

Warum bin ich symmetrisch? II

⇒ Dieser Artikel greift eine jüngste Entdeckung der Neurobiologie auf und ordnet diese in grundlegende Schritte bei der Gehirnentwicklung ein. Nervenzellen bzw. Neurone spezialisieren sich auf Zielbereiche, die sie erreichen sollen, und werden im Wachstum ihrer Nervenfasern von der Umgebung gesteuert. Der Mechanismus macht sich die Möglichkeit der Gleichheit spiegelbildlicher Organe zunutze und ist Auslöser für den bilateral-symmetrischen Körperbau.

Zur Erklärung des „Warum“ der Symmetrie werden evolutionäre Entwicklung und Embryogenese im Zusammenhang betrachtet. Es wird eine Brücke von der kambrischen Explosion der Artenvielfalt über die Keimblattentwicklung und den Musterorganismus der Taufliege *Drosophila melanogaster* bis hin zum denkenden Gehirn geschlagen.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einordnung
- 2 Aktueller Stand der Biogenetik zur Neuronen-Entwicklung
- 3 Axone mit Pfadfinder-Qualitäten
- 4 Neuralrohr und frühe Differenzierung der Nervenzellen
- 5 Axon-Wachstum zur gegenüberliegenden Körperseite
- 6 Evolutionärer Fortschritt durch die Symmetrie
- 7 Zusammenspiel von Sensorik und Motorik im EEG-Takt
- 8 Übersichtsplan im Gehirn - Homunculus
- 9 Neocortex setzt noch einen drauf ...

Einordnung

„Wer, wie, was – wieso, weshalb, warum“ aus dem guten alten Sesamstraßenlied. Es stellt dem Was und Wie auch die W-Frage nach dem Warum an die Seite. Übertragen auf die Genetik sind Antworten auf ein Warum schwierig und oft nur empirisch möglich. Vergleichende Studien erlauben Schlussfolgerungen auf grobe Mechanismen und führen zu medizinischem Wissen und Medikamenten. Übergreifende Zusammenhänge sind dabei schwer zu durchleuchten. Zu komplex sind ineinandergreifende Gene, Proteinfaktoren und deren Zusammenwirken im entwickelten Lebewesen. Gerade in jüngster Zeit macht die Genetik große Fortschritte mit Fragen nach dem Was und dem Wie – Stichwort „Genschere“ mit der CRISPR/Cas-Methode. Der Fachbegriff Genotyp steht für die Gesamtheit der Gene eines Organismus und damit für das Was des Erbguts als Ganzes. Der Phänotyp oder das Erscheinungsbild ist in der Genetik die Menge aller Merkmale eines Organismus und beantwortet Fragen nach dem Wie. Der Phänotyp wird von unseren Genen hervorgebracht. Er unterscheidet sich vom Genotyp durch hochdynamische Abläufe. Denn aus der DNA-Analyse allein geht nicht hervor, welche Informationen und Varianten der Gene – sogenannte Allele – zur Anwendung kommen. Nachfolgend wird ausgehend von einer kaum zehn Jahre alten Entdeckung einer dynamischen Differenzierung von Gehirnzellen das Grundprinzip einer symmetrischen Organisation der Lebewesen untermauert. Ein Warum-bin-ich-so-wie-ich-bin wird greifbar.

Aktueller Stand der Biogenetik zur Neuronen-Entwicklung

Ein einzigartiger Mechanismus, der erst vor einem Jahrzehnt entdeckt wurde, unterscheidet die Nervenzellen von allen anderen Zellen durch das Hinzufügen einer langen Abfolge an Nukleinbasen am sogenannten „3'-Ende“ von messenger-RNAs. Die Summe der mRNAs einer Zelle prägt deren spezifische Rolle, welches Organ sie bildet und was sie bewirkt. Bis zu ihrem 3'-Ende transportiert mRNA den Code für die Produktion von Proteinen. Die angefügte Sequenz kodiert selbst keine Proteine und wird in der Biogenetik mehr und mehr als Kontroll-Zentrum für die funktionale Prägung insbesondere der Nervenzellen verstanden.

Der Artikel „Emerging Roles for 3' UTRs in Neurons“ von Bongmin Bae und Pedro Miura von April 2020 (Quelle: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7279237/>) umreißt den aktuellen Stand der Biogenetik mit Bezug auf die mRNA-Verlängerung wie folgt:

Die 3'-Verlängerungen der mRNA dienen als Zentren der Steuerung der mRNA und als Ziel für microRNA und für an RNA bindende Proteine. Teile der 3'-Verlängerungen bewirken Schwankungen der mRNA-Stabilität. Andere steuern die mRNA in Ziel-Bereiche innerhalb des Neurons und damit an ihren Wirkungsort – etwa zum Axon, zu den Dendriten oder Synapsen. Tausende mRNAs befinden sich in Unterbereichen der Zellen. Auch wenn ihre Rolle bei der Ziel-Bereich-Kontrolle als gefestigtes Wissen gilt, so werden die spezifischen 3'-Verlängerungen und ihre relevanten strukturellen Merkmale noch kaum verstanden. Das Nervensystem bringt selektiv 3'-Verlängerungen hervor. Wir beginnen gerade erst, die Regulierungsprozesse dahinter zu erkennen. Dabei stoßen wir auf überraschende Steuerungsaufgaben, welche über die reine Protein-Produktion hinausgehen. Auch verdichten sich Erkenntnisse, dass sich 3'-Verlängerungen teilen und zu stabilen Fragmenten führen, die wir heute noch nicht verstehen.

Der Artikel „Post-transcriptional Processing of mRNA in Neurons: The Vestiges of the RNA World Drive Transcriptome Diversity“ von Catia Andreassi, Hemish Crear, Antonella Eiccio von August 2018 (Quelle: <https://www.frontiersin.org/articles/403882>) betrachtet die in ihrem Axon, den Dendriten oder Synapsen differenzierte Ausprägung von Nervenzellen durch die 3'-Verlängerung von RNAs genauer und zeigt eine strukturierte Übersicht der erforschten Mechanismen. Es geht um alternative mRNA bei gleichem Erbgut, sogenannte Isoformen, und die damit verbundene Entstehung unterschiedlicher 3'-Verlängerungen wie auch von Varianten der mRNA in ihren Protein-kodierenden Abschnitten. Es geht um dahinterstehende Abläufe im Zellkern und danach im Cytoplasma. An RNA bindende Proteine werden per 3'-Verlängerung gezielt eingefangen. Damit werden dann enzymgesteuerte Abläufe erklärt, die etwa zu Teilung und Umbau der mRNA führen.

Der Biogenetik-Artikel spricht von einer potenziellen Erklärung mit dem starken Evolutionsdruck, der Proteine für bestimmte Funktionen hervorgebracht und optimiert hat. Dabei erscheint einleuchtend, dass sich der Protein-kodierende Bereich einer mRNA bis zu ihrem 3'-Ende nicht allzu viel an Variabilität erlauben darf. Das gilt nicht für die Verlängerung, die so zum Motor für die breite Diversität der Gehirnzellen-Differenzierung wird.

Eine gewonnene Erkenntnis ist, dass sich die Differenzierung der Zellen eines Lebewesens entgegen früherer Annahmen nicht allein aus der Anzahl der Gene ergibt. Insbesondere nachdem wir aus der Entschlüsselung des Genoms beim Menschen von nur 23.000 Genen ausgehen. Das würde für die Zelldifferenzierung nicht genügen, da nicht nur differenzierte Organe, deren Anordnung und Unterstrukturen, sondern auch die Wegfindung von Nervenfasern und damit deren korrekte Verschaltung Teil der Differenzierungsaufgabe ist.

Axone mit Pfadfinder-Qualitäten

Passend zu der neueren Erkenntnis zur Zelldifferenzierung über 3'-Verlängerung von mRNA wusste man schon einige Jahre früher, dass Nervenzellen in ihren entfernten Axonen über die Fähigkeit der Proteinsynthese verfügen. Der Artikel „Ribosomes in axons – scrounging from the neighbors?“ von Jeffery L. Twiss und Mike Fainzilber von Mai 2009 trägt dazu folgendes bei (Quelle: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0962892409000762>) ...

„Die jahrzehntelange Kontroverse über das Vorkommen von Ribosomen in Axonen verdichtet sich zu der Erkenntnis, dass die Proteinsynthesemaschinerie sowohl in zentralen als auch in peripheren Axonen während der Entwicklung und in adulten peripheren Axonen nach Verletzung rekrutiert und aktiviert wird. Forschungen deuten darauf hin, dass die Rekrutierung von Ribosomen zu Axonen auch über den seitlichen Transfer von Gliazellen erfolgt.“

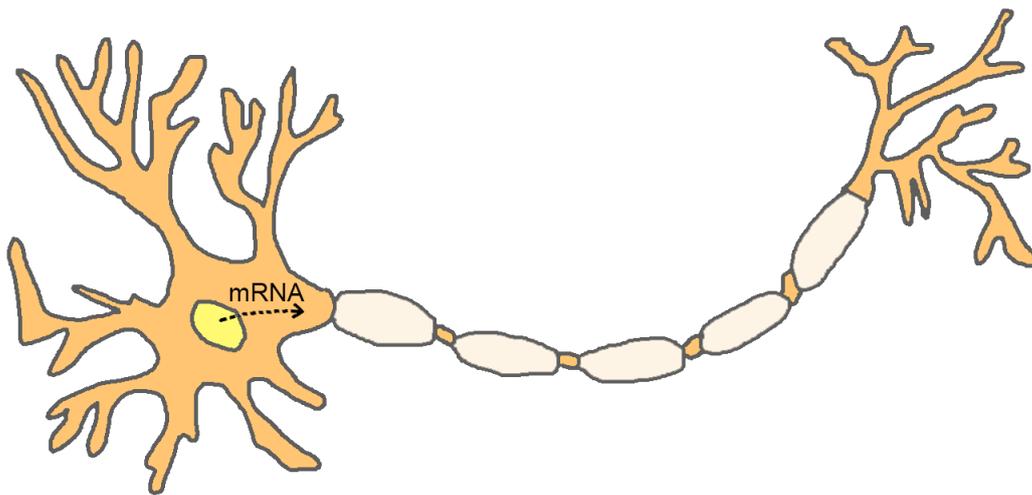


Bild: „Pfadfinder-mRNA“ wird vom Zellkern in das Axon eines Neurons transportiert

Mit den jüngsten Erkenntnissen über die Prägung Neuron-spezifischer mRNA und eine entsprechend Neuron-spezifische Proteinsynthese bis in den Wachstumskegel des Axons werden die Pfadfinderqualitäten vorstellbar. Neurone sind in der Entwicklung oder auch bei der Heilung von Verletzungen in der Lage, eindeutige Ziel-Organen oder auch Ziel-Neurone im Lebewesen per Axon-Wachstum zu erreichen.

Damit öffnet sich ein Fenster zum Mechanismus hinter der gezielten Einrichtung von Nachrichtenkanälen und gesamten Verschaltungslogik unseres Nervensystems. Und es dürfte sich wohl eine Vielzahl weiterer Forschungsfragen konkretisieren. Für diesen Artikel relevant ist heute, dass es eine funktionale Prägung der Nervenzellen gibt. Damit ist vorstellbar, dass mit deren Spezialisierung korrespondierende Organzellen oder auch Ziel-Neurone eine komplementäre Prägung mit auf den Weg bekommen. Am Zielpunkt des Axon-Wachstums könnten Wegweiser-Signale generiert werden. Organzellen und Ziel-Neurone würden mit den auf sie spezialisierten und suchenden Neuronen auf einen gemeinsamen Differenzierungs-Ursprung zurückgehen.

Eine Plausibilisierung für einen gemeinsamen Differenzierungsursprung von Organen und auf diese bezogenen Neurone ergibt sich aus zwei synchronen Vorgängen in der menschlichen Embryoentwicklung. Ab dem 23. Tag der Schwangerschaft kommt es zum sprunghaften Anstieg bei der Zellteilung der Neuronen-Stammzellen, zur sogenannten neuronalen Proliferation. Etwa zeitgleich am Ende der dritten Entwicklungswoche entstehen neben dem Neuralrohr je Wirbel und beidseitig der Körperachse die sogenannten Somiten. Das sind abgegrenzte Zellverbände, aus denen später alle Organe hervorgehen.

Neuralrohr und frühe Differenzierung der Nervenzellen

Im Protein-Gemisch des embryonalen Keimblatts bildet sich durch Abfaltung im Bild nach unten bzw. nach ventral die Neuralrinne. Mit ihr zeigt sich die Symmetrieachse des entstehenden Lebewesens. Die Rinnenstruktur verschließt sich später auch oben und wird zum Neuralrohr. Bemerkenswert ist die frühe Differenzierung der Neuronen-Stammzellen.

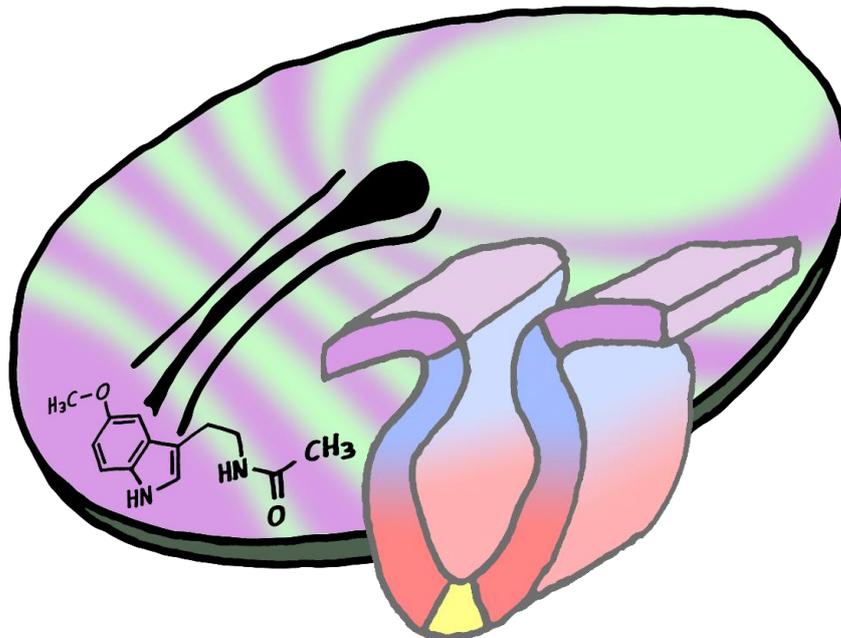


Bild: Neuralrinne in der Mitte des Keimblatts wird zum Neuralrohr

Der in der Darstellung gelbe Bereich wird als Bodenplatte des Neuralrohrs bezeichnet. Die hier differenzierten Neurone synthetisieren ein Protein, welches den Verlauf der Entwicklung maßgeblich kontrolliert. Das sogenannte Sonic Hedgehog, kurz: SHH, ist ein evolutionär stark konserviertes Signalmolekül. Es reguliert die embryonale Entwicklung aller bilateral-symmetrischen Tierarten. SHH kontrolliert die Organisation des zentralen Nervensystems, der Gliedmaßen, Finger und vieler anderer Körperteile. SHH modelliert den sich entwickelnden Embryo unter Verwendung eines Konzentrationsgradienten. Bei ungleichmäßiger Verteilung der SHH-Moleküle werden unterschiedliche Zellschicksale vorbestimmt (Quelle: Wikipedia).

Neben der Teilung in links und rechts ist unser Rückenmark auch in einen motorisch spezialisierten vorderen – bzw. ventralen – Bereich und einen sensorisch spezialisierten hinteren, dorsalen Bereich gegliedert. Die in motorisch oder sensorisch differenzierten Zellschicksale werden durch den ausgehend von der Bodenplatte nach oben hin abnehmenden SHH-Konzentrationsgradienten gesteuert. Der im Bild rote Sektor des Neuralrohrs enthält motorische, der blaue sensorische Neuronen-Stammzellen.

Nach dem Prinzip der Parsimonie, einem Sparsamkeitsprinzip aus der Scholastik, ist bei erklärenden Hypothesen und Theorien höchstmögliche Sparsamkeit geboten. Übertragen auf diesen Artikel ist ebenso sparsam mit komplexen Mechanismen von Lebewesen umzugehen, die einem einzigen Zeitpunkt in der Evolution zugerechnet werden. Daher sei hier angemerkt, dass wir davon ausgehen, dass Nervenkreisläufe mit sensorischen und motorischen Signalpfaden schon vor den bilateral-symmetrischen Lebewesen und vor zentralen Gehirnen evolutionär entstanden sein mussten. So verfügen etwa auch Quallen über ein Nervensystem.

Axon-Wachstum zur gegenüberliegenden Körperseite

Die besondere Bedeutung des Nervensystems der Taufliegenart *Drosophila melanogaster* liegt darin, dass es als leistungsfähiges Modellsystem für neurogenetische Untersuchungen Verwendung findet. Die Taufliegenart ist außerordentlich gut untersucht und trägt bis hin zur Humanmedizin zu Erkenntnissen bei. Dabei ist ihr zentrales Strickleiter-Nervensystem mit vergrößerten Ganglien am Kopfende näher am Nervensystem der frühen Bilateria, als an dem des Menschen. Das Auftreten bilateral-symmetrischer Lebewesen und die etwa zeitgleiche Entwicklung der ersten zentralen Nervensysteme schreiben wir der sogenannten kambrischen Artenexplosion vor etwa 540 Millionen Jahren zu. *Drosophila* hilft uns also auch, näher an den Ursprung der Entwicklung heranzukommen – an das Warum unserer Symmetrie.

Das Universitätskript „Neurobiologie von *Drosophila*“ von Prof. Christian Klämbt und Prof. Ralf Stanewsky von Oktober 2020 erlaubt einen Einblick in die wissenschaftliche Arbeit und enthält einen im Zusammenhang mit dem Axon-Wachstum interessanten Abschnitt zur Neurogenese (Quelle: <http://neurobio.uni-muenster.de/sites/neurobio.uni-muenster.de/files/2021-01/Drosophila%20Skript%202020.pdf>). „Die Neurone differenzieren und senden Axone aus. Die Spitze eines Axons, der Wachstumskegel, nimmt während des Auswachsens in der Umgebung Signale auf, die eine korrekte Wegfindung und damit eine korrekte Verschaltung ermöglichen. Das axonale Muster im *Drosophila* ZNS erinnert an eine Strickleiter. Die Sprossen sind die Kommissuren ... Neben der Beeinflussung der Differenzierung lateraler Neurone steuern die Mittellinienzellen des Neuralrohrs das Auswachsen kommissuraler Axone ... das gleiche gilt auch für die Mittellinienzellen der Wirbeltiere, die Bodenplattenzellen.“

Der Sprung in der Evolution – so lässt sich vermuten – geht auf die Wirkung der Bodenplatte im Neuralrohr zurück, die zur maßgeblichen körperseiten-übergreifenden Verschaltung führt.

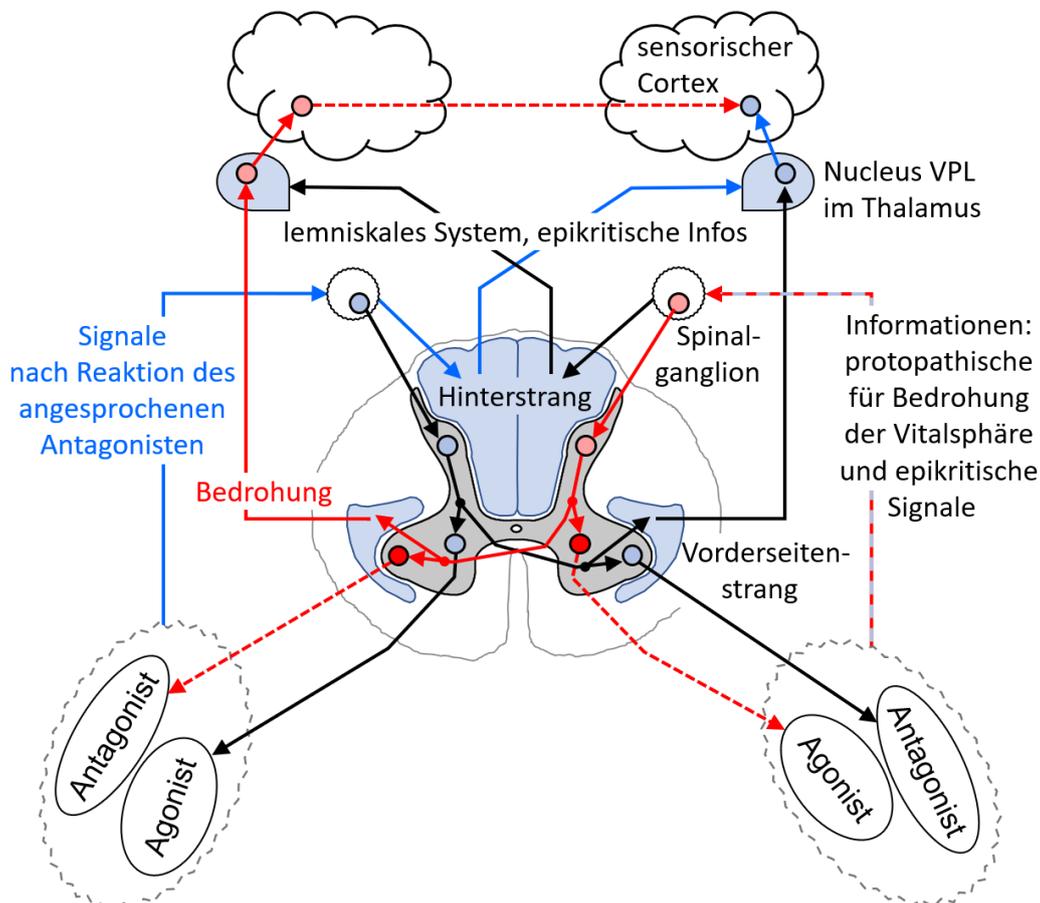


Bild: Körperseiten-übergreifende Nervensystem-Verschaltung bei Säugetieren

Evolutionärer Fortschritt durch die Symmetrie

Im Prinzip-Bild zur körperseiten-übergreifenden Nervensystem-Verschaltung bei Säugetieren ist zu sehen, dass die Motoneurone des Rückenmarks – im Bild dunkelrot – über nur wenige Zwischen-Neurone und ausgehend von sensorischen Signalen ansteuerbar sind. Zu sehen ist darüber hinaus eine Weiterleitung von Signalen an ein zentrales Gehirn, von wo dann über obere Motoneurone im motorischen Cortex ebenfalls eine Ansteuerung unterer Motoneuronen des Rückenmarks erfolgt. Die Ansteuerung vom Gehirn aus wird durch unser Bewusstsein beeinflusst, die Ansteuerung auf Ebene des Rückenmarks erleben wir dagegen als Reflexe.

Der daraus erwachsende evolutionäre Vorteil, der bereits für *Drosophila* gilt, liegt darin, dass eine komplexere Signalverarbeitung hinzutritt. Übergreifend nutzbare Sinnessignale wie die der Augen können erheblich besser vorverarbeitet und bei Flucht oder Nahrungssuche für eine noch besser koordinierte Ansteuerung verschiedener Muskeln eingesetzt werden. Die bessere Sinneswahrnehmung und besser koordinierte Bewegungen machen den Unterschied.

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.“

Gesundheitsbewusste Menschen kennen Balance-Übungen auf einem Bein, mit denen sie die schnelle Ansteuerung ihrer Mikromuskulatur auf Ebene des Rückenmarks trainieren. Dabei passiert vieles unterbewusst und schnell. Im Ergebnis erreichen wir eine perfekte Abstimmung der an unserer Balance beteiligten Einzelmuskeln und deren 1b-Neurone. Wenn wir dagegen bewusst zupacken, können wir uns nicht um jeden Muskel einzeln kümmern und nutzen 1s-Neurone. Typ 1s eignet sich allein deshalb für die zentral gesteuerten Befehle, da das Gehirn weit entfernt ist und über einzelne Axone je Muskelgruppe koordinierte Bewegungen steuert. Das erfordert einen kleinen und auf die einzelnen Axone zugeschnittenen Eingangsbereich.

„Wir haben herausgefunden, dass die Höhe ihrer Potenzial-Grundlinie sowie die erforderliche Auslöse-Spannung 1b- und 1s-Neurone unterscheidet. Wir haben nachgewiesen, dass das Shaker-cognate-I-Gen den Typ-A-K⁺-Kanal kodiert, der das Antwortverhalten auf Spannungsspitzen beeinflusst. 1s-Neurone zeigten eine charakteristisch verzögerte Reaktion.“ Mit dieser frühen Erkenntnis wird im oben angesprochenen Artikel ein genetischer Zusammenhang hergestellt. Mit hinzukommenden Erkenntnissen über die 3'-Verlängerungen wissen wir heute, dass es komplexe ineinandergreifende Mechanismen gibt, welche verschiedenartige Neurone differenzieren, die das sha-I-Gen in einem Fall zur Expression bringen und im anderen nicht.

Den Fortschritt gegenüber evolutionär bereits zuvor hervorgebrachten Nervenkreisläufen bringen aufgesattelte Signalkreisläufe mit Anbindung an ein zentrales Gehirn. Warum ist der bilateral-symmetrische Körperbau eine Voraussetzung dafür? Die Antwort darauf ist bemerkenswert kompakt: Sensorische und motorische Neurone und die dazu korrespondierenden Organ-Körperzellen werden in ihrer Differenzierung aufeinander abgestimmt, so dass sie zueinander finden können. Danach ermöglicht die körperseiten-übergreifende Verschaltung, dass auch im Gehirn Hemisphären-übergreifende Verschaltungen zueinander finden.

Mit der genetischen Gleichheit spiegelbildlicher Organe festigen sich weitreichende Verschaltungen. Das erlaubt die Konzentration von höherer Signalverarbeitung in einem Kopfbereich.

Zusammenspiel von Sensorik und Motorik im EEG-Takt

Bei Delta- und Theta-Wellen unter 8 Hertz der EEG-Hirnstrommessung schlafen wir, bei Alpha-, Beta-, Gamma-Wellen sind wir wach. Dass übergreifende Hirnfunktionen einem Rhythmus folgen, ist bis hin zu Insekten und niederen Tieren nachweisbar. Taktgeber bei höheren Lebewesen ist ein Neuronennetzwerk der Formatio reticularis im Hirnstamm. Das aufsteigende retikuläre Aktivierungssystem ARAS aktiviert die Pyramidenzellen der Hirnrinde, welche über weite Nervenfasern bis über einen Meter Länge zum einen die Skelettmuskeln vom motorischen Cortex aus ansteuern und zum andern spiegelbildliche Gehirnareale der gegenüberliegenden Hemisphäre erreichen.

Durch die Sonderstellung, dass mit den Pyramidenzellen bevorzugt Fernverbindungen im Gehirn per gemeinsamem Takt aktiviert werden, hat die Evolution eine weitere Grundlage für ein vom Ort des Geschehens entferntes Gehirn geschaffen. Synchroner Signale eignen sich besonders für Resonanzen, die einen Erregungszustand aufrechterhalten oder verstärken können. Nur so werden Reizschwellen zur Ansteuerung der Skelettmuskeln überschritten. In der Entwicklungsphase des Gehirns müssen beide Gehirnhälften beim Ansprechen einer Muskelgruppe einen für diese spezifischen Bedeutungskontext aktiv halten.

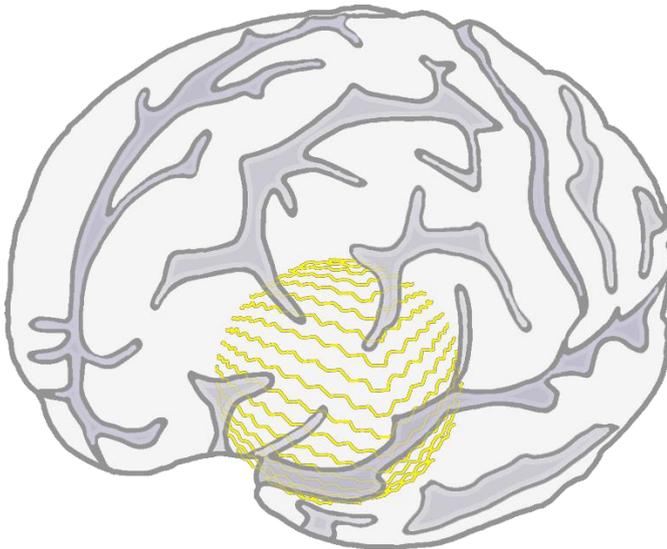


Bild: Aktivierungssystem ARAS ermöglicht Resonanzen als Vorstufe koordinierter Bewegung

Der Artikel „Electrophysiological Correlates of Rest and Activity in *Drosophila melanogaster*“ von Douglas A. Nitz, Bruno van Swinderen, Giulio Tononi, Ralph J. Greenspan von November 2002 (Quelle: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982202013003>) schlägt eine Brücke zu *Drosophila* und lässt vermuten, dass zentrale Taktgeber eine wesentliche Rolle in der frühen Evolution und Gehirnentwicklung spielten. Der Artikel befasst sich mit an lebenden Taufliiegen wie bei einem EEG gemessenen impulsartigen Spannungsspitzen. Diese haben eine Dauer zwischen 5 und 50 ms. Sie treten als Burst-Signale im Sekundenbereich auf. Eine deutliche Änderung und Abschwächung der Burst-Signale wird in schlafähnlichen Ruhephasen der Taufliergie beobachtet. Dabei erhöht sich die Erregungsschwelle der Motorik.

Der Mechanismus scheint im Ergebnis zwei Fliegen mit einer Klappe zu schlagen. Zum einen werden Pyramidenzellen und ihre Fernverbindungen in die Lage versetzt, sich gegen ein Grundrauschen überlagerter Gehirnaktivitäten durchzusetzen. Zum anderen wird erstmals auch ein primitiver übergreifender Zusammenhang mit Einbindung der Sinnesorgane geschaffen. Wie eine Hülle liegen die retikulären Strukturen des ARAS um die spezifischen Kerne der Sinnesorgane im Thalamus. Die unspezifischen Zentralkerne des Thalamus leiten zum Nucleus caudatus und zum Putamen, die beide regulatorisch auf die Motorik wirken.

Übersichtsplan im Gehirn - Homunculus

Am Anfang des Lernprozesses im Gehirn steht das Erlernen des eigenen Körpers, des Was-ist-wo. Grundlage dafür sind Bereiche im Gehirn mit somatotopischer Anordnung. In diesen Bereichen sind die Positionen der Neurone zueinander entsprechend der relativen Lage der Körperteile angeordnet, die sie bei der Informationsverarbeitung repräsentieren. Bei Säugtieren und Menschen besitzen der sensorische und der motorische Cortex beider Gehirnhälften eine jeweils somatotopische Anordnung – man spricht auch vom sensorischen und motorischen Homunculus oder Menschlein. Ein weiterer Bereich liegt im Thalamus, in den die sensorischen Signale des Körpers eintreten. Es wird vermutet, dass sich die Homunculus-Areale durch phänotypische Differenzierung der Gehirnzellen bilden. Die am Anfang des Artikels behandelte Differenzierung durch die 3'-Verlängerung von mRNA trägt dazu bei, dass austretende wie auch eintretende Axone durch gelenktes Wachstum ihre Zielbereiche finden.

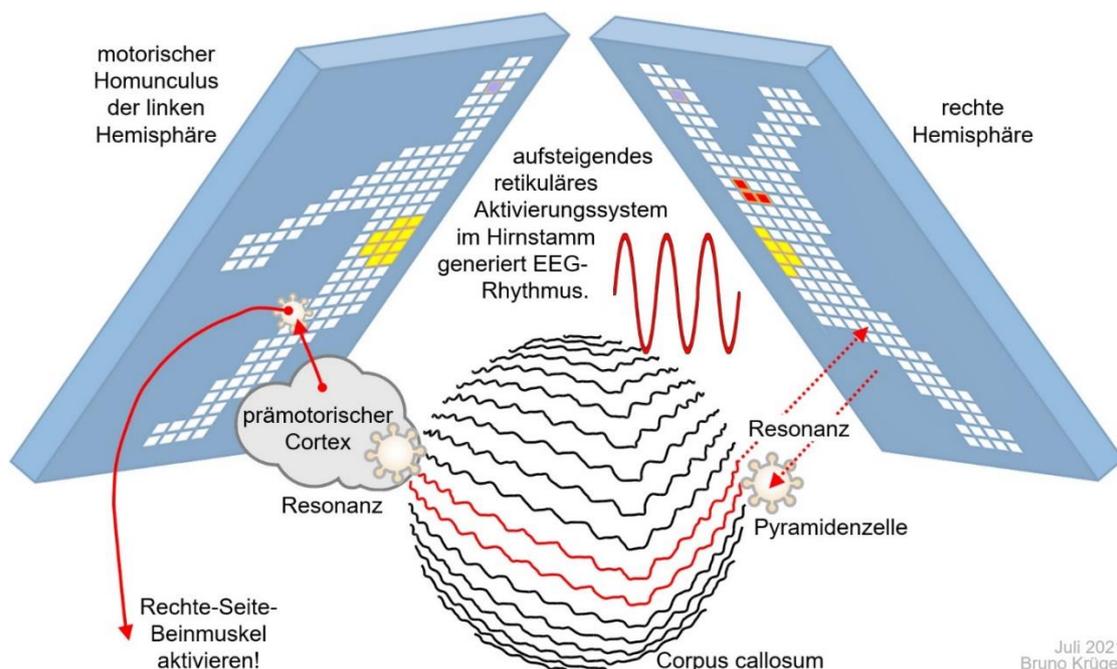


Bild: Motorischer Homunculus der linken im Zusammenwirken mit rechter Hemisphäre

Wiederkehrende Aktivitäten führen zu Brückenbildungen und Signalschleifen zwischen aktiven Neuronen. Ein Lernprozess setzt ein. Bei Reizen, die die Bedrohung eines Körperteils signalisieren, erfolgt eine eindringliche Aktivierung von Neuronen der Sensorik in Thalamus und Cortex. Weitere Neurone, die wegen des reflexartig bewegten Körperteils aktiv sind, werden in Signalschleifen einbezogen. In der frühen Lernphase bewirken Agonist-Reflexe Wechselwirkungen mit jeweils entsprechenden Antagonisten auf der gegenüberliegenden Körperseite. Das führt zu Muskelbewegungen und damit auf beiden Seiten zu epikritischen Signalen ans Gehirn. Im linken und zugleich im rechten sensorischen Cortex und Thalamus kommt es in der Folge zur Aktivierung zueinander passender Neurone, die auf beiden Seiten das spiegelbildlich vorhandene Körperteil repräsentieren. Der springende Punkt ist, dass sich Signalschleifen zwischen den Gehirnhälften ausprägen, die bei eindringlichen Bedrohungen wirken und eine Empfindlichkeit der nicht-bedrohten Körperseite für differenziertere Reize steuern.

Homunculus-Neurone könnten auf eine ursprüngliche gemeinsame Differenzierung mit Organzellen zurückgehen, um ihre Verschaltung zu erklären. Eine stimmige Hemisphären-überbrückende Verschaltung über das Corpus callosum ließe sich dagegen mit der durch synchrone Aktivierung begünstigten Festigung erklären. Ungefestigte Signalwege führen zu weniger Kontakten eines Axons mit Dendriten im Ziel-Bereich. Wissenschaftlich bekannt ist, dass das eine Apoptose bzw. kontrollierten Selbstmord unbrauchbarer Neurone auslösen kann.

Neocortex setzt noch einen drauf ...

Eine Konzentration von höherer Signalverarbeitung mit einem steuernden Kopf war ein bahnbrechender Fortschritt in der Evolution. Damit wurden die Lebewesen symmetrisch. Auf die davor bereits hervorgebrachten sensorisch-motorischen Signalkreisläufen wurden höhere Signalkreisläufe aufgesattelt. Das entkoppelte die zuvor in ihrer Wirksamkeit lokal beschränkte Sensorik, so dass sie zunehmend übergreifend und für eine koordinierte Bewegungskontrolle nutzbar wurde. Die Entwicklung von den ersten Bilateria bis zur Taufliede Drosophila konnte daraufhin hochspezialisierte Sinnesorgane wie vor allem die Augen und die für koordinierte Bewegungen aufeinander abgestimmten Gliedmaße hervorbringen.

Ein ebenfalls enormer Fortschritt in der Evolution und für die Gehirne verbindet sich mit dem Aufkommen der Säugetiere. Das Verhalten der Säugetiere unterscheidet sich besonders durch seine soziale Natur mit zu beobachtenden Empfindungen wie Sorge um den Nachwuchs, Angst, Liebe, Lust und Spieltrieb. Neurologisch neu ist der Neocortex. Dieser hat mit sechs unterscheidbaren Schichten eine andere Struktur als die übrige Großhirnrinde, von der er beim Menschen rund 90 % einnimmt. Die Eingangsschnittstelle zur Sensorik des Neocortex ist der Thalamus mit seinen spezifischen Kernen der Sinnesorgane. Die das Rückenmark ansteuernde Ausgangsschnittstelle ist der Motorcortex (im Bild unten rot dargestellt).

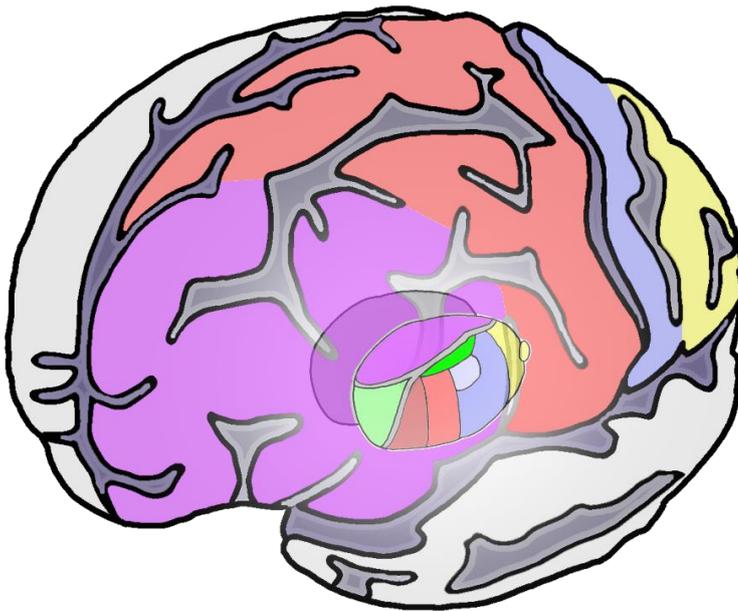


Bild: Neocortex mit zum Thalamus in seinem Zentrum korrespondierenden Arealen

Im hinteren Bereich der Hirnrinde liegen die sensorischen Felder, wie die Sehrinde (im Bild gelb) und der sensorische Homunculus (im Bild hellblau). Davor liegt der motorische Homunculus und ganz vorne die assoziativen Felder der Hirnrinde (im Bild violett).

Eine zentrale Vermittler-Rolle hat das limbische System der Säugetiere, welches sich um den Thalamus formiert. Es ist Bindeglied zwischen Neocortex und älteren Hirnbereichen und sorgt für eine koordinierte Kontrolle von Sensorik und Motorik. Vom limbischen System wird der sogenannte Papez-Kreis in Gang gesetzt. Ein Signalkreislauf, der zum einen den Wirkungseinfluss des Großhirns sicherstellt und zum anderen Denkvorgänge vom Grundrauschen neuronaler Aktivitäten besser entkoppelt. Von diesem System gehen auch die bewusste Bewegungskontrolle und das Gedächtnis für bewusste Wahrnehmungen aus. Darauf wird in weiterführenden Artikeln näher eingegangen (Quelle: <https://www.KruegerGold.de>).