

Tobias C. Breiner

Farb- und Formpsychologie

 Springer

Farb- und Formpsychologie

Tobias C. Breiner

Farb- und Formpsychologie

Tobias C. Breiner
Fakultät Informatik, Hochschule Kempten
Kempten, Deutschland

ISBN 978-3-662-57869-8 ISBN 978-3-662-57870-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57870-4>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Verantwortlich im Verlag: Marion Krämer

Springer 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

Vorwort

Dieses Buch befasst sich mit der Wirkung der Farb- und Formgebung. Besonderen Wert wird auf ihre Anwendung im Game-Design gelegt.

Dabei werden zum Verständnis der Farbpsychologie zunächst in ► Kap. 1 die Physik des Lichtes, sowie in ► Kap. 2 biologische und physiologische Grundlagen behandelt. Der besondere Aufbau der Netzhaut erklärt viele optische Täuschungen, die einen unterhaltsamen Aspekt in diesen beiden Kapiteln darstellen.

Eng damit verwoben gibt es verschiedene historische und rezente Theorien zur Wahrnehmung der Farbe, um die es in ► Kap. 3 geht.

Auf diesen Theorien bauen die Farbsysteme auf, welche in ► Kap. 4 übersichtlich erklärt werden. Am Schluss dieses Kapitels wird erstmals auch ein selbst entwickeltes neues Farbsystem präsentiert, welches für psychologische Studien besonders geeignet ist.

In der Farbpsychologie gibt es eine Vielzahl von Studien. Diese zeigen, dass Farben einen massiven Einfluss auf das menschliche Verhalten ausüben. Dieser wird oft unterschätzt. Diesem Einfluss und seiner Anwendung im Game-Design widmet sich ► Kap. 5.

► Kap. 6 gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Assoziationsforschungen im Hinblick auf verschiedene Farben und listet übersichtlich die Assoziationen auf, die bestimmte Farben auslösen können. In ► Abschn. 6.9 werden die spektakulärsten Ergebnisse präsentiert. Hier wird erstmals eine neue Assoziationsstudie vorgestellt, welche zeigt, dass die Assoziationen zu bestimmten Farben eine dreidimensionale Anordnung bilden. Diese besitzt eine in sich logische Struktur, aus der sich sogar Antworten auf tiefgreifende philosophische Fragestellungen herleiten lassen.

► Kap. 7 beschäftigt sich mit den Bewegungen des Auges, also mit der Blickverfolgung. Um zu verstehen, wie die Form eines Objektes wahrgenommen wird, werden zunächst die physiologischen Vorgänge behandelt, die zum Erkennen einer Kontur führen. Dies ist für das Verständnis des darauf folgenden Kapitels wichtig.

► Kap. 8 behandelt die anschließende Farb- und Formwahrnehmung im Gehirn.

Die Formpsychologie ist weniger akademisch exploriert als die Farbpsychologie. Es gibt zwar etliche Gestaltungsregeln, welche im Design angewandt werden, diese sind aber weitgehend nicht durch empirische Studien abgesichert. Vielmehr entstanden sie intuitiv durch Designer, die ihre Assoziationen und Erfahrungen formulierten. Diese Gestaltungsregeln finden sich insbesondere in der Gestaltpsychologie, die mit der Formerkennung eng verflochten ist. Ihre wichtigsten Aspekte werden in ► Kap. 9 behandelt.

Das Buch schließt durch ► Kap. 10 mit dem kontrovers diskutierten Goldenen Schnitt und ähnlichen Proportionen ab.

Leider hat sich im deutschsprachigen Raum noch keine geschlechtsneutrale Endung bei Personen allgemein etabliert. Aus Gründen der Lesbarkeit bedient sich das vorliegende Buch daher meist männlicher Substantive, schließt die weibliche Form der Begriffe jedoch selbstverständlich mit ein. Wenn z. B. von Spielern die Rede ist, so sind stets Spielerinnen und Spieler gemeint.

Es soll erwähnt werden, dass ein YouTube-Kanal, welcher sich mit der Farb- und Formpsychologie befasst und auf dem vorliegenden Buch aufbaut, in Arbeit ist. Auch werden zeitnah drei andere Bücher beim Springer-Verlag veröffentlicht, die sich mit verwandten Themen befassen:

Ein Buch wird sich mit den Grundlagen der Computerspiele und der allgemeinen Spielpsychologie beschäftigen.

Ein anderes gibt Antworten auf die Fragestellung, ob Computerspiele die Aggressivität fördern. Es werden ebenfalls Suchtaspekte von Games untersucht.

Ein weiteres Buch behandelt die Psychologie der Handlung. Es wird darin unter anderem ein neues Modell der Heldenreise vorgestellt, welches tiefgreifende Erkenntnisse über den Aufbau unserer Psyche zulässt.

Die ersten beiden Bücher sind gemeinsam von Luca Kolibius und mir verfasst, das letzte von mir alleine.

Ich möchte mich in diesem Zusammenhang ausdrücklich bei Luca bedanken, mit dem die kostruktive Zusammenarbeit aufgrund seiner Kompetenz bei gleichzeitiger Lässigkeit sehr viel Spaß gemacht hat.

Auch möchte ich mich bei meinen Studierenden bedanken. Sie haben mir sehr oft zu neuen Erkenntnissen verholfen. Dies geschah entweder durch inspirierende Fragestellungen während der Vorlesungen und Übungen oder gar durch eigene Studien im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten.

Ein großer Dank geht auch an meine Frau Nicole und meine Kinder Sina, Jonas und Felix. Für meine Familie hatte ich schließlich während der Zeit des Bücherschreibens nicht so viel Zeit, wie ich es mir eigentlich gewünscht hätte.

Vor allem möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern Ursula Breiner und Dr. Herbert L. Breiner bedanken, die das vorliegende Buch vor Manuskriptabgabe durchgelesen haben. Ihre vielen Anmerkungen und Korrekturvorschläge wurden *weitestgehend* oder besser gesagt *weitgehend* beherzigt (Insider), sodass es auch ein wenig ihr Buch ist.

Tobias C. Breiner

Kempten
31.05.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Physik von Licht und Farbe	1
1.1	Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums	2
1.2	Lichtbrechung und Spektralfarben	3
1.3	Lichtstreuung	6
	Literatur	8
2	Physiologie des Auges	9
2.1	Anatomie des Augapfels	10
2.2	Chromophore	10
2.3	Sehzellen	16
2.4	Farbfehlsichtigkeiten	21
2.5	Neuronale Verarbeitung in der Netzhaut	21
2.6	Optische Täuschungen der Netzhautneuronen	25
	Literatur	30
3	Farbtheorien	31
3.1	Dreifarbentheorie	32
3.2	Graßmann'sche Gesetze	33
3.3	Opponentenfarbtheorie	34
	Literatur	35
4	Farbsysteme	37
4.1	Historische Farbsysteme	39
4.1.1	Lineare Farbsysteme der Antike und des Mittelalters	39
4.1.2	Frühe Farbkreise	41
4.1.3	Goethes Farbsystem	42
4.1.4	Lambert'sche Farbpypamide	44
4.1.5	Runges Farbenkugel	46
4.2	Künstlerfarbsysteme	47
4.2.1	HSL	47
4.2.2	HSV, HSB und HSI	48
4.3	Technische Farbsysteme	49
4.3.1	RGB	50
4.3.2	RGBA	51
4.3.3	CMY	51
4.3.4	CMYK	53
4.3.5	YUV, YIQ, YCC, YDbDr, YPbPr, YCbCr und Y'CbCr	53
4.4	Normfarbsysteme	56
4.4.1	RAL	57
4.4.2	HKS	57
4.4.3	PMS	58
4.5	CIE-Farbsysteme	58
4.5.1	CIE RGB	60
4.5.2	CIE XYZ	60

4.5.3	CIE xyz	61
4.5.4	CIE Yxy	61
4.5.5	CIE xy	61
4.5.6	CIE LAB	63
4.5.7	CIE HLC	64
4.6	Opponentenfarbsysteme	64
4.6.1	ODK	64
4.6.2	NCS	65
4.6.3	MCS	66
4.7	Psychologisches Farbsystem	67
	Literatur	69
5	Farbwirkungen	71
5.1	Farbstudien in der Werbung	72
5.2	Farbstudien bei Echtlebensspielen	72
5.3	Farbstudien bei Computerspielen	78
5.4	Farbstudien des Instituts für Computerspiele und Simulation	79
5.5	Anwendung von Farben in Computerspielen	82
	Literatur	85
6	Farbassoziationen	87
6.1	Assoziationsforschungen zu Farben	88
6.2	Assoziationen zu Schwarz	90
6.3	Assoziationen zu Weiß	91
6.4	Assoziationen zu Rot	91
6.5	Assoziationen zu Grün	92
6.6	Assoziationen zu Blau	93
6.7	Assoziationen zu Gelb und Gold	94
6.8	Assoziationen zu Grau und Silber	95
6.9	Die Farbreizassoziationsstudie	96
6.9.1	Formulierung der Hypothese	96
6.9.2	Studienaufbau	97
6.9.3	Ergebnisse	98
6.9.4	Holistisches Assoziationsmodell	99
6.9.5	Assoziatives Nähenmaß	105
	Literatur	108
7	Augenbewegungen	111
7.1	Augensakkaden	112
7.2	Blickerfassung bei Computerspielen	113
7.3	Optische Täuschungen der Augensakkaden	115
	Literatur	117
8	Visuelle Verarbeitung im Gehirn	119
8.1	Sehbahn	120
8.2	Sehrinde	121

8.3	Orientierungs- und Augendominanzsäulen	122
8.4	Optische Täuschungen der Orientierungssäulen	123
8.5	Optische Bewegungstäuschungen	126
	Literatur	132
9	Gestaltpsychologie	135
9.1	Prinzip der Nähe	138
9.2	Prinzip der räumlichen Konzentration	139
9.3	Prinzip der Ähnlichkeit	140
9.4	Prinzip der stetigen Fortsetzung	140
9.5	Prinzip der Geschlossenheit	141
9.6	Prinzip der relativen Größe	141
9.7	Prinzip der Symmetrie	141
9.8	Prinzip des gemeinsamen Schicksals	142
9.9	Prinzip der Einfachheit	142
9.10	Prinzip der gemeinsamen Region	143
9.11	Prinzip der Gleichzeitigkeit	143
9.12	Prinzip der Verbundenheit	143
9.13	Prinzip der Prägnanzstufen	144
9.14	Gestaltprinzipien beim Lesen	145
	Literatur	148
10	Goldene Proportionen	149
10.1	Anwendung der Goldenen Proportionen bei Computerspielen	150
10.2	Geschichte des Goldenen Schnittes	151
10.3	Goldene Folge	151
10.4	Goldene Spirale	152
10.5	Goldene Zahl	153
10.6	Goldener Schnitt	154
10.7	Goldene Erdpunkte	155
10.8	Goldener Winkel	157
10.9	Studien zu den Goldenen Proportionen	157
10.9.1	Fechners Studie zum Goldenen Schnitt	157
10.9.2	Studien zu den Goldenen Proportionen mit positivem Befund	159
10.9.3	Studien zu den Goldenen Proportionen mit uneinheitlichem Befund	161
10.9.4	Studien zu den Goldenen Proportionen mit negativem Befund	162
10.9.5	Diskussion zu den Studien mit negativem Befund	166
10.10	Status quo bezüglich der Goldenen Proportionen	167
10.11	Modifikationsfaktoren der Goldenen Proportionen	167
10.12	Erklärungsversuche zur Wirkung der Goldenen Proportionen	168
	Literatur	169
	Serviceteil	
	Personenverzeichnis	175
	Sachverzeichnis	177

Über den Autor



Prof. Dr. Tobias C. Breiner

Breiner studierte an der TU Darmstadt Informatik. Nach Arbeiten am Fraunhofer Institut für Grafische Datenverarbeitung erhielt er ein Begabtenstipendium an der Universidade Nova in Lissabon. Daran anschließend entwickelte er als Freiberufler unter anderem Arcade-Games, Sportspiele und 3D Fabrikvisualisierungen sowie professionelle Fahrsimulationen für BMW, Daimler-Chrysler und Siemens.

2006 promovierte Breiner an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main mit dem Thema „Dreidimensionale virtuelle Organismen“. Er begann eine Habilitation im Bereich Computergrafik, die 2007 durch den Ruf als Professor für Computergrafik an die SRH Hochschule Heidelberg vorzeitig beendet wurde.

Dort baute er als Studiendekan den neuen Studienschwerpunkt „Game-Entwicklung“ auf. Sein Bereich wuchs zur größten europäischen Ausbildungsstätte für Computerspiele. Er entwickelte als Prodekan der Fakultät für Informatik zudem den ersten europäischen Bachelorstudiengang für Virtuelle Realitäten und akkreditierte ihn erfolgreich.

Im März 2011 wurde er an die Hochschule Kempten berufen. Dort entwickelte er den Bachelorstudiengang „Informatik – Game Engineering“.

Seine computergrafischen Forschungsschwerpunkte sind Echtzeitraytracing und Fraktales Modellieren. Auch der Einfluss von Games und Virtuellen Realitäten auf unseren Alltag werden von ihm erforscht. Er ist Erfinder mehrerer Methoden in der Computergrafik, wie die Quaoaring-Technologie, das damit verbundene Biologische Koordinatensystem, die fraktale Planetengenerierung, die Hierarchitekturmodellierung, das Open-World-Konzept bei Spielen und die trigonometrischen Freiformdeformationen.

Breiner ist Autor von über 50 Veröffentlichungen und mehrfacher Preisträger. Unter anderem gewann er 2009 den „Best Teaching Award“, der denjenigen Professor mit der besten Lehre auszeichnet, 2010 den Preis der „SRH-Initiative für Kreative Lehre“ für sein neues Studiengangskonzept „SIEGER“ und 2012 den „Preis des bayerischen Staatsministeriums für herausragende Lehre“.

Er ist hauptverantwortlich für die Entwicklung mehrerer Game-Engines, wie die LichtBlitz-Engine, die Vektoria-Engine und die Zockl-Engine der Firma „3D-Generation“. Er spricht zwölf Sprachen, davon fünf fließend.

Breiner ist verheiratet und Vater dreier Kinder. Einige seiner Hobbys sind – neben der Informatik – Subkulturen, Kampfsport, Komponieren, Plansprachen entwickeln und Malen.



Physik von Licht und Farbe

- 1.1 Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums – 2
- 1.2 Lichtbrechung und Spektralfarben – 3
- 1.3 Lichtstreuung – 6
- Literatur – 8

Um einige Aspekte der Farbpsychologie umfassend zu verstehen, ist es nützlich, die Grundlagen der physikalischen Natur des Lichtes und der Sehphysiologie zu kennen. Im Folgenden sollen nur die zum Verständnis dieses Buches wichtigsten Kenntnisse vermittelt werden, bei näherem Interesse kann ein diesbezügliches Fachbuch wie z. B. Berke (1999) oder Karnath und Thier (2012) herangezogen werden.

1.1 Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums

Licht ist – vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet – spezielle *elektromagnetische Strahlung* (electromagnetic radiation). Diese Strahlung verhält sich in manchen Experimenten wie Wellen, in anderen Experimenten eher wie Partikel. Diese Eigenschaft des Lichtes (und anderer elektromagnetischer Strahlung) nennt sich *Welle-Teilchen-Dualismus* (wave-particle duality).

Der *Wellencharakter* (wave character) des Lichtes zeigt sich unter anderem daran, dass Licht definierte *Frequenzen* (frequencies) und damit auch definierte *Wellenlängen* (wave length) aufweist. Die Beziehung zwischen Frequenz und Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$f = c/\lambda$$

Dabei bedeutet f die Frequenz, λ die Wellenlänge und c die Lichtgeschwindigkeit, die eine physikalische Konstante ist und ca. 299.792.458 m/s beträgt.

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes liegen dabei zwischen ca. 380 nm und 760 nm (Butcher 2016). Dabei sind die Grenzen nicht scharf definiert. Sie können zwischen unterschiedlichen Personen und Versuchsaufbauten leicht variieren.

Neben Licht gibt es auch andere elektromagnetische Wellen, dazu gehören die *Niederfrequenzwellen* (low frequency waves), die

Radiowellen (radio waves), die *Mikrowellen* (micro waves), die *Infrarotstrahlen* (infra red rays), die *ultraviolette Strahlung* (ultraviolet rays), die *Röntgenstrahlung* (X-rays) und die *Gammastrahlung* (gamma-rays; NASA 2017).

Vom physiologischen Standpunkt ist – vom Licht abgesehen – davon nur die Infrarotstrahlung von Belang, da sie als Wärme wahrgenommen werden kann.

Die ultraviolette Strahlung kann zwar nicht direkt wahrgenommen werden, sie beeinflusst die Stimmung und die Gesundheit jedoch indirekt, da sie unter anderem für die Synthese wichtiger Moleküle wie beispielsweise Vitamin D in der Haut verantwortlich ist.

Die Wellenlängen dieser elektromagnetischen Wellen werden im Folgenden aufgelistet, dabei ist zu beachten, dass in der Literatur die Grenzen zwischen den verschiedenen Wellen- bzw. Strahlungsarten leicht unterschiedlich gezogen werden und sich teilweise auch überlappen (Butcher 2016; Herz 2017; Mehta 2011; NASA 2017):

- Niederfrequenzwellen, >10 km
 - Extremely Low Frequency (ELF), >10.000 km
 - Super Low Frequency (SLF), 10.000 km–1000 km
 - Ultra Low Frequency (ULF), 1000 km–100 km
 - Längstwellen = Very Low Frequency Waves (VLF) 100 km–10 km
- Rundfunkwellen, 10 km–1 m
 - Langwellen (LW), 10 km–1 km
 - Mittelwellen (MW), 1000 m–100 m
 - Kurzwellen (KW), 100 m–10 m
 - Ultrakurzwellen (UKW), 10 m–1 m
- Mikrowellen, 1 m–1 mm
 - Dezimeterwellen, 1 m–1 dm
 - Zentimeterwellen, 10 cm–1 cm
 - Millimeterwellen, 10 mm–1 mm
- Infrarotstrahlen (=Wärmestrahlung), 1 mm–760 nm
 - Fernes Infrarot (weitestgehend identisch mit der Terahertzstrahlung), 1 mm–50 μ m
 - Mittleres Infrarot, 50 μ m–3 μ m
 - Nahes Infrarot, 3 μ m–760 nm

1.2 · Lichtbrechung und Spektralfarben

- Für Menschen sichtbares Licht, 760 nm–380 nm
- Ultraviolette Strahlung, 380 nm–1 nm
 - UVA-Strahlung (=Schwarzlicht), 380 nm–315 nm
 - UVB-Strahlung (=Dornstrahlung), 280 nm–315 nm
 - UVC-Strahlung, 280 nm–100 nm
 - extreme UV-Strahlung, 100 nm–1 nm
- Röntgenstrahlung, 1 nm–5 pm
 - Überweiche Röntgenstrahlung, 1 nm–60 pm
 - Weiche Röntgenstrahlung, 60 pm–20 pm
 - Mittlere Röntgenstrahlung, 20 pm–10 pm
 - Harte Röntgenstrahlung, 10 pm–5 pm
- Gammastrahlung (überharte Röntgenstrahlung), <5 pm

Der Frequenzbereich des sichtbaren Lichtes entspricht genau einer Oktave. Der bisher erforschte Bereich des elektromagnetischen Spektrums umfasst dagegen mehr als 73 Oktaven, sodass der Mensch nur einen verschwindend kleinen Bruchteil des elektromagnetischen Spektrums über das optische Sinnessystem wahrnehmen kann. Die Beschränkung auf eine Oktave ist möglicherweise kein Zufall, da molekulare Resonanzeffekte oft ein zweites Maximum bei der doppelten Frequenz haben, sodass durch die Beschränkung auf eine Oktave Redundanzeffekte vermieden werden. Auch die Position innerhalb des elektromagnetischen Spektrums ist zu erklären, da die Atmosphäre der Erde elektromagnetische Strahlung der Wellenlängen zwischen 300 nm bis ca. 900 nm (neben den Radiowellen und den Längstwellen) bevorzugt passieren lässt und in diesem Bereich eine Art Sichtfenster bietet.

Wird nur der Wellencharakter des Lichtes beachtet, so fallen die Ähnlichkeiten zu Schallwellen auf, nur dass Licht kein Trägermedium benötigt. Treffen beispielsweise zwei gleich starke Lichtstrahlen mit einem Phasenunterschied von 180° aufeinander, so wird – analog zu Schallwellen – die resultierende Amplitude Null sein. Bis Anfang des 20. Jahrhunderts

wurden daher als hypothetisches Trägermedium des Lichtes feinstoffliche Partikel, der *Äther* (ether), postuliert. Diese Annahme wurde aber durch verschiedene physikalische Versuche, insbesondere das Experiment von Michelson und Morley, widerlegt (Whittaker 1910, S. 137 ff.).

Licht existiert nur portionsweise, also *quantisiert* (BE: quantised; AE: quantized). Ein einzelnes Lichtteilchen heißt *Photon* (photon). Je kleiner die Wellenlänge eines Photons ist, desto mehr Energie besitzt es und desto mehr vermag es in der Regel molekulare Strukturen beim Auftreffen zu verändern. Somit besitzt Licht auch *Teilchencharakter* (particle character). Dies bedingt, dass elektromagnetische Strahlung höherer Frequenz in der Regel gefährlicher ist als Strahlung niedrigerer Frequenzen. Hochfrequente ultraviolette Strahlen, Röntgenstrahlen und Gammastrahlen können so aufgrund der hohen Energie ihrer Photonen zu Zerstörungseffekten von Molekülen im menschlichen Körper führen, insbesondere zu Mutationen der Desoxyribonukleinsäure. Diese Strahlungsarten sind daher kanzerogen und mutagen.

1.2 Lichtbrechung und Spektralfarben

Licht mit kleinerer Wellenlänge hat einen höheren Brechungsindex als Licht großer Wellenlänge. Mithilfe dieser unterschiedlichen Refraktionseigenschaften kann weißes Licht in seine *Spektralfarben* (BE: spectral colours, AE: spectral colors) zerlegt werden, z. B. mittels eines optischen Prismas. In der Natur kommt die Spektralzerlegung unter anderem in Form eines Regenbogens vor. Hier wird das Licht an den Vorderseite des Wassertropfens gebrochen und an der Rückseite der Wassertropfen reflektiert. Der Hauptregenbogen entsteht durch einfache Reflexion, der schwächere Nebenregenbogen durch zweifache Reflexion des gebrochenen Lichtes an der Tropfenrückseite. Andere seltenere

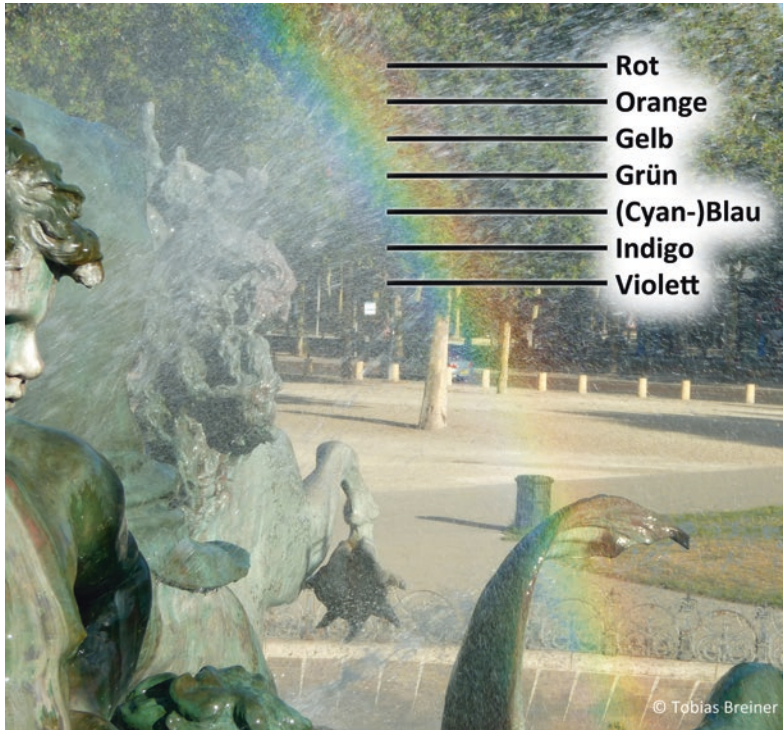
1

Naturphänomene, die zu einer Zerlegung des Lichtes in seine Spektralfarben führen, sind Zirkumzenitalbögen, Zirkumhorizontalbögen, Taubögen, Schneebögen, irisierende Eiswolken, Nebensonnen und Mondhalos.

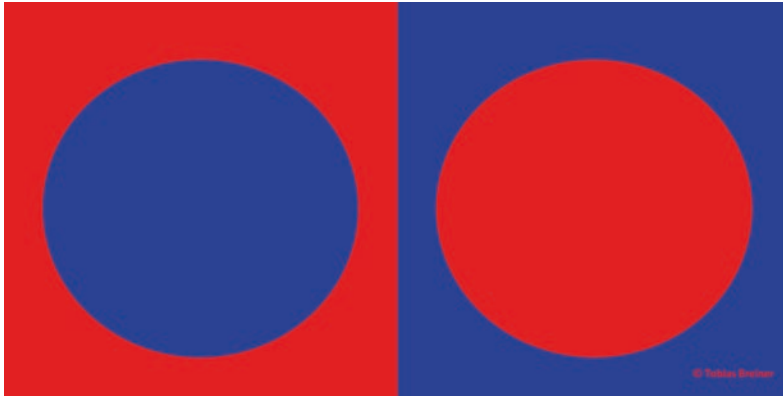
Isaac Newton (1642–1726) experimentierte als einer der Ersten mit Far zerlegungen, die er mithilfe eines Prismas vornahm (Newton 1704). Er nannte die Spektralfarben *Rot* (red), *Orange* (orange), *Gelb* (yellow), *Grün* (green), *Blau* (blue bzw. im Newtonschen Original: *blew*), *Indigo* (indigo) und *Violett* (violet) (Newton 1704). Er sah diese sieben Farben fälschlicherweise auch als Grundfarben des Lichtes an. Die Spektralbeschreibungen Newtons wurden in den deutschsprachigen Raum übernommen. Dabei wurde nicht bedacht, dass die englische Farbbezeichnung „blue“ recht ungenau ist. Sie kann sowohl Cyan, Türkis, Hellblau, Preußischblau, Ozeanblau, Indigo als auch

weitere Blau- und Türkistöne bezeichnen. In diesem Falle bezog sich Newton auf eine Farbe zwischen Hellblau und Cyan, was indirekt daran erkennbar ist, dass er Indigo ebenfalls benannt hat. Trotzdem werden die originalen Bezeichnungen Newtons hierzulande immer noch in Kindergärten und Schulen bei den Beschreibungen von Regenbögen angewandt, was für einige Verwirrung sorgt. Erziehende sollten daher zumindest das Wort „Blau“ in den Spektralfarben durch „Hellblau“ oder noch genauer durch „Cyan“ ersetzen. ■ Abb. 1.1 zeigt, wie die sieben Spektralfarbenbezeichnungen auf einen Regenbogen angewandt werden können.

Von den unterschiedlichen Wellenlängen dieser Lichtfarben konnte Newton noch nichts wissen. Hier folgt eine ungefähre Angabe der Wellenlängen der einzelnen Spektralfarben, allerdings muss dazu angemerkt werden, dass das Spektrum ein Kontinuum bildet und die



■ Abb. 1.1 Die sieben Spektralfarben in einem Regenbogen einer Fontäne



■ **Abb. 1.2** Beispiel für die chromatische Aberration: Die blaue Kreisfläche links erscheint hinter der roten Umgebungsfläche, die rote Kreisfläche rechts dagegen vor der blauen Grundfläche

Spektralfarben von verschiedenen Organisationen unterschiedlich definiert sind (Butcher 2016; Herz 2017; Mehta 2011; NASA 2017):

- Rot: ~760 nm–630 nm
- Orange: ~630 nm–590 nm
- Gelb: ~590 nm–560 nm
- Grün: ~560 nm–490 nm
- Cyanblau: ~490 nm–470 nm
- Indigo: ~470 nm–440 nm
- Violett: ~440 nm–380 nm

Die unterschiedlichen Brechungsindizes bei Licht verschiedener Wellenlängen spielen auch bei der Farbwahrnehmung eine Rolle: Ein blaues Objekt wird bei einer gleich gekrümmten Augenlinse anders projiziert als ein rotes Objekt. Die Ziliarmuskeln, welche die Augenlinse verformen, müssen daher bei blauen Objekten in eine größere Ferne fokussieren. Dies wird als *chromatische Aberration* (chromatic aberration) bezeichnet. Bei einer Fläche mit blauen und roten Anteilen erscheinen daher die blauen Flächen subjektiv hinter den roten (■ Abb. 1.2).

Die chromatische Aberration tritt nicht nur in der Augenlinse auf, sondern auch in den Linsen von Videobrillen. Ein häufiges Artefakt bei VR-Systemen sind daher blaue oder rote Ränder um die virtuellen Objekte.

Eine Sonderform der chromatischen Aberration ist die *Farbstereoskopie* (BE: stereoscopy through colours; AE: stereoscopy by colors). Sie tritt bei *Binokularität* (binocularity)

auf, also wenn beide Augen beteiligt sind und durch *Triangulation* (triangulation) gleichartiger Bildteile zwischen rechtem und linken Augenbild Rückschlüsse auf die Entfernung der Objekte vom Beobachter gezogen werden. Die chromatische Aberration bedingt dann, dass blaue Photonen stärker gebrochen und damit im Augapfel weiter nach innen projiziert werden. Aus diesem Grund werden blaue Objekte subjektiv als weiter entfernt wahrgenommen werden als rote. ■ Abb. 1.3 zeigt eine Skizze, welche den Mechanismus der Farbstereoskopie erklärt.

Die Farbstereoskopie tritt nicht nur beim Menschen auf, sondern erschwert auch das bildbasierte 3D-Scanning für Computerspiele, welches ebenfalls durch Triangulation mehrerer Kamerabilder erreicht wird. Die 3D-Scanner platzieren die Vertices¹ blauer Oberflächen fälschlicherweise zu weit weg, während die Vertices roter Flächen zu sehr in die Nähe der Kameras gesetzt werden. Insbesondere bei mehrfarbigen Oberflächen kann dies zu ungewollten Reliefartefakten führen.

1 Ein Vertex (Plural: Vertices) bezeichnet in der Computergrafik einen Eckpunkt eines Oberflächenpolygons von virtuellen Objekten. Dieser enthält neben dem dreidimensionalen Positionsvektor noch Zusatzinformationen, z. B. die Oberflächennormale an diesem Punkt oder Texturkoordinaten.

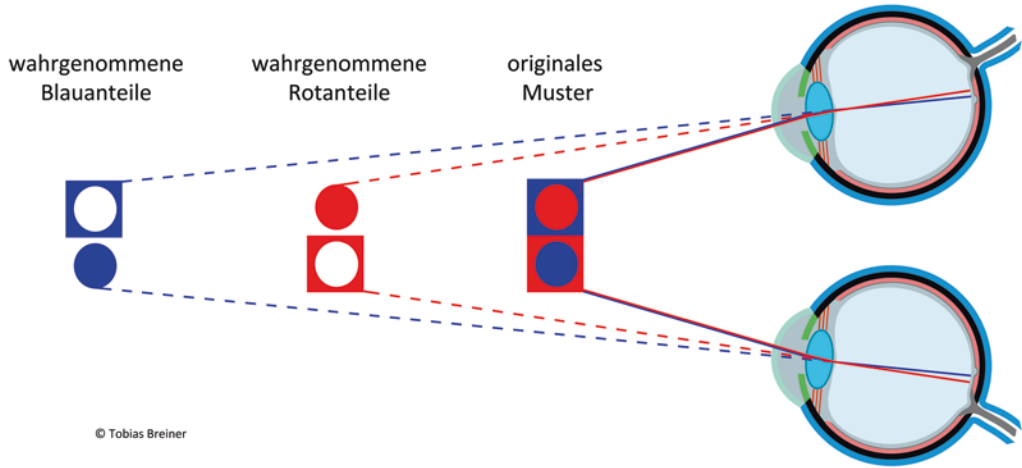


Abb. 1.3 Skizze zur Erklärung der Farbstereoskopie: Blaues Licht ist kurzwelliger als rotes. Daher werden infolge der chromatischen Aberration die blauen Photonenanteile des Bildes stärker in der Augenlinse gebrochen und weiter nach innen (nasal) auf die Netzhaut projiziert. Dies bedingt eine stereoskopische Illusion, die bedingt, dass blaue Bildanteile stereoskopisch scheinbar in die Ferne rücken, während rote Bildanteile subjektiv in der Nähe wahrgenommen werden

1.3 Lichtstreuung

Je kurzwelliger Licht ist, desto mehr wird es von den Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen der Atmosphäre gestreut. Daher wird bei einem wolkenlosen, klaren Tag hauptsächlich blaues Licht von den Luftteilchen zurückgeworfen. Wir nehmen dies als blauen Himmel wahr. Die Sonne nehmen wir aus dem gleichen Grund als leicht gelblich wahr, da ein beträchtlicher Anteil der direkten Blustrahlen durch diese *Lichtstreuung* bzw. *Blau-streuung* herausgefiltert wird. In **Abb. 1.4** wird dieser Effekt in Form einer Skizze erklärt.

Die Streuung ist auch für das Morgen- und Abendrot verantwortlich. Weil das Sonnenlicht an den Tag-zu-Nacht-Übergängen einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss, kommt durch die Streuung nichts mehr von dem blauen Licht beim Betrachter an. Der Himmel wird daher erst gelblich (wenn die mittelwelligen Anteile des Sonnenlichtes noch durchkommen) und schließlich rötlich.

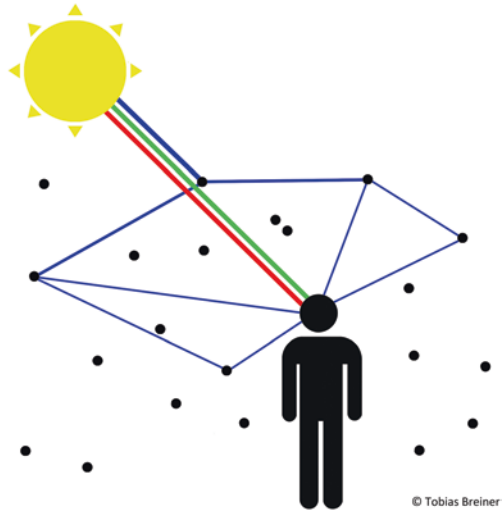


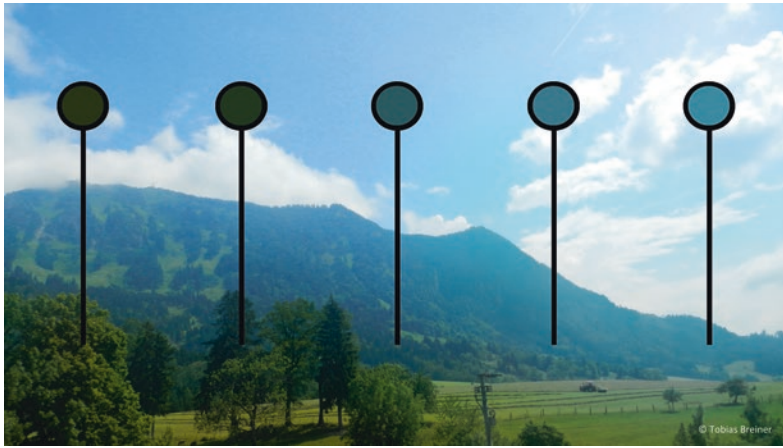
Abb. 1.4 Skizze zur Erklärung der Blaustreuung: Blaue Photonen der Sonne werden stark an den Luftteilchen der Atmosphäre gestreut. Daher erreichen diese kurzwelligen Lichtanteile das Auge selten direkt, sondern treffen aus allen Richtungen der Atmosphäre ein. Dies hat zur Folge, dass der wolkenlose Himmel blau erscheint. Die Mischung der restlichen Spektralanteile des Sonnenlichtes ergibt gelb, sodass die Mittagssonne gelblich aussieht

Das Phänomen der Blauverschiebung weit entfernter Gegenstände kommt ebenfalls durch die Lichtstreuung zustande. Er ist als Effekt der „blauen Berge“ bekannt, der vor allem an klaren, sonnigen Tagen auftritt: Aufgrund der vielen Luftteilchen zwischen dem Betrachter und den Bergen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass viele blaue Photonen des Sonnenlichts in Richtung des Betrachters umgelenkt werden. An Schlechtwettertagen oder bei hoher Luftfeuchtigkeit erscheinen entfernte Berge

jedoch nicht blau, sondern eher blass bis hellblau. Diese Weißverschiebung kommt durch den Wasserdampf in der Atmosphäre zustande.

■ Abb. 1.5 zeigt ein Beispiel für Blau- in Kombination mit Weißverschiebung.

In Computerspielen werden diese Effekte durch *Entfernungsshader* (distance shaders) simuliert, die Abhängig von Luftfeuchtigkeit und Sonnenstand entfernte Objekte realistisch umfärben. ■ Abb. 1.6 zeigt den Effekt eines solchen Entfernungsshaders im Spiel FarCry.



■ Abb. 1.5 Blauverschiebung von entfernten Bergen infolge der Blaustreuung in der Atmosphäre mit gleichzeitigem Verblassungseffekt durch Luftfeuchtigkeit, aufgenommen im Allgäu



■ Abb. 1.6 Beispiel für einen Entfernungsshader im Spiel FarCry 4. Die tibetanische Pagode und die Berge im Hintergrund des Pfades sind deutlich ins Blau-Weiße verschoben

Fazit

Licht ist spezielle elektromagnetische Strahlung in einem Frequenzbereich von ca. 760 nm–380 nm.

Somit kann der Mensch nur einen verschwindend kleinen Bruchteil des elektromagnetischen Spektrums optisch wahrnehmen.

Kurzwelliges Licht wird stärker gebrochen als langwelliges. Dies bedingt eine Reihe von Phänomenen, wie die Entstehung von Regenbögen, die chromatische Aberration oder den Alltagseffekt, dass der Himmel und die Berge blau, die Mittagssonne gelb und die Sonnenauf- und -untergänge rot erscheinen.

Literatur

- Berke, A. (1999). *Biologie des Auges* (2. Aufl.). Mainz: WVAO.
 Butcher, G. (2016). *Tour of the electromagnetic spectrum* (3. Aufl.). USA: Government Printing Office.

- Joachim Herz Stiftung. (2017). Physik – Elektromagnetisches Spektrum. ► <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum>. Zugriffen: 15. Nov. 2017.
- Karnath, H.-O., & Thier, P. (2012). *Kognitive Neurowissenschaften* (3. Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Mehta, A. (2011). Introduction to the electromagnetic spectrum and spectroscopy. ► <http://pharmax-change.info/press/2011/08/introduction-to-the-electromagnetic-spectrum-and-spectroscopy/>. Zugriffen: 23. Nov. 2017.
- NASA. (2017). The electromagnetic spectrum. ► <https://science.nasa.gov/ems>. Zugriffen: 23. Nov. 2017.
- Newton, I. (1704). *Opticks, or, A treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London: Smith & Walford.
- Whittaker, E. T. (1910). *A history of the theories of aether and electricity* (1. Aufl.). Dublin: Longmans, Green & Co. ► <https://archive.org/details/history-oftheorie00whitrich>. Zugriffen: 23. Nov. 2017.



Physiologie des Auges

- 2.1 Anatomie des Augapfels – 10
- 2.2 Chromophore – 10
- 2.3 Sehzellen – 16
- 2.4 Farbfehlsichtigkeiten – 21
- 2.5 Neuronale Verarbeitung in der Netzhaut – 21
- 2.6 Optische Täuschungen der Netzhautneuronen – 25
- Literatur – 30

Um die Farbpsychologie nicht nur oberflächlich, sondern umfassend zu verstehen, ist es unabdingbar, die Grundlagen des visuellen Systems des Menschen zu kennen.

In den folgenden Unterabschnitten werden dabei nur diejenigen biologischen Aspekte behandelt, die für das Verständnis der Farbwahrnehmung unabdingbar sind.

2.1 Anatomie des Augapfels

Das Auge wird von der *weißen Lederhaut* (sclera) umgrenzt. Im vorderen Teil des Auges weicht die weiße Lederhaut der durchsichtigen *Hornhaut* (cornea). Dabei ist die Cornea konvex gewölbt, was beim Modellieren von virtuellen Spielcharakteren beachtet werden sollte, um einen realistischen Augen-eindruck zu erzeugen. Die Cornea hat keine Adern oder Venen. Sie wird daher vom *Tränenfilm* (tear film) von außen mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt.

Hinter der Cornea liegt die *Regenbogenhaut* (iris). Die kreisrunde Öffnung der Iris nennt sich *Pupille* (pupil). Die Iris zieht sich unwillkürlich bei Lichteinfall durch Ringmuskeln zusammen, sodass sie wie eine Blende wirkt und den Einfall des Lichtes regulieren kann.

Hinter der Pupille liegt eine elastische *Linse* (lens). Sie hängt durch *Zonulafasern* (zonule fibers) an radial angeordnete *Ziliarmuskeln* (ciliary muscles). Durch diese kann sie deformiert werden, sodass sich der Mensch auf verschiedene Fokussierungstiefen einstellen kann. Es ist zu beachten, dass nur ca. ein Viertel der Brechkraft auf die eigentliche Linse entfallen, die restlichen Anteile der Brechkraft – also drei Viertel übernimmt die Cornea.

Hinter der Linse liegt der größte Innenbereich des Augapfels, welcher vom *Glaskörper* (vitreous body) belegt ist. Der Glaskörper ist eine gallertartige Substanz, die zu 98 % aus Wasser besteht und für die Stabilität des Auges zuständig ist. Er ist durch Proteinfäden mit der *Netzhaut* (retina) verbunden. Zwischen den

Proteinfäden fließt das *Kammerwasser* (BE: aqueous humour; AE: aqueous humor).

Wenn ein Objekt fixiert wird, so wird es auf die Retina im *Fixationspunkt* (BE: projection centre; AE: projection center) punktsymmetrisch gespiegelt projiziert. Dieser Fixationspunkt befindet sich im *Gelben Fleck* (macula). Er befindet sich entgegengesetzt zur Pupille im Zentrum der Netzhaut. Der Innenbereich des Gelben Flecks ist etwas vertieft in die Retina eingelassen, sodass auch von der *Sehgrube* (Fovea centralis) gesprochen wird. Dort ist die Dichte der Sehzellrezeptoren am höchsten. Die Dichte nimmt von dort aus radial nach außen hin ab.

Im *Blinden Fleck* (optic disc), der nicht mit dem Gelben Fleck verwechselt werden sollte, tritt der *Sehnerv* (optic nerve) mit ca. 1,2 Mio. Axonen aus. Er befindet sich ca. 15° schläfenseitig.

Zwischen Iris und Linse befindet sich die *hintere Augenkammer* (posterior chamber) und zwischen Iris und Cornea die *vordere Augenkammer* (anterior chamber). Beide sind mit Kammerwasser gefüllt. Auch der schmale Bereich zwischen Glaskörper und Netzhaut ist vom Kammerwasser durchflutet.

Dieses Kammerwasser ist durch die *Blut-Auge-Schranke* (blood-ocular barrier) vom restlichen Blutkreislauf abgekoppelt, das heißt, dass viele hydrophile Moleküle nicht direkt in das Kammerwasser dringen können. Dies ist einerseits ein Segen, sonst würden wir z. B. beim Essen von Roter Bete alles in Rot sehen, andererseits aber auch ein Fluch, denn viele potentiell nützliche Augenmedikamente können dadurch nicht an ihren Zielort gelangen. Das Kammerwasser hat den gleichen Brechungsindex wie der Glaskörper (Berke 1999). ■ Abb. 2.1 zeigt den schematischen Aufbau des Auges.

2.2 Chromophore

Da Licht im Nanometerbereich schwingt, kann es zu Resonanzeffekten im atomaren und molekularen Bereich kommen, sodass Licht bestimmter Frequenzen von einigen