

# Wie das Auge mehr als einzelne Punkte sieht

*Von Cornelius Schröder, Februar 2022*

*Das Auge wird oft mit einer Kamera verglichen, in der das einfallende Bild in Pixel umgewandelt wird. Doch seine Funktionalität geht weit darüber hinaus: in einem hoch effizienten Netzwerk aus Nervenzellen wird das Bildsignal verarbeitet und komprimiert, bevor es ins Gehirn weiter geleitet wird.*

Bereits Charles Darwin beschrieb, dass verschiedenen Arten bestmöglich an ihre Umwelt angepasst sind. Wie weit diese Anpassung geht, hätte allerdings auch ihn überrascht. So ist selbst das Auge von Tier zu Tier unterschiedlich spezialisiert. Hier wird eintreffendes Licht in der Netzhaut von Millionen Photorezeptoren erkannt und in elektrische Signale umgewandelt. Dies geschieht in einem hochspezialisierten und mit seiner Umwelt abgestimmten Schaltkreis. In diesem wird das auf die Netzhaut treffende Bild ähnlich wie in einem Computerprogramm sehr stark komprimiert, um mehr als den Faktor hundert. Anschließend wird das Signal in verschiedene Hirnareale weiter geleitet. Wissenschaftler\*innen beschäftigen sich schon seit Jahrzehnten wie genau diese Verarbeitung vonstatten geht, aber noch viele Fragen bleiben ungeklärt.

Denn anders als das ursprünglich von den Photorezeptoren erkannte Signal ist das zum Gehirn weitergeleitete Signal nicht mehr in einzelne Bildpunkte (oder "Pixel") kodiert. Stattdessen gibt es verschiedene Kanäle, von denen jeder verschiedene Merkmale des Bildes repräsentiert. So gibt es Kanäle, die Bewegungen in eine bestimmte Richtung kodieren. Diese würden zum Beispiel aktiv werden, wenn ein Auto von links nach rechts durch unser Blickfeld fährt. Die verschiedenen Kanäle lassen sich verschiedenen Typen von Nervenzellen zuordnen. Diese kodieren jeweils ähnliche Merkmale in unterschiedlichen Bereichen des Bildes und überdecken es wie ein Mosaik. Die Zelltypen bilden gewissermaßen die Bausteine des Schaltkreises aus denen die Netzhaut aufgebaut ist.

Mit der Zeit wurden immer bessere Methoden entwickelt, um die Aktivität der Bausteine messen zu können. Unseren Kolleg\*innen an der Universität Tübingen war es damit möglich in Mäusen die Aktivität der einzelnen Nervenzellen des Netzwerks zu messen. Hierzu veränderten sie die Zellen genetisch so, dass sie bei Aktivität aufleuchten. Das Leuchten von ganzen Zellpopulationen kann dann mit einem speziellen Mikroskop aufgenommen werden. Dies ermöglicht es die einzelnen Verarbeitungsschritte im Netzwerk mitzuverfolgen. Salopp gesagt, können wir somit dem Auge beim "Denken" zusehen. Doch was genau gedacht wird bleibt zunächst im Dunkeln.

Nachdem die Aufnahmen von tausenden von Zellen in früheren Studien schon in die einzelnen Zelltypen sortiert werden konnten, blieb jedoch noch unklar, wie diese einzelnen Bausteine verschaltet sind. In meiner Doktorarbeit versuchte ich zusammen mit Kolleg\*innen diesen Schaltplan nachzubilden und seine anatomische Struktur aus diesen Aufnahmen abzuleiten.

Hierzu modellierten wir am Computer die Funktionsweise der Bausteine aus verschiedenen Basisfunktionen. Diese bilden verschiedene Prozesse in den Zellen nach. Die genauen Parameter der Basisfunktionen sowie der Schaltplan zwischen den Bausteinen wurden dann mittels modernster Algorithmen geschätzt. Dabei wird das Computermodell schrittweise optimiert, bis es in bestmöglicher Weise mit den aufgenommenen Daten übereinstimmt. Mit diesem Modell konnten wir sowohl Unterschiede in den Basisfunktionen wie auch Verbindungen zwischen den verschiedenen Bausteinen vorhersagen. Diese lassen sich nun in Experimenten testen und können helfen Licht ins Dunkle zu bringen wie genau im Auge "gedacht" wird.

Neben dieser funktionellen Nachbildung der Netzhaut stellt sich jedoch die Frage, ob es generelle Grundsätze gibt, denen die Signalverarbeitung in der Netzhaut folgt. Bereits in den fünfziger Jahren stellten Forscher\*innen die Hypothese auf, dass das visuelle System die Information so *effizient* wie möglich verarbeitet. Diese Effizienz ist aber abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen, wie zum Beispiel der Anzahl an Nervenzellen, sowie von der Relevanz verschiedener Merkmale im Bild. So kann es für eine Maus zum Beispiel von größter Bedeutung sein den herabstürzenden Raubvogel möglichst frühzeitig und verlässlich zu erkennen, wohingegen es für den Menschen von geringerer Bedeutung ist.

Beim Erkennen wichtiger Merkmale spielen verschiedenen Farbkanäle eine wesentliche Rolle. Diese ergeben sich aus verschiedenen Photorezeptortypen, die auf Licht unterschiedlicher Wellenlängen empfindlich sind. Wenn man sich ein Bild durch diese unterschiedlichen Farbkanäle anschaut, kann man ganz unterschiedliche Merkmale erkennen. So wäre es beispielsweise nahezu unmöglich, in einem schwarz-weiß Bild die roten Kirschen eines Baumes zu erkennen. Noch extremer können diese Unterschiede unter Wasser sein, da Wasser für Licht unterschiedlicher Wellenlängen unterschiedlich durchlässig ist. Wie würde unsere Welt wohl aussehen, wenn wir unsere menschlichen drei Farbkanäle (rot, grün und blau) durch einen zusätzlichen Farbkanal erweitern könnten, der ultraviolette (UV) Licht erkennen kann? So sehr das für und Menschen nach Science-Fiction klingen mag, so normal ist dies für viele Fische und andere Tiere.

Doch beschenken diese Rezeptoren den Tieren nicht nur eine "buntere" Umwelt, sondern sind überlebenswichtig: Zusammen mit Kolleg\*innen von der Universität Sussex in Brighton, UK, untersuchten wir die Funktion und Eigenschaften dieser UV-sensitiven Photorezeptoren am Beispiel von Zebrafischlarven. In Verhaltensexperimenten stellten wir fest, dass die Larven auf ihre UV Photorezeptoren angewiesen sind um ihre Beutetiere zu fangen. Zu diesen gehören unter anderem Pantoffeltierchen, die UV Licht reflektieren, aber durchsichtig in den anderen Lichtkanälen sind. Die wenige Millimeter großen Zebrafischlarven können in gewisser Weise also "mehr" sehen als wir Menschen, und dieses "mehr" bildet die Grundlage für ihre Jagd.

Mit weiteren Experimenten, in denen meine Kolleg\*innen in Brighton die Aktivität der Nervenzellen aufnahmen, konnten wir zeigen, dass die Funktionsweise der UV Photorezeptoren stark davon abhängt in welche Richtung sie schauen. Mit einem Computermodell versuchten wir aus diesen unterschiedlichen Funktionsweisen verschiedene anatomische Eigenschaften der Photorezeptoren vorherzusagen. Dies stellte uns jedoch vor die Herausforderung das Modell an die aufgenommenen Daten anzupassen. Insbesondere war es dafür nötig, die

Unsicherheit der Daten mit in die Modellierung einzubeziehen, um zuverlässige Rückschlüsse auf Unterschiede ziehen zu können. Hierzu verwendeten wir ein neues Verfahren, das uns nicht nur einzelne Punktschätzungen für ein bestmögliches Modell liefert, sondern darüber hinaus eine Bewertung, wie groß die Unsicherheit dieser Schätzung ist. Damit konnten wir zeigen, dass die Spezialisierung der UV Photorezeptoren bereits auf einer anatomischen Ebene beginnt und sie von der "Blickrichtung" des Photorezeptors abhängt. Diese Ergebnisse passen perfekt zu der Hypothese der effizienten Kodierung, da in verschiedenen Bildausschnitten unterschiedliche Merkmale zu finden sind, die kodiert werden müssen – denn der herabstürzende Raubvogel kommt eben doch meistens von oben.

Bevor wir aber endgültig verstehen, was mit dem Bildsignal in unserem Auge passiert bis es ins Gehirn weitergeleitet wird, ist es noch eine lange Reise. Dabei inspiriert auch die Hypothese der effizienten Kodierung immer wieder neue Experimente. Um den experimentellen Daten aber ihre Information entlocken zu können, bedarf es immer besserer Computermodelle und Algorithmen. Vielleicht lässt aber auch uns die Technik in Zukunft "mehr" sehen als wir uns heute erdenken können. Beispiele der "erweiterten Realität", bei der die menschliche Wahrnehmung durch zusätzliche Information oder virtuelle Objekte ergänzt wird, gibt es jedenfalls schon zur Genüge.