

Warum es Gelbgrün, aber kein Rotgrün gibt

„Vorspann“:

Grafische Darstellungen von wellenlängenabhängigen Absorptionskurven

Im folgenden Text werden grafische Darstellungen verwendet, in denen auf der waagrechtens x-Achse die Wellenlänge aufgetragen ist. Damit werden die verschiedenen Bereiche der wahrgenommenen Lichtreize, also die physikalische Ursache unserer Wahrnehmung, dargestellt. Während diese „Seite der Medaille“ kaum Fehldeutungen zulässt, wird die Bedeutung der y-Achse leicht falsch interpretiert. Die hier aufgetragene „Absorption“ gibt an, wie intensiv die verschiedenen „Lichtsorten“ (Wellenlängenbereiche) in den Sinneszellen wirken. Was bedeutet das?

Ganz allgemein arbeiten unsere Sinneszellen („Rezeptoren“) nach dem gleichen Prinzip: Durch eine äußere Einwirkung („Reiz“) wird eine (chemische) Reaktion ausgelöst. Dabei kann eine bestimmte Art von Sinneszelle immer nur auf einen für ihn typischen Reiz („Reizqualität“) reagieren: Wir können daher nicht mit der Nase sehen und nicht mit den Ohren riechen. Der einzelne Rezeptor ist nicht in der Lage, verschiedene Reizqualitäten zu unterscheiden. In ihm können nur unterschiedliche viele Moleküle zu einer Reaktion gebracht werden, je nachdem, wie intensiv der Reiz war. Die Deutung, um welche Reizart es sich gehandelt hat, ist Sache des Gehirns. Es interpretiert die eingehenden Signale nach ihrer Herkunft. Das ist für uns ungewohnt: Wenn wir Telefonanrufe erhalten, dann kommen die Nachrichten von unterschiedlichen Anrufern (die wir am Namen, ihrer Stimme oder der Nummer auf dem Display unterscheiden) über die gleiche Leitung zu uns. Unsere „Telefonanlage“ im Gehirn arbeitet umgekehrt: Von allen „Gesprächspartnern“ (Sinnesorganen) führen getrennte Leitungen zum Gehirn, hier stehen entsprechend viele Telefonapparate. Wenn das Telefon mit der Aufschrift „Kältereiz kleiner Zeh linker Fuß“ läutet, weiß das Gehirn, wo es uns kalt geworden ist. Wichtig: alle Telefon haben das gleiche Läutezeichen, sie können nur unterschiedlich laut klingeln.

In den Stäbchen und Zapfen unserer Augen werden photochemische Reaktionen ausgelöst, d.h. ein Lichtreiz verändert die Struktur bestimmter Moleküle, wodurch weitere chemische Reaktionen in Gang gesetzt werden. Die Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes besteht nur darin, wieviele Moleküle von einer bestimmten Lichtmenge zur Reaktion gebracht werden. Das „Klingeln“ des dazugehörigen Telefonapparates im Gehirn wird also nur unterschiedlich laut sein. Die in den Grafiken dargestellten Kurven der (relativen) Absorption bzw. Erregung in Abhängigkeit von der Wellenlänge darf also nicht so verstanden werden, als ob der Rezeptor differenzierte Signale abgeben könnte, aus denen auf die Wellenlänge geschlossen werden könnte. Ein schwächerer Lichtreiz aus dem mittleren Bereich der Kurve kann zur gleichen Signalstärke („Klingellautstärke“) führen wie ein Reiz aus den Randbereichen.

Hinweis zur Lektüre:

Bitte laden Sie sich parallel die Datei *Farbensehen 3 Grafik.pdf* auf Ihren Bildschirm.

In dieser Grafik habe ich versucht, alle wesentlichen Schritte des Wahrnehmungsprozesses zusammenzufassen und hoffe, dass sie Ihnen hilft, den Überblick zu behalten.

1. Jede Theorie hat ihre Grenzen: wo die Dreikomponententheorie versagt

In der ersten Folge (03 Farbensehen 1) wurden bereits einige Fragen angesprochen, die durch die Dreikomponententheorie nicht befriedigend beantwortet werden können. Diesen ungeklärten Problemen wollen wir uns in dieser Folge zuwenden.

1.1. Gelb: Misch- oder Grundfarbe?

Im Farbdreieck der Dreikomponententheorie (s. Farbensehen 1, Kap. 2.2.) wird dem Farbeindruck „Gelb“ die Qualität einer Mischfarbe aus Rot und Grün zugeschrieben. Dem entspricht auch die technische Realisierung, den Eindruck „Gelb“ durch additive Farbmischung aus grünem und rotem Licht zu erzeugen (wie z.B. auf einem Fernseh- oder Computerbildschirm). Unsere Wahrnehmung hebt aber Gelb aus dem „Fußvolk“ der Mischfarben auf das gleiche Niveau wie Rot, Grün und Blau, wir empfinden „Gelb“ nicht als Mischfarbe.

Diesen Widerspruch zwischen der Dreikomponententheorie und unserer subjektiven Wahrnehmung erkannte als erster 1874 der Physiologe Ewald HERING (1834-1918). Während die Dreikomponententheorie sich dem Problem der Farbwahrnehmung mehr von der physikalischen Seite her nähert, formulierte er eine Theorie, die den Aspekten der menschlichen Farbwahrnehmung mehr Rechnung tragen sollte. Er stellte die Empfindung „Gelb“ als „elementar“ heraus wie Rot, Grün und Blau. Er schreibt:

„Gelb kann in's Rothe oder in's Grüne, nicht aber in's Blaue, Blau nur entweder in's Rothe oder in's Grüne, Roth nur entweder in's Gelbe oder in's Blaue spielen. Diese vier Farben kann man also mit vollem Rechte, wie dies schon Leonardo da Vinci that, als einfache oder Grundfarben bezeichnen.“

Lit. (1)

1.2. Sprachlich möglich, aber nicht vorstellbar: Gelbblau und Grünrot

Als Hauptargument für seine Theorie sah HERING in der „Unvereinbarkeit“ bestimmter Farben:

„Man betrachte irgend ein beliebiges Grün, und man wird es entweder für reines Grün nehmen, oder man wird finden, daß es entweder in's Blaue sticht oder in's Gelbe, nie aber in beide Farben zugleich.“

„Alle übrigen Farben können wir insofern zusammengesetzte oder Mischfarben nennen, als sich immer zwei Farben in ihnen zugleich erkennen lassen. Mehr als zwei einfache Farben aber lassen sich aus keiner zusammengesetzten Farbe herausempfinden.*

Anders ausgedrückt heißt dies, daß einerseits Roth und Grün, andererseits Gelb und Blau nie gleichzeitig in einer Farbe deutlich bemerkbar sind.“

Lit. (1)

* neben den „Hauptfarben“ Rot, Grün, Gelb, Blau

Wie Sie leicht selbst überprüfen können, benennen wir die meisten Farbeindrücke mit Kombinationswörtern wie Gelbgrün, grünstichiges Blau oder gelbliches Rot, weil wir sie als Mischungen der Hauptfarben unserer Farbempfindungswelt Rot, Grün, Blau und Gelb empfinden. Es gibt also „unvereinbare“ Farbpaaire (Rot und Grün sowie Gelb und Blau): Mischungen aus diesen Paaren können wir uns nicht vorstellen. Wir wissen zwar aus dem Malkasten, dass man blaue mit gelber Farbe mischen kann, die daraus resultierende Farbe bezeichnen wir aber spontan als „Grün“ und nicht als „gelbstichiges Blau“. Auch einen Türkiston empfinden wir als grün- (nicht gelb-)stichiges Blau. Wird unserem Auge gleichzeitig gelbes und blaues Licht geboten, dann nehmen wir einen Weißindruck wahr. Dies ist allerdings auch nach der Dreikomponententheorie zu erwarten, da sich Gelb und Blau über den Weißpunkt hinweg gegenüber liegen. Wie schon im vorherigen Abschnitt angesprochen, erzeugt gleichzeitiges Rot- und Grünlicht keinen Eindruck einer Rot-Grün-Mischung, sondern eben eine eigenständige Empfindung, die wir mit „Gelb“ bezeichnen. Offenbar arbeitet unsere Farbwahrnehmung nicht mit drei, sondern vier „Grundfarben“. HERING postulierte daher ein neurophysiologisches System, das mit zwei Paaren von „Gegenfarben“ arbeitet; ein Rot-Grün- und ein Blau-Gelb-Paar:

Um einen kurzen Ausdruck für die sich gegenseitig ausschließenden Grundfarben zu haben, will ich sie wegen ihres sozusagen feindseligen Verhaltens zu einander Gegenfarben nennen.

Lit. (1)

HERING erkannte selbst, dass seine Theorie im Widerspruch zur Dreikomponententheorie stand, wies aber deutlich darauf hin, dass er sich eben von einer anderen Seite her dem Problem der Farbwahrnehmung näherte:

„In den Lehrbüchern der Physik ist freilich zu lesen, daß Roth und Grün, wie auch Gelb und Blau zusammen Weiß geben. Aber dies hat nur Sinn, wenn man unter Roth und Grün nicht Empfindungen, sondern Ätherschwingungen versteht. Denn zu sagen, im Weiß werde gleichzeitig Roth und Grün, oder Gelb und Blau so empfunden, wie man im Violett gleichzeitig Roth und Blau empfindet, wäre doch paradox.“

Lit. (1)

Zur damaligen Zeit wurden die elektromagnetischen Schwingungen (Lichtwellen) als „Ätherschwingungen“ bezeichnet.

1.3. „Grundfarbe“: etwas babylonisch...

An dieser Stelle sei kurz ein sprachliches Problem angesprochen: Wir haben in unserer Kindheit Bezeichnungen für Farbeindrücke gelernt und uns dabei an die vier Bezeichnungen Rot, Gelb, Grün und Blau gewöhnt. Dass in unserer Sprache ausgerechnet diese Farben aus dem Spektrum ausgewählt wurden (physikalisch gesehen willkürlich), liegt sicher in unserem Wahrnehmungsvorgang begründet, wie es HERING auch vermutete. Untersuchungen zeigten, dass Versuchspersonen mit diesen vier Bezeichnungen alle Farbtöne des Spektrum charakterisieren können. Naheliegenderweise kann man sie daher auch als „Grundfarben“ bezeichnen. Leider ist aber dieser Begriff in verschiedenen Bereichen der Kunst und Technik mit verschiedenen Bedeutungen belegt. So kennen Sie von den Patronen ihres Tintenstrahldruckers die Bezeichnungen „Magenta“ und „Cyan“, diese Farben sind neben „Yellow“ (Gelb) die „Grundfarben“ des Vierfarbendruckes (CMY-Farbraum, „Schwarz“ wird als vierte „Farbe“ gezählt). Dabei ist „Magenta“ ein leicht blautichiges Rot (helles Purpur). Der gleiche Name wird aber auch im „RGB-Farbraum“ („Grundfarben“ Rot, Grün, Blau) für eine Mischung aus Rot und Blau verwendet, umgangssprachlich gerne „Pink“ genannt. „Cyan“ der Druckerfarben ist ein Blau mit leichtem Türkisstich.

1.4. HERINGS Erklärungsversuch

HERING vermutete als Ursache für das Phänomen der „Gegenfarben“ entsprechende gegensätzlich arbeitende chemische Prozesse, die durch die Farbenpaare in den Zapfen der Netzhaut ausgelöst werden. Vielleicht wäre es für die Anerkennung seiner Theorie besser gewesen, er hätte diesen (von ihm nicht beweisbaren) Erklärungsversuch unterlassen. Seinen Gegnern lieferte er damit „Munition“ gegen seine Vorstellungen, obwohl sein Denkansatz, wie wir heute wissen, durchaus richtig war.

1.5. „Streit um Kaisers Bart“: Theoriestreitigkeiten, vergeudete Energien

Leider, wie oft in den (Natur-)Wissenschaften, entbrannte ein heftiger Streit zwischen den Verfechtern der beiden Theorien, der sogar heute noch, allerdings eher unter Nicht-Physiologen, anhält. Dieser Streit ist ein lehrbuchreifes Beispiel für den fehlerhaften Umgang mit Theorien. Grundsätzlich stellt jede (naturwissenschaftliche) Theorie den Versuch dar, hinter verschiedenen Beobachtungen eine Regel zu sehen, eine Art „Strickmuster“. Die Triebfeder dafür ist letztlich unser Bestreben, die unendliche Vielzahl von Naturerscheinungen mit einer kleineren Zahl solcher „Muster“ besser erfassen zu können.

Die Frage, ob eine Theorie „richtig“ oder „falsch“ ist, muss immer vor dem Hintergrund ihres „Gültigkeitsbereiches“ gesehen werden. Ein altes Beispiel, an das sie sich vielleicht noch aus dem Physikunterricht erinnern, ist das Hookesche Gesetz. Der englische Physiker Robert HOOKE (1635 - 1702) erkannte 1676, dass eine Stahlfeder genau im gleichen Maße länger wird, in dem man sie durch angehängte Gewichte dehnt (ihre Verlängerung also proportional zur verlängernden Kraft ist). Für andere Materialien, z.B. ein Gummiband, trifft diese Beschreibung des Dehnungsverhaltens ebenso wenig zu wie für eine Stahlfeder, die so stark gedehnt wird, dass sie anschließend nicht mehr in ihre Ausgangslänge zurückschnellt. Es wäre aber nicht sinnvoll, diese „Theorie“ deshalb als „falsch“ zu bezeichnen. Sie erfüllt ihren Zweck, nämlich die Beschreibung des Dehnungsverhaltens einer Stahlfeder bei nicht zu großer Belastung, völlig korrekt. Heute existieren mathematisch wesentlich anspruchsvollere Berechnungsverfahren, um auch das Dehnungsverhalten z.B. eines Gummibandes zu beschreiben. Aber kein vernünftiger Physiker oder Techniker käme auf die Idee,

diese „überkomplizierten“ Formeln für eine Stahlfeder zu verwenden. Es gilt immer das Motto „So einfach wie möglich, so kompliziert wie nötig“.

Die beiden Farbsehtheorien näherten sich dem Problem der Farbe von zwei unterschiedlichen Seiten her. Die Dreikomponententheorie stellt die Frage „Wie kann man bestimmte Farbeindrücke erzeugen?“ und beschreibt die dafür notwendigen physikalischen Gegebenheiten (Licht verschiedener Wellenlängen). Der Physiologe bezeichnet eine solche von unseren Sinnesorganen aufgenommene äußere chemisch-physikalische Einwirkung als „Reiz“. Im Gegensatz dazu spricht er von „Erregung“, wenn er die durch den Reiz in den Sinneszellen ausgelösten Prozesse betrachtet. Nicht die Reize, sondern die Erregungen liefern dem Gehirn die Informationen, aus denen in unserem Bewusstsein eine „Empfindung“ oder „Wahrnehmung“ entsteht. Die Dreikomponententheorie nähert sich also dem Problem der Farbwahrnehmung von der Reiz-Seite her.

Die Gegenfarbentheorie HERINGS hingegen rollt die Problematik vom Wahrnehmungs-ende her auf (und hat sich damit sicher die schwierigere Alternative ausgesucht). Unsere Farbwahrnehmung ist eben keine Naturerscheinung wie Gewicht oder Licht, sondern eine in unserem Gehirn durch hoch komplizierte Nervenverknüpfungen erzeugte Empfindung. Für Empfindungen gibt es aber leider keine Messgeräte, die wir einfach an unser Gehirn anstöpseln können!

Zwischen den beiden Theorieansätzen klafft daher zunächst eine große Lücke, aber jede liefert für bestimmte Beobachtungen einsichtige „Erklärungen“.

Weiter muss zur Beurteilung einer Theorie auch immer der übrige Kenntnisstand der jeweiligen Zeit berücksichtigt werden. Zur Zeit HERINGS waren die Funktionen der Nervenzellen mit ihren Verschaltungen noch unbekannt. HERING konnte nur die Existenz von nervösen Systemen postulieren, durch die die von ihm erschlossenen Prinzipien der Farbwahrnehmung realisiert werden. Dass er dabei die Sinneszellen der Netzhaut „verdächtigte“ ist eigentlich sehr naheliegend, da er von der Existenz anderer möglicher „Täter“ (nämlich das Netzwerk von Nervenzellen in der Netzhaut mit ihren synaptischen Verknüpfungen) nichts wusste. Seine Theorie lockte aber etliche andere Forscher auf die richtige Fährte, die schließlich auch zu den erfolgreichen „Fahndungsergebnissen“ unseres heutigen Wissenstandes führte.

2. „Salomonisches“ Urteil und Ehrenrettung für HERING

2.1. Was HERING gerne gehabt hätte...

Leider erlebte HERING die Bestätigung seiner Vorstellungen nicht mehr. Erst 1956 gelang es Gunnar SVAETICHIN (1915-1981), in der Netzhaut von Fischen Zellen nachzuweisen, die tatsächlich in gegensätzlicher Weise auf rotes und grünes bzw. gelbes und blaues Licht reagieren. (Auch er irrte sich in der Deutung seiner Experimente, er glaubte Zapfen „angezapft“ zu haben, in Wirklichkeit handelte es sich um Horizontalzellen). Wie so oft in den Naturwissenschaften, war der Durchbruch zur Beilegung des (vermeintlich unüberbrückbaren) Streites erst möglich geworden, seit moderne Methoden zur Untersuchung von Nervenzellen und ihren elektrischen Signalen entwickelt worden waren. Jetzt folgten aber die Entdeckungen Schlag auf Schlag. 1958 konnte der amerikanische Physiologe Russell L. DE VALOIS (1926-2003) entsprechend arbeitende Zellen in Regionen des Zwischenhirns von Makaken nachweisen. (DE VALOIS arbeitete übrigens auch ein Jahr lang an der Universität Freiburg.). 1966 folgten weitergehende Untersuchungen des Forschertandems WIE-

SEL und HUBEL, die 1981 für ihre weitreichenden Forschungen zur Verarbeitung visueller Eindrücke im Gehirn mit dem Nobelpreis geehrt wurden („für ihre Entdeckungen über Informationsverarbeitung im Sehwahrnehmungssystem“).

2.2. Kleiner Exkurs: Wie „sprechen“ Nervenzellen?

Um unnötige Wiederholungen zu vermeiden: Lesen Sie bitte das Kapitel 2 im Text „Genetik.pdf“.

Die „Signale“ der Nervenzellen sind kurze elektrische Impulse (vergleichbar mit dem kurzen Antippen eines Tastschalters wie bei einem Morseapparat). Ihre Dauer liegt in der Größenordnung von 1 ms (Tausendstel Sekunde). Zum Grauen aller Physiker werden sie „Aktionspotentiale“ genannt. Solche kurzen „Blitze“ kennen wir, z.B. von Warnlampen. Solche Warnanlagen kennen aber keine „Modulation“: es gibt nur Blitzen oder Nicht-Blitzen. Die schon einmal als Vergleich herangezogenen „Piepser“ der Abstandswarner im Auto sind modulationsfähig: Je mehr sich das Fahrzeug einem Hindernis nähert, um so schneller wird die Folge der Pieps-Signale. Nach dem gleichen Muster werden die elektrischen Signale der Nervenzellen moduliert. Je stärker eine Zelle erregt wird, um so schneller „feuert“ sie ihre Impulse, die dann über die dünnen Nervenzellausläufer (die „Telefonleitungen“ des Nervensystems) zu anderen Zellen transportiert werden. Im klassischen Fall feuert eine Zelle nur, wenn sie erregt wird (bei Sinneszellen durch einen Reiz, ansonsten durch Informationen von anderen Zellen).

Es gibt aber auch Zellen, die im „Ruhezustand“ (d.h. ohne Erregung von außen) mit einer gleichmäßigen, mittleren Geschwindigkeit Impulse aussenden (eine Art „Standby“-Meldung). Wird die Zelle nun von anderen Zellen erregt, kann sie die Feuergeschwindigkeit entsprechend erhöhen, wie eine „normale“ Zelle. Unsere zellulären Verknüpfungen verfügen aber neben einer gegenseitigen Erregung auch über die Möglichkeit, mit hemmenden Signalen die Erregung einer anderen Zelle zu drosseln. Solche „hemmenden Synapsen“ dienen z.B. dazu, Vorgänge zu bremsen oder ganz zu stoppen. Durch die geschickte Kombination von Erregung und Hemmung werden Nachrichten in unserem Gehirn verteilt und auch in den jeweiligen Gehirnbereichen „gewichtet“. Gerade im Bereich der Sinneswahrnehmungen ist die Gewichtung notwendig, da unser Bewusstsein immer nur einen Bruchteil aller Informationen, die von außen dem Gehirn zuströmen, erfassen kann. Der „Arbeitsspeicher“ unserer bewussten Wahrnehmung ist eben auch deutlich kleiner als die riesige Datenfülle, die in der Gedächtnis-„festplatte“ gespeichert ist und ständig von den Sinnesorganen geliefert wird.

Auch in der Netzhaut sind solche Zwei-Richtungen-Zellen eingebaut. Es sei kurz eingefügt, dass die Netzhaut kein „normales“ Sinnesorgan ist, sondern ein vorgeschobener Außenposten des Gehirns. Es entsteht während der Embryonalentwicklung als Ausstülpungen der Gehirnanlage. Neben den Sinneszellen (Stäbchen und Zapfen) stellt sie ein hoch komplexes Geflecht mehrerer Schichten von Nervenzellen dar. Die Informationen, die vom Auge zum Gehirn geschickt werden, sind keine „Rohdaten“, sondern bereits trickreich aufbereitet.

Eine der vorbereitenden Arbeiten, die das Auge dem Gehirn schon abnimmt, ist die Verarbeitung der Zapfen-Informationen.

2.3. Aus drei mach vier

2.3.1. Wenn es 1944 schon ein Internet gegeben hätte...

Wie schon eingangs beschrieben, näherten sich die beiden „Kontrahenten“ Dreifarben- und Gegenfarbentheorie dem Problem der Farbwahrnehmung von zwei Richtungen her und zunächst schienen sie unvereinbar miteinander. Ein erster, eigentlich wegweisender Denkansatz, auf welchem Wege aus ursprünglich drei Sinneskanälen ein Doppelpaar aus vier Wahrnehmungen entstehen könnte, entwickelte 1944 der schwedische Physiologe Gustaf F. GÖTHLIN (1874-1949). Entdeckungen eines anderen Forschers führten ihn auf die richtige Fährte. Der englische Nobelpreisträger SHERRINGTON* hatte im Rückenmark das Schaltungsprinzip von hemmenden und erregenden Synapsen gefunden. Vereinfacht gesagt: Nervenzellen können addieren und subtrahieren. GÖTHLIN entwickelte ein „Waagenmodell“, in dem die Informationen aus den drei Zapfentypen als negative bzw. positive „Gewichte“ zu den zwei Gegenfarbpaaren „austariert“ werden. Offenbar kannte aber sein Landsmann Ragnar GRANIT, ebenfalls Nobelpreisträger und ein, wenn nicht der „Guru“ der Sehwahrnehmung, seine Idee nicht. Hätte es damals schon den weltweiten Informationsaustausch des Internets gegeben, wäre vielleicht das Problem „wie macht das Auge bzw. das Gehirn aus drei (Zapfeninformationen) vier (Gegenfarben)?“ früher gelöst worden.

Die Antwort auf die Frage „Wie macht man aus drei vier?“ ist in diesem Modell die doppelte Nutzung von Informationen. Die Signale von den Grün- und Rotrezeptoren* werden nicht nur für die Wahrnehmung dieser beiden Farben, sondern auch für die „Gelb“-Wahrnehmung genutzt. Für die Frage, ob eine Fläche den Eindruck „Rot“ oder „Grün“ hervorruft, wird der Unterschied („Subtraktion“) der Erregungsstärken verwendet: überwiegt die Erregung der Rotrezeptoren die der Grünrezeptoren, deutet das Gehirn diese Information als „Rot“ und umgekehrt als „Grün“. Für die Interpretation „Gelb“ wird die Summe („Addition“) der Rot- und Grünerregungen mit der Blauerregung verglichen, sozusagen gemeinsam „in die Waagschale geworfen“.

2.3.2. Die Versöhnung der „feindlichen Brüder“

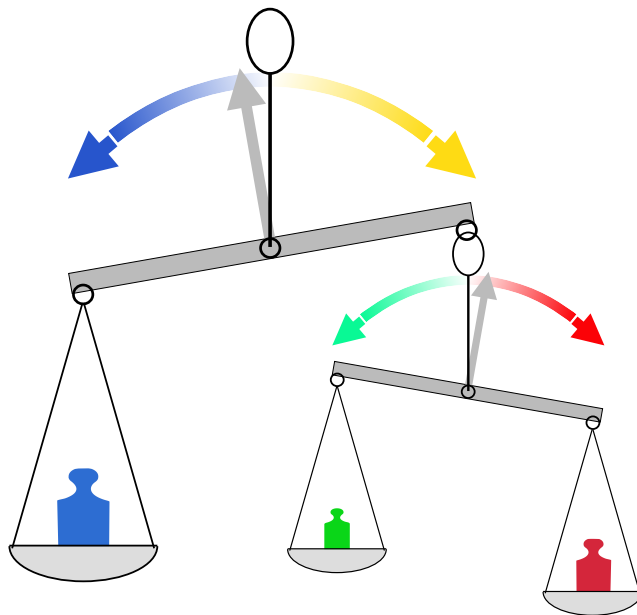
J.A. von KRIES gelang es schließlich um 1905, die beiden kontroversen Theorien miteinander friedlich zu vereinen. Seine „Versöhnung“ beruhte auf der Annahme, dass die beiden Vorstellungen zwei verschiedenen Ebenen („Zonen“) zugeordnet werden. Während die Dreikomponententheorie Vorgänge auf der Ebene der Sinneszellen (drei Zapfen) beschreibt, gibt die Gegenfarbentheorie Phänomenen Ausdruck, die auf einer höheren Ebene (Nervenzellen der Netzhaut bzw. des Gehirns) angesiedelt sind.

Den Nachweis für die Richtigkeit seiner Annahme konnten erst Untersuchungen in der Mitte des 20. Jahrhunderts erbringen. Nach und nach wurden immer mehr Nervenzellen in der Netzhaut und in den Gehirnbereichen „oberhalb“ des Auges entdeckt, die Informationen von den Zapfen in unterschiedlicher Weise verarbeiten. Inzwischen werden sieben verschiedene „Verrechnungstypen“ unterschieden. Daraus wurde schon die Vermutung abgeleitet, dass nicht zwei, sondern drei Gegenfarbepaare in unserem Farbwahrnehmungssystem existieren.

Bald nach der Entwicklung der KRIESSchen Zonentheorie wurde versucht, die Verrechnung der Zapfeninformationen mit mathematische Formeln zu erfassen, also rechnerische Modelle für die Tätigkeit der Nervenzellen zu erstellen. In der Übersichtsgrafik in der Anlagedatei ist eines dieser Berechnungsmodelle dargestellt. Es stammt aus der Anfangszeit der mathematischen „Spielecke“ der Neurophysiologen und soll eher symbolisch verstanden werden. Die anfängliche Euphorie, man könne die Rechenakrobatik unserer Nervenzellen mit relativ schlichten Rechenoperationen erfassen, scheiterte an den Ergebnissen der neurophysiologischen Messungen. In einer Arbeit von 2011 (Lit. 13) heißt es daher ernüchternd:
„Bis jetzt existiert noch kein Modell, das diese komplizierte Verarbeitung befriedigend beschreibt.“

„Waagenmodell“ der Farbwahrnehmung
 GÖTHLIN 1944

www.die-reise-maus.de



- Die Gegenfarbenpaare Blau-Gelb und Rot-Grün als Waagen,
- das Paar Rot-Grün wirkt als Waagschale für die Gelb-Seite des Blau-Gelb-Paares,
- die Erregungen der drei Zapfensorten als Gewichte.

Dargestellt ein blasses Purpur:

Ausschlag der Gelb-Blau-Waage in Richtung Blau, der Rot-Grün-Waage in Richtung Rot

nach Angaben aus Lit. (14)

2.4. Was nicht unerwähnt bleiben sollte: ein paar Ausblicke in verschiedene Richtungen

2.4.1. Neuigkeiten zählen!

Ein großes Forschungsgebiet widmet sich den besonderen Fähigkeiten unseres Seh-sinnes, Kontraste, wie etwa ein Wechsel von Farben im gesehenen Bild, wahr zu nehmen. Dazu werden die Informationen benachbarter Sehzellen zu Gruppen zusammengefasst, so genannten rezeptiven Feldern. Sie bestehen im Prinzip aus einem zentralen und einem Randbereich, wobei die Nervenzellen im Zentrum entgegengesetzte Erregungen zu denen des Randbereiches erzeugen. Wandert ein Farb- oder Helligkeitsunterschied im gesehenen Bild über ein solches Feld, so signalisieren die gegensätzlichen Erregungen aus Mitte und Rand dem Gehirn diesen Unterschied sozusagen „künstlich verstärkt“. Die Wirkung ist etwa vergleichbar mit einem Bildbearbeitungsprogramm, in dem man den Kontrast eines Bildes verstärken kann.

Diese Kontrastverstärkung entspricht dem allgemeinen Arbeitsprinzip unserer Sinneswahrnehmungen, besonders empfindlich auf Veränderungen zu reagieren. Biologisch ist dies leicht verständlich: So filtert das System „Neues“ aus der riesigen Informationsfülle heraus, die unsere Sinnesorgane aus der Umwelt aufnehmen.

Menschen mit einer gestörten Farbwahrnehmung, die Rot und Grün nicht unterscheiden können, lassen uns die Bedeutung dieser Mechanismen erkennen: Für sie sind die roten Erdbeeren im grünen Laub nicht farblich unterscheidbar! Für unsere Vorfahren in den Bäumen war es sicher ein gewaltiger Gewinn, dass Ihnen die Evolution zusätzlich zu den schon bei anderen Säugern vorhandenen Grün- (M-)Zapfen noch die Rot-(L-)Zapfen „geschenkt“ hat. Der Farbwechsel von Grün nach Rot wird als „überhöhtes“ Signal an das Gehirn geleitet. Dank dieses Neuerwerbes konnten sie rot gefärbte Früchte im grünen Laub der Bäume erheblich schneller erkennen (so wie wir die Erdbeeren!).

2.4.2. Was schon die alten Römer toll fanden...

Der Farbstoff der Purpurschnecke war im alten Rom anfänglich den Senatoren vorbehalten, sie durften ihre Toga mit einem Streifen dieser Farbe schmücken. Nachdem sich die Kaiser ganz in Purpur kleideten wurde schließlich Purpur zur Lieblingsfarbe aller Römer, die sich diesen Luxus leisten konnten, ein symbolhaftes Beispiel für den allmählichen Niedergang des römischen Reiches.

Wie schon in den vorhergehenden Beiträgen zum Thema Farbensehen gab die eigentümliche Wahrnehmung eines „Purpur“- oder neudeutsch „Pink“-Farbeindrucks den Physiologen immer schon Rätsel auf. Besonders interessant war ja das Fehlen dieser Farbe im natürlichen Spektrum, wie wir es in einem Regenbogen sehen. Dieses Rätsel scheint immerhin gelüftet: Eine der sieben verschiedenen nervösen „Taschenrechner“ reagiert tatsächlich auf die Wellenlängenkombination, die uns den Purpureindruck vermitteln, sie verarbeiten sowohl Informationen aus den Blau -(S)- als auch aus den Rot- (L-)Rezeptoren.

2.4.3. Was nicht nur Grafiker manchmal verzweifeln lässt...

Wenn Sie jemals versucht haben, ein Foto über Ihren Computer auszudrucken, dann können Sie ein Lied davon singen: was auf dem Bildschirm so toll aussah spuckt der Drucker als Enttäuschung aus. Selbst wenn Sie ein Bild aus einem Programm in ein anderes übertragen, und plötzlich ein deutlich verändertes Bild vor sich sehen, glauben Sie an einen elektronischen Klabautermann, der da sein Unwesen treibt. Das alles sind aber nur Belege für unsere bislang immer noch unzulänglichen Methoden, das Phänomen der Farbwahrnehmung mathematisch zu beschreiben. Computer sind eben nur Rechenmaschinen und solange wir die Rechenricks unseres Gehirnes nicht entschlüsselt haben, werden sie sich weiterhin „verrechnen“. Hier ist der Traum von der „künstlichen Intelligenz“ noch in weiter Ferne! An diesem Problem werden sich vermutlich noch weitere Forschergenerationen die Zähne ausbeißen.

Freuen wir uns also an der bunten Welt und staunen wir über unser Gehirn, das uns diese Freude ermöglicht!

Quellen

1. Hering, Ewald: Zur Lehre vom Lichtsinne. Zweiter, unveränderter Abdruck. Wien, 1878. In: Deutsches Textarchiv <http://www.deutschestextarchiv.de/hering_lichtsinn_1878/141>, S. 133, abgerufen am 29.01.2018.
2. <http://fourier.eng.hmc.edu/e180/lectures/color2/node2.html>
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Russell_L._De_Valois
4. jgp.rupress.org/content/jgp/43/6/115.full.pdf (Arbeit von De Valois)
5. <https://www.dasgehirn.info/entdecken/meilensteine/den-rasen-mit-der-nagelschere-schneiden>
6. <http://hubel.med.harvard.edu/book/b46.htm> (Beschreibung Exp. De Valois, Hubel & Wiesel)
7. <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/color-perception/> (Verschaltung, Gegenfarben-Mischungsexperimente)
8. <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/zonentheorie/71869> (div. Grafiken)
9. <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/farbensehen/892>
10. <http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAAllgemeine/module/16457?step=3> (Kurven Vergleich Mischung aus 2 Farben/Modellverrechnung)
11. Peter Lennie: The Physiology of Color Vision; Center for Neural Science, New York University, New York, NY 10003, USA
[9ed7a60d3c3b5d404f5ddc0376eb19c3bb55.pdf](http://www.cns.nyu.edu/~plennie/papers/9ed7a60d3c3b5d404f5ddc0376eb19c3bb55.pdf) (Retina-Zellen-Schema; M-,P-Zellen Beschreibung der Verknüpfung mit Zapfen; Sehbahn (Schemagrafik!); Sehrinde-Bereiche Grafik)
12. Michael H. Rowe: Trichromatic Color Vision in Primates; 93.full.pdf
13. Dr. rer. nat. Eva Lübke: Sättigung im CIELAB-Farbsystem und LSh-Farbsystem; Habilitationsschrift 2011, Technische Universität Ilmenau (<http://deutsches-farbenzentrum.de/wp-content/uploads/2011/10/Habilitation5.24.pdf>)
14. Peter Gouras: Color Vision (<http://webvision.med.utah.edu/book/part-vii-color-vision/color-vision/>)

Bildnachweis

- B1. Sprechblase: https://s14-eu5.ixquick.com/cgi-bin/serveimage?url=http%3A%2F%2Ft0.gstatic.com%2Fimages%3Fq%3Dtbn%3AANd9GcQ2Fi1cKw89RuoUFZb08lo6ZHHUfCw_0qjRHq5grZm80MMAuF8&sp=79eff6ad14436c12a65314d79a131a04&antcache=771313
- B2. Kopf: <https://s14-eu5.ixquick.com/cgi-bin/serveimage?url=https%3A%2F%2Fus.123rf.com%2F450wm%2Felenarolau%2Felenarolau1506%2Felenarolau150600032%2F41775745-sammlung-von-sprechblasen-mit-kopf-im-profil-silhouette-sprechen-sprechen-im-chat-schreien-lachend-a.jpg%3Fver%3D6&sp=33e15637cee7db08dd0885d26a76b7bb>
- B3. <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/zonentheorie/71869> (Verschaltung, Grundlage für eigene Grafik)
- B4. https://s14-eu5.ixquick.com/cgi-bin/serveimage?url=https%3A%2F%2Fviamedici.thieme.de%2Fapi%2Fimages%2F1%2Fz%2Fh%2Fa%2Fu%2Ft%2Fana_022600_netzhaut.png&sp=759a822d6b49c3edf9e03bb3c2c-f5ab8 (Netzhautzellen-Schema)

Fachbegriffe**Dreikomponententheorie (YOUNG & HELMHOLTZ)**

Begründet durch die Beobachtung, dass jeder Farbeindruck durch eine geeignete Mischung aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau hervorgerufen werden kann, postuliert die D. die Existenz dreier Rezeptoren*-Typen, die eine unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit besitzen.

Die Existenz von drei Zapfentypen mit unterschiedlichen Absorptionsbereichen wurde durch neurophysiologische Untersuchungen gesichert.

HELMHOLTZ, Hermann, 1821-1894, dt. Physiker und Physiologe;

YOUNG, Thomas, 1773-1829, engl. Mediziner und Naturwissenschaftler.

Farbe

Definition nach DIN 5033 Farbmessung, Teil 1, 1979:

Farbe ist ein durch das Auge vermittelter Sinneseindruck, also eine Gesichtsempfindung.

Die Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teils des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.

Farbwahrnehmung (Empfindung)

Insbesondere zur zahlenmäßigen Darstellung von Farben (Farbmetrik) unterscheidet man zwischen

- Farbton (engl. *hue*): Darstellung auf Farbkreis (rot-gelb-grün-blau etc.)
- Helligkeit (engl. *brightness*): Übergang von hell nach dunkel (schwarz)
- Sättigung (engl. *saturation*): Grad der „Farbigkeit“, Übergang von voller Farbtönung zum Weißpunkt.

Gegenfarbentheorie (HERING)

Aus Beobachtungen der Farbwahrnehmung (Psychophysik) abgeleitet, postuliert zwei Paare von gegensätzlichen Farbempfindungen (Blau-Gelb und Rot-Grün). Beschreibt nach heutiger Vorstellung Prozesse im Bereich der Nervenzellen in Netzhaut und Gehirn.

Karl Ewald Konstantin HERING (1834 - 1918) deutscher Physiologe und Hirnforscher.

Stäbchen

Sehzellen (Lichtrezeptoren) in der Netzhaut (Retina), empfindlich für den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes, ermöglichen Hell-Dunkel-Sehen, lichtempfindlicher als Zapfen, besonders in Bereichen außerhalb des gelben Flecks der Retina.

Zapfen

Sehzellen (Lichtrezeptoren) in der Netzhaut (Retina) mit unterschiedlichen Absorptionsbereichen für verschiedene Wellenlängen des Lichtes, ermöglichen Farbwahrnehmungen; besonders im gelben Fleck (Sehzentrum).

Drei Typen (Mensch):

L-Zapfen (L=long), früher und der Einfachheit halber auch heute noch oft „Rot“-Zapfen:

empfindlich für längere Wellenlängen, Absorptionsmaximum bei 560 nm ($\hat{=}$ grünlichem Gelb);

M-Zapfen (M=medium), „Grün“-Zapfen:

empfindlich für mittlere Wellenlängen, Absorptionsmaximum bei 530 nm ($\hat{=}$ Smaragdgrün);

S-Zapfen (S=short) „Blau“-Zapfen.

empfindlich für kürzere Wellenlängen, Absorptionsmaximum bei 420 nm ($\hat{=}$ Blauviolett).

Weitere Fachbegriffserklärungen aus der Biologie und den angrenzenden Wissenschaftsgebieten Physik und Chemie finden Sie auch in der Rubrik „Lexika“ in den Dateien „Biologie_LX.pdf“ bzw. „Chemie_LX.pdf“.

SHERRINGTON, Sir Charles Scott (1857-1952) britischer Neurophysiologe. Nobelpreis für Medizin 1932 gemeinsam mit Edgar Douglas Adrian für seine Entdeckungen über Funktionen der Neuronen. Auf ihn gehen u.a. fundamentale Begriffe der Neurophysiologie wie Synapse (Verbindungsstelle zwischen Nervenzellen), Propriozeptoren (Sinneszellartige Messfühler im Inneren des Körpers) zurück sowie die Funktionsweise der Rückenmarksreflexe.

KRIES, Johannes Adolf von (1853 - 1928), deutscher Arzt und Prof. der Physiologie (Freiburg); Arbeiten über Funktionen der Sinnesorgane, insbesondere der Augen, darunter entwickelte er die Kries-Zonentheorie, die die Dreifarben- mit der Gegenfarbentheorie verknüpft.