

Zur Relation von Komplementär- und Gegenfarbpaaren

Sebastian Hümbert, Johannes Grebe-Ellis

Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften,
AG Physik und ihre Didaktik, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal
humbert@uni-wuppertal.de, grebe-ellis@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Das Spannungsfeld zwischen Fachwissenschaft und Lebenswelt zu überbrücken stellt eine ständige Herausforderung für den Physikunterricht dar. Besonders deutlich wird dies in der Behandlung des Themas „Farbe“. Der im Physikunterricht oft vorgestellte additive Farbkreis in Anlehnung an Newton scheint unvereinbar mit anderen Ordnungssystemen, wie sie beispielsweise im Kunstunterricht vermittelt werden. Insbesondere die Mehrdeutigkeit des Begriffs der Komplementärfarbe ist ein Stolperstein. Der Beschreibung von Komplementarität als Eigenschaft von Farbpaaren fehlt meistens ein Hinweis auf den Bezugsrahmen, innerhalb dessen die Bezeichnung "komplementär" ihren jeweiligen Sinn gewinnt. Der Einsatz farbmetrischer Methoden erlaubt jedoch die fachwissenschaftlich-technische und die künstlerisch-wahrnehmungsbasierte Perspektive miteinander in Bezug zu setzen. Am Konkreten Beispiel des additiven Farbkreises in Anlehnung an Newton und Goethes Nachbildfarbkreis auf der Basis wahrnehmungsgemäß gegenfarbiger Nachbildfarbpaare wird demonstriert, wie beide Farbkreise ineinander überführt werden können. An die Arbeit von Wilson und Brocklebank anknüpfend wird eine computergestützte Versuchsreihe vorgestellt, in der mit einfachen Mitteln nachvollzogen werden kann, wie Komplementärfarbpaare und gegenfarbige Nachbildpaare unter Entsättigung zu Weiß ineinander übergehen. Dies illustriert ein mögliches experimentelles Vorgehen in dem beide Perspektiven auf Farbe einfließen ohne die jeweils andere Perspektive zu diskreditieren. Die Ergebnisse der Versuchsreihe werden diskutiert und in den Kontext eines bildoptischen Zugangs zur Farbe gestellt. Darüber hinaus wird die Abhängigkeit der Farbordnungen von den für ihre Entstehung maßgeblichen Phänomenkontexten erläutert.

1. Einleitung

In der einschlägigen Schulbuchliteratur sowie in populärwissenschaftlichen Darstellungen wird üblicherweise der *additive Farbkreis* zur Darstellung der Ordnung von Farbe gewählt [1], [2]. Die additiven Primärfarben Rot, Grün und Blau sowie die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb werden so angeordnet, dass benachbarte Farben möglichst große Ähnlichkeit aufweisen, wodurch sich die bekannte Reihenfolge Rot, Gelb, Grün, Cyan, Blau und Magenta ergibt. Zudem liegen sich bei dieser Anordnung solche Farben gegenüber, die additiv gemischt Weiß ergeben („Komplementärfarbpaare“). Eine derartige Behandlung der Farbordnung knüpft an Newtons Prismenversuche zur „Zerlegung“ von Licht in seine „farbigen Bestandteile“ an [3].

Schülerinnen und Schüler lernen jedoch in Kunst und Gestaltung sowie schulfernen Bildungskontexten auch andere Ordnungssysteme kennen, die mit diesem additiven Farbkreis nicht vereinbar scheinen. Dazu gehören beispielsweise die Systeme von Künstlern wie Phillip Otto Runge und Johannes Itten oder dem Psychologen Wilhelm Wundt, welche auf der subtraktiven Pigmentmischung aufbauen oder die von Johann Wolfgang von Goethe oder Adolf

Hölzel, welche die menschliche Farbwarnnehmung zum Ausgangspunkt nehmen [2][4].

Es stellt sich die Frage, wie die schulische Behandlung von „Farbe“ und „Farbordnung“ im Physikunterricht das Spannungsverhältnis zwischen all diesen Systematisierungsvorschlägen auflösen kann. Das Problem, auf das die verschiedenen Farbkreise hinweisen, ist dabei exemplarisch. Es verweist auf das allgemeine Spannungsverhältnis zwischen der wahrnehmungsfernen Idealisierung der traditionellen Physik auf der einen Seite und einer lebensweltnahen, wahrnehmungsbasierten Konzeptualisierung, wie sie etwa in der Kunst oder der Psychologie angestrebt wird [2], auf der anderen Seite.

Bevor diese Frage aber überhaupt nur sinnvoll gestellt geschweige denn beantwortet werden kann, muss zunächst eine fachdidaktisch perspektivierte Sachklärung erfolgen. Dabei erweist sich das Instrument der Farbmetrik als überaus nützlich, denn hier wird die wahrnehmungsimmanente Ordnung der Farbe zur Beschreibung und Modellbildung genutzt. Pioniere und prominente Vertreter dieses Forschungsfeldes waren beispielsweise die Physiker James C. Maxwell [5], Hermann von Helmholtz [6] und Erwin Schrödinger [7–11], die mit ihren Arbei-

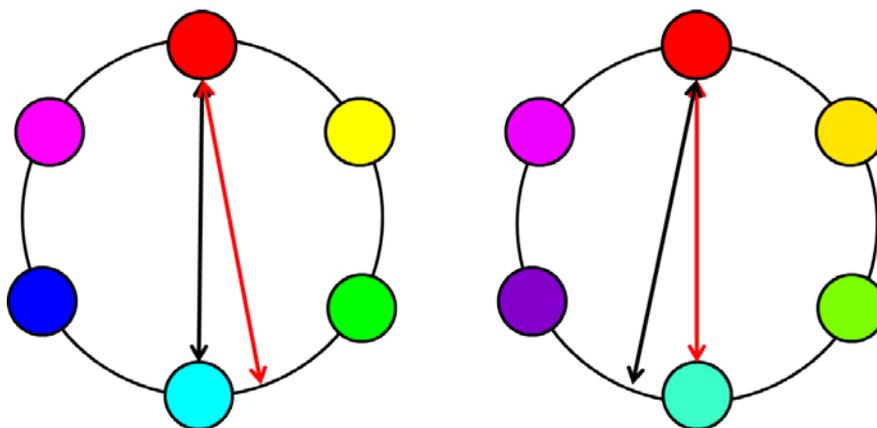


Abb. 1: Schematische Darstellung zweier Farbkreise mit je sechs Farben. Links der RGB-Farbkreis, rechts der Nachbildfarbkreis. Die schwarzen Pfeile markieren qualitativ die Lage der Komplementärfarbpaa-re, die roten Pfeile die der Gegenfarbpaa-re in den jeweiligen Kreisen. Die Farbdarstellung ist monitor- bzw. druckabhängig.

ten zur Begründung der modernen Farbmeterik beigetragen haben.

Die Farbmeterik lässt sich fachdidaktisch nutzen um die verschiedenen Farbkreise miteinander in Beziehung zu setzen. Farbmeterische Untersuchungen zeigen, dass die gesehene Farbe abhängig ist von solchen Parametern wie Sättigung (Abney-Effekt), Helligkeit (Bezoldt-Brücke-Effekt) und Kontrast (Simultankontrast) [12–18]. Wilson und Brocklebank fanden bereits 1955 heraus, dass bei Entsättigung zu Weiß die additiv komplementären Farbpaare und die wahrnehmungsgemäß gegenfarbigen Nachbildfarbpaare konvergieren [19]. Damit besteht über die Entsättigung eine direkte Verbindung zwischen dem additiven Farbkreis und Goethes *Nachbildfarbkreis*. Diese Verbindung wird im vorliegenden Beitrag anhand eines eigenen computergestützten Experiments demonstriert und deren Auswertung in der CIE-Normfarbtafel vorgestellt. Die Pfade durch die Farbtafel, welche die Entsättigung von Komplementärfarbpaa-ren und Nachbildfarbpaa-ren beschreiben, haben im Unbuntpunkt eine gemeinsame Tangente. Die Farbkreise gehen bei Entsättigung ineinander über.

Im Folgenden werden zunächst die beiden Farbkreise näher erläutert und ihr Verhalten bei Entsättigung zu Weiß mit Hilfe der CIE-Normfarbtafel dargestellt beschrieben. Dabei erweist sich, dass die wahrnehmungsimmanente Farbordnung intersubjektiv überprüfbar ist, da sie sich in der CIE-Normfarbtafel abbilden lässt. Die Klassifizierung bzw. Deklassierung von Farbe als „sekundärer Qualität“ ist eine historisch begründete, die eine lebensweltliche Anknüpfung für Lernende erschwert und fachlich nicht notwendig ist. Im Anschluss wird das Experiment vorgestellt, die Ergebnisse erläutert und vor dem Hintergrund der oben erwähnten farbmeterischen

Untersuchungen diskutiert. Abschließend wird erläutert, dass sich die verschiedenen Farbordnungen aus den unterschiedlichen Phänomenkontexten ergeben, da diese verschiedene Kriterien für die Gegensätzlichkeit von Farbpaaren vorgeben. Die jeweiligen Erscheinungsbedingungen wie Helligkeit, Sättigung, räumlicher und zeitlicher Kontrast sowie Beleuchtungsart bzw. Referenzweiß beeinflussen die innere Ordnung der Farberscheinungen.

Der Beitrag schließt an eine Reihe physikdidaktischer Arbeiten an, in denen das Thema Farbe phänomenologisch erschlossen wird [20–22].

2. sRGB-Farbkreis, Nachbildfarbkreis und CIE-Normfarbtafel

Der additive Farbkreis stellt, wie eingangs bereits erläutert, die additiven Mischungsrelationen farbigen Lichts und die Komplementärfarbpaa-re dar (Abb. 1 links, qualitativ). Dieser Farbkreis ist heute von besonderer Bedeutung, da er auch die Farbordnung der allgegenwärtigen Bildschirme zusammenfasst. Egal ob Fernsehbildschirm, Computermonitor oder Handydisplay, alle selbstleuchtenden Bildwiedergabemedien funktionieren nach dem Prinzip der additiven Lichtmischung. Aus den drei Primärfarben der additiven Mischung, Rot, Grün und Blau, werden alle anderen Farben gemischt¹. Die dargestellten Farben lassen sich daher als Zahlentripel im RGB-Raum auffassen. Rot entspricht üblicherweise dem Tripel (255, 0, 0), Grün entspricht (0, 255, 0) und

¹ Es gibt inzwischen auch Geräte, in denen zur Erweiterung des Gamuts noch mehr Farben eingesetzt werden. Diese werden jedoch nicht benötigt um alle Farbtöne darzustellen, sondern um für bestimmte Farbtöne eine größere Intensität zu erzielen.

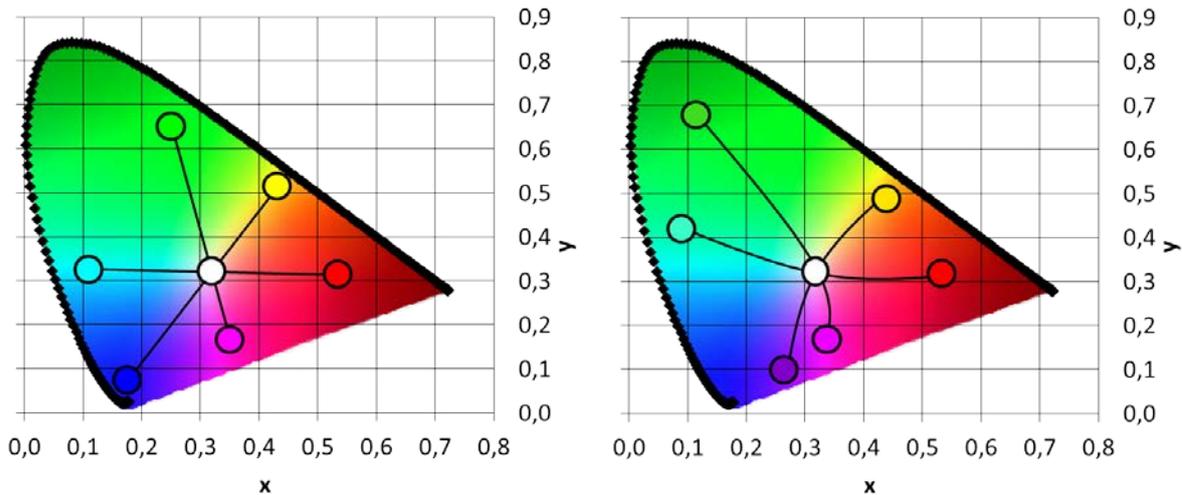


Abb. 2: Transformation der beiden Farbkreise in die CIE-Normfarbtafel (qualitative Darstellung zur Verdeutlichung). Links der RGB-Farbkreis: Die Linien von den gesättigten Farben zu Unbunt verbildlichen die additive Entsättigung zu Weiß. Die Linien komplementärer Farbtöne gehen im Unbuntpunkt stetig ineinander über. Rechts der Nachbildfarbkreis: Die Kurven von den gesättigten Farben zu Unbunt verbildlichen die gesehenen Farben bei additiver Entsättigung zu Weiß. Das Auge nimmt i. d. R. eine Farbtonverschiebung wahr (Abney-Effekt). Die Kurven, die zu Gegenfarben gehören, gehen im Unbuntpunkt stetig ineinander über.

Blau (0, 0, 255). Die Zahl 255 als Maximalwert ergibt sich, da üblicherweise die Intensität der jeweiligen Farbanteile diskret über 8-Bit-Kanäle angesteuert wird und sich somit $2^8 = 256$ Intensitätsstufen von 0 bis 255 ergeben. Die Komplementärfarben sind in dieser Darstellung Cyan (0, 255, 255), Magenta (255, 0, 255) und Gelb (255, 255, 0). Der Farbbereich, der sich mit den jeweilig zur Verfügung stehenden drei Grundfarben ermischen lässt, wird als der *Gamut* des Gerätes bezeichnet. Für das in diesem Beitrag vorgestellte Experiment gehen wir von dem heute üblichen sRGB-Standard aus. Das heißt der dieser Untersuchung zu Grunde liegende additive Farbkreis ist der sRGB-Farbkreis.

Dem gegenüber steht Goethes Nachbildfarbkreis (Abb. 1 rechts, qualitativ²). Dieser Farbkreis ist so aufgebaut, dass sich gerade genau die Farben einander gegenüber stehen, die sich als negatives Nachbild fordern, wenn man sie für eine kleine Weile, ca. 15-20 Sekunden, fixiert und anschließend auf eine neutral unbunte Fläche blickt [4]. Die sich so ergebenden Nachbildfarbpaare weichen von den additiven Komplementärfarbpaaren ab.

Vergleichen wir beide Kreise direkt miteinander (Abb. 1, qualitative Darstellung, 6 Farben ausge-

wählt), so stellen wir folgendes fest: Versuchen wir ein Gegenfarbpaar in den RGB-Kreis einzutragen, indem wir die Orte der beiden Farben durch eine gerade Linie verbinden, so liegt diese Linie schief im Kreis. Ebenso verhält es sich, wenn wir entsprechend ein Komplementärfarbpaar in den Nachbildkreis eintragen. Um die fachliche Bedeutung dieser Verbindungslinien erfassen zu können, bedarf es eines Werkzeugs, welches eine kontextunabhängige geometrische Visualisierung der Farben ermöglicht. Hierzu nutzen wir die CIE-Normfarbtafel³. Diese Darstellung aus der Farbmeterik ist eine zweidimensionale Projektion des Raumes aller (für normalsichtige Beobachter) sichtbaren Farben. Sie erlaubt die Darstellung sowohl spektrometrisch gemessener als auch über visuellen Abgleich bestimmter Farben. Sie eignet sich daher um zwischen dem klassischen physikalischen Ansatz und einem phänomenologischen Ansatz zur Farbbeschreibung zu vermitteln. Die Farben werden durch ihre Lage in der Tafel in Farbton und Sättigung spezifiziert. Die Information über die Helligkeitsdimension geht bei der Projektion verloren, ist für die folgende Betrachtung aber nicht ausschlaggebend. Für eine ausführliche Beschreibung der CIE-Norm und der farbmeterischen Transformationen zur Bestimmung der Farbkoordi-

² Der hier dargestellte Farbkreis entspricht Goethes Kreis in der Art und Weise seines Zustandekommens. Die gewählten Farbtöne entstammen jedoch eigenen Messungen mit Lichtfarben am sRGB-Monitor, weswegen Goethes eigene Darstellung etwas anders aussieht.

³ Wir verwenden das 10°-Großfeldnormal, welches von der Commission International de l'Éclairage (CIE, Internationale Beleuchtungskommission) 1964 vorgeschlagen wurde.

naten verweisen wir auf die gängige Lehrbuch- und Fachliteratur [23–25].

3. Untersuchung der Farbkreise in der CIE-Normfarbtafel

Betrachten wir zunächst wieder den RGB-Farbkreis. Abbildung 2 links zeigt qualitativ die Lage der sechs Farben in der CIE-Normfarbtafel. Die Linien, die die komplementären Farbpaare miteinander verbinden schneiden sich alle im gleichen Punkt, dem Unbuntpunkt⁴. Sie verweisen in dieser Darstellung auf einen additiven Mischvorgang. Beginnend bei einer Kreisfarbe, beispielsweise Rot, liegen auf der Linie bis zum Unbuntpunkt all die Farben, die sich bei Entsättigung der Farbe zu Weiß durch additives Beimischen der Komplementärfarbe, hier Cyan, ergeben. Die Linie von Rot nach Unbunt ist also nichts anderes als der Weg im Farbraum von der gesättigten Farbe hin zu Weiß, wie es sich bei der additiven Mischung des Lichts einer roten Lampe mit dem einer komplementär-cyanfarbigen Lampe ergeben würde. Im Unbuntpunkt geht die Linie stetig in die entsprechende Linie der Komplementärfarbe, hier Cyan, über. Dies gilt für alle Komplementärfarbpaare. Das liegt daran, dass der CIE-Normfarbtafel gerade so konzipiert ist, dass additive Mischungen zweier Farben auf einer Geraden zwischen diesen beiden Farben liegen. Wenngleich die CIE-Darstellung in dieser Hinsicht „parteiisch“ erscheint, lässt sich dennoch auch der Nachbildfarbkreis in ihr sinnvoll auflösen. Auch die wahrgenommenen Nachbildfarben der am Monitor erzeugten Farbzeuge lassen sich in die CIE-Normfarbtafel übertragen. Dazu bedarf es eines sogenannten visuellen Abgleichs. Die Nachbildfarbe wird von der Versuchsperson in einem neutralen Umfeld nachgemischt. Diese abgeglichene Farbe lässt sich wiederum auslesen und in die CIE-Darstellung transformieren. Für verschiedene Beobachter ergeben sich dabei annähernd die gleichen Gegenfarbpaare [19]. Abbildung 2 rechts zeigt qualitativ die Lage der drei Gegenfarbpaare. Hier betrachten wir nun den gleichen Mischvorgang, nämlich das additive Beimischen der jeweiligen Komplementärfarbe, tragen jedoch nicht die sich ergebenden Mischfarben spektrometrisch bestimmt ein, sondern die jeweils über visuellen Abgleich be-

stimmten, also gesehenen Farben. Das Ergebnis sind keine Geraden sondern Kurven, die sich von der satten Kreisfarbe zum Unbuntpunkt bewegen. Beobachter stellen also bei Entsättigung der Farbe eine Farbtonverschiebung fest. Der Effekt, der sich hier zeigt, ist der sogenannte Abney-Effekt, der 1909 erstmals von dem englischen Chemiker und Fotografen Sir William de Wiveleslie Abney beschrieben wurde. Am Unbuntpunkt gehen die Kurven nun stetig in die Kurven der entsprechenden wahrnehmungsgemäßen Gegenfarben über. Für den gleichen Entsättigungsvorgang zeigt sich also in der Wahrnehmung eine Bahn durch den Farbraum, die über den Unbuntpunkt zwei einander fordernde Gegenfarben miteinander stetig verbindet.

Je ungesättigter die Farben sind, desto stärker nähern sich die Komplementärfarbpaare und die Gegenfarbpaare an. Diese Entdeckung geht auf die beiden Physiker und Farbforscher Wilson und Brocklebank zurück. In ihrer Arbeit von 1955 zeigen sie mit Hilfe von Farbkreiseln zur Realisierung additiver Farbmischung, wie der Abney-Effekt bei Entsättigung gerade zu einer Annäherung der additiv komplementären Farbpaare und der im Nachbild einander fordernden Farbpaare führt (vgl. Abb. 3). Dabei fällt auf, dass sich drei Farbpaare ergeben, die bei Entsättigung keine wahrnehmbare Farbtonverschiebung erfahren und die somit sowohl Komplementär- als auch Gegenfarbpaare sind. Solche *Farbpaare konstanten Farbtons* sind für einen Brückenschlag zwischen dem klassischen und einem wahrnehmungsbe-

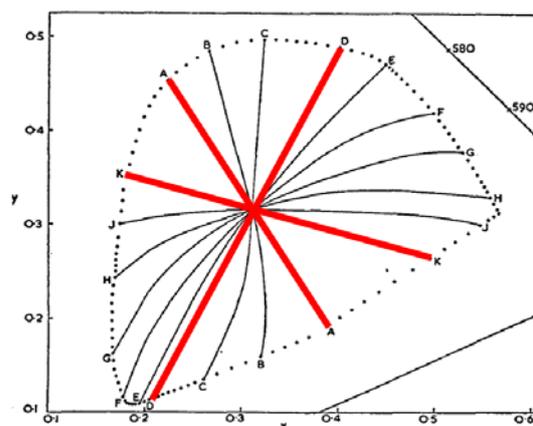


Abb. 3: Die Graphik stammt aus der Arbeit von Wilson und Brocklebank zur Bestimmung der Farben von Nachbildern [10]. Sie zeigt ausgewählte Nachbildfarbpaare in der CIE-Normfarbtafel. Zu sehen ist, wie oben beschrieben, dass bei Entsättigung die wahrgenommenen Farben eine Tonverschiebung auf Grund des Abney-Effekts zeigen. Je ungesättigter, desto weiter nähern sich die Paare den Komplementärfarbpaaren an. Drei Paare (rote Markierung der Autoren) weisen keinen Abney-Shift auf.

⁴ Die Lage des Unbuntpunktes, an dem die Farborte für Weiß, Schwarz und alle Grautöne zusammen fallen, ist abhängig von der im Experiment verwendeten Beleuchtung.

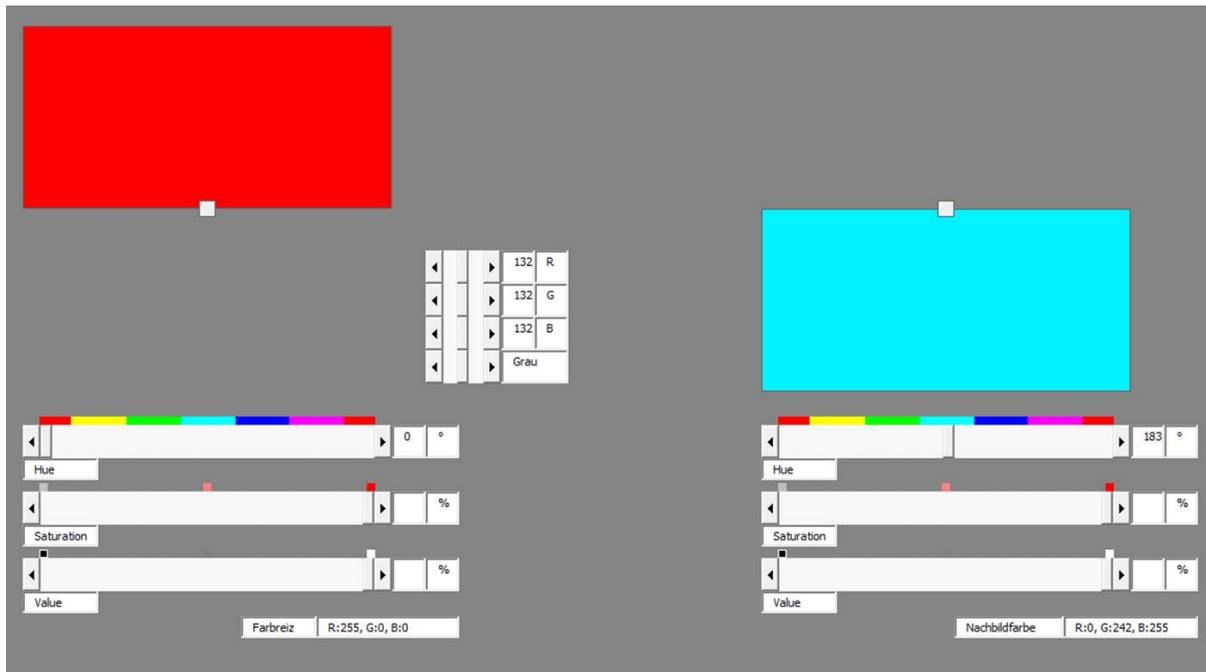


Abb. 4: Die graphische Oberfläche des computergestützten Abgleichexperiments. Links wird ein Farbreiz eingestellt und 20 Sekunden fixiert. Danach wird rechts das Nachbild projiziert und im Referenzfeld nachgemischt. Sättigung und Value (Schwarzwert) werden konstant gehalten, Farbton und die Helligkeit des Hintergrundes können angeglich werden. Damit orientieren wir uns an dem Vorgehen in den Experimenten von Wilson und Brocklebank.

zogenen Zugang zur Farbe von Interesse. Das im Folgenden vorgestellte Experiment zielt daher auch auf das Auffinden dieser Farbpaare konstanten Farbtons ab (vgl. Abb. 4).

4. Eigene Messungen und Vergleich mit alten und neuen Forschungsergebnissen

An einem Computerbildschirm mit sRGB-Gamut und konstanter Farbwiedergabe über einen großen Aufblickwinkel hinweg wurden Versuchspersonen Farbreize präsentiert, die sie mit einer Fixationshilfe für 20 Sekunden anblickten. Sodann bestand die Aufgabe darin den Blick auf eine weitere, nebenstehende Fixationshilfe zu richten, wo sie dann oberhalb auf unbuntem Grund das Nachbild des Reizes sehen und in einem darunter befindlichen Referenzfeld nachmischen konnten. Als Farbreize dienten die am Bildschirm generierten Farbtöne von 0° bis 350° in Zehnerschritten. Nachbilder wurden für 100 %, 75 %, 50 % und 25 % Sättigung erzeugt. Im Referenzfeld wurden die Sättigung konstant auf dem Wert des jeweiligen Reizes und die Helligkeit (Value, Schwarzbeimischung) konstant auf 100 % gehalten. Zum Abgleich konnten die Versuchspersonen sowohl den Farbton des Referenzfeldes als auch die Helligkeit der Projektionsfläche variieren. Damit orientieren wir uns am Versuchsaufbau von Wilson und Brocklebank zur Generierung bestmöglicher Passung zwischen Nachbild und Referenzfeld. Die

Ergebnisse unserer Messungen sind in Abbildung 5 zusammengefasst.

Die Darstellung zeigt, dass mit abnehmender Sättigung die Nachbildfarbpaare immer dichter an die Komplementärfarbpaare (gekennzeichnet durch die Gerade) heranrücken. Außerdem finden sich bei Interpolation der Daten drei Schnittstellen mit der Geraden auf der die Komplementärfarben liegen. Das bedeutet, dass es auch in unserer Messung drei Farbpaare konstanten Farbtons gibt, die sowohl komplementär als auch gegenfarbig sind. Ein direkter Vergleich unserer Messung mit den Ergebnissen von Wilson und Brocklebank in der CIE-Farbtafel (Abb. 6) zeigt jedoch, dass sich für unseren Versuchsaufbau drei andere Farbpaare ergeben.

Der Vergleich mit neueren Messungen zeigt, wie eingangs erwähnt, dass nicht nur der Abney-Effekt ausschlaggebend für die wahrgenommenen Farbtonverschiebungen ist. So zeigt sich beispielsweise, dass bei gleicher Beleuchtungsart bereits unterschiedliche Formen der Entsättigung, etwa ein Mischen hin zu Weiß oder hin zu einem gleichhellen Grau, unterschiedliche konstante Farbtöne hervorrufen [13], [14]. Zudem wirken sich auch die Leuchtdichte (Bezold-Brücke-Effekt) und die Kontrastart der zu vergleichenden Farbflächen (simultan oder sukzessiv) aus [12], [13], [16]. Letztlich bedeutet dies, dass es vom untersuchten Phänomen bzw. dem untersuchten Versuchsaufbau abhängt, welche Farb-

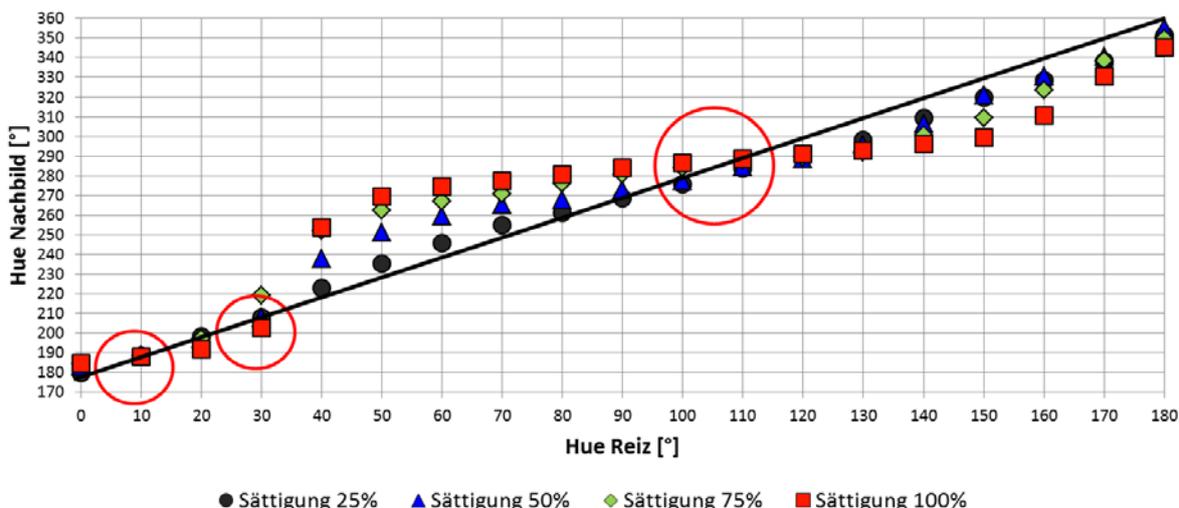


Abb. 5: Ergebnisse unserer Abgleichexperimente. Die Punkte markieren die gefundenen Farbpaare bei 100%, 75%, 50% und 25% Sättigung von Reiz und Referenzfeld. Bei abnehmender Sättigung nähern sich die Paare immer mehr den komplementären Farbpaaren an, welche durch die Gerade dargestellt werden. Bei Interpolation der Daten zeigen sich drei Schnittpunkte mit dieser Geraden, welche für drei Farbpaare stehen, die sowohl komplementär als auch gegenfarbig sind. Diese Schnittpunkte entsprechen drei Farbpaaren konstanten Farbtönen.

paare sowohl komplementär als auch gegenfarbig sind. Sie müssen also von Fall zu Fall eigens bestimmt werden.

Die Unterschiede zwischen RGB-farbkreis und Nachbildfarbkreis manifestieren sich erst bei Steigerung der Farbigeit. Farbpaare gleichen Farbtönen in beiden Farbkreisen können der Orientierung dienen. Gegenfarben, die sich im Nachbildfarbkreis einander gegenüber stehen, lassen sich im RGB-Farbkreis durch gekrümmte Linien durch den Unbuntpunkt sinnvoll verbinden. Umgekehrt ließen sich Komplementärfarbpaare, die sich im RGB-Farbkreis gegenüber stehen, im Nachbildfarbkreis ebenfalls

über Kurven durch den Unbuntpunkt verbinden. Eine Nachbildfarbtafel, die wahrnehmungsgemäße Entsättigung korrekt darstellen würde, würde also die Verhältnisse umkehren. Konstante Farbtöne und die Stärke und Richtung der Farbtonverschiebungen hängen vom betrachteten Phänomen ab. In der Nähe des Unbuntpunktes, also bei geringer Farbreinheit (Sättigung, Chroma, Value etc.), weichen die Komplementärfarbpaare und die gegenfarbpaare kaum voneinander ab. In diesem Regime entsprechen die Farbkreise einander (Abb. 7).

5. Zusammenfassung

Komplementarität und Gegenfarbigkeit lassen sich als zwei Erscheinungsweisen des Grundprinzips Gegensätzlichkeit verstehen. Die Untersuchung mit Hilfe der CIE-Normfarbtafelarstellung erlaubt es, diese beiden Erscheinungsweisen nicht als unvereinbare oder auf Grund von Sinnestäuschung auftretende Antagonisten im Farbdiskurs zu missdeuten, sondern sie in Bezug zueinander zu setzen. Die Auswirkungen der physikalischen Einflussgrößen Leuchtdichte, Farbreinheit, Kontrastart etc. können leicht veranschaulicht werden.

Was einerseits in der Physik und andererseits in der Kunst über Farbe unterrichtet wird, erweist sich somit nicht als mehr oder weniger richtig oder wahr als das jeweils andere. Es sind lediglich zwei Perspektiven auf den gleichen Gegenstand, die in Bezug zueinander gesetzt werden können. Die Farben selbst müssen nicht als Sinnestäuschung disqualifiziert werden. Als Teil unserer lebensweltlichen

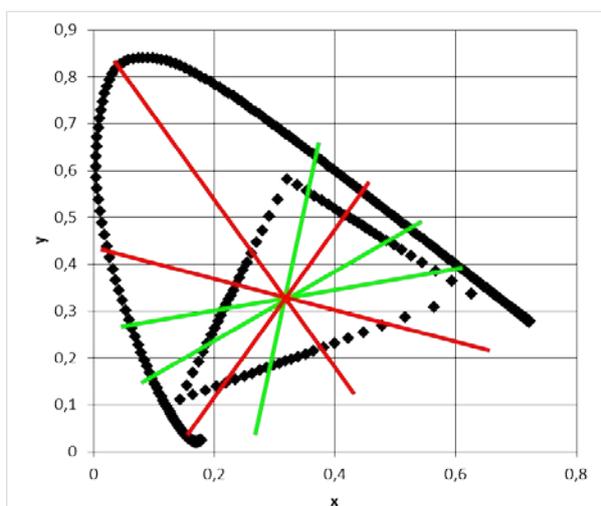


Abb. 6: Vergleich der Farbpaare konstanten Farbtönen von Wilson und Brocklebank (rot) und aus unserer Messung (grün). Die Paare stimmen offensichtlich nicht überein. Das Dreieck im Innern der CIE-Farbtafel markiert quantitativ den sRGB-Gamut des verwendeten Monitors.

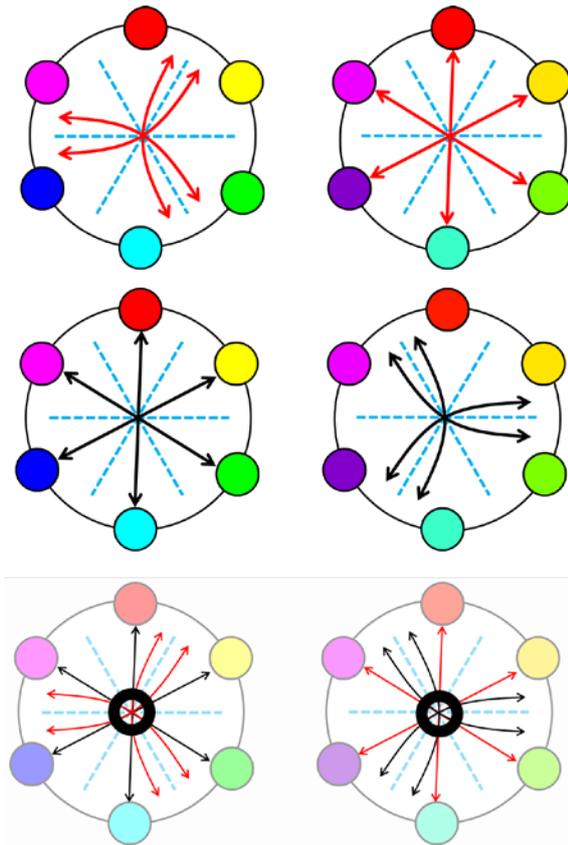


Abb. 7: Zusammenfassender Vergleich des RGB-Farbkreises links und des Nachbildfarbkreises rechts. Gegenfarbpaare (oben, rote Pfeile) und Komplementärfarbpaare (mitte, schwarze Pfeile) werden im jeweils anderen Farbkreis über Kurven miteinander verbunden, die durch den Unbuntpunkt gehen. Farbpaare konstanten Farbtons sind in beiden Kreisen identisch (blau gestrichelte Linien). Sie unterteilen die Kreise in Segmente unterschiedlicher Farbtonshift-Richtungen. Im Bereich geringer Farbintensität (unten) entsprechen die Farbkreise einander, da geringere Farbintensität zu einem Angleichen der Farbpaare führt (Abney, Bezold-Brücke etc.).

Realität besitzen sie eine innere Ordnung, die sich in den Farbkreisen abbildet und die zu einer ganzheitlichen Betrachtung mit heran gezogen werden kann. Welcher Farbkreis der „richtige“ ist, hängt letztlich von dem Phänomen ab, anhand dessen man nach der inneren Ordnung sucht.

6. Literatur

- [1] MEYN, JAN-PETER: Primärfarben in Kunst und Physik. In: *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule* Bd. 62 (2013), Nr. 3, S. 34–41
- [2] WELSCH, NORBERT ; LIEBMANN, CLAUS CHR.: *Farben Natur Technik Kunst*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2012
- [3] NEWTON, ISAAC: *Opticks: Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections, and Colors of Light*, 1730
- [4] GOETHE, JOHANN WOLFGANG VON ;

- SCHMIDT, P. (Hrsg.): *Zur Farbenlehre*. Bd. 10. München : btb, 2006 — ISBN 3446140190
- [5] MAXWELL, JAMES CLERK: Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. In: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* Bd. XXI (1855), S. 275–298
- [6] HELMHOLTZ, H: Handbuch der physiologischen Optik. In: *Hamburg: Voss* (1909)
- [7] SCHRÖDINGER, E: Theorie der Pigmente von grösster Leuchtkraft. In: *Annalen der Physik* Bd. 367 (1920), Nr. 15, S. 603–622
- [8] SCHRÖDINGER, ERWIN: Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. In: *Annalen der Physik* Bd. 368 (1920), Nr. 21, S. 427–456
- [9] SCHRÖDINGER, E: Farbenmetrik. In: *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei* Bd. 1 (1920), Nr. 5, S. 459–466
- [10] SCHRÖDINGER, E: Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. In: *Annalen der Physik* Bd. 22 (1920), Nr. 63
- [11] SCHRÖDINGER, ERWIN: Über das Verhältnis der Vierfarben zur Dreifarben Theorie. In: *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften - mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* Bd. 134 (1925), Nr. 2a, S. 471–490
- [12] PRIDMORE, RALPH W.: Bezold-Brücke hue-shift as functions of luminance level, luminance ratio, interstimulus interval and adapting white for aperture and object colors. In: *Vision Research* Bd. 39 (1999), Nr. 23, S. 3873–3891
- [13] PRIDMORE, RALPH W.: Effects of luminance, wavelength and purity on the color attributes: Brief review with new data and perspectives. In: *Color Research and Application* Bd. 32 (2007), Nr. 3, S. 208–222
- [14] PRIDMORE, RALPH W.: Effect of purity in hue (Abney effect) in various conditions. In: *Color Research and Application* Bd. 32 (2007), Nr. 1, S. 25–39
- [15] BURNS, S. A. ; ELSNER, A. E. ; POKORNY, J. ; SMITH, V. C.: The abney effect: Chromaticity coordinates of unique and other constant hues. In: *Vision Research* Bd. 24 (1984), Nr. 5, S. 479–489 — ISBN 0042-6989 (Print)n0042-6989 (Linking)
- [16] PIDMORE, RALPH W.: Bezold – Brücke Effect Exists in Related and Unrelated Colors and Resembles the Abney Effect. In: *Color Research and Application* Bd. 29 (2004), Nr. 3, S. 241–246
- [17] KURTENBACH, W ; STERNHEIM, C E ; SPILLMANN, L: Change in hue of spectral colors by dilution with white light (Abney

- effect). In: *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science* Bd. 1 (1984), Nr. 4, S. 365–372 — ISBN 0740-3232 (Print)
- [18] PINNA, BAINGIO ; BRELSTAFF, GAVIN ; SPILLMANN, LOTHAR: Surface color from boundaries: A new „watercolor“illusion. In: *Vision research* Bd. 41 (2001), S. 2669–2676
- [19] WILSON, MH ; BROCKLEBANK, RW: Complementary hues of after-images. In: *JOSA* Bd. 45 (1955), Nr. 4, S. 293–299
- [20] HOLTSMARK, TORGER: *Colour and Image*. Berlin : Logos Verlag, 2012
- [21] RANG, MATTHIAS: *Phänomenologie komplementärer Spektren*. Berlin : Logos Verlag, 2015
- [22] WESTPHAL, NICO: Wie aus farbigen Schatten bunte Bilder hervorgehen– Experimente zur Zwei-Farben-Projektion. In: *Beiträge zur DGP-Frühjahrstagung* (2009)
- [23] VALBERG, ARNE: *Light Vision Color*. West Sussex : Wiley, 2005 — ISBN 0470012129
- [24] LANG, H.: Farbmatrik. In: *Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3 Optik*. Berlin : De Gruyter, 2004
- [25] STOCKMAN, ANDREW: *Colour & Vision Research Laboratory*. URL <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>