

Zusammenfassung

Die Fähigkeit eines Organismus seine natürliche Umgebung farblich wahrzunehmen erhöht die Interaktions- und Orientierungsfähigkeit und somit die Überlebenschancen. So konnte gezeigt werden, dass farbige natürliche Szenen besser wiedererkannt werden können als achromatische Szenen und theoretische Überlegungen legen nahe, dass die an die natürliche Umgebung angepasste Farbwahrnehmung hilft, effizienter Nahrung zu finden. Wie aber die Wahrnehmung einer farbigen Umgebung im Gehirn entsteht ist bisher nur in Grundzügen verstanden.

Um die neuronalen Grundlagen der menschlichen Farbwahrnehmung besser zu verstehen, untersucht die vorliegende Arbeit die kortikale Verarbeitung von chromatischen Stimulationsmustern im menschlichen Kortex und deren Abhängigkeit von Farbe, Bewegung und Kontrast. Dadurch wird es, unter anderem, möglich, die Aktivierungsmuster in verschiedenen Gehirnregionen über die Verarbeitungshierarchie hinweg zu vergleichen, und Schlüsse, hinsichtlich der unterschiedlichen Transformationen des visuellen Signals in Abhängigkeit dieser Reizattribute zu ziehen. Die visuellen Stimulationen wurden unter Berücksichtigung bekannter spektraler Sensitivitäten von drei unterschiedlichen Lichtrezeptorklassen (Zapfen) in der menschlichen Retina erstellt. Diese Stimulationstechnik erlaubt die selektive Anregung der unterschiedlichen Zapfenklassen und damit die selektive Anregung bekannter humaner Farbmechanismen, in denen die drei Zapfentypen unterschiedlich gewichtet sind.

Das auf die Retina fallende Bild des Sehfeldes wird im Kortex in mehreren räumlich getrennten visuellen Arealen repräsentiert. Die Grenzen dieser visuellen Areale wurden mit der retinotopen Kartierung mittels funktioneller Kernspintomographie nicht invasiv lokalisiert. Zahlreiche behaviorale und neurophysiologische Studien am Affenhirn zeigten, dass diese Regionen unterschiedliche, aber auch überlappende funktionale Spezialisierungen aufweisen. Das Verständnis der funktionellen Spezialisierung der menschlichen visuellen Areale ist allerdings sehr begrenzt. Um diese Spezialisierung im Menschen zu untersuchen, wurden in der vorliegenden Arbeit die Antworteigenschaften exakt lokalisierter visueller Areale mittels funktioneller Kernspintomographie hinsichtlich

der visuellen Reizattribute Farbe, Kontrast und Geschwindigkeit vermessen, charakterisiert und verglichen.

In einer gängigen Theorie wird z.B. angenommen, dass visuelle Reizeigenschaften wie Farbe und Bewegung, parallel durch getrennte kortikale Mechanismen, so genannte Informationspfade, verarbeitet werden. Aktuelle psychophysische, neurophysiologische und Läsionsstudien, sowie die vorliegende Arbeit, stellen diese strenge Trennung der Informationspfade in Frage. Einige dieser Studien unterstützen die Annahme, dass zwei kortikale Bewegungsmechanismen existieren, die sich hinsichtlich ihres Beitrags zur Wahrnehmung von Bewegung unterscheiden. Einer der Mechanismen ist in der Lage Bewegungen im Sehfeld über einen weiten Geschwindigkeitsbereich zu signalisieren, während der zweite auf langsame Geschwindigkeiten spezialisiert ist. Die Mechanismen unterscheiden sich zusätzlich hinsichtlich ihrer chromatischen Sensitivität. Obwohl keiner der beiden Mechanismen 'farbenblind' ist, wird dem Mechanismus für langsame Bewegungen eine starke Präferenz für chromatische Bewegung zugeschrieben. Die neuronalen Korrelate dieser postulierten Mechanismen sind weitgehend unbekannt. Die vorliegende Arbeit stellt neurophysiologische Befunde vor, die es erlauben, die untersuchten visuellen Areale auf Grund ihrer Antwortcharakteristika hinsichtlich unterschiedlich schnell bewegter chromatischer Reize den postulierten Bewegungsmechanismen zuzuordnen. So lässt sich z.B. zeigen, dass eine Region im lateralen medio-temporalen Kortex (Areal MT+) Eigenschaften besitzt, die für ihre Assoziation mit dem Mechanismus für schnelle Bewegungswahrnehmung sprechen. Areal MT+ wird durch Stimulation mit hohen Geschwindigkeiten und mit farbigen Reizen aktiviert. Im Gegensatz dazu weisen zwei Areale, die jeweils auf der dorsalen (V3A) und der ventralen Seite (hV4) des Hinterhauptlappens im Gehirn liegen, sehr ähnliche Antwortmuster auf, die ihre Assoziation mit dem Mechanismus für langsame Bewegungswahrnehmung erlauben. Beide Areale werden stark von langsam bewegten chromatischen Reizen aktiviert, während ihre Antwortstärke abnimmt, wenn die Bewegung des Stimulus eine gewisse Geschwindigkeit überschreitet. Im primären visuellen Kortex zeigte sich, dass die relativen Geschwindigkeitspräferenzen für alle stimulierten Rezeptorkombinationen in V1 kontrastabhängig sind.

Die vorliegende Arbeit stellt die bis dato vollständigste Charakterisierung chromatischen Antwortverhaltens in den visuellen Arealen des menschlichen Kortex dar. Die visuellen Areale wurden in dreizehn Richtungen im Zapfen-Kontrastraum in jeweils vier Kontraststufen und zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten hinsichtlich ihrer chromatischen Sensitivität analysiert. So zeigt sich im primären visuellen Kortex (V1), dass die selektive Stimulation zweier menschlicher Farbmechanismen (Gelb/Blau und Luminanz) die geringste Antwortstärken aller präsentierten chromatischen Stimuli hervorrief. Der Aktivierungsabfall tritt nicht bei der selektiven Stimulation des Rot/Grün-Mechanismus auf. Dieser Befund unterstreicht die zentrale Stellung der Rot/Grün Unterscheidung in der menschlichen Farbwahrnehmung. Dies kann als Hinweis für die Existenz kortikaler Gegenfarbenmechanismen gewertet werden. Zusätzlich wurden in allen untersuchten visuellen Arealen die höchsten Aktivierungsstärken durch Mischfarben hervorgerufen, die verschiedene Mechanismen simultan ansprechen. Durch den Vergleich der Aktivierungsstärken bei unterschiedlichen Farb- und Geschwindigkeitskombinationen können weiterhin visuelle Reize vorgeschlagen werden, welche die Areale MT+ und das ventrale Areal hV4 möglichst unabhängig voneinander aktivieren. Diese Reize können dazu dienen, die Verarbeitung jeweils im ventralen oder dorsalen Informationspfad in zukünftigen Studien zu betonen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Farbe und Bewegung auf mehreren kortikalen Ebenen verarbeitet werden, in denen bestimmte Stimulusattribute zwar bevorzugt, aber nicht exklusiv analysiert werden. Eine verbreitete Vorstellung von kortikalen Farb- oder Bewegungszentren wird als Konsequenz der vorgestellten Ergebnisse obsolet. Des Weiteren bieten die Resultate dieser Arbeit Erklärungsansätze für kontrovers diskutierte Befunde von Läsionsstudien an zerebral achromatopsischen Patienten mit residualer chromatischer Bewegungswahrnehmung von langsamen Geschwindigkeiten.