

Die optischen Eigenschaften der Wirbeltiernetzhaut

Dipl.-Ing. Martina Prasse, Universität Leipzig, Paul-Flechsig-Institut für Hirnforschung, Pathophysiologie der Neuroglia, Jahnallee 59, 04109 Leipzig

1. Einleitung

Die Wirbeltiernetzhaut ist ein dünnes Nervengewebe an der hinteren Innenseite des Augapfels. Sie verarbeitet die in das Auge eindringenden Lichtreize und gibt die visuelle Information in Form von Nervenimpulsen an das Gehirn weiter. Dabei handelt es sich um ein komplexes, mehrschichtiges System aus verschiedenen Zellen und ihren Kompartimenten. Ein Lichtreiz muss nahezu all diese Schichten durchdringen, bevor er die photosensitiven Rezeptoren erreicht (Abb.1). Dieser inverse Aufbau ist bei allen Wirbeltieren zu finden und wirkt bezüglich der optischen Parameter wie eine „Fehlkonstruktion“. Obwohl biologische Zellen sehr transparent sind, unterscheiden sie sich in ihrer Größe und ihrem Brechungsindex. In bestimmten Netzhautschichten sind sogar Zellstrukturen zu finden, deren Größenordnung der Wellenlängen des sichtbaren Lichts entspricht. Folglich müsste das transmittierte Licht durch strahlen- und wellenoptische Effekte beeinflusst werden und visuelle Information verloren gehen (Werner, 2010).

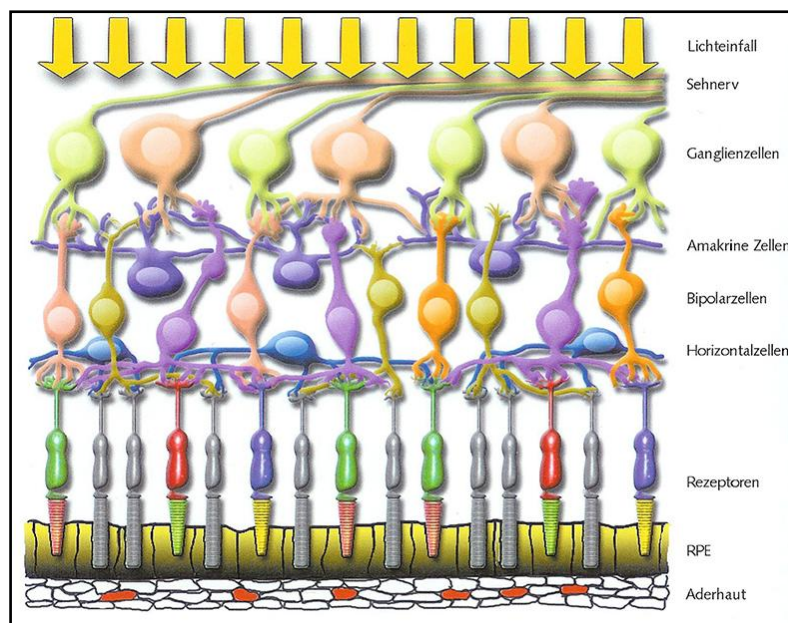


Abb. 1: Schematische Zeichnung der Neuronen innerhalb eines Netzhautquerschnitts (Welsch et al., 2007).

Diese Schlussfolgerung steht jedoch im Widerspruch zur Praxis: Trotz der inversen Anordnung der Netzhautschichten bleibt die visuelle Information gut erhalten. Untersuchungen haben ergeben, dass die Wirbeltiernetzhaut über bestimmte Strukturen und Mechanismen verfügt, die den Lichttransport unterstützen.

2. Der strukturelle Aufbau der Netzhaut

2.1 Zelltypen

2.1.1 Photorezeptoren

In der Wirbeltiernetzhaut gibt es zwei Klassen lichtempfindlicher Sinneszellen, welche sich in ihrem Aufbau sehr ähneln (Abb. 2). Bezüglich der Sensitivität und neuronalen Verschaltung gibt es jedoch bedeutende Unterschiede. Zapfen haben im Vergleich zu Stäbchen eine geringere Photosensitivität und reagieren erst bei vergleichsweise hohen Lichtintensitäten (photopisches Sehen bzw. Sehen bei Tageslicht). Darüber hinaus ermöglichen sie die Farbwahrnehmung und das Erkennen von Bilddetails. Farben können aber nur dann wahrgenommen werden, wenn die spektralen Anteile gewichtet und miteinander verglichen werden können. Beim Menschen wird dies mit Hilfe von drei verschiedene Zapfentypen realisiert, welche sich in den Absorptionsspektren ihrer Sehpigmente unterscheiden. Durch eine Verschaltung mit den nachfolgenden Nervenzellen, wird das Erkennen von Details möglich. Im Bereich der Fovea befinden sich ausschließlich Zapfen, von denen jeder an einen exklusiven Signalübertragungsweg angebunden ist. In diesem Netzhautbereich entspricht die optische Auflösung der Zapfendichte. Diese direkte Verschaltung ist im zentralen Netzhautgebiet am stärksten und nimmt in Richtung der Peripherie ab. Im Vergleich zu den Zapfen, ist das Stäbchensystem extrem konvergent. Hier sind zahlreiche Stäbchen mit nur einer Ganglienzelle verbunden, welche die Informationen zusammenfasst und als ein einziges Signal weiterleitet. Diese Zusammenfassung führt einerseits zur Summation der Lichtwahrnehmung und somit zur Steigerung der Sensitivität (skotopisches Sehen bzw. Nachtsehen). Aber andererseits ergibt sich daraus auch eine geringe optische Auflösung, die zum Erkennen von Bilddetails nicht ausreicht (Reichenbach, 2008).

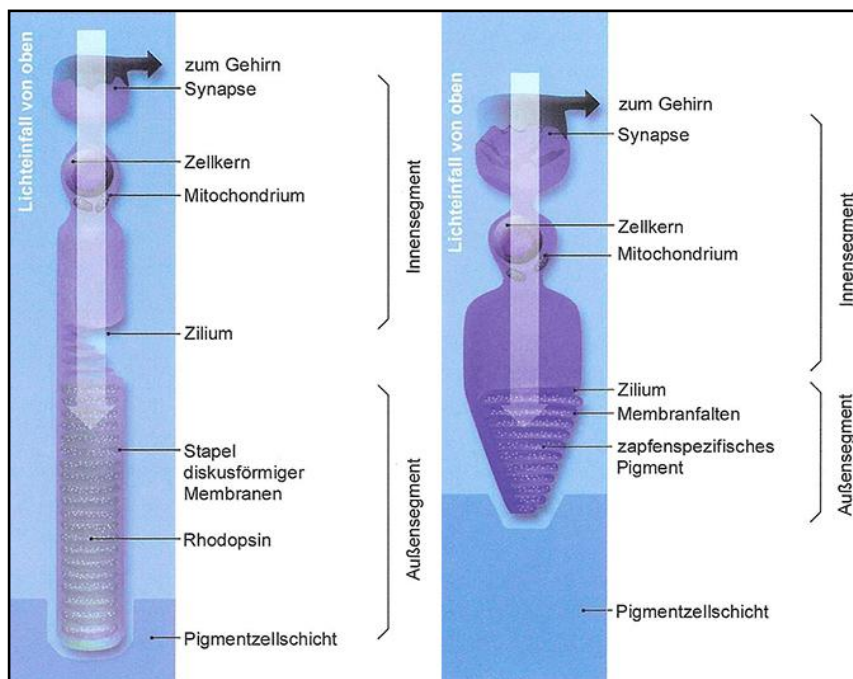


Abb. 2: Aufbau der Stäbchen (l.) und Zapfen (r.)
(Welsch et al., 2007).

2.1.2 Glia- und Nervenzellen

Das retinale Nervengewebe besteht aus zwei verschiedenen Zellklassen – Nervenzellen und Gliazellen. Während Nervenzellen reizinduzierte Signale empfangen und weiterleiten, sind die Funktionen der Gliazellen noch Gegenstand intensiver Untersuchungen. Ursprünglich wurde angenommen, dass sie lediglich die Nervenzellen stützen und isolieren. Inzwischen ist jedoch bekannt, dass Gliazellen eine Reihe von Funktionen übernehmen und mit den Nervenzellen interagieren. Es gibt verschiedene Typen von Gliazellen. Ein besonderer Gliazelltyp der Netzhaut ist die Müllerzelle. Solche Zellen werden auch Müllersche Radialgliazellen genannt, da sie senkrecht zur Netzhautoberfläche verlaufen, diese radial durchziehen und somit eine nahezu homogene Struktur paralleler Fasern bilden. Jede dieser Fasern ist von einer Nervenzellgruppe umgeben. Gemeinsam bilden sie strukturell-funktionelle Einheiten, aus denen sich die Netzhaut säulenartig zusammensetzt (Abb. 3) (Reichenbach, 2008).

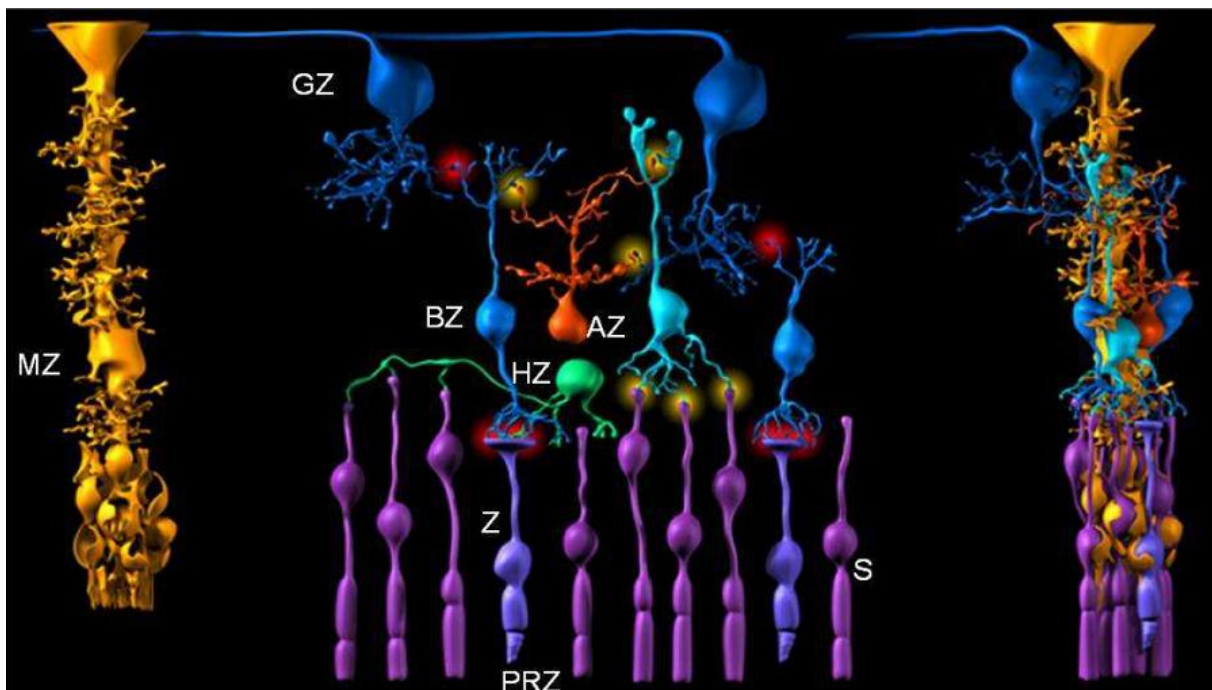


Abb. 3: Müllersche Radialgliazelle (l.), Nervenzellgruppe (m.), gemeinsame strukturell-funktionelle Einheit (r.) (Reichenbach, 2008).

2.2 Netzhautschichten

Die Wirbeltiernetzhaut besteht aus einer Reihe von Zellschichten, die sich in Struktur und Stärke voneinander unterscheiden. Die folgenden Ausführungen orientieren sich an der Richtung des Lichtpfades. An der Grenze zwischen Glaskörper und Netzhaut wird die Netzhaut durch eine Grenzmembran abgeschlossen. Die erste Schicht besteht aus zahlreichen Nervenfasern, die von den Ganglienzellen kommend in Richtung des optischen Nerts verlaufen. Die Kerne der Ganglienzellen bilden die angrenzende Ganglienzellschicht. Die synaptischen Kontakte, durch welche die Ganglienzellen mit den Bipolarzellen und den amakrinen Zellen verbunden sind, bilden die innere plexiforme Schicht. Im Anschluss befindet sich die innere Körnerschicht mit den Zellkernen der Amakrin-, Bipolar-, Horizontal- und Müllerzellen. Von dort erstrecken sich die Fortsätze der Bipolar- und Horizontalzellen und bilden mit den Photorezeptorfortsätzen Synapsen aus (äußere plexiforme Schicht). Die Zellkerne der Photorezeptoren bilden wiederum die äußere Körnerschicht, welche durch die äußere Grenzmembran abgeschlossen wird. Dort befinden sich die interzellulären Verbindungen zwischen Müllerzellen und Photorezeptoren. Die Innen- und Außensegmente der Rezeptoren bilden die angrenzende Photorezeptorschicht, welche durch die äußerste Netzhautschicht – das retinale Pigmentepithel – abgeschlossen wird (Abb. 4) (Reichenbach, 2008, modifiziert).

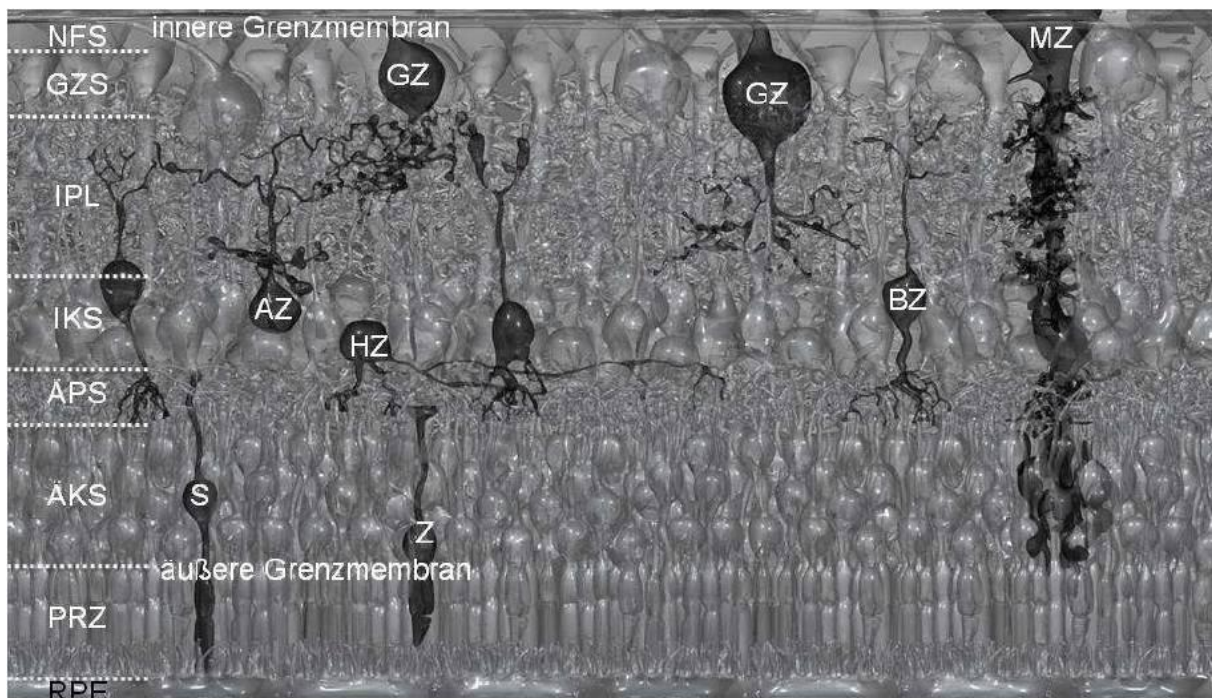


Abb. 4: Netzhautquerschnitt mit Kennzeichnung der Schichten: Nervenfaserschicht (NFS), Ganglienzellschicht (GZS), Innere Plexiforme Schicht (IPL), Innere Körnerschicht (IKS), Äußere Plexiforme Schicht (APS), Äußere Körnerschicht (ÄKS), Photorezeptorschicht (PRZ), Retinales Pigmentepithel (RPE) (Werner, 2010).

Da sich die Zellkerne und die synaptischen Kontakte bezüglich ihrer mikroskopischen Größe und ihrer Brechungsindizes unterscheiden, ist das Netzhautgewebe von zahlreichen optischen Grenzflächen durchsetzt. An solchen Grenzflächen wird das transmittierte Licht dementsprechend reflektiert, absorbiert, gebrochen und gestreut. Solche optischen Einflüsse sollten die Information verfälschen und den Signal-Rausch-Abstand verringern. Da sich die Größe des Streuwinkels indirekt proportional zur Größe des streuenden Elements verhält, ist anzunehmen, dass die Streuung in den plexiformen Schichten und der Nervenfaserschicht am stärksten ist. Denn dort befinden sich zahlreiche Zellfortsätze mit ihren Synapsen, deren Größenordnung näherungsweise den Wellenlängen des sichtbaren Lichts entspricht (Werner, 2010). Tatsächlich können auf OCT-Bildern die plexiformen Schichten durch ihre starken Reflexionen erkannt werden (Abb. 5).

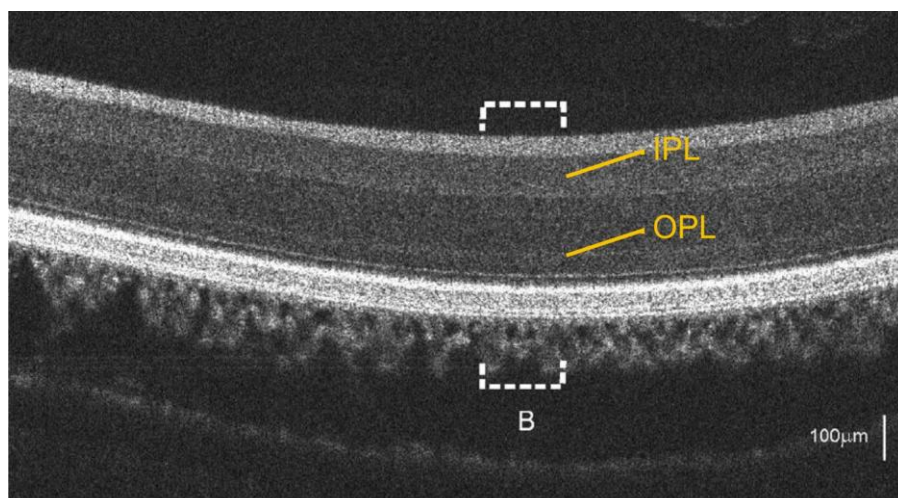


Abb. 5: OCT-Bild der Netzhaut eines Breitschwingsbussards.
IPL = Inner Plexiform Layer, OPL = Outer Plexiform Layer
(Ruggeri et al., 2010).

3. Die Müllerzelle als Lichtwellenleiter

3.1 Die Müllerzelle im Zellverband (Morphologie)

Die Müllerzellen verlaufen senkrecht zur Netzhautoberfläche und durchziehen alle Nervenzellschichten. Dabei bilden sie ein gleichmäßiges Muster paralleler Fasern, welche sowohl mit den Neuronen, als auch mit den Photorezeptorinnensegmenten und dem Glaskörper in Kontakt stehen. (Reichenbach, 1999)

Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Müllerzelllänge und Netzhautdicke. In unmittelbarer Nähe zum Glaskörper erweitert sich die Müllerzelle konisch und bildet einen Endfuß. Diese Endfüße dehnen sich soweit aus, dass sie die gesamte Netzhautoberfläche kontinuierlich bedecken.

Jede Müllerzelle bildet das Zentrum einer funktionellen Einheit. Sie wird säulenartig von einer Reihe Nervenzellen umgeben und ist an deren Stoffwechselprozessen beteiligt (Abb. 3). Somit lässt sich die Netzhautmorphologie als eine Aneinanderreihung solcher Einheiten begreifen. Die Müllerzellichte und somit auch die Dichte der funktionellen Einheiten können unter den Wirbeltieren stark variieren. So ist in der Netzhaut von gleichwarmen Wirbeltieren (Peripherie: ca. 5000 /mm²; Zentrum: ca. 10.000 /mm²) eine deutlich höhere Müllerzellichte zu finden, als bei wechselwarmen (1500 /mm² - 2000 /mm²).

Es wurde beobachtet, dass sich die Müllerzellichte und die Zapfendichte ähneln (AR2). Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Müllerzellen der Anzahl der Zapfen entspricht (Werner, 2010).

3.2 Experimenteller Nachweis der optischen Funktion

Der radiale und die gesamte Netzhaut durchdringende Verlauf der Müllerzellen ließ die Hypothese entstehen, dass die Müllerzellen auch eine optische Funktion haben. Es wurde vermutet, dass sie auftreffendes Licht wie ein Glasfaserkabel durch die invertierte Netzhaut direkt zu den Fotorezeptoren leiten. Die Müllerzellen würden in ihrer Gesamtheit wie eine Faseroptische Platte wirken. Auf diese Weise könnte die optische Information ohne störende Streueffekte durch die Netzhautschichten transportiert und von den Photorezeptoren empfangen werden. Die verschiedenen Brechungsindices innerhalb und außerhalb der Müllerzellen unterstützen diese Vermutung, denn die Müllerzellen haben im Vergleich zu den Nervenzellen einen verhältnismäßig großen Brechungsindex. Lediglich die an den Glaskörper angrenzenden Endfüße haben einen geringeren (Abb. 6). Auf diese Weise könnte für den Lichtpfad zunächst ein weicher optischer Übergang in die Netzhaut geschaffen werden. Der hohe Brechungsindex der weiteren Müllerzellabschnitte würde dann zu Reflexionen an den Grenzflächen führen, wodurch das Licht durch die Müllerzelle und somit durch die Netzhaut transportiert wird (Franze et al., 2007).

Diese Hypothese wurde mit Hilfe verschiedener Verfahren überprüft.

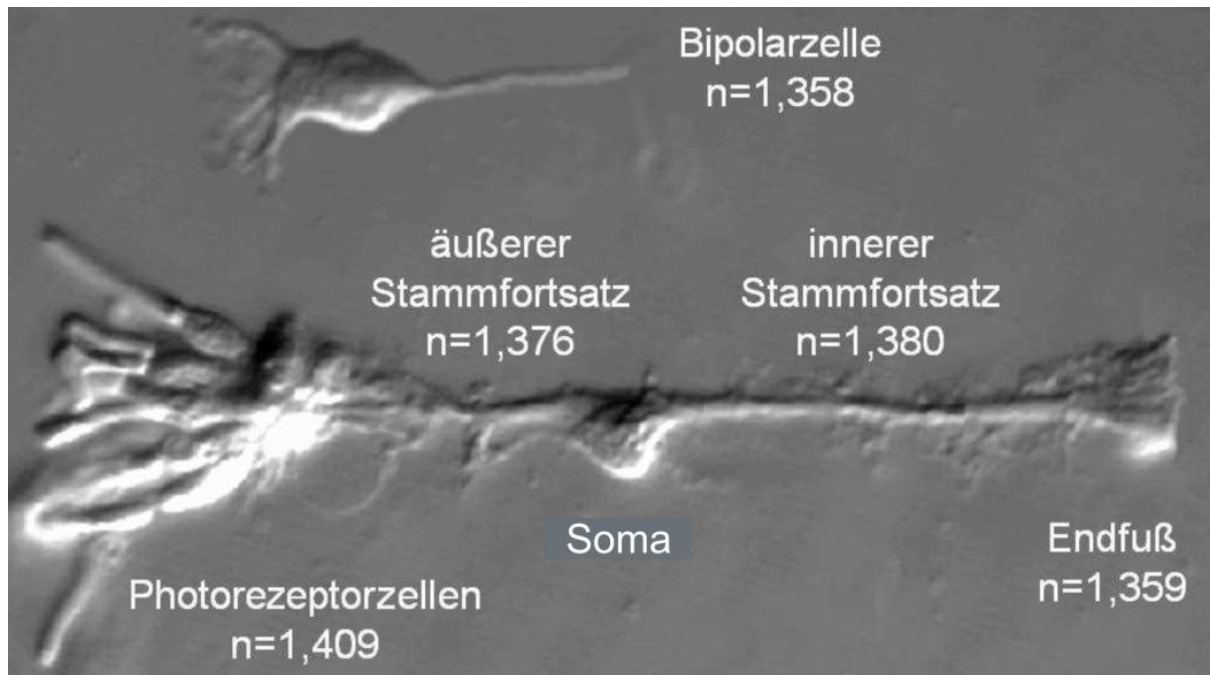


Abb. 6: Brechungsindices der Müllerzelle, der Fotorezeptoren und Bipolarzellen (Franze et al., 2007, modifiziert).

3.2.1 Retinale Reflexion

Die Reflexionseigenschaften wurden anhand einer frisch isolierten Meerschweinnetzhaut untersucht. Mit Hilfe eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops war es möglich, die Fokalebene zu variieren und somit verschiedene Gewebeschichten scharf abzubilden. Zunächst wurde eine flach ausgebreitete Netzhaut verwendet. Dabei wurde die Fokalebene jeweils so gewählt, dass einzelne Abbildungen von allen Nervenzellschichten erzeugt werden konnten (Abb. 7). Aus diesen Abbildungen konnte anschließender Radialschnitt des Netzhautgewebes rekonstruiert werden. Dabei zeigte sich, dass insbesondere solche Bereiche eine starke Reflexion bewirkten, die reich an Nervenfasern und synaptischen Kontakten sind. Trotz dieses Reflexionsverhaltens waren sowohl große Anteile der Nervenfaserschicht, als auch ein Punktraster ähnliches Muster in den plexiformen Schichten frei von messbarer Reflexion. Durch einen Vergleich der verschiedenen Abbildungen wurde deutlich, dass sich die Punktmuster der plexiformen Schichten zu einer Struktur paralleler Röhren verbinden lässt, welche die Gesamte Netzhaut durchzieht (Franze, 2007; Reichenbach, 2008).

3.2.2 Retinale Transmission

Die Fotorezeptoren der Netzhaut absorbieren das einfallende Licht und wandeln es in ein Nervensignal um. Folglich müssen Beobachtungen zum Transmissionsverhalten der Netzhaut in der Photorezeptorebene stattfinden. Um dies realisieren zu können, wurden auf der Rückseite eines frisch isolierten Meerschweinauges die äußeren Schichten, inklusive der Photorezeptorschicht, chirurgisch entfernt. Das präparierte Auge wurde durch eine Lichtquelle beleuchtet, so dass das Licht dem natürlichen Pfad entsprechend die Netzhaut erreichte. Mit

einem geeigneten Detektor in der Fotorezeptorebene wurde schließlich ein Muster erkannt, welches der Inversion des reflektierten Punktmusters entsprach (Abb. 7). Sowohl das Punktmuster der retinalen Reflexion, als auch das der retinalen Transmission ähneln sehr dem Verteilungsmuster der Müllerzellen (Franze, 2007; Reichenbach, 2008).

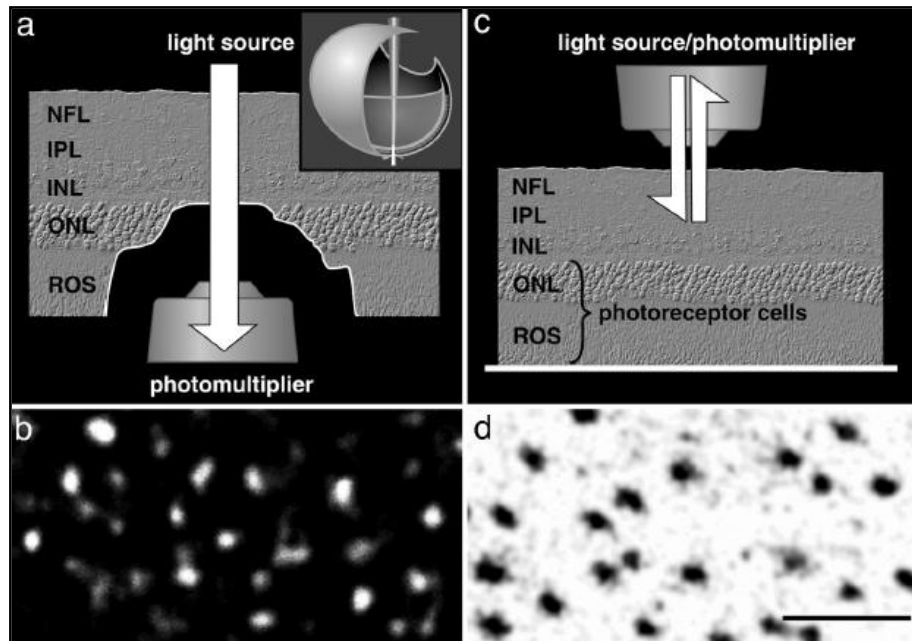


Abb. 7: Lichttransmission und -reflexion der inneren Netzhautschichten (Balken=10µm). (a) Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Transmission. (b) Konfokales Bild der retinalen Transmission. (c) Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Reflexion. (d) Konfokales Bild der retinalen Reflexion (Franze et al., 2007).

3.2.3 Transmission durch isolierte Müllerzelle

Mit Hilfe einer „Laser-Falle“ (Optical Stretcher) konnte die lichtleitende Wirkung direkt an einer Müllerzelle nachgewiesen werden. Eine solche „Laser-Falle“ besteht aus zwei sich gegenüber stehenden Glasfasern, in die jeweils ein Infrarot-Laser (1064nm) eingekoppelt wird (Abb. 8). Wenn eine isolierte, in Nährlösung schwimmende Müllerzelle zwischen diese beiden Glasfasern gelangt und die Laser eingeschaltet werden, richtet sie sich entlang der optischen Achse dieser Glasfasern aus und wird dort gehalten (Abb. 8a, 8b). Anschließend werden die Glasfasern an die Zelle herangeschoben. In eine der beiden Fasern wird ein weiterer Laser eingekoppelt, welcher sichtbares Licht (514nm) emittiert, während am Ende der anderen Faser die ankommende Lichtintensität gemessen wird (Abb. 8c, 8d). Da die Glasfasern mit keiner weiteren Optik ausgestattet wurden, ist der austretende „sichtbare“ Laserstrahl entsprechend divergent. Die Messungen ergaben, dass mit Hilfe der Müllerzelle viel mehr Licht über die Distanz zwischen den Fasern transportiert wurde (Abb. 8d). Folglich hat die Zelle die Divergenz des Lasers unterdrückt und das Licht weitergeleitet (Franze, 2007; Reichenbach, 2008).

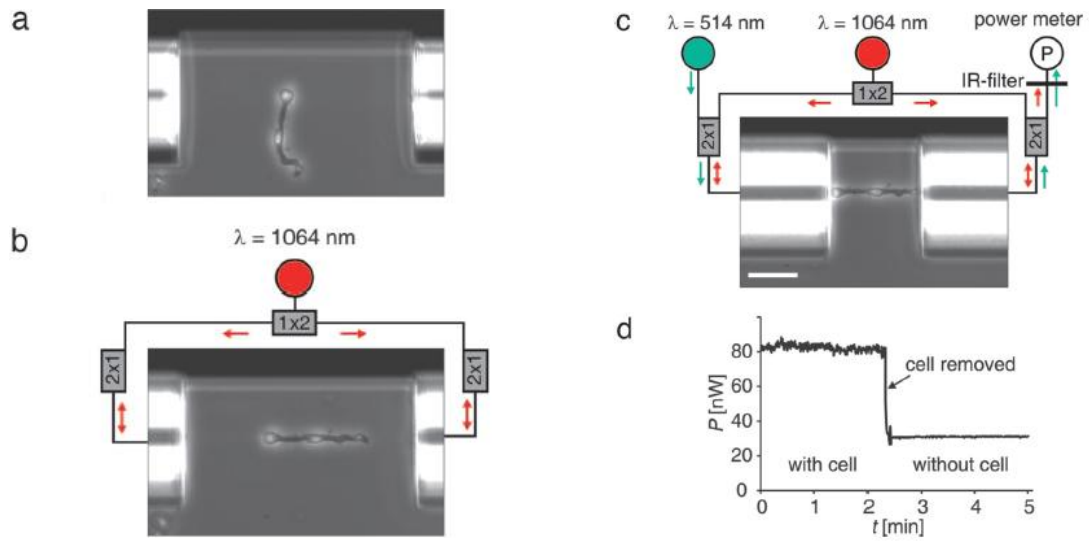


Abb. 8: Nachweis der lichtleitenden Eigenschaft an einer isolierten Müllerzelle (Balken=50 μm) (Franze et al., 2007).

4. Die Bedeutung der Fovea

Die Wirbeltiernetzhaut hat im Laufe der Evolution eine Reihe von adaptiven Spezialisierungen erfahren, welche es ermöglichten, die unterschiedlichsten Lebensräume zu besiedeln. Bei einigen Wirbeltieren, die an das Sehen bei Tageslicht angepasst sind, ist eine ganz besondere Form der Spezialisierung zu finden: Die Fovea centralis. Dabei handelt es sich um eine rotationssymmetrische Vertiefung der Netzhaut, welche von einer Art Wall umgeben ist.

Eine Fovea hat sich nur bei einigen Wirbeltieren, wie z.B. Menschen, Primaten und Greifvögeln, entwickelt (Reichenbach, 2008).

Da diese Wirbeltiere alle über einen guten Visus verfügen, hat die Fovea vermutlich einen entscheidenden Einfluss auf die Sehschärfe.

4.1 Die traditionelle Erklärung der Fovea-Funktion

Bei Betrachtung der „flachen“ Fovea, wie sie bei Menschen und Primaten zu finden ist, ist der visuelle Vorteil direkt zu erkennen. Die säulenartigen Zellgruppen der Netzhaut sind an dieser Stelle seitlich verbogen, so dass die Fovea das Ergebnis einer zentrifugalen Verschiebung der inneren Netzhautschichten ist. Dadurch kann das Licht direkt von den Photorezeptoren absorbiert werden (Abb. 9). In diesem Bereich befinden sich ausschließlich Zapfen, welche besonders lang, schlank und dicht gepackt sind. Darüber hinaus befindet sich die Fovea an der Stelle, an der die optische Achse des Sehapparats die Netzhaut schneidet – also im Fokus. All diese morphologischen Merkmale tragen zu einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis und zu einer höheren Auflösung bei (Reichenbach, 2008).

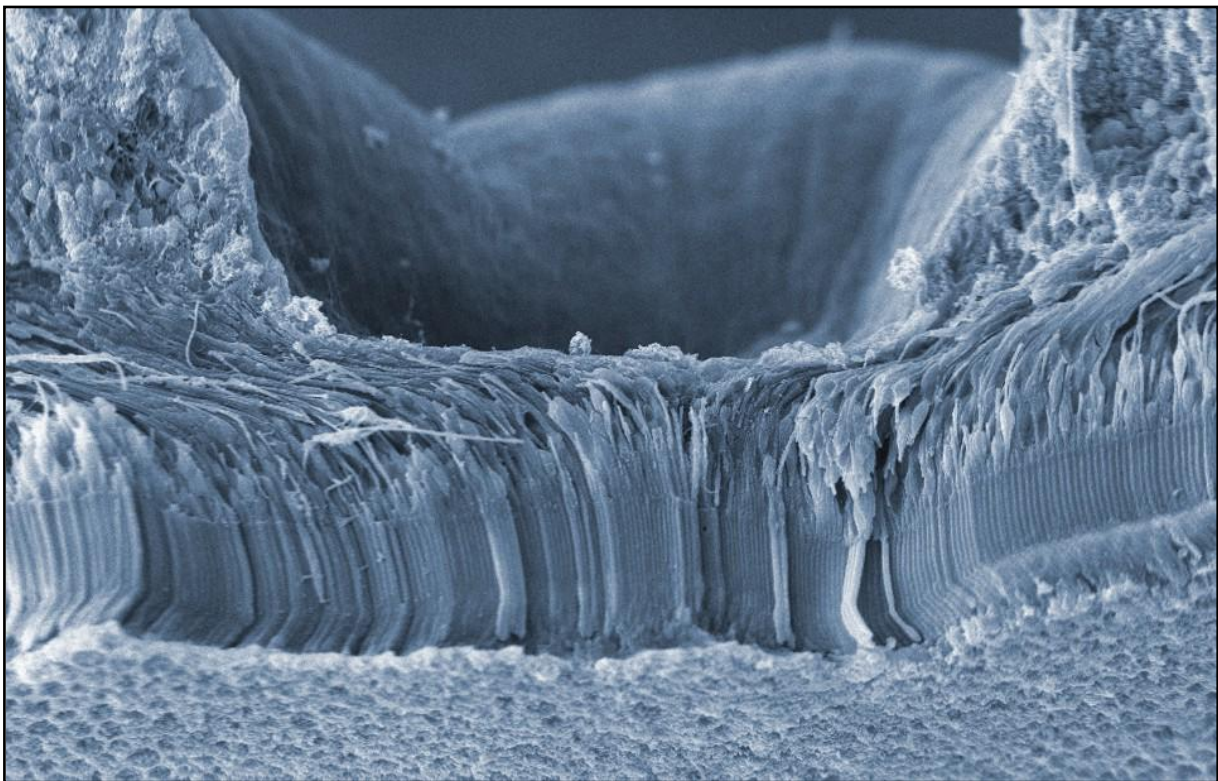
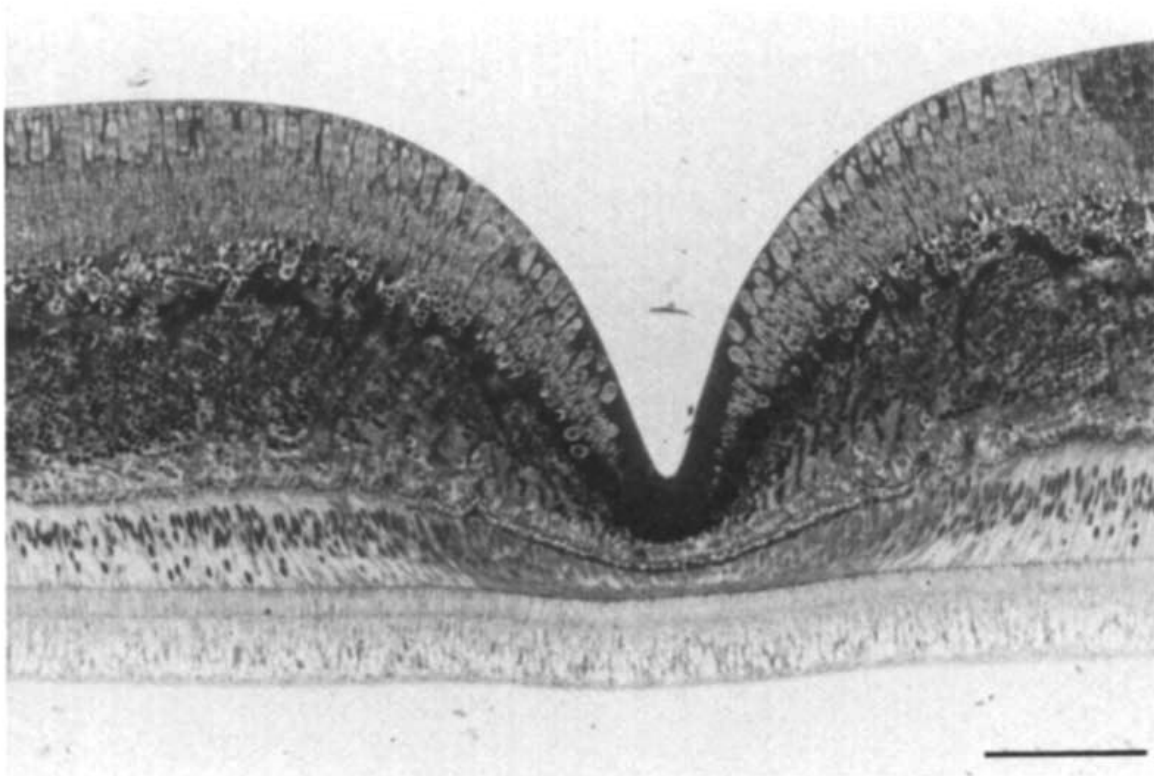


Abb. 9: Radialer Schnitt durch das Zentrum einer Primaten-Fovea. (Prieß, 2010)

4.2 Die These von Walls

Eine andere Variante der Fovea ist bei einigen Vögeln, Reptilien und Fischen zu finden. Dabei handelt es sich um eine spitze, trichterförmige Vertiefung mit einem vergleichsweise geringen Durchmesser. Anders als bei der „flachen“ Fovea handelt es sich bei der „spitzen“ Fovea um eine Art Eindellung der Netzhaut. Selbst am tiefsten Punkt ist ein Großteil der inneren Netzhautschichten vorhanden, so dass es keinen Bereich gibt, in dem das Licht direkt auf die Photorezeptoren trifft (Abb. 10). Somit könnte dieses Design als vergleichsweise nachteilig interpretiert werden. Da jedoch insbesondere Greifvögel für ihre hervorragende Sehschärfe bekannt sind (Reymond, 1985), muss sich hinter dem Konzept der Fovea mehr verbergen, als eine Exposition der Photorezeptoren.



**Abb. 9: Radialschnitt durch das Zentrum der spitzen Fovea eines Keilschwanzadlers
Balken = 100 μm (Reymond, 1985).**

Gordon Lynn Walls stellte bereits 1937 die These auf, dass die unterschiedlichen Brechungsindizes von Glaskörper und Netzhaut zu einem optischen Vergrößerungseffekt im Bereich der Fovea führen müssten. Dabei ging er davon aus, dass die Netzhautschichten völlig transparent und frei von Streuung sind. Die von Walls beschriebene Vergrößerung würde zu einer erhöhten Auflösung führen, da nun mehr Fotorezeptoren pro Bildelement erregt werden (Abb. 11) (Walls, 1937; Walls 1963).

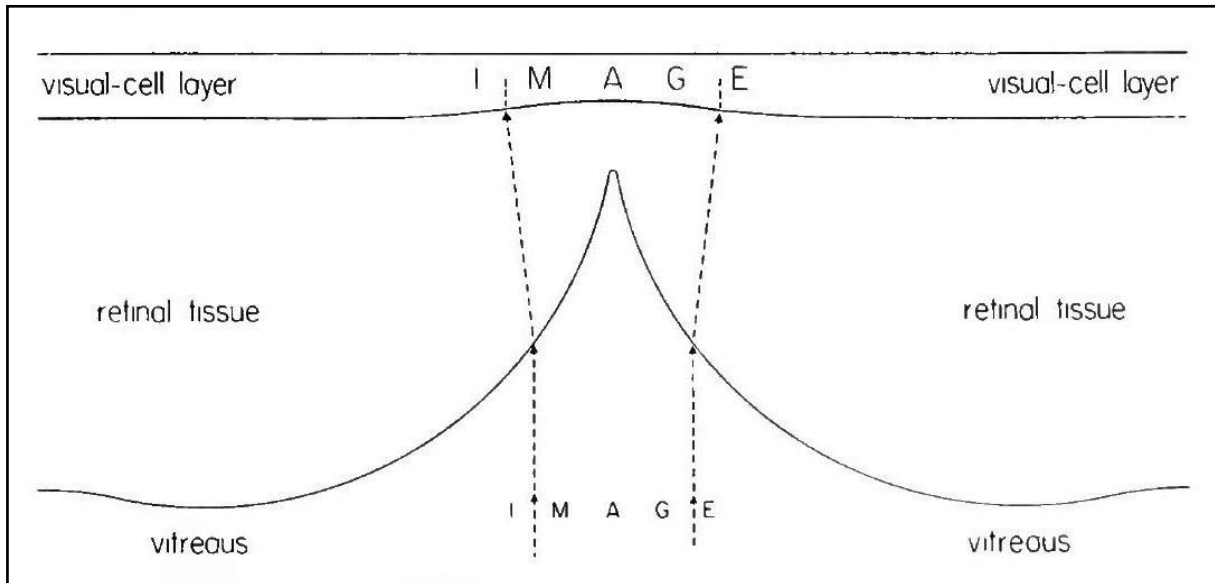


Abb. 11: Prinzip des durch eine spitze Fovea erzeugten Vergrößerungseffekts (Walls, 1963).
Anmerkung: Darstellung entgegen der üblichen Konvention, d.h. Lichteinfall von „unten“.

Diese These lässt sich auch auf die „flache“ Fovea übertragen: Durch die seitliche Verschiebung der inneren Netzhautschichten wird die Fovea von einem verdickten Randbereich umgeben, in welchem das Licht folglich noch stärker gestreut werden müsste, als im sonstigen Netzhautgebiet. Eine ringförmige Beeinträchtigung des Bildes im perifovealen Bereich wurde jedoch noch nie beobachtet. Bezüglich der These von Walls ließe sich dies durch die Lichtbrechung an den Fovea-Flanken erklären, aus welcher sich eine höhere Bildauflösung ergibt und den Signalverlust in der Fovea-Peripherie wieder ausgleicht (Abb. 12) (Prieß, 2010).

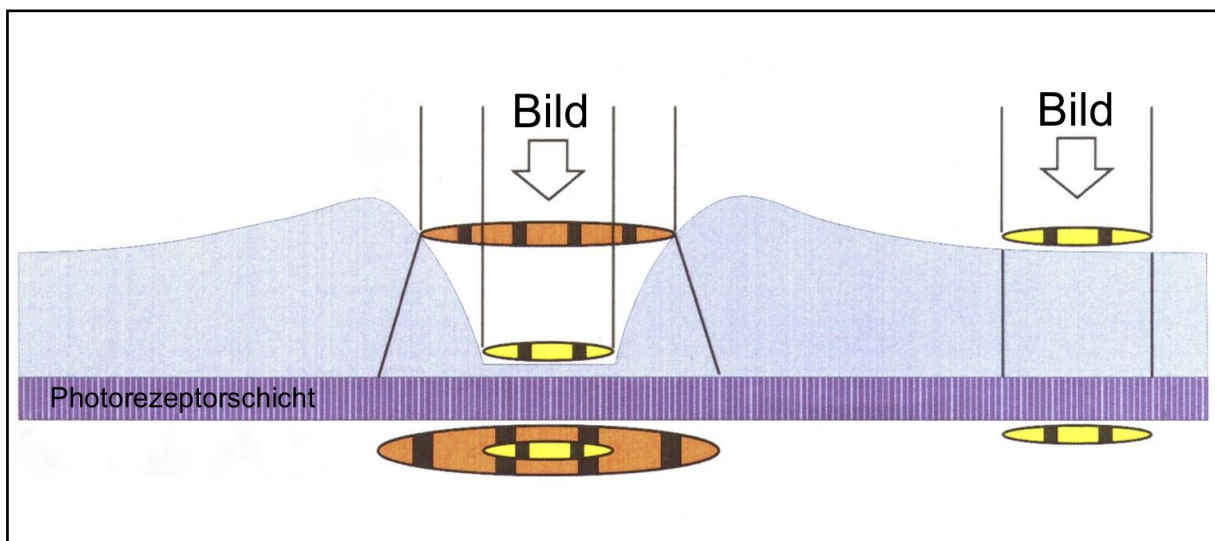


Abb. 12: Prinzip des durch eine flache Fovea erzeugten Vergrößerungseffekts (Prieß, 2010).

4.3 Experimentelle Überprüfung der These von Walls

Die Untersuchungen bezüglich eines potentiellen optischen Effekts wurden zunächst mit Hilfe von Fovea-Imitaten durchgeführt. Dabei handelte es sich um Kunststoffmodelle der flachen und der spitzen Fovea im Verhältnis 1:1. Zur Annäherung an die natürliche Optik wurde aus einer Reihe transparenter Kunststoffe ein Gießharz gewählt, dessen Brechungsindex dem der Netzhaut möglichst ähnlich ist ($n=1,51$). Da es sich insbesondere bei der spitzen Fovea um eine sehr feine Struktur handelt, ist die technische Nachbildung kompliziert. Deshalb wurden zunächst nur die Modelle der flachen Fovea untersucht.

Zur Beobachtung der optischen Wirkung wurden die Modelle jeweils in den Strahlengang eines inversen Mikroskops eingebracht. Darüber hinaus befand sich in der Ebene der Leuchtfeldblende eine kleine runde Glasscheibe, mit einem feinen Gitter (Linienabstand = $500\mu\text{m}$) auf der Oberfläche. Dieses Gitter wurde auf das Fovea-Modell projiziert, um optische Verzerrungen sichtbar zu machen. Da die Abbildung in der virtuellen Fotorezeptorebene beobachtet werden sollte, wurde zunächst die Oberseite des Objektträgers fokussiert und anschließend die optischen Abbildungen mit einer Kamera dokumentiert.

Neben den Aufnahmen mit Fovea-Modell wurde auch eine Referenzaufnahme des Gitters gemacht.

Der direkte Vergleich der durch das Modell beeinflussten Aufnahmen mit dem Referenzbild machte interessante optische Verzerrungen sichtbar (Abb. 13).

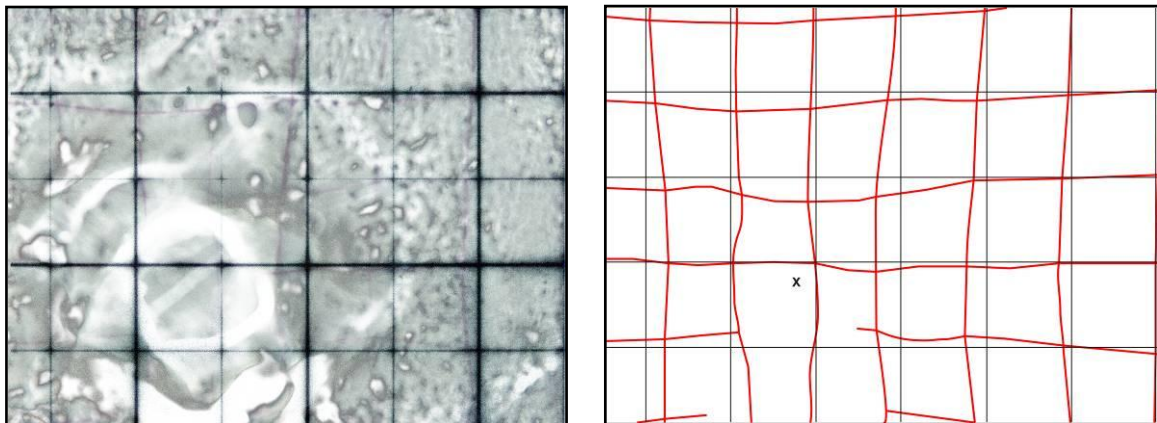


Abb. 13: Durch das Modell einer flachen Fovea erzeugte Verzerrung einer Gitterprojektion. Das „x“ markiert den Mittelpunkt der Fovea.

Da die Netzhaut jedoch kein homogenes Gewebe ist, sondern sich aus mehreren Schichten verschiedener Zelltypen zusammensetzt, ist davon auszugehen, dass sich der Brechungsindex in Abhängigkeit von der Netzhautschicht ändert. Die genauen Werte sind derzeit noch unbekannt. Somit kann allein auf Grund der modellierten Fovea-Geometrie noch keine Aussage über den tatsächlichen optischen Effekt getroffen werden.

Die beobachteten Ergebnisse zeigen jedoch, dass die These von Walls auch auf flache Foveae zutreffen könnte und motiviert zu weiteren Untersuchungen.

5. Zusammenfassung / Ausblicke

Die beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wirbeltiernetzhaut bezüglich ihrer optischen Eigenschaften ein Sinnesorgan mit bemerkenswerten adaptiven Spezialisierungen ist. Der zunächst fehlerhaft wirkende inverse Aufbau offenbart bei näherer Betrachtung eine Morphologie, welche mit technischen Entwicklungen unserer Zeit vergleichbar ist und diese eventuell noch übertrifft. So lässt sich die retinale Verteilung und Struktur der Müllerzellen mit den Glasfasern einer Faseroptischen Platte vergleichen, welche das Licht durch die Netzhaut zu den Fotorezeptoren transportiert. Die Funktion der Fovea centralis ist noch nicht geklärt. In Anbetracht eines potentiellen Linsen-Charakters, könnten zukünftige Erkenntnisse einen richtungsweisenden Einfluss im Bereich der Mikrooptik haben. Somit bietet die gesamte Wirbeltiernetzhaut als komplexes optosensorisches System die Inspiration zu innovativen Technologien. Im Bereich der medizinischen Forschung könnten mit Hilfe neuer Erkenntnisse weitere Aussagen über die Möglichkeiten und Grenzen der visuellen Wahrnehmung getroffen werden und die ophthalmologische Diagnostik unterstützen.

Durch zukünftige Untersuchungen soll die Wirkung der Fovea genauer erforscht werden. Hierfür werden nicht nur die verwendeten Fovea-Imitate optimiert, sondern auch native Retinae untersucht. Diese Untersuchungen werden sowohl am intakten Auge mittels OTC (Optische Kohärenztomographie), als auch an der isolierten Netzhaut mittels Mikroskopie durchgeführt. Die Kombination beider Verfahren soll nicht nur genauere Daten bezüglich der optischen Wirkung in Abhängigkeit von der Geometrie und Struktur liefern, sondern auch entsprechende Zusammenhänge mit der Fotorezeptordichte und -verteilung aufzeigen.

Literatur

Franze, K.; et al.: Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 104(2007)20, 8287-92

Prieß, C.: Modellierung des Strahlengangs in der Fovea Centralis der Retina (2010) Jena, Fachhochschule Jena, Fachbereich SciTec. Bachelorthesis (2010)

Reichenbach, A.: Neuroglia – das andere zelluläre Element im Nervensystem: Die Müllersche Gliazelle. Socio-medico Verlag. Wessobrunn (1999)

Reichenbach, A.: Die Wirbeltiernetzhaut – ein merkwürdiges Sinnesorgan. Sitzungsberichte der sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse. 130 (2008) 6

Ruggeri, M. et al.: Retinal Structure of Birds of Prey Revealed by Ultra-High Resolution Spectral-Domain Optical Coherence Tomography. Investigative Ophthalmology & Visual Science (IOVS). 51(2010)11, 5789-95

Welsch, N.; et al.: Farben: Natur, Technik, Kunst. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg (2007)

Walls, G. L.: Significance of the Foveal Depression. Archives of Ophthalmology. 18 (1937) 6, 912-919

Walls, G. L.: The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation. 2. Auflage. Hafner Publishing Company. New York (1963)

Werner, B.: Modellierung des Strahlengangs durch das Netzhautgewebe (2010) Jena, Fachhochschule Jena, Fachbereich SciTec. Bachelorthesis (2010)