

Das Gehirn entwickelt vor der Geburt das Auge und in der Netzhaut das ‚Gehirn im Auge‘ für die kortikale Informationsverarbeitung.

Norbert Lauinger

*Institut für Optosensorik, Wetzlar

<mailto:norbert@lauinger-web.de>

Die drei Körnerschichten der Netzhaut werden als diffraktiv-optische Phasen-(Raum-)Gitter interpretiert. Als ‚Gehirn im Auge‘ könnten sie in Fresnel-Nahfeld-Interferenzen ‚kortikale‘ Funktionalitäten der Bildverarbeitung übernehmen: die Transformation des sichtbaren Spektrums in RGB-Beugungsordnungen, die monokulare Tiefenkarte, die Ortsfrequenzfilterung und die Objektklassifikation.

1 Einführung

Das Gehirn entwickelt vorgeburtlich das Auge zum optischen Abbildungsapparat und durch Invagination des neuronalen Flächenepithels in den Augenbecher die Netzhaut im Bildraum der Optik. Bis zum 7. Monat wird die einlagige Zellkörperschicht zur 3-lagigen retinalen Körnerschicht - wie Abb.1 zeigt - zwischen den beiden Grenzmembranen der Netzhaut differenziert.

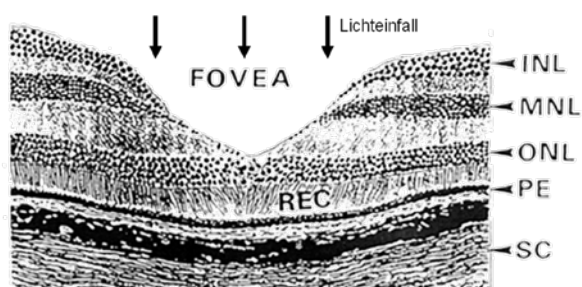


Abb.1: INL = innerer, MNL = mittlerer, ONL = äußerer Nuclear Layer in der Netzhaut des Auges [1]. REC = Rezeptoren, PE = Pigmentepithel, SC = Sklera.

Da die gitterbildenden Zellkörper für Licht völlig transparent sind, wird ihnen bisher keine optische Rolle zugesprochen. Erst ab dem 7. Monat wachsen die Zapfen und Stäbchen aus den ONL-Zellkörpern in den Hohlraum zwischen Netzhaut und Pigmentepithel aus. Die drei Körnerschichten bilden mit ihren abgestuften Zellabstandsmaßen (Gitterkonstanten) eine Gitterhierarchie. Selbst in der Fovea, in der nur Zapfen ausgebildet werden, bleibt die Schicht der ONL-Zellkörper den Fotorezeptoren lichtwärts vorgelagert, wie alle drei Schichten in der gesamten übrigen Netzhaut. Man bezeichnet die Anlage deshalb als ‚invertierte‘ Retina. Die 3-Schichten-Zellkörper-Gitteranlage wird hier als ein Aufbau von Phasengittern behandelt, deren diffraktive Eigenschaft sich aus den Brechungsindex-Unterschieden ihrer Kern-Mantel-Struktur ergibt. Die mit Zellkörpern dichtest besetzte ONL-Schicht stellt ein Raumgitter dar, das durch seine Lage in der Makula einen besonderen Bezug zum Farbsehen hat. Alle drei zellulären Gitter

werden hier als ‚Gehirn im Auge‘ bezeichnet. Damit wird diese Anlage vergleichbar mit dem Schichtenaufbau in kortikalen visuellen Zentren (CGL und V1). Es wird dargestellt, welche kortikalen Funktionalitäten damit bereits in der Netzhaut selbst – am Bildort der Sehobjekte - ausgeführt werden könnten.

2. Die kortikalen Funktionalitäten des ‚Gehirns im Auge‘.

Das menschliche Sehen gelingt, wenn ein fokussiertes Objekt an seinem Bildort in RGB (Helligkeit oder Farbe) codiert, vom Hintergrund und anderen Objekten getrennt und „WAS es ist“, ein Auto oder ein Baum u.a.m., als invariante ‚optische Melodie‘ erfasst wird. Zwei einfache Beobachtungen untermauern diese Interpretation: a) Beim Schließen eines Auges schrumpft die 3D-Welt nicht auf eine 2D-Fläche zusammen. Ein Beweis für das Vorhandensein einer Tiefenkarte in jedem Auge. b) im binokularen Sehen wird beim Schließen eines Auges die Helligkeit des Sichtbaren nicht halbiert. Jede Nichtadditivität von Helligkeiten ist in der Optik ein Beleg für Interferenzgeschehen. Die kortikalen Funktionalitäten wären damit zumindest die Folgenden:

a: Transformation des sichtbaren Spektrums in den RGB-Raum durch das ONL-Raumgitter. Die Berechnung des ONL-Zellgitters als Raumgitter [5] belegt, dass für das Tages-(Farben-)Sehen drei konzentrische RGB-Beugungsordnungen im hexagonalen Gitter auf der Grundlage von Fresnel-Nahfeld-Interferenzen resultieren. Ihre Resonanz-Wellenlängen liegen bei 559nmR, 537nmG und 447nmB, den Gipfelwerten der spektralen Hellempfindlichkeitskurven der Zapfepigmente. Die große Halbwertsbreite der Kurven spricht für eine kleine Zahl von Gittern im Raumgitter. Sie ermöglicht eine zunehmende Dämpfung der beidseitig zu den Gipfelwerten benachbarten Spektralanteile. Die Berechnungen belegen zudem, dass auch das Dämmerungssehen auf der RGB-Grundlage beruht, wobei R und G bei Verkürzung der 3. Gitterkonstante im Raumgitter zum Gipfelwert der spekt-

ralen Hellempfindlichkeitskurve der Stäbchen bei 512nmR und 512nmG fusionieren ($B = 415\text{nm}$ wird dabei einflusslos). Die sog. Purkinje-Shift wird damit zu einem Helligkeitsniveau-adaptiven Vorgang. Entsprechend wird die Transformation des sichtbaren Spektrums (380-760nm) nicht durch die Photochemie der Fotorezeptoren-Pigmente gewährleistet, sondern durch die diffraktive Fresnel-Nahfeld-Raumgitteroptik. Sie stellt ein erstes 'kortikales' Produkt des ‚Gehirns im Auge‘ dar.

b: Ortsfrequenzfilterung (laterales Auflösungsvermögen bzw. Visus-Funktion) durch das INL. Die netzhaut-zonenspezifische Verteilung der Ganglienzellkörper im INL-Gitter ist identisch mit den Abständen ihrer Rezeptiven Feldzentren. Tages- und Dämmerungssehen nutzen dabei gemeinsam die eine zelluläre Netzstruktur. Ein Visus von 1.0 wird in der Fovea erreicht, ein mit 0.2 niedrigerer Wert in der Zone der größten Stäbchendichte [7]. Das eigentliche Netz der Netzhaut wäre somit eine Funktion des INL-Zellkörper-Gitters.

c: Die Tiefenkarte in jedem Auge: ein kortikales Produkt der beiden Gitter INL und MNL. Zwei Komponenten wirken bei dieser Funktionalität zusammen. Die Linsen-Abbildungsgleichung belegt, dass ferne Objekte ihr scharfes Bild im Bildraum näher hinter der Linse und nahe Objekte ihr Bild weiter weg hinter der Linse anliefern. Im Auge resultiert dabei rechnerisch für Objektentfernungen zwischen 1000m und 0.25m eine Tiefenstrecke von ca. 2.3mm. Die nur binokular auslösbare Akkommodation kann diese Differenz keinesfalls beseitigen. Die zweite Komponente dieser ‚kortikalen‘ Funktion wäre wiederum die Fresnel-Nahfeld-Optik, die diese Tiefenkarte verkleinern könnte, über eine Kaskade zweier Gitter eventuell bis auf die Länge der Fotorezeptoren-Außenglieder als RGB-Empfänger. Und dies innerhalb der mittleren Netzhautdicke von ca. $250\mu\text{m}$. E.Lau [4] hat mit einem Doppelraster diese Abstandsmesstechnik dargestellt. Mit der Tiefenkarte und der Fresnel-Nahfeld-Optik könnte so die Objekt-Hintergrund- bzw. Objekt-Objekt-Trennung bereits in der Netzhaut gelingen.

d: Die gitteroptische log-polare Objektklassifizierung mit INL- und MNL-Gitter. Für die Frage danach, WAS Etwas Sichtbares ist (ein Baum oder ein Auto u.a.m.), hat die Abbildungsoptik eine entscheidende Bedeutung. Denn damit kann das ‚Gehirn im Auge‘ am jeweiligen Bildort eines Objekts eine Invariante erzeugen, die der Rolle der ‚Melodie‘ im Hören entspricht und als ‚optische Melodie‘ der sichtbaren Dinge bezeichnet werden kann. Sie wäre verfügbar, bevor die sprachliche Benennung der Sehobjekte greift. Das Instrument für diese kortikale Funktionalität ist die log-polare Ortsfrequenzanalyse. Sie stellt ein Kreissystem dar mit Radien im hexagonalen Netz, die Wurzelfunktionen entsprechen und die entfernungs- bzw. grö-

ßen-, lage- und verschiebungsinvariant das jeweilige Sehobjekt in seinen polaren Ortsfrequenzen erfassen. Es wurde von Glezer im Cortex [3] und von Reitboeck [6] und Eckhorn [2] in Wahrnehmungs-Experimenten mit Rhesusaffen in kortikalen Ableitungen beschrieben. Es gibt keinen Grund, weshalb man auch diese Funktionalität nicht bereits in der Retina ausführen können sollte. Offen mag dabei lediglich die genaue Form der zugrundeliegenden Nahfeld-Interferenzen sein.

3. Zusammenfassung und Ausblick. Durch die Interpretation der drei zellulären Gitter der Netzhaut des Auges als ‚Gehirn im Auge‘ rückt dieses in die Reihe der kortikalen Zentren der mehrschichtigen Informationsverarbeitung in CGL und V1. Für das Tages- und Dämmerungssehen genügen jeweils 1-2 der Zellgitter. Für das Farbsehen kommt dann die evolutionär zuletzt mit der Makula eingefügte ONL-Raumgitterschicht hinzu. Das Sehen fände auf dieser gitteroptischen Grundlage im ‚reziproken Gitterraum‘ der Kristallphysik statt. Diese Modelldarstellung sollte durch experimentelle Arbeiten in der Nachfolge des vom Autor initiierten und geleiteten Bmbf-Projekts NAMIOS [Nano- und Mikro-Raumgitter für die optische Sensorik, 2006 - 2013] verifiziert werden. Sie könnte für eine nächste Generation der Retina-Implantate bedeutsam werden.

Literatur.

- [1] W. Bargmann: „Histologie und mikroskopische Anatomie des Menschen“, Thieme-Verlag, 1967.
- [2] R. Eckhorn, A. Frien “Neural Signals as Indicators of spatial and temporal segmentation coding in the visual system”, in: *Proc. Intern. Conf. on Brain Processes. J.Mira-Mira (edit.)*, MIT-Press, 1995, 1-10.
- [3] V.D. Glezer: „Vision and Mind. Modeling Mental Functions“, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah New Jersey, 1995.
- [4] E. Lau: “Beugungserscheinungen an Doppelrastern”, *Annalen der Physik*, 2. 6, 1948, 417-423.
- [5] N. Lauinger: „Gehirn und Auge: Entwicklung der kortikalen Informationsverarbeitung in der Netzhaut“, *Der Augenspiegel* April 2018 (Teil 1, 28-33), Mai 2018 (Teil 2, 30-34), Verlag MediaWelt GmbH, Ratingen. „Lichtbeugung im Raumgitter der Netzhaut“ *Der Augenspiegel* Nov.2017 (Teil 1,38-42), Dez.2017 (Teil 2, 40-43).
- [6] H.J. Reitboeck, J. Altmann: „A Model for Size- and Rotation-Invariant Pattern Processing in the Visual System“. *Biol. Cybern.*, 51, 1984, 113-121.
- [7] Th. Wertheim: „Über die indirekte Sehschärfe“, *Zeitschrift Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 7, 1894, 172-187.