

Schwarz: Ab- oder Anwesenheit von Licht

im Rahmen des Seminars

Farben sehen, modellieren und wiedergeben

Erik Pischel

Wintersemester 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Schwarz und die Farbtheorien	5
2.1	Dreifarbentheorie von Helmholtz	5
2.1.1	Allgemeine Theorie	5
2.1.2	Schwarz in der Dreifarben­theorie	5
2.1.3	Kritik an der Dreifarben­theorie	5
2.1.4	Erklärung des sukzessiven Kontrastes: Trägheitsthe­se	5
2.1.5	Erklärung des simultanen Kontrastes: Urteilsthe­se	6
2.2	Gegenfarbentheorie von Hering	6
2.2.1	Theorie	6
2.2.2	Belege	7
2.3	Theorie von Hurvich und Jameson	8
3	Empirische Befunde	9
3.1	Frühe Experimente	9
3.2	Aktuelle Experimente	9
3.2.1	Farbnennungsexperimente	9
3.2.2	Experimente zu spektralen Empfindlichkeit	10
3.3	Modell von Shinomori	10
4	Physiologische Mechanismen	12
5	Zusammenfassung	14
	Literaturverzeichnis	15

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gegenfarben-Prozess-Modell nach HURVICH und JAMESON	8
3.1	Modell von SHINOMORI	11
4.1	Zäpfchen-Empfindlichkeit	13

1 Einleitung

Die Wahrnehmung von Farben im allgemeinen und damit auch von Schwarz gehört zu unseren täglichen Erfahrungen und ist für uns selbstverständlich. Daher erstaunt es mich, dass es bis heute bei weitem nicht gelungen ist, genau herauszufinden, wie die Wahrnehmung von Schwarz dem menschlichen visuellen System gelingt.

Im folgenden werde ich zunächst Farbtheorien und ihre Sichtweise im Fall „Schwarz“ vorstellen, dann einen Überblick über experimentelle Befunde zu geben und abschliessend diese kurz den bis heute erforschten physiologischen Mechanismen gegenüberstellen.

Der größte Teil dieses Textes stützt sich auf die Darstellungen in [4].

2 Schwarz und die Farbtheorien

2.1 Dreifarbentheorie von Helmholtz

2.1.1 Allgemeine Theorie

HERMANN LUDWIG FERDINAND VON HELMHOLTZ (1821–1894) nahm Ideen von YOUNG und MAXWELL auf und postulierte seine berühmte Drei-Farben-Theorie. Sie geht davon aus, dass es drei verschiebene Typen von Rezeptoren in unserem visuell-sensorischen System gibt. Sie reagieren verschieden sensibel auf das Licht mit Wellenlängen zwischen 400nm und 700nm. Ein Lichtstimulus regt diese Rezeptoren in verschiedener Intensität an. Die wahrgenommene Farbe entspricht direkt dem Verhältnis der Reizstärken der drei Rezeptortypen. Insbesondere wird die Farbe Weiss wahrgenommen, wenn alle drei Rezeptortypen gleich angeregt werden. Schwarz entsteht nach dieser Theorie, wenn keine der drei Rezeptortypen stimuliert werden.

2.1.2 Schwarz in der Dreifarbentheorie

Für HELMHOLTZ war Schwarz die Wahrnehmung der Abwesenheit von Licht. Dies sei jedoch zu unterscheiden von der Abwesenheit aller Empfindung: wir nehmen eine schwarzen Körper vor uns war, jedoch erscheint uns ein Körper hinter uns, von dem kein Licht zu uns gelangt, nicht schwarz, sondern wir nehmen ihn nicht war.

Vor ihm vertraten ARISTOTELES und GOETHE diese Ansicht.

2.1.3 Kritik an der Dreifarbentheorie

Die Theorie erklärt sehr gut die (additive) Farbmischung. Es ist jedoch fraglich, warum die Wahrnehmung von Weiss bzw. Grau als gleichzeitige Empfindung von Rot, Grün und Blau statt einer getrennten Empfindung anzunehmen ist. Desweiteren sehen Personen mit fehlenden Grün-Stäbchen sehen „Weiss“ wie normal-sichtige Personen auch.

2.1.4 Erklärung des sukzessiven Kontrastes: Trägheitsthese

HELMHOLTZ erklärte den sukzessiven Kontrast wie folgt: Wenn Rezeptoren zulange stimuliert werden, so „ermüden“ sie und können danach auf einen Stimulus nicht mehr reagieren. Beispiel: Stimulus ist ein weisses Objekt. Wird es weggenommen, reagieren die „ermüdeten“ Rezeptoren nicht mehr auf das einfallende Licht, Schwarz wird wahrgenommen.

2.1.5 Erklärung des simultanen Kontrastes: Urteilsthese

Für den simultanen Kontrast bietet HELMHOLTZ folgende These: Personen korrigieren unbewusst den Farbeindruck mit Erfahrungswerten und gleichen so Beleuchtungseinflüsse aus. Die bewusst wahrgenommene Farbeindruck besteht dann aus der Farbempfindung und dem unbewussten, korrigierenden Urteil. Je „erfahrener“ eine Person ist, desto weniger ist ihre Farbwahrnehmung vom Kontrast beeinflusst. Dem widersprechen jedoch Experimente wie der GELB-Effekt.

2.2 Gegenfarbentheorie von Hering

2.2.1 Theorie

Allgemeine Theorie

Geleitet von der Erfahrung, dass sich im Farbkreis keine Mischungen herstellen lassen, die sich als gelb-blau oder rot-grün bezeichnen lassen¹, kann man vom gegenseitigen Ausschluss von Gelb und Blau bzw, Rot und Grün sprechen. KARL EWALD KONSTANTIN HERING (1834–1918) postulierte, dass dies auf einem neurophysiologischen, chemischen Prozess basiert. Er nahm an, dass zwei Gegenfarben-Prozesse existieren, mit je einem hemmenden und einem erregenden Anteil, die nach einem Gleichgewicht streben. Dies erklärt die Nachbilder in Gegenfarben.

Ein dritter antagonistischer Prozess ist nach HERING der Schwarz-Weiss-Prozess, der für die Wahrnehmung des achromatischen Anteils einer Farbe zuständig ist. Bei diesem Prozess schliessen sich die beiden Anteile jedoch nicht gegenseitig aus - Schwarz kann über grau zu Weiss übergehen.

Schwarz in der Gegenfarbentheorie

Für HERING kommt die Wahrnehmung von Schwarz erst durch einen äusseren Lichtreiz zustande. Schwarz ist für ihn eine Produkt von indirekter Lichteinwirkung von räumlichen (simultanen) oder zeitlichen (sukzessiven) Kontrast. Ein Objekt könne eine Menge Licht reflektieren und als rot, grün, gelb . . . wahrgenommen werden, aber wenn es von einem Objekt umgeben wird, das eine grössere Lichtintensität ausstrahlt, so wird es als Schwarz wahrgenommen. Der Kontrast der beiden Stimuli bestimmt, ob das eine Objekt Schwarz erscheint.

Kritik an der Gegenfarbentheorie

Die Theorie erklärt gut Effekte der achromatische Wahrnehmung. Es ist jedoch nicht klar, warum der Schwarz-Weiss-Prozess im Gegensatz zum Rot-Grün- und Blau-Gelb-Prozess nicht antagonistisch ist.

¹dies gelingt in keiner uns bekannten Kultur!

Erklärung des sukzessiven Kontrastes

Die Wahrnehmung eines als Weiss angesehenen Stimulus erzeuge eine hemmende Wirkung im Schwarz-Weiss-Prozess, erklärte Hering. Durch den Versuch des Ausgleichs würde nach Ausschaltung des Stimulus der erregende Anteil im Prozess dominieren und ein schwarzes Nachbild entstehen.

Erklärung des simultanen Kontrastes

Der Stimulus regt nicht nur das Areal an, auf das es trifft, sondern nach HERINGS Vorstellungen werden die benachbarten Gebiete angeregt, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Damit kann zum Beispiel eine weisse Umgebung ein Feld im Zentrum als Schwarz erscheinen lassen.

2.2.2 Belege

Im folgenden stelle ich einige Experimente vor, die HERINGS Theorie von Schwarz als Kontrastphänomen stützen und der HELMHOLTZschen Theorie von Schwarz als Abwesenheit von Licht widersprechen.

Wenn man die Augen schliesst, ist das Wahrgenommene keineswegs „pures“ Schwarz, sondern vielmehr von einer gewissen Helligkeit. Diese Wahrnehmung nennt man „Eigengrau“. Sie steht in direktem Widerspruch zur HELMHOLTZschen Theorie, dass die Wahrnehmung von Abwesenheit von Licht den Eindruck „Schwarz“ entstehen lässt.

Gelb, ein Gestaltpsychologe, demonstrierte, wie der Eindruck „Schwarz“ durch simultanen Kontrast induziert werden kann:

Ein verstecktes Licht beleuchtet nur eine schwarze Scheibe, die vor einer weniger stark beleuchteten schwarzen Wand hängt. Der Beobachter sieht die Scheibe weiss. Wird jedoch ein Stück weisses Papier vor die Scheibe gehängt und ebenfalls beleuchtet, so sieht der Beobachter die Scheibe schwarz. Bei erneuter Wegnahme des weissen Papiers erscheint die Scheibe wieder weiss, das heisst, dass Wissen die Wahrnehmung nicht unbedingt beeinflusst. ([3])

Folgendes Experiment demonstriert die Beziehung zwischen Schwarz und simultanen Kontrast: Von einem Dia von VAN EYCK's „Arnolfini-Hochzeit“ werden die chromatischen und achromatischen Komponenten getrennt: ein neues Dia mit dem chromatischen und ein Druck mit den achromatischen Komponenten entstehen. Wenn das neue Dia auf den Druck projiziert wird, so wird das originale Bild reproduziert. Wird das neue Dia jedoch auf eine schwarze Fläche projiziert, so werden die schwarzen Anteile des Bildes nicht reproduziert! Der Helligkeitskontrast, der im achromatischen Druck abgebildet wurde, ist nötig, um Schwarz zu reproduzieren!

Ein letztes Experiment sei hier angeführt, das auf den Zusammenhang von Schwarz und simultanem Kontrast hinweist:

Zwei weisse Flächen werden im Rechten Winkel in einem Raum aufgehängt, der Hintergrund ist schwarz. Eine der Flächen wird 30x stärker beleuchtet als die andere. Anhand verschiedener Grautonkarten müssen zwei Versuchsgruppen die Farben

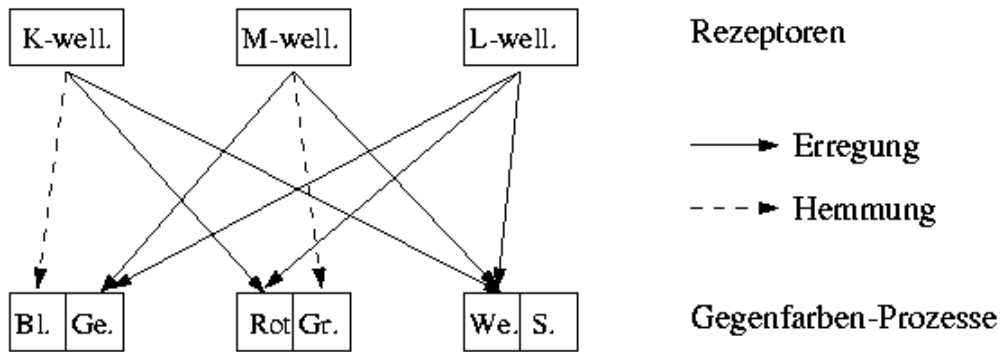


Abbildung 2.1: Abbildung der Rezeptoren auf die Gegenfarben-Prozesse nach HURVICH und JAMESON (nach [4])

der Flächen einordnen, wobei eine Gruppe durch eine Blende mit einem kleinen Loch schauen muss, die räumliches Sehen verhindert.

Während die normalsehende Gruppe beide Flächen als weiss erkennt, sieht die Blendengruppe die weniger stark beleuchtete Fläche als schwarz an und die hell beleuchtete als weiss.

Durch die fehlenden weiteren Grenzlinien bzw. durch die fehlende räumliche Zuordnung war es den Beobachtern mit Blende also nicht möglich, das Reflexionsvermögen der Fläche zu erkennen. ([3])

2.3 Theorie von Hurvich und Jameson

HURVICH und JAMESON vereinigten 1957 in ihrer Theorie die Ideen von HELMHOLTZ und HERING. Sie gehen wie HELMHOLTZ von drei Rezeptor-Typen aus, deren neuronale Signale zu HERINGS antagonistischen Prozessen kombiniert werden (siehe Abbildung 2.1). Z.B. interagieren die Signale der L- und S-Rezeptoren antagonistisch mit dem der M-Rezeptoren und dies ergibt den Rot/Grün Kanal.

Weiss wird in diesem Model wie bei HELMHOLTZ durch die Summe der Signale aller drei Rezeptor-Typen hervorgerufen. Schwarz wird wahrgenommen, wenn Rezeptoren aller drei Typen in räumlicher oder zeitlicher Nähe Hemmung signalisieren. So entsteht der Schwarz/Weiss-Kanal.

Diese Theorie kombiniert elegant die beiden vorherrschenden widerstreitenden Theorien. Für den chromatischen Teil der Theorien wurden Experimente durchgeführt, deren Ergebnisse mit der Theorie in Einklang gebracht werden konnten.

3 Empirische Befunde

3.1 Frühe Experimente

Bis in die siebziger Jahre fanden viele Experimente zur Helligkeit bzw. Dunkelheit bei simultanen Kontrast statt, jedoch untersuchte keines die Induktion von Schwarz direkt.

Prinzipiell wurde bei diesen Experimenten ein breitbandiges („weisses“) Testfeld von einem breitbandigen Induktionsfeld umgeben. Als Ergebnis dieser Experimente kann zusammengefasst werden: je grösser Intensität des Induktionsfeld, desto dunkler erscheint das Testfeld, bis ein Punkt erreicht wird, an dem das Testfeld schwarz wird.

Es gab auch Erweiterungen um farbige Test- bzw. Induktionsfelde. EVANS (1967) misst die Schwelle für Grau, MINT und THOMAS (1968) die Schwelle für „gerade erkennbar dunkler werden“. Ergebnis dieser beide Experimente: Die Helligkeit des Induktionsfeldes ist alleiniger Faktor für jeweilige Grenze, es liegt kein spektraler Einfluss vor.

3.2 Aktuelle Experimente

Experimente zur expliziten Induktion von Schwarz wurden seit den achtziger Jahren durchgeführt. Sie lassen sich in zwei Kategorien einordnen:

1. „Farbnennungsexperimente“ untersuchen Farberscheinung unter der Bedingung von simultanen bzw. sukzessiven Kontrast.
2. „Experimente zur spektralen Empfindlichkeit“ messen Funktionen der spektralen Empfindlichkeit unter der Bedingung von simultanen bzw. sukzessiven Kontrast.

3.2.1 Farbnennungsexperimente

Zum einen wurde bei diesen Experimenten festgestellt, dass die Komponenten schwarz und weiss elementar sind, dies jedoch nicht die Komponente grau zutrifft. Zur Beschreibung wurde selten gleichzeitig eine weisse und eine schwarze Komponente benötigt, was auf den antagonistischen Charakter des schwarz/weiss-Prozesses hinweist. In diesen beiden Punkt wird HERING's Sichtweise also gestützt.

Desweiteren beobachtete man, dass beim räumlichen Kontrast die Erhöhung der Intensität des Induktionsfeldes zur Verminderung des Weiss-Anteils führt, der benötigt wird, um das Testfeld zu beschreiben. VOLBRECHT et al. zeigten ausserdem, dass die Beleuchtungsstärke und nicht der Farbton des induzierenden Feldes die Schwelle von 100% Schwarz bestimmt.

3.2.2 Experimente zu spektralen Empfindlichkeit

Studien, bei denen die spektrale Empfindlichkeit gemessen wird, unterstützen in Bezug auf induziertes Schwarz (mittels räumlichen bzw. zeitlichen Kontrast) die Theorie von JAMESON und HURVICH. Die Daten lassen den Schluss zu, dass Schwarz durch additive Kombination der Zäpfchen wahrgenommen wird.

In einer Untersuchung von FULD et al. wird jedoch ein gegenteiliges Ergebnis erzielt: Die Wahrnehmung von Schwarz weist nicht-additive chromatische Einflüsse auf.

Diese Unterschiede kann SHINOMORI durch die unterschiedliche Versuchsanordnung erklären: während die erst genannten Studien mit einem „weissen“ Testfeld und einem monochromatischen Induktionsfeld arbeiten, wies das Experiment von FULD et al. die entgegengesetzte Konstellation auf.

Dieser Unterschied in der Versuchsanordnung stellte sich als entscheidend für die unterschiedlichen Ergebnisse heraus. SHINOMORI untersuchte die spektrale Empfindlichkeit mittels Induktion von Schwarz unter beiden Versuchsanordnungen. Es bestätigte sich, dass im Falle eines „weissen“ Zentrums und monochromatischer Umgebung die ermittelte Funktion nicht von chromatischen Einflüssen abhängt und wahrscheinlich durch die additiven Reizeingänge der L- und M-Zäpfchen zustande kommt. Um umgekehrten Fall ist ein chromatischer Einfluss erkennbar.

3.3 Modell von Shinomori

Die Abbildung 3.1 zeigt ein Modell von SHINOMORI, das auf Daten seines beschriebenen Versuches von 1997 basiert. Es ist der Abbildung zu entnehmen. Die Darstellung hier zielt nicht so sehr auf das Detail sondern vielmehr auf die Komplexität. Es ist zu beachten, dass dieses Modell nur für die Wahrnehmung von Schwarz unter der Bedingung von räumlichen Kontrast erstellt wurde.

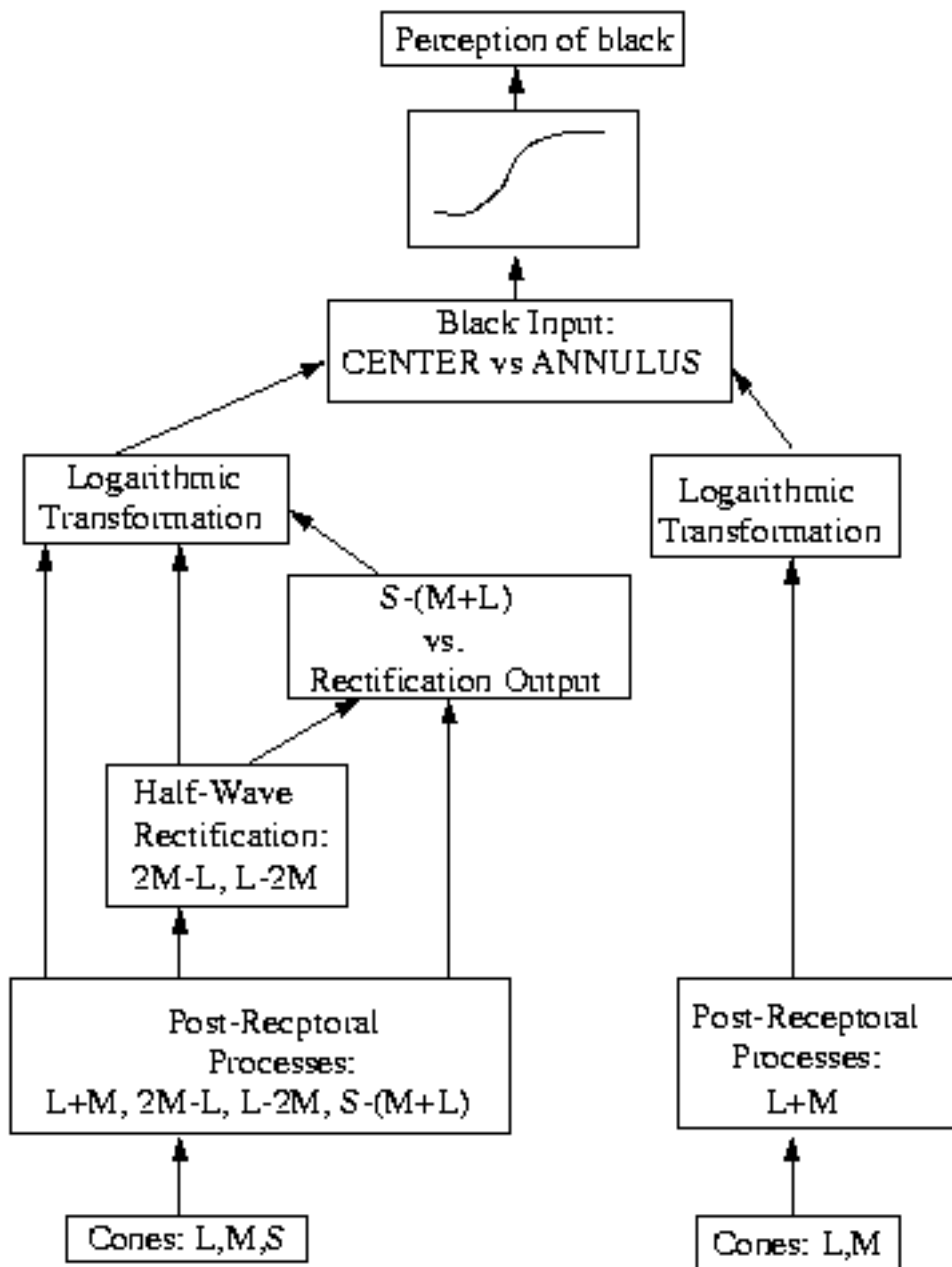


Abbildung 3.1: Das Modell von SHINOMORI beschreibt die Wahrnehmung von Schwarz unter dem Einfluss von simultanem Kontrast (nach [4])

4 Physiologische Mechanismen

HELMHOLTZ drei Farbrezeptoren wurden in den Zäpfchen gefunden. Allerdings ist er nicht davon ausgegangen, dass die Empfindlichkeit der mittel- und langwellig sensiblen Rezeptoren so eng beieinander liegen (siehe Abbildung 4.1). Neural Mechanismen im visuellen Pfad zum Gehirn zeigen jedoch keine Reaktionsfunktionen wie die der Zäpfchen auf.

HERING ging von antagonistischen neurologischen Prozessen aus, wobei nicht ganz klar ist, wo er diese Prozesse ansiedelt. Es wurden jedoch räumlich antagonistische Mechanismen sowohl achromatischer als auch chromatischer Natur entdeckt.

Besonders interessant für achromatische Prozesse sind sog. Breitbandzellen. Von diesen gibt es zwei Kategorien:

- on-center/off-surround – reagieren auf Erhellung; können als „weiss+/schwarz-“-Zellen bezeichnet werden; „weisser Punkt auf schwarzem Hintergrund“ ergibt optimale Aktivität
- off-center/on-surround – reagieren auf Verdunkelung; können als „schwarz-/weiss+“-Zellen bezeichnet werden; „schwarzer Punkt auf weissen Hintergrund“ ergibt optimale Aktivität

Können diese zwei Zell-Typen alle achromatischen Erscheinungen erklären?

Es gibt noch viele weitere Fragen, z.B.

- Wie kann man mit den Breitbandzellen das SHINOMORI-Modell erklären, welches komplexer ist?
- Vielleicht sollten wir statt in s/w-Prozessen lieber in on-channels und off-channels denken, die auf Erhellung und Verdunkelung reagieren?

Physiologische Studien haben das Schwarz noch nicht direkt untersucht. Vielleicht sollte man erst derartige Untersuchungen abwarten, bevor man voreilig Schlüsse zieht.

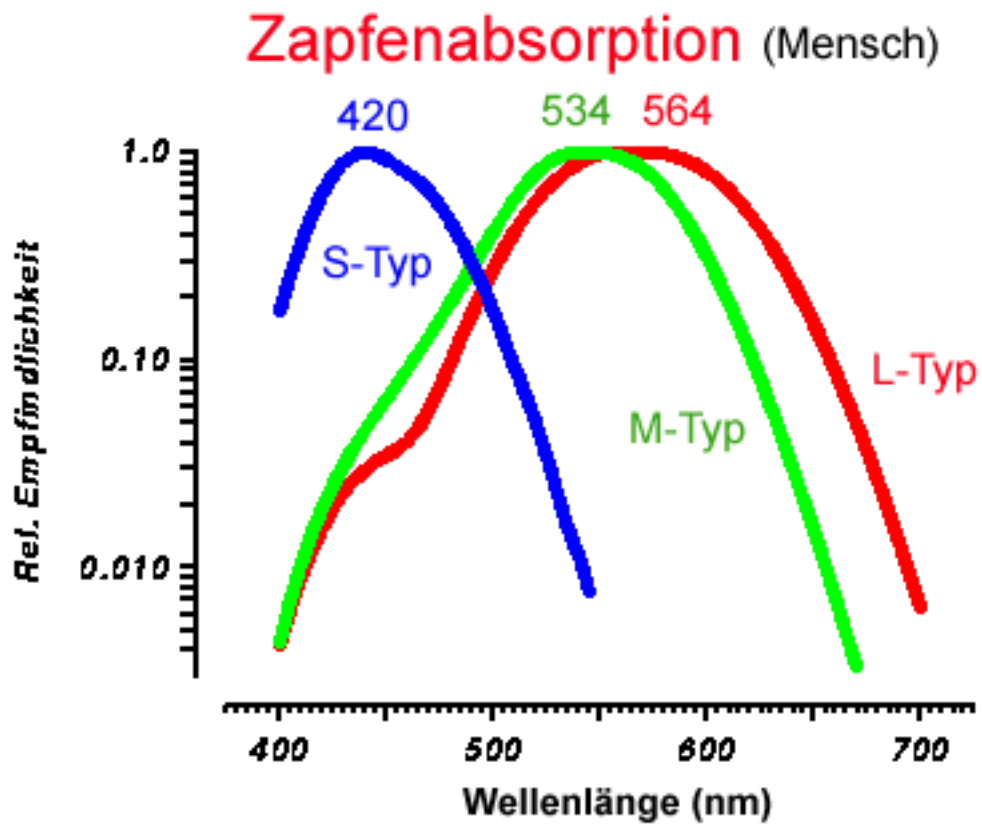


Abbildung 4.1: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen

5 Zusammenfassung

Die Theorien von HELMHOLTZ und HERING haben die Farbforschung seit ihrer Entstehung beeinflusst. Doch selbst 120 Jahre danach wissen wir bei weitem noch nicht alles.

Die Frage „Schwarz – Ab- oder Anwesenheit von Licht?“ kann man zugunsten HERINGs beantworten. Auch wenn der genaue Mechanismus der Wahrnehmung von Schwarz noch nicht erforscht ist, so hat sich doch gezeigt, dass eine lokale Intensitätsdifferenz das Phänomen „Schwarz“ hervorruft. Schwarz ist nicht die Abwesenheit jeder Lichtenergie, wie Helmholtz vermutete, sondern das Resultat des Kontrastes, einer Lichtenergiedifferenz, wie es bereits HERING vor 120 Jahren annahm.

Literaturverzeichnis

- [1] GEGENFURTNER, KARL R.: *Farbsehen beim Menschen*. <http://www.mpik-tueb.mpg.de/bu/people/karl/html/heidelberg/heidelberg.html>.
- [2] MICROSOFT (Herausgeber): *Encarta Enzyklopädie*. Microsoft, 1999.
- [3] REITMAYER, ELLEN: *Helligkeit und Kontrast*. <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/seminararbeiten/s98/Helligkeit/Helligkeit.html>, 1998.
- [4] VOLBRECHT, VICKI J. und REINHOLD KLIEGL: *The Perception of Blackness: An Historical and Contemporary Review*. In: BACKHAUS, WERNER G. K., REINHOLD KLIEGL und JOHN S. WERNER (Herausgeber): *Color Vision*, Kapitel 10, Seiten 187 – 206. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1998.