

X . media . press



Klaus Simon

Farbe im Digitalen Publizieren

Konzepte der digitalen Farbwiedergabe
für Office, Design und Software

Prof. Dr. Klaus Simon
Alte Landstr. 158
8800 Thalwil
Schweiz
klaus.simon@empa.ch

ISBN 978-3-540-37327-8

e-ISBN 978-3-540-37329-2

DOI 10.1007/978-3-540-37329-2

ISSN 1439-3107

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

© 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Einbandgestaltung: KünkelLopka Werbeagentur, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort

Die hier präsentierte Sichtweise des Themas «Farbe» ist geprägt durch meine berufliche Tätigkeit an der Empa¹ bzw. der Ugra², die bis 2005 dort organisatorisch integriert war. Auf Grund der dadurch bedingten Konzentration auf branchenweite Veränderungen bzw. Vorgänge ist es naheliegend das Thema «Farbe» vor dem Hintergrund der aktuellen Workflow-Szenarien darzustellen. In Anbetracht des vollständig etablierten Desktop Publishings und des zunehmenden Trends zum Cross Media Publishing verändern sich die Zielgruppen, an die sich ein solches Werk traditionell wendet. Der gewählte Titel sei als Hinweis auf die geänderten Bedürfnisse bzw. Erwartungen an ein diesbezügliches Lehrbuch verstanden.

Die Publikationstechnik vor 1990 war durch die fotomechanische Bildreproduktion geprägt. Sie zeichnete sich durch feststehende industrielle Arbeitsabläufe aus, die durch Spezialisten der Druckvorstufe ausgeführt wurden. Farbe war gerätespezifisch. Der Umgang mit Farbe beschränkte sich auf die Bedienung der entsprechenden Geräte, z.B. einer Kamera, welche in den vielen einschlägigen Ausbildungsgängen der graphischen Industrie erlernt wurde. Farbe als technische Spezifikation war nur in Form der Qualitätskontrolle, z.B. bei Schadensfällen, präsent.

Im digitalen Publizieren besteht das Produkt aus einer abstrakten Layoutbeschreibung. Die festgefügteten Arbeitsabläufe der Druckvorstufe sind durch offene Kommunikationsstandards ersetzt worden. Die abstrakten Farbspezifikationen der digitalen Daten sind geräte-neutral. Gerätespezifische Anpassungen müssen explizit, z.B. durch ein Color Management System, vorgenommen werden. Der sichere Umgang mit digitalen Farbdaten erfordert ein konzeptionelles Wissen über Farbe, Farbmessung oder Farbräume. Das operative Farbverständnis der fotomechanischen Bildreproduktion tritt in den Hintergrund.

Die Herausforderung besteht nun darin, dass Farbe als ein Phänomen der menschlichen Wahrnehmung technisch keinesfalls einfach zugänglich ist. Das erste thematische Kapitel des Buches

¹Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt

²Verein zur Förderung wissenschaftlicher Untersuchungen in der grafischen Industrie, dem schweizer Pendant zur deutschen Fogra

beschäftigt sich demgemäss mit den physiologischen Grundlagen des Sehens. Es folgt die Farbmessung, der farblichen Charakterisierung eines Lichtreizes, einschliesslich der Besonderheiten der wichtigsten technischen Farbräume. Die Farbmessung wird in den allgemeineren Kontext der Farberfassung eingebettet. Ein spezielles Kapitel ist dem Halftoning, der Realisierung von Helligkeitsstufen auf Papier, gewidmet. Anschliessend beschäftigen wir uns mit den zentralen Problemfeldern der modernen Farbbildreproduktion, dem Gamut Mapping und seiner Anwendung im Color Management. Die Workflow-Problematik wird aus einer historischen Perspektive beleuchtet. Das letzte Kapitel behandelt die Qualitätskontrolle.

Wie bei jedem Lehrbuch mussten verschiedene Kompromissen eingegangen werden. An erster Stelle ist hier der Widerspruch zwischen fachlicher Tiefe und allgemeiner Verständlichkeit zu nennen. Es wurde speziell versucht, Farbforschung als Selbstzweck zu vermeiden und den Bezug jedes Einzelthemas zum Publizieren herauszuarbeiten.

Traditionell bildet die Danksagung den Schluss eines Vorwortes, so auch hier. Zunächst bedanke ich mich beim Springer-Verlag und speziell bei Herrn Engesser für das wohlwollende Interesse am Thema und die unkomplizierte Zusammenarbeit. Mein Dank gilt ferner den in- und externen Kollegen, die mich in der ein oder anderen Art und Weise unterstützt haben, namentlich möchte ich Iris Spro, Donata Faust und Urs Bünter erwähnen. Schliesslich sei den verschiedenen Firmen, Museen und Organisationen gedankt, die mit Illustrationen zum Gelingen des Werkes beigetragen haben. Jeder diesbezüglichen Abbildung ist eine entsprechende explizite Quellenangabe zugeordnet.

Zürich, Mai 2007

Klaus Simon

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	7
1.1 Literaturverzeichnis	11
2 Sehen und Wahrnehmen	13
2.1 Der Lichtreiz	16
2.1.1 Spektren	17
2.1.2 Strahlungsgrößen	18
2.2 Physiologie des Sehens	22
2.2.1 Das Auge als optisches System	23
2.3 Die Netzhaut	25
2.3.1 Räumliche Verteilung der Rezeptoren	26
2.3.2 Adaptation	27
2.3.3 Die drei Zapfenarten	29
2.3.4 Rezeptive Felder	31
2.3.5 Hermann-Gitter	33
2.3.6 Simultankontrast	34
2.4 Farbsehen	35
2.4.1 Dreikomponententheorie	35
2.4.2 Gegenfarbentheorie nach Hering	36
2.4.3 Zonentheorie	37
2.5 Wahrnehmungsschwellen	39
2.5.1 Reiz- und Empfindungsstärke	39
2.5.2 Helligkeitsempfindung	41
2.5.3 Räumliches Auflösungsvermögen	43
2.5.4 Zeitliches Auflösungsvermögen	47
2.6 Literaturverzeichnis	48

3 Farbmatrik	51
3.1 Farbvergleiche	52
3.2 Farbvalenzen	54
3.2.1 Spektralwertkurven	60
3.2.2 Farbdiagramme	61
3.2.3 Das Normvalenzsystem	63
3.2.4 Absolute und relative Farbmatrik	65
3.2.5 Grossfeld-Normvalenzsystem	66
3.3 Gleichabständige Farbräume	67
3.3.1 Konzepte für Farbabstände	68
3.3.2 CIELUV	72
3.3.3 CIELAB	75
3.3.4 Farbdifferenzformeln	80
3.4 Körperfarben	83
3.4.1 Lichtmodifikation durch Materie	84
3.4.2 Messgeometrien	88
3.4.3 Lichtquellen	90
3.5 Der \mathcal{CMYK} -Farbraum	93
3.5.1 Optimalfarben und der ideale Mehrfarbendruck	94
3.5.2 Die realen Grundfarben des Mehrfarbendrucks	100
3.5.3 Transformation \mathcal{XYZ} nach \mathcal{CMYK}	102
3.6 \mathcal{RGB} -Farbräume	107
3.6.1 Ableitung aus \mathcal{XYZ}	107
3.6.2 sRGB	111
3.6.3 \mathcal{RGB} als Arbeitsraum	114
3.6.4 Bemerkungen	120
3.7 Literaturverzeichnis	121

4	Farbordnungssysteme	125
4.1	Das Munsell-System	127
4.2	Das NCS-Farbsystem	129
4.3	Das DIN-Farbsystem	131
4.4	Literaturverzeichnis	132
5	Farberfassung	133
5.1	Farbmessverfahren	134
5.2	Farbmessung	136
5.3	Scanner	139
5.4	Digitalfotografie	141
5.5	Literaturverzeichnis	142
6	Halftoning	143
6.1	Rasterzellen	143
6.2	Amplitudenmodulation	145
6.2.1	Farbdarstellung und Moiré-Effekte	147
6.2.2	Rasterzellenformen	149
6.3	Frequenzmodulierte Rasterung	151
6.4	Rasteralgorithmen	152
6.4.1	Dot-by-Dot-Verfahren	154
6.4.2	Error Diffusion	159
6.4.3	Intensitätsmodulation	163
6.5	Bemerkungen	164
6.6	Literaturverzeichnis	165

7 Gamut Mapping	167
7.1 Traditionelle Designprinzipien	172
7.1.1 Farbton	172
7.1.2 Helligkeit	173
7.1.3 Sättigung	188
7.2 State-of-the-Art	189
7.2.1 Clipping-Verfahren	190
7.2.2 Grundschema komplexerer Algorithmen	191
7.3 Forschungstendenzen	198
7.4 Schlussbemerkungen	200
7.5 Literaturverzeichnis	200
8 Color Management Systeme	203
8.1 Gerätespezifische Farbtransformationen	205
8.2 ICC-Profile	207
8.2.1 Wiedergabeziele	207
8.2.2 Profilklassen	219
8.2.3 Profilstruktur	220
8.3 Color Matching Method	224
8.4 Profilerstellung	225
8.4.1 Scanner- und Kameraprofile	229
8.4.2 Monitorprofile	232
8.4.3 Druckerprofile	235
8.5 Benutzersicht	238
8.6 Technische Probleme	239
8.7 Bewertung	243
8.8 Literaturverzeichnis	246

9 Drucken: Gestern, Heute, Morgen	247
9.1 Entstehen der Schwarzen Kunst	249
9.2 Industrialisierung des Druckens	252
9.2.1 Papiererzeugung	252
9.2.2 Weiterentwicklung der Druckmaschinen	254
9.2.3 Mechanisierung der Schreib- und Satztechnik	258
9.3 Druck wird Massenmedium	262
9.4 Entwicklung der Bildreproduktion	266
9.4.1 Holzschnitte und Kupferstiche	267
9.4.2 Steindruck	272
9.4.3 Fotomechanische Bildreproduktion	277
9.4.4 Entwicklung der Fotografie	278
9.4.5 Fotomechanische Rasterung	285
9.4.6 Der fotografische Schwarzweissprozess	288
9.4.7 Offsetdruck	292
9.4.8 Fotosatz	295
9.5 Die Druckvorstufe zwischen 1970 – 90	297
9.6 Digitale Druckvorstufe	299
9.6.1 Camera Ready und Wissenschaft	300
9.6.2 Desktop Publishing	302
9.6.3 Digitale Bogenmontage	305
9.7 Computer-to-Techniken	306
9.8 Cross Media Publishing	310
9.9 Konventionelle Druckverfahren	313
9.9.1 Buchdruck	315
9.9.2 Flexodruck	315
9.9.3 Tiefdruck	316

9.9.4 Siebdruck	318
9.10 Non-Impact-Printing	319
9.10.1 Elektrofotografie (Laserdruck)	320
9.10.2 Inkjets	321
9.10.3 Thermographie	323
9.11 Literaturverzeichnis	324
10 Proofing	325
10.1 Proof-Arten	326
10.2 Rahmenbedingungen des Kontraktproofs	327
10.3 Technik	330
10.3.1 Rasterproof (True Proof)	333
10.3.2 Softproof	333
10.3.3 Remote Proofing	334
10.4 Tendenzen	335
10.5 Literaturverzeichnis	335

Motivation

Der Mensch nimmt seine Umwelt überwiegend visuell wahr. Redewendungen wie «*sich ein Bild machen*» oder «*ein Bild sagt mehr als tausend Worte*» weisen auf die zentrale Bedeutung des Gesichtssinnes hin. Ein wichtiger Teilaspekt ist dabei das Farbsehen. Sprachlich ist Farbe im Allgemeinen positiv besetzt wie in «*schön bunt*»¹ oder «*Farbe bekommen*».² Die Abwesenheit von Farbe, z.B. «*grau in grau*», wird dagegen negativ wahrgenommen. Formulierungen wie «*ich sehe rot*» oder «*sich grün und blau ärgern*» deuten auf die Verbindung von Farbe und Emotion.



Abbildung 1.1
Farbe und Gestalten

Die Wertschätzung von Farbe kann an dem Aufwand abgelesen werden, der zur farblichen Gestaltung der Umwelt getrieben wird, z.B. im Produktdesign. Die Auswahl der «*richtigen*» Farbe für ein neues Kleidungsstück oder ein neues Auto ist ein selbstverständlicher Teil der Kaufentscheidung. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die Entstehung der modernen Chemieindustrie auf das Engste mit der Produktion von Farbstoffen verknüpft ist,

¹abwechslungsreich, nicht langweilig

²für gesund werden

man denke etwa an BASF, Agfa oder IG Farben.³ Von der Gestaltung der Welt ist es nur ein kleiner Schritt zu ihrer Abbildung in der Kunst oder der Kommunikation. So bezeugen etwa die Höhlenbilder der **Grotte Chauvet** (Vallon-Pont-d'Arc)⁴, die Ikonenmalerei der orthodoxen Christen oder die farbenprächtigen Mandalas des tibetischen Lamaismus das tiefverwurzelte Interesse an Farbbildern in der menschlichen Kultur. Ein aktuelles und für die vorliegende Analyse besonders naheliegendes Beispiel liefert das Web. Das Internet, das 30 Jahre unbemerkt von der Öffentlichkeit als Werkzeug von Wissenschaftler für Wissenschaftler existierte, wurde erst Mitte der 90er Jahre populärer Teil der Alltagskultur, nachdem es fähig wurde auf einfache Art Farbbilder darzustellen.



Abbildung 1.2
mit und ohne Farbe

³Eine sehr schöne Beschreibung der Entwicklung der Farbstoffindustrie findet man in **Bram** [1].

⁴siehe **Chauvet** [2]

Und damit sind wir beim Thema des Buches angekommen, der Erzeugung digitaler Farbbilder. Obwohl der Computer im pragmatischen Umgang mit Farbe vieles vereinfacht hat, ist das wissenschaftliche Phänomen *Farbe* nicht trivial und ist bis heute Gegenstand der Grundlagenforschung.

Dies liegt vor allem daran, dass Farbe keine physikalische Grösse ist, sondern eine neuronale Interpretation sinnesphysiologisch erfasster, relativer Intensitätsunterschiede in der Wellenlängenzusammensetzung von sichtbarem Licht darstellt.

Diese Aussage mag zunächst einmal irritieren, denn fundamental erfahren wir Farbe als Oberflächenfarbe, oder genauer, die Farbe eines Gegenstandes nehmen wir als Materialeigenschaft seiner Oberfläche wahr. Dieser Eindruck beruht auf der Konstanz der Farbwahrnehmung, d.h. ein rotes Auto bleibt ein rotes Auto, sowohl bei Glühbirnenlicht in der Garage, im Nebel auf der Autobahn oder im Morgenrot auf Mallorca. Ein besonders extremes Beispiel stellt eine farbige Sonnenbrille dar. Nach einer gewissen zeitlichen Anpassung nehmen wir unsere Umwelt mehr oder weniger wie gewohnt wahr, wobei besonders die Unterscheidbarkeit von bunt und unbunt erhalten bleibt.⁵ Diese Konstanz von Oberflächenfarbe⁶ ist aus evolutionsbiologischer Sicht äusserst wichtig für uns als Lebewesen, denn sie erlaubt es uns, unsere Umwelt an ihren Oberflächenfarben zu erkennen. Aus physikalischer Sicht ist diese Konstanz jedoch eher verwunderlich, denn die Farbe ist offenbar eine Funktion des von der jeweiligen Oberfläche reflektierten Lichtes. Die Lichtverhältnisse in unserer



Abbildung 1.3
zur Farbkonstanz;
der blaue Schnee
wird weiss
wahrgenommen

⁵Die Farbkonstanz hat jedoch auch ihre Grenzen. So sind durch einen roten Farbfilter weisse Gegenstände noch als solche zu erkennen, aber rote erscheinen ebenfalls als weisse.

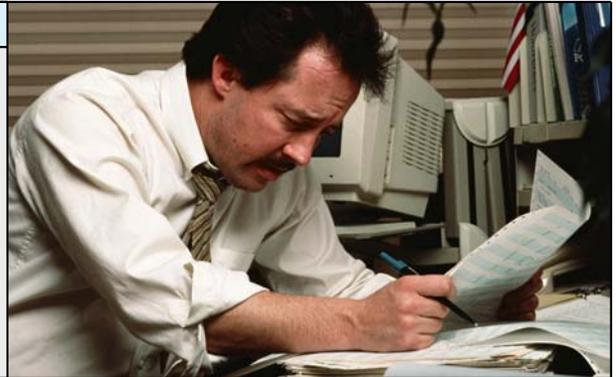
⁶Entwicklungsbiologen sehen in dieser Fähigkeit einen entscheidenden evolutionären Vorteil höherer Primaten.

Umwelt variieren⁷ aber in einem schier unglaublichen Umfang.⁸ In Strahlungsleistung gemessen, ist ein schwarzer Kohlenhaufen in der Sommersonne wesentlich heller als weisser Schnee in der Abenddämmerung.

Die elementare Erfahrung, dass mehr oder weniger unabhängig von den herrschenden Lichtverhältnissen eine Oberflächenfarbe als konstant wahrgenommen wird, zeigt, dass Farbsehen eine bemerkenswerte Leistung unseres Gehirns repräsentiert. Die entsprechenden physiologischen bzw. neuronalen Prozesse werden gerade heutzutage intensiv erforscht. Ihr Verständnis ist im 20. Jahrhundert soweit gereift, dass die technische Farbwiedergabe als Farbfoto, Farbkopie oder DVD zu einem unverzichtbaren Teil der Alltagskultur geworden ist.

Tafel 1.1: Ziele des Buches

- Farbwiedergabe im **Cross Media Publishing**
 - Druck, Bildschirm, Web, ...
- **geräteneutrale Farbwiedergabe**
- Verständnis des **digitalen Workflows**
 - marktgetriebene Entwicklung: PDF, ...
 - Forschung hinkt hinterher
- Publizieren als **Autorenkompetenz**



Der technisch zielgerichteten Farbproduktion liegt eine Modellierung des menschlichen Farbsehens bzw. -empfindens zu Grunde. Die zugehörige Theorie, genannt *Farbmetrik*, ist als Abbildung neuronaler Prozesse geprägt von Normierungstabellen, nichtlinearen Kurvenverläufen, permanenten Interpolationen zwischen empirischen Stützwerten und ähnlichen Unbequemlichkeiten. Es ist deshalb kein Wunder, dass mit der Etablierung des Computers als Universalwerkzeug der technischen Zivilisation auch die Farbmetrik einen enormen Aufschwung erfahren hat. In der Tat hat in den letzten 20 Jahren die Digitalisierung der Farbwiedergabe einen solchen Umfang angenommen, dass es nicht mehr übertrieben ist von

⁷wobei noch nicht einmal primär an die Sonnenbrille gedacht ist

⁸siehe Kapitel 2.2

einer *Computational Color Reproduction* zu sprechen. In dieser Abhandlung wird versucht diese Sicht der Dinge wiederzugeben, insbesondere bezüglich der Farbbildproduktion in der Druckindustrie, dem Web oder dem privaten Tintenstrahldrucker.



Tafel 1.2: Entwicklung der Medientechnik

- ≈ 1440 Erfindung des Buchdrucks
- ≈ 1800 Erfindung der Lithographie
- ≈ 1840 Erfindung der Fotografie
- ≈ 1880 fotomechanischer Rasterdruck
- ≈ 1890 Mechanisierung der Satztechnik
- ≈ 1900 Offsetdruck
- 1931 CIE-Normvalenzsystem
- 1970 digitaler Fotosatz
- 1985 Desktop Publishing
- 2000 Cross Media Publishing

Dabei wird eine geräteneutrale Darstellung der Farbwiedergabe angestrebt, im Sinne des heute populären *Cross Media Publishing*.⁹ Spezielle Themen wie *Gamut Mapping* oder *Color Manangement* orientieren sich an den Verhältnissen des digitalen Workflows der Medienbranche. Dieses Buch versucht zum einen das Interesse der Informatik an der digitalen Farbwiedergabe zu wecken, einem schnell wachsenden Softwaremarkt, zum anderen versucht sie die Bedürfnisse eines Autors¹⁰ im Publishing-Alltag abzudecken.

1.1 Literaturverzeichnis

- [1] G. Bram und N. Anh. Der Siegeszug der Farbstoffindustrie. *Spektrum der Wissenschaft*, Seiten 56–58, 2000. Sonderausgabe Farben.
- [2] J. Chauvet, E. Deschamps, und C. Hillaire. *Grotte Chauvet (bei Vallon-Pont-d'Arc)*. Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen, 1995.

⁹Publizieren desselben Inhaltes in verschiedenen Medien wie Zeitung, CD oder Web

¹⁰Doktoranden oder Wissenschaftlers

Sehen und Wahrnehmen

Die Farbwiedergabe orientiert sich sowohl in ihrem konzeptionellen Aufbau als auch in ihren technischen Standards relativ direkt an dem physiologischen Verständnis des Farbsehens. Bevor wir uns der technischen Spezifikation von Farbe zuwenden können, ist es deshalb erforderlich, sich zunächst mit einigen grundsätzlichen Erkenntnissen über das Sehsystem des Menschen vertraut zu machen.

Unter einem *Lichtreiz* verstehen wir die Anregung der Rezeptorzellen in der Netzhaut durch einfallendes Licht. Der Lichtreiz erzeugt im Bewusstsein eine Farbwahrnehmung, die *Farbempfindung*. Die *Farbmetrik* als Wissenschaft versucht den Zusammenhang

Tafel 2.1: Sehen und Wahrnehmen

- **Lichtreiz**
 - Anregung der Netzhautrezeptoren durch Licht
- **Farbempfindung**
 - durch Licht im Bewusstsein erzeugte Wahrnehmung
- **Farbmetrik**
 - quantitativer Zusammenh. « *Lichtreiz-Empfindung* »
 - Analyse mit psychophysikalischen Methoden
- **Farbvalenz (niedere Farbmetrik)**
 - Welche Lichtreize erzeugen die gleiche Empfindung?
 - * genauer: ... werden physiologisch gleich erfasst?

Lichtreiz–Farbempfindung

quantitativ zu beschreiben. Dazu bedient sie sich *psychophysikalischer Methoden*. Die Bezeichnung Psychophysik geht auf den Physiker **Gustav Theodor Fechner** zurück, der 1860 in seinem Werk

Elemente der Psychophysik

eine Reihe von richtungsweisenden Methoden beschrieb, die auch heute noch Stand der Technik sind. Das Teilgebiet der *Farbvalenzmetrik*¹ beschäftigt sich mit der Frage: *Welche Lichtreize erzeugen die gleiche Empfindung?* Die Farbvalenzmetrik ist die eigentliche Basis der technischen Farbspezifikation, siehe Kapitel 3. Ihre zentrale Fragestellung lässt sich allerdings nicht ohne Weiteres beantworten.

¹auch niedere Farbmetrik genannt

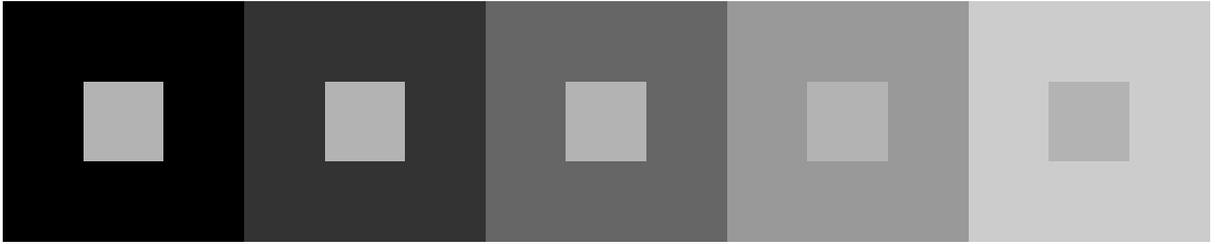


Abbildung 2.1
Simultankontrast

Betrachten wir dazu die Abbildung 2.1. Der hier illustrierte Effekt ist als *Simultankontrast* bekannt. Ein graues Feld (Mitte) mit weißem Hintergrund erscheint dunkler als dasselbe graue Feld mit schwarzem Hintergrund. Dieses Beispiel zeigt, dass gleiche Lichtreize (das mittlere Graufeld) verschieden empfunden werden können. Das Bild in Tafel 2.2 veranschaulicht unsere Problematik am Beispiel einer schwarzen Fläche, die nicht automatisch als die Abwesenheit eines Lichtreizes zu verstehen ist. Betrachten wir einen Bildschirm, der im abgeschalteten Zustand grau ist.² Durch das Einschalten wird der Bildschirm heller, also heller als grau. Trotzdem können wir auf dem «*heller als grau*»-Bildschirm tief-schwarze Flächen erzeugen, was zeigt:

Schwarz ist weiss mit einem helleren Rand.

Aber wir haben auch das umgekehrte Phänomen, nämlich dass verschiedene Lichtreize die gleiche Empfindung auslösen. Typisch hierfür sind Adaptationsvorgänge an die vorherrschende Beleuchtung. Bei der Hell- bzw. Dunkeladaptation handelt es sich hauptsächlich um eine chemische Anpassung der Rezeptorempfindlichkeit. Sie erlaubt das Sehen unter sehr verschiedenen Beleuchtungsstärken, siehe Abschnitt 2.3.2.

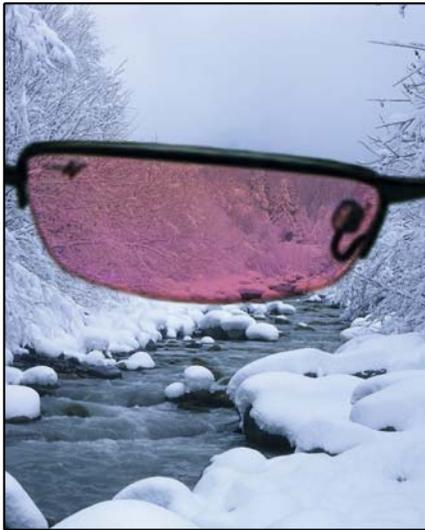
Tafel 2.2: gleicher Reiz – verschied. Empfindungen

- **Monitorschwarz**

- abgeschalteter Bildschirm ist grau
 - * reflektiert Umfeldlicht
- im aktiven Betrieb wird er heller
 - * Selbststrahler
- nun sind tief-schwarze Bildflächen sichtbar



²durch Reflexion des Umgebungslichtes



Tafel 2.3: verschiedene Reize — gleiche Empfindung

- durch Adaptation an vorherrschende Beleuchtung
- **Helladaptation**
 - durch Anpassung der Rezeptorempfindlichkeit
 - erlaubt Sehen in verschiedenen Beleuchtungsstärken
- **chromatische Adaptation** (Farbkonstanz, Umstimmung)
 - Anpassung an die Farbe der Lichtquelle
 - * erfolgt auf neuronaler Ebene in der Netzhaut
 - Wahrnehmung konstanter Oberflächenfarben
 - * “unabhängig” von der Lichtquelle
 - im Unbunten die Unterscheidung
weiss-beschatteter Flächen von *grau-beleuchteten*

Auf die *chromatische Adaptation*, bekannt als *Farbkonstanz* oder *Umstimmung des Auges*, haben wir bereits in der Einleitung hingewiesen. Sie erfolgt auf neuronaler Ebene in der Netzhaut und ist als Anpassung an die Farbe der vorherrschenden Lichtquelle zu verstehen. Funktional ermöglicht sie die Wahrnehmung von Oberflächenfarben unabhängig von der Lichtquelle. Bezüglich unbunter Farben ermöglicht die Farbkonstanz die Erkennung von Schatten, d.h. die Unterscheidung von «*weiss-beschatteten Flächen*» von «*grau-unbeschatteten Flächen*.»

Für die Farbmatrik bedeutet dies, dass das Empfinden einer farbigen Fläche sowohl vom Sehfeld als auch vom Adaptationszustand des Auges abhängig ist. Die zentrale Frage der Farbmatrik «*Welche Lichtreize verursachen gleiche Empfindungen?*» muss genauer gefasst werden, um beantwortet werden zu können. Die Präzisierung des Problems besteht in einer Standardisierung des Sehfeldes zusammen mit der Beschränkung auf «*gleich-ungleich*»-Entscheidungen. Im Detail werden wir darauf im Kapitel 3 eingehen.

Tafel 2.4: Farbvalenz

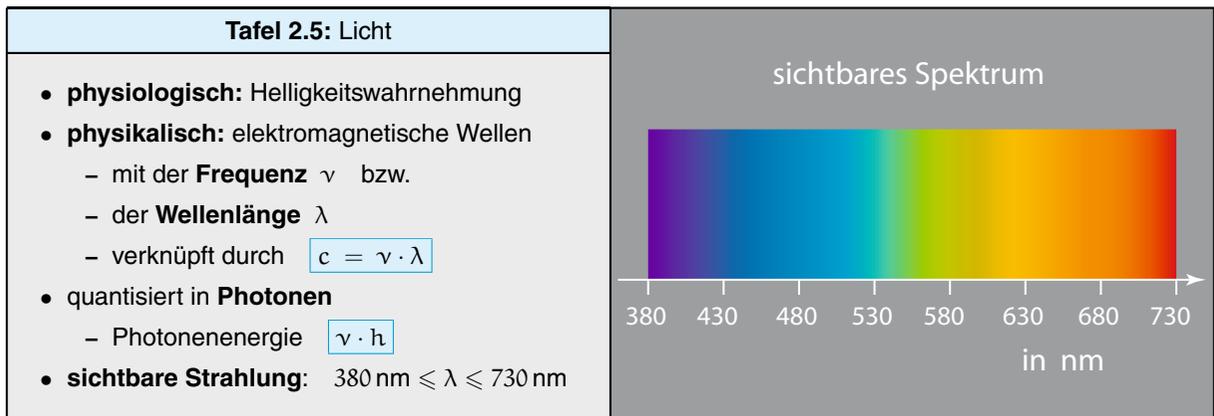
- das **Farbempfinden einer Farbfläche** ist
 - sowohl abhängig vom Sehfeld als auch
 - vom aktuellen Adaptationszustand des Auges
- **gleiche Empfindungen** sind nur erfassbar bei ...
 - standardisierten Bedingungen und
 - für den Test «*gleich – ungleich*»
- dies führt zur Definition des **Normbeobachters**
 - Grundlage der technischen Farberfassung
- Einfluss von Sehfeld auf die Farbempfindung
 - wird in der **Color Appearance** untersucht

Das Resultat dieser Bemühungen ist ein sogenannter *Normbeobachter*, der das durchschnittliche Farbempfinden eines Menschen

in der definierten Situation repräsentieren soll. Der Einfluss des Umfeldes, der durch dieses Vorgehen ausgeschlossen wurde, wird in der Farbforschung in dem Teilgebiet *Color Appearance* behandelt. Wir verweisen diesbezüglich auf das exzellente Werk von **Mark Fairchild** [4].

Bezeichnung	Frequenz (Hz)	Wellenlänge (m)
Niederfrequenz	$3 \cdot 10^1 - 3 \cdot 10^4$	$10^7 - 10^4$
Radiowellen	$3 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^{12}$	$10^4 - 2 \cdot 10^{-4}$
Infrarot	$3 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$	$10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$
sichtbares Licht	$4 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$
Ultraviolett	$7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$
Röntgenstrahlen	$3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{23}$	$10^{-7} - 10^{-15}$
γ -Strahlen	$8 \cdot 10^{17} - 4 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{-10} - 7 \cdot 10^{-14}$

Abbildung 2.2
elektromagnetisches
Spektrum



2.1 Der Lichtreiz

Der erste Schritt auf dem Weg zu einer farbmetrischen Beschreibung eines Lichtreizes besteht in einer physikalischen Charakterisierung des ihn verursachenden Lichtes.³

³Zur Vereinfachung der Sprache werden wir im Folgenden auf eine strenge Unterscheidung des Lichtreizes von dem ihm zu Grunde liegenden Lichtes verzichten, falls dadurch keine Verwirrung zu erwarten ist.

Aus physikalischer Sicht ist Licht eine elektromagnetische Strahlung. Umgangssprachlich versteht man unter Licht den *sichtbaren Anteil dieser Strahlung*, pragmatisch etwa durch den Wellenlängenbereich zwischen 380 und 780 nm charakterisiert. Im erweiterten Sinne bezeichnet Licht auch Infrarot-, Ultraviolett- und Röntgenstrahlung, siehe Abbildung 2.2.

Im engeren Sinne stellt elektromagnetische Strahlung eine Überlagerung von elektrischen und magnetischen Feldern dar, die sich im Vakuum oder in einem nicht absorbierenden Medium ausbreiten. An jedem Ort führen sowohl das elektrische wie auch das magnetische Feld Schwingungen der *Frequenz* ν und der *Wellenlänge* λ aus. Das elektromagnetische Feld ist quantisiert. Die einzelnen Teilchen (Quanten) heissen *Photonen*. Ein einzelnes Photon hat eine Energie⁴ von $\nu \cdot h$. Da andererseits die Frequenz ν mit der Wellenlänge λ durch die Lichtgeschwindigkeit⁵ c mittels $c = \nu \cdot \lambda$ verknüpft ist, ist auch λ ein Mass für die Energie eines Photons.

2.1.1 Spektren

In der Farbmétrie ist der zentrale Gegenstand der Betrachtung die *spektrale Strahlungsdichte (Spektrum)* $S(\lambda)$ eines Lichtreizes, d.h. seine Energieverteilung bezogen auf die Wellenlänge λ . Dabei sind jedoch gewisse Vorgehensweisen zu beachten, die zum Teil auf Gewohnheit zum grösseren Teil aber auf die Restriktionen des Sehprozesses zurückgehen.

In lichttechnischen Anwendungen wird der sichtbare Wellenlängenbereich⁶ 380 – 780 nm in eine feste Anzahl von Wellenlängenbänder B_1, \dots, B_n unterteilt. Jedes dieser Bänder B_i wird dann durch eine einzige Wellenlänge λ_i , $\lambda_i \in B_i$, repräsentiert. Die am häufigsten verwendete Bandbreite ist 10 nm,

Tafel 2.6: Spektrum $S(\lambda)$

- **relative Energieverteilung** gemäss Wellenlänge λ
- in der Farbmétrie üblich
 - Diskretisierung von $S(\lambda)$ in Tabellenform
 - * häufigste Intervalllängen: 10 nm, 5 nm und 1 nm
 - Skalierung: $S(555 \text{ nm}) = 100$ bzw. $S(560 \text{ nm}) = 100$
- **Extremfälle**
 - *energiegleiches Spektrum* $S(\lambda) = k$, $k \in \mathbb{R}^+$
 - *monochromatische Strahlung*
 - * $S(\lambda) = 0$ für $\lambda \neq \lambda_0$ und $\lambda_0 \in \mathbb{R}^+$

⁴Plancksches Wirkungsquantum $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34}$ Js

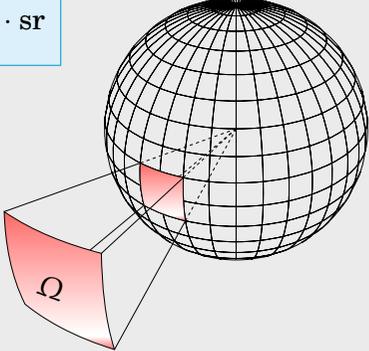
⁵im Vakuum gilt $c = 299792458$ m/s, CGPM, 1983 Neudefinition des Meters

⁶häufig auch nur angegeben als 400 – 700 nm

seltener findet man 5 nm oder gar 1 nm-Schritte. Ohne weitere Angaben gehen wir im Rest des Buches von 10 nm-Bandbreiten aus. Diese Diskretisierung hat ihre Begründung in der begrenzten Fähigkeit des Auges Farbdifferenzen erkennen zu können, siehe Abschnitt 3.3.3.

Im Allgemeinen werden Spektren als relative Strahlungsverteilungen angegeben, d.h. $S(\lambda)$ bzw. $S(\lambda_i)$ drückt den prozentualen Anteil des repräsentierten Wellenlängenbandes an der Gesamtenergie des betrachteten Lichtreizes aus. Typisch ist die Normierung auf einen willkürlichen Wert, meist auf 1 oder 100 bei der Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ nm}$ oder $\lambda = 560 \text{ nm}$.⁷

Schliesslich unterscheidet man noch zwei Extremfälle eines Spektrums. Gilt $S(\lambda) = c$ für eine Konstante c , so spricht man von einem *energiegleichen Spektrum*. Für eine *monochromatische Strahlung* gilt dagegen $S(\lambda') \neq 0$ und $S(\lambda) = 0$ für $\lambda \neq \lambda'$, $\lambda \in \mathbb{R}^+$.

Tafel 2.7: Raumwinkel Ω	
<ul style="list-style-type: none"> • Abstrahlung in kegelförmiges Raumsegment • gegeben sei eine Kugel mit Radius r <ul style="list-style-type: none"> – um die Strahlungsquelle • Ω ist das Verhältnis der Fläche A zu r^2 • Einheit: Steradian (sr) • Raumwinkel des vollen Raums: $\Omega = 4\pi \text{ sr}$ 	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> $\Omega = \frac{A}{r^2} \cdot \text{sr}$ </div> 

2.1.2 Strahlungsgrößen

Mit einem relativen Spektrum ist ein Lichtreiz jedoch noch nicht vollständig beschrieben. Zur eindeutigen physikalischen Charakterisierung, etwa für Fragen der Messtechnik oder der Beleuchtung, ist zusätzlich noch die Kenntnis der Gesamtenergie des Lichtreizes nötig. Physikalisch betrachten wir eine Leistung, die Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit im Auge empfangen wird. Eine gegebene

⁷den Maximalwerten des Hellempfindlichkeitsgrades

Strahlungsleistung Φ kann auch auf eine Fläche A bezogen werden. Wir erhalten dann die *Bestrahlungsstärke* $E = d\Phi/dA$.

Besonders im Zusammenhang mit Lichtquellen betrachtet man auch die Strahlungsleistung in ein Raumsegment, die *Strahlungsstärke* $I = d\Phi/d\Omega$. Dabei wird von einer punktförmigen Strahlungsquelle ausgegangen, um die eine Kugel mit Radius r existiert. Der Raumwinkel Ω spannt dann auf der Oberfläche der Kugel eine bestimmte Fläche A auf. Das Verhältnis dieser Fläche A zu r^2 dient dann als Mass für Ω . Die Einheit wird im SI-System in sr angegeben und als *Steradian* bezeichnet, folglich gilt

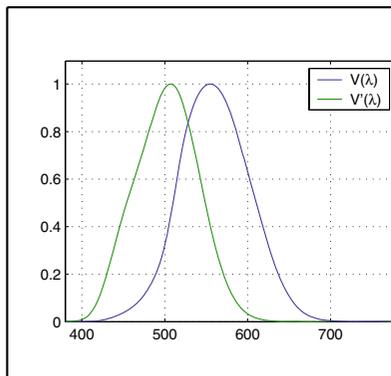
$$(2.1) \quad \Omega = \frac{A}{r^2} \cdot \text{sr.}$$

Da die Oberfläche der Einheitskugel gleich 4π ist, wird durch (2.1) der Raumwinkel des vollen Raums auf $\Omega = 4\pi$ sr festgelegt. Die Fläche A wird im Allgemeinen durch Integration bestimmt.

Die strahlungsphysikalischen Grössen Φ , E und I bezeichnet man auch als *radiometrische Grössen*. Aus ihnen leitet man durch Gewichtung der Spektren ihre *photometrischen* Entsprechungen, den *Lichtstrom* Φ_p , die *Beleuchtungsstärke* E_p und die *Lichtstärke* I_p ab. Die Photometrie beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von Licht durch den Menschen. Das menschliche Auge ist aber für optische Strahlung verschiedener Wellenlänge unterschiedlich empfindlich.

Tafel 2.8: wichtige radiometrische Grössen

- **Strahlungsleistung** Φ
 - Strahlungsenergie pro Zeiteinheit
- **Bestrahlungsstärke** $E \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\Phi}{dA}$
 - Strahlungsleistung pro Fläche dA
- **Strahlungsstärke** $I \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\Phi}{d\Omega}$
 - Strahlungsleistung pro Raumwinkel $d\Omega$



Tafel 2.9: Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$

- Hellempfindung eines Lichtreizes variiert mit der Wellenlänge
 - verschieden für Tag- bzw. Nachtsehen
 - unterschiedlich von Mensch zu Mensch, altersabhängig usw.
- Normung durch Internationale Beleuchtungskommission (CIE)
- für das Tagsehen (photopisches Sehen, helladaptiert) $V(\lambda)$
 - Angabe in Tabellenform (in 10-, 5- oder 1-nm-Schritten)
- für das Nachtsehen (skotopisches Sehen, dunkeladaptiert) $V'(\lambda)$

Diese Empfindlichkeit ist zudem noch für das Tages- bzw. Nachtsehen verschieden. Ferner variiert die Empfindlichkeit von Mensch zu Mensch, verändert sich mit dem Alter, schwankt mit dem Vitaminhaushalt, Ermüdung usw.

Um angesichts dieser Umstände die Augenempfindlichkeit in geordneter Weise in ein Messsystem einfließen zu lassen, hat die CIE⁸ eine *mittlere Augenempfindlichkeit* festgelegt, den *spektralen Hellempfindlichkeitsgrad*⁹ $V(\lambda)$ für das Tagsehen (photopisches Sehen, helladaptiertes Auge), bzw. $V'(\lambda)$, angepasst an das Nachtsehen (skotopisches Sehen, dunkeladaptiertes Auge), siehe Tafel 2.9.

Bemerkung. Gegenüber $V(\lambda)$ ist $V'(\lambda)$ in den Blaubereich verschoben, was den sogenannten *Purkinje-Shift-Effekt*¹⁰ zur Folge hat: Ein bei Tageslicht blauer Gegenstand erscheint bei starker Abdunkelung heller als ein bei Tageslicht gleich heller roter.

Tafel 2.10: photometrische Strahlungsgrößen

- **Lichtstärke** I_p
 - photometrische Entsprechung der Strahlungsstärke I
- abgeleitet durch

$$I_p = K_m \int_0^\infty I(\lambda)V(\lambda) d\lambda$$
- und

$$I'_p = K'_m \int_0^\infty I(\lambda)V'(\lambda) d\lambda$$
- mit $K_m = 683$ bzw. $K'_m = 1700 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$
- andere photometrische Größen analog

Radiometrie		Photometrie	
Grösse	Einheit	Grösse	Einheit
Strahlungsleistung Φ	W (Watt)	Lichtstrom Φ_p	lm (Lumen)
Strahlungsstärke I	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Lichtstärke I_p	cd (Candela)
Bestrahlungsstärke E	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Beleuchtungsstärke E_p	lx (Lux)
Strahldichte L	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Leuchtdichte L_p	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Strahlungsenergie Q	W·s	Lichtmenge Q_p	lm·s
Bestrahlung H	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$	Belichtung H_p	lx·s
Strahlungsausbeute η	%	Lichtausbeute η_p	$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
spez. Ausstrahlung M	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	spez. Lichtausstrahl. M_p	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$

Abbildung 2.3
Messgrößen
des Lichtes

⁸die Internationale Beleuchtungskommission

⁹Sowohl der sichtbare Wellenlängenbereich als auch die Form des Hellempfindlichkeitsgrades ist stark korreliert mit dem Spektrum der primären Strahlungsquelle des Menschen, nämlich der Sonne. Vereinfachend lässt sich sagen: Der Mensch sieht die Strahlung, die es zu sehen gibt.

¹⁰nach dem tschechischen Physiologen **Jan Evangelista Purkinje**, der ihn 1823 erstmals beschrieb

Mit $V(\lambda)$ bzw. $V'(\lambda)$ ist die Lichtstärke I_p definiert als

$$I_p = K_m \int_0^{\infty} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

bzw.

$$I'_p = K'_m \int_0^{\infty} I(\lambda) V'(\lambda) d\lambda.$$

Die Konstanten K_m und K'_m sind festgelegt¹¹ als

$$K_m = 683 \text{ cd sr W}^{-1}$$

und

$$K'_m = 1700 \text{ cd sr W}^{-1}.$$

Der Lichtstrom und die Beleuchtungsstärke sind analog definiert.

Als Basiseinheit der Photometrie fungierte seit Anbeginn die *Candela*¹², die Einheit der Lichtstärke. Die ersten Versuche zu ihrer Definition reichen zurück bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts. Von der 16. Generalkonferenz für Mass und Gewicht (CGPM) wurde sie 1979 neu definiert: Die **Candela (cd)** ist die Lichtstärke einer monochromatischen Strahlungsquelle mit der Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ nm}$ und der Strahlungsstärke $1/683 \text{ Watt pro sr}$. Daraus leiten sich dann die Einheit des Lichtstroms $\text{cd}\cdot\text{sr} = \text{lm}$ (Lumen) und der Beleuchtungsstärke $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2} = \text{lx}$ (Lux) ab. In der Tabelle aus Abbildung 2.3 sind die vorangegangenen radio- bzw. photometrischen Größen noch einmal zusammengestellt.

Ausser punktförmigen Strahlungsquellen betrachtet man in der Farbproduktion

Tafel 2.11: Candela

- Basiseinheit der Lichttechnik
- 6. Generalkonferenz für Mass u. Gewicht, 1979
 - Die **Candela (cd)** ist die Lichtstärke einer
 - * monochromatischen Strahlungsquelle
 - mit der Wellenlänge

$\lambda = 555 \text{ nm}$
 - und der Strahlungsstärke

1	Watt
683	sr
- d.h. für $\lambda = 555 \text{ nm}$ entspricht
 - 1 Watt Strahlungsleistung
 - einem Lichtstrom von 683 Lumen
- abgeleitete Einheiten
 - $\text{cd}\cdot\text{sr} = \text{lm}$ (Lumen) und $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2} = \text{lx}$ (Lux)

Tafel 2.12: Bemerkungen

- zum Lesen genügen 500 lx
- 500 lx allgemein ausreichend für Arbeitsplätzen
 - 1000 lx für Präzisionsarbeiten
- Mondlicht erzeugt etwa 0.2 lx
 - nicht mehr ausreichend zum Farbsehen
- Tageslicht liefert
 - im Winter etwa 6000 lx
 - im Sommer dagegen 70'000 lx
- Leuchtdichte der Sonnenscheibe beträgt
 - ausserhalb der Atmosphäre etwa $225 \cdot 10^7 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$
 - auf Meereshöhe etwa $150 \cdot 10^7 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

¹²lat. Wachskerze

auch häufig selbstleuchtende Flächen (Bildschirm) oder beleuchtete Flächen (Papier). Dann verstehen wir unter der *Leuchtdichte* den Lichtstrom pro Flächeneinheit, der in der Richtung der Flächennormalen abgestrahlt bzw. reflektiert wird.

Für die intuitive Bewertung dieser Begriffe mögen die folgenden Bemerkungen hilfreich sein:

- Zum Lesen genügt dem Menschen eine Beleuchtungsstärke von 500 lx.
- 500 lx werden allgemein an Arbeitsplätzen benötigt bzw. 1000 lx für Präzisionsarbeiten.
- Das Mondlicht erzeugt etwa 0.2 lx, was zum Farbsehen nicht mehr ausreicht.
- Tageslicht liefert im Winter etwa 6000 lx, im Sommer dagegen 70'000 lx.
- Die Leuchtdichte der Sonnenscheibe beträgt ausserhalb der Atmosphäre etwa $225 \cdot 10^7 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, bei klarer Atmosphäre auf Meereshöhe etwa $150 \cdot 10^7 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

2.2 Physiologie des Sehens

Das Auge liefert zwar nur einen Beitrag zum Gesamtphänomen Farbsehen, bezüglich der Farbvalenzmetrik jedoch den entscheidenden. Der Sehprozess lässt sich folgendermassen gliedern. Das

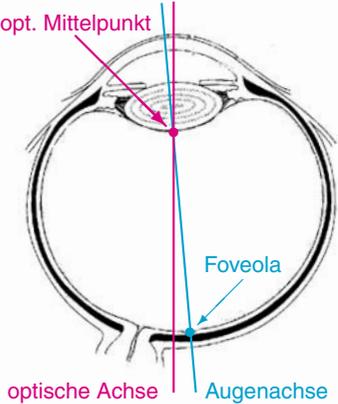
einfallende Licht wird von der Hornhaut und der Augenlinse gebündelt, so dass auf der Netzhaut ein Abbild der Aussenwelt entsteht. Das Netzhautbild führt zu einer lokal unterschiedlichen Anregung der 125 Mill. Rezeptorzellen. Durch neuronale Prozesse innerhalb der Netzhaut wird diese Anregung zu etwa 1.2 Mill. Impulse des Sehnervs konzentriert. Die schlussendliche Erzeugung der visuellen Wahrnehmung erfolgt dann in spezialisierten Regionen des Grosshirns.

Tafel 2.13: Struktur des visuellen Systems

- das Auge (als optisches System)
 - bündelt einfallendes Licht
 - bildet die Aussenwelt auf die Netzhaut ab
- Anregung von ca. 125 Mill. Rezeptorzellen
- neuronale Konzentration auf etwa 1.2 Mill. Sehnervenfasern
- Weiterleitung an die visuellen Gehirnzentren

2.2.1 Das Auge als optisches System

Man kann das menschliche Auge als eine Bikonvexlinse¹³ betrachten, das ein reelles Bild der Aussenwelt auf einer lichtempfindlichen Fläche, der Netzhaut erzeugt. Zwar ist das Auge als optisches Instrument (Hornhaut, Linse) eher schlechter als eine billige Kamera, aber seine diesbezüglichen Schwächen werden durch raffinierte neuronale Regelungsmechanismen mehr als korrigiert, so dass der menschliche Gesichtssinn als Gesamtsystem weit ausserhalb des technisch Machbaren anzusiedeln ist.

Tafel 2.14: das optische System Auge	
	<ul style="list-style-type: none"> • Hornhaut (44dpt) und Augenlinse (25dpt) bilden Gesamtsystem <ul style="list-style-type: none"> – optischer Mittelpunkt im hinteren Scheitel der Augenlinse – ca. 17.1 mm vor der Netzhaut • keine Brechung an den inneren Grenzflächen • Pupille als Aperturblende <ul style="list-style-type: none"> – Lichtmengensteuerung und Scharfeinstellung im Nahbereich • Augenachse <ul style="list-style-type: none"> – auf Foveola ausgerichtet <ul style="list-style-type: none"> * das Gebiet des schärfsten Sehens – um etwa 5° gegenüber der optischen Achse verschoben

Der *Augapfel* ist mehr oder weniger kugelförmig, etwa 24 mm tief und 22 mm breit, siehe Abbildung 2.4. Die äussere Hülle besteht aus der lichtundurchlässigen *Lederhaut* und, im vorderen Teil, aus der transparenten *Hornhaut*, die etwas aus dem Kugelkörper herausragt. An der Grenzfläche Luft-Hornhaut findet mit 44 *Dioptrien* (dpt)¹⁴ der grösste Teil der Lichtbrechung statt.

Dass an den inneren Grenzflächen kaum eine Brechung erfolgt, liegt an den geringen Unterschieden der Brechungsindizes von Hornhaut (1.376), des Kammerwassers¹⁵ (1.336) und des Glaskörpers¹⁶

¹³Bezüglich hier nicht weiter erläuterten Begriffen der geometrischen Optik verweisen wir auf Hecht [6].

¹⁴Einheit der Linsenbrechkraft: Die Dioptrienzahl ist der Kehrwert der in Metern gemessenen Brennweite.

¹⁵Flüssigkeit zwischen Hornhaut und Linse

¹⁶gallertartige Füllung des Augapfels

(1.337). Zwischen der Hornhaut und der Augenlinse befindet sich die Aperturblende des Auges, die *Regenbogenhaut (Iris)* mit ihrem Zentrumsloch, der *Pupille*. Ausser an der kurzfristigen Lichtmengensteuerung¹⁷ ist die Iris auch an der Scharfeinstellung naher Objekte beteiligt.

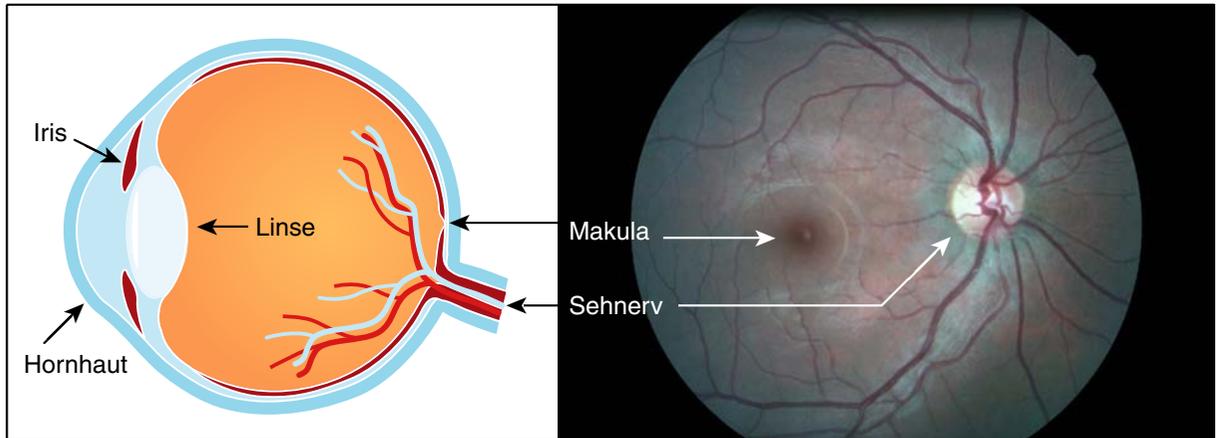


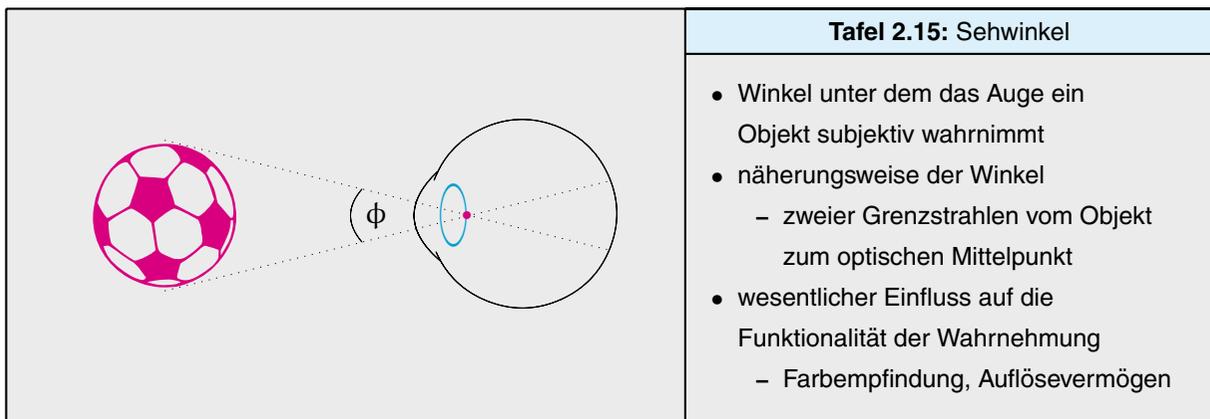
Abbildung 2.4
Auge und Netzhaut

Nach der Durchquerung der Pupille erreicht das einfallende Licht die Augenlinse. Sie besteht aus einer kompliziert geschichteten, faserigen Masse, die sich zwiebelförmig aus etwa 22'000 sehr dünnen Schichten zusammensetzt. Ihr Brechungsindex variiert von 1.406 im Kern bis etwa 1.386 am Rand. Durch Zusammenziehen oder Entspannen ist sie hauptsächlich für die Scharfeinstellung eines anvisierten Objektes verantwortlich.

Die lichtbrechenden Teile des Auges, die Hornhaut und die Augenlinse können zur Vereinfachung als eine Einheit aufgefasst werden. Das zusammengesetzte Linsensystem hat seinen optischen Mittelpunkt (Knotenpunkt) etwa 17.1 mm vor der Netzhaut im Zentrum des hinteren Randes der Augenlinse. Seine Gesamtbrechkraft von maximal 69 dpt erzeugt auf der Netzhaut einen Zerstreuungskreis mit 0.01 mm Durchmesser. Das Gesamtsystem ist auf eine spezielle Region der Netzhaut ausgerichtet. Dieser etwa 0.3 mm durchmessende Bereich des schärfsten Sehens wird *Foveola* genannt. Durch den optischen Mittelpunkt und die Foveola ist die *Augenachse* festgelegt, die sich um etwa 5° von der *optischen Achse* des Systems unterscheidet, siehe Tafel 2.14.

¹⁷bis zu einem Faktor 16

Auf Grund der Ausrichtung des Linsensystems auf einen zentralen Netzhautbereich ist es für die Wahrnehmung eines Objektes von grosser Relevanz wie gut die Objektabbildung mit diesem Zentralbereich korreliert. Dies führt zu dem Begriff des *Sehwinkels*, dem Winkel unter dem das Auge ein Objekt subjektiv wahrnimmt, siehe Tafel 2.15. Da man achsennahe Strahlen, die durch den optischen Mittelpunkt gehen, in guter Näherung als Geraden darstellen kann,¹⁸ ist es möglich, den Sehwinkel als den Winkel zweier Grenzstrahlen vom Objekt zum optischen Mittelpunkt, dem hinteren Scheitel der Augenlinse, aufzufassen. Der Sehwinkel ist ein zentraler Begriff der Farbwiedergabe, insbesondere weil die Farbempfindung damit variiert und der minimal auflösbare Sehwinkel eine der zentralen Kenngrössen des Halftoning darstellt.



2.3 Die Netzhaut

Der Ort, an dem das optische Abbild der Aussenwelt in ein Erregungsmuster überführt wird,¹⁹ ist die *Netzhaut* oder *Retina*. Sie ist ein feines Geflecht aus Nervengewebe, das an der Aussenseite (!) lichtempfindliche Sinneszellen enthält und nach innen von transparenten Nervensträngen bedeckt ist, siehe Tafel 2.16. Die Fortsätze (Axone) der Ganglienzellen bilden die Fasern des Sehnervs und laufen im sogenannten *Blinden Fleck* (*Papille*), dem Austrittspunkt

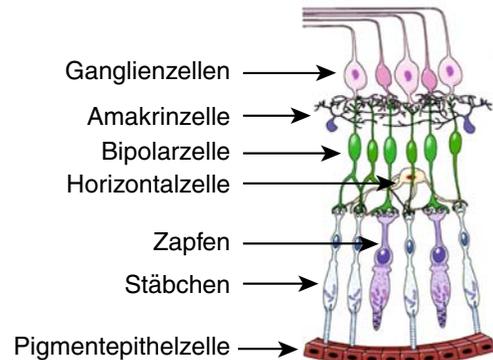
¹⁸siehe Hecht [6, S. 249]

¹⁹Zur Vertiefung dieses sei auf [8, Kap. 18: Sehen und Augenbewegungen] hingewiesen

zum Gehirn, zusammen. Die umgebende äussere Schicht, das *retinale Pigmentepithel (Aderhaut)*, hat durch die reichliche Pigmentierung mit Melanin eine dunkle Farbe, die Streulicht absorbiert. Sie ist stark durchblutet und versorgt die Photorezeptoren, insbesondere mit Vitamin A, das an der Synthese der Photopigmente beteiligt ist.

Tafel 2.16: Netzhaut (Retina)

- Umsetzung des optischen Aussenbildes in Erregungsmuster
- Funktionalität auf das Sehzentrum konzentriert
- lichtempfindliche Sinneszellen aussen
- innen von transparenten Nervenzellen bedeckt
 - laufen im blinden Fleck zusammen (Sehnerv zum Grosshirn)
- zwei verschiedene Arten von Photorezeptoren
 - **Zapfen:** Farbsehen, ca. 5 Millionen
 - **Stäbchen:** Schwarz-Weiss-Sehen, 120 Mill.



Die Netzhaut verfügt über zwei Arten von Photorezeptoren, die *Zapfen* und die *Stäbchen*, siehe Tafel 2.16. Die etwa 5 Millionen Zapfen sind für das Farbsehen verantwortlich. Relativ gesehen sind sie jedoch nicht sehr lichtempfindlich. Spezialisiert auf die Helligkeitswahrnehmung sind die 120 Millionen Stäbchen, die dafür jedoch keinen Beitrag zum Farbsehen leisten.

Über den Rezeptorzellen befindet sich ein neuronales Geflecht, das sich aus *Horizontal-, Bipolar-, Amakrin- und Ganglienzellen* zusammensetzt. Diese Schicht realisiert eine neuronale Verarbeitung des Erregungsmusters der Rezeptorzellen und konzentriert die Information auf die Ganglienzellen, welche die Weiterleitung zum Grosshirn übernehmen. Im Zentrumsbereich der Netzhaut ist das Nervenengeflecht zur Seite hinverlagert, so dass der Lichteinfall nicht gestört wird.

2.3.1 Räumliche Verteilung der Rezeptoren

Die räumliche Struktur der Netzhaut ist auf die *Foveola*, das Gebiet des schärfsten Sehens ausgerichtet. Die Rezeptordichte und ih-