

Christa Neumeyer

Farbensehen - Wie und warum wir die Welt farbig wahrnehmen



Springer Spektrum

Farbensehen – Wie und warum wir die Welt farbig wahrnehmen

Christa Neumeyer

Farbensehen – Wie und warum wir die Welt farbig wahrnehmen

 Springer Spektrum

Christa Neumeyer
Neurobiologie
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Mainz, Deutschland

ISBN 978-3-662-69340-7 ISBN 978-3-662-69341-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69341-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Sarah Koch
Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

Der Begriff „Farbe“ ist zweifach besetzt: Er bezeichnet einerseits den *Farbstoff*, das Material, mit dem wir z. B. eine Wand streichen, und andererseits die Empfindung, die wir haben, wenn wir Farbe *sehen*. Die Eigenschaften, die den Farbstoff „bunt“ machen, lassen sich durch physikalische und chemische Analysen herausfinden. Weshalb er jedoch farbig *aussieht*, hängt von den Vorgängen ab, die in unserem Auge und in unserem Gehirn ablaufen. Um das Verständnis dieser physiologischen Ursachen unseres Farbensehens geht es in vorliegendem Buch.

Interessanterweise waren es die größten Physiker, von Isaac Newton bis Erwin Schrödinger, die sich, meist in jungen Jahren, mit dem Phänomen „Farbe“ beschäftigt haben. Bei Newton waren es vermutlich die Farben des Regenbogens, die sein wissenschaftliches Interesse weckten. In seinen Experimenten, in denen er den Regenbogen simulierte, erkannte er jedoch bald, dass eine physikalische Erklärung allein nicht ausreicht. „Farbe“ ist physikalisch nicht definiert. Sie entsteht erst in unserem „Sensorium“.

Wie dies geschieht, was die Ursache unseres „Farbensehens“ ist, wird seit dem 19. Jahrhundert experimentell untersucht, zunächst vor allem mit Methoden der Psychophysik. Mit ihnen lässt sich der Zusammenhang zwischen dem physikalischen Lichtreiz und der *Farbempfindung* beschreiben. So war schon um 1850 klar, dass es drei Arten von Lichtsinneszellen geben muss, die die Grundlage des Farbensehens bilden. Jedoch erst seit den 1950er Jahren ist es dank der Entwicklung empfindlicher elektrophysiologischer Methoden möglich, die Nervenzellen in Auge und Gehirn genauer zu untersuchen. Seither ist das Farbensehen ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das zusätzlich mit molekularbiologischen

Methoden, mikroskopischen Techniken, genetischen Analysen und psychophysischen Messverfahren ein wichtiges Teilgebiet der Hirnforschung ist. Mithilfe all dieser Methoden ist unser Verständnis des Farbensehens seit den 1980er Jahren eindrucksvoll gewachsen.

Christa Neumeyer

Inhaltsverzeichnis

1	Die trichromatische Theorie des Farbensehens	1
1.1	Isaac Newton und die Frage: Was ist Farbe?	1
1.2	Was ist die Ursache der Farbempfindung?	5
1.3	Die Lichtsinneszellen	8
1.4	Was melden die Zapfen dem Gehirn?	14
	Literatur	15
2	Farbmischung im täglichen Leben	17
2.1	Additive Farbmischung und ihre Anwendung	17
2.2	„Subtraktive“ Farbmischung und ihre Anwendung in der Malerei	19
	Literatur	26
3	Die Systematik der Farben	27
3.1	Die ästhetische Ordnung der Farben	27
3.2	Farbmetrik: Die Messung der Farben in der Praxis	30
3.3	Das Physiologische Farbsystem	35
	Literatur	38
4	Die Wahrnehmung der Spektralfarben	39
4.1	Die Helligkeit der Farben (spektrale Empfindlichkeit)	39
4.2	Die Unterscheidbarkeit von Spektralfarben ($\Delta\lambda$ -Funktion)	42
	Literatur	45

5	Die Farben der Gegenstände und das Himmelslicht	47
5.1	Die Intensität des Himmelslichts und die Sichtbarkeit der Objekte	47
5.2	Die Farben des Himmelslichts und die Konstanz der Farben	49
5.3	Chromatische Adaptation und farbige Nachbilder (sukzessiver Farbkontrast)	51
	Literatur	54
6	Wechselwirkung benachbarter farbiger Flächen	55
6.1	Laterale Wechselwirkung und das Phänomen der Farbigen Schatten	55
6.2	Simultaner Helligkeits- und Farbkontrast	57
6.3	Der Einfluss der Umgebung am Beispiel von Schwarz, Braun und Weiß	62
6.4	Die Wirkung des gesamten Gesichtsfeldes demonstriert von Gilchrist, Mongue und Land	63
	Literatur	65
7	Urfarben und Gegenfarben: Die Theorie von Ewald Hering	67
	Literatur	72
8	Neuronale Grundlagen des Farbensehens	73
8.1	Retina	74
8.2	Gehirn: Corpus geniculatum laterale (CGL) und visueller Cortex	80
	Literatur	85
9	Genetische Grundlagen des Farbensehens	87
9.1	Anomalien des Farbensehens	87
9.2	Vererbung des Farbensehens	90
9.3	Die Evolution des Farbensehens	94
	Literatur	97
10	Das Farbensehen der Tiere	99
	Literatur	109



Die trichromatische Theorie des Farbensehens

1

Zusammenfassung

Zu allen Zeiten hat der Mensch Farben gesehen, erlebt und gestaltet. Die Frage aber, wie und warum wir Farben sehen, gerät erst im 17. Jhd. mit Isaac Newton in den Fokus der Wissenschaft. Seine Experimente zeigten, dass „Farbe“ keine physikalische Eigenschaft des Lichts ist, sondern auf Vorgängen in Auge und Gehirn beruht. Seitdem unterscheiden wir zwischen der *Physik* des Lichts einerseits und der *Empfindung* von Farbe andererseits. Dass für das Farbsehen des Menschen drei Typen von Lichtsinneszellen verantwortlich sind, konnten berühmte Physiker in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit psychophysischen Methoden zeigen. Erst 100 Jahre später war es möglich, die Sinneszellen (Zapfen) direkt mithilfe neu entwickelter Methoden nachzuweisen und zu untersuchen. Die drei Zapfentypen unterscheiden sich im Aufbau des Eiweißmoleküls Opsin, das zusammen mit dem Retinal das Sehpigment Rhodopsin bildet. Die Absorption von Lichtquanten führt zur Änderung des elektrischen Potentials, dessen Stärke von der Anzahl der Lichtquanten, nicht aber von deren Energie abhängt. Deshalb ist jeder einzelne Zapfen „farbenblind“ und die Empfindung „Farbe“ beruht auf einem Vergleich der Erregungswerte der drei Zapfentypen in Retina und Gehirn.

1.1 Isaac Newton und die Frage: Was ist Farbe?

Die experimentelle Erforschung des Farbensehens beginnt mit Isaac Newton (1642–1727). Bereits als junger Mann hatte er die entscheidende Erkenntnis gewonnen, die er folgendermaßen formulierte: „Wenn wir sagen, dieser Lichtstrahl ist rot, dann sprechen wir nicht philosophisch, sondern grob und wie die

Leute auf der Straße. *Denn das Licht ist nicht farbig. Es hat lediglich die Kraft, in unserem Sensorium eine Empfindung auszulösen, die wir „Rot“ nennen.*“ In einer Reihe sorgfältig geplanter Experimente, die er 1664–1672 am Trinity College in Cambridge¹ durchgeführt, aber erst 1704 in seinem Buch „Opticks (or a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light)“ zusammenfassend publiziert hatte, war es ihm gelungen, die *Physik* des Lichts von den Eigenschaften der *Empfindung* zu trennen. Dies war und ist schwierig, denn wir erleben die Farbe eines Gegenstandes wie eine physikalische Eigenschaft des Gegenstandes. Newton jedoch erkannte, dass nur der *Farbreiz*, d. h. das ins Auge eingestrahelte Licht, physikalisch definiert ist. Die wahrgenommene Farbe jedoch ist eine Sinnesleistung und hängt von den Vorgängen in Auge und Gehirn, unserem „Sensorium“, ab.

Der Aufbau seiner Experimente ist einfach. Abb. 1.1 zeigt eine Skizze des Prismenversuchs aus Newtons Notizheft. Durch ein kleines Loch im geschlossenen Fensterladen auf der rechten Seite seines Zimmers tritt Sonnenlicht ein, das mithilfe einer Linse auf ein Prisma gerichtet wird. Das Prisma entwirft ein weit auseinandergezogenes Band von farbigem Licht auf dem weißen Wandschirm links. Ganz oben auf dem Schirm befindet sich das am stärksten gebrochene Violett, ganz unten das am schwächsten gebrochene Rot, und dazwischen die Farben Blau, Grün, Gelb und Orange. Gelb nimmt nur einen ganz schmalen Bereich ein und war unter diesen Bedingungen kaum sichtbar. Die auf dem Schirm eingezeichneten Kreise im Kontinuum der Spektralfarben stellen Abbildungen der Öffnung im Fensterladen dar. Ohne das Prisma wäre, wie die gestrichelten Linien in Abb. 1.1 zeigen, nur ein weißes Bild ganz unten auf dem Schirm sichtbar.

Die entscheidende Frage war nun, ob die Farben des Spektrums bereits im weißen Sonnenlicht enthalten sind oder ob sie auf einer physikalischen Eigenschaft des Prismas beruhen. Um dies zu entscheiden, hat Newton am unteren, roten Ende des Spektrums ein Loch in den Wandschirm geschnitten und das rote Licht durch ein zweites Prisma (in der Abbildung links) treten lassen. Dieses auch als „experimentum crucis“ bezeichnete Experiment ergab keine weitere Aufspaltung des Lichts, sondern nur eine Abbildung des roten Spektralbereichs. Damit war bewiesen, dass die Farben zum Sonnenlicht gehören und durch das Prisma lediglich aufgespalten und sichtbar werden.

Die Erkenntnis, dass das Licht selbst nicht farbig ist, sondern dass die Farben in unserem „Sensorium“ entstehen, ergab sich durch Versuche, in denen Newton

¹ Da die Universität zwischen 1665–1667 wegen der Pest geschlossen war, ist vermutlich ein Teil der Experimente auf dem Landsitz seiner Mutter in Woolsthorpe, Lincolnshire entstanden.

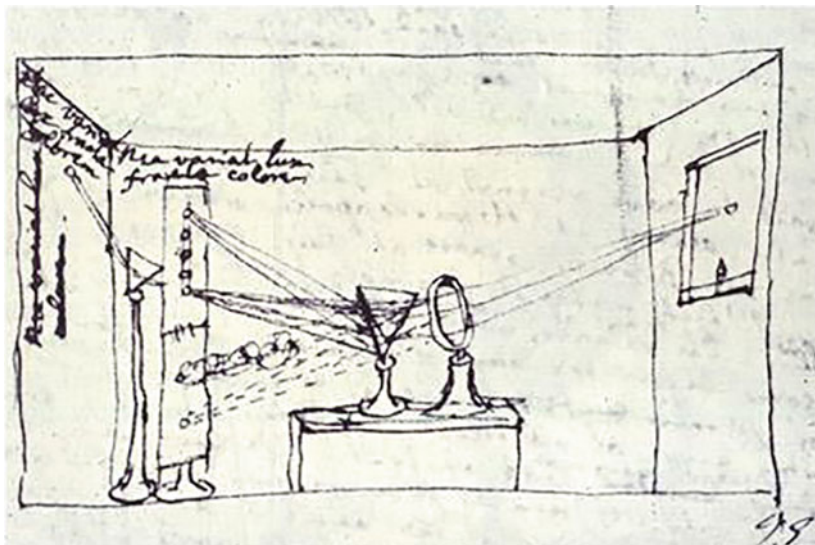


Abb. 1.1 Versuchsaufbau des Prismen-Experiments von Isaac Newton aus seinem Skizzenbuch. Siehe Text. (Aus: Hakfoort 1988)

verschiedene Bereiche des Spektrums mithilfe von Linsen auf ein und dieselbe Stelle der Wand überlagerte. Bündelte er z. B. rotes Licht und grünes Licht auf diese Stelle, so zeigte sich eine neue Farbe: Gelb oder Gelb-Orange, eine Farbe, die im Spektrum zwischen Rot und Grün liegt. Obwohl sich physikalisch nichts geändert hatte, auf der Wand war weiterhin nur rotes und grünes Licht, erschien ihre Summe, also die „additive Mischung“, in einer *anderen* Farbe. Das heißt, das „Sensorium“ interpretiert diese Mischung anders als das rote und das grüne Licht getrennt. War das gesamte Spektrum durch eine Linse auf der weißen Wand überlagert, so zeigten sich keine bunten Farben, sondern die Stelle war, wie das Sonnenlicht, weiß. Das Ergebnis dieser Mischversuche hat Newton erstmals in einem Farbenkreis dargestellt, in dem sich die beiden Enden des Spektrums (Rot und Violett) direkt zum Kreis schließen (Abb. 1.2).

Physikalisch unterscheiden sich die Farben des Spektrums in ihrer Wellenlänge (zwischen 380 und 700 nm). Da Newton von der Wellennatur des Lichts nicht überzeugt war, sondern an ihre Teilchennatur glaubte, sprach er von Unterschieden in der Brechbarkeit.