

Gegensätzlichkeit bringt uns das Denken

⇒ Der Artikel veranschaulicht eine Systematik zur zweckmäßigen Verschaltung zwischen Stufen der Informationsverarbeitung im Gehirn. Eine nähere Betrachtung des Sehens und neuronaler Abläufe untermauert ein wiederkehrendes Muster der Gegensätzlichkeit bei In- und Output-Signalen.

1 Hypothese zu Gegensätzlichkeit als Prinzip

Vieles, wie etwa unsere Augen, konnte sich aus einer auf Symmetrie fußenden Systematik heraus entwickeln. Bemerkenswert ist die dabei entstandene Vielfalt und funktionale Tüchtigkeit. Seit der kambrischen Explosion der Artenvielfalt vor etwa 540 Mio. Jahren und der Entstehung höherer Lebensformen spielt das zentrale Nervensystem mit Gehirn eine Rolle. Zeitgleich mit dieser Entwicklung kam der bilateral-symmetrische Körperbau auf. Und damit eine erste grundlegende Gegensätzlichkeit – links und rechts.

Das führt zu der Frage, welche Prinzipien hinter den neuronalen Entwicklungen stehen. Die Suche richtet sich auf funktionale Konzepte, die grundsätzliche Antworten auf ein Herangehen an Informationsverarbeitung im Allgemeinen geben könnten. Ein Ansatzpunkt der Betrachtung ist der Informationsaustausch über Nervenfasern zwischen separaten Arealen im Gehirn. Wie finden Nervenfasern bzw. Axone von ihrem Startpunkt zu einer nächsten Stufe der Informationsverarbeitung? Wie kommt es zur Ordnung, bei der Neurone die Anordnung einer vorgelagerten Verarbeitungsstufe beibehalten? So reagieren benachbarte Neurone im somatosensorischen Cortex wie auch die entsprechend benachbarten Neurone im dazwischengeschalteten Thalamus auf Reize benachbarter Körperstellen – sie sind somatotop gegliedert. Ähnlich verhält es sich mit benachbarten Orten auf der Retina. Diese werden bildgetreu über aufeinanderfolgende Stufen hinweg über retinotop angeordnete Neurone verschaltet. Eine Hypothese zu möglichem Wachstum und Wegfindung von Axonen soll weiterhelfen. Der springende Punkt wird dann sein, wie sehr sich die Konsequenzen der wie folgt formulierten Hypothese in den neuronalen Abläufen widerspiegeln.

Es soll angenommen werden: >> Axone, die Informationsverarbeitungsstufen miteinander verbinden, hängen wesentlich davon ab, dass sie von Axonen benachbarter Start-Neurone begleitet werden, deren jeweilige Aktivierungen sich gegenseitig möglichst ausschließen. <<

Neurone finden sich häufig in einer dichotomen 50:50-Zweiteilung. Die einen stehen für einen Informationsinhalt, die anderen für das Gegenteil. Perfekt lässt sich das exakte Gegenteil eines Informationsinhalts im Gehirn nicht ermitteln. Die Felder an Neuronen oder Rezeptoren, von denen gegensätzlich agierende Neurone ihren Input beziehen, haben stets Überlappungen mit der Nachbarschaft. Dieser Überlappungsunschärfe wird durch eine automatische Selektion besser geeigneter Informationsinhalte entgegengewirkt. So hat die visuelle Bildverarbeitung zu einer Selektion der Empfindlichkeit auf starke Kontraste geführt. Benachbarte Ganglienzellen der Retina können höchstens bei Übergängen oder entlang von Linien auf denselben Kontrast reagieren. Der Kontrast entsteht nun gerade dadurch, dass es in der

Nachbarschaft anders aussieht. Reagiert ein Neuron auf einen visuellen Bild-Kontrast, so kann man davon ausgehen, dass sich Neurone in der Nachbarschaft eher ruhig verhalten. Noch erheblich sicherer ist zugleich, dass sich ein antagonistisches Nachbar-Neuron, welches das Gegenteil der Information darstellt, definitiv nicht regt. Eine ruhige Nachbarschaft bei eigener Aktivität überträgt sich genau dann auf die nächste Stufe der Informationsverarbeitung, wenn entsprechende Neuronen-Anordnungen beibehalten werden. Somatotope, retinotope und andere Formen der Beibehaltung einer Anordnung vertragen sich recht gut mit der Hypothese.

2 Partnerschaft gegen Zelltod der Neurone

Die Apoptose ist ein Mechanismus, der geschädigte oder funktionsuntüchtige Neurone sterben lässt. Dieses Schicksal erfahren auch überflüssige Neurone, denen es nicht gelingt, ihre Axone an einem Zielort dauerhaft mit Empfangsstellen zu verschalten. Es stellt sich also nicht nur die Frage, wie Nervenfasern von ihrem Startpunkt zur nächsten Stufe der Informationsverarbeitung finden. Es muss einen Mechanismus geben, der eine Wachstumsphase zulässt und vor dem Zelltod bewahrt, während ein Axon noch auf dem Weg zu seinem Ziel ist. Wenn sich zwei Partner-Axone gegenseitig in ihrer Wachstums- und Wegfindungsphase ihre fortgesetzte Existenz sichern würden, dann wäre das darauf eine Antwort und verträge sich ebenfalls recht gut mit der o. g. Hypothese. Partner-Axone würden bei ihrer Wanderschaft abwechselnd die Funktion des Zielorts einnehmen. Zugleich würde es den Beiden erleichtert, zu benachbarten Neuronen im Eingangsbereich der nachfolgenden Informationsverarbeitungsstufe zu finden.

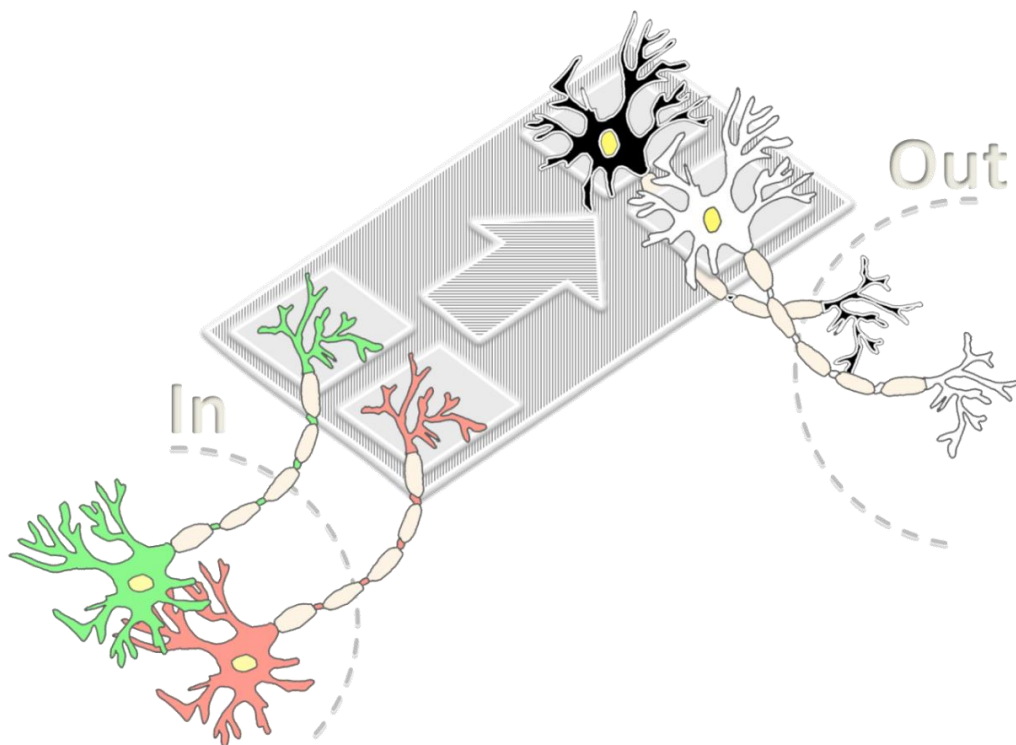


Bild: Inhaltlich gegensätzliche Input-Neurone führen zu *anders-gegensätzlichem* Output.

Richtig spannend wird die eingeschlagene Denkrichtung, wenn das Prinzip der Gegensätzlichkeit von einer Stufe der Informationsverarbeitung auf die nächste übertragen wird und sich so theoretisch beliebig oft fortsetzt. Was sich von Stufe zu Stufe ändert ist der Informationsinhalt. Gleich bliebe das Prinzip. Allerdings würden gegensätzliche Input-Signale zu *anders-gegensätzlichen* Output-Signalen verarbeitet.

3 Bilateral-symmetrischer Körperbau und Sehen

Ohne bilateral-symmetrischen Körper kein zentrales Gehirn. Beides hängt zusammen. Aufgabe des Gehirns ist die Wahrnehmung von Reizen der Umgebung und die Reaktion mit Muskelbewegungen. Sensible Nervensignale und motorische Befehle werden in einen Zusammenhang gebracht. Wie die Stellen, auf die sich die Sensorik bezieht, in ein Körperwissen und Gesamtbild eingeordnet werden, ist Gegenstand eines separaten Artikels. Der behandelt u. a. Pfadfinder-Qualitäten der Axone und deren Wachstum zur gegenüberliegenden Körperseite.
→ <https://www.kruegerGold.de/Texte/2021-Wer-Wie-Was-Evolution.pdf> ... Illustration daraus:

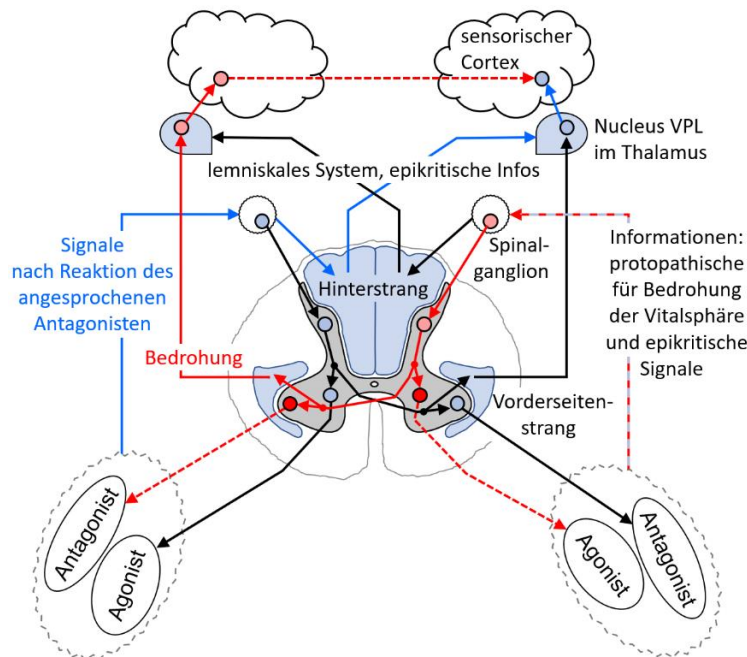


Bild: Körperseiten-übergreifende Nervensystem-Verschaltung bei Säugetieren

Wichtige Beobachtungen von Funktionen der am Sehen beteiligten Nervenzellen, Verlauf der Nervenbahnen und Aufgaben von Verarbeitungszentren werden in einem weiteren Artikel mit dem symmetrischen Auftreten von Augenpaaren betrachtet. Ohne Symmetrie kein Sehen.
→ <https://www.kruegerGold.de/Texte/2021-Symmetrie-und-Sehen.pdf>

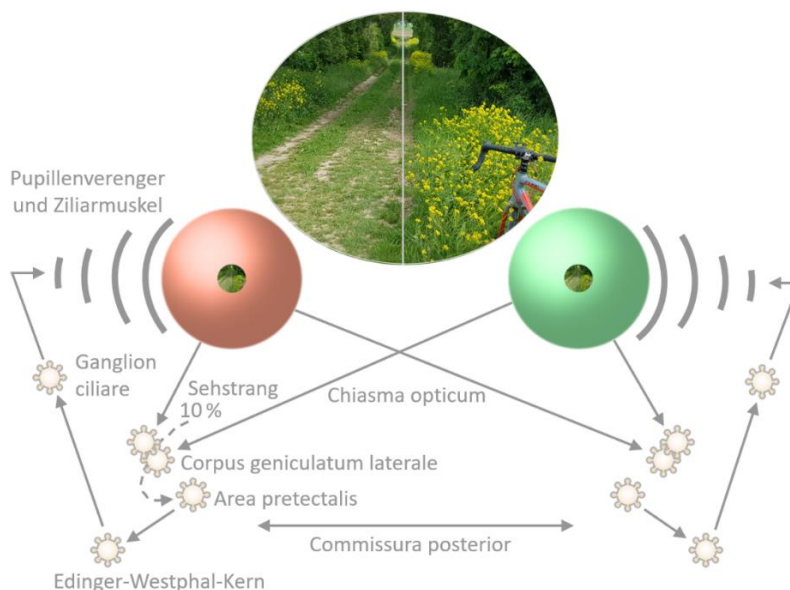


Bild: System für die Ansteuerung der Augapfel-Muskeln über parasympathisches System

4 Sehen und visuelle Verarbeitung

Gehirnareale der visuellen Verarbeitung sind in der Neurologie am besten erforscht. Eine vieler Quellen: https://www.kurt-paulus.de/pdf/Visuelle_Verarbeitung_im_Gehirn_com.pdf ... Die Fülle des vorhandenen Wissens wird genutzt, um das Prinzip der Gegensätzlichkeit als Erfolgsfaktor hinter den komplexen Abläufen einzuordnen. Gegensätze und Symmetrien sind darin mehr als nur Beobachtungen. Sie sind der Treiber der Evolution und der Gehirne.

On- und Off-Zentrum-Ganglienzellen auf der Netzhaut sind etwa 50:50 gleichverteilt. Dasselbe gilt für die weiterleitenden Nervenzellen im Corpus geniculatum laterale des Thalamus und für die empfangenden Zellen der Eingangsschicht IV-C des visuellen Cortex. Bis zu dieser Stufe der visuellen Verarbeitung reagieren die beteiligten Nervenzellen auf Bildpunkte in der On-/Off-Zentrum-Logik. Das ändert sich ab hier.

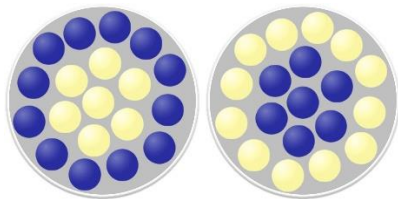


Bild: On- und Off-Zentrum-Zellen reagieren zueinander gegensätzlich auf ihr rezeptives Feld.

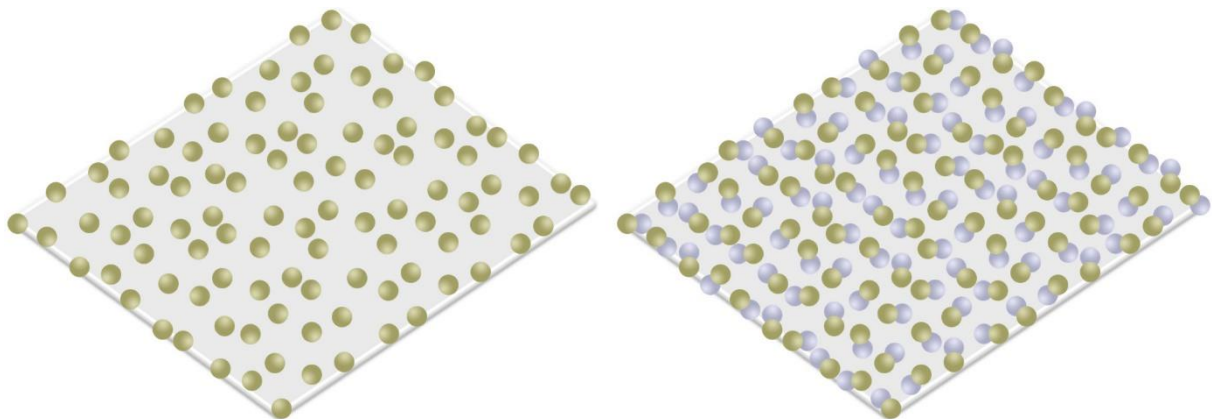


Bild: Zu on-Zentrum- gibt es gleich viele off-Zentrum-empfindliche Zellen in der Schicht IV-C.

In der Schicht IV-C des primären visuellen Cortex (V1) kommen die Nervenfasern vom Corpus geniculatum laterale (CGL) des Thalamus an. In dieser Schicht unterscheidet man *einfache* und *komplexe* kortikale Zellen sowie „endinhibierte“ Zellen. Die einfachen Zellen reagieren am stärksten auf Linien an einem bestimmten Ort und in einer bestimmten Orientierung zwischen 0° und 180° zur Waagerechten – bis zu einer Abweichung von $\pm 10^\circ$.

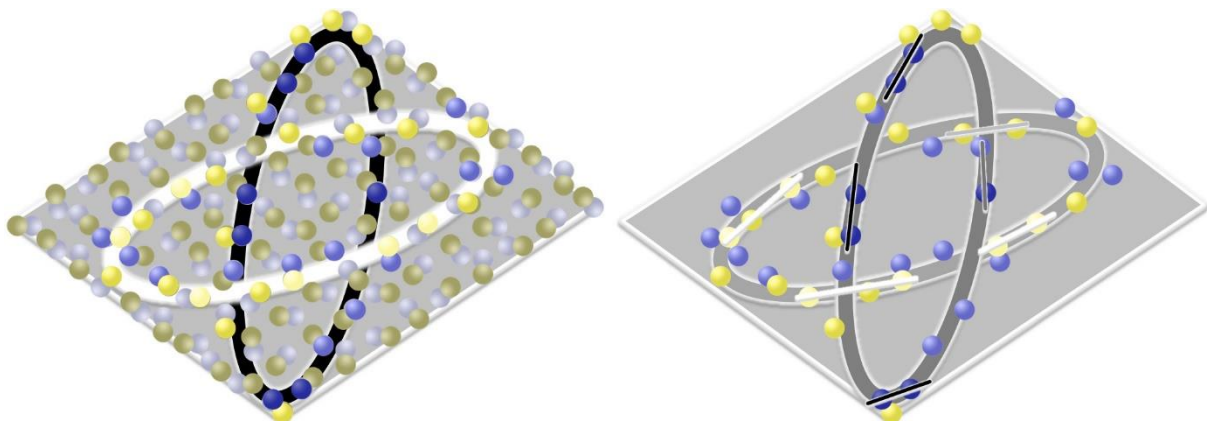


Bild: On-Zentrum (hier: gelb) und Off-Zentrum-Zellen (hier: blau) reagieren auf Bild-Kontraste.

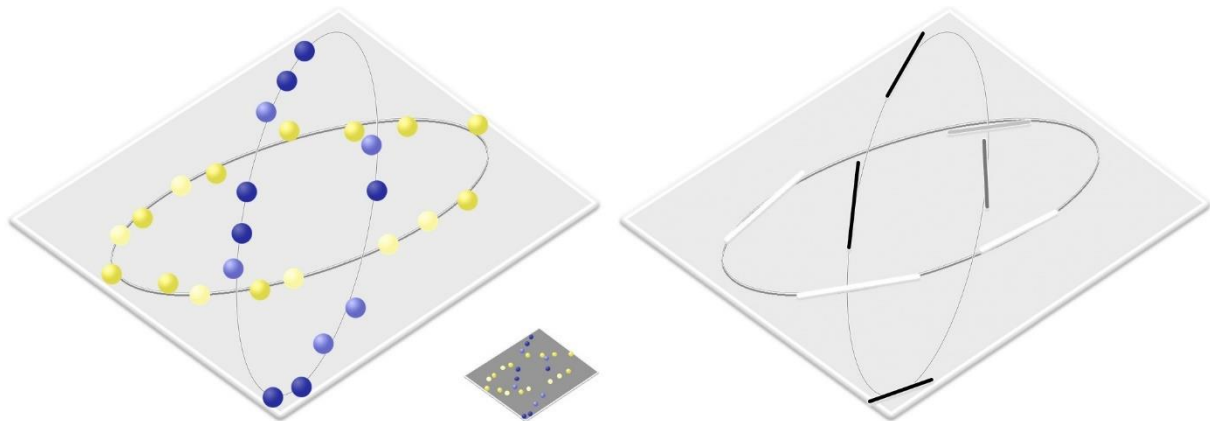
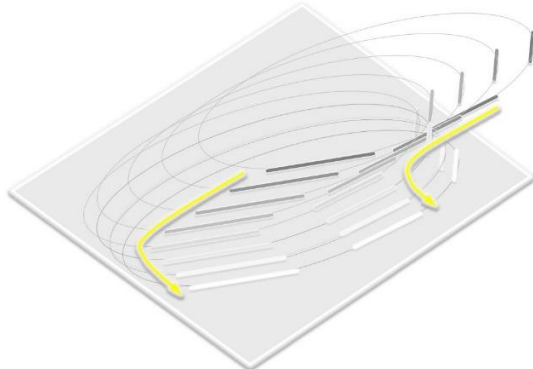


Bild: Umwelt – erfasst als System von Linien, denen Orientierungsrichtungen zugeordnet sind

Die komplexen Zellen empfangen Eingangssignale mehrerer einfacher Zellen und bilden innerhalb der Schicht IV-C eine zweite Stufe der Informationsverarbeitung. Sie antworten auf eine bestimmte Bewegungsrichtung, in der sich die Linien bewegen. Dazu nutzen sie mehrere einfache Zellen, wenn deren Signale einen zeitlichen Abstand haben. Die endinhibierten Zellen sind noch komplexer mit Signalen einfacher und komplexer Zellen verschaltet. Sie reagieren sowohl auf Bewegungsrichtungen und auch auf Linien-Längen. Bemerkenswert ist als erstes die Arbeitsteilung zwischen *einfachen* und *komplexen* Zellen beim Erkennen von Linien mit Einordnung einmal nach dem Winkel ihrer Orientierung und einmal nach dem Winkel ihrer Bewegungsrichtung.



In Schicht IV-B des primären visuellen Cortex werden Bewegungsrichtungen zu zuvor erfassten Linien zugeordnet. Im Bild ändern Linien ihre Bewegungsrichtung:

1. von rechts-oben nach links-unten und
2. von links-oben nach rechts-unten.

Bild: Eine zweite Stufe der Informationsverarbeitung ordnet Linien Bewegungsrichtungen zu.

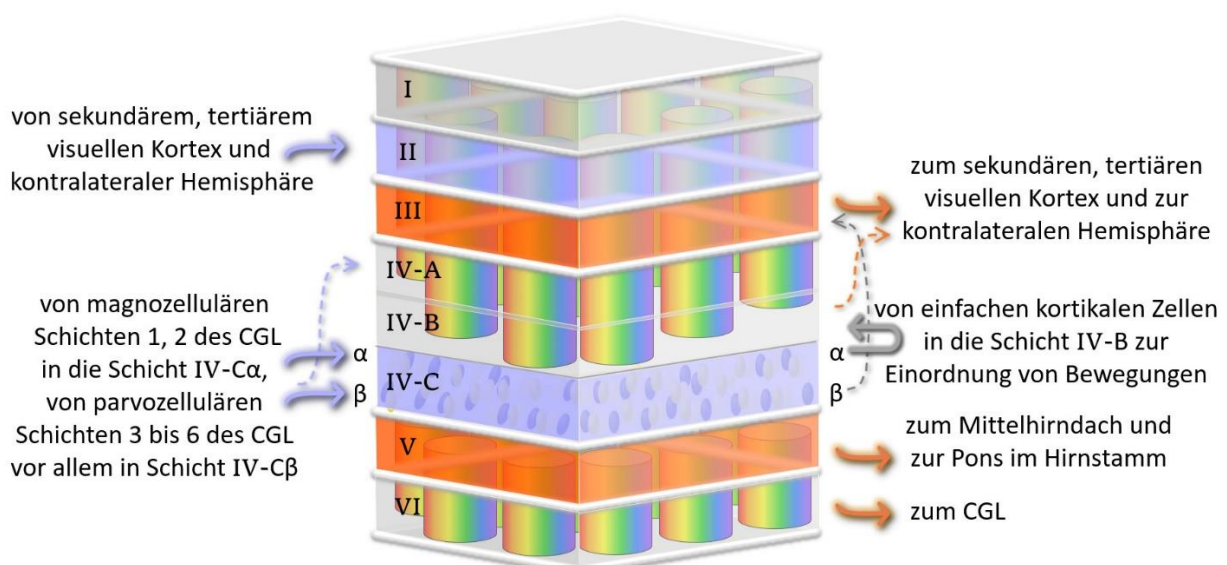
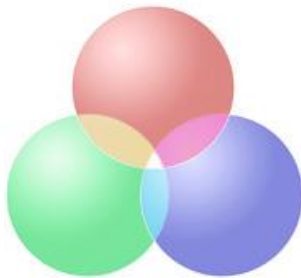


Bild: Wichtige Input- (blau) und Output-Schichten (rot) im primären, visuellen Cortex (V1)

Das Prinzip der Gegensätzlichkeit ist bestimmend für die Ein- und Ausgänge der Informationsverarbeitungsstufen im Gehirn. Am Eingang sorgt das Prinzip für ein garantiert inaktives Partner-Neuron in der Nachbarschaft jedes aktivierbaren Neurons. Es schafft Trennschärfe. Am Ausgang sorgt das Prinzip für die Verteilung von Attributen auf ganze Gruppen an Neuronen, von denen jedes für sich mit einem Mehr oder Weniger zum Informationsinhalt beiträgt. Damit wird das Prinzip der Gegensätzlichkeit gegen unvermeidliche Unschärfen auf dem Weg zur nachfolgenden Informationsverarbeitungsstufen robust gemacht.

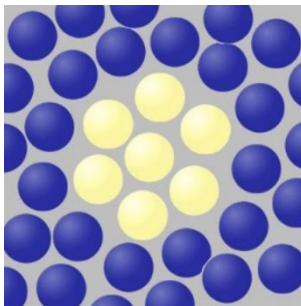
Art der Spezialisierung auf Gegensätzlichkeiten

Darstellung



Farbe wird in der Retina mit Zapfenzellen als Farbrezeptoren erfasst. Von diesen gibt es drei Arten mit Spezialisierung auf unterschiedliche Grundfarben. Die Ganglienzellen der nachfolgenden Verschaltung spezialisieren sich beim Menschen auf einen rot-grünen, einen blau-gelben und einen schwarz-weißen Gegenfarbmechanismus.

Zapfenzellen



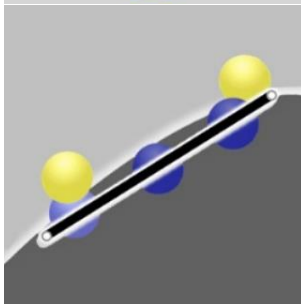
Kontrast wird in der Retina mit der Verschaltung auf zwei Arten an Ganglienzellen erfasst, On-Zentrum- und Off-Zentrum-Ganglienzellen. Den Input einer Verschaltung liefern die Rezeptoren der Retina, die in einem rezeptiven Feld des Gesichtsfeldes liegen. On-Zentrum-Zellen reagieren auf helle Punkte in einem dunkleren Umfeld und Off-Zentrum-Zellen auf ein helles Umfeld mit dunklem Zentrum.

On-Zentrum- und Off-Zentrum-Ganglienzellen



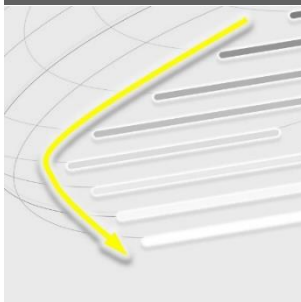
Perspektive von links oder rechts entsteht durch das Sehen mit zwei Augen. Ganglienzellen der Retina des linken und des rechten Auges, die dem linken Gesichtsfeld zugeordnet sind, gelangen über den Sehnerv zum Corpus geniculatum laterale (CGL) des Thalamus der rechten Hemisphäre. Die Signale der Perspektive des linken Auges werden im rechten Thalamus in den Schichten 1, 4, 6 des CGL abgebildet. Rechtes Auge projiziert auf Schichten 2, 3, 5.

Schichten 1, 4, 6 versus 2, 3, 5 des CGL sowie Augen-Dominanz-Säulen im V1



Linien und Kanten werden in der Schicht IV-C des primären visuellen Cortex (V1) mit Verschaltung auf einfache Zellen erfasst. Differenziert werden die Linien nach ihrer Orientierungsrichtung. Orte im Gesichtsfeld werden retinotop auf runde Felder an Neuronen abgebildet. Neurone in den Feldern sind nach Orientierungsrichtung angeordnet. Die Anordnung zieht sich säulenartig durch Cortex-Schichten.

kreisförmige Anordnung von Neuronen-Feldern im V1



Bewegungsrichtungen werden in Schicht IV-B des V1 mit Verschaltung einfacher auf komplexe Zellen vorerfasst. Orte im Gesichtsfeld bleiben retinotop auf runde Felder abgebildet – und komplexe Zellen nach Orientierungsrichtungen der Linien angeordnet. Bewegungen werden vom V1 über die parietale Wo-Bahn zu auf Bewegung spezialisierten Cortex-Arealen weiterverschaltet. Davon getrennt führt die temporale Was-Bahn zu Arealen der Mustererkennung.

einfache und komplexe Zellen im V1 sowie Wo-Bahn und Was-Bahn

5 Systematik von Rückkopplungen

Bis zu diesem Punkt wurde der Nutzen von Gegensätzlichkeit und Trennschärfe für die Informationsverarbeitung besprochen. Aufeinanderfolgende Verarbeitungsstufen sahen wir zunächst als in Gegenrichtung vollständig voneinander entkoppelt. Zum Verständnis des Wachstums haben wir eine Hypothese zu Hilfe genommen: *Axone sollen von Axonen begleitet werden, deren jeweilige Aktivierungen sich gegenseitig ausschließen.* Diese Hypothese verträglich mit der Herausforderung, dass das Wachstum von Axonen zu entfernten Zielarealen schneller als ihr Zelltod gelänge. Dazu sollen Partner-Axone in einer Kommunikation miteinander stehen und dabei mit wechselnden Sender- und Empfänger-Rollen ihre Existenz sichern.

Für den Fall, dass nachfolgende Verarbeitungsstufen auf vorangehende Stufen Signale zurückkoppeln, stabilisiert sich Gegensätzlichkeit und Trennschärfe weiter. Rückkopplungen finden sich in nahezu allen Informationsflüssen im Gehirn. Sie sind allerdings in Bezug auf die Anzahl der Axone und Informationsmenge deutlich geringer ausgeprägt. Rückkopplungen halten angestoßene Aktivierungen länger aufrecht. Wichtige Informationen bleiben dadurch für kurze Zeit für die Weiterverarbeitung verfügbar. Die Wirkung von Rückkopplungen beschränkt sich dabei nicht allein auf ein undifferenziertes Verstärken ganzer Gehirnareale.

Auch für den Signalweg von Rückkopplungen verträglich eine dichotome Anordnung von gegensätzlich aktiven Axonen mit der besprochenen Hypothese. So ließe sich nicht zuletzt die notwendige Gesamtzahl der Axone reduzieren. Der Gedanke dahinter ist, dass ganze Gruppen ähnlicher Informationsverarbeitungselementen auf einen Rückkopplungsaspekt hinwirken und entsprechend zusammenschaltet sind. Das Feedback zu einem Aspekt könnte auf ein Axon-Paar reduziert und auf den Signalweg der Rückkopplung geführt werden.

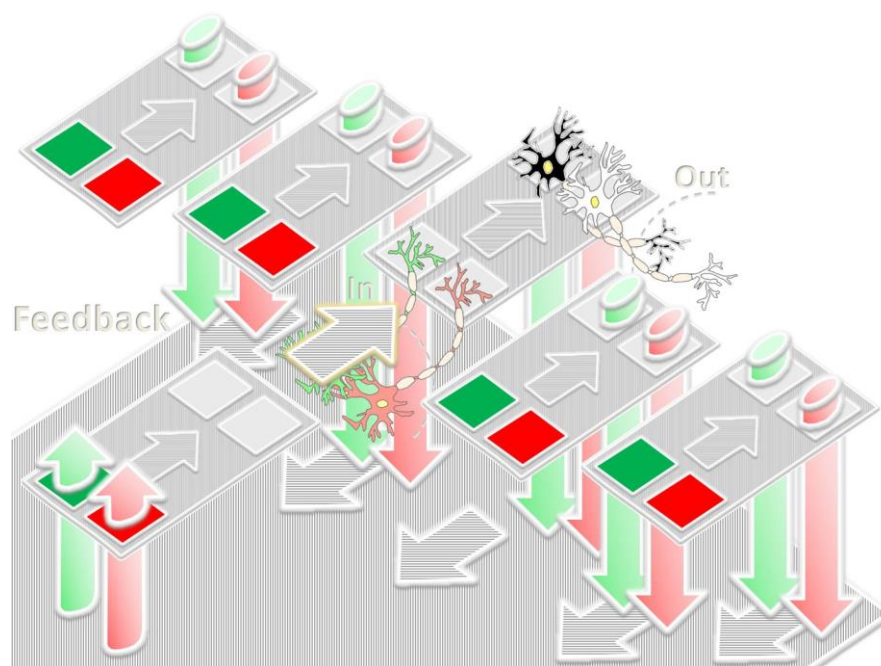


Bild: Ähnliche Informationsverarbeitungselemente bewirken über nachfolgende Stufe Feedback.

Im Bild wird eine dichotome Gegensätzlichkeit mit den Farben rot und grün dargestellt. Wenn ähnliche Informationsverarbeitungsstufen ein gemeinsames Attribut mit einem Mehr oder Weniger ihrer Signalstärke anzeigen, so wirkt die Rückkopplung wie ein Gruppenverstärker bei einem Mischpult. Beide, vorgelagerte und nachfolgende Informationsverarbeitungsstufe, müssen sich nur einig sein, dass sich rot und grün ausschließen. Axone innerhalb und zwischen Gehirnarealen erfahren eine Stärkung ihrer Übertragungseigenschaften in Abhängigkeit von ihrer Nutzung. Ungenutzte Axone verkümmern. Rückkopplungen sind daher der Motor der neuronalen Plastizität, der Anpassung an Signalverarbeitung, die auch relevant ist.

6 Motorik

Gehirn, Sehen und Wahrnehmung haben ein gemeinsames Ziel ... die optimale Reaktion eines bilateral-symmetrischen Lebewesens auf seine Umwelt. Wir sprechen von der Motorik. Alle Gehirnareale benötigen für Ihr Funktionieren Rückkopplungen. Und sie benötigen auch eine Trennung von Input und Output. Dazu sind neuronale Zellen bereits im Rückenmark mit unterschiedlichen Eigenschaften differenziert. Eine Neuronen-Art ist auf den Empfang von vorgelagerten Stufen spezialisiert. Im Großhirn erfüllen die Körnerzellen vor allem in den Schichten II und IV diese Aufgabe. Eine andere Art ist auf das Senden in Richtung nachgelagerter Stufen spezialisiert – Pyramidenzellen vor allem in den Schichten III und V. Interessant ist, dass Schichten IV und V vor allem zum Rückenmark und Thalamus und zu archaischen Teilen des Gehirns eine Schnittstelle bilden. Auch in der Embryogenese entstehen die Cortex-Schichten IV, V vor II und III. Die Schichten II und III bilden vor allem die Schnittstelle zu anderen Großhirnarealen und zur kontralateralen Hemisphäre.

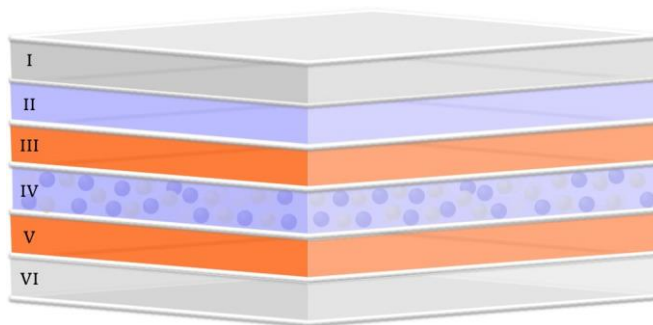


Bild: Sechs Schichten der Großhirnrinde unterstützen Trennung von Senden und Empfangen

Die Trennung von Input und Output kennzeichnet alle Gehirnareale und ist für die Motorik ganz besonders wichtig. In den letzten Informationsverarbeitungsstufen darf es keine überflüssigen Signalschleifen geben. Wege für stabilisierende Rückkopplungen sollen möglichst weit sein.

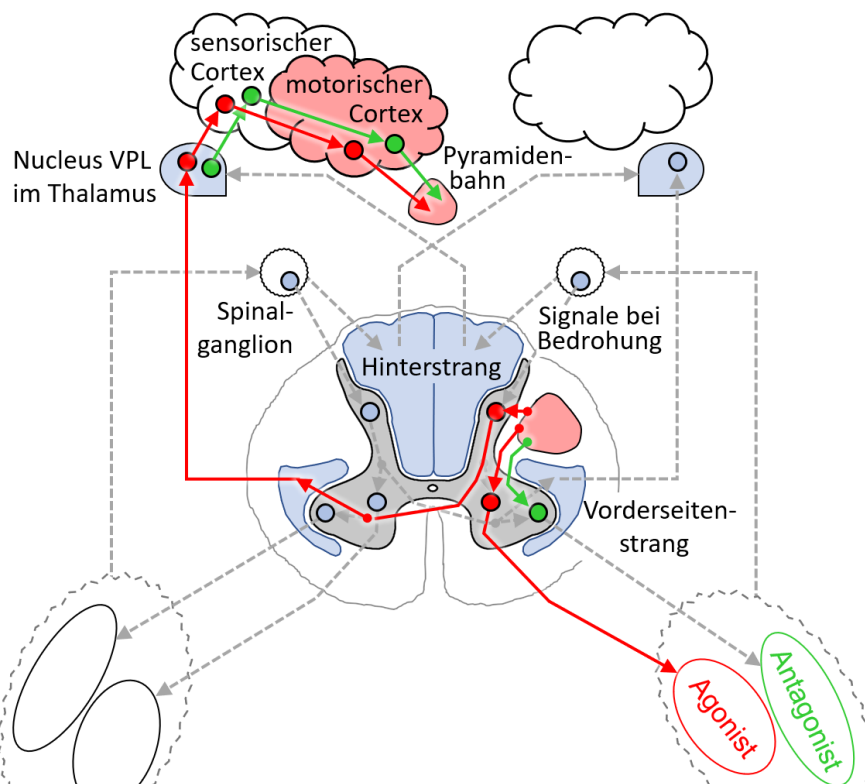


Bild: Rückkopplung für die Steuerung der Motorik über das Rückenmark

Diesem Zweck dient die Zweistufigkeit der Motorik. Die erste Befehlsstufe liegt im Gehirn. Diese aktiviert die zweite Stufe im Rückenmark. Das Rückenmark ist in dieser Systematik der entfernteste Ort, von dem optimal separierte Rückkopplungen realisiert werden. Im Großhirn der Säugetiere erreichen Signale aus dem Rückenmark den somatosensorischen Cortex. Vor allem sensible, protopathische Signale, die eine Bedrohung des Körpers melden, wirken mit Motorik-Neuronen für Reflexe zusammen. Damit bilden Sie als einen zweiten Teil ihrer Aufgabe einen differenzierten Signal-Rückweg von der zweiten Stufe der Motorik zurück zum Gehirn. Der motorische Cortex ist zwar benachbart zum somatosensorischen Cortex angeordnet, von diesem aber getrennt. Damit ist gewährleistet, dass Verbindungen zwischen den Arealen auf das Notwendige begrenzt und trotzdem ungehindert möglich sind.

Ähnliche Informationsverarbeitungselemente im Sinne der Motorik sind einzelne Muskeln, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden können. Dies reduziert die benötigten Axone der Rückkopplung auf das Notwendige. Die damit zwingend erforderliche Dichotomie ergibt sich aus der Aufteilung aller vom Gehirn ansteuerbarer Muskeln in *Spieler-* und *Gegenspieler-Muskeln*. Oder: *Agonisten* und *Antagonisten*.

Der Artikel „Role of Intrinsic Properties in Drosophila Motoneuron Recruitment During Fictive Crawling“ von Jennifer E. Schaefer, Jason W. Worrel, Richard B. Levine von September 2010 (Quelle: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jn.00298.2010>) gibt eine Vorstellung, wie Reflexe auf der einen und zentrale Steuerung auf der anderen Seite zusammenspielen. „Motoneurone der Drosophila-Larve lassen sich in leicht und schwer ansprechbare Typen einteilen. Typ 1b – für big/groß – Neurone haben größere synaptische Eingangsbereiche und steuern nur einen einzelnen Muskel an. Typ 1s – für small/klein – Neurone haben kleinere Eingangsbereiche und steuern ganze Muskelgruppen an. Dabei spezialisieren sich die leicht ansprechbaren 1b-Neurone auf präzise Bewegungen und darauf, früher angesprochen zu werden als die 1s-Neurone, die sich ihrerseits auf kraftvolle Bewegungen spezialisieren.“ Damit wird zum Schluss deutlich, wie sich Gruppen ähnlicher Informationsverarbeitungselemente schon bei primitiven Lebewesen in einer zweistufigen Hierarchie entwickeln können.

7 Fortschrittlicher Zwischenschritt der Bildverarbeitung



Bild: 40x40er Bildpunkteblöcke sind hier in den Frequenzbereich transformiert.

Die digitale Bild- und Videoverarbeitung nutzt bereits seit über 30 Jahren eine Mathematik, die uns auch dabei hilft, unser Sehen besser zu verstehen. Wie beim Auge ordnet die technische Bildaufnahme die messbare Größe der Helligkeit einer Menge an Bildpunkten zu. Deren Raster ist auf die gewünschte Detailauflösung ausgelegt. Die digitale Bildverarbeitung macht sich danach zunutze, dass es zwei absolut gleichberechtigte mathematische Darstellungsformen für die Bildinformationen gibt. Neben der Punkt-für-Punkt bildgetreuen Darstellung der jeweils gemessenen Helligkeit transformiert die alternative Darstellungsform die ursprünglichen Bilddaten in einen Frequenzbereich. Das ist Mathematikern geläufig, sie kennen die sogenannte Fourier-Transformation für ein-, zwei-, drei-, n-dimensionale Funktionen.

Theoretisch muss ein Bild nicht in 40x40er oder auch 8x8er Bildblöcke strukturiert werden. Das geschieht mit Rücksicht auf einen ökonomisch sinnvollen Rechenaufwand für die Transformation. Selbstverständlich können wir Bilder auch als Ganzes transformieren. Das Bild oben zeigt eine sogenannte Diskrete-Cosinus-Transformation mit 40x40er Blöcken. Die transformierten Blöcke sind aus Darstellungsgründen mit starkem Kontrast modifiziert. Sie zeigen in der Frequenzebenen-Darstellung jeweils links unten den durchschnittlichen Grauwert des ursprünglichen Bildblocks. Nach rechts werden die Werte für zunehmend horizontale *räumliche* Frequenzen, nach oben die Werte für zunehmend vertikale Frequenzen dargestellt. Der Nutzen liegt in der Datenreduktion auf einen einstelligen Prozentbereich der Original-Bilddaten. Die eingehandelten Informationsverluste sind für unser Sehen weniger relevant, wenn sich die Auflösung der Helligkeitswerte hin zu höheren räumlichen Frequenzen reduziert. Die digitale Bild- und Videoverarbeitung hat zu einem Zwischenschritt der Bilddarstellung gefunden, der die vorhandene Bildinformation für eine neue Dimension der Differenzierung von Signalen optimiert. Dabei differenziert die Informationstechnik nach Relevanz der Daten.

Unser Sehen hatte anders als die moderne Videotechnik eine zusätzliche Herausforderung zu bewältigen. Bei evolutionärer Entstehung muss eine Innovation nach der anderen gefunden und unter Nutzung vorhandener Stärken in unser Gehirn integriert werden. Die absolute Stärke des Gehirns besteht in seiner automatischen Anpassung an Gegensätzlichkeiten. Dem folgt ganz besonders die dichotome Aufteilung in On- und Off-Zentrum-Ganglienzellen der Retina.

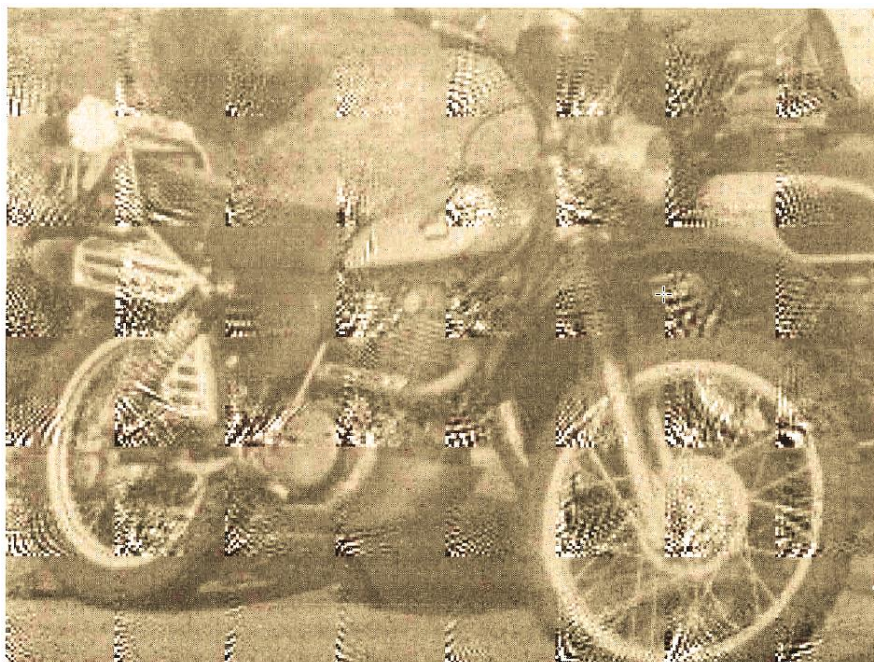


Bild: Mit den Mitteln der Mathematik lässt sich das Ursprungsbild zurückgewinnen.

Eine der herausragenden Innovationen der Evolution war die Entstehung der Säugetiere. Diese zeichnen sich sowohl durch vorausschauendes Verhalten wie auch neurologisch durch ihr Großhirn aus. Und genau das setzt mit mehr als 30 visuellen Arealen etwa 60% seiner

Großhirnrinde für das Wahrnehmen, Interpretieren und Reagieren auf visuelle Reize ein. Und wie die Erforschung des primären visuellen Cortex gezeigt hat, startet die Informationsverarbeitung auch hier wie bei digitalen Videos mit einem Zwischenschritt der Bilddarstellung.

Die erste Informationsverarbeitungsstufe im Großhirn transformiert von den Augen empfangene Bildpunkte-Raster in Linien und differenziert diese nach Orientierungsrichtungen. Wie bei der digitalen Bild- und Videoverarbeitung wird damit die Grundlage für eine neue Dimension der Differenzierung geschaffen. Bewegung! Der Unterschied zur Bewegungserkennung primitiver Lebewesen liegt in der für die dichotome Weiterverarbeitung optimalen Eigenschaft von Kanten und Linien. Linien in einem zweidimensionalen Bildraster sind aus Sicht der statischen Mustererkennung entweder mehr oder weniger ausgeprägt vorhanden. Oder aus Sicht der Bewegungserkennung entweder mehr oder weniger schnell am Verschwinden. Einmal in ihrer Orientierungsrichtung erkannte Linien sind mit dem Attribut >>Kontrast<< und dessen >>Differenzierungswert nach der Zeit<< dichotom auf zwei Neuronen-Typen verteilt – die *einfachen* und *komplexen* Zellen. Der Nutzen des Großhirns liegt in seiner überlegenen Wahrnehmung von Raum und Zeit. Dazu erfasst es die Umwelt als System von Linien.

8 Evolutionsschub durch Rückkopplung

Im Nachhinein ist es nicht ganz einfach, entscheidende Schritte der Gehirnentwicklung voneinander zu unterscheiden. Die Evolution der Lebewesen und ihrer Gehirne basiert auf Mutationen, also kleinen Schritten, die einmal mehr, ein anderes Mal weniger erfolgreich sind. Es ist damit schwierig, den entscheidenden Schritt auszumachen, der zur Zentralisierung von Gehirnen geführt hat. Die Anlagen dazu, wie etwa der elektrische Transport von Reizen über Nervenfasern, gab es bereits bei primitiveren Lebewesen. Die bilateral-symmetrisch gebauten Bilateria und kambrische Explosion der Artenvielfalt führten dann zur Zentralisierung. Wie es scheint, ist es das Konzept der Symmetrie als solches, welches zur fortlaufenden Selektion zweckmäßiger Verschaltungen führt. Möglicherweise ist der Anschlag dieser Entwicklung in Mutationen zu suchen, die einen entscheidenden Beitrag zur angenommenen Hypothese leisten konnten: >> *Axone, die Informationsverarbeitungsstufen miteinander verbinden, hängen wesentlich davon ab, dass sie von Axonen benachbarter Start-Neurone begleitet werden, deren jeweilige Aktivierungen sich gegenseitig möglichst ausschließen.* <<

Die Innovationskraft dieses winzig scheinenden Schritts ist aus nachrichtentheoretischer Sicht revolutionär. Damit würden Axone gezielt selektiert, die paarweise auftreten und zueinander nur gegensätzlich und nie gleichzeitig aktiv sein können. Damit wird nichts Geringeres als die 0 und die 1 als Informationsträger hervorgebracht. Gleichzeitig realisieren die Axone die benötigten nachrichtentechnischen Übertragungswege. In der Elektrotechnik unterscheidet man Schaltnetze und Schaltwerke. Schaltnetze funktionieren ohne Rückkopplung. Sie übersetzen Signale und Reize an ihrem Eingang mit stets gleichem Verhalten und gleichen Reaktionen am Ausgang. Schaltwerke dagegen funktionieren mit Rückkopplungen. Vorherige Signale und Reize an ihrem Eingang bewirken zwischengespeicherte Zustände eines Automaten, die sich mit neuen Inputs verbinden. Das schafft die Brücke, wie die Evolution mit kleinen Schritten von primitiven zu höherentwickelten Gehirnen gelangt. Nachrichtentechnische Rückkopplungen sind erst mit der Erfindung von 0 und 1 möglich. Nur so lässt sich das Zurückgekoppelte von etwas beliebig Anderem differenzieren. *Im Grunde kennzeichnet das den Schritt von der Reiz- zur echten Informationsverarbeitung. Und dazu eignet sich ein zentrales Gehirn.*

Was noch im modernen Gehirn eher wie ein Schaltnetz ohne Rückkopplung realisiert ist, wurde evolutionäre entsprechend früh hervorgebracht. Das betrifft oft überlebenswichtige Aufgaben und robust funktionierende Abläufe. Darüber hinaus nutzt die Evolution beliebige Gestaltungsfreiheiten für Schaltwerke. Sobald sich Ein- und Ausgang der Informationsverarbeitung im Gehirn vom völlig Primitiven abheben, spricht man von Sensorik und Motorik. Sensorik nimmt Reize der Umwelt entgegen und Motorik setzt Reaktionen um. Das sind die

sich gegenüberstehenden Seiten der neuronalen Informationsverarbeitung. Die reine Sensorik soll wahrheitsgetreu die Umwelt erkennen. Hier dienen Rückkopplungen der Verstärkung und Kurzzeitspeicherung der als richtig und wichtig eingestuft Signale. Die reine Motorik soll Reaktionen auf die Umwelt auslösen. Hier dienen Rückkopplungen der Richtigkeit, dass auch der benötigte Ziel-Muskel erreicht wird. Der Großteil des Denkens – Wahrnehmen und Einordnen von Informationen, Planen und Durchführen erlernter Handlungsabläufe – liegt dazwischen. Dazu stellen wir uns einen Übergang über viele Stufen der Informationsverarbeitung von der Sensorik bis zur Motorik vor.

Das Sehen und Hören als Treiber der Gehirne erscheint einleuchtend. Dieser Artikel hat sich auf das besonders gut erforschte Sehen konzentriert. Mit diesen Sinnen wird die Umwelt präziser als je zuvor erfasst. Ihre Entwicklung verspricht überlegene Fähigkeiten, die mit Zentralisierung einer Steuerungszentrale zu einer ganzheitlichen Motorik führen. Das Großhirn der Säugetiere setzt einen drauf und systematisiert eine noch differenziertere Wahrnehmung. Die Fülle an neurologischem Wissen führt uns hier zu einem übergreifenden Verständnis der Verschaltung zwischen den Stufen der Informationsverarbeitung im Gehirn. Teils sind es Erkenntnisse aus der Erforschung höherer Säugetiere, die uns die grundsätzlichen Zusammenhänge vor Augen führen. Auch wenn diese schon für Regenwürmer relevant waren.

9 Denken und Wohlergehen

Ein Muskel-Reiz kann im richtigen Moment gut, im falschen schlecht sein. Eine Idee *Hund* kann in der Version *Freund des Menschen* gut, in der Version *bissig* auch böse sein. Alle Ideen bis hin zu Muskel-Befehlen müssen zwischen zwei gegensätzlichen Bewertungen alternieren können. In der Evolution gibt es fortlaufend Fortschritte und keine großen Sprünge. Die Bewertungsaufgabe für richtig und falsch, go und no-go muss stets aus einer primitiven Vorläuferentwicklung hervorgehen. Vorläufer einer ganzheitlichen Steuerung sind die Reflexe, die auf Bedrohungen reagieren. Siehe protopathische Rückenmarkssignale der Sensorik. Bei mobilen Lebewesen kommen Flucht- oder Kampf-Reflexe hinzu. Das schafft bereits eine Grundlage und erlaubt ein am Wohl orientiertes Denken. Was noch fehlt ist ein Mechanismus, wie sich aus der Verarbeitung von Gegensätzlichkeiten tatsächliche Eingriffe in das Verhalten ergeben. Eine erste Zweiteilung der Bewertungsaufgabe mit den Mitteln des Nervensystems ist das Hochfahren von Aktivitätsbereitschaft per sympathischem und das antagonistische Herunterfahren per parasympathischem Nervensystem. Das kann und muss ohne komplexes Denken und aufwändige Rückkopplungen funktionieren.

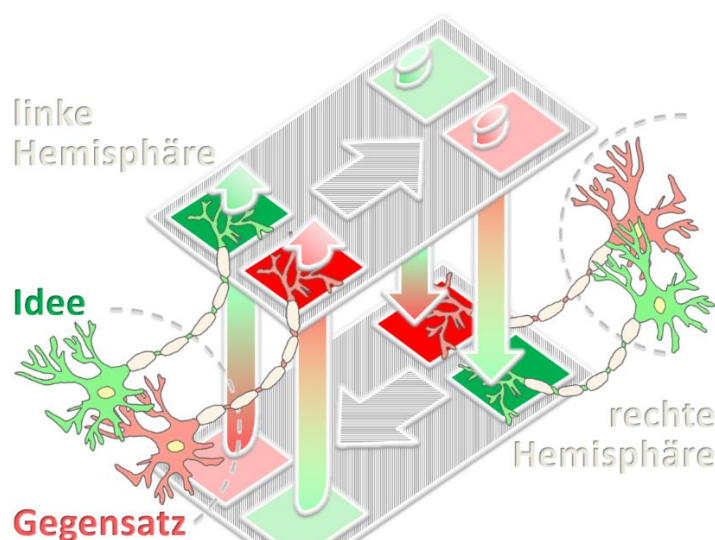


Bild: Abruf von Ideen und ihrer Gegensätze per Zusammenspiel beider Hemisphären

Mit jeder weiteren Stufe der Differenzierung und Informationsverarbeitung beginnt Denken. Sympathikus und Parasympathikus machen den Anfang und alternieren tief in das Gehirn hineinwirkende Einstellungen. Damit erhält die ihrerseits von somatosensorischen Reflexen entkoppelte Motorik ein erstes ganzheitliches Korrektiv. Das Schaltwerk Gehirn differenziert mit Sympathikus und Parasympathikus eine Zustandsspeicherung. Eine erste Differenzierung, die vorhandenes Wissen und Fähigkeiten nach dem Maßstab des Wohlergehens einordnet.

Das führt zur aus nachrichtentechnischer Sicht idealen Idee. Deren Abruf sollte für eine ideale Ganzheitlichkeit mit einer Rückkopplung zwischen beiden Hemisphären realisiert werden. Für eine ebenso ideale Abgrenzung gegen Unschärfen sollte der Kern der Idee nicht durch Rückkopplungen innerhalb einer Hemisphäre beeinflusst werden. Gegenüberliegende Areale zur Darstellung der idealen Idee sollten im Ruhezustand beides darstellen – die Idee und ihr Gegenteil. Es ist dann nur noch eine Sache des aktuellen Denk-Zustands, ob die aktivierte Idee zu einer inhaltlichen Differenzierung führt oder einer Differenzierung der Bewertung, die nachgelagerte Verarbeitungsschritte beschleunigt. *Böser Hund* im Alarm-Zustand des Sympathikus wäre dann eine solche bewertende Einordnung. Im gedanklichen Grübel-Zustand des Parasympathikus kann sich die inhaltliche Idee *Hund* = *Nicht-Katze* einstellen.

Der springende Punkt ist, dass beide Hemisphären am Beispiel der idealen Idee mit einer dualen Rollenverteilung in Erscheinung treten. Die eine Seite schlüpft in die Rolle des rat-suchenden Entscheiders, die andere in die Rolle des ratgebenden Beobachters. Der Unterschied ist, dass der Entscheider das Verfahren startet. Am Ende des Vorgangs erlischt die Rollenverteilung und kann jederzeit vertauscht werden. Für besondere Fähigkeiten kann die impulsgebende Entscheider-Rolle auch auf eine Hemisphäre spezialisiert sein. Das bedeutet aber nicht, dass die andere Seite inaktiv ist. So kennen wir die Spezialisierung der Gehirnhälften. Die linke Seite hat ihre Stärken etwa bei Sprache und Orientierung unserer Aufmerksamkeit im Raum. Die rechte kennen wir als kreative Seite mit Stärken bei der Vorstellung eines Gesamteindrucks. Der Künstler sieht das fertige Bild vor seinem geistigen Auge.