

Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme
Interaktive und Multimediale Systeme
Technische Universität Wien

Projektpraktikum (mit Bakkalaureatsarbeit)
SS 2004

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

Thema Nr. 17

Wien, 03.06.2004

Marie-Theres Tschurlovits 0125975

mth.web@gmx.net

Inhalt

1.	Zusammenfassung	4
1.1	Links auf andere Lerneinheiten	4
2.	Level of Detail 2	5
2.1	Sehen und Wahrnehmung	5
2.1.1	Aufbau des visuellen Systems	5
2.1.2	Eigenschaften von Stäbchen und Zapfen	6
2.1.3	Spektrale Hellempfindlichkeit	7
2.1.4	Reizverarbeitung durch Neuronen	9
2.1.5	Weiterverarbeitung im Gehirn	9
2.2	Helligkeits-, Frequenzgangs- und Richtungsempfindlichkeit.....	9
2.2.1	Helligkeitsempfindlichkeit	9
2.2.2	Richtungsempfindlichkeit.....	10
2.2.3	Psychophysische Erklärung der Richtungsempfindlichkeit.....	12
2.2.4	Frequenzgangsempfindlichkeit.....	14
2.2.5	Psychophysik von Ortsfrequenzkanälen	16
2.3	Farbwahrnehmung	18
2.3.1	Wichtige Begriffe	18
2.3.2	Physikalische Eigenschaften des Lichts.....	19
2.3.3	Farb- und Helligkeitskonstanz	19
2.3.4	Dreifarbentheorie von Young-Helmholtz	19
2.3.5	Tristimulus Theorie von Maxwell	20
2.3.6	Wie viele Farben kann der Mensch unterscheiden?	20
2.3.7	24-bit für fotorealistische Bilddarstellung.....	21
2.3.8	Auflösung von Farb- und Grauwerten	22
2.3.9	YUV (YIQ) Farbmodell.....	22
2.3.10	Wichtige Begriffe zur Unterabtastung	22
2.3.11	Unterabtastung der Farbwerte (Chroma-Subsampling).....	23
3.	Level of Detail 3	25
3.1	Vergleich der Auflösung von Farb- bzw. Helligkeitswerten	25
3.1.1	Vorschlag interaktive Anwendung	25
3.1.2	Weiterführende Literatur und Links	25
4.	Literatur	26
4.1	Eigene Literatur	26

1. Zusammenfassung

Die Aufgabe der Bildcodierung ist die Reduktion der zu übertragenden Datenmenge. Eine Entwicklungstendenz ist das Erzielen immer höherer Reduktionsfaktoren unter Ausnutzung von Inhaltsmerkmalen der Bilder. Weiters können bei der Kompression gewisse Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung ausgenutzt werden, indem man gewisse Details, die die menschliche Wahrnehmung sowiese nicht verarbeiten könnte erst gar nicht codiert. So lassen sich komprimiertere Darstellungen erzeugen ohne auf ein anspruchsvolles Ergebnis verzichten zu müssen.

Dieses Kapitel behandelt die Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung bezüglich des Sehsinns (Gesichtsinns), die Empfindlichkeit des Auges hinsichtlich Helligkeit, Kontrast und Farbe und deren Auswirkungen auf die Bildcodierung, u.a. durch die Technik der Unterabtastung (Subsampling).

1.1 Links auf andere Lerneinheiten

2. Level of Detail 2

Wie man die Umwelt wahrnimmt hängt sowohl von den Eigenschaften der Umwelt selbst, aber auch von den Eigenschaften des visuellen Systems des Menschen ab. Beim Sehen wird der betrachtete Ausschnitt der Umgebung auf die Netzhaut (Retina) abgebildet. Die eintreffenden Reize werden in neuronale Signale umgewandelt, und im visuellen System in Verbindung mit sensumotorischen Informationen und den Informationen der anderen Sinnesorgane und des Gedächtnisses verarbeitet. Dieser komplexe Verarbeitungsprozess stellt die Grundlage der Wahrnehmung dar.

2.1 Sehen und Wahrnehmung

2.1.1 Aufbau des visuellen Systems

Zu Beginn des Sehvorgangs wird sichtbares (meist reflektiertes) Licht vom Auge aufgenommen. Das Licht wird von der Hornhaut und der Linse fokussiert und erzeugt in weiterer Folge eine Abbildung auf der Netzhaut (Retina). Die Netzhaut selbst ist eine dünne aus Neuronen bestehende Schicht, die den hinteren Teil des Augapfels auskleidet (Abbildung 1).

Definition: Ein *Neuron* ist ein elementarer Baustein des Nervensystems, der Reize aufnimmt, verarbeitet und weiterleitet. [E01, S. 706]

Zu den Neuronen zählen auch Stäbchen und Zapfen. Diese sind Photorezeptoren, die auf einfallendes Licht mit elektrischen Signalen reagieren. Die so entstandenen elektrischen Signale werden durch das Neuronennetzwerk verarbeitet und gelangen grob gesehen über den Sehnerv zum Gehirn. [E01, S. 41 ff, S. 51 ff.]

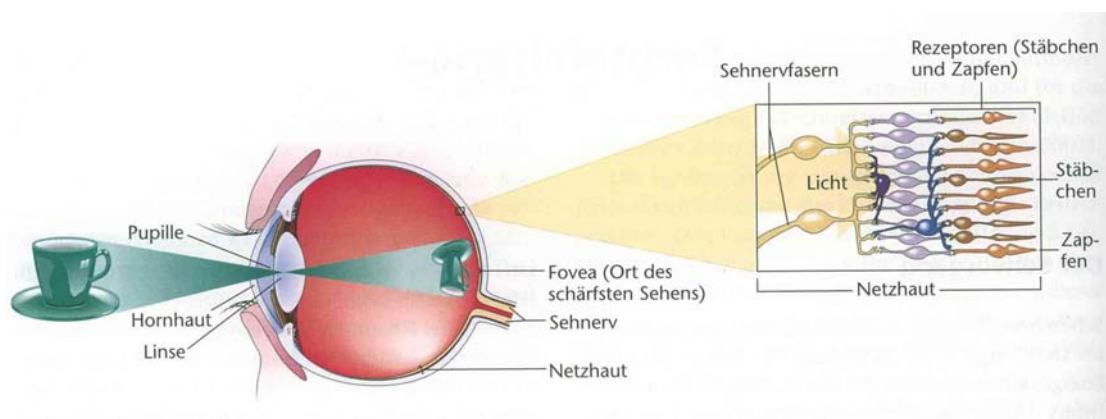


Abbildung 1: Der Aufbau des visuellen Systems [E01, S. 52]

Erklärung: Abbildung 1 zeigt den Aufbau des visuellen Systems des Menschen. Zu Beginn des Sehvorgangs wird sichtbares (meist reflektiertes) Licht vom Auge aufgenommen. Das Licht wird von der Hornhaut und der Linse fokussiert und erzeugt in weiterer Folge eine Abbildung auf der Netzhaut (Retina). Die in der Netzhaut angesiedelten Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) reagieren auf das einfallende Licht mit elektrischen Signalen, die durch ein Neuronennetzwerk verarbeitet und über den Sehnerv zum Gehirn weitergeleitet werden.

Das für den Menschen sichtbare Licht, deckt nur einen kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums ab. Sehen ist die Verarbeitung der im sichtbaren Licht enthaltenen Information. Das sichtbare Licht hat Wellenlängen im Bereich zwischen 400 und 700 nm. Dehnt man diesen Bereich des Spektrums, erhält man die Farben, die ein Mensch mit normaler Farbwahrnehmung sehen kann. (siehe Abbildung 2)

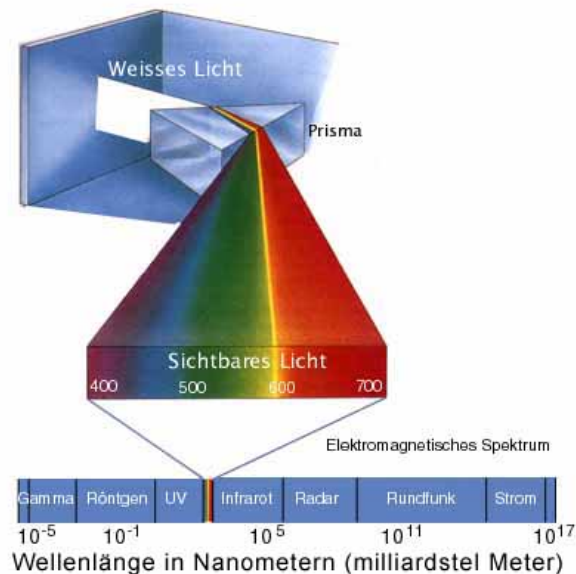


Abbildung 2: Das sichtbare Licht im elektromagnetischen Spektrum
[<http://www.regiosurf.net/supplement/wahrn/sehen/licht.jpg>]

Erklärung: Weißes (Sonnen) Licht, das durch ein Prisma fällt, spaltet sich in die so genannten Spektralfarben auf. Dieses sichtbare Licht deckt nur einen sehr kleinen Teil des gesamten elektromagnetischen Spektrums, im Bereich von ca. 400-700 nm, ab.

2.1.2 Eigenschaften von Stäbchen und Zapfen

Zapfen und Stäbchen unterscheiden sich durch ihre unterschiedliche Form und ihre Verteilung auf der Netzhaut. Weiters unterscheiden sich die beiden Rezeptorenarten auch durch ihre Funktion. Diese unterschiedlichen Eigenschaften beeinflussen unsere Wahrnehmung. Beide jedoch enthalten ein lichtempfindliches Sehpigment (Sehpurpur). Dieses reagiert auf Licht mit einer Formänderung, was in Folge zu einem bioelektrischen Signal führt. [E01, S. 53]

Je nach Beleuchtungsintensität kommt die eine oder andere Art von Rezeptoren zum Einsatz. Im hellen Tageslicht verwendet das visuelle System die **Zapfen** (photopisches Sehen). Das bedeutet, dass man Farben sehen und einzelne Details ausmachen kann. Ist die Beleuchtung jedoch eher schwach (z.B. in der Dämmerung) werden die **Stäbchen** eingesetzt (skotopisches Sehen). Dieser Typ von Rezeptoren kann im Gegensatz zu den Zapfen keine einzelnen Details auflösen und ist nicht auf das Farbsehen ausgerichtet. Deshalb ist man bei schwacher Ausleuchtung nicht in der Lage Farben zu unterscheiden und kann die Umgebung nur in Grautönen wahrnehmen. Auch lässt sich dadurch erklären, dass man nachts kaum in der Lage ist einzelne Details auszumachen, da die Stäbchen nicht auf die Auflösung von Details spezialisiert sind. [E01, S. 41 ff; E03, S. 170]

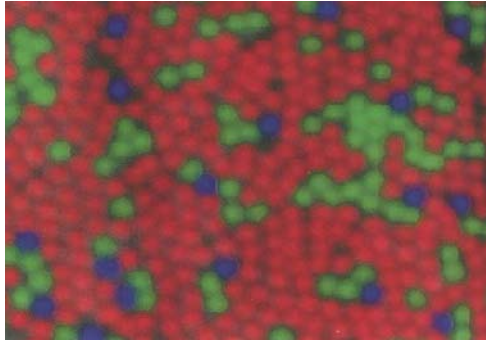


Abbildung 3: Anordnung der drei Zapfensorten im Bereich der Fovea [E01, S. 52]

Erklärung: Abbildung 3 zeigt die Anordnung der drei Sorten von Zapfen nahe der Fovea. Die Zapfen, die kurzwelliges Licht verarbeiten erscheinen blau, die für Licht mittlerer Wellenlänge grün. Für langwelliges Licht sind die in der Abbildung rot gefärbten Zapfen verantwortlich. Man sieht, dass im Bereich der Fovea hauptsächlich Zapfen für die Verarbeitung langwelligeren Lichts angesiedelt sind.

Die Netzhaut weist zwei markante Regionen auf:

- *Fovea (centralis):* Die Fovea ist die Stelle der Netzhaut mit der größten Sehschärfe und liegt annähernd im Zentrum der Retina. An dieser Stelle befinden sich ausschließlich Zapfen (Abbildung 4, links), die in einem näherungsweise hexagonalen Raster angeordnet sind.
- *Blinder Fleck:* An dieser Stelle verlässt der Sehnerv die Netzhaut. Lichtstrahlen, die auf den blinden Fleck fallen, können nicht wahrgenommen werden.

Während im Zentrum der Netzhaut ausschließlich Zapfen angeordnet sind nimmt zum Rand der Retina der Anteil an Stäbchen zu (Abbildung 4, rechts). An den äußersten Rändern sind nur noch Stäbchen angeordnet. Auf der gesamten Netzhaut befinden sich zwar an die 120 Millionen Stäbchen jedoch nur ca. 6 Millionen Zapfen. [E01, S. 49; E03, S. 170]

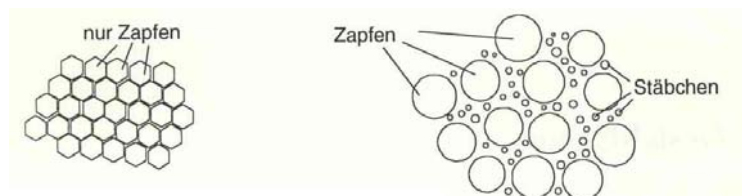


Abbildung 4: Anordnung der Rezeptoren [E03, S. 170]

Erklärung: Im Zentrum der Netzhaut befinden sich ausschließlich Zapfen (links). Je näher man sich dem Randbereich der Netzhaut nähert, desto größer wird der Anteil der Stäbchen (rechts).

2.1.3 Spektrale Hellempfindlichkeit

Definition: Lichtenergie breitet sich wellenförmig aus. Unter der *Wellenlänge* versteht man den Abstand zwischen den Amplituden der Lichtwellen.

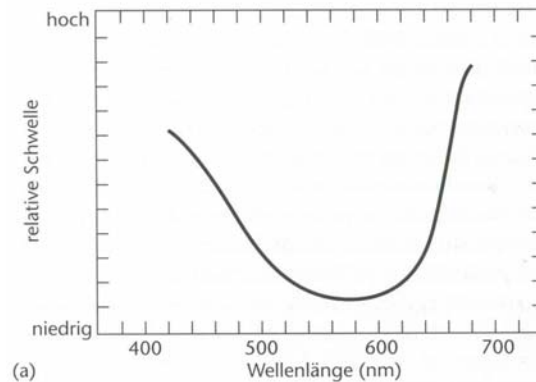


Abbildung 5: Schwellenwert für das Sehen eines Lichtpunktes [E01, S. 57]

Erklärung: Die Kurve in Abbildung 5 zeigt, dass die Schwelle in der Mitte des Spektrums am niedrigsten ist. Daraus folgt, dass zum Sehen von mittleren Wellenlängen eine geringere Lichtintensität benötigt wird als für die kurz- bzw. langwelligen Endbereiche. Nimmt man die Reziprokwerte der Schwellenwerte erhält man die Kurve der spektralen Hellempfindlichkeit.

Um eine Kurve für die spektrale Helligkeitsempfindlichkeit zu ermitteln, misst man die relative Schwelle für das Sehen von Licht unterschiedlicher Wellenlängen. Es lässt sich feststellen, dass zum Sehen von mittleren Wellenlängen eine geringere Lichtintensität benötigt wird als für die kurz- bzw. langwelligen Endbereiche. Nimmt man die Reziprokwerte der Schwellenwerte erhält man die Kurve der spektralen Hellempfindlichkeit. Ein Vergleich der spektralen Hellempfindlichkeit von Zapfen und Stäbchen findet sich in Abbildung 6. Man kann erkennen, dass Stäbchen für kurzwelliges Licht empfindlicher sind als Zapfen. Aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängen lässt sich erklären, dass man während der Dunkeladaption zunehmend mit den Stäbchen sieht. Das hat zur Folge, dass relative Empfindlichkeit für kurzwelliges Licht steigt, d.h. die Empfindlichkeit für Licht am blauen Ende des Spektrums. Diese unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitskurven von Zapfen und Stäbchen lassen sich durch die Absorptionsspektren der Sehpigmente erklären.

Definition: Ein *Absorptionsspektrum* ist die Darstellung der Lichtmenge, die ein Sehpigment absorbiert, aufgetragen gegen die Wellenlänge des Lichtes.

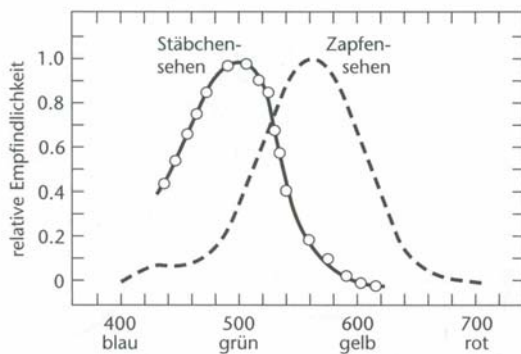


Abbildung 6: Spektrale Hellempfindlichkeitskurven für Stäbchen- und Zapfensehen [E01, S. 58]

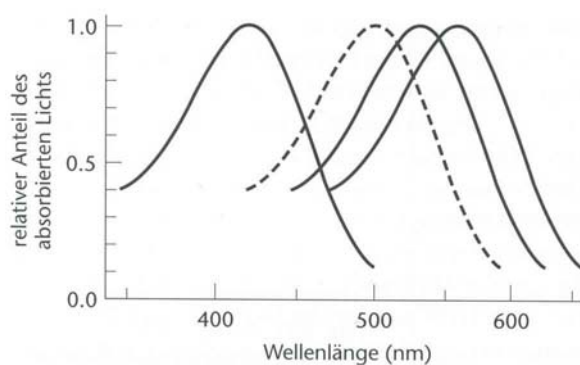


Abbildung 7: Absorptionsspektrum der drei menschlichen Zapfenpigmente [E01, S. 60]

Erklärung: Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der spektralen Hellempfindlichkeit von Zapfen und Stäbchen. Die höchste Empfindlichkeit liegt bei den Zapfen im Bereich von 560 nm, bei Stäbchen um die 500 nm.

Erklärung: In Abbildung 7 werden die Absorptionsspektren der drei verschiedenen Zapfenpigmente (für kurz-, mittel- und langwelliges Licht) dargestellt. Das kurzwellige Zapfenpigment absorbiert Licht am besten im Bereich um die 420 nm, das mittelwellige um die 530 nm und das langwellige um die 560 nm.

Bei Bestimmung der Absorptionsspektren der Zapfenpigmente ergab sich folgendes: es entstehen drei verschiedene Kurven, da es drei verschiedene Rezeptorenarten mit den entsprechenden Zapfenpigmenten gibt

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

(Abbildung 7). Mit Hilfe, der aus den Absorptionsspektren gewonnen Information kann man eine spektrale Hell-empfindlichkeitskurve für die Zapfen ermitteln, die ihren höchsten Punkt bei 560 nm erreicht (Abbildung 6).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Eigenschaften des Sehpigments der Stäbchen und Zapfen eine wichtige Rolle in der Gestaltung der menschlichen Wahrnehmung spielen. Weiters hängt die Wahrnehmung jedoch von den neuronalen Verbindungen des visuellen Systems ab, d.h. wie die elektrischen Signale von den Neuronen verarbeitet werden. [E01, S. 57 ff]

2.1.4 Reizverarbeitung durch Neuronen

Bei der Reizung des Sehpigments wird ein Generatorpotential aufgebaut welches in weiterer Folge in eine Impulsfolge umgesetzt wird. Diese Impulse werden zu den Nervenfasern weitergeleitet und -verarbeitet. Das entstandene Signal zeigt eine *logarithmische Abhängigkeit* von der einfallenden Lichtintensität (*Webersches Gesetz*).

Jeweils mehrere benachbarte Rezeptoren sind durch eine spezielle Form der Neuronen verbunden, den so genannten Horizontalzellen. Diese steuern den Hemmungs- und Erregungspegel zwischen benachbarten Rezeptoren, so dass nur beim Auftreten eines örtlichen Helligkeitsgradienten Information an die nachfolgende Neuronenschicht (Bipolarzellen) weitergeleitet wird. In den Amakrinen sind die Bipolarzellen ein weiteres Mal horizontalverknüpft, danach folgen die Ganglienzellen. Diese Ganglienzellen erfassen und analysieren annähernd kreisförmige rezeptive Felder. Die bis dahin verarbeiteten Informationen werden von nur noch 800 000 Nervenfasern an das Gehirn weitergeleitet. Das bedeutet, dass Rezeptoren zu Nervenfasern ungefähr im Verhältnis 150:1 stehen. Somit findet bereits in der Netzhaut eine Vorcodierung der visuellen Information mit einem hohen Kompressionsfaktor statt.

Neben der von den Horizontalzellen bewirkten Gradientenanalyse, werden in den nachfolgenden Neuronenschichten eventuell noch Voranalysen bezüglich Kantenrichtung, einfachen Mustern, Winkeln u.ä. vorgenommen. Hier könnte bereits eine Begründung für Mehrdeutigkeiten der Wahrnehmung und optische Täuschungen zu finden sein. [E03, S. 170 ff.]

2.1.5 Weiterverarbeitung im Gehirn

Der Sehnerv leitet die visuelle Information zum Sehzentrum im Cortex weiter. Über die Arbeitsweise des Cortex gibt es u.a. die so genannte Hyperkolumnentheorie. Diese Theorie besagt, dass Abschnitte des visuellen Cortex, die Hyperkolumnen für die Analyse des Netzhautinhalts verantwortlich sind. Jede Hyperkolumne enthält wiederum Detektoren zur Erkennung von Rändern, Schlitzen, Linien, etc.

Bestimmte Teile des visuellen Cortex sind für die Verarbeitung der getrennt vorliegenden Informationen von linkem und rechtem Auge verantwortlich. Eine andere Hirnregion ist für die visuelle Weiterverarbeitung zuständig, u.a. der Erkennung komplexer Formen und Objekte, stereoskopisches Sehen, etc. Dass vorrangig visuelle Reizdifferenzen bearbeitet werden erklärt, dass bewegte Objekte besser wahrgenommen werden als ruhende.

Um eine Szene schnell analysieren zu können ist eine massive Parallelbearbeitung der Informationen nötig. Außerdem können manche Bewegungen, die stärkere Reize als andere ausüben, kurzfristig andere Reize verdrängen. Die Interpretation von visueller Information ist aber auch eng mit dem Lernen verbunden. Manche optische Täuschungen (z.B. die unterschiedliche Einschätzung zwei gleich langer Geraden) lassen sich darauf zurückführen, dass sie dem gewohnten Perspektiveindruck widersprechen.

Das Gehirn koordiniert letztendlich sämtliche Informationen mit Augen-, Körper- und Kopfbewegungen. Ein Objekt wird auch dann als starr interpretiert, wenn sich der Betrachter bewegt und sich so das Abbild auf der Netzhaut eigentlich verändert. In so einem Fall führt das Gehirn eine Bewegungskompensation durch und unterdrückt ebenfalls Reize, die durch Vergrößerung- und Verkleinerung eines sich nähernden bzw. entfernenden Objekts hervorgerufen werden, sodass dieses Objekt immer als gleich groß interpretiert wird (Reafferenzprinzip). [E03, S. 171 ff.]

2.2 Helligkeits-, Frequenzgangs- und Richtungsempfindlichkeit

2.2.1 Helligkeitsempfindlichkeit

Die Amplitudenempfindung (Stärke des Reizes) des Sehsinns folgt dem Weber'schen Gesetz.

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

Weber'sches Gesetz: Wahrnehmbare Helligkeitsschwankungen ΔL bilden (in einem bestimmten Bereich) zur absoluten Helligkeit annähernd eine Konstante

$$\frac{\Delta L}{L} = \text{const.} \approx 0,02$$

Diese Eigenschaft wird z.B. durch eine nichtlineare Arbeitsweise von Fernsehbildschirmen kompensiert, was dazu führt, dass Rauschstörungen weniger stark wahrgenommen werden. In Bildcodierverfahren kann zusätzlich der Umstand ausgenutzt werden, dass das Verhältnis $\Delta L/L$ in Bereichen mit örtlicher Helligkeitsschwankung höher ist als in gleichmäßig hellen Flächen. Daher besitzen Kanten und andere örtliche hochfrequente Anteile einen Maskierungseffekt für Rauschstörungen. [E03, S. 172 ff]

2.2.2 Richtungsempfindlichkeit

Im menschlichen Gehirn gibt es unterschiedlich empfindliche Verarbeitungseinheiten für Kantenrichtung, Kantenbreite, u.ä. Daraus könnte man schließen, dass die subjektive Wahrnehmung von Kontrasten sowohl von der örtlichen Richtung wie auch von der Frequenz abhängt. Die Kontrastempfindlichkeit ist bei diagonalen Kantenrichtungen am geringsten (Abbildung 8). [E03, S. 173]

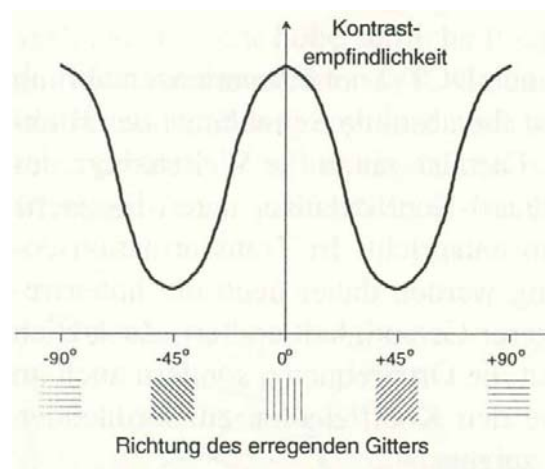


Abbildung 8: Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Kantenrichtung [E03, S. 173]

Erklärung: Abbildung 8 zeigt, dass die Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges auch von der Ausrichtung einer Kante abhängt. Man sieht, dass die Kontrastempfindlichkeit bei diagonalen Linien am geringsten ist.

Die Begründung für dieses Ergebnis findet sich in der speziellen Verarbeitung von Information in einem speziellen Teil des Gehirns, dem primären visuellen Cortex, auch Area striata oder Streifenfeld genannt. 1981 erhielten Hubel und Wiesel für die Erforschung der Funktionsweise dieses Gehirnteils den Nobelpreis für Physiologie und Medizin. Ihr Ziel war es gewesen, herauszufinden, welche Art von optischen Reizen die Neuronen des Cortex veranlasst zu reagieren (Reize „zu feuern“). Sie wollten verschiedene Bereiche im Gesichtsfeld der Versuchsperson (einer Katze) testen und projizierten dazu mit einem Diaprojektor Lichtpunkte an die Wand. Während die in der Netzhaut ansässigen Ganglienzellen darauf mit Reizantworten reagierten, zeigte sich im visuellen Cortex kaum eine Reaktion. Durch Zufall konnten sie die Neurone dazu bewegen, doch zu reagieren! Beim Einschleichen eines neuen Dias „ging ein Neuron los wie ein Maschinengewehr“. Nach Untersuchung weiterer Neuronen gelangten Hubel und Wiesel zu der Überzeugung, dass die Neuronen des visuellen Cortex am besten auf streifenförmige Reize ansprechen, die eine bestimmte Ausrichtung aufweisen. Die beiden Nobelpreisträger identifizierten drei Haupttypen von Neuronen, die sie nach der Reizart, auf die sie optimal reagieren, einteilten.

Einfache Zellen des Cortex

Einfache Cortexzellen haben receptive Felder, die jeweils in eine erregende und in eine hemmende Zone unterteilt sind. Diese Felder sind jedoch nebeneinander (in Streifenform) angeordnet und nicht, wie man vielleicht vermuten würde, durchmischt. D.h. das receptive Feld einer einfachen Cortexzelle ist so aufgebaut, dass diese Zelle optimal auf einen in eine bestimmte Richtung orientierten Lichtstreifen reagiert.

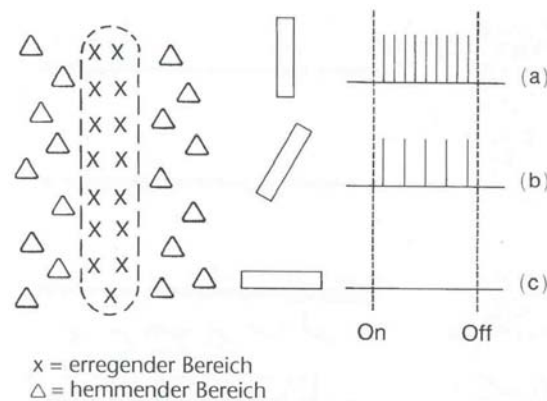


Abbildung 9: Rezeptives Feld einer einfachen Cortexzelle [E01, S. 87]

Erklärung: Der linke Teil von Abbildung 9 zeigt die streifenförmige Anordnung der erregenden und hemmenden Bereiche eines rezeptiven Feldes einer einfachen Cortexzelle. Punkt (a) im rechten Teil der Abbildung zeigt, dass die stärkste Reizantwort genau dann erfolgt wenn der Streifen parallel zur Ausrichtung des rezeptiven Feldes orientiert ist. Die Reizantwort fällt schwächer aus, wenn der Streifen leicht geneigt wird (b) und bleibt vollkommen aus (c), steht der Streifen normal auf das rezeptive Feld.

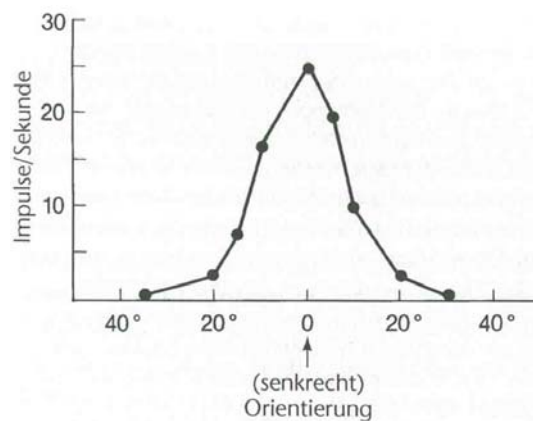


Abbildung 10: Empfindlichkeit einer einfachen Cortexzelle auf verschieden ausgerichtete Streifen [E01, S. 87]

Erklärung: Abbildung 10 zeigt die Bevorzugung von Streifen unterschiedlicher Ausrichtung durch die einfachen Cortexzellen. Während die Zelle auf einen senkrechten Streifen (also parallel zum erregenden Bereich des rezeptiven Feldes, d.h. ein Winkel von 0°) mit 25 Nervenimpulsen pro Sekunde reagiert erfolgt auf einen um 20° geneigten Streifen bereits eine kaum merkbare Reaktion (weniger als 5 Impulse pro Sekunde). Zum Vergleich: der Winkel zwischen 12:00 und 12:04 auf dem Ziffernblatt einer Uhr entspricht einem Winkel von 24°.

Diese bestimmte Art von Zellen spricht also am besten auf senkrechte Kanten an. Hubel und Wiesel konnten aber noch weitere einfache Zellen bestimmen, die ihrerseits am besten auf waagrechte oder diagonale Kanten reagieren.

Komplexe Zellen des Cortex

Wie die einfachen Cortexzellen reagieren auch die komplexen Cortexzellen am besten auf Streifen oder Kanten einer bestimmten Orientierung. Der Unterschied liegt darin, dass komplexe Zellen kaum auf kleine Lichtpunkte oder unbewegte Reize reagieren. Damit eine komplexe Zelle eine Reizantwort abgibt, muss sich ein richtig ausgerichteter Lichtstreifen quer über das gesamte rezeptive Feld bewegen. Viele komplexe Zellen reagieren außerdem noch optimal auf eine festgelegte Bewegungsrichtung.

Endinhibierte Zellen des Cortex

Diese Zellen reagieren nur auf sich bewegende Linien einer bestimmten Länge oder auf sich bewegende Ecken bzw. Winkel.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verschaltung der Rezeptoren der Netzhaut und dem visuellen Cortex zu Cortexneuronen führt, die auf bestimmte Reizmerkmale wie Orientierung oder Bewegungsrichtung, Reizantworten geben. Deshalb wird diese Art von Neuronen manchmal *Merkmalsdetektoren* genannt. Betrachtet man die Eigenschaften der verschiedenen Zellen genauer, kann man feststellen, je weiter man sich von der Netzhaut in Richtung Gehirn entfernt, desto mehr spezifische Reize sind nötig um die Neuronen zu einer Reizantwort zu bewegen. Hubel und Wiesel konnten also zeigen, dass zwischen den Reizinformationen und neuronaler Aktivität eine klare Beziehung besteht. Betrachtet man einen Gegenstand werden unterschiedliche Neuronenarten aktiviert, was die Basis für die neuronale Repräsentation eines Gegenstandes darstellt. [E01, S. 87 ff]

2.2.3 Psychophysische Erklärung der Richtungsempfindlichkeit

Psychophysische Untersuchungen zur so genannten *selektiven Adaption* lieferten Hinweise darauf, dass die Orientierungsdetektoren auch eine direkte Entsprechung in unserer Wahrnehmung besitzen. Folgende Idee liegt der Technik der selektiven Adaption zugrunde: betrachtet man ein Reizfeld mit einer bestimmten Streifenorientierung längere Zeit, so adaptieren die betroffenen Neuronen. Diese Adaption führt zu einer Sensitivitätsänderung, die psychophysisch messbar ist.

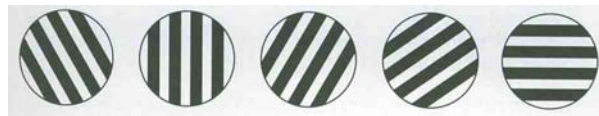


Abbildung 11: Verschieden orientierte Streifenmuster

Erklärung: Abbildung 11 zeigt Streifenmuster verschiedener Orientierung. Solche Streifenmuster werden bei Untersuchungen zur so genannten selektiven Adaption verwendet.

Die Eigenschaften eines Streifenmusters werden durch Wellenform, Kontrast, Orientierung, Phase und Ortsfrequenz bestimmt:

Wellenform

Die *Wellenform* eines Streifenmusters kennzeichnet die Intensitätsverteilung, d.h. das Muster von Intensitäten quer zum Streifenmuster.

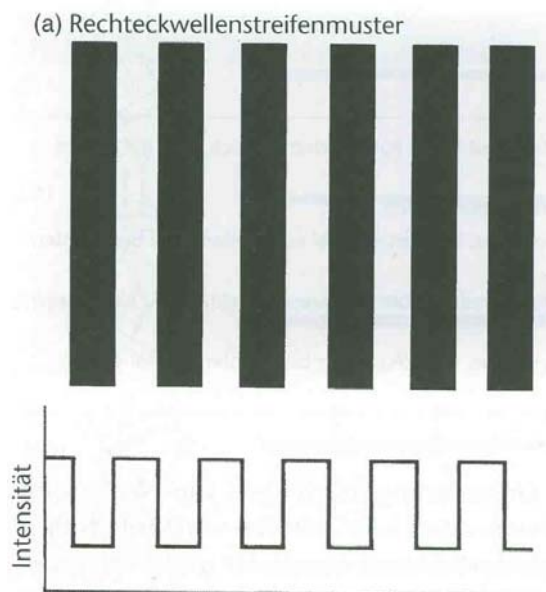


Abbildung 12: Rechteckwellenstreifenmuster mit Intensitätsverteilung [E01, S. 90]

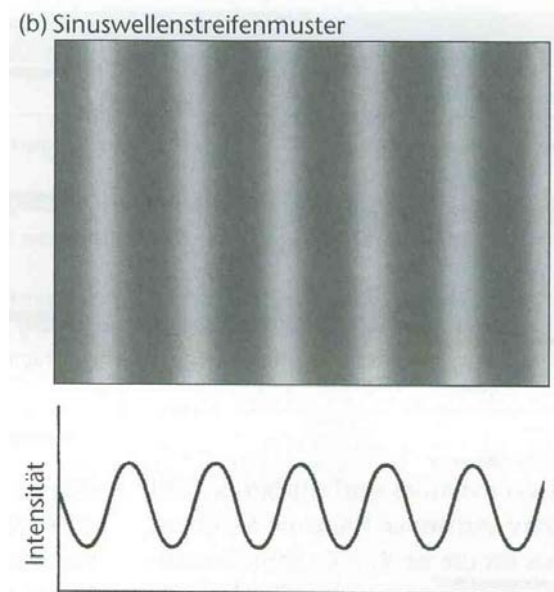


Abbildung 13: Sinuswellenstreifenmuster mit Intensitätsverteilung [E01, S. 90]

Erklärung: Abbildung 12 und 13 zeigen unter den beiden Streifenmustern die zugehörigen Intensitätsverteilungen. Die Intensität der Streifen wechselt in der linken Abbildung abrupt zwischen hoch (weiße Streifen) und niedrig (schwarze Streifen). Dieses Muster bezeichnet man daher als *Rechteckwellenstreifenmuster*.

Die Intensitäten des rechten Musters nehmen zeigen einen kontinuierlichen Hell-Dunkel-Übergang. Da diese Verteilung eine Sinuswelle darstellt, wird es *Sinuswellenstreifenmuster* genannt.

Neben den abgebildeten Rechtecks- und Sinuswellenstreifenmustern gibt es auch Sägezahnwellenstreifenmuster, Dreieckswellenstreifenmuster uvm. Für die Untersuchung der Kontrastwahrnehmung sind jedoch nur Rechtecks- und Sinuswellenstreifenmuster von Bedeutung.

Kontrast

Der *Kontrast* eines Streifenmusters wird folgendermaßen berechnet: Amplitude A geteilt durch den Mittelwert seiner Intensität M . Die Abbildungen 14 und 15 zeigen Streifenmuster mit hohem bzw. niedrigem Kontrast.

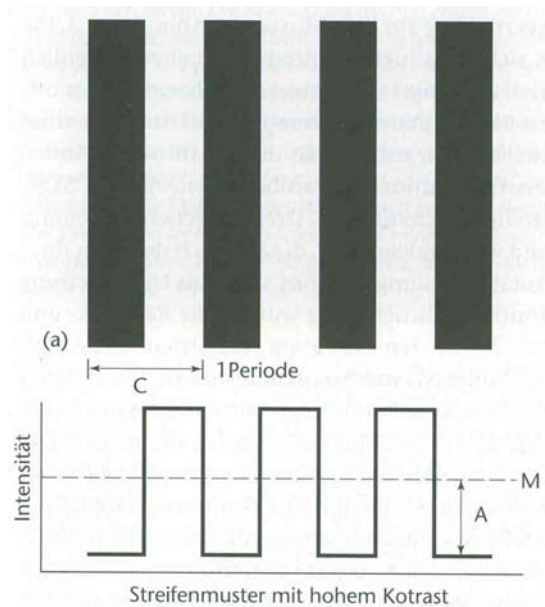


Abbildung 14: Streifenmuster mit hohem Kontrast [E01, S. 90]

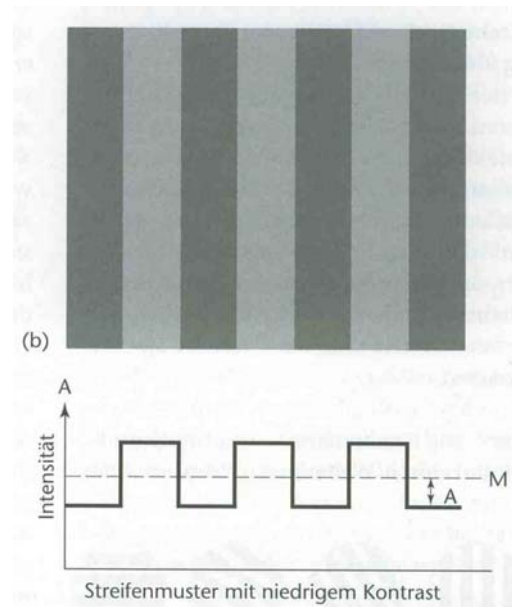


Abbildung 15: Streifenmuster mit niedrigem Kontrast [E01, S. 90]

Erklärung: Die beiden Muster in den Abbildungen 14 und 15 weisen jeweils dieselbe durchschnittliche Intensität M auf (gestrichelte Linie). Das linke Muster hat aber eine größere Amplitude A als das rechte Muster. Berechnet man den Kontrast A/M , ergibt sich deshalb in dem linken Bild ein höherer Kontrast, was auch unserem Sinnesindruck entspricht. Die Strecke C gibt die Periodendauer an, die obigen Bilder umfassen also $3 \frac{1}{2}$ Perioden.

Orientierung

Unter der Orientierung eines Streifenmusters versteht man seinen Winkel relativ zur Senkrechten (siehe auch Abbildung 8).

Phase

Die Phase eines Streifenmusters ist seine Position relativ zu einem festen Bezugspunkt, z.B. zu der kleinen Linie der Streckenbemessung in Abbildung 14. Würde das Muster relativ zu diesem Bezugspunkt waagrecht verschoben werden, würde sich damit die Phase ändern.

Geringere Sensitivität für diagonale Kanten

Menschen können horizontale und vertikale Kanten besser wahrnehmen als diagonale. Dies lässt sich aller Wahrscheinlichkeit nach durch die orientierungssensitiven Neuronen erklären. Sowohl in psychophysischen Messungen als auch in der Magnetresonanztomographie (MRT) kann eine geringere Sensitivität für schräge Kanten festgestellt werden. Die gute Übereinstimmung dieser zwei Messungsarten und der Umstand, dass dieser Effekt außerhalb des primären visuellen Cortex nicht festgestellt werden kann, lässt darauf schließen, dass wirklich die orientierungssensitiven Neuronen dafür verantwortlich sind. [E01, S. 89 ff]

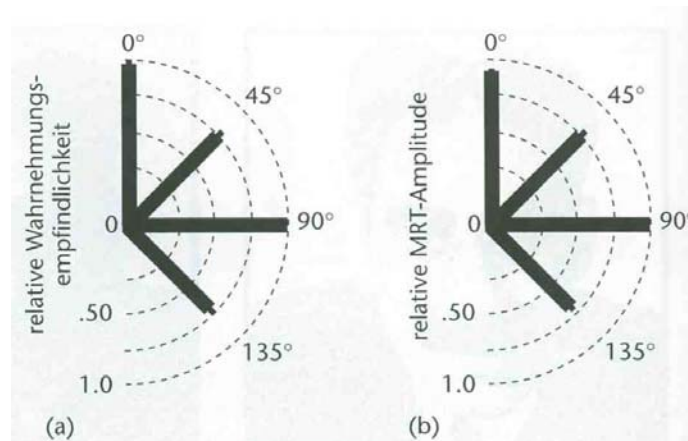


Abbildung 16: Sensitivität bezüglich Streifenmuster unterschiedlicher Orientierung [E01, S. 91]

Erklärung: Punkt (a) in Abbildung 16 zeigt die Unterschiede in der relativen Sensitivität von Streifenmustern mit den Ausrichtungen von 0, 45, 90 und 135°. Je länger der Balken, desto größer die Sensitivität. (b) zeigt die Daten einer Magnetresonanztomographie.

2.2.4 Frequenzgangsempfindlichkeit

Empfindlichkeit gegenüber örtlichen Amplitudenschwankungen

Beispiel: Die Ortsfrequenz (*spatial frequency*) könnte man grob durch die Anzahl von Perioden C (jeweils ein weißer und schwarzer Streifen in Abbildung 14) pro Streckeneinheit definieren. Bei 3,5 Perioden und 5 cm Gesamtbreite käme man so auf $3,5/5 \sim 0,7$ Perioden/cm.

Die Ortsfrequenz liefert ein Maß für die örtliche Auflösung, die Detailtiefe, einer Abbildung. In der Praxis wird die Abhängigkeit von der Ortsfrequenz meist mit Streifenmustern oder Sinusanregungen gemessen (Abbildung 18). Deren Wiederholfrequenz wird in Abhängigkeit der Perioden pro Grad des Seh winkels auf der Netzhaut angegeben (*cycles/degree*).

Der Grad des Seh winkels bestimmt die Stärke des Reizes auf der Netzhaut. Der Seh winkel ϕ (siehe Abbildung 17) ist der Winkel zwischen zwei imaginären Linien, die vom Auge des Beobachters ausgehen.

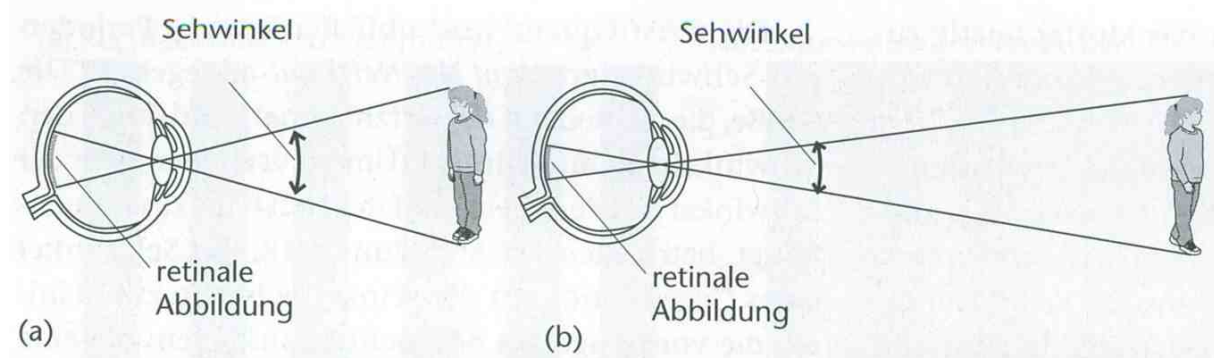


Abbildung 17: Sehwinkel abhängig von der Entfernung zum betrachteten Objekt [E01, S. 92]

Erklärung: Man kann leicht erkennen, dass der Sehwinkel (und somit das Bild auf der Netzhaut) kleiner wird, je weiter das Objekt vom Betrachter entfernt ist.

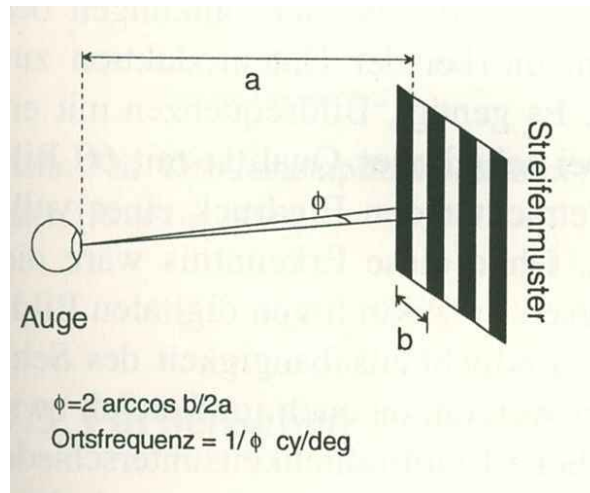


Abbildung 18: Definition der Ortsfrequenz [E03, S. 173]

Erklärung: In der Praxis wird die Abhängigkeit von der Ortsfrequenz meist mit Streifenmuster oder Sinusanregungen gemessen (Abbildung 18). Der Sehwinkel berechnet sich mit $\phi = 2 \arccos b/2a$, wobei a der Abstand Betrachter-Streifenmuster ist und b eine Periodendauer. Die Wiederholfrequenz wird in Abhängigkeit der Perioden pro Grad des Sehwinkels auf der Netzhaut angegeben (cycles/degree).

Beispiel: Das Empfindlichkeitsmaximum bezüglich der Ortsfrequenz entspricht damit in einem Betrachtungsabstand von 2,9 m in etwa einer Wellenlänge mit einer Periode von 0,5 cm. Dies wäre ein optimaler Betrachtungsabstand für einen Bildschirm mit 49 cm Bilddiagonale, dessen Zeilenlänge ca. 39 cm beträgt. Bei einer Bildwiedergabe im CIF-Format (325 Bildpunkte/Zeile) haben die Bildpunkte einen Abstand von ca. 0,12 cm, im CCIR-601 Format (720 Bildpunkte/Zeile) beträgt der Abstand ca. 0,06 cm.

Beispiel: Bei einer DCT-Codierung mit einer Blockgröße von 8×8 Bildpunkten beträgt die absolute Seitenlänge des Blockes etwa 0,96 cm (Standard Intermediate Format SIF) bzw. 0,48 cm (C-Common Intermediate Format CCIR). Dies entspricht der Wellenlänge des ersten horizontalen und vertikalen Wechselanteil-Koeffizienten, deren Frequenz in etwa dem Empfindlichkeitsmaximum entspricht. In Transformations-Codierverfahren mit psychovisualer Gewichtung werden die höherfrequenten Koeffizienten mit fortlaufend geringerer Genauigkeit codiert. Die zugelassene Verzerrung kann nicht nur an die Ortsfrequenz sondern auch noch an die Kantenrichtung angepasst werden, da die den Koeffizienten zugeordneten Bilder bestimmte Richtungspräferenzen zeigen.

Empfindlichkeit gegenüber zeitlichen Schwankungen

Die geringe Empfindlichkeit des Sehnsinns gegenüber hochfrequenten zeitlichen Schwankungen des Bildsignals wird schon seit langer Zeit ausgenutzt. Bereits eine Bildwiederholfrequenz von 25 Hz (d.h. 25 Bilder/sec) gaukelt dem menschlichen Betrachter eine vollkommen flüssige Bewegung vor. Diese zeitliche Empfindlichkeit kann aber noch weiter ausgenutzt werden, da im Bereich von 0 Hz (Einzelbild) zu 25 Hz noch weitere deutliche Empfindlichkeitsunterschiede zu verzeichnen sind.

Zeitliche und örtliche Empfindlichkeit können nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sie eine bisher zwar wenig erforschte, jedoch komplizierte Wechselwirkungen zeigen (Abbildung 19).

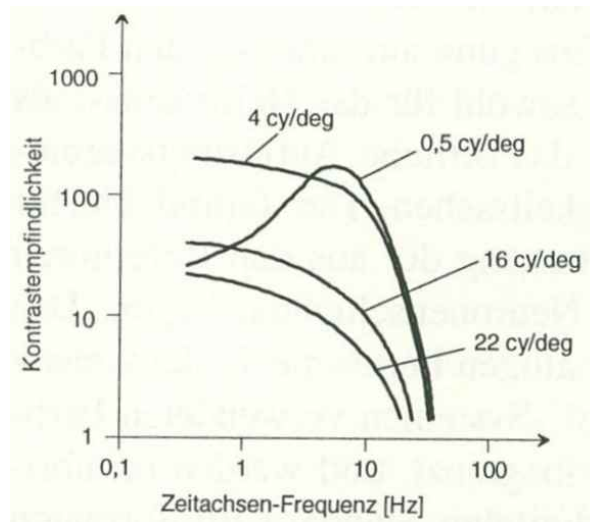


Abbildung 19: Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit von Zeit- und Ortsfrequenz [E03, S. 175]

Erklärung: Aus Abbildung 19 geht hervor, dass die zeitliche Empfindlichkeit ihr Maximum im Bereich von 5-10 Hz erreicht und von da aus zu beiden Seiten abnimmt. Einerseits ist anscheinend das Empfindlichkeitsmaximum höherer Ortsfrequenzen (z.B. 16 cycles/degree) weniger ausgeprägt, andererseits hängt auch die Position des örtlichen Empfindlichkeitsmaximums von der zeitlichen Frequenz ab. [E03, S. 173 ff, E01, S. 91 ff]

2.2.5 Psychophysik von Ortsfrequenzkanälen

Psychophysische Untersuchungen haben ergeben, dass es in menschlichen visuellen System nicht nur Detektoren für Orientierungen gibt, sondern auch für die Ortsfrequenz. Diese Untersuchungen nutzen die Auswirkungen selektiver Adaption auf die *Kontrastübertragungsfunktion* (Modulationsübertragungsfunktion).

Mit dieser Funktion wird der Kontrast beschrieben, der notwendig ist, um Streifenmuster mit unterschiedlicher Ortsfrequenz zu sehen. Um die Kontrastübertragungsfunktion zu bestimmen, wird mit einem Sinuswellenstreifenmuster mit sehr niedriger Frequenz (also sehr breiten Streifen) und einem Kontrast, bei dem man die Streifen noch gut erkennen kann, begonnen. In weiterer Folge wird der Kontrast solange verringert, bis das Streifenmuster wie eine gleichmäßig graue Fläche erscheint, die Streifen also nicht mehr unterschieden werden können. Dieser Kontrast entspricht dann der Wahrnehmungsschwelle S . Die Kontrastempfindlichkeit berechnet sich dann mit $1/S$. Diese Prozedur wird mit schrittweise erhöhter Ortsfrequenz des Streifenmusters wiederholt (d.h. die Streifen werden verschmälert und enger zusammengedrückt).

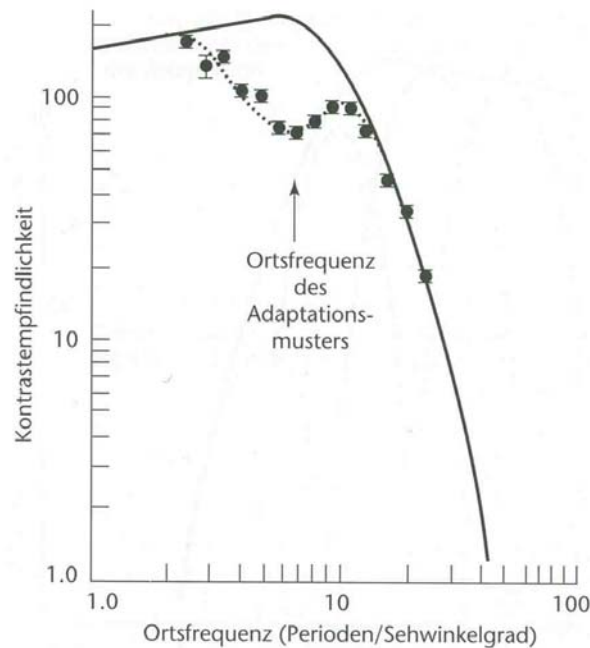


Abbildung 20: Kontrastübertragungsfunktion für ein Sinuswellenstreifenmuster [E01, S. 95]

Erklärung: Abbildung 20 zeigt die Kontrastübertragungsfunktion für ein Sinuswellenstreifenmuster (die durchgehende Linie). Die Kurve sagt aus, dass das visuelle System für Sinuswellenstreifenmuster mit einer Ortsfrequenz zwischen 2 und 4 cycles/degree am empfindlichsten ist (andere Messungen ergaben auch Werte im Bereich von 10 cycles/degree). Das bedeutet, dass die Versuchspersonen die Streifen selbst dann noch unterscheiden können, wenn der Kontrast bereits sehr gering ist. Weiters ist ersichtlich, dass die Empfindlichkeit bei höheren und niedrigeren Frequenzen abnimmt. Das bedeutet, um diese Frequenzen wahrnehmen zu können müsste der Kontrast bedeutend stärker sein. Bei sehr niedrigen und sehr hohen Frequenzen können die Versuchspersonen diese auch bei sehr großem Kontrast nicht mehr wahrnehmen.

Die gepunktete Kurve zeigt die Empfindlichkeit nach Anpassung an eine bestimmte Ortsfrequenz (in diesem Fall 7,5 cycles/degree). Man sieht deutlich, dass die Kontrastempfindlichkeit in diesem Bereich abgenommen hat.

Wie lässt sich jetzt erklären, dass die Fähigkeit ein Streifenmuster wahrzunehmen, von dessen Ortsfrequenz abhängt? Eine mögliche Begründung wäre, dass sich in der Kontrastübertragungsfunktion die Aktivität einer Reihe von Frequenzkanälen niederschlägt, von denen jeder nur auf einen engen Bereich von Ortsfrequenzen anspricht. Diese Annahme wird von Experimenten zur selektiven Adaption untermauert. Ein solches Experiment ist folgendermaßen aufgebaut: Zu Beginn wird die Kontrastempfindlichkeit einer Versuchsperson bestimmt. Danach wird die Person ein paar Minuten lang an eine bestimmte Ortsfrequenz adaptiert, einfach dadurch, dass sie längere Zeit ein Streifenmuster mit starkem Kontrast betrachtet (z.B. 7,5 cycles/degree). Dann wird bestimmt, wie sich die Gewöhnung an diese Frequenz auf die Kontrastübertragungsfunktion auswirkt, indem man erneut die Kontrastübertragungsfunktion bestimmt (Abbildung 21). Dieses und ähnliche Experimente unterstützen also die Vorstellung, dass die Kontrastübertragungsfunktion auf die Aktivität einer Reihe von schmälere Frequenzkanälen zurückgeht. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch im Bereich der einfachen Cortexzellen gefunden, die auch jeweils auf unterschiedliche Bereiche der Ortsfrequenzen empfindlich reagieren.

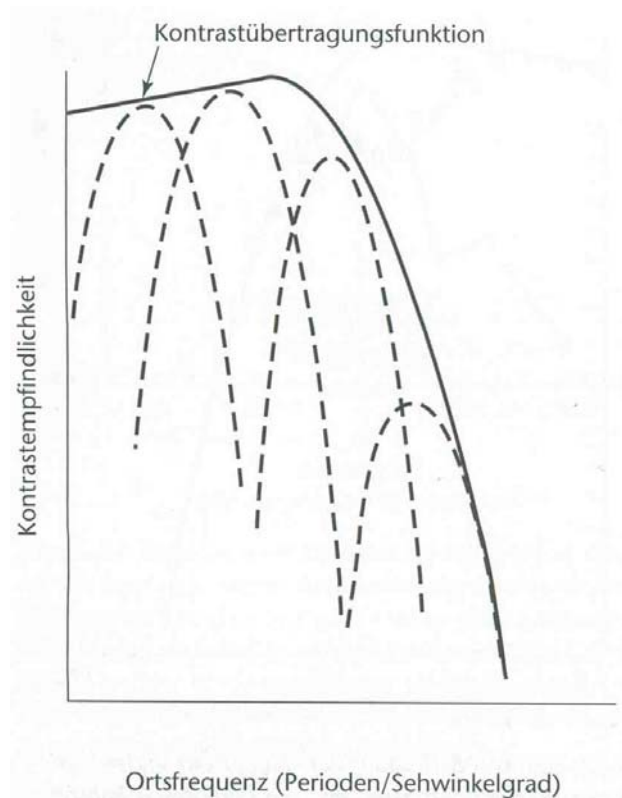


Abbildung 21: Kontrastübertragungsfunktion und einige ihr zugrunde liegende Kanäle [E01, S. 96]

Erklärung: Diese Abbildung zeigt dieselbe Kontrastübertragungsfunktion wie in Abbildung 20 (durchgezogene Linie). Außerdem zeigt sie einige dieser Funktion zugrundeliegende Kanäle (gestrichelte Linien). Diese Kanäle sind jeweils nur für einen schmalen Frequenzbereich empfindlich und ergeben zusammen die Kontrastübertragungsfunktion. [E01, S. 95 ff]

2.3 Farbwahrnehmung

Farbe ist eine sehr auffällige, allgegenwärtige Qualität unserer Wahrnehmung. Neben der Signalwirkung und den ästhetischen Aspekten, hat Farbe jedoch noch weitere wichtige Funktionen, die dabei helfen, Formen wahrzunehmen, Gegenstände zu erkennen und überlebenswichtige Aufgaben zu bewältigen.

Die Fähigkeit Farben zu sehen unterstützt stark die Fähigkeit Gegenstände gegen andere abzugrenzen und kleine Objekte vor einem vielfarbigem Hintergrund zu erkennen. Farben liefern jedoch nicht nur Information über Kontraste sondern geben auch Hinweise, dass z.B. verdeckte Teile eines Gegenstandes zusammengehören. Farben bewahren den Betrachter vor Verwirrung durch Schatten, Spiegelungen oder ungleichmäßige Beleuchtung. Eine veränderte Beleuchtung kann Helligkeitskonturen erzeugen, die fälschlicherweise für die Konturen eines Gegenstandes gehalten werden könnten.

Beispiel: Ein vollkommen farbenblinder Mensch (der die Welt nur in Abstufungen von Grau sieht) hat Probleme damit, Objekte, die teils im Schatten teils im Licht liegen, wahrzunehmen. Es könnte ihm passieren, dass er diesen einen Gegenstand als zwei einzelne Objekte wahrnimmt.

Menschen mit normaler Farbsichtigkeit werden selten dieser Täuschung verfallen, da eine durch Schatten verursachte Änderung der Oberflächenhelligkeit die Wahrnehmung der Farbe nur in geringem Maße beeinflusst.

[E01, S. 145 ff]

2.3.1 Wichtige Begriffe

Farbton (hue): Der *Farbton* bezieht sich auf die dominante Wellenlänge des spezifischen Farbspektrums. Den *Farbton* im Bereich des größten Werts des Spektrums empfindet man am stärksten.

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

Sättigung (saturation): Die *Sättigung* gibt die Reinheit der Farbe an. Bei hoher Sättigung wirkt sie pur und kräftig, bei niedriger Sättigung spricht man oft von Pastellfarben. Ist im Farbspektrum ein hervorstechender Impuls vorhanden so erscheint die Farbe gesättigt, sind alle drei Wellenlängen gleichverteilt entsteht ist die Farbe völlig ungesättigt und erscheint grau.

Helligkeit (luminance, brightness, intensity): Die *Helligkeit* einer Farbe ist abhängig von der Menge des in das Auge einfallendes Lichtes.

Achromatische Farben: Weiß, Schwarz, Schattierungen von Grau

Chromatische Farben: Blau, Rot, Grün, Gelb, ...

2.3.2 Physikalische Eigenschaften des Lichts

Sir Isaac Newton beobachtete schon 1704, dass sich weißes Sonnenlicht, das durch ein Prisma fällt, sich in die so genannten Spektralfarben aufspaltet (siehe Abbildung 2). Nach weiteren Experimenten stellte sich heraus, dass das Sonnenlicht aus allen Spektralfarben zusammengesetzt ist und sich diese durch ihre Wellenlänge unterscheiden. Daraus folgt, dass die Wellenlänge eine physikalische Eigenschaft des Lichts ist, die mit der Farbwahrnehmung zusammenhängt. Kennt man die Wellenlänge des Lichts kann man die Farbe ungefähr abschätzen.

Normalerweise treten die Wellenlängen kaum einzeln auf. Die verschiedenen Lichtquellen in unserer Umgebung senden unterschiedliche Wellenlängen aus und auch nur beleuchtete Gegenstände reflektieren gewisse Wellenlängen, die dann von den Augen aufgenommen werden. [E01, S. 147]

2.3.3 Farb- und Helligkeitskonstanz

Farbkonstanz

Objekte werden auch durch Farben charakterisiert und der Farbeindruck sollte sich auch bei wechselnden Lichtverhältnissen (z.B. Sonnenlicht, Kunstlicht) nicht verändern. Die Art der Lichtquelle übt jedoch auf die Farbwahrnehmung einen großen Einfluss aus. Vergleicht man beispielsweise die Emissionsspektren von (weißem) Sonnenlicht mit dem Licht, das eine Glühbirne aussendet so sieht man, dass das Sonnenlicht weitgehend alle Wellenlängen in gleichem Ausmaß beinhaltet, während die Glühbirne vor allem langwelliges Licht aussendet was zu einem gelblichen Farbeindruck führt.

Doch obwohl die spektralen Verteilungen von verschiedenen Lichtquellen so unterschiedlich sein können, wirkt sich das kaum auf unsere Farbwahrnehmung aus. Betritt man z.B. weiß gekleidet einen mit Kunstlicht beleuchteten Raum, erscheint die Kleidung trotzdem nicht gelblich. Diese relative Stabilität der Farbwahrnehmung (kleine Änderungen sind schon möglich) unter sich verändernden Beleuchtungsverhältnissen nennt man *Farbkonstanz*.

Begründungen für die Farbkonstanz findet man im Zusammenwirken von Farbadaption (chromatische Adaptation), dem Umfeld und dem Vorwissen des Betrachters. [E01, S. 168 ff]

Helligkeitskonstanz

Einen vergleichbaren Mechanismus wie die Farbkonstanz gibt es auch für die achromatischen Farben, die so genannte *Helligkeitskonstanz*. Darunter versteht man, dass achromatische Farben (Schwarz, Weiß, Grau) auch unter sich wechselnden Lichtverhältnissen, mit gleich bleibender Helligkeit wahrgenommen werden. Helligkeitskonstanz bedeutet somit, dass man die wahren achromatischen Eigenschaften eines Gegenstandes unabhängig von der Beleuchtung erkennen kann. Ohne diese Eigenschaft würde man dieselben Dinge ständig in unterschiedlichen Helligkeitsstufen wahrnehmen und Aussagen wie „dieses Papier ist weiß“ würden stark an Aussagekraft verlieren. [E01, S. 171 ff]

2.3.4 Dreifarben Theorie von Young-Helmholtz

Dieser Theorie zufolge erregt Licht mit einer bestimmten Wellenlänge die drei Rezeptorsysteme (Zapfenarten) in unterschiedlichem Ausmaß. Die Aktivitätsmuster dieser drei Systeme führen zur Wahrnehmung einer Farbe. So wird jede Wellenlänge im Nervensystem durch ein eigenes Aktivitätsmuster der drei Rezeptorsysteme codiert. Ein einziger Rezeptortyp könnte die Wellenlänge des Lichts nicht eindeutig identifizieren, da eine bestimmte Wellenlänge in einem einzelnen Rezeptortyp verschiedene Reizantworten verursachen könnte, je nach Intensität des Lichts. Sind jedoch mindestens zwei Zapfenrezeptorsysteme daran beteiligt, wird ein neuronales Muster geliefert, das die Wellenlänge unabhängig von der Lichtintensität bestimmt. Zusammenfassend lässt sich fest-

stellen, dass die Farbwahrnehmung auf drei Rezeptorsystemen beruht und dass mindestens drei Wellenlängen nötig sind um alle (sichtbaren) Wellenlängen des Spektrums darzustellen. [E01, S. 153]

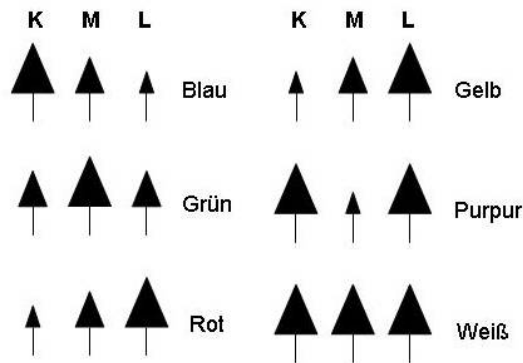


Abbildung 22: Entladungsmuster der drei Zapfenarten [E01, S. 156]

Erklärung: In Abbildung 22 sieht man die Beziehung zwischen den Reizantworten der drei Rezeptorarten und der Farbwahrnehmung. Die Stärke der Reaktionen der Rezeptoren für kurzwelliges (K), mittelwelliges (M) und langwelliges (L) Licht ist durch die Größe der Pfeile dargestellt.

Die Farbwahrnehmung basiert also auf dem Aktivitätsmuster der drei Rezeptorsysteme. Das bedeutet, kennt man die Reaktion dieser Systeme kann man feststellen, welche Farben wahrgenommen werden.

In Zusammenhang mit der Vorstellung, dass die Farbwahrnehmung auf dem Aktivitätsmuster mehrerer Rezeptorarten beruht, steht auch der Begriff des *Metamers*.

Definition: Zwei Farbflächen mit unterschiedlichen Wellenlängen, die jedoch perzeptuell identisch sind, nennt man *Metamere*. Zwei Farbreize erscheinen farblich identisch, wenn sie die Rezeptoren im gleichen Verhältnis erregen. [E01, S. 156 ff]

2.3.5 Tristimulus Theorie von Maxwell

Maxwell führte, aufbauend auf den Erkenntnissen von Young und Helmholtz, weitere Farbmischversuche durch. Eine neue Erkenntnis war, dass die Farbigekeit einer Oberfläche relativ unempfindlich gegenüber Helligkeitsänderungen ist. Er eliminierte diesen Faktor vollständig aus seinen Gleichungen und berechnete die sogenannten *Tristimuluswerte*. Seiner Theorie zufolge müssten sich alle Farbwerte innerhalb eines gleichseitigen Dreiecks, dem Maxwellschen Dreieck, finden lassen. Dies stimmt jedoch nicht zur Gänze, das sich Maxwells Untersuchungen auf Pigmentvergleiche stützten, das Licht der Spektralfarben jedoch in manchen Fällen viel intensiver sein kann, was dazu führt, dass sich manche intensive Spektralfarben sich nicht in Maxwells Dreieck finden lassen. [E09]

2.3.6 Wie viele Farben kann der Mensch unterscheiden?

Zur Bestimmung der von einem Menschen unterscheidbaren Farbabstufungen, beginnt man an einem Ende des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung und erhöht so lange die Wellenlänge, bis der Betrachter einen Farbunterschied erkennen kann. So ergeben sich etwa 200 wahrnehmbare Farbabstufungen des sichtbaren Teils des Spektrums. Variiert man die Intensität innerhalb jeder Stufe und verändert somit die Helligkeit der Farbe, lassen sich pro Stufe 500 Helligkeitswerte unterscheiden. Außerdem kann die Sättigung jeder Farbabstufen variiert werden. Dies geschieht indem man einer Farbe, z.B. Licht mit einer Wellenlänge von 640 nm (Rot), kontinuierlich Weiß hinzufügt. Die Farbe verliert somit an Sättigung. Die Sättigung einer Farbe verhält sich somit umgekehrt proportional zum Weißanteil der Farbe: je gesättigter eine Farbe ist, desto geringer ist der Weißanteil. Pro Farbe erhält man ungefähr 20 Sättigungsabstufungen.

Berücksichtigt man nun sowohl die 200 erkennbaren Abstufungen des sichtbaren Lichts, die 500 möglichen Helligkeitswerte und die 20 Sättigungswerte pro Stufe, erhält man $(200 \times 500 \times 20 = 2\,000\,000)$ 2 Millionen verschiedene Farben. [E02, S. 467-480]

2.3.7 24-bit für fotorealistische Bilddarstellung

Um Bilder fotorealistisch darzustellen sind heutzutage entweder 24-bit (3×8 bit) bzw. 32-bit Darstellungen üblich, wobei sich die zusätzlichen 8 bit der 32-bit Darstellungen meist durch einen zusätzlichen Alphakanal ergeben.

24-bit Darstellungen scheinen aus folgendem Grund ausreichend: wie in 2.3.6 dargestellt kann der Mensch an die 2 Millionen Farben unterscheiden. Auch wenn sich die verschiedenen Quellen recht uneinig sind, wie die Menge der wahrnehmbaren Farben bestimmt werden kann und wieviele es wirklich sind, kann festgestellt werden, dass eine Darstellung mit 16-bit (d.h. $2^{16} = 65\,536$ Farben) auf keinen Fall ausreichend ist.

Mit 24-bit (3×8 bit = 3×1 Byte = $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 2^{24} = 16\,777\,216$) können jedoch ca. 16 Millionen Farben dargestellt werden, was für die meisten fotorealistischen Anwendungen reichen sollte.

Außerdem scheint sich die 24-bit Darstellung dahingehend anzubieten, dass jede Farbkomponente ein Byte Speicherplatz zur Verfügung hat, was für die Berechnung eine praktische Größe darstellt.

Für Interessierte sei auf [E11] hingewiesen. Das Paper von G. W. Larson präsentiert eine 24-bit Codierung, die sich weniger an aktuellen Anzeige Technologien (z.B. CRT-Monitoren) orientiert, sondern daran, wie das menschliche Auge wahrnimmt. Es wird eine logarithmische Repräsentation der Helligkeit verwendet um auf das Phänomen einzugehen, dass das beim Lichteinfall in das Auge entstehende Signal eine logarithmische Abhängigkeit der Helligkeitsintensität zeigt (vgl. Kapitel 2.1.4).

Die verwendete 24-bit Codierung zerfällt in zwei Teile: 10-bit für die logarithmische Helligkeitsdarstellung, 14-bit für die Farbwerte UV.

Der nur 14-bit große Speicherplatz für die Farbwerte kann deshalb genügen, dass nur Farben, die das Auge auch wirklich unterscheiden kann, gespeichert werden.

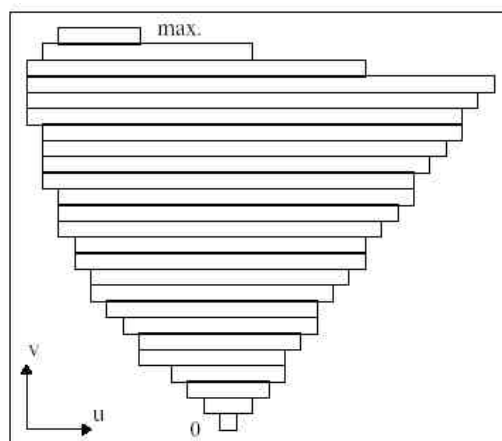


Abbildung 23: Erfasster Farbraum von 24-bit Codierung (Larson)
[<http://positron.cs.berkeley.edu/~gwl Larson/papers/cic98.pdf>]

Erklärung: Abbildung 23 zeigt, wie der als gleichförmige wahrgenommene Farbraum in kleine Teile gleicher Größe unterteilt und mit Scanlines abgetastet wird.

2.3.8 Auflösung von Farb- und Grauwerten

Obwohl das Zapfensystem bei hellem (Tages)Licht sowohl für Helligkeits- als auch Farbwahrnehmung eingesetzt wird, ist das örtliche Auflösungsvermögen der Zapfen beim Farbsehen geringer als beim Helligkeitssehen. Die Begründung liegt in der speziellen Art der Zusammenfassung, der aus den Rezeptoren gewonnenen Information, in den nachfolgenden Neuronenschichten.

Das unscharfe Farbsehvermögen wird schon in der analogen Fernsehtechnik seit langem ausgenutzt. Die Farbdifferenzsignale der PAL-, SECAM- und NTSC-Systeme sind in Zeilenrichtung stark bandbegrenzt und werden nur für jede 2. Zeile übertragen.

Ebenso werden in digitalen Bildformaten die Farbanteile unterabtastet. Außerdem wird bei der Umrechnung vom RGB- in das YUV-System schon in den Vorfaktoren berücksichtigt, dass bei Vorherrschen einer Komponente andere „übertönt“ werden können. Des Öfteren weist der Grünanteil eine hohe Dominanz auf während starke Blauerregungen äußerst selten vorkommen. [E03, S. 176]

2.3.9 YUV (YIQ) Farbmodell

Bei der in Europa gängigen Fernsehnorm PAL (Phase Alternating Line) wird der YUV-Farbraum benutzt (auch bekannt als Y'CbCr oder YPbPr), während das amerikanische NTSC-System auf dem YIQ-Farbraum aufbaut. Beide Farbsysteme sind sich grundsätzlich sehr ähnlich.

In YUV steht Y für die Helligkeitskomponente (luminance/brightness) und UV für die beiden Farbkomponenten (chrominance).

YUV-Signale werden aus RGB-Werten berechnet. Die gewichteten Werte von R, G und B werden addiert und repräsentieren das Helligkeitssignal Y (Luminanzkanal), das sowohl Helligkeits als auch Kontrastinformation beinhaltet. Das U-Signal entsteht durch Subtraktion des Y-Wertes vom Blauwert des RGB-Signals (Blau differenz-Chroma: $U = B - Y$). Das V-Signal wird analog durch Subtraktion des Y-Wertes vom Rotsignal berechnet (Rotdifferenz-Chroma: $V = R - Y$):

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B$$

$$U = -0,146 \cdot R - 0,288 \cdot G + 0,434 \cdot B = 0,493 \cdot (B - Y)$$

$$V = 0,617 \cdot R - 0,517 \cdot G - 0,1 \cdot B = 0,877 \cdot (R - Y)$$



Abbildung 24: Y-, U- und V-Kanäle des YUV-Signals
[www.uni-weimar.de/~zueger/02_ss01/sem_bild/HA_Bildkompression.pdf]

Erklärung: Abbildung 24 verdeutlicht, dass die wertvollste Information im Y-Kanal des YUV-Signals angesiedelt ist. Während im Y-Kanal die eigentliche Kontrastinformation gespeichert ist, haben die UV-Kanäle diesbezüglich einen weitaus geringeren Informationsgehalt.

Durch die Umwandlung in den YUV-Farbraum kommt es zu einer Abgrenzung der Farb- von der Helligkeitsinformation. So kann das schwächere örtliche Auflösungsvermögen der Zapfen beim Farbsehen auch in der Bildcodierung ausgenutzt werden. Durch Unterabtastung des Farbsignals kann so ein höherer Kompressionsfaktor erzielt werden. [E03, S. 4, E08, E10, E12]

2.3.10 Wichtige Begriffe zur Unterabtastung

Definition: Ursprünglich wurde als *Bandbreite* die Differenz zwischen der niedrigsten und der höchsten möglichen Frequenz eines Übertragungskanals bezeichnet. Bei der Datenübertragung mit dem Computer wird darunter jedoch die Menge an Daten verstanden, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums über einen Kanal übertra-

gen werden kann. Deshalb versteht man unter Bandbreite auch oft die maximale Datenübertragungsrate, die in „bits per second“ (bps) angegeben wird. [E05]

Theorem: Das *Abtasttheorem von Nyquist-Shannon* besagt, dass ein kontinuierliches Signal, das eine Maximalfrequenz f_{max} aufweist, mit einer mindestens doppelt so großen Frequenz wie f_{max} abgetastet werden muss. Nur so ist es möglich, aus dem so entstandenen diskreten Signal das ursprüngliche Signal ohne Informationsverlust zu rekonstruieren. [E04]

$$f_{abtast} > 2 \cdot f_{max}$$

Definition: Ein *Tiefpass-Filter (Lowpass filter)* lässt niedrige Frequenzen ungehindert durch, dämpft jedoch höhere Frequenzen. Tiefpass-Filter werden dazu benutzt ein Signal von störenden hochfrequenten Anteilen zu befreien, ohne dadurch die niederfrequenten Teile zu beeinflussen. [E06]

Definition: Man spricht von *Unterabtastung (Dezimation, Subsampling)* wenn ein Signal mit einer geringeren Frequenz als der doppelten Maximalfrequenz f_{max} abgetastet wird. Das bedeutet für die Bildcodierung, ein Bildsignal geringerer Auflösung zu erzeugen. Das Subsampling führt unweigerlich zu einem Informationsverlust. [E03, S. 51]

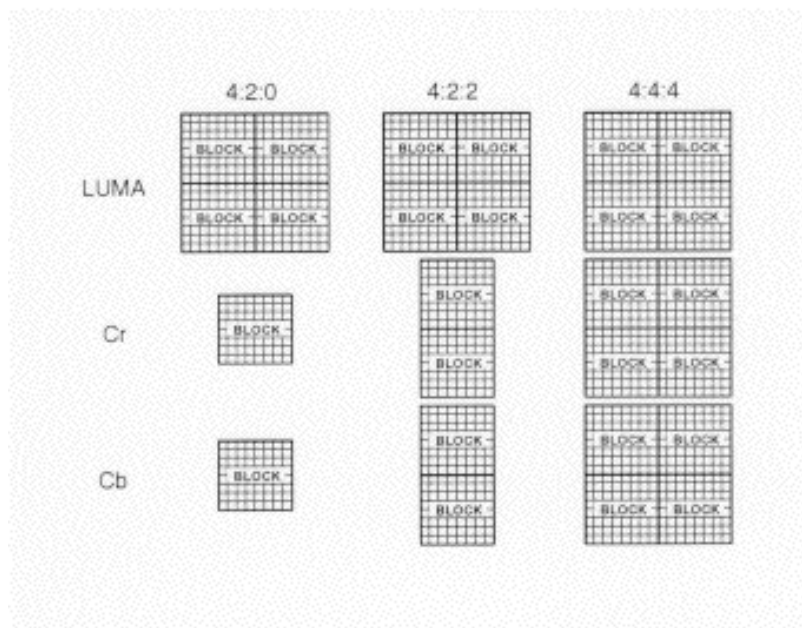


Abbildung 25: Unterabtastung von YUV-Signalen
[\[http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Multimedia/vid.gif\]](http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Multimedia/vid.gif)

Erklärung: Abbildung 25 zeigt schematisch die Grundidee der Unterabtastung YUV-Signalen mit den Verhältnissen 4:2:0, 4:2:2 und 4:4:4. Die erste Zahl gibt den relativen Anteil an Helligkeitsinformation Y an. Die zweite und die dritte Zahl geben den relativen Anteil an Farbinformationen U und V jeder geraden bzw. ungeraden Bildzeile an.

2.3.11 Unterabtastung der Farbwerte (Chroma-Subsampling)

Bei verlustbehafteter Bildkomprimierung (z.B. JPEG) macht man sich zu nutze, dass das menschliche Auge Helligkeitsinformationen gegenüber viel sensibler ist als Farbinformationen. Das bedeutet, dass man die Farbwerte in geringer Auflösung, unterabgetastet darstellen kann, und trotzdem adäquate Resultate erzielt. YUV-codierte Bilder können (in abnehmender Qualität) auf unterschiedliche Weise abgetastet werden: 4:4:4, 4:2:2, 4:2:0, 4:1:1, 4:1:0 (Abbildung 25).

Die erste Zahl gibt den relativen Anteil an Helligkeitsinformation Y an. Die zweite und die dritte Zahl geben den relativen Anteil an Farbinformationen U und V jeder geraden bzw. ungeraden Bildzeile an.

Beispiel: Bei der am häufigsten verwendeten 4:2:2 Unterabtastung (z.B. in CCIR 601 Video) enthält der Y-Kanal doppelt soviel Information wie jeder der Farbkanäle U und V, d.h. es wird in Bezug auf die Helligkeit nur die halbe Farbinformation gespeichert.

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

Beim 2×2 -*Chroma Subsampling* wird das Bild in 2×2 Pixel große Makroblöcke unterteilt. Die Farbwerte dieser vier Pixel werden gemittelt und nur diese Durchschnittsfarbinformation des Blocks wird gespeichert. [E07]

Bei der Anzeige eines solchen Bildes ist der menschliche Betrachter in der Lage die fehlende Farbinformation zu interpolieren.

3. Level of Detail 3

3.1 Vergleich der Auflösung von Farb- bzw. Helligkeitswerten

3.1.1 Vorschlag interaktive Anwendung

1.1.1.1. Beschreibung der Anwendung

Es wird ein Farbbild angezeigt (wahlweise ein fotoreales und eine Grafik, z.B. Text vor Hintergrund). Der User kann nun die Auflösung des Bildes ändern, und zwar die der Helligkeitswerte und die der Farbwerte getrennt voneinander. Das Applet soll veranschaulichen, dass unser Auge bei Verminderung der Auflösung der Helligkeitswerte empfindlicher reagiert als bei verringerter Auflösung der Farbwerte.

1.1.1.2. Mögliche Einstellungen

1. Y-Wert: räumliche Auflösung, Bittiefe
2. UV-Wert: räumliche Auflösung, Bittiefe

1.1.1.3. Ausgabe

Bilddarstellung mit eingestellten Auflösungswerten

3.1.2 Weiterführende Literatur und Links

4. Literatur

4.1 Eigene Literatur

E01	Wahrnehmungspsychologie	
Untertitel	Zweite deutsche Ausgabe herausgegeben von Manfred Ritter	
URL		
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	E. Bruce Goldstein	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Spektrum Akademischer Verlag	
Veröffentlichungsdatum	2002	
Veröffentlicht in	Heidelberg, Berlin	
URL		
Datum (URL)		

E02	Principals of neural science	
Untertitel	Color vision	
URL		
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	P. Gouras	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessel (Hrsg.)	
Veröffentlichungsdatum	1991	
Veröffentlicht in	New York: Elsevier	
URL		
Datum (URL)		

E03	Digitale Bildcodierung	
Untertitel	Repräsentation, Kompression und Übertragung von Bildsignalen	
URL		
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	Jens-Rainer Ohm	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Springer-Verlag	
Veröffentlichungsdatum	1995	
Veröffentlicht in	Berlin Heidelberg	
URL		
Datum (URL)		

E04	Wikipedia	
Untertitel	Nyquist-Shannon Abtasttheorem	
URL	http://de.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon_Abtasttheorem	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)		
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

Grundlagen der perzeptuellen Bildkodierung

E05	net-lexikon	
Untertitel	Bandbreite Definition Erklärung Bedeutung	
URL	http://www.net-lexikon.de/Bandbreite.html	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)		
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E06	free-definition	
Untertitel	Low-pass filter Definition Meaning Information Explanation	
URL	http://www.free-definition.com/Low-pass-filter.html	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)		
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E07	Chroma subsampling in JPG compression	
Untertitel		
URL	http://www.wfu.edu/~matthews/misc/jpg_vs_gif/JpgCompTest/JpgChromaSub.html	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)	G. Eric Matthews	
URL	http://www.wfu.edu/~matthews/index.html	
Datum (URL)	15.05.2004	
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E08	State of the Art in Spectral Rendering	
Untertitel		
URL		
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	Alexander Wilkie, Werner Purgathofer	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Institut für Computergraphik und Algorithmen, TU Wien	
Veröffentlichungsdatum	Oktober 2003	
Veröffentlicht in	Computer Graphics FORUM	
URL		
Datum (URL)		

E09	Computer Graphics	
Untertitel	C Version, Second Edition	
URL		
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	Donald Hearn, M. Pauline Baker	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Prentice Hall	
Veröffentlichungsdatum	1997	
Veröffentlicht in	Upper Saddle River, New Yersey 07458	
URL		
Datum (URL)		

E08	Wikipedia	
Untertitel	YUV - Wikipedia, the free encyclopedia	
URL	http://en.wikipedia.org/wiki/YUV	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)		
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E09	James Clerck Maxwell	
Untertitel		
URL	http://www.colorsystem.com/projekte/dt/!19MAXD.HTM	
Datum (URL)	15.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)		
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von		
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E10	Farbbasierte Segmentierung von Körperregionen	
Untertitel		
URL	http://isl.ira.uka.de/~stiefel/studienarbeiten/andy_sa.pdf	
Datum (URL)	Februar 2002	
Autor/ Autorin		
Name(n)	Andy King	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Institut für Logik, Komplexität und Deduktionssysteme, Universität Karlsruhe	
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in		
URL		
Datum (URL)		

E11	Overcoming Gamut and Dynamic Range Limitations in Digital Images	
Untertitel		
URL	http://positron.cs.berkeley.edu/~gwlarson/papers/cic98.pdf	
Datum (URL)		
Autor/ Autorin		
Name(n)	Gregory W. Larson	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Silicon Graphics, Inc.	
Veröffentlichungsdatum		
Veröffentlicht in	Mountain View, California	
URL		
Datum (URL)		

E12	Hausarbeit und Referat zum Thema Bildkompression	
Untertitel		
URL	www.uni-weimar.de/~zueger/02_ss01/sem_bild/HA_Bildkompression.pdf	
Datum (URL)	19.05.2004	
Autor/ Autorin		
Name(n)	Emanuel Züger	
URL		
Datum (URL)		
Veröffentlichung		
Veröffentlicht von	Bauhaus-Uni	
Veröffentlichungsdatum	03.06.2001	
Veröffentlicht in	Weimar	
URL		
Datum (URL)		