



Internet-Akademie

Serie

„Streifzüge durch die Naturwissenschaften“

Autor: Hans Stobinsky

Folge 04

Farbensehen Teil 2

Das Gehirn deutet Signale

1. Ein wenig Physik

1.1. Was ist Licht?

Das Naturphänomen „Licht“ hat verständlicherweise Generationen von Physikern beschäftigt, spielt es doch für uns „Augentiere“ eine überragende Rolle. Das Ringen mit dem Licht ist auch ein lehrreiches Beispiel aus der Wissenschaftsgeschichte, über Irrungen und Wirrungen, schier endlose Streitigkeiten über die „richtige“ Theorie und die Einsicht, dass der Mensch immer nur einen Teil der Welt, in der er lebt, erfassen kann und die Beschreibungen oder Erklärungen, die er sich zurecht legt, auch stets nur Teilaspekte erfassen. Dieser Teil der Wissenschaftsgeschichte ist all denen zu empfehlen, die glauben, Naturwissenschaftler seien keine „normalen“ Menschen!

„Licht“ kann physikalisch als elektromagnetischer Wellenvorgang beschrieben werden und ist damit ein Teil des gesamten Spektrums elektromagnetischer Wellen, wozu auch Wärmestrahlung, Radiowellen oder „Mikrowellen“ gehören. Das besondere des Bereiches, den wir „Lichtwellen“ nennen, ist „nur“ die Tatsache, dass wir dafür mit dem Auge ein Sinnesorgan haben.

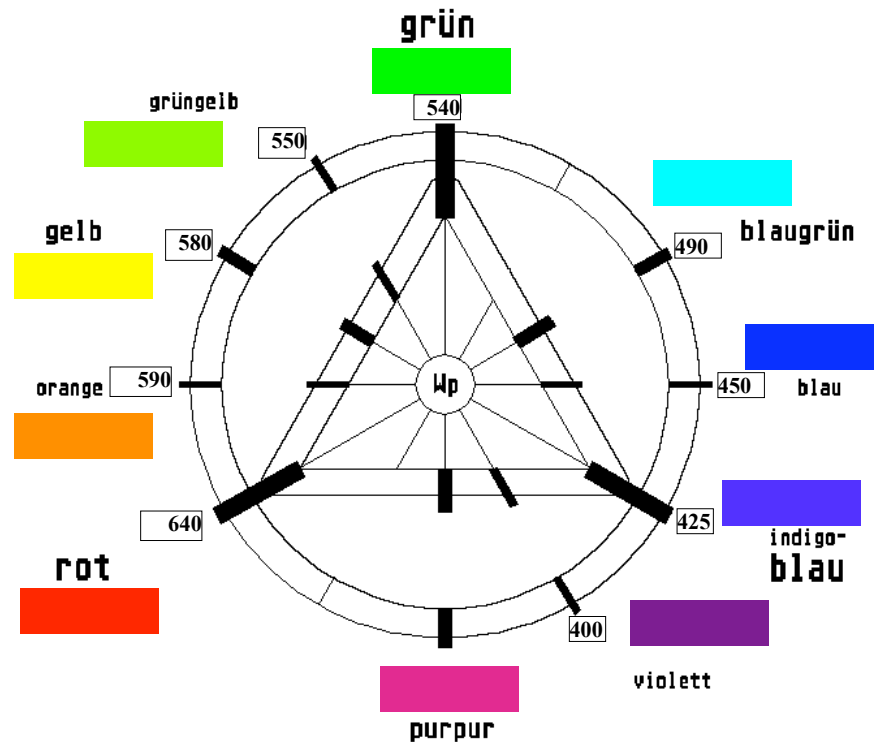
Zusatz für physikalisch Interessierte (kann übersprungen werden):

Neben der Beschreibung des Lichtes als Wellenvorgang existiert (früher als unvereinbare Kontroverse, heute in „friedlicher Koexistenz“) die Beschreibung als Teilchen- (Korpuskel-)erscheinung. Danach besteht Licht aus Teilchen, den Photonen. Diese Beschreibung hat sich als zweckmäßig erwiesen für die Erklärung der Vorgänge, wenn Licht mit Atomen in Wechselwirkung tritt, z.B. bei der Anregung von Elektronen durch Licht. Hier tritt nämlich das Phänomen der Energiequantelung auf, das sich mit der Korpuskel-Vorstellung leichter vereinbaren lässt als mit der Wellenvorstellung (Prinzip: jedes Photon besitzt eine definierte „Energieportion“).

1.2. Wellenlängen

Zur Unterscheidung der verschiedenen elektromagnetischen Wellen verwendet man die „Wellenlänge“, die Distanz zwischen zwei sich wiederholenden Punkten einer Welle (ein „Wellenberg“ und ein „Wellental“). Das für den Menschen sichtbare Licht liegt im Bereich zwischen 400 und 700 nm (1 nm ist ein Nanometer, ein Millionstel Millimeter oder 10^{-9} m). Jeder Teil aus diesem Intervall erzeugt in unserer Wahrnehmung einen charakteristischen Farbeindruck. Diese Eindrücke ordnen wir „rückwärts“ den verschiedenen Wellenlängen zu, wenn wir von Rot- oder Blau-Licht sprechen. Beachten Sie aber: Das Licht selbst „hat“ keine Farbe! Diese Zuordnungen kann man in das Farbdreieck eintragen.

Da die Wellenlängen alle die gleiche physikalische Qualität haben (es gibt keine „Grund-“ oder „Misch“-Wellenlängen), werden sie auf einer kreisförmigen Linie eingetragen. Der Ringschluss ist „unphysikalisch“, wird aber oft verwendet, um auch den Purpur-Bereich eintragen zu können.



1.3. Die magische Grenze zwischen Physik und Wahrnehmung

Am Beispiel des Farbensehens kann man sehr gut die Grenze verdeutlichen, die zwischen zwei Betrachtungsebenen für eine Naturerscheinung („Farbe“) liegen kann:

- Auf der einen Seite liegt die Ebene der Ereignisse in unserer Umwelt (hier den Wellenlängen der verschiedenen Lichtarten), sie sind in vielen Fällen relativ leicht zu beschreiben und zu messen.
- Auf der anderen Ebene liegen die Wahrnehmungen, die sie in unserem Gehirn verursachen (Farbeindrücke). Ihre Messung ist oft mit großen Schwierigkeiten behaftet, einen „Service-Stecker“ hat die Evolution (oder jemand anderes) (glücklicherweise) nicht eingebaut!

Dazwischen liegen hoch komplexe Vorgänge der Informationsverarbeitung im Auge und Gehirn, die bis heute nicht vollständig aufgeklärt sind. Der Unterschied zwischen den beiden Ebenen kann sicher so groß sein wie zwischen einem realen Objekt und dem Bild, das ein abstrakter Künstler davon macht.

So zeigt die Grafik, dass

- Der Linienzug der Wellenlängen offen ist, unser „Wahrnehmungsdreieck“ hingegen ein ringförmig geschlossenes Kontinuum ist.
- Der „Kreisschluss“ wird von der Farbempfindung „Purpur“ belegt, für die es keine entsprechenden Wellenlängen gibt.

2. Das doppelbödige Gelb: Spektralreines Gelb und „Mischgelb“

Am Beispiel „Gelb“ lassen sich einige Eigenwilligkeiten des Farbensinnes aufzeigen:

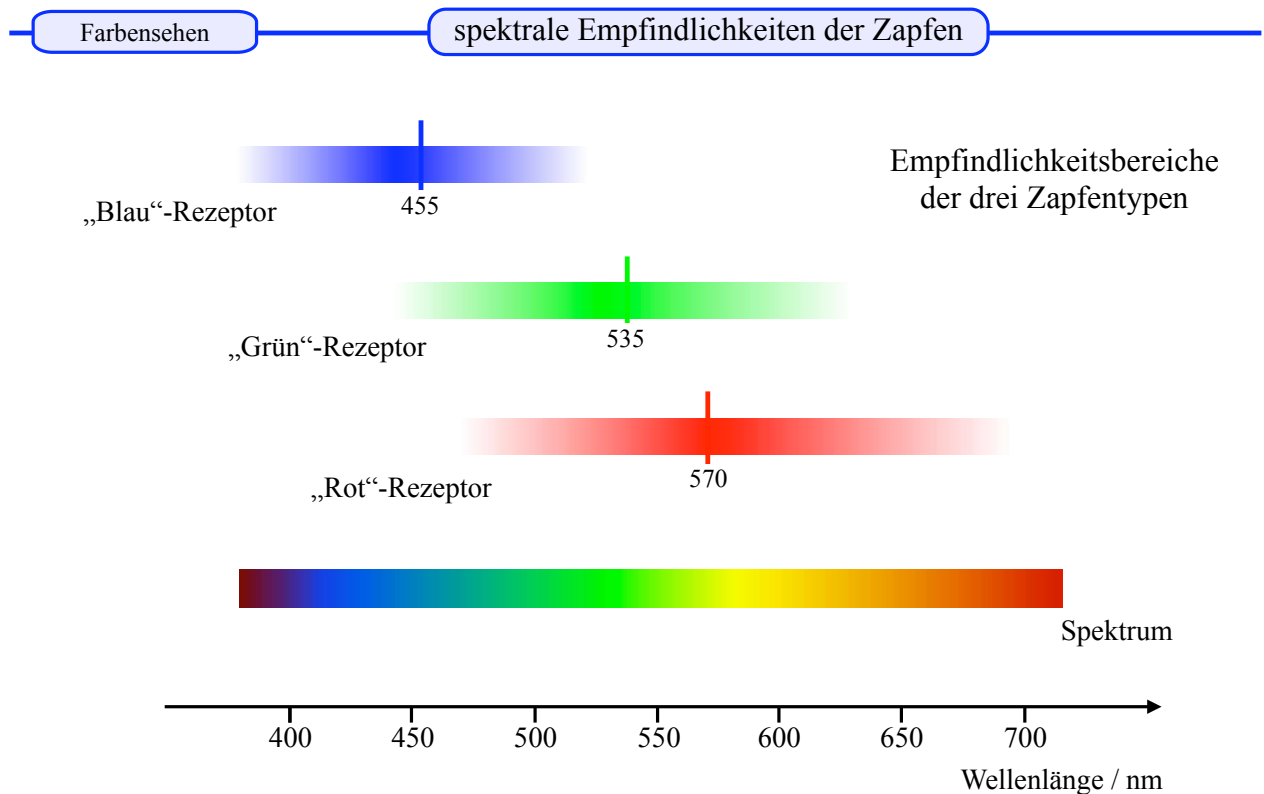
- Der Eindruck „Gelb“ kann auf zwei verschiedene Arten hervorgerufen werden:
 - a. durch Licht mit der Wellenlänge von etwa 580 nm, man spricht von „spektralreinem“ Gelblicht;
 - b. durch gleichzeitige Wahrnehmung von Lichtern mit den Wellenlängen von etwa 640 („Rot“) und 540 nm („Grün“).
- Obwohl durch eine Mischung zweier Lichtarten hervorgerufen, empfinden wir „Gelb“ als eine eigenständige Farbqualität.

3. Die Ebene der Sinneszellen: „Lichtmelder“ für das Gehirn

3.1. Die Sehzelltypen

Wir betreten eine neue Betrachtungsebene zwischen Umwelt und Gehirn: die lichtempfindlichen Sinneszellen im Auge. Für unsere Betrachtungen genügen einige grundsätzliche Punkte:

- Sinneszellen schicken Signale zum Gehirn, sobald sie von „ihrem“ Reiz (hier: Licht) getroffen werden. Sie können sie sich ähnlich vorstellen wie die Rückfahrmelder in Autos: Sobald der Pfosten hinter dem Auto von dem Melder erfasst wird, piepst das Gerät beim Fahrer, das Piepsen wird umso lauter, je näher das Auto an den Pfosten heran fährt. Die Signale von unseren Lichtsinneszellen lassen es im Gehirn „Piepsen“, umso lauter, je heller das Licht ist.
- Es gibt zwei Typen von Lichtsinneszellen:
 - die Stäbchen, die nur Helligkeitsunterschiede feststellen können (reines Schwarz-Weiß-Sehen, dafür mit sehr hoher Lichtempfindlichkeit) und
 - die Zapfen, von denen wir drei verschiedene Typen besitzen und mit denen wir Farben differenzieren können („erkauft“ mit einer geringeren Lichtempfindlichkeit: „bei Nacht sind alle Katzen grau“).
- Die drei Zapfentypen unterscheiden sich durch den jeweiligen Wellenlängenbereich, für den sie empfindlich sind (Grafik „spektrale Empfindlichkeit der Zapfen“). (Vergleich: Drei Sensoren in der hinteren Stoßstange für Mitte, Links und Rechts)



3.2. Die drei Zapfen und ihre Empfindlichkeitsbereiche

Aus der Grafik kann man folgende wesentliche Punkte entnehmen:

- Jeder Zapfentyp deckt einen relativ großen Bereich des Spektrums ab. (Die Rückfahrsektoren erfassen auch jeweils einen fächerförmigen Bereich hinter dem Auto.)
- Die Erfassungsbereiche der drei Typen überlappen sich sehr stark. (Der Mitte-Sensor erfasst auch noch Bereiche, die die Links- und Rechts-Sensoren erfassen.)
- Die Empfindlichkeiten sind innerhalb des jeweiligen „Erfassungsbereiches“ unterschiedlich: Von einem mittleren Bereich höchster Empfindlichkeit werden sie zu den beiden Seiten hin unempfindlicher. (Der Farbverlauf in der Grafik soll dies andeuten; im Vergleich: der Mitte-Sensor reagiert auf Objekte genau in der Mitte mit dem lautesten Piepsen, nach Links oder Rechts wird es leiser.)

- Die Bezeichnungen „Rot“- , „Grün“- und „Blau“-Rezeptor entsprechen nicht den Bereichen ihrer jeweils höchsten Empfindlichkeit:

Der „Rot“rezeptor ist im „Gelb“-Bereich am empfindlichsten, er ist aber der einzige, der den langwelligen „Rot“-Bereich erfassen kann;

der „Grün“rezeptor erfasst neben Grün und Blaugrün auch Gelb und Orange;

der „Blau“rezeptor ist, ähnlich dem „Rot“rezeptor, allein für das kurzwellige Blauende zuständig, greift aber auch noch in den Grünbereich hinein.

Manche Autoren bevorzugen daher die Bezeichnungen „Lang-, Mittel- und Kurzwellen“-Rezeptoren; die alten Bezeichnungen entstammen der Zeit, in der man zwar schon die Dreikomponententheorie entwickelt hatte, aber noch keine genauen Empfindlichkeitsmessungen durchführen konnte, ein Beispiel für „historisch gewachsene“ Fachbegriffe und ihrer „Hartnäckigkeit“ (so wie sich die Kalorie immer noch gegen das Joule behaupten kann, der Mensch ist eben ein Gewohnheitstier!).

4. Das Gehirn deutet Signale

4.1. Drei Signale werden kombiniert

An Hand der Grafik können wir jetzt den „Trick“ erkennen, wie mit nur drei verschiedenen Sehzelltypen die erwähnten 100 Farbnuancen differenziert werden können:

Grundprinzipien:

- Jeder Zapfentyp liefert bei Belichtung ein Signal, wenn das Licht in seinen Erfassungsbereich fällt. (Die drei Sensoren liefern drei verschiedene Piepstöne, z.B. Links tiefer Ton, Mitte höherer und Rechts ganz hoher Ton)
- Die Signalstärke ist abhängig von seiner Empfindlichkeit: Bei 570nm „piepst“ der Rotrezeptor sehr laut, nach längeren und kürzeren Wellenlängen wird sein Piepsen immer leiser.
- Beachten Sie aber bitte: Der Rotrezeptor kann nur in einer „Tonlage piepsen“! Auch wenn er von gelbem Licht getroffen wird, „piepst“ er mit dem gleichen „Ton“ wie bei Rot- oder Orange-Licht.

4.2. Signale werden zu Wahrnehmungen: Piepstöne werden zu Akkorden gemischt

Jedem Bereich des Spektrums (man kann auch sagen: jedem Wellenlängenbereich) entspricht ein bestimmtes Empfindlichkeitsverhältnis der drei Zapfentypen. Das Gehirn „hört“ in unserem Vergleich immer nur Piepstöne „Hoch“, „Mittel“, „Tief“, unterschiedlich sind nur die Lautstärken der Töne. In Wirklichkeit sind die von den Sehzellen stammenden „Piepstöne“ alle gleich, das Gehirn erkennt ihre Unterschiedlichkeit an den Leitungen, über die sie zum Gehirn gemeldet werden. Jeder Vergleich hat eben seine Grenzen, ab denen er zu „hinken“ beginnt! Je nach Lautstärkenverhältnis der drei Töne erzeugt es dann die vielen verschiedenen Nuancen unserer Farbwahrnehmung. Im Vergleich: Der Fahrer kann am gleitenden Übergang der Tonmischungen verfolgen, wo genau der Pfosten steht: Je weiter er sich z.B. von Links gegen die Mitte hin befindet, umso leiser wird der tiefe Ton („Links“) und umso lauter wird der mittlere Ton („Mitte“).

4.3. Beispiele

Wir wollen dies an ein paar Fällen durchspielen:

- Orange-Töne: Sie werden durch gleichzeitige „Rot“ und „Grün“-Signale dargestellt, wobei zunehmend lautes „Piepsen“ des „Grün“-Rezeptors eine Verschiebung nach „Gelb“ bewirkt.
- Grün-Töne: Von Seiten der Rot- und Grün-Rezeptoren liegen ähnliche Verhältnisse wie bei den Orange-Tönen vor, da aber auch noch der Blau-Rezeptor mit in den „Akkord“ einspringt, empfinden wir „Grün“. Da in diesem Bereich drei Erregungen vorhanden sind, können wir besonders feine Unterschiede differenzieren. Sie wissen sicher, wie leicht ein Gelb einen Grünstich oder ein Grün einen Blaustich haben kann.
- Blaugrün-Töne: Wie bei Orange wird der Grün-Rezeptor erregt, diesmal aber ist sein Pieps-Partner der Blau-Rezeptor.
- Gelb (spektralrein): Wie schon bei den Orange-Tönen werden sowohl der Grün- als auch der Rot-Rezeptor erregt, mit einem besonders lauten „Piepsen“ vom Rot-Rezeptor.
- Gelb durch Mischung von Rot- und Grün-Licht: Das Rotlicht erregt nur den Rot-Rezeptor, das Grün-Licht den Grün-Rezeptor (und etwas den Rot-Rezeptor). Zusammen ergibt das die gleiche Erregungsmischung wie bei spektralreinem Gelb und damit die gleiche Wahrnehmung. (Das Gehirn hört wieder „Rot“- und „Grün“-Piepstöne.)

Fachbegriff-Erklärungen

Rezeptor

- a. In der Sinnesphysiologie: Sinneszelle
- b. Moleküle, meist an Membranoberflächen, an denen andere Moleküle ankoppeln können.
(z.B.: R. für Transmitter in der Synapse)

Wellenlänge

Räumliche Ausdehnung einer Periode eines Wechselvorganges, umgekehrt proportional zur Energie (langwelliges Infrarot-Licht ist energieärmer als kurzwelliges UV-Licht).

z.B: W. des für den Menschen sichtbaren Lichtes: 400 nm - 700 nm