit auch das prismatische Bild vergrößert wird?

Bisher haben wir nur die konzeptuelle Anschauung des kontinuierlichen Farbverlaufs im Phänomen nicht bestätigt gefunden. Diese Anschauung, die Newton als erster formuliert hat, hat Helmholtz mit seinem umfangreichen Werk zur Farbwahrnehmung manifestiert. Seit Helmholtz wurde aber nicht nur die Existenz der bis dahin nur vermuteten drei Zapfen bestätigt, sondern auch ihre Empfindlichkeitskurven berechnet und ein Normfarbsystem entwickelt, in dem wahrgenommene Farben quantitativ dargestellt werden können. Es bleibt also zu überprüfen, ob auch der uns heute zur Verfügung stehende Rechenapparat der Optik und Farbmeterik zu falschen Voraussagen hinsichtlich des Phänomens führt. Durch die Grafik »Was sehen wir im Spektrum?« soll die entsprechende Rechnung nachvollziehbar werden.

Der Vorschlag einer grafischen Vermittlung zwischen Phänomen und Theorie

Die Grafik »Was sehen wir im Spektrum?« soll also nicht die konzeptuelle Anschauung illustrieren, nach der sich Licht durch Brechung am Prisma in einen

¹⁴ Ebd. S. 235.

kontinuierlichen Farbverlauf auffächert. Stattdessen führt die Grafik durch die rechnerische Herleitung eines Farbwerts, der nach den Regeln der Optik und Farbmetrik einem Messbereich im prismatischen Spektrum zugeordnet werden kann. Die Entwicklung der Grafik war in dieser Hinsicht ein Experiment. Ich wusste im Vorhinein nicht, ob die so berechneten Farbwerte dem Phänomen entsprechen würden oder nicht. In beiden Fällen wäre etwas gewonnen. Im Letzteren hätten wir in Kuhn'schen Worten mit einer Anomalie zu tun. Sie würde entweder auf eine zu findende Weise doch noch innerhalb unseres Theoriegebäudes erklärt werden. Oder es würden sich früher oder später weitere Anomalien zu ihr gesellen und das Gebäude zum Einsturz bringen. Der Fall der Anomalie ist nicht eingetreten. Stattdessen stimmen die am Computerbildschirm abgebildeten RGB-Farbwerte ziemlich gut mit den phänomenal beobachteten Farben überein. Wie es zu der ursprünglichen Verwirrung über die Variation des Farbverlaufs kommen konnte und was wir aus ihrer Auflösung mitnehmen können, werde ich weiter unten andeuten. In den folgenden Abschnitten gebe ich vorerst Einblicke in die Entwicklung und Umsetzung der Grafik.

Der narrative Verlauf

Die Grafik besteht bisher aus zwei Teilen, #1 und #2. Die jeweils obere Hälfte zeigt eine Linienzeichnung des Strahlenverlaufs, in der jeweils unteren Hälfte wird die rechnerische Voraussage des Farbwertes an einer gewählten Stelle im Spektrum nachvollzogen. In #1 wird dabei durch alle Schritte geführt, die für diese Rechnung notwendig sind. In #2 wird die Rechnung nur noch verkürzt dargestellt, dafür aber für unterschiedliche Messbereiche und Abstände, und die entsprechenden Farbergebnisse werden zum Vergleich einander gegenübergestellt.

Die rechnerischen Schritte aus #1 ergeben sich aus folgender Überlegung: An einer Stelle im Spektrum kommen Strahlen verschiedener Wellenlängen an. Wie oben geschildert kann die Farbe, in der wir die Stelle wahrnehmen, anhand von

drei monochromatischen Lichtern annäherungsweise simuliert werden. Die CIE hat das Normfarbsystem entwickelt, in dem so ein dreidimensionaler Farb-Wert berechnet werden kann. Das Ziel ist also ein Farb-Wert in einem RGB-Farbraum. Diesen erreichen wir über eine lineare Umformung des dreidimensionalen XYZ-Wertes,¹⁵ die sich aus den \bar{x} -, \bar{y} - und \bar{z} -Werten der CIE-Farbabgleichsfunktionen ergeben. Die X-, Y- und Z-Anteile berechnen sich dabei jeweils aus dem Integral über das Produkt der \bar{x} -, \bar{y} - bzw. \bar{z} -Werte und der Intensitätswerte im Intervall der Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm, dem sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Wellenlängenskala.¹⁶ Die Intensitätsverteilung ergibt sich aus der relativen Verteilung der Wellenlängen im Messbereich und der Intensitätsverteilung der Lichtquelle. Unser Messbereich ist nun ein Ausschnitt des Strahlenabbildes, das hinter einem Prisma auf einem Auffangschirm erscheint. Die relative Verteilung der Wellenlängen in diesem Ausschnitt kann geometrisch bestimmt werden. Physikalische Grundlage dafür sind das Snellius'sche Gesetz und die jeweiligen Brechungsindizes der Wellenlängen. Die Anfangswerte für die geometrische Bestimmung des Strahlenverlauf sind die Seitenlänge des Prismas, die Breite des einfallenden Strahls, dessen Einfallswinkel in das Prisma, sowie der Winkel und der Abstand, in denen Prisma und Schirm zueinander stehen. Den Messbereich habe ich als den Bereich um den Mittelpunkt des Strahlenabbildes einer gewählten Wellenlänge definiert. Welche Strahlen im Messbereich landen, hängt dann nur noch von der Breite des Bereichs ab.

In diesem Rückwärts-Durchlauf sind nun alle Stationen benannt, durch die die Grafik im Vorwärtsgang führt. Die Rechnung wird dabei an einem konkreten Beispiel nachvollzogen. Die Anfangswerte habe ich einerseits so gewählt, dass der nachgezeichnete Strahlenverlauf das Layout nicht sprengt, und

15 Wir drücken den XYZ-Wert im dreidimensionalen XYZ-Raum als den Wert aus, der diesem im strukturgleichen RGB-Raum entspricht.

16 Anschaulich gesprochen wird die Fläche unter der Intensitäts-Kurve mit der Fläche unter den \bar{x} -, \bar{y} - und \bar{z} -Kurven verrechnet.

andererseits so, dass der Aufbau leicht in den eigenen vier Wänden nachvollzogen werden kann (vorausgesetzt man hat ein Prisma der Seitenlänge 3 cm zur Hand). Als Ausgangs-Wellenlänge, die den Messbereich bestimmt, habe ich 575 nm gewählt, sie soll Helmholtz als »Elementargelb« bezeichnet haben.¹⁷

#2 präsentiert die Farbwerte für insgesamt vier Messbereiche, inklusive des Messbereichs aus #1. Jeweils zwei Messbereiche werden durch den Strahlmittelpunkt derselben Ausgangswellenlänge bestimmt, einmal aber dem prismatischen Bild bei einem Abstand von 50 cm und einmal dem Bild beim doppelten Abstand von 100 cm entnommen. Außerdem wird zusätzlich der Farbwert der beiden anliegenden Messbereiche präsentiert und so der unterschiedliche Grad der Farbveränderung an einer relativen Stelle im prismatischen Bild verdeutlicht.

Der Code

Die grafische Darstellung des Strahlenverlaufs und die angegebenen Werte beruhen auf in Python durchgeführten Berechnungen. Prinzipiell habe ich den Code so angelegt, dass alle Anfangswerte variiert werden können.

Die Brechungsindizes, die Intensitätsverteilung weißen Lichts, die Werte der CMFs und die Umrechnungsmatrix sind im Netz frei verfügbare Daten.¹⁸ Die Werte der Matrix, mit der die XYZ-Werte in die RGB-Werte überführt werden, hängt von der Intensitätsverteilung des weißen Lichts ab. Aus pragmatischen Gründen wählte ich daher die Intensitätsverteilung des Standardleuchtmittels D65, die recht nahe an die Verteilung von Sonnenlicht kommt. Die Hauptaufgabe,

¹⁷ Diese Bezeichnung wird in allerlei Texten Helmholtz zugeordnet, ein Originalzitat in Helmholtz Schriften konnte ich aber nicht finden.

¹⁸ Brechungsindizes verfügbar unter Light Conversion, UAB: »Refractive Index«; Intensitätsverteilung und CMFs unter Color and Vision Research Labs: *Colour & Vision Research laboratory and database*; Matrix unter Lindbloom: »XYZ to RGB.« Seit 2006 empfiehlt die CIE neue Standard-Werte zur Berechnung von Farbwerten, diese sind bisher aber kaum etabliert und in der Farbmeterik wird nach wie vor mit den CIE-Werten von 1931 gerechnet, die auf Guild und Wrights experimentellen Ergebnissen beruhen. So auch die Matrix von Lindbloom. Daher führe ich die Rechnung ebenfalls mit den Werten von 1931 durch. Für noch präzisere Ergebnisse müssten die neue Werte verwendet und die Matrix auf Basis dieser selbst berechnet werden.

die ich mit dem Code zu bewältigen hatte, war also die geometrische Berechnung der Intensitätsverteilung in einem gewählten Messbereich und die korrekte Verrechnung aller gegebenen und berechneten Werte.¹⁹

Für jede Wellenlänge muss die Intensität bestimmt werden, mit der sie im Messbereich auftritt. Anschaulich gesprochen überlappen die Strahlenabbilder der Wellenlängen den Messbereich zu unterschiedlichen Graden. Da aber durch die verschiedenen Brechungswinkel, die Strahlenabbilder der Wellenlängen auf dem Schirm unterschiedlich lang sind, darf zwei verschiedenen Wellenlängen nicht derselbe Intensitätswert zugeordnet werden, wenn ihre beiden Strahlenabbilder den Messbereich vollständig überlappen. Deswegen habe ich nicht berechnet, zu wie viel Prozent *des Messbereichs* sie den Messbereich überlappen, sondern wie viel Prozent *ihrer eigenen Strahlenabbilder* sich mit dem Messbereich überlappen. Wellenlängen, deren Strahlenabbilder auf dem Schirm außerhalb des Messbereichs liegen, haben den Intensitätswert 0.²⁰ Die oben erwähnten Integrale zur Berechnung der XYZ-Werte können nun als Summen ausgeführt und in einem letzten Schritt in die RGB-Werte transformiert werden.²¹

Die Gestaltung

Die Grafik ist für die Betrachtung auf einem Bildschirm ausgelegt, da RGB-Werte abgebildet werden, die im Druck nicht angemessen wiedergegeben werden können. Idealerweise hat der Bildschirm eine Größe von mindestens 15 Zoll,

19 Mit der entsprechenden Ausrüstung könnte die Intensitätsverteilung natürlich einfach gemessen werden und es bliebe lediglich die Verrechnung der Werte.

20 Da diese Intensitätsverteilung relativ ist (die Intensitätskurve also gleich aussieht, egal was ihr Maximalwert ist), habe ich sie auf einen Maximalwert von 1 normiert. Unklar ist mir geblieben, wie ich sicherstellen kann, ob diese Skalierung der Intensitätswerte die richtige ist, um die XYZ-to-RGB-Matrix anwenden zu dürfen. Nachdem die RGB-Werte in der richtigen Größenordnung herauskommen, scheint mir nicht ganz daneben zu liegen. Der Unterschied in der Skalierung würde sich auf die RGB-Farbwerte nur so auswirken, dass sie dunkler oder heller würden, im Farbton aber gleich blieben. (Daher ist auch die Berücksichtigung der Intensitätsabnahme mit dem Quadrat des Weges, den das Licht zurücklegt, zu unseren Zwecken nicht unbedingt notwendig). Dennoch freue ich mich über Vorschläge, wie diese Unklarheit aufzulösen ist.

21 Zur Ausführung der Integrale als Summen vgl. Schanda: »CIE Colorimetry.« S. 32.

damit der narrative Verlauf der Gesamtkomposition auf einen Blick erfasst werden kann. Das digitale Format hat aber auch den Vorteil, dass Teile der Grafik am Bildschirm vergrößert werden können. So können sowohl die einzelnen Graphen, als auch das Linienmuster der auf dem Schirm ankommenden Strahlen bildschirmfüllend betrachtet werden.

Die Grafik verzichtet auf stark schematische und vereinfachende Darstellungen, nur der Strahlenverlauf beruht auf der geometrischen Anschauung von Licht als Strahlen geradliniger Ausbreitung. Der Verlauf ist im Gegensatz zu den meisten schematischen Darstellungen der Brechung von Licht am Prisma maßstabsgetreu abgebildet und bietet somit eine Orientierung für die Personen, die das Experiment zu Hause nachstellen.

Der rechnerische Abschnitt setzt die Fähigkeit voraus, Kurven in einem Koordinatensystem zu interpretieren. Der Text bietet den Kontext zu den Kurven und erklärt wie sie in der Berechnung des Farbwerts zusammenwirken. Die Kurven selbst sind möglichst genaue Abzeichnungen geplotteter Kurven.²² Die Grafik ist in der Hinsicht qualitativ quantitativ. Winzige Abweichungen von den tatsächlich berechneten Werten sind wegen der Linienstärke und den interpolierten Werten zwischen den Pfadpunkten nicht zu vermeiden, für den Nachvollzug der Grafik spielen sie aber keine Rolle.²³

Farbe habe ich nur verwendet, um Bezeichnung und Bezeichnetes zu verknüpfen. Dabei reicht es, dass die Farbe lediglich die Blickrichtung steuert. Welcher Winkel der Einfallswinkel des Lichts und welcher der Winkel des Prismas zum Schirm ist, wird aus der Zeichnung selbst klar. Ein weiteres gestalterisches Element, das ausschließlich blickleitende Funktion hat, ist die Linie, die vom Messbereich ausgehend die Koordinatensysteme durchläuft.

22 Die Intensitätskurve habe ich zuvor mit Python geplottet. Die anderen Kurven habe ich denselben Seiten entnommen, die ich in Fußnote 18 nenne.

23 Aus Koordinatensystemen lassen sich keine Werte mit neun Nachkommastellen ablesen, wer also Werte aus Koordinatensystemen abliest, um mit ihnen zu rechnen, kann nur ein ungefähres Ergebnis anstreben.

Erweiterungsmöglichkeiten

Die Grafik besteht aktuell aus den beiden Teilen #1 und #2. Mit dem variablen Code könnten aber noch eine Reihe weiterer Teile erstellt werden. Beispielsweise könnten andere Teile analog zu #2 die Farbwerte und Farbveränderung anderer Messbereiche miteinander vergleichen. Es könnte auch nur der Farbwert eines Messbereichs berechnet werden und dieser dem Farbwert gegenübergestellt werden, der für monochromatisches Licht der Ausgangs-Wellenlänge berechnet würde, die den Messbereich bestimmt. Denkbar wäre auch das Weiterentwickeln der Grafik zu einer interaktiven Grafik, in der die Anfangswerte und Vergleichselemente selbst gewählt werden können, oder die es erlaubt, die Veränderung des prismatischen Spektrums bei unterschiedlichen Schirmabständen mitzuverfolgen.

Eine Evaluation der grafischen Unternehmung

Die Grafik veranschaulicht, dass unsere Wahrnehmung der RGB-Farben, deren Werte anhand des mathematischen Rechenapparats der Optik und Farbmetrik berechnet werden können, ziemlich gut mit der Wahrnehmung der Farben im prismatischen Spektrum übereinstimmen. Feine Abweichungen im Ton sind natürlich möglich, vor allem sagt aber die Grafik die Abnahme der Farbvielfalt mit größer werdendem Abstand des Prismas zum Schirm richtig voraus. Die Aufreihung der Koordinatensysteme mit den vielen verschiedenen Kurven macht dabei deutlich, dass der Farbwert nicht allein durch die Werte bestimmt wird, die einer einzigen Wellenlänge zugeordnet werden können. Er ergibt sich aus der Verrechnung der Werte aller Wellenlängen, die sich im Messbereich tummeln.

So kann insbesondere an #2 der Grafik abgelesen werden, dass eine gelbe Wahrnehmung nur mit einer solchen Intensitätsverteilung der Wellenlängen einhergeht, die gleichermaßen Reize der M- und L-Zapfen auslöst. Je weiter die Strahlen

verschiedener Wellenlängen auseinanderdriften, desto größer wird erst die Wahrscheinlichkeit nur einen der beiden Zapfentypen zu erregen und desto kleiner der Bereich im Gesamtbild, den wir als Gelb wahrnehmen. Dass sich diese Veränderung in der Wahrscheinlichkeit stärker auf die Farbwahrnehmung auswirkt, als es die Kurven vermuten lassen, zeigen erst die berechneten Farbwerte.

Der Gelbanteil im prismatischen Spektrum müsste dennoch ab einem gewissen Abstand wieder zunehmen, nämlich sobald sich nur noch die Strahlenabbilder der Wellenlängen überlappen, die für sich genommen rein rechnerisch zu einer gelben Wahrnehmung führen würden. Hier sprechen wir allerdings nur von den Wellenlängen ungefähr zwischen 565 und 575 nm. [Abb. 7] Für den Anblick der aneinandergereihten Strahlenabbilder der ganzzahligen »gelben« Wellenlängen in diesem Intervall, müssten wir den Auffangschirm bei einem Lichtspalt von etwa 0,1 cm Breite etwa 10 m vom Prisma entfernt aufbauen. Unabhängig davon, dass sich in dem betrachteten Ausschnitt immer noch die Strahlenabbilder unendlich vieler, oder mathematisch gesprochen überabzählbar vieler Wellenlängen überlappen würden, bräuchten wir eine weiße Lichtquelle mit der Intensität eines Lasers, um bei der Entfernung überhaupt noch Farben wahrnehmen zu können. Die anfängliche Verwirrung über die Variation des Farbverlaufs kann also folgendermaßen aufgelöst werden: Prismatische Erscheinungen wurden historisch und werden nach wie vor hauptsächlich zur anschaulichen Herleitung des Lichtkontinuums herangezogen. Die Beschreibung des kontinuierlichen Farbverlaufs soll so das mathematische Kontinuum anschaulich vermitteln. Die Veränderung der Farbvielfalt in diesem Verlauf konnte aber von Newton und Helmholtz noch nicht aus ihren Theorien abgeleitet werden. Unsere klassische Vorstellung des

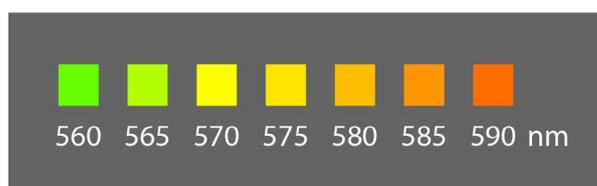


Abb. 7: RGB-Farben, die auf Basis der CIE-CMFs von 1931 für die angegebenen Wellenlängen berechnet werden können. Selbst erstellte Grafik im sRGB-Farbraum.

kontinuierlichen Farbverlaufs entspricht dadurch nicht dem Farbverlauf, der sich tatsächlich aus der Zuordnung von Farbwerten zu einzelnen Wellenlängen ergeben würde. Das Gelb und die Übergänge ins Rote und Grüne nehmen in unserer konzeptuellen Anschauung so unverhältnismäßig viel Platz ein. Dieser verzerrte kontinuierliche Farbverlauf ist die Stolperfalle in der Transferaufgabe. Wir meinen die physiologische Grundlage bereits in die Farbigkeit des Verlaufs eingebettet und sehen uns darin berechtigt, ebenfalls jenen kontinuierlichen Farbverlauf als Vermittler aufzurufen, um nun umgekehrt die prismatische Erscheinung anhand des Lichtkontinuums herzuleiten.

Die Herleitung eines farbigen Bildes darf aber nicht mit einem farbigen Bild beginnen. Wie gut die kontinuierlichen Übergänge im prismatischen Spektrum sichtbar sind, hängt also nicht insofern vom Abstand ab, als das prismatische Bild mit zunehmendem Abstand einfach größer skaliert wird. Der Abstand bedingt viel mehr die Intensitätsverteilungen im Spektrum und somit die unterschiedlichen Reaktionen der drei Zapfentypen auf diese Verteilungen. Wie stark die Unterschiede in der Reaktion ausfallen und wie hart oder weich die Übergänge wirken, hängt dann nur noch von den Empfindlichkeitskurven und der Weiterverarbeitung der Reize ab.

Der prismatische Farbverlauf ist also konzeptuell-anschaulich nicht mit einem Lauf durch die kontinuierliche Wellenlängenskala zu vergleichen, sondern eher mit dem Verschieben und Stauchen der Flächen unter den Empfindlichkeitskurven, wobei hier die physiologische Weiterverarbeitung noch nicht berücksichtigt wird. Die Ungewissheit über diese Weiterverarbeitung, die hier in der Forschung noch vorherrscht, können wir bei der Voraussage von Farbwerten bisher nur rein rechnerisch anhand der CMFs kompensieren.

Die Erweiterung des Goetheschen Symmetrie-Einwands

Die grafische Unternehmung war der Versuch, zwischen unseren heutigen Theorien und dem prismatischen Phänomen angemessen grafisch zu vermitteln. Aus ihrer Evaluation schließe ich, dass jede Erklärung eines Farbphänomens in ihrem Ansatz die Annahmen der Optik und der Farbwahrnehmung vereinen können muss.

Losgelöst von der konzeptuellen Anschauung notwendig weicher Farbverläufe im prismatischen Spektrum, möchte ich nun auf ein Farbphänomen hinweisen, zu dessen Beobachtung die ursprüngliche Anschauung kaum motivieren würde und das bisher weder in den Theorien zur Optik noch zur Farbwahrnehmung berücksichtigt wird. Neben dem klassischen prismatischen Bild eines weißen Lichtstrahls in schwarzer Umgebung ist es möglich, bei Vertauschung der Rollen von Licht und Dunkelheit ein Bild zu erzeugen, das sich in der relativen schematischen Aufteilung des Bildes in Farbstreifen symmetrisch zum klassischen prismatischen Bild verhält. [Abb. 8] Mit dem Verweis auf diese Symmetrie hatte Goethe versucht, Newtons Theorie über die physikalische Beschaffenheit von Licht, ins Absurde zu ziehen. Denn Newton hätte aus dem invertierten Experiment genauso schließen können, Dunkelheit (und nicht Licht) bestünde aus heterogenen Strahlen.²⁴ Olaf Müller und Matthias Rang haben diesen Einwand auf die Spitze getrieben, indem sie Newtons *experimentum crucis* invertiert nachbauten.²⁵ Ingo Nussbaumer

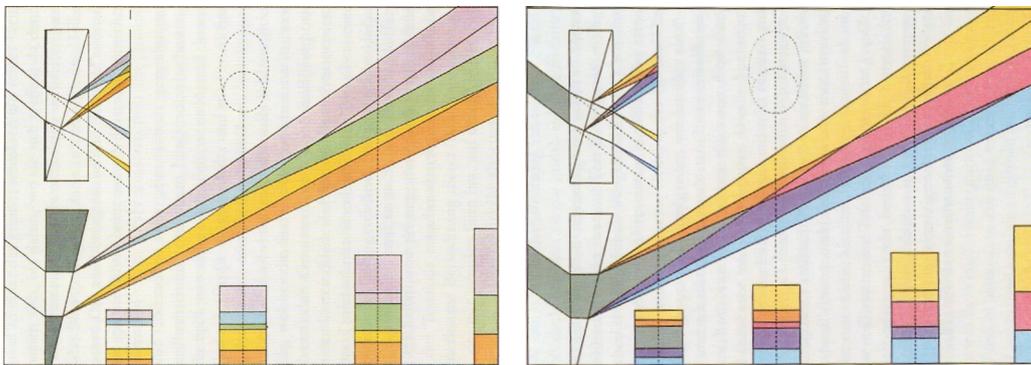


Abb. 8: Fünfte und Sechste Tafel. In: Goethe: *Die Tafeln zur Farbenlehre und deren Erklärungen*. S. 25 bzw. 28.

²⁴ Vgl. Goethe: *Die Tafeln zur Farbenlehre und deren Erklärungen*. S. 27.

²⁵ Siehe Müller, Rang: »Newton in Grönland.«

hat nach dem Prinzip der Komplementarität sogar noch sechs weitere Spektren gefunden, die dieselbe relative Aufteilung nach Farben aufweisen.²⁶ Es gibt also insgesamt 2^3 , also acht prismatische Spektren derselben relativen Farbverteilung. [Abb. 9] Müller und Rang schlussfolgern, »dass es möglich sein müsste, die optischen Phänomene in einer Theorie zu fassen, deren Symmetrie die Symmetrie der Phänomene abbildet«²⁷.

Wie die Grafik verdeutlicht, ist die relative Verteilung der Farben im prismatischen Bild notwendig an die Empfindlichkeitskurven unserer Sehnerven geknüpft. Der symmetrische Einwand betrifft also nicht nur – wie Goethe es beabsichtigte und Müller und Rang andeuten – die physikalische Natur des Lichts, sondern auch das theoretische Grundgebäude unserer Farbwahrnehmung. Der Symmetrietest müsste also um folgende Punkte erweitert werden: Maxwells Farbabgleichsexperimente müssen sich analog mit drei anderen Primärlichtern durchführen lassen, die dann nach Helmholtz als »*Grundempfindungen*«²⁸ bezeichnet werden könnten.



Abb. 9: Die unordentlichen Vollspektren. In: Nussbaumer: *Zur Farbenlehre*. S. 132, Tafel XX.

26 Siehe Nussbaumer: *Zur Farbenlehre*.

27 Müller, Rang: »Newton in Grönland.« S. 89.

28 Helmholtz: *Handbuch der physiologischen Optik*. S. 291. Hervorhebung im Original gesperrt.

Für Goethes Spektrum sind das beispielsweise Primärlichter in Türkis/Cyan, Magenta/Purpur und Gelb. Es muss zu jedem der Spektren eine Metrik gefunden werden, nach der entsprechende CMFs als Kurven in einem Koordinatensystem dargestellt werden können, dessen x-Achse nicht die herkömmliche Skala der Wellenlängen abbildet, sondern ein Kontinuum aus mehrdimensionalen Linearkombinationen von Wellenlängen. Welchem der acht Spektren dann die herkömmliche Skala zugeordnet wird, wird dadurch mathematisch beliebig.

Die mathematische Durchführbarkeit und der Erfolg eines solchen Symmetrietests ist so weit rein spekulativ, sollte er aber gelingen, könnte auch dieser in einer Erweiterung der Grafik veranschaulicht werden.²⁹ Welche Rolle das prismatische Spektrum bei der Strukturierung unserer Welt spielen kann, ist jedenfalls noch nicht zu Ende gedacht.

Rück- und Ausblick

Die grafische Unternehmung beruht in erster Linie auf der Unzulänglichkeit des Anschauungsmaterials, das unseren heutigen Theorien der Optik und der Farbwahrnehmung zur Seite gestellt wird. Gerade das Phänomen, das die Ausbildung unseres Verständnisses von Licht und Farbe beflügelt hat, lässt sich mit ihnen nicht angemessen erklären.

Im historischen Rückblick habe ich bemerkt, dass unsere konzeptuelle Anschauung des prismatischen Spektrums noch auf den Stand der Farbwahrnehmungstheorie zurückgeht, bevor sich das Wissen über den physiologischen Sehapparat quantitativ gefestigt hatte. Dass diese Anschauung bis heute nicht korrigiert wurde, liegt vermutlich einerseits daran, dass sich nach Helmholtz die weitere Forschung über Licht und Farbwahrnehmung in verschiedene Wissenschaftsbereiche verstreut

²⁹ Ob sich diese algebraischen Umformungen der Wellenlängenskala aus dem sichtbaren Bereich elektromagnetischer Strahlung auf die Strahlung im Allgemeinen übertragen ließe, wäre dann möglicherweise der nächste Schritt mit all seinen unangenehmen wie aufregenden Konsequenzen bezüglich unserer Vorstellung von Energiegrößen.

hat. Andererseits erweist sich das konzeptuelle Sprechen von Wellenlängen aus einem Farbkontinuum für einen großen Teil der Farbphänomene als hinreichend intuitiv. Nicht aber, um den Ursprung des Farbkontinuums, das prismatische Spektrum, zu erklären.

Mit der Grafik rücke ich die Bedeutung der lokalen Intensitätsverteilung des Lichtes im prismatischen Spektrum und der Empfindlichkeiten der Zapfen in den Vordergrund. Mit dem Rechenapparat der Farbmeterik, der diese beiden Aspekte berücksichtigt, führe ich von einem gewählten Messbereich im prismatischen Bild zu einem dreidimensionalen Farbwert. Die Farbwahrnehmung, die mit diesem Wert verknüpft ist, findet sich im Phänomen bestätigt.

Konzeptuelle Anschauungen wie die des kontinuierlichen Farbverlaufs helfen nicht nur dabei, sich einer Theorie anzunähern und sie zu verstehen, sondern bedingen auch den Möglichkeitsraum, in dem wir unsere Theorien weiterentwickeln. In grafischer Auseinandersetzung können wir Theorien und Anschauungen auf ihre Stimmigkeit untereinander und auf ihre Stimmigkeit mit dem Phänomen testen. Grafiken vereinfachen auch den Austausch zwischen verschiedenen Disziplinen und bestärken disziplinferne Kritik.

Die Grafik »Was sehen wir im Spektrum?« bietet einen Einblick in die theoretischen Grundlagen der Optik und Farbwahrnehmung. Ihre Reflexion ermöglicht die Ausbildung einer neuen konzeptuellen Anschauung des prismatischen Spektrums, die noch mal neue Wege eröffnen kann, über die Natur und Struktur von Licht und Farbwahrnehmung nachzudenken.

Quellenverzeichnis

David H. Brainard, Andrew Stockman: »Fundamentals of color vision I: color processing in the eye.« In: *Color Psychology*. Hrsg. von Andrew J. Elliot , Mark D. Fairchild, Anna Franklin. Cambridge: Cambridge University Press 2015. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107337930>.

Color and Vision Research Labs: *Colour & Vision Research laboratory and database*. <http://www.cvrl.org/>. Stand Mai 2020.

Johann Wolfgang Goethe: *Die Tafeln zur Farbenlehre und deren Erklärungen*. Frankfurt am Main/Leipzig: Insel Verlag 1994.

Hermann von Helmholtz: *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Leopold Voss 1867.

Light Conversion, UAB: »Refractive Index.« Auf: *Optics Toolbox*. <http://toolbox.lightcon.com/tools/refractiveindex/>. Stand Mai 2020.

Bruce Lindbloom: »Computing XYZ From Spectral Data (Emissive Case).« Auf: *brucelindbloom*. <http://www.brucelindbloom.com/>. Stand Mai 2020.

Bruce Lindbloom: »XYZ to RGB.« Auf: *brucelindbloom*. <http://www.brucelindbloom.com/>. Stand Mai 2020.

James C. Maxwell: »On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum.« In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 150 (1860). S. 57- 84.

Olaf L. Müller: »Fuchs, Du hast das Gelb gestohlen. Versuch über Goethes diebische Variation eines Experiments von Newton.« In: *Experiment Farbe. 200 Jahre Goethes Farbenlehre*. Hrsg. von Johannes Kühl, Nora Löbe und Matthias Rang. Katalog zur Ausstellung, Dornach (Schweiz), 11. Juni bis 31. August 2010. Dornach: Verlag am Goetheanum, 2010. S. 38-53.

Olaf L. Müller, Matthias Rang: »Newton in Grönland. Das umgestülpte *experimentum crucis* in der Streulichtkammer.« In: *Philosophie naturalis* 46 (2009) H. 1. S. 61-114.

Isaac Newton: »A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colors: sent by the author to the publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; in order to be communicated to the R. Society.« In: *Philosophical Transactions* 6 (1671) H. 80. <https://doi.org/10.1098/rstl.1671.0072>.

Isaac Newton: *Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. London: Printed for Sam. Smith, and Benj. Walford 1704.

János Schanda: »CIE Colorimetry.« In: *COLORIMETRY. Understanding the CIE System*. Hrsg. von dems. Hoboken/New Jersey: Wiley 2007.

Wilfred R. Theisen: »Liber de visu. The Greco-Latin Translation of Euclid's Optics.« In: *Mediaeval Studies* 41 (1979). S. 44-105. <https://doi.org/10.1484/J.MS.2.306242>.

Thomas Young: »The Bakarian Lecture. On the theory of light and colors.« In: *Philosophical Transactions* 92 (1802). <https://doi.org/10.1098/rstl.1802.0004>.