

Modulation und Information im Gehirn

⇒ Der Artikel behandelt die Entstehung von Informationsinhalten zwischen gekoppelten neuronalen Zentren. Es wird an den Grundlagenartikel >>Gegensätzlichkeit bringt uns das Denken<< angeknüpft und ein neuronales Merkmal vorausgesetzt. Nervenfasern im Gehirn besitzen bei ihrer Entstehung und im Wachstum eine Eigenschaft, die informationstechnisch relevant ist. Sie treten regelmäßig in Paaren auf, deren Partner nur abwechselnd und nie gleichzeitig Reize senden. Ihre jeweiligen Informationsinhalte sind zueinander gegensätzlich.

1 Gegensätzlichkeit

Gegensätzlichkeit bei neuronaler Informationsverarbeitung hat zwei elementare Spielarten.

- (1) Inhaltliche Gegensätzlichkeit wie links/rechts, schwarz/weiß etc.
- (2) Sich gegenseitig ausschließende Impulsgeberrolle zwischen zwei neuronalen Zentren.

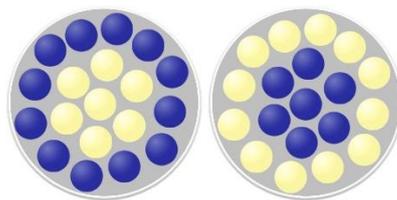


Bild: On- und Off-Zentrum-Zellen der Retina reagieren gegensätzlich auf ihr rezeptives Feld.



Bild: Neuronen-Paare vermitteln Impulsgeberrolle zwischen gekoppelten neuronalen Zentren.

Der evolutionäre Fortschritt zur neuronalen Verarbeitung von Gegensätzen liegt in der klaren Differenzierung. Damit erst wird ein systematischer Aufbau von Rückkopplungen realisierbar. Im Grunde kennzeichnet das den Schritt von der Reiz- zur echten Informationsverarbeitung. Zwischen den elementaren Spielarten der Gegensätzlichkeit gibt es fließende Übergänge in Abhängigkeit davon, wie entkoppelt oder von außen gesteuert eine Informationsbahn ist.

2 Neuronale Zentren verhandeln ihren Sinn untereinander

Neuronale Zentren üben untereinander einen modulierenden Einfluss aus. Die jeweilige Aufgabe oder den Zweck eines neuronalen Zentrums muss man sich als etwas vorstellen, das im freien Spiel der Kräfte entsteht. Einmal Funktionierendes wird im Laufe der Evolution weiterentwickelt. Das Wenigste verschwindet. Allerdings geraten evolutionär ältere Zentren unter den modulierenden Einfluss modernerer Hirnfunktionen. Der im Gehirn *verhandelte* Informationsgehalt erhöht sich mit neu hinzukommenden Formen gegenseitiger Modulation.

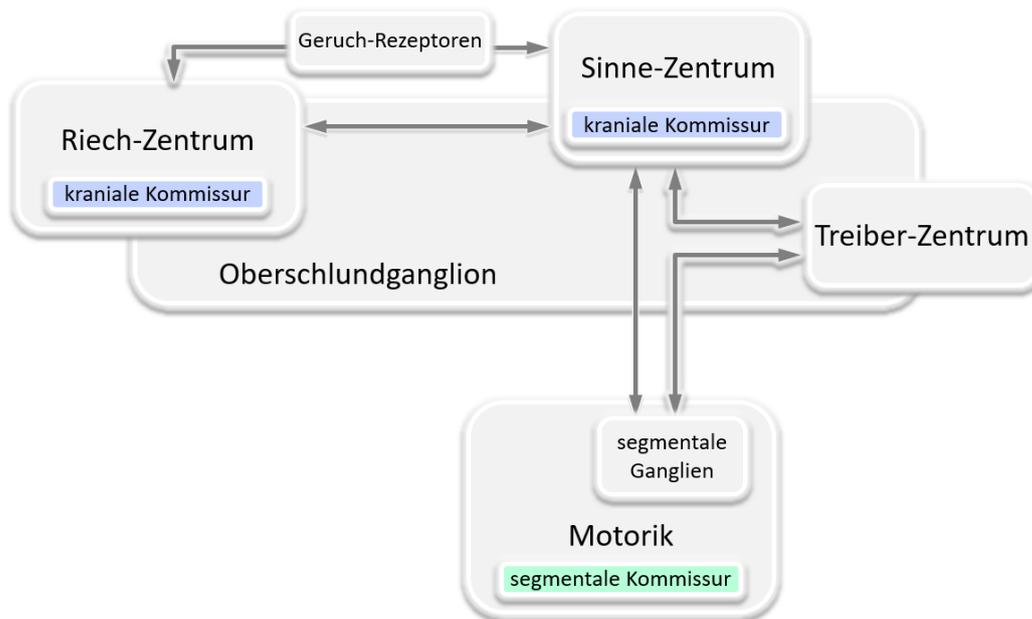


Bild: Nervensystem-Modell einfacher Bilateria, z. B. Regenwurm, Tauffliege etc.

Die Zentren im Nervensystem-Modell wissen nichts voneinander, außer dass sie jeweils über Projektionsflächen mit Neuronen verfügen, wo sie die Reize verkoppelter Zentren erreichen.

Projektionsflächen mit Neuronen sind regelmäßig derart dichotom organisiert, dass etwa die eine Hälfte der Neurone Informationsinhalte repräsentiert und die andere Hälfte dazu die genau gegensätzlichen Informationen. So reagieren On-Zentrum-Zellen des Seh-Apparats auf eine helle Mitte und ein dunkles Umfeld ihres rezeptiven Feldes. Off-Zentrum-Zellen reagieren auf eine dunkle Mitte bei hellem Umfeld.

Die zentrale Überlegung, auf der dieser Artikel fußt, behandelt eine vergleichbare Dichotomie bei Projektionsflächen verkoppelter Zentren. Neuronale Zentren, wie sie im Nervensystem-Modell dargestellt sind, repräsentieren wie die Sinneszellen des Seh-Apparats gegensätzliche Informationen. Und wie beim Seh-Apparat bilden Projektionsflächen funktional relevante Daten ab. Allerdings repräsentieren die dichotom organisierten Neuronen-Paare einen jeweils gemeinschaftlichen Informationsinhalt, der nichts mit ihrer Gegensätzlichkeit zu tun hat. Die Gegensätzlichkeit der Neuronen-Paare muss man sich als etwas wie z. B. eine Impulsgeberrolle oder eine Art Staffelstab vorstellen, der zwischen den neuronalen Zentren hin und her gereicht wird.

Die zentrale Überlegung schließt ein, dass die Nervenfasern zwischen den Zentren im Idealfall paarweise organisiert sind. In jedem Axon-Paar kann dann zeitgleich nur ein Partner-Axon einen Signalreiz führen und damit die Zuordnung des *Staffelstabs* repräsentieren. Daraus folgt, dass verkoppelten Zentren im Nervensystem-Modell nahe beieinander liegende inhaltliche

Projektionsfeldbedeutungen zufallen müssen. Und dass die Verbindungspfade tendenziell eine Gleichzeitigkeit aktiver Informationsinhalte zum Ausdruck bringen.

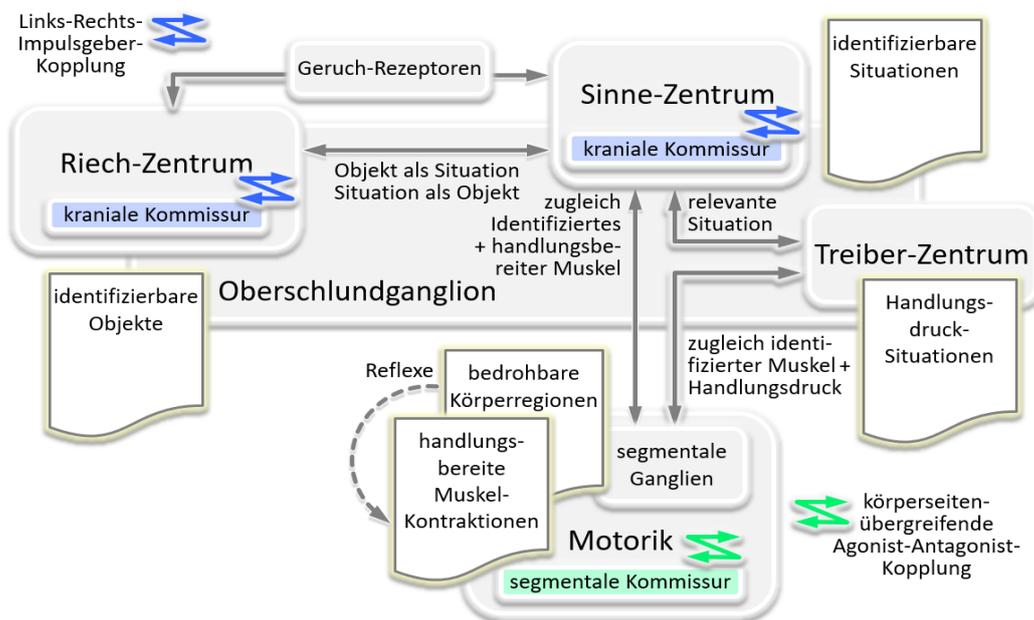


Bild: Nervensystem-Modell und Zentrum-spezifische Neuronen-Felder mit inhaltlicher Deutung

Diese Überlegung und unser neurologisches Wissen führen zu einer semantischen Interpretation. Bei Betrachtung der jeweiligen Zentren ließe sich mit folgenden Formulierungen eine inhaltliche Bedeutung der Projektionsflächen nähern.

	Riech-Zentrum	Sinne-Zentrum	Treiber-Zentrum	Motorik, Input	Motorik, Output
Deutung	identifizierbare, riechbare Objekte	identifizierbare, lebensrelevante Situationen	Handlungsdruck-Situationen bzgl. Chancen/Risiken	bedrohbare, spürbare Körperregionen	handlungsbereite Muskelkontraktionen
Riechen	Riech-Zentrum-Verbindungen	Riechbares wird mit Situationen gleichgesetzt.	- indirekt -	- indirekt -	- indirekt -
Sinne		Sinne-Zentrum-Verbindungen	für Körper-Reaktionen relevante Situationen	als bedroht identifizierte Körperregionen	als handlungsbereit identifizierte Muskeln
Treiber			Treiber-Zentrum-Verbindungen	Handlungsdruck-Situationen bzgl. Körperregionen	zu Handlungsdruck geeignete Muskeln
Sensorik				somatosensorische Verbindungen	agonistische u. antagonistische Reflexneigungen

Tabelle: Semantische Interpretation neuronaler Projektionsfelder und ihrer Verbindungen

3 Bilateral-symmetrischer Körperbau

Der Evolutionsschritt zu bilateral-symmetrischen Körperformen vollzog sich in zeitlicher Nähe zum Aufkommen zentraler Nervensysteme. Ihm folgte die kambrische Explosion der Artenvielfalt vor 540 Millionen Jahren. Zwei elementare Spielarten von Gegensätzlichkeiten sind der Schlüssel zum Verständnis des zeitlichen Zusammentreffens von aufkommendem zentralem Nervensystem und kambrischer Explosion. Ein fundamentaler Anschlag der Evolution.

Die erste *Spielart* von Gegensätzlichkeit ist inhaltlicher Art. Alles, was der Wirklichkeit der Umwelt entspringt, kann nur mit einem Konzept der Überprüfbarkeit zu einem Sinn verarbeitet werden. Dazu organisiert die Sensorik Gegenkopplungen zwischen identisch aufgebauten Organen. Diese bilden die Wirklichkeit mit ihren Signalen von zwei Seiten redundant ab. Die identischen Organe werden Attribut für Attribut, z. B. Bildpunkt für Bildpunkt, miteinander verkoppelt. Darin findet sich das Prinzip der neuronalen Projektionfelder wieder. Es lässt sich zeigen, dass Informationselemente von benachbarten Informationselementen umso klarer zu unterscheiden sind, wenn diese paarweise organisiert sind. Ein Partner-Neuron repräsentiert ein Attribut, das andere Neuron den dazu passenden Gegensatz. Anknüpfende evolutionäre Entwicklungen stärken dann ein Herausbilden von Kontrasten, wie wir sie von den On- und Off-Zentrum-Ganglienzellen kennen. Die Kopplung der neuronalen Zentren einfacher Bilateria für Riechen, Sinne und einen Antrieb der Motorik erkennt man in der *kranialen Kommissur*, der Nervenfaserverbindung am Kopfende ihres Strickleiternervensystems.

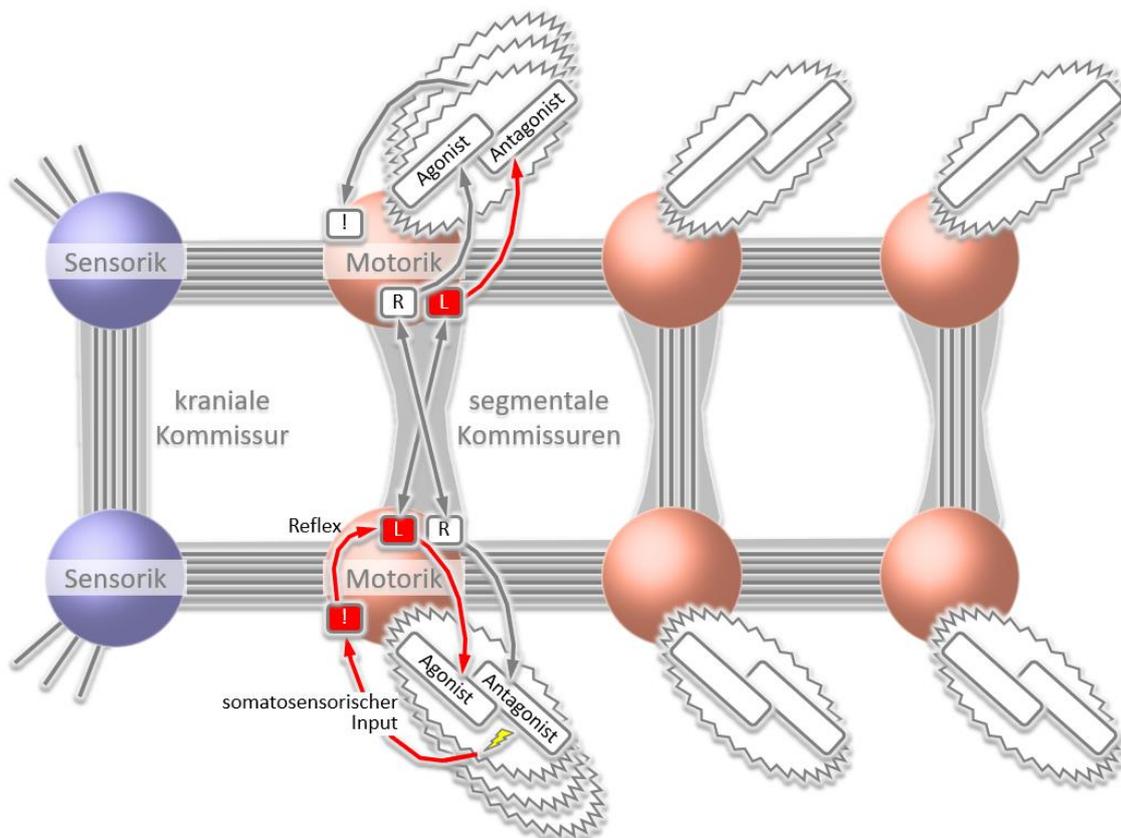


Bild: Strickleiternervensystem einfacher Bilateria verfügt über Ganglien als neuronale Zentren.

Die zweite *Spielart* von Gegensätzlichkeit ist eine sich gegensätzlich gegenüberstehende Impulsgeberrolle zwischen zwei neuronalen Zentren. Genauso wie die äußere Wirklichkeit, muss auch die innere Wirklichkeit des Körpers einem Konzept der Überprüfbarkeit folgen. Dazu organisiert die Motorik ähnlich wie die Sensorik Gegenkopplungen zwischen identisch aufgebauten Organen. Während die Sensorik Reize der Umwelt empfängt, löst die Motorik

Reaktionen auf diese Reize über die Ansteuerung von Muskeln aus. Was für die Sensorik der Gegensatz in Form von Kontrasten ist, das ist für die Motorik das Konzept von Spieler- und Gegenspielermuskeln, *Agonisten* und *Antagonisten*. Zu jedem kontrollierbaren Muskel der Bilateria, vom Regenwurm bis zum hochentwickelten Säugetier, existiert ein Gegenspieler. Einem Beuger-Muskel steht ein Strecker-Muskel gegenüber. Die Kopplung der neuronalen Zentren einfacher Bilateria für deren Motorik erkennt man in den *segmentalen Kommissuren*, den Nervenfaserverbindungen hinter der kranialen Kommissur bis zum Schwanzende.

Im Gegensatz zur Sensorik, geht es nicht um die Überprüfung der Wirklichkeit durch das Übereinanderlegen und Verkoppeln redundanter Signalinhalte. Die Motorik überprüft nicht, sie generiert Wirklichkeit. Ihr Konzept der Überprüfbarkeit baut nicht auf dem Vergleich von Gleichem, sondern auf dem zeitgleichen Generieren von Gegensätzlichem auf. Realisiert wird das durch Kopplung der neuronalen Ansteuerung der Agonisten einer Körperseite mit der Ansteuerung entsprechender Antagonisten der gegenüberliegenden Seite und umgekehrt. Im unkontrollierten Fall, etwa bei starken Reflexen, kommt es zu Muskelkontraktionen von Beugern auf der einen Körperseite und gleichzeitigen Strecker-Reaktionen auf der gegenüberliegenden Seite. Bei der primitiven Fortbewegung eines Tausendfüßlers könnte das sogar hilfreich sein. Im kontrollierten Fall wirkt der unkontrollierten Reaktion der anderen Körperseite allerdings eine Modulation von höherer Stelle entgegen. Hier sprechen wir von der Entwicklung einer zentralen Steuerung, die vom Kopfende ausgeht. Diese zentrale Steuerung muss neben Projektionsflächen für Sinne und Wahrnehmung der Umwelt zusätzlich Projektionsflächen für somatosensorische Informationen organisieren. Damit muss sie das *Generieren von Gegensätzlichem* überprüfen. Und damit den Kreis der notwendigen Überprüfung der *inneren Wirklichkeit* schließen. Anfänglich unkontrollierte Reflexe steuern die dazu erforderliche Lernphase. Auf beiden Seiten des Körpers ausgelöste Reaktionen führen auch auf beiden Seiten zu somatosensorischen Wahrnehmungen. Diese gelangen dann auf beiden Körperseiten zu kranialen Projektionsfeldern der zentralen Steuerungszentren. Und beidseitig der Körpermitte gegenüberliegende Projektionsfelder werden über die kraniale Kommissur miteinander verkoppelt.

Die Sensorik, die Reize aus der Umwelt zu einem Sinn verarbeitet, und die Motorik, die Gegensätzliches generiert und der dadurch eine somatosensorische Wahrnehmung, also ein *Körpersinn* folgt, haben eines gemeinsam. Sie müssen beide aus hinreichend symmetrisch organisierten Organen und symmetrischen Verschaltungen konstruiert sein.

4 Zentralisierung der Motorik

Das Strickleiternnervensystem einfacher Bilateria zeigt eine einfache Architektur. Es zentralisiert Sensorik-Areale bereits in den beiden Oberschlundganglien am Kopfende. Die Motorik verteilt sich auf segmentale Ganglien und hat noch kein spezialisiertes Zentrum am Kopfende. Auch höherentwickelte Lebewesen verfügen entlang ihrer Körperachse in Richtung Schwanzende über neuronale Einheiten, über die kontrollierbare Muskeln erreicht werden. Allerdings unterscheiden sie sich durch eine zunehmende Zentralisierung motorischer Aufgaben im Kopf.

Evolutionsschritte, aus denen später etwa Reptilien und Fische hervorgegangen sind, brachten zentralisierte Motorik-Zentren hervor. Das bei Säugetieren als *Striatum* bezeichnete Gehirnareal hat sich aus diesen Vorläufern entwickelt. In grober Näherung lassen sich weitere moderne Einheiten als Nachfolger ursprünglicher Funktionseinheiten zuordnen. In einer systematisierenden und vereinfachten Anschauung wird das Riech-Zentrum zum Riechhirn. Das Treiber-Zentrum zum Hypothalamus. Und das integrierende Sinne-Zentrum, das eine schlagkräftige Zusammenführung aller Sinne leistet, wird zur Amygdala der Säugetiere. Dieses Sinne-Zentrum und die spätere Amygdala haben einen direkten Zugang zur Motorik. Bei Säugetieren wird die Amygdala in Zusammenhang mit emotionalen Empfindungen gebracht. Und mit der Fähigkeit, Situationen schnell einschätzen und reagieren zu können.

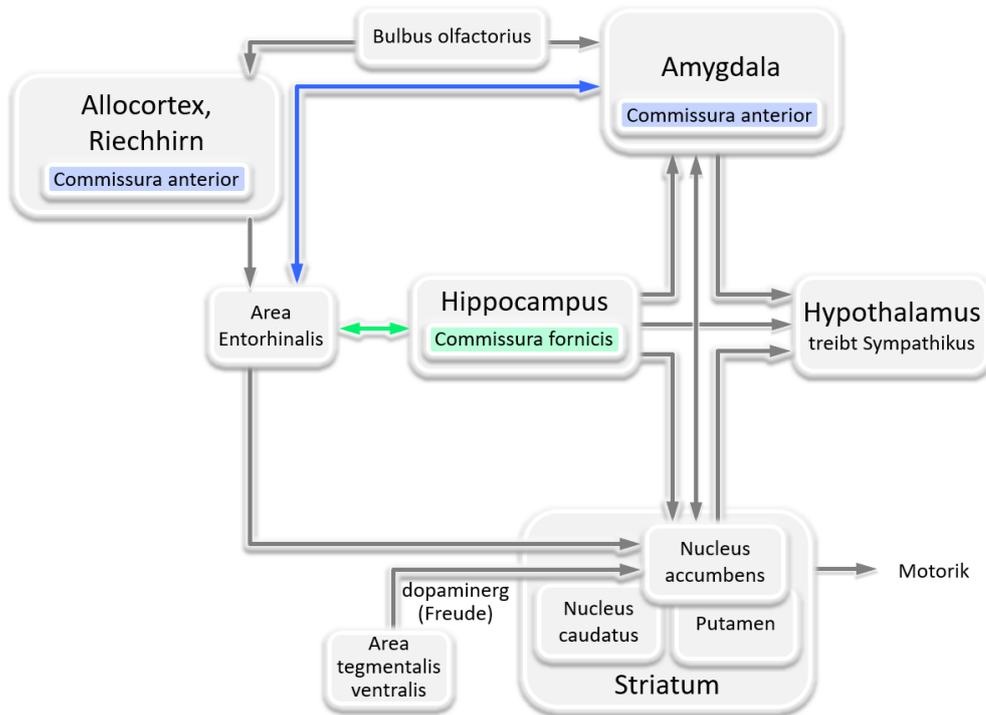


Bild: Gehirn-Modell mit erstmals bei Reptilien auftretendem Archicortex und Hippocampus

Nervensystem-Modelle einfacher Bilateria gehen auf die Nutzbarmachung von Kontrasten und Gegensätzlichem zurück. Ihr evolutionärer Anshub ist in physiologischen Merkmalen zu erkennen, durch die Nervenfasern regelmäßig paarweise entstehen. Und sich mit einer sich gegenseitig ausschließenden Reiz-Übertragung auf den Weg zu entfernten Zentren machen. Die neuronalen Zentren, die jeweils für sich genommen kein übergreifendes Wissen besitzen, entfalten in ihrem Zusammenwirken einen Sinn. Sinn wird gleichsam im Dialog und mit gegenseitiger Modulation der neuronalen Zentren untereinander *verhandelt*.



Bild: Im Kopf zentralisierte Motorik-Aufgaben benötigen dazu passendes Gehirn-Zentrum.

In der vereinfachten Anschauung zum Gehirn-Modell steht die spätere Amygdala stellvertretend für die Sinne-Zusammenführung und der Nucleus Accumbens im Striatum für ein neues Projektionsfeld, das stärker in die zentralen Dialoge der Gehirnzentren eingebunden wird. Sinnesorgane auf der linken Seite sind über Kommissuren mit Sinnesorganen auf der rechten Seite verbunden. Sie bilden mit ihren Signalen die Wirklichkeit redundant ab. Ihre Verbindungsachse repräsentiert das fundamentale Konzept der Überprüfbarkeit. Die Sensorik integriert redundante Signale von links und rechts. Dagegen hat die Motorik erst einmal keine integrierende, sondern eine differenzierende Aufgabe. Die im Kopf zentralisierte Motorik muss aus der über die Sensorik wahrgenommenen Wirklichkeit herausdifferenzieren, welche spürbaren Körperregionen und handlungsbereiten Muskeln im Dialog zwischen den Gehirnzentren aktuell relevant sind. Eine weitere Dialog-Achse zu den Sinnesorganen einer Körperseite ermöglicht dann im Zusammenwirken eine eindeutige Adressierung von Muskel-Reizen.

Das Nervensystem einfacher Bilateria mit Strickleiternervensystem beherrscht eine eindeutige Adressierung auf der Ebene der Körpersegmente. Segmentübergreifend koordinierte Bewegungen erfolgen bei ihnen weniger situationsangepasst, sondern eher in starren Mustern. Gehirne höherentwickelter Bilateria müssen den ganzen Körper überblicken und eine erhebliche Merkleistung entwickeln. Dabei kommt das moderne Gehirn ins Arbeiten. Und auch dafür werden weitere Gehirnzentren erforderlich. Und zwar für eine Differenzierung, wann Zeit für Denkarbeit ist und wann ein rasches Handeln geboten ist. Zu diesem Zweck kommen zwei zentrale Gehirnareale hinzu. Eines für die Beschleunigung von Merkprozessen und eines für die Erfassung eines allgemeinen Körpergefühls. In moderneren Gehirnen hat der Hippocampus eine herausragende Rolle für das Einprägen von Informationen. Und das Transmittersystem der Area tegmentalis ventralis, kurz: ATV, sammelt Informationen zum Körpergefühl. Die Signale der ATV richten sich als erstes an Nucleus accumbens und parallel dazu an weite Bereiche des Gehirns. Die Wirkung dieser Signale wird mit Emotionen der Freude und des Glücks verglichen. Allerdings ist einer direkten *Glück-Wirkung* ein Riegel vorgeschoben. Die Wirkung entsteht erst in Verbindung mit dem Hormon Dopamin, das wiederum vom Hypothalamus produziert wird. Das funktioniert wie ein übergreifender Schalter.

	Amygdala	Nuc. accumbens	Hippocampus	Hypothalamus	ATV
Aufgabe	sensorisch drängende Muskel-Adressierung	zu Körpergefühl passende Muskel-Adressierung	Langzeitpotenzierung situativer Erfahrungen	treibt Muskel-Bereitschaft und Sympathikus	Transmittersystem zu positivem Körpergefühl
Amygd.	Amygdala-Dialoge	Differenzierung adressierbarer Muskel-Reize	Modulation von Dringlichkeit mit Erfahrungen	Erhöhung übergreifender Reaktionsbereitschaft	Körpergefühl-Beteiligung an Lage-Beurteilung
Nuc acc		Nucleus accumbens-Dialoge	Modulation von Glückserwartung mit Erfahrungen	Senkung übergreifender Reaktionsbereitschaft	übergreifende Modulation eines Glückseindrucks
Hippoc.			Hippocampus-Dialoge	Modulation vegetativer + hormoneller Regelkreise	Speicherung positiv empfundener Aktivitäten
Hypoth.				Hypothalamus-Dialoge	Adressierung der Regelkreise nach Körpergefühl

Tabelle: Vorstellbare Interpretation der Beteiligung neuronaler Elemente an der Motorik

5 Konzept der neuronalen Verkopplung

Mit Weiterentwicklung der neuronalen Zentren von primitiven Oberschlundganglien zu immer höher entwickelten Gehirnen wird eine semantische Interpretation neuronaler Zentren zunehmend schwierig. Neurone sind klein und selbst leistungsstarke neuronale Projektionsflächen sind klein. Auch ergeben sich wissenschaftliche Schlussfolgerung meist aus beobachtbaren Wirkungen, die im Zusammenspiel vieler Areale entstehen. In diesem Artikel geht es um einen konzeptionellen Überblick und um ausgesuchte funktionale Gehirnareale mit markanten Merkmalen. Statt wissenschaftlicher Tiefe der Wirkzusammenhänge werden lediglich vorstellbare Interpretationen entworfen, die eine kontinuierliche Evolution plausibilisieren.

Das mit den Bilateria entstandene Konzept der neuronalen Verkopplung fußt im Kern auf einer informationstechnisch relevanten Eigenschaft, die Entstehung und Wachstum von Nervenfasern im Gehirn beeinflusst. *Axone treten regelmäßig in Paaren auf, deren Partner nur abwechselnd und nie gleichzeitig Reize senden. Ihre Informationsinhalte sind zueinander gegensätzlich.* Durch dieses Merkmal und mit zwei Spielarten von Gegensätzlichkeit entwickeln sich Gehirne. Noch eine Eigenschaft ist zum Verständnis der Verkopplungen relevant. Diese betrifft die Nervenzellen selbst. Von diesen gibt es unterschiedliche Typen. Und eine der wichtigsten Differenzierungen ist die zwischen eher sensorischen oder motorischen Neuronen-Typen. So konzentrieren sich etwa im dorsalen Areal des Rückenmarks Neurone, die auf den Empfang entfernter Reize aus dem Körper spezialisiert sind. Im ventralen Bereich konzentrieren sich Neurone, welche motorische Reize an entfernte Muskeln abgeben. Das erlaubt Gehirnarealen eine Trennung von Input und Output. Und dazwischen kann alles mit allem verschaltet sein.

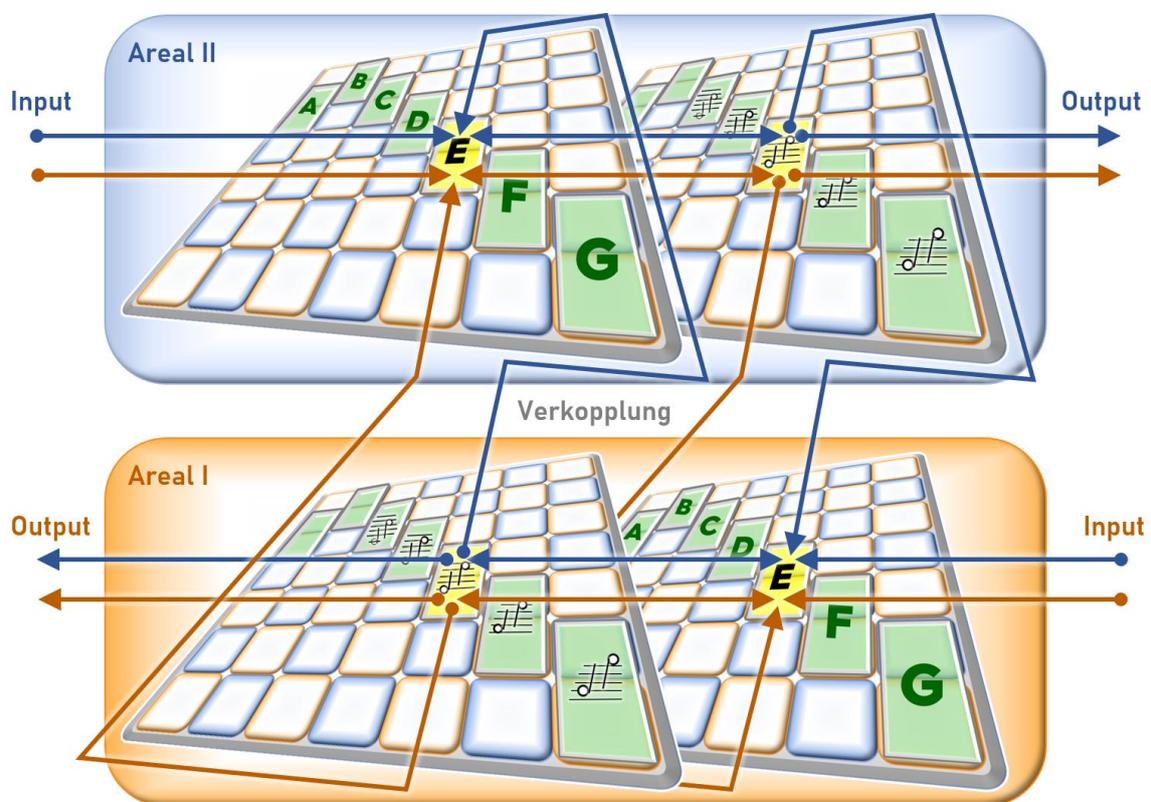


Bild: So sähe ein körperseitenübergreifender Abgleich redundanter sensorischer Signale aus.

Beim körperseitenübergreifenden Abgleich redundanter Signale ist die Verkopplung der linksseitigen und rechten Wahrnehmung durch eine identische Interpretation der Bedeutung der Input-Bereiche gekennzeichnet. Dabei dient die Verkopplung der Areale in diesem Fall der

Verstärkung und inhaltlichen Bestätigung. Die Verkopplung ist entsprechend nicht auf eine Modulation des Sinns ausgerichtet, sondern nutzt die Areal-internen Verknüpfungen, um den Output-Bereich des Partner-Areals zu stärken. Jede Weiterverarbeitung führt allerdings auch zu inhaltlichen Veränderungen. Daher ändert sich die Interpretation der Bedeutung vom Input zum Output. Der Input des visuellen Kortex repräsentiert etwa Bildpunkte und der Output einer ersten Verarbeitungsstufe Kanten und Linien im wahrgenommenen Gesichtsfeld.

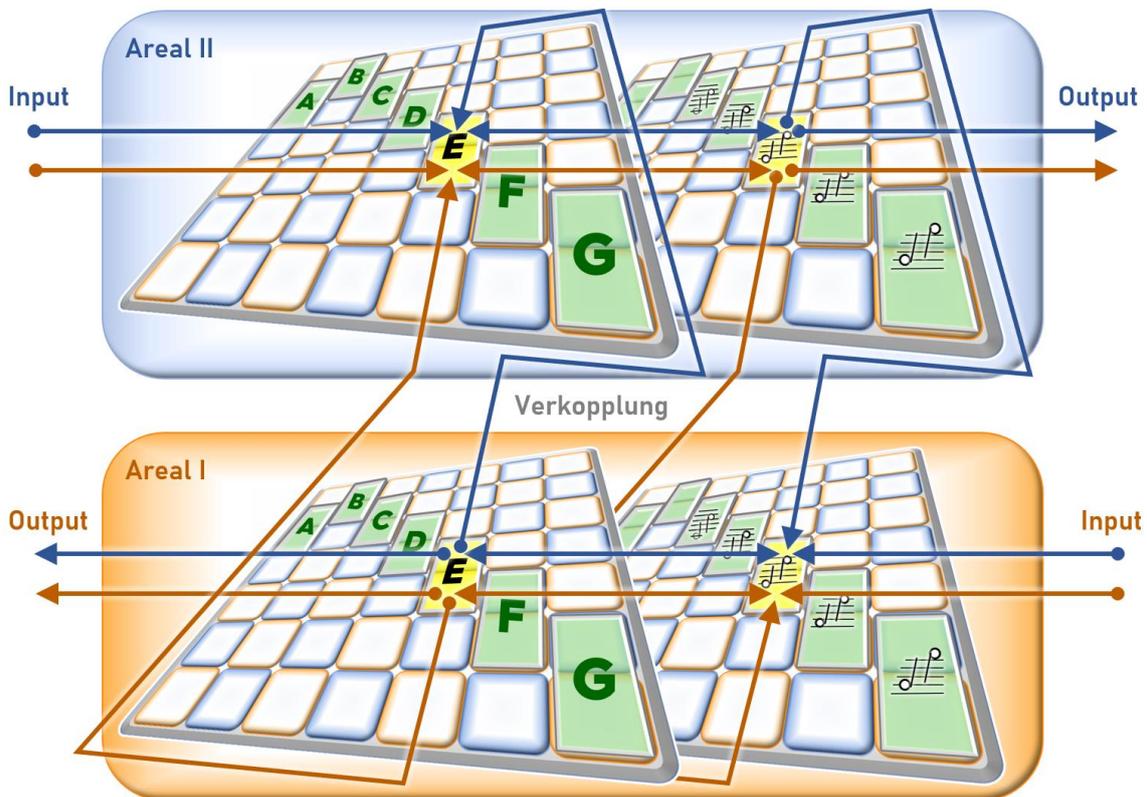


Bild: So sähe körperseitenübergreifendes Generieren gegensätzlicher Motorik-Wirkung aus.

Die Bilder sehen aus wie Original und Fälschung. Dabei stellen sie die gegensätzlichen Spielarten von sensorischer und motorischer neuronaler Verkopplung dar. Das Konzept der Motorik zeichnet sich durch zeitgleiches Generieren von Gegensätzlichem aus. Das lässt sich als eine reflexartige Ansprache eines Agonist-Muskels verstehen, dem gleichzeitig der passende kontralaterale Antagonist folgt. In diesem Fall ist die Verkopplung dadurch gekennzeichnet, dass die Bedeutungs-Alternativen der Output-Signale eines Areals genau den Bedeutungen im Input-Bereich des kontralateralen Areals entsprechen. Im Fall der Motorik gibt es auf beiden Körperseiten symmetrische Muskeln, bzw. Agonist-Antagonist-Paare. Die Areale unterscheiden sich allein darin, dass sie einmal die linke und einmal die rechte Körperseite steuern. Damit steuern beide Seiten einen identischen Muskel-Typ E oder dessen Antagonisten an. Änderungswirkung des jeweiligen Areals ist ein Wechsel des Fokus vom Agonisten zum Antagonisten oder umgekehrt.

Die Bedeutung der Output-Signale von Areal I ist identisch oder ähnelt der Bedeutung der Input-Signale von Areal II. Der Fall, dass dies gleichzeitig auch umgekehrt gilt, ist nur der Spezialfall, der zum Generieren von exakt Gegensätzlichem führt. Zwischen den Spezialfällen, die sich aus Sensorik und Motorik ableiten, liegen alle anderen Verkopplungsfälle im Gehirn. Die Gehirnareale leisten einen Beitrag, haben in sich aber keine eigene Perspektive auf den sich im Verbund abzeichnenden Sinn. Sinn entsteht allein aus der Perspektive eines außenstehenden Beobachters.

6 Lernen

Mit nachvollziehbaren physiologischen Merkmalen entwickelten sich im Laufe der Evolution aus einfachen Nervensystemen zentrale Gehirne. Diese sind mit bilateral-symmetrischer Körperform dazu in der Lage, zu lernen. Voraussetzung ist ihre beidseitige Ansteuerung von Muskeln und die nachfolgende Einordnung somatosensorischer Wahrnehmungen.

Das Lernen, Sammeln von Erfahrungen und Abrufen von Wissen spielt sich in den vielen Spielarten an Verkopplungen der Gehirnarealen ab, die zwischen Sensorik und Motorik liegen. Der springende Punkt ist, dass die Verteilung der Wissensinhalte auf beide Gehirnhälften alles andere als symmetrisch ist. Beliebige und über das ganze Gehirn verteilte Reizleitungsmuster repräsentieren aktuelle und erinnerte Situationen und Erfahrungen. Das Einspielen von Inhalten in das Speichermedium Gehirn und genauso der Abruf vorhandener Inhalte wird durch spezialisierte Gehirnareale unterstützt. Bereits beim Reptilienhirn sprachen wir vom Hippocampus als Beschleuniger von Merkprozessen.

Da Erfahrungen und Wissen nicht Sache allein einer Körperseite sind, müssen beide Seiten eng verknüpft sein. Eine herausragende Rolle dabei haben die Hemisphären-übergreifenden Kommissuren. Der Hippocampus etwa nutzt die *Commissura fornicis*. Die Kommissuren lassen sich wie bei der Motorik-nahen neuronalen Verkopplung für die Generierung von Gegensätzen nutzen. Wobei das Gegensätzliche als eine wechselnden Links-rechts-Zuordnung einer Impulsgeberrolle verstanden werden kann. Die wichtigste Eigenschaft des Hippocampus als *Merk-Beschleuniger* ist es dann, mit fast allen Gehirnarealen gut vernetzt zu sein. Dabei muss der Hippocampus von einem Input-Projektionsfeld gespeist werden, welches möglichst wirklichkeitstreu die Situation repräsentiert, in der sich das Lebewesen befindet. Der Dialog zwischen beiden Hippocampi mit verknüpften Projektionsfeldern verhandelt eine Art führende Rolle, löst aber auf beiden Seiten weitreichende Reizleitungsmuster aus.

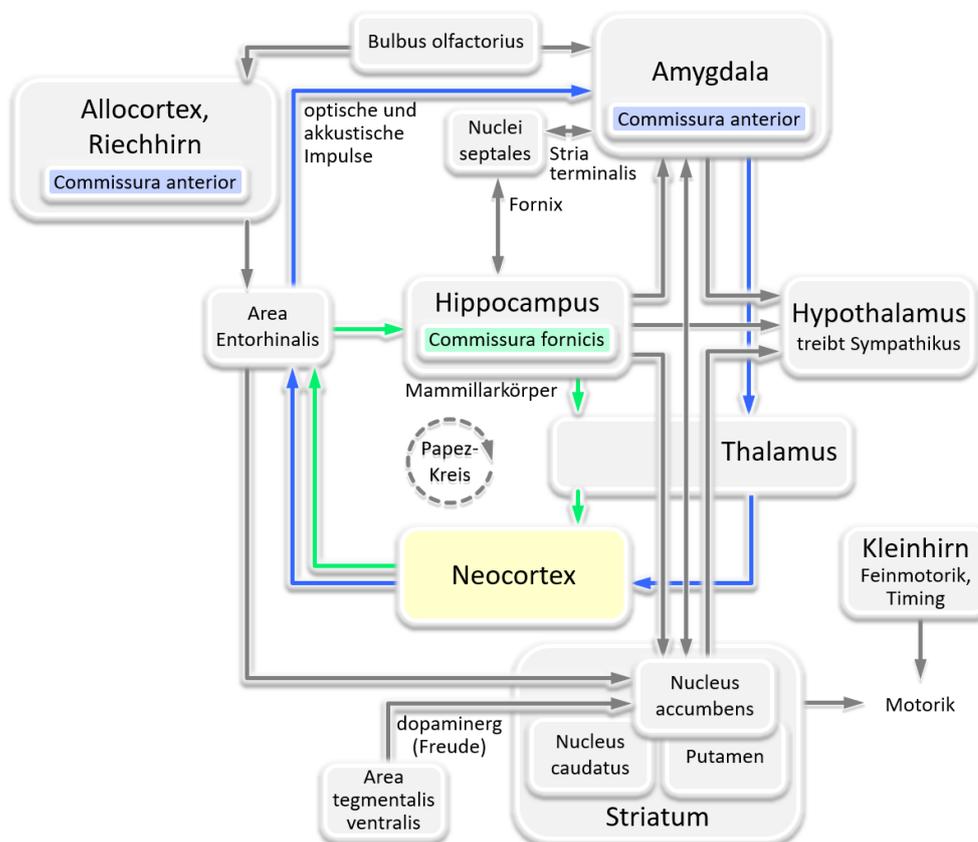


Bild: Gehirn-Modell mit beginnender Neocortex-Entwicklung

Einen weiteren Fortschritt der Evolution der Gehirne sehen wir im *Neocortex*. Darunter wird der multisensorische und motorische Teil der Großhirnrinde von Säugetieren verstanden. Sein besonderes physiologisches Merkmal ist der Aufbau mit sechs unterscheidbaren Schichten. Aufgabe und Zweck auch des Neocortex entstanden im freien Spiel der Kräfte. Dabei blieben funktionierende ältere Gehirnareale erst einmal erhalten. Allerdings gewinnt der Neocortex einen zunehmenden modulierenden Einfluss auf das neuronale Geschehen.

Da der Neocortex isoliert keinen Sinn ergibt, entstanden für dessen Einbindung neue Gehirnfunktionen der Säugetiere. Zu nennen ist vor allem das limbische System. Dazu gehört das zentrale Areal des *Thalamus*, über den alle sensorischen und später bewusst wahrnehmbaren Signale zum Cortex weitergeschaltet werden. Dazu gehört auch die Entstehung eines weiträumig verlaufenden Signalpfads, über den mehrere Millionen Signale über nacheinander geschaltete Neurone im Kreis geführt werden. Der sogenannte *Papez-Signalkreislauf*. Mit diesem wird der Neocortex mit dem *Merk-Beschleuniger* Hippocampus verkoppelt. Dabei wird der Input über die *Area Entorhinalis* und das Übergangsbereich *Subiculum* geleitet. Aufgabe der Area Entorhinalis mit ihrer Input-Position ist es, die aktuelle Situation zu stabilisieren und Wissen zum aktuellen Umfeld beizutragen. Sie moduliert den Merkprozess-Input und leistet Orientierung. Ähnlich wie mit einer Landkarte, die je nach Umfeld gewechselt werden kann.

7 Bewusstsein und seine Grenzen

Mit unserem Wissen über Gehirnzentren und funktionale Kopplungen wächst eine Vorstellung, wie Informationen im Gehirn entstehen und wie diese mit zunehmend komplexen Überlagerungen moduliert werden. Wie aber kann daraus ein gefühlt freischwebendes Bewusstsein entstehen? Eine tief in die Philosophie eindringende Frage, die sicherlich nicht mit einem Schritt zu beantworten ist. Dennoch können wir uns einer Vorstellung nähern, wo die Grenzen des Denkens und damit wahrscheinlich auch des Bewusstseins liegen. Relevant scheinen dafür die evolutionären Innovationen zu sein, die die Gehirne der Menschen und auch die von Primaten unterscheiden.

Auffällig in der jüngeren Evolution des Menschen ist die zunehmende Größe des *orbitofrontalen Cortex*, kurz: OFC. Besonderheit ist seine Lage im präfrontalen Cortex, der als einziger Bereich des Neocortex eine wechselseitige Verkopplung mit dem Hypothalamus hat. Aus Kenntnissen über seine Rolle bei der Verarbeitung von Emotionen wird der OFC auch in Zusammenhang mit psychologischen Eigenschaften wie etwa Moral gebracht. Er wird als limbischer Assoziationscortex gesehen. Und er scheint das Gehirn im Unterschied zu den Tieren fokussierter an den Körper und vom Hypothalamus gesteuerte Prozesse anzubinden.

Auch interessant ist die Nähe der Area Entorhinalis und damit ihre wahrscheinliche Kopplung zur *Parahippocampal place area*, kurz: PPA. Neurone in diesem Areal reagieren auf das Erkennen von Orten und Landschaften. Damit scheint der Merkprozess-Input im Papez-Signalkreislauf weiter systematisiert zu werden. Gleichsam einer Landkarte gibt die PPA Orientierung. Sie stabilisiert das Denken.

Zur – für das Verständnis des Denkens – herausragendsten Innovation scheint allerdings der Nucleus ventrolateralis des Thalamus beizutragen. Dieses Areal ist zugleich das Tor zum motorischen Cortex. Es bildet mit seinen Projektionsfeldern die Signale ab, die danach auf kürzestem Weg die oberen Motoneurone erreichen. Abgebildet wird somit die am Ende bewusst wahrnehmbare Motorik. Im Thalamus werden alle bewussten Sinnesinformationen in Richtung Cortex verschaltet. Mit dem Nucleus ventrolateralis wird das, was direkt in den Vollzug willkürlichen Muskelsteuerung einfließt, auf die gleiche informationstechnische Ebene der Wahrnehmung gestellt. Über diese Verschaltung verfügen allein Menschen und Primaten.

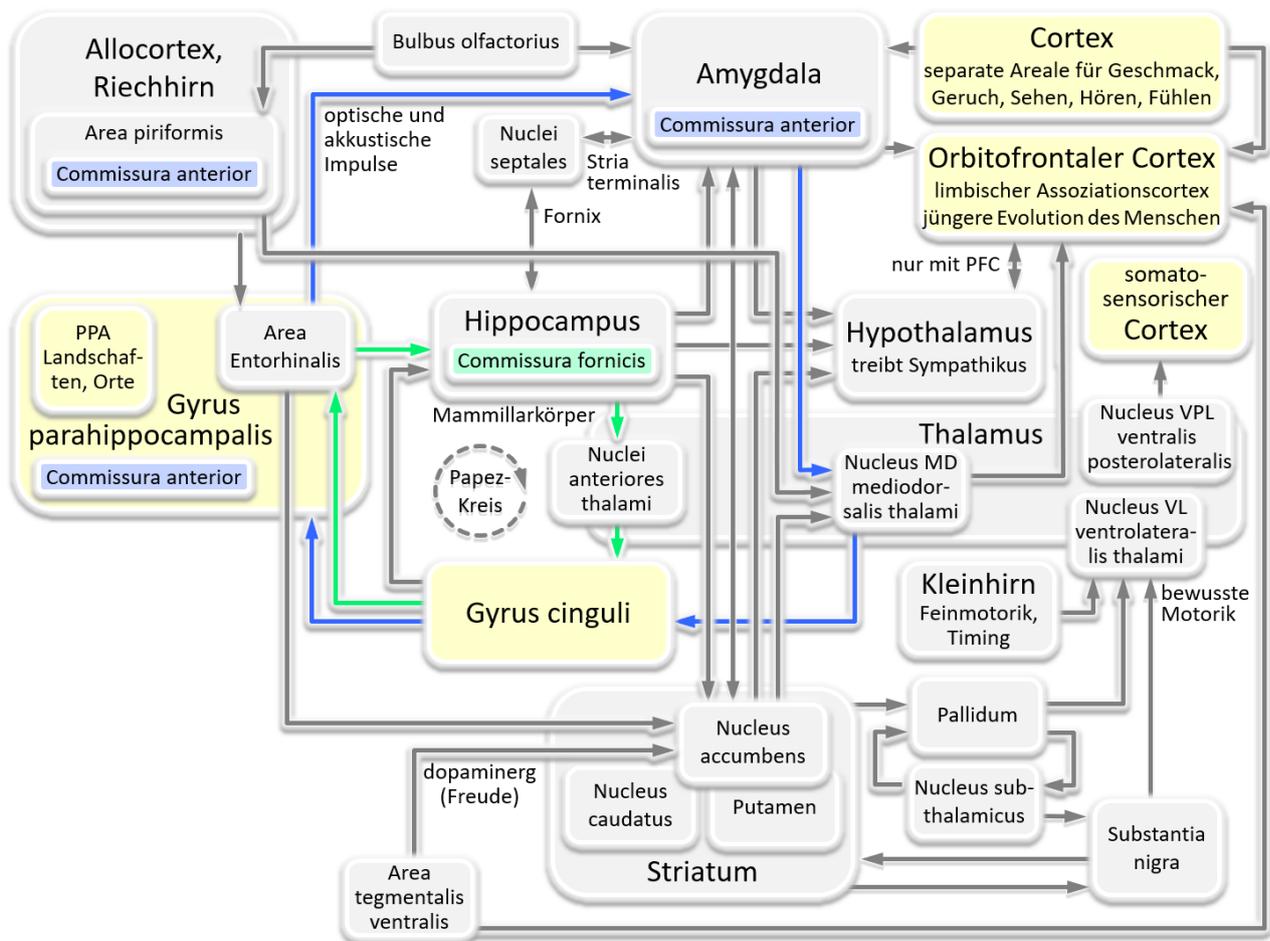


Bild: Gehirn-Areale bei Menschen knüpfen an Vorläufer-Gehirne an.

Mit der gleichzeitigen und auch gleichgewichtigen Wahrnehmung von Sensorik und Motorik scheint sich die Grenze dessen, was Bewusstsein ausmacht, deutlich zu verschieben. Wahrnehmen, Erinnern, Planen und Handeln lassen sich damit auf eine Informationsebene bringen. Bis hinunter auf die Ebene einfacher Projektionsfelder können Signale moduliert und Rückkopplungen vom Handeln zurück zur Wahrnehmung genutzt werden. Sensorik und Motorik werden eine Einheit. Und der Mensch gewinnt einen fundamentalen Regelkreis.

Interessant scheinen in dem Zusammenhang auch neuste Techniken zur mentalen Steuerung von Prothesen. Dazu werden trainierbarer Gehirnströme erfasst. Bemerkenswert sind Berichte, nach denen mental gesteuerte, externe Prothesen als Teil des Körpers empfunden werden.

Wichtig zur Annäherung an die Frage der Grenzen des Bewusstseins sind weiterhin philosophische Überlegungen. Denn auch die Natur unserer Motorik, die auf Muskelsteuerung begrenzt ist, spielt eine Rolle. Es wäre sicherlich recht nett, Superman-Eigenschaften zu haben, um Laserstrahlen auszustrahlen, Hitze zu erzeugen oder ähnlich verrückte Wirkungen auszulösen. Allerdings geht das nicht. Unser Denken ist dadurch wesentlich durch Objekte und Material bestimmt, mit dem wir motorisch wechselwirken können. Nach und nach, aber auch viel mühsamer, weiten wir unser Denken auf sensorisch Wahrnehmbares aus, sofern wir einen Weg finden, das Wahrgenommene zu beeinflussen. Noch weiter können wir gehen mit technisch Messbarem, welches wir mit physikalischen Modellen einordnen und verstehen. Klassisches Beispiel dazu ist die Relativitätstheorie, mit der wir Wirkungen in Raum und Zeit einordnen. Darauf bauen technische Entwicklungen wie etwa der optische Laser auf.

8 Wo sich das Bewusstsein befindet

Dieser Artikel knüpft an den Grundlagenartikel >>*Gegensätzlichkeit bringt uns das Denken*<< an. Der behandelt ein wiederkehrendes Muster der Gegensätzlichkeit bei In- und Output-Signalen und schließt auf systematische Verschaltungen zwischen Stufen der neuronalen Informationsverarbeitung (<https://www.kruegerGold.de/Texte/2022-Dichotomie-im-Gehirn.pdf>). Der Grundlagenartikel hebt den Sehsinn und den Neocortex der Säugetiere als herausragende Innovation hervor. Schlüsselement dabei ist die Erschließung einer Gegensätzlichkeit, die statische Muster und Bewegungen differenziert. Es wird gezeigt, dass der auf Kanten und Linien spezialisierte primäre visuelle Cortex einen nicht auf Antrieb erkennbaren Fortschritt leistet. Dieser läuft auf eine verbesserte Wahrnehmung von Raum und Zeit hinaus.

Ein ähnliches Schlüsselement ließe sich als Grundlage des Hemisphären-übergreifenden Denkens vermuten und wie folgt als Hypothese formulieren. Vorausgesetzt werden paarweise organisierte Signale im Papez-Kreis. Jedem Paar ist ein Informationsattribut bzw. eine bestimmte gehirnweite Auswirkung zugeordnet. Und für jedes Paar gilt, dass nur ein Partner-Signal aktiv ist. Repräsentiert würde damit eine Impulsgeberrolle oder eine Art Staffelstab, der zwischen den neuronalen Zentren hin und her gereicht wird. Daran soll die Annahme angeknüpft werden, dass es bei der Verkopplung zwischen Papez-Kreis und weit verteilten Gehirnarealen zu zwei grundsätzlich gegensätzlichen Input-Verhalten der Areale kommt. Und dass das Gehirn von einer Einrichtung der gegensätzlichen Verhaltensarten systematisch Gebrauch macht. Die beiden Verhaltensarten prägen wahlweise entweder

- (1) eine Veränderungswahrnehmung zum entsprechenden Papez-Kreis-Signal oder
- (2) ein Erkennen des Moments durch die Feststellung eines dauerhaften Signals.

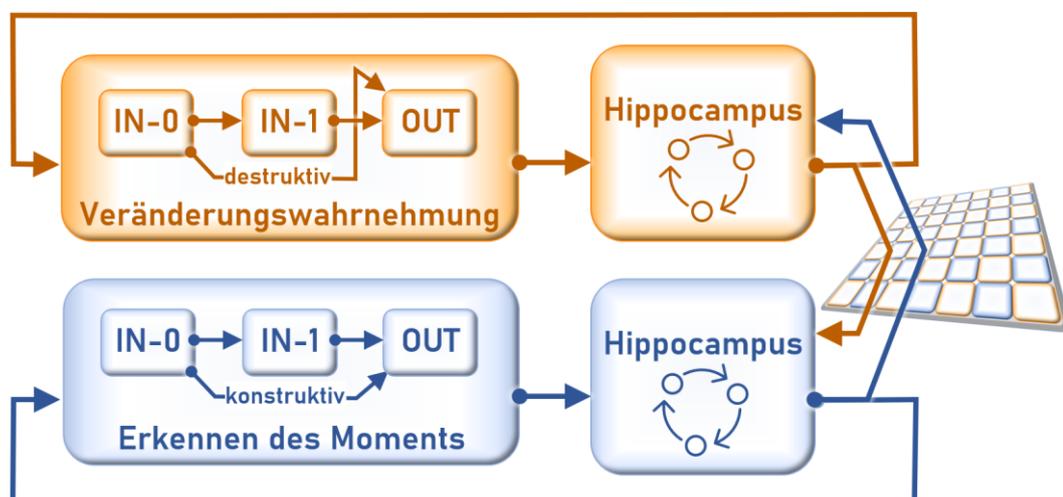


Bild: Vereinfachte Schaltungsvarianten zum Erzielen der gegensätzlichen Input-Verhalten

So könnte das Gehirnareal der einen Hemisphäre bevorzugt auf eine Veränderung des Inputs aus dem Papez-Kreis und das kontralaterale Gehirnareal auf einen beständig eintreffenden Input reagieren. Auf diese Weise würden sich große Teile des Gehirns spezialisieren. Und ihre Spezialisierung wäre gleichsam wie auf Knopfdruck als Fokussierungsfunktion durch das Gehirn nutzbar. Wir erinnern uns, dass die Gehirnareale mit paarweisen *Staffelstab-Signalen* angesprochen werden. Wenn der zu einer Hemisphäre zugeordnete Staffelstab inaktiv ist und damit auch das entsprechende Input-Verhalten nicht aktiviert wird, so kann selbstverständlich der gegensätzliche Staffelstab aktiv sein. Damit ändert sich zwar das Input-Verhalten, jedoch geschieht das nicht zu dem Preis, dass das Gehirnareal ohne Staffelstab nicht angesprochen würde. Es wird einfach auf eine andere Art angesprochen.

Das hier angenommene Spezialisierungskonzept scheint zu bekannten kognitiven Fähigkeiten zu passen. Die linke Gehirnhälfte 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. Vielleicht ist damit bereits ein früher evolutionäre Vorteil verbunden. Etwa mit der Fähigkeit zum schnellen Umschalten bei Gefahr. Das wäre nicht nur den hochentwickelten Säugetieren vorbehalten. Als Voraussetzung würden nach Körperseiten separierte Areale des vegetativen Nervensystems genügen. Der *Schalter im Kopf* würde zwischen aktiven Verhaltensarten hin und her schalten, nicht einfach nur in den Ruhemodus.

Der Ort, wo sich das Bewusstsein befindet, ist nicht mit einem Gehirnareal oder einer Stelle im Kopf zu beantworten. Aus medizinischen Erkenntnissen aus Verletzungen, Entfernung von Gehirnteilen oder durchtrennten Signalpfaden wissen wir, dass ein Bewusstsein in der Regel fortbesteht. Lernfähigkeit und Charaktereigenschaften können sich allerdings entscheidend verändern, etwa wenn Hippocampi, Papez-Kreis oder OFC betroffen sind. Allerdings ließe sich ein Signalkreislauf alternativ auch über Nucleus mediodorsalis, Gyrus parahippocampalis und Amygdala schließen. Und die Commissura anterior zur Hemisphären-Kopplung nutzen. Es ist denkbar, dass auch primitivere Säugetiere über so etwa wie ein Bewusstsein verfügen. Mit der oben entwickelten Hypothese kommt es auf vier Schlüsselemente für das Bewusstsein an.



Bild: Schlüsselemente des Bewusstseins erkennen den Moment wie auch dessen Änderung.

Die Schlussfolgerung daraus ist die, dass das Bewusstsein in funktionalen Merkmalen, die bei Bedarf auch von wechselnden Gehirnarealen übernommen werden, zu suchen ist. Eine vage Vorstellung ließe sich zum Schluss vielleicht doch noch formulieren ...

Ich nehme an, dass mit erwachendem Bewusstsein eine größer werdende Teilmenge der Signalpfade vor allem im Papez-Kreislauf den Zustand höheren Denkens definiert. Mit zunehmend als losgelöst empfundenem Bewusstsein ist die Zustand-bestimmende Teilmenge, die das Bewusstsein ausmacht, ihrerseits mit Arealen vorzugsweise im OFC verkoppelt. Dabei ist die bewusstseinsbildende Signal-Teilmenge von äußeren Einflüssen so gut es geht entkoppelt. Dennoch erlangt sie direkten Einfluss auf zustandsändernde *Staffelstab-Einstellungen*.