

23.04.2021

Symmetrie und Sehen

⇒ Dieser Artikel behandelt den Zusammenhang zwischen bilateraler Symmetrie und dem Sehsinn mit zwei Augen. Wichtige Beobachtungen von Funktionen der am Sehen beteiligten Nervenzellen, Verlauf der Nervenbahnen und Aufgabe der Verarbeitungszentren werden im Zusammenhang mit dem symmetrischen Auftreten von Augenpaaren betrachtet.

Lebensformen und ihre Eigenschaften entwickeln sich selbstorganisiert. Auffallend dabei ist, dass sich mit dem Evolutionsschritt zu bilateral-symmetrischen Körperformen vor rund 540 Millionen Jahren eine explosionsartige Weiterentwicklung vollzog. Grundlage dafür waren Symmetrie und Zentrales Nervensystem (siehe <https://www.kruegergold.de>). Lebewesen sind auf ihre Sinne angewiesen, um auf ihre Umwelt reagieren zu können. Mit den komplexer werdenden symmetrischen Lebensformen erst entstand das Sehen mit zwei Augen.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einordnung
- 2 Grundlagen des Seh-Apparats
- 3 Was Evolution kann und was nicht
- 4 Überschneidung der Gesichtsfelder beider Augen
- 5 Evolution verzeiht Beschädigungen
- 6 Regelungslogik des Seh-Apparats

Einordnung

Die medizinische Erforschung des Gehirns hat zu einer Fülle an Wissen geführt, welches es heute ermöglicht, zu Kern-Aspekten des Seh-Apparats vorzudringen, die das Ergebnis grundlegender Weichenstellungen gewesen sein könnten. In diesem Artikel werden Einzelbeiträge der am Sehen beteiligten Teile des Gehirns herausgestellt und die Tür zu einem funktionalen Verständnis einer schrittweisen Evolution geöffnet.

Unsere Augen konnten sich aus einer auf Symmetrie fußenden Systematik heraus entwickeln und das trotz ihrer am Ende enormen Komplexität. Mit der gezeigten Auswahl neuronaler Funktionen und ihrer Zusammenhänge entsteht ein klares Bild zum Ablauf der Evolution.

Grundlagen des Seh-Apparats

Die für die Darstellung hier wichtigen Stationen des Sehens bei Wirbeltieren und beim Menschen lassen sich wie folgt ordnen. Hier verwendete medizinische Bezeichnungen sind zum Teil nur Experten geläufig und sollen bei der weiterführenden Recherche helfen.

(A) Augapfel mit

- Pupille mit Pupillenverenger und dessen Gegenspieler Musculus dilator pupillae,
- Elastische Linse und Ziliarmuskel für die Akkommodation des Nah-/Fern-Sehens,
- Netzhaut oder Retina auf der Innenseite der hinteren Augenhaut im Augapfel,
- Fotorezeptorzellen, rot/grün/blau-empfindliche Zapfen, Stäbchen für schwarz/weiß,
- Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen für die Verschaltung der Rezeptoren,
- Ganglienzellen der Netzhaut, untergliedert in On- und Off-Zentrum-Ganglienzellen.

Ganglienzellen reagieren auf ein rezeptives Feld, einen ganzen Bereich von Rezeptoren. On-Zentrum-Ganglienzellen werden bei Lichteinfall im Zentrum erregt und bei Lichteinfall im Umfeld ihres rezeptiven Feldes gehemmt. Off-Zentrum-Ganglienzellen reagieren umgekehrt. Bei der visuellen Informationsverarbeitung bei Primaten wird farbliches Sehen ermöglicht. Dazu gibt es drei Arten von Ganglienzellen, für Hell/Dunkel-Unterscheidung sowie für Rot/Grün- und Blau/Gelb-Kontrast.

Über diese Stationen tritt das Licht ins Auge ein, wird fokussiert, nach Farbschemata differenziert erfasst und mit zwei Verschaltungswirkungen, On- und Off-Zentrum, auf Ganglienzellen abgebildet. Die Nervenfasern der Ganglienzellen formieren sich dann zum Sehnerv.

(B) Sehleitung mit

- Sehnerv oder Nervus opticus,
- blinder Fleck, Papille, wo die Nervenfasern der Ganglienzellen den Augapfel verlassen,
- Chiasma opticum, Kreuzungspunkt, an dem Fasern von der nasalen Hälfte der Netzhaut zur gegenüberliegenden Gehirnhälfte wechseln und der Rest nicht wechselt,
- Sehstrang oder Tractus opticus oder auch Sehbahn,
- Corpus geniculatum laterale im Thalamus mit Verschaltung über Zwischenneurone,
- Sehstrahlung oder Radiatio optica, führt vom CGL zum primären visuellen Cortex.

Über diese Stationen wird das Bild beider Augen transportiert und jeweils in einen linken und rechten Bildteil geteilt und dann neu gebündelt, so dass beide nach links schauenden Bildteile beider Augen zur rechten Gehirnhälfte gelangen und umgekehrt. Bei Primaten bleibt die Differenzierung der drei Arten von Ganglienzellen der Netzhaut mit ihren jeweiligen Farbschemata erhalten, in dem diese auf übereinanderliegende sechs Schichten im CGL des Thalamus zugeordnet werden. Die Schichten 1, 4 und 6 erhalten Signale vom gegenüberliegenden, die Schichten 2, 3 und 5 vom Auge auf derselben Körperseite. Eine Gehirnhälfte erhält so die Bildsignale der gegenüberliegenden Hälfte des Gesichtsfeldes.

(C) System für die Ansteuerung der Augapfel-Muskeln mit

- 10% der Sehnervenfasern, welche die Sehbahn verlassen,
- Praetectum oder Area pretectalis im Epithalamus,
- Commissura posterior verbindet mit Praetectum der andern Hirnhälfte,
- Edinger-Westphal-Kern oder Nucleus accessorius nervi oculomotorii im Mittelhirn als Ursprungskern der parasymphatischen Nervenfasern des dritten Hirnnervs,
- Ganglion ciliare für die Umschaltung von prä- auf postganglionäre Neurone,
- parasymphatische Nervenfasern vom GC zum Pupillenverenger und Ziliarmuskel, ... und neben der parasymphatischen Steuerung ergänzend noch:

- Sympathikus, der eigenständig für Aktivität im Flucht-oder-Kampf-Fall sorgt,
- Oberes Halsganglion od. Ganglion cervicale superius, Umschaltstation d. Sympathikus,
- sympathische Nervenfasern, die das Ganglion ciliare ohne Umschaltung durchlaufen,
- Musculus dilator pupillae, welcher die Pupille weitet.

Mit diesen Stationen wird die Lichtmenge, die durch die Pupille einfällt, reguliert. Bei Panik werden alle Feinheiten übergangen und der Lichteinfall maximiert. Über den Edinger-Westphal-Kern wird dem entgegengesteuert und auch die Lichtbrechung der Linse und damit die Trennschärfe der Signale einzelner Sehnervenfasern über den Ziliarmuskel eingestellt.

Was Evolution kann und was nicht

Grundlage der Evolution ist ein Auswahlprozess, angetrieben durch fortwährende Änderungen des Erbguts, durch Mutationen. Im einen oder anderen Fall führt das zu einer durchsetzungsstarken Weiterentwicklung. Das ist selten und die meisten Mutationen bringen keinen Vorteil oder führen sogar zum Tod, oft bereits in der Embryo-Phase.

Was die Evolution nicht kann, ist Wunder vollbringen. Das wäre etwa der Fall, wenn mehrere Teile eines Ganzen wie etwa die Elemente des Seh-Apparats aus einem einzigen Schritt bei der Änderung von Erbgut hervorgehen könnten. Bei der Analyse des Zusammenhangs zwischen Symmetrie und Sehsinn wird berücksichtigt, dass sich einzelne Elemente des Seh-Apparates nacheinander entwickeln können und jedes für sich mit nachfolgenden Mutationen nach und nach höhere Komplexitätsstufen erreichen kann. Was die Evolution kann lässt sich systematisch erfassen. Am Anfang der Überlegung stehen generelle Wirkmechanismen, die für den Sehsinn, wie wir ihn kennen, funktionieren müssen.

1. Das Gehirn erkennt aus der Beliebigkeit eingehender Nervenreize, dass es sich um konkrete Informationen der Umgebung handelt. Dazu muss es einen zweiten und unabhängigen Signalweg für identische Informationsinhalte geben. Die synchronen Erregungen am Ende beider Signalwege müssen derart zusammenlaufen, dass diese im Zusammenhang interpretierbar werden. Das wird durch zwei baugleiche Augen und durch Überschneidung ihrer jeweiligen Gesichtsfelder unterstützt.
2. Das Gehirn unterscheidet das Vorhandensein von Licht an einem Rezeptor vom Nichtvorhandensein und ist in der Lage das Sehen so zu kalibrieren, dass sich eine Weiterverarbeitung lohnt. Das wird durch Differenzierung in 50% On- und 50% Off-Zentrum-Ganglienzellen unterstützt. Es entsteht eine Art Gegenspieler-Mechanismus.
3. Der Seh-Sinn schafft die Grundlagen für das Erkennen von Strukturen der Umgebung. Dazu muss es eine nützliche Eigenschaft der verarbeiteten Signale geben. Das wird durch Spezialisierung der Ganglienzellen der Netzhaut auf Kontraste gut unterstützt.
4. Mit zunehmender Komplexität des Auges verarbeitet das Gehirn Bilder mit höherer Detail-Auflösung, die von der Anzahl der Ganglienzellen der Netzhaut und ihrer efferenten Nervenfasern bestimmt wird. Dazu muss es eine wirksame Differenzierung der jeweiligen Informationsinhalte geben. Dies wird bei der Weiterverschaltung im CGL und dort durch nach Informationsart differenzierte Schichten unterstützt.
5. Der Seh-Apparat kommt damit zurecht, dass die Bildschärfe mit Nah- und Fern-Sehen variiert. Dazu muss die Trennschärfe für Detail-auflösende Signale gezielt beeinflusst werden. Dies wird mit dem System zur Ansteuerung der Augapfel-Muskeln unterstützt.

Es ist vorstellbar, dass die aufgeführten Wirkmechanismen auch mit einem jeweils primitiven Anfangsstadium funktionieren. Die Möglichkeit ihrer schrittweisen Evolution ist damit plausibel.

Überschneidung der Gesichtsfelder beider Augen

Zwei Augen sehen mehr als eines. Allerdings befindet sich im Gesichtsfeld beider Augen im Bereich einer gedachten Achse, die das Gesehene Bild in einen Teil links und einen rechts der Symmetrieebene des ganzen Körpers gliedert, auch ein zentraler Bildbereich. Dieser wird mit beiden Augen gleichermaßen erfasst. Es wird erwartet, dass auch Lebewesen, deren Augen seitlich angeordnet sind, zumindest einen minimalen zentralen Bildbereich mit beiden Augen zugleich erfassen. Körpermitte und Symmetrieebene geben dem Seh-Sinn seine Orientierung.



Bild: Beide Augen sehen einen gemeinsamen Bildbereich um die Achse der Körpersymmetrie.

Die Sehleitung teilt die Nervenfasern am Chiasma opticum so auf, dass ausgehend sowohl vom linken als auch vom rechten Auge ein jeweils auf der linken Seite des Körpers gesehenes Teilbild zur rechten Gehirnhälfte gelangt und umgekehrt. Die in der Darstellung unten farblich gleich unterlegten Teilbilder gelangen zur jeweils passenden Gehirnhälfte. Im Corpus geniculatum laterale werden sie separat auf übereinanderliegende Schichten projiziert. Zum Erkennen, dass es sich um nicht beliebige Informationen der Umgebung handelt, genügt ein minimaler Bildbereich, der exakt gleich von beiden Augen aus beide Gehirnhälften erreicht. Eine Grenzlinie, die in den Bildteil für die linke und den für die rechte Gehirnhälfte teilt, gibt es nicht.

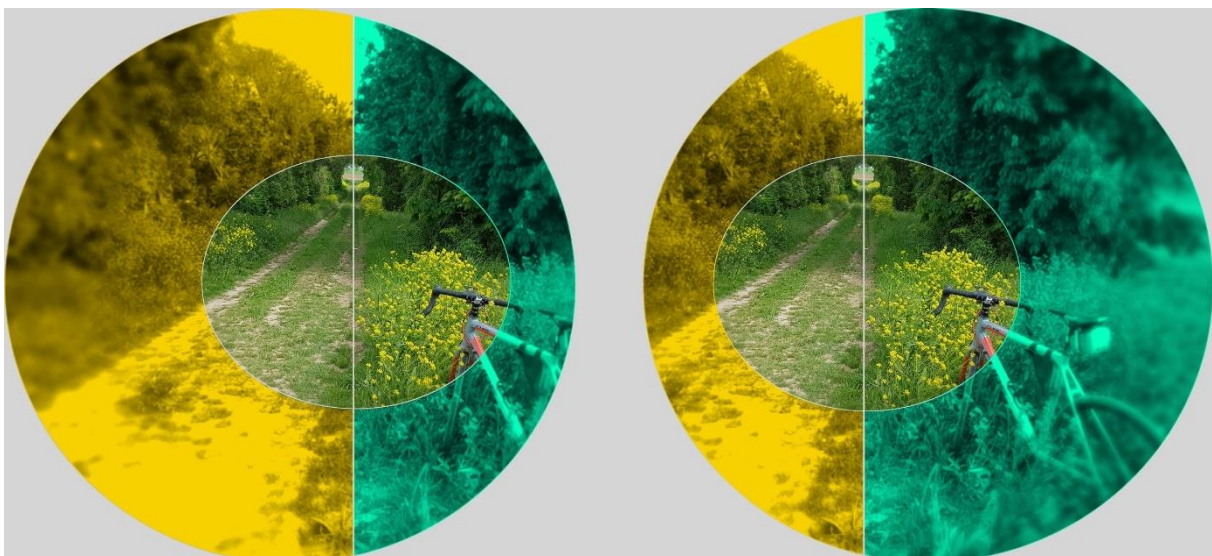


Bild: Aufteilung der Gesichtsfelder beider Augen zur Verteilung auf die Gehirnhälften

Evolution verzeiht Beschädigungen

Das erste Wesen, das jemals mit zwei Augen ausgestattet war, hätte mit Verlust eines Auges bei seiner Geburt niemals lernen können, nur mit dem verbleibenden zu sehen. Vorstellbar ist ein primitiver Sehsinn mit nur wenigen oder sogar nur einer einzigen Fotorezeptorzelle. Damit wäre die Information der Umgebung, ob es gerade hell oder dunkel ist, zu erfassen. Im besten Fall noch zusätzlich die Information, ob es eher vorne oder hinten, links oder rechts, oben oder unten heller ist. Das erste Wesen hätte weder Vorfahren noch eigenes Wissen, aus dem es zuverlässig schließen könnte, ob ein Nervenreiz eine Information der Umgebung transportiert oder irrelevant ist, etwa als Folge eines spontan ausgelösten Nervenimpulses.

Der springende Punkt beim Fortgang der Evolution ist nicht allein das Erreichen einer höheren Komplexität des Seh-Apparates. Wichtiger noch ist das Erreichen einer höheren Robustheit gegen kleinere und größere Schäden bis hin zum Ausfall eines der beiden Augen. Robustheit ist ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal beim Kampf ums Überleben. Es genügt also nicht allein, durchsetzungsstarke Eigenschaften weiterzuentwickeln, der Mechanismus muss auch Beschädigungen verzeihen. Genau das leistet die schrittweise Entwicklung des Seh-Apparats mit der auf Symmetrie fußenden Systematik.

Kein komplexes Sehen, wenn die Tierart nicht zwei Augen hat. Diese Systematik bringt zugleich eine verblüffend einfache Verbesserung der Robustheit mit. Ein einzelnes Individuum kann nach Verlust eines Auges weiterhin sehen, da das Bild des gesunden Auges nutzbar bleibt. Wenn auch verteilt auf zwei Gehirnhälften. Das ist nun kein Widerspruch zum oben genannten Paradigma, welches einen zweiten Signalweg für identische Informationsinhalte fordert. Denn es schleicht sich nach und nach ein vererbtes Signalwege-Wissen ein, welches Informationen der Umgebungen als das, was sie sind, einordnet. Und das ohne ein erneutes Erlernen durch das Individuum. Im übertragenen Sinn übernimmt das Erbgut die Aufgabe des zweiten Signalwegs.

Erbgutveränderungen tragen fortlaufend kleine Verbesserungen an allen Systemteilen bei, vom Augapfel über die Sehleitung bis zur Steuerung und Verarbeitung. Nebeneffekt und evolutionärer Vorteil ist neben besserem Sehen ein schnelleres Wachstum in der Embryo-Phase und kürzere Lernphasen des Individuums. Die Weiterentwicklung der Gehirnzentren und ihre Verknüpfungen untereinander einschließlich der Synchronisierung zwischen links und rechts tragen zum Erfolg des Seh-Apparats bei und machen ihn robust.

Regelungslogik des Seh-Apparats

Unabhängig von der Tierart, die im Verlauf der Evolution ihren Seh-Apparat weiterentwickelt, verfügt diese über symmetrisch angeordnete Augen, die einen in Bezug auf die Symmetrieebene des Körpers mittigen Bildbereich vor dem Körper erfassen. Dieser wird von beiden Augen erfasst und von dort zu beiden Gehirnhälften projiziert. Je mehr die Augen bei Tieren seitlich angeordnet sind, desto mehr rückt dieser mittige Bildbereich an den zur Nase gelegenen Rand des Gesichtsfelds des jeweiligen Auges. Die Projektion eines identischen Bildbereichs für beide Gehirnhälften ist bei Mensch und Tier das Ass, welches die Evolution im Ärmel hat. Es sorgt mithilfe der Redundanz gleicher Informationsinhalte dafür, dass Zusammenwirken und Verflechtungen beider Gehirnhälften intensiviert werden. Damit liegt es nahe, dass ein Mehr an Robustheit und Komplexität davon profitiert, wenn sich der Überschneidungsbereich der Gesichtsfelder beider Augen vergrößert. Beachtenswertes Nebenprodukt einer zunehmenden Komplexität ist etwa unser dreidimensionales Sehen.



Bild: Identischer Bildbereich, der von beiden Augen aus beide Gehirnhälften erreicht

Ein besseres Sehen und ein höherer Nutzen werden mit Regelkreisen justiert, die sich die Verflechtung beider Gehirnhälften auf Grundlage des beidseitig verarbeiteten Bildbereichs zu Nutze machen. Zu den geregelten Größen zählen die Öffnungsweite der Pupillen für den Lichteinfall und die Nah-/Fern-Ausrichtung per Ziliarmuskeln für die Augen-Akkommodation. Auch die mit Verdrehen der Augen gesteuerte Blickrichtung trägt zur Gesamtfunktion bei. Der für die Regelkreise zwischen den Gehirnhälften benötigte Nervenstrang ist die Commissura posterior. Pupillen und Akkommodation werden bei beiden Augen synchron justiert.

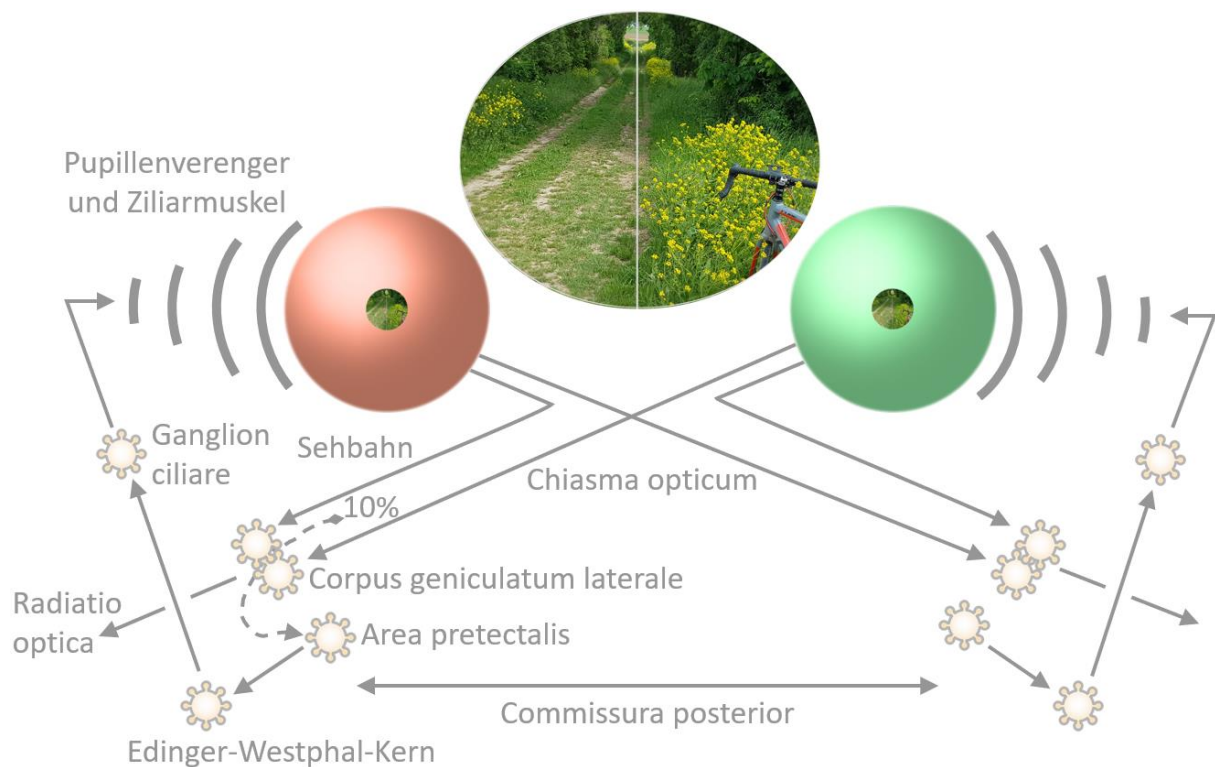


Bild: System für die Ansteuerung der Augapfel-Muskeln über parasympathisches System

Die an dieser Stelle herausgestellten Regelungsgrößen nutzen nicht nur den beidseitig verarbeiteten mittigen Bildbereich, sie regulieren umgekehrt auch die Seh-Schärfe, welche in diesem Bereich zu erzielen ist. Vorausgesetzt es gibt dort genügend Rezeptoren.

Ein eng einzugrenzendes Areal der Netzhaut ist die Makula, durch deren Mitte die Sehachse verläuft. Sie nimmt weniger als 1% der Netzhautgröße ein, wobei von ihr etwa die Hälfte der Nervenfasern des Sehnervs ausgeht. In ihrem Zentrum, der Fovea centralis oder Sehgrube, wird beim Menschen eine Dichte von 150.000 Zapfenzellen pro Quadratmillimeter erreicht. Diese Stelle liegt auf der Netzhaut 5° entfernt von der anatomischen Achse des menschlichen Auges. Das passt genau zu der Achse, die durch den Schnitt mit der Symmetrieebene des Körpers entsteht und die das Gesichtsfeld in links und rechts teilt. Im Gesichtsfeld eines Auges rückt diese Achse zur Nase hin. In der um 180° gedrehten optischen Projektion auf der Netzhaut rückt sie von der Nase fort zur Seite des Körpers hin. Und genau hier liegt die Makula an der richtigen Stelle. Auch für Tiere kann vorhergesagt werden, dass sich die Dichte an Fotorezeptorzellen nach dem Überschneidungsbereich der Gesichtsfelder der Augen richtet.

Die Aufteilung der Nervenfasern aus einem zur Körpersymmetrie mittigen Bildbereich auf beide Gehirnhälften reduziert zwar im jeweiligen linken oder rechten Teilbild an genau dieser Stelle die Auflösung. Da im betroffenen Areal zugleich auch die höchste Dichte an Fotorezeptorzellen liegt, fällt eine Halbierung der Nervenfasern hier nicht ins Gewicht. Zudem sind die Signale nicht verloren, sie sind nur auf zwei Gehirnhälften verteilt. Und es passt zur Logik des Mechanismus. Beide Gehirnhälften müssen kooperieren. Auf die Makula, bzw. das Areal mit der höchsten Dichte an Fotorezeptorzellen ist die Regulierung der Seh-Schärfe ausgerichtet. Regelkreise, die beide Gehirnhälften überbrücken, werden dadurch weiter gefestigt. Für das vom Gehirn wahrgenommene Bild verschwindet die Trennung in einen linken und rechten Bildteil und die am Chiasma opticum aufgeteilten Informationen werden zusammengeführt.

Die oben gezeigte System-Darstellung verdeutlicht das Zusammenspiel neuronaler Elemente. Die medizinische Forschung kann Gehirnfunktionen heute schon recht gut abgrenzen, ist aber noch nicht in der Lage, das Regulationsgeschehen auf Basis einzelner Nervenimpulse und in Echtzeit zu beobachten. Allein die Zuordnung der heute bekannten Funktionen einzelner Ganglien und Gehirnzentren kann als Bestätigung der grundlegenden Schlussfolgerung in diesem Artikel gesehen werden. Danach wäre die bilaterale Symmetrie, wie wir sie in der Natur allgegenwärtig beobachten, auch die Voraussetzung für unser heutiges Sehen.

Dieser Artikel beschränkt sich auf den Seh-Apparat und öffnet damit die Tür zu einem funktionalen Verständnis. Es ist zu erwarten, dass sich eine weiterführende Analyse des visuellen Cortex und dessen Zusammenwirken mit CGL und Thalamus sowie mit der gegenüberliegenden Gehirnhälfte gut anschließen ließe.