

Durch Farbe in die 3. Dimension

Christian Ucke und Rainer Wolf

Die chromatische Aberration tritt beim Auge als Abbildungsfehler auf. Im Normalfall bemerken wir ihn jedoch nicht. Eine Brille, die ein spezielles Beugungsgitter enthält, verstärkt diese chromatische Aberration und läßt geschickt farbig gestaltete Bilder räumlich erscheinen.

Was die Qualität der Optik des Auges im Vergleich mit einer hochwertigen Linse anbetrifft, so hat dazu Helmholtz [1] im vorigen Jahrhundert festgestellt:

"Wenn mir ein Optiker ein Instrument verkaufen wollte, welches solche Fehler hätte, so ist es nicht zuviel gesagt, daß ich mich vollkommen berechtigt glauben würde, die härtesten Ausdrücke über die Nachlässigkeit seiner Arbeit zu gebrauchen, und ihm sein Instrument mit Protest zurückzugeben."

Zum Glück gleicht unser Sehsystem - sozusagen per software - viele dieser Fehler aus. Wir bemerken sie höchstens in besonderen Situationen. Ein Beispiel dafür ist die chromatische Aberration. Der Brechwert des menschlichen Auges unterscheidet sich für rotes bzw. blaues Licht um bis zu 2 Dioptrien [1]. Experimentell läßt sich das mit einem Filter aus Kobaltglas, wie sie bei Chemikern verbreitet sind, und einer punktförmigen Lichtquelle sehr schön demonstrieren. Kobaltglas absorbiert fast alles Licht bis auf die beiden Enden des sichtbaren Spektrums. Blickt man die Lichtquelle durch ein derartiges Filter an, sieht man entweder einen roten Punkt mit einem blauen Zerstreungskreis darum (Abbildung 1) oder einen blauen Punkt mit einem roten Kreis [2]. Dieser Effekt wird auch als longitudinale Aberration bezeichnet. Welche der beiden Möglichkeiten man sieht, hängt vom Abstand und momentanen Akkommodationszustand ab. Der Punkt liegt im Normalfall nicht zentrisch im Kreis (transversale Aberration). Das ist allerdings subjektiv nur schwer zu erkennen. Der Grund für die transversale Aberration liegt darin, daß die optische Achse des Auges im

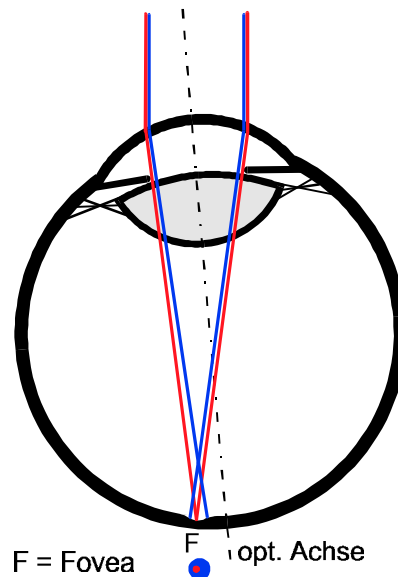


Abb.1: Rotes und blaues Licht werden verschieden stark im Auge gebrochen. Eine Punktlichtquelle durch ein Kobaltfilter betrachtet, ergibt eine blaue Scheibe mit einem nicht zentrierten, roten Punkt darin oder umgekehrt. Zeichnung nicht maßstäblich.

allgemeinen nicht mit der Blicklinie übereinstimmt. In der Augenoptik wird die chromatische Aberration des Auges sogar für die Optimierung der Brillenanpassung verwendet (Rot-Grün-Test). In Abbildung 1 ist die optische Achse des Auges strichpunktiert gezeichnet. Blickt ein Auge ein Objekt an, so wird dieses auf der Netzhautgrube F (Fovea centralis) abgebildet. Dies ist die Stelle des schärfsten Sehens. Die Netzhautgrube liegt in der Regel aber nicht auf der optischen Achse, sondern meist zur Schläfe hin (temporal) versetzt.

Werbegraphiker vermeiden normalerweise rote Schrift auf blauem Grund und ähnliche, stark unterschiedliche Farbkombination. Da unser Bewegungsehen in Schwarzweiß arbeitet, sind die Konturen von farbigen Flächen, die genau gleich hell sind, für den „Bewegungsmodul“ unseres Sehsystems unsichtbar: Er meldet „Bewegungsweise unbekannt“. Infolgedessen scheinen sich die farbigen Flächen vor unserem Auge auf unbestimmte Weise wabernd hin und her zu bewegen, denn die Grenzlinien selbst werden nach wie vor wahrgenommen. Manchmal wird dieser Effekt allerdings auch mit Absicht eingesetzt, um unangenehme Aufmerksamkeit zu erzielen.

Während die gerade beschriebenen Erscheinungen schon beim einäugigen Sehen auftreten, ergibt sich beim beidäugigen Betrachten von farbigen Bildern ein weiteres Phänomen, das unter dem Begriff Farbenstereoskopie oder Farbtiefeneffekt schon seit dem vorigen Jahrhundert bekannt ist [2].

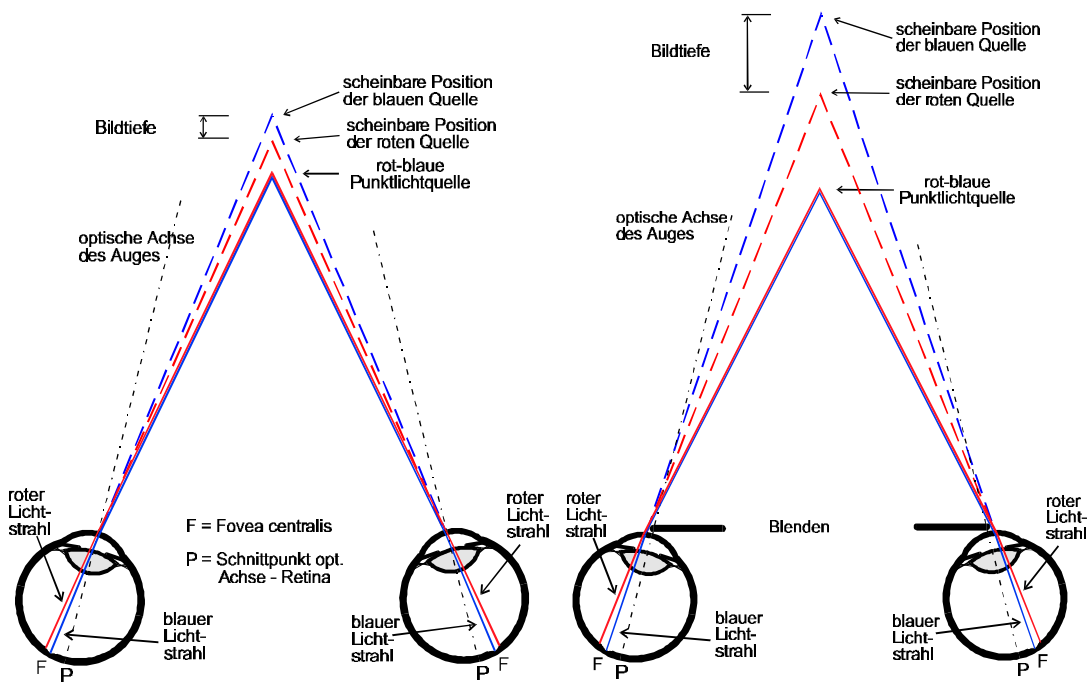


Abb.2a: Eine Lichtquelle, die nur aus einem roten und blauen Punkt besteht, spaltet sich beim Anblicken scheinbar räumlich auf. Winkel- und Größenverhältnisse nicht maßstäblich.

Abb.2b: Die räumliche Tiefenversetzung des blau-roten Punktes wird mit vor die Pupillen gesetzten Blenden verstärkt.

Um diesen Effekt zu verstehen, denke man sich in etwa 50 Zentimeter Abstand eine Punktlichtquelle hinter einem Kobaltfilter. Blickt man dieses aus einem blauen und roten Punkt bestehende Objekt an, so werden diese Punkte, die sich in gleichem Abstand vom Auge befinden, auf unterschiedliche Positionen der Netzhaut abgebildet (Abbildung 2a). Wenn der blaue Punkt in der Netzhautgrube F abgebildet wird, befindet sich der rote Punkt auf Grund der schwächeren Brechung roten Lichts in den Augenmedien auf der Netzhaut etwas seitlich daneben - und zwar in beiden Augen spiegelbildlich jeweils zur Schläfe hin versetzt. Dies interpretiert unser Sehsystem so, daß der rote Punkt näher am Auge liegt als der blaue Punkt (Schnittpunkt der gestrichelten Linien). Mit etwas Aufmerksamkeit ist diese Farbstereoskopie bei bunten Objekten mit bloßem Auge sichtbar [2]. Besonders gut funktioniert das mit roter oder blauer Schrift auf schwarzem Hintergrund. Sogar Farbenblinde können das erkennen, denn die Erscheinung beruht ja auf der Dispersion der brechenden Medien und nicht auf der Fähigkeit, Farben zu sehen.

Mit einem auf Helmholtz zurückgehenden Experiment ist der Farbtiefeneffekt zu verstärken [3]. Hält man eine Blende oder noch einfacher die eigenen Finger so vor die Augen, wie in Abbildung 2b gezeigt, deckt man den jeweils inneren (nasal befindlichen) Teil der Pupille ab. Dadurch gelangen nur noch die an der temporalen Seite der Pupille stark gebrochenen Lichtstrahlen ins Auge und damit wird der Farbtiefeneffekt deutlicher. Deckt man die Pupillen außen (temporal) ab, kehrt sich der Farbtiefeneffekt sogar um: blau erscheint näher als rot.

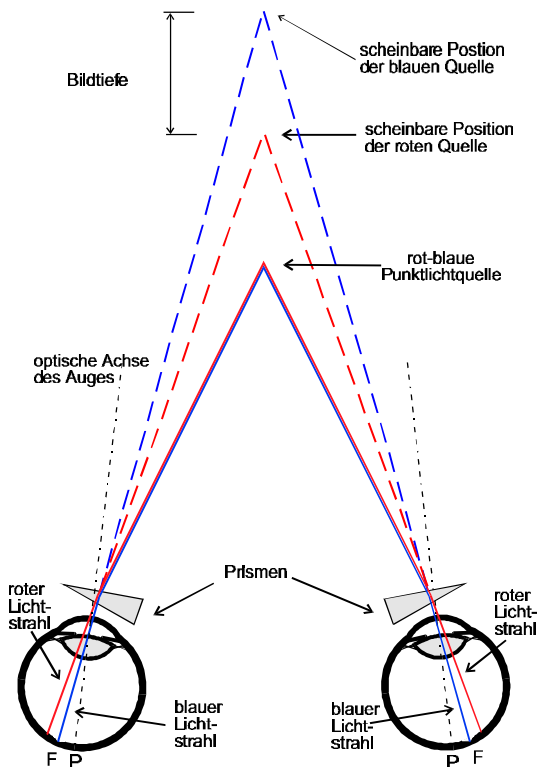


Abb. 3a: Vor die Augen gesetzte Prismen verstärken den Farbtiefeneffekt.

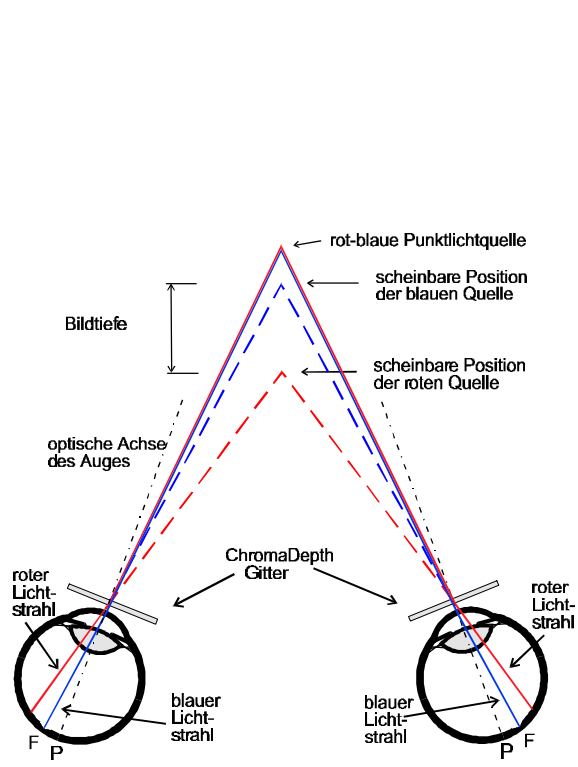


Abb. 3b: Vor die Augen gesetzte ChromaDepth-Folien verstärken den Farbtiefeneffekt ebenfalls.

Setzt man einfache Prismen mit der Basis nach innen vor die Augen (Abbildung 3a), wird der 3D-Effekt noch mehr verstärkt [2, 3]. Solche Prismen sind in der Brillenoptik zur Behandlung des Schielens sehr gebräuchlich. Die Prismen fächern die Farben weiter auf, wodurch der Abstand zwischen dem blauen und dem roten Bildpunkt auf der Netzhaut größer wird. Das wiederum wird als größerer Tiefenabstand des roten vom blauen Punkt im Objektraum interpretiert.

Die Ablenkung in den Prismen bewirkt aber auch, daß die optischen Achsen der Augen nach außen gedreht werden. Das kann zu Problemen führen: Zum Doppeltsehen (weil beim menschlichen Auge Akkommodation und Konvergenz stark miteinander gekoppelt sind), zu Kopfschmerzen wegen höhenversetzter Bilder (wenn die Prismenbrille nicht ganz gerade sitzt), zu Schwindelgefühl (weil sich die Sehwelt anders bewegt als erwartet). Mit sogenannten Geradsichtprismen lassen sich die beiden erstgenannten Probleme umgehen. Geradsichtprismen bestehen aus mehreren Gläsern verschiedener Dispersion mit dem Effekt, daß ein Lichtstrahl mittlerer Wellenlänge gerade nicht abgelenkt wird, während die Enden des Spektrums zu beiden Seiten gebrochen werden.

Nun sind solche Prismen für normale Brillen nicht besonders handlich und außerdem relativ teuer. Eine spektrale Aufspaltung des Lichts läßt sich auch mit Beugungsgittern erreichen. Bei einfachen Beugungsgittern liegen jedoch immer mehrere Beugungsordnungen vor. Blickt man auf ein Objekt durch ein derartiges Gitter, erhält man dementsprechend mehrere, nebeneinanderliegende Bilder, die sich gegenseitig stören. Das wiederum kann man mit sogenannten Blaze- oder Echelette-Gittern vermeiden, die in der Optik schon lange bekannt sind [4].

Durch entsprechende Gestaltung der Gitterform kann man erreichen, daß praktisch das gesamte Licht in eine Beugungsordnung hinein konzentriert wird. In den siebziger Jahren wurden Verfahren entwickelt, die es ermöglichen, derartige Transmissionsgitter mit interferenz-optischen Methoden und speziellen Ätzverfahren herzustellen [5]. Erst dadurch - und mit erheblichem technischen Aufwand - wurde die Massenherstellung solcher Transmissionsgitter möglich [6]. Entsprechende Patentschriften [7] verraten längst nicht alle Einzelheiten, bieten aber dennoch eine gute Zusammenfassung der diesem 3D-Effekt zugrundeliegenden physiologischen und physikalischen Überlegungen.

Das Gitter der diesem Heft beiliegenden ChromaDepth-Brille hat eine Gitterkonstante von $g \approx 32\mu\text{m}$ (Abbildung 4). Das läßt sich mit einem Laser bekannter Wellenlänge leicht bestimmen. Fast die gesamte Lichtintensität wird in die erste Beugungsordnung **auf nur einer Seite** konzentriert (Blaze-Gitter). Mit einem Laserpointer ist das leicht sichtbar zu machen. Dreht man die Gitterfolie senkrecht zum Laserstrahl, dreht sich das hellste Beugungsbild - das Bild erster Ordnung - im Kreis um das kaum sichtbare Beugungsbild nullter Ordnung.

Gemäß $\sin\varphi = \lambda/g$ ergibt sich für grünes Licht ($\lambda = 560\text{nm}$) für die erste Beugungsordnung des Gitters ein Winkel $\varphi \approx 1^\circ$. Aus dem Brechungsgesetz folgt für den Ablenkwinkel des Prismas (Abbildung 4) ebenfalls ein Winkel von etwa 1° . Dadurch wird fast die gesamte Intensität des auffallenden Lichts in die erste Beugungsordnung auf eine Seite gelenkt. Im Prinzip sind Blaze-Gitter nur für eine Wellenlänge optimiert. Bei davon abweichenden Wellenlängen gelangt auch Licht in andere Beugungsordnungen als die 1. Ordnung. Mit dem Laserpointer ($\lambda \approx 670\text{nm}$) sieht man deswegen auch viele Beugungsordnungen.

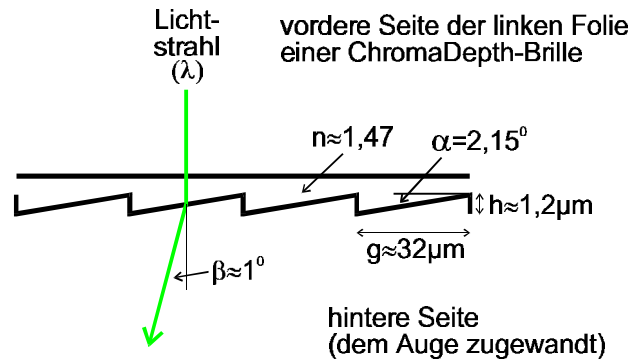


Abb.4: Querschnitt einer ChromaDepth-Folie. Zum einen ist die Folie ein Gitter mit einer Gitterkonstante $g \approx 32\mu\text{m}$, wobei die eingebauten Prismen das Licht gerade um einen Winkel von etwa 1° ablenken. Die Blaze-Bedingungen für dieses Gitter lauten: Beugung: $I = g \cdot \sin b$; Brechung: $n \cdot \sin a = \sin(a+b)$

An die Stelle der Prismen in Abbildung 3a kann man nun diese Gitter setzen und hat prinzipiell den gleichen Effekt (Abbildung 3b). Das Gitter hat sogar den Vorteil daß die Akkommodation-Konvergenz-Kopplung sehr viel weniger beansprucht wird, das heißt man muß weniger stark und außerdem einwärts schielen. Das können die meisten Menschen viel besser. Außerdem ist beim Gitter die Dispersion viel größer als beim Prisma.

Vertauscht man die Gitter in der Brille, kehren sich die Tiefenverhältnisse um. Ein Experiment, das sich leicht durchführen läßt: Man verschiebt die Brille seitwärts, z.B. so weit nach links, daß das linke Auge durch die rechte Brillenfolie blickt, und das rechte Auge an der Brille vorbei. Allerdings ist der Tiefeneindruck dann nur noch halb so stark.

Betrachtet man ein Bild durch eine ChromaDepth-Brille mit Gittern vor beiden Augen, erscheinen vor allem senkrechte Kanten relativ unscharf und verwaschen. Aus diesem Grund vertreibt die Firma Chromatek zwei Arten von Brillen: die C3DTM-Brille (früher Standardbrille genannt) mit Gittern vor jedem Auge und die HoloPlayTM-Brille (früher High-Definition-Brille), bei der nur ein Gitter vor dem linken Auge vorhanden ist. Vor dem anderen Auge befindet sich eine transparente Folie. Mit der HoloPlayTM-Brille hat man einen vergleichsweise starken 3D-Eindruck bei teilweise unscharfen Objektträgern. Bei der C3DTM Brille ergibt sich ein halb so starker 3D-Eindruck. Denn nur vor dem linken Auge befindet sich ein Gitter, während dafür die Objekte mit dem rechten Auge scharf gesehen werden.

Der große Vorteil dieser 3D-Brille liegt darin, daß man nur ein **einziges** Bild braucht. Die Tiefeninformation wird über die Farbe kodiert. Bei fast allen anderen 3D-Verfahren sind immer zwei getrennte "Stereo-Halbbilder" notwendig, die man den beiden Augen getrennt zuführt [8, 9]. Die ChromaDepth-Brille bietet Fotografen wie auch Malern die Chance, in flachen Bildern Tiefeneffekte zu erzeugen. Es ist reizvoll, mit der ChromaDepth-Brille auf Entdeckungsreise zu gehen und Gemälde zu betrachten, deren Urheber vom Farbtiefeneffekt nichts ahnten. So manche Bilder von Vasarely entfalten

ganz unerwartete Effekte, so etwa seine Arbeiten Izzo-22, Dell-2 und Bicube. Gezieltes Malen mit der Chroma-Depth-Brille vor den Augen will übrigens gelernt sein. Denn die stereoskopische Wirkung unterschiedlicher Farben macht es schwer, zu wissen, wann der Pinsel die Leinwand wirklich berührt! Das Bild "Nachtaugen" (Abbildung 5) hat Dorle Wolf gemalt, während sie eine High Definition ChromaDepth-Brille trug. Der Farbstereoeffekt verschafft dieser und anderen Arbeiten [10] reizvolle Tiefe (siehe auch das Titelbild).

Natürliche Grenzen sind dem Chromatek-Verfahren durch die Einschränkung der verwendbaren Farben gegeben. Man darf die Farben eben nicht beliebig einsetzen, wenn man nicht paradoxe Tiefeneffekte erzeugen will. Für spezielle Zwecke ist das aber kein Nachteil -im Münchener Forum der Technik im Planetarium des Deutschen Museums läuft schon seit Herbst 1996 eine Lasershow (Cosmic Dreams), bei der ChromaDepth-Brillen benutzt werden. Die spektral reinen Laserfarben sind besonders geeignet, den dreidimensionalen Effekt hervortreten zu lassen. Mit einem Laserpointer kann man sich auch seine eigene Show machen.



Abb. 5: "Nachtaugen". Acrylgemälde (49mal37cm) von Dorle Wolf

Literatur:

- [1] **H. Schober:** Das Sehen, VEB Fachbuchverlag, Bd. 1 und 2, Leipzig 1970
- [2] **W. Einthoven:** Stereoscopic process and apparatus using different deviations of different colors, U.S. Patent No. 5-002-364, March 26, 1991
- [3] **I. Kohler:** Experiments with Goggles, Scientific American **206** (1962), No.5, 62-72
- [4] **Pedrotti et al.:** Optik, Eine Einführung, Prentice Hall, München 1996
- [5] **J. Sicking et al.:** More Than Meets the Eye, The Physics Teacher **33** (1995), 446-448
- [6] **Chromatek Inc.,** 1246 Old Alpharetta Road, Alpharetta, Georgia 30005 USA
- [7] **R.A. Steenblik:** Stereoscopic process and apparatus using different deviations of different colors, U.S. Patent No. 5-002-364, March 26, 1991
- [8] **D. und R. Wolf:** 3D-Sehen mit nur einem Stereohalbbild? 3D-Magazin **4** (1995) 39-42
- [9] **R. Wolf:** Zusammenhänge: Kunst, Geist, Gehirn. Warum wir Gemälde so sehen, wie wir sie sehen. In: Welt der Wahrnehmung - Wahrnehmung der Welt. Symposium „Turm der Sinne“, Nürnberg (1998). H.Fink, R. Rosenzweig und R. Wolf (Hrsg.), in Vorbereitung.
- [10] **D. Wolf (Hrsg.)** der farbe leben. Arbeiten der Malerin Dorle Wolf. Bilderkatalog, Viertürme-Verlag Münsterschwarzach, ISBN 3-00-003388-2 (1999).

*Der Hersteller der Chromadepth-Brille bietet im Internet informative Seiten mit vielen Beispielen inklusive Videosequenzen an unter der Adresse: <http://www.chromatek.com/>
Die Brille ist direkt vom Hersteller aus den USA erhältlich. In Deutschland auch bei: Physik-Boutique, Stark-Verlag, Postfach 1852, 85318 Freising (<http://www.stark-verlag.de>)*

Anschriften:

Dr. Christian Ucke, Physikdepartment E 20, Techn. Univ. München, 85747 Garching; e-mail: ucke@e20.physik.tu-muenchen.de

Dr. Rainer Wolf, BIOZENTRUM der Universitaet Würzburg, Am Hubland, 97074; e-mail: lrwolf@biozentrum.uni-wuerzburg.de