

Wie Kiemenbögen Hirnnerven (chaotisch) ordnen (Von LUCA bis Eva #12)

Intro

Wenn wir Wirbeltiere betrachten – Fische, Amphibien, Reptilien, Vögel und Säugetiere –, sehen wir völlig unterschiedliche Köpfe, die jedoch alle einen gemeinsamen Bauplan haben, den wir in den letzten Episoden ergründet haben: von der Wirbelsäule bis zum Kiefer. Eine der wichtigsten Regionen, die an der Entwicklung wichtiger Kopfstrukturen – und darüber hinaus beteiligt sind, sind die Kiemenbögen.

Im Laufe der Evolution wurden diese umgebaut, umfunktioniert und immer wieder neu eingesetzt: zu Kieferknochen, Kehlkopfstrukturen, Mittelohrknöchelchen und vielem mehr.

Und eng mit dieser Geschichte verbunden sind die Hirnnerven. Jeder Kiemenbogen wird von einem bestimmten Nerv versorgt – und genau dieses uralte Muster lässt sich noch heute in uns Menschen erkennen. Es zeigt, wie sich komplexe Strukturen nicht „neu erfinden“, sondern aus vorhandenen Bauteilen weiterentwickeln.

In diesem Video schauen wir uns an, wie diese Nerven entstanden, warum sie noch immer dem uralten Kiemenbogen-Plan folgen – und wie man daran die Evolution beinahe „ablesen“ kann.

Schaut auch in die Videobeschreibung für weiterführende Literatur und Studien.

Kiemenbögen

Beginnen wir erstmal damit zu klären, was Kiemenbögen eigentlich sind. Wir haben sie schon in den Episoden zur Entstehung des Kopfes und vor allem des Kiefers angesprochen und schaut da gerne nochmal vorbei.¹ Doch hier das Wichtigste:

Kiemenbögen erscheinen als eine Reihe sich wiederholender Schwellungen und Spalten im Embryo der Wirbeltiere. So bilden auch menschliche Embryonen diese Kiemenbögen aus. Wichtig für unser Verständnis: die Kiemenbögen im Embryo sind keine (funktionalen) Kiemen, sondern embryonale Anlagen aus denen eine Vielzahl von Organen hervorgehen, so auch die Kiemen bei Fischen. Kiemenbögen waren schon bei den Vorfahren der Deuterostomia vorhanden und finden sich auch bei Hemichordaten, Manteltieren und Lanzettfischchen. Bei den Echinodermata – den

¹ Siehe:

- Entstehung der Wirbeltierkiefer: Der erste Biss der Evolution (Von Luca bis Eva Teil 11). <https://internet-evoluzzer.de/entstehung-der-wirbeltierkiefer-der-erste-biss-der-evolution-von-luca-bis-eva-teil-11/> als Video: <https://youtu.be/Vu8Ls6yyDe8>

Seesternen, Seeigeln und ihren Verwandten, sind sie sekundär wieder reduziert worden.

Jeder Kiemenbogen ist im Prinzip gleich aufgebaut, man spricht von Metamerie. So weist jeder Kiemenbogen einen Kern aus Mesoderm, aus der später eine Knorpel- und Muskelanlage hervorgeht, einen Kiemenbogennerv aus der Neuralleiste und eine Kiemenbogenarterie auf. Aus den Kiemenbogen entwickeln sich bei höheren Wirbeltieren viele Organe, die deshalb als branchiogene Organe bezeichnet werden. Bei Säugetierembryonen bilden sich grundsätzlich sechs Kiemenbögen aus, die wir uns näher anschauen.²

Den ersten Kiemenbogen, auch Mandibularbogen genannt, haben wir intensiv in unserer letzten Episode über die Entstehung der Kiefer behandelt. Die Knorpelanlage wird als Meckelscher Knorpel bezeichnet. Aus ihm entstehen große Teile des Gesichtsschädels, wie Ober- und Unterkiefer und Gaumen. Bei Säugetieren entstehen zudem die beiden Mittelohrknochen Hammer und Amboss aus dem ersten Kiemenbogen. Bei anderen Wirbeltieren bilden diese Knochen Teil des primären Kiefergelenks. Aus der Muskelanlage entsteht die Kaumuskulatur, die Arterie des ersten Bogens bildet sich weitgehend zurück, ist aber zu einem geringen Teil an der Bildung der äußeren Halsschlagader (Arteria carotis externa) und der Oberkieferarterie beteiligt.

Aus dem zweiten Kiemenbogen, auch Hyoidbogen genannt, entsteht der obere Teil des Zungenbeins und Teile des Schläfenbeins, sowie der Steigbügel. Aus der Muskelanlage entstehen vor allem die Gesichtsmuskeln, die für die Mimik verantwortlich sind. Die zugehörige Arterie entwickelt sich zunächst zur Arteria stapedia. Diese wiederum bildet sich aber vollständig zurück, so dass lediglich ein gefäßloses Loch im Steigbügel übrigbleibt.

Der Knorpel des dritten Kiemenbogens entwickelt sich zum unteren Teil des Zungenbeins die Muskelanlage zum Musculus stylopharyngeus, die Arterie entwickelt sich gemeinsam mit der dorsalen Aorta zur inneren Halsschlagader (Arteria carotis interna).

Aus der Knorpelanlage des vierten Kiemenbogens bildet sich der obere Teil des Kehlkopfes und aus der Muskelanlage die entsprechende Kehlkopfmuskulatur und ein Teil der Rachenmuskulatur. Die Arterien des vierten Kiemenbogens entwickeln sich auf beiden Seiten unterschiedlich: Aus der linken Arterie entsteht der Aortenbogen, aus der rechten die Unterschlüsselbeinarterie (Arteria subclavia dextra).

Der fünfte Kiemenbogen ist rudimentär und bildet keine Strukturen aus.

² Zum generellen Aufbau und den daraus resultierenden Organen der Kiemenbögen siehe:

- Bommas-Ebert, U. et al. (2006). Kurzlehrbuch Anatomie und Embryologie. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart 2006
- Sadler, TW (2014). Taschenlehrbuch Embryologie: Die normale menschliche Entwicklung und ihre Fehlbildungen. 12., überarb. und erw. Auflage. Thieme, Stuttgart.
- Onlineartikel von DocChek Flexikon: <https://flexikon.doccheck.com/de/Kiemenbogen>

Der sechste Kiemenbogen und sein Knorpel bilden sich zum unteren Teil des Kehlkopfes um. Die Muskelanlage entwickelt sich dementsprechend auch zur inneren Kehlkopfmuskulatur. Auch die Arterien des sechsten Kiemenbogens entwickeln sich auf beiden Seiten verschieden: Links entstehen der Truncus pulmonalis und der Ductus arteriosus, rechts die Lungenarterie (Arteria pulmonalis). Schon früh in der Embryonalentwicklung des Menschen verschmelzen der sechste und vierte Kiemenbogen miteinander.

Zwischen den sechs Kiemenbogen entstehen innen fünf Schlundtaschen oder Kiemenspalten (Sacci pharyngeales), aus deren Entoderm sich ebenfalls definitive Strukturen entwickeln.

Aus der ersten Kiemenspalte entstehen Paukenhöhle und Ohrtrumpete, aus der zweiten Kiemenspalte die Gaumenmandeln, aus der dritten und vierten Kiemenspalte bilden sich die Nebenschilddrüsen, aus der dritten zusätzlich die Thymusdrüse. Aus der fünften Kiemenspalte entstehen die C-Zellen, die bei Säugetieren in die Schilddrüse einwandern.

Für Fragen der Evolution eignen sich die embryonalen Kiemenbögen besonders gut, weil an ihnen sichtbar wird, wie sich Körperstrukturen im Laufe der Evolutionsgeschichte verändern.³ In den letzten Jahrzehnten hat die Forschung zur Embryonalentwicklung — dank neuer Labormethoden — enorme Fortschritte gemacht. Dabei zeigt sich immer klarer, wie eng Entwicklung und Evolution miteinander verbunden sind. Dieses Forschungsfeld nennt man „evolutionäre Entwicklungsbiologie“, kurz Evo-Devo. Dazu gibt es übrigens bereits ein eigenes Video auf diesem Kanal.⁴

Während einer bestimmten Phase der Embryonalentwicklung, dem phylotypischen Stadium, ähneln sich die Embryonen eines gesamten Tierstammes — bei Wirbeltieren z. B. entstehen in dieser Zeit dieselben Grundstrukturen wie die Kiemenbögen. Dieses Stadium lässt sich nicht nur äußerlich, sondern auch genetisch nachweisen: Die Aktivität der Gene ist in dieser Phase bei allen Wirbeltieren am ähnlichsten, davor und danach unterscheiden sie sich stärker. In dieser Zeit sind jene Entwicklungsgene aktiv, die den allgemeinen Bauplan festlegen: Wo Kopf und Schwanz entstehen, wo Rücken, Bauch und Gliedmaßen angelegt werden. Erst wenn dieser Bauplan steht, können sich die einzelnen Regionen zunehmend eigenständig — quasi wie Module — weiterentwickeln.

In der letzten Episode haben wir bereits gesehen, welche Rolle der erste und zweite Kiemenbogen bei der Entstehung der Wirbeltierkiefer spielen. Weitere Beispiele —

³ Einige populärwissenschaftliche Lehrbücher, die sich mit den Kiemenbögen auseinandersetzen sind:

- Coyne, JA (2009). Why Evolution is true. Oxford University Press. Kapitel 3: Remnants: Vestiges, Embryos, and Bad Design
- Dawkins, R. (2012). Die Schöpfungslüge Warum Darwin recht hat. Ullstein Verlag. Kapitel 11: „Geschichte, die uns verewigt“
- Shubin, N. (2008): Der Fisch in uns. S. Fischer-Verlag. Kapitel 5: „Vorwärtskommen“

⁴ Siehe: Embryonen und Evolution: Evolutionäre Entwicklungsbiologie, Evo-Devo (“Von LUCA bis Eva” Teil 6) <https://internet-evoluzzer.de/embryonen-und-evolution-evolutionaere-entwicklungsbiologie-evo-devo-von-luca-bis-eva-teil-6/> als Video: <https://youtu.be/B8Osnw6ioRU>

etwa die Entwicklung der Gehörknöchelchen der Säugetiere — folgen später in dieser Reihe. In dieser Episode wenden wir uns jedoch einem anderen System zu: den Nerven der Kiemenbögen. Denn aus ihnen entstehen einige der Hirnnerven — ein Netzwerk, das bis heute manchmal erstaunlich komplizierte Verläufe aufweist.

Hirnnerven

Insgesamt gibt es 12 Hirnnerven.⁵ Die einfachsten haben jeweils nur eine Funktion und setzen jeweils an einem Muskel oder einem anderen Organ an. Hierzu gehören Riechnerv (*Nervus olfactorius*; I), Sehnerv (*Nervus opticus*, II) und der Hörnerv (*Nervus vestibulocochlearis*, VIII), die die entsprechenden Sinnesorgane innervieren. Drei Hirnnerven sind mit der Bewegung der Augenmuskeln assoziiert (*Nervus oculomotorius*, *Nervus trochlearis*, *Nervus abducens*; III, IV, VI), einer steuert die Zungenbewegung (*Nervus hypoglossus*; XII) und einer, dass sich der Kopf auf dem Hals drehen kann (*Nervus accessorius*, XI)

Jedoch sind vier Hirnnerven in ihrem Verlauf tatsächlich merkwürdig und komplizierter: Der *Nervus trigeminus* (V), der Gesichtsnerv (*Nervus facialis*, VII), der *Nervus glossopharyngeus* (IX) und der Vagusnerv (*Nervus vagus*, X). Diese vier haben sehr komplizierte Aufgaben und verlaufen zu diesem Zweck auf gewundenen Wegen durch den Kopf. Besondere Erwähnung verdienen der Trigeminus und der Gesichtsnerv (*Nervus facialis*). Beide gehen vom Gehirn aus und verzweigen sich dann zu einem verwirrenden Nervenplexus. Beide übertragen sowohl Sinnes- als auch Bewegungsinformationen, deren einzelnen Fasern von verschiedenen Teilen des Gehirns ausgehen, sich vereinigen und dann wieder trennen, sodass sie als Äste den gesamten Kopf durchziehen. Die Zweige des Trigeminusnervs haben zwei wichtige Aufgaben: Sie steuern Muskeln und transportieren Sinnesinformationen von vielen Teilen unseres Gesichts zum Gehirn. Zu den Muskeln, die vom Trigeminusnerv versorgt werden, gehören die Kaumuskeln ebenso wie winzige Muskeln tief im Innenohr. Außerdem ist der Trigeminus der wichtigste Nerv für Empfindungen im Gesicht. Dass eine Ohrfeige nicht nur aus emotionalen Gründen so wehtut, liegt daran, dass der Trigeminus die Sinnesinformationen von der Gesichtshaut zum Gehirn übermittelt. Auch der Zahnarzt kennt die Äste des Trigeminusnervs sehr gut. Manche von ihnen laufen zu den Zahnwurzeln.

Der Gesichtsnerv steuert ebenfalls Muskeln und übermittelt Sinnesinformationen. Wie der Name schon sagt, ist er der wichtigste Nerv für die Muskeln, die Gesichtsausdrücke erzeugen. Diese winzigen Muskeln benutzen wir, um zu lächeln, die Stirn zu runzeln und die Augenbrauen zu heben oder zu senken. Auf den ersten Blick scheint an ihnen nichts Sinnvolles zu sein. So verlaufen zum Beispiel sowohl vom Trigeminus- als auch vom Gesichtsnerv winzige Äste zu den Muskeln in unseren

⁵ Zum allgemeinen Überblick über die Hirnnerven siehe:

- Standring, S, Borley, NR (2008). Overview of cranial nerves and cranial nerve nuclei. Gray's anatomy: the anatomical basis of clinical practice (40th ed.). [Edinburgh]: Churchill Livingstone/Elsevier.

Einen Überblick über die evolutionären Hintergründe der Kiemenbögen siehe:

- Shubin, N. (2008): Der Fisch in uns. S. Fischer-Verlag. Kapitel 5: „Vorwärtkommen“

Ohren. Warum nehmen zwei verschiedene Nerven, die ansonsten ganz unterschiedliche Teile von Gesicht und Kiefer versorgen, Einfluss auf Muskeln im Ohr, die unmittelbar nebeneinander liegen? Und was noch verwirrender ist: Die Äste von Trigemini und Gesichtsnerv überkreuzen sich fast auf ihrem Weg zu Gesicht und Kiefer. Warum? Die Erklärung: Es handelt sich um die Nerven der Kiemenbögen.

Im Zusammenhang mit den Kiemenbögen macht der Verlauf dieser Nerven Sinn. Dass der Trigemini sowohl zu den Kiefern als auch zum Ohr verläuft, liegt daran, dass alle von ihm versorgten Strukturen sich ursprünglich im ersten Kiemenbogen entwickeln. Das Gleiche gilt für den Gesichtsnerv und den zweiten Kiemenbogen. Die Muskeln für die Gesichtsausdrücke und der Ohren entstammen dem zweiten Kiemenbogen. Ebenso ist der komplizierte Verlauf der Nerven des dritten und vierten Bogens darauf zurückzuführen, dass die von ihnen versorgten Strukturen ebenfalls aus diesen Bögen hervorgegangen sind. Die Nerven des dritten und vierten Kiemenbogens, also der Glossopharyngeus und der Vagusnerv, unterliegen der gleichen Gesetzmäßigkeit wie die weiter vorn gelegenen Nerven: Auch sie verlaufen zu Strukturen, die sich aus ihrem Kiemenbogen gebildet haben.

Aber damit nicht genug. Dieser Prozess lässt sich auch evolutionsgeschichtlich verfolgen, da wir schon erläutert haben, dass sich diese Kiemenbögen bei allen Wirbeltieren ausbilden. An dieser Stelle können wir Punkt für Punkt einen Vergleich zwischen unserem Kopf und z. B. dem der Haie anstellen. Betrachtet man den ersten Kiemenbogen von Haien und Menschen, so stößt man auf eine große Ähnlichkeit: die Kiefer. Der wichtigste Unterschied besteht darin, dass sich aus dem Kiemenbogen beim Menschen auch ein Teil der Ohrknöchelchen bildet, die es bei Haien nicht gibt. Wie nicht anders zu erwarten, geht auch der Schädelnerv, der bei Haien wie bei Menschen den Kiefer versorgt – der Trigemini – aus dem ersten Kiemenbogen hervor. Die Zellen im zweiten Kiemenbogen teilen und verändern sich, bis sie einen Balken aus Knorpel und Muskeln bilden. Bei uns spaltet sich der Knorpelbalken auf und bildet einen der drei Mittelohrknochen (den Steigbügel) sowie mehrere weitere kleine Strukturen an der Unterseite von Kopf und Rachen, wie das Zungenbein. Beim Hai teilt sich der zweite Kiemenbogen und bildet zwei Knochen, die als Stütze für die Kiefer dienen: der untere entspricht unserem Zungenbein, der obere stützt den Oberkiefer und entspricht unserem Steigbügel. Knochen, die bei Haien den Ober- und Unterkiefer stützen, dienen bei uns zum Hören und Schlucken. Was den dritten und vierten Kiemenbogen angeht, so stellen wir fest, dass viele Strukturen, die uns beim Sprechen und Schlucken helfen, bei Haien zum Stützgewebe der Kiemen gehören. Die Muskeln und Schädelnerven, mit denen wir schlucken und reden, bewegen bei Haien und anderen Fischen die Kiemen.

Welche „Absurditäten“ die Evolution der Kiemenbogennerven zulässt, zeigt sich am Beispiel des rückläufigen Kehlkopfnerfs (*Nervus laryngeus recurrens*), eines Zweigs des Vagusnervs und dessen Verlauf bei der Giraffe. Dieser Nerv verbindet das Gehirn mit dem Kehlkopf. Bei Säugetieren vermeidet dieser Nerv den direkten Weg zwischen Gehirn und Kehlkopf und verläuft stattdessen hin zur Brust, umschlingt die Aorta in der Nähe des Herzens und kehrt dann zum Kehlkopf zurück. Das macht diesen Nerv

siebenmal länger als er sein muss! Für ein Tier wie die Giraffe durchquert es den gesamten Hals zweimal, ist also 4,5 m lang! Natürlich macht der bizarre Verlauf dieses Nervs evolutionär absolut Sinn. Bei Fischen und frühen Säugetierembryonen ist der Vorläufer des Rückläufigen Kehlkopfnervs tief im Hals- und Körperbereich am sechsten Kiemenbogen befestigt. Fische behalten dieses Muster immer noch bei. Während der späteren Embryonalentwicklung bei Säugetieren werden diese Kiemenbögen jedoch umgewandelt, tatsächlich verbindet sich hier dieser Nerv mit dem Vagus-Nerv des vierten Kiemenbogens und verkomplizieren so den Verlauf dieses Nervs. Teile des alten fischartigen Kreislaufsystems wurden neu angeordnet, sodass die Aorta (ebenfalls Teil des sechsten Kiemenbogens) in die Brust zurückkehrte und den Rückläufigen Kehlkopfnerv (der sich um die Aorta schlang) ebenfalls in den Brustraum mitführte.⁶ Unser Kopf mag auf den ersten Blick unglaublich kompliziert wirken, aber er ist nach einem sehr einfachen, eleganten Bauplan konstruiert. Allen Schädeln auf der Welt liegen die gleichen Prinzipien zugrunde, ganz gleich, ob es sich um einen Hai, einen Knochenfisch, einen Salamander oder einen Menschen handelt.

Gliazellen

Betrachten wir uns noch einige Besonderheiten des Nervensystems. Wir haben schon die Ursprünge des Nervensystems in einer anderen Episode kennengelernt, schaut gerne dort mal rein.⁷

Aber auch hier das Allerwichtigste, um euch auf diese Episode neugierig zu machen: Das Nervensystem der Tiere basiert auf hochspezialisierten Zellen, den Neuronen. Sie nehmen Signale über Dendriten auf, verarbeiten sie im Zellkörper und leiten sie über das Axon weiter. An den Synapsen werden Informationen auf nachgeschaltete Zellen übertragen, entweder direkt elektrisch oder über Neurotransmitter. Kern dieser Signalweitergabe sind Membranpotenziale und Aktionspotenziale – schnelle, kontrollierte Spannungsänderungen an der Zellmembran. Diese elektrischen Eigenschaften entstehen, weil Zellen unterschiedliche Ionenkonzentrationen innen und außen aufrechterhalten. Kalium, Natrium und Calcium spielen dabei zentrale Rollen: Kalium stabilisiert das Ruhepotenzial, während der Einstrom von Natrium und Calcium die Membran kurzzeitig depolarisiert und ein Aktionspotenzial auslöst. Spannungsgesteuerte Ionenkanäle öffnen und schließen dabei präzise im richtigen Moment. Calcium wirkt darüber hinaus als universelles Steuersignal – es löst Muskelkontraktionen aus und sorgt in Synapsen dafür, dass Neurotransmitter freigesetzt werden.

⁶ Siehe hierzu auch mein Artikel:

- „Evolution for Idiots Teil 2: Irreduzierbare Komplexität und die Evolution des Auges“ <https://internet-evoluzzer.de/evolution-for-idiots-teil-2-irreduzierbare-komplexitaet-und-die-evolution-des-auges/>
- Wedel, M. J. 2012. A monument of inefficiency: The presumed course of the recurrent laryngeal nerve in sauropod dinosaurs. Acta Palaeontologica Polonica 57(2)251-256.
<http://dx.doi.org/10.4202/app.2011.0019>

⁷ Siehe Teil 7 unserer Reihe: „Warum wir Haut, Muskeln und Nerven haben – Die Evolution der Organsysteme“ <https://internet-evoluzzer.de/warum-wir-haut-muskeln-und-nerven-haben-die-evolution-der-organsysteme-von-luca-bis-eva-teil-7/> als Video: <https://www.youtube.com/watch?v=S71GdzUiSDg>

Diese Mechanismen sind evolutionär tief verankert. Frühe Zellen mussten Natrium und insbesondere Calcium aus dem Zellinneren fernhalten, weil Calcium mit Phosphat ausfällt und zentrale Stoffwechselprozesse blockiert hätte. Daraus entwickelte sich ein auf Pumpen basierendes System — der Vorläufer moderner Membranpotenziale. Ionenpumpen entwickelten sich daher früh, um stabile Konzentrationsgradienten aufzubauen. Aus einfachen Kaliumkanälen gingen später spannungsgesteuerte Natrium- und Calciumkanäle hervor – eine entscheidende Voraussetzung für schnelle elektrische Signale. Interessanterweise existieren Aktionspotenziale auch bei Einzellern, etwa in ihren Cilien und Geißeln; erst bei Tieren breiteten sich diese Signale auf ganze Zellkörper aus und wurden zu einem koordinierten Kommunikationssystem.

Synapsen entwickelten sich ebenfalls schrittweise. Zunächst verbanden elektrische Synapsen, die aus Gap Junctions bestehen, Zellen direkt miteinander. Daraus gingen chemische und schließlich komplexe elektrochemische Synapsen hervor, in denen Vesikel mit Neurotransmittern gezielt ausgeschüttet werden. Viele dieser Neurotransmitter und weitere Bausteine existierten bereits in Einzellern und in Tieren ohne Nervensystem. Das zeigt: Das Nervensystem entstand nicht aus dem Nichts, sondern durch die Reorganisation vorhandener molekularer Werkzeuge.

Mit zunehmender Komplexität der Tiere bildeten sich zunächst diffuse Nervennetze, wie bei Quallen. Bei bilateralen Tieren führte gerichtete Fortbewegung zur Konzentration von Nervenzellen am Vorderende — zur Cephalisation und zur Entstehung von Gehirnen. Mehrmals unabhängig entwickelten sich hochzentralisierte Nervensysteme, etwa bei Arthropoden, Kopffüßern und Wirbeltieren. Bemerkenswert ist, dass selbst Schwämme, die keine Nervenzellen haben, bereits genetische und molekulare Strukturen besitzen, die synaptischen Komponenten ähneln. Und bei Placozoen koordinieren Peptidsignale das Verhalten ganzer Zellverbände — funktionell bereits verwandt mit neuronaler Kommunikation. Bevor also Neuronen existierten, gab es schon neurosekretorische Netzwerke, die kollektive Zellreaktionen steuerten. Das heutige Nervensystem entstand durch Spezialisierung und Integration dieser uralten Mechanismen.

Neben den Nervenzellen kommen die sogenannten Gliazellen vor.⁸ Sie sorgen für die Ernährung von Neuronen, bilden isolierende Markscheiden, bilden die Blut-Hirn-Schranke, nehmen Botenstoffe wieder auf und erfüllen wichtige Funktionen im Immunsystem. Etwa die Hälfte der Zellen im menschlichen Gehirn sind Gliazellen, ähnlich wie bei anderen Primaten. Es gibt verschiedene Typen von Gliazellen, zu den wichtigsten gehören die Astrozyten, sternförmig verzweigte Zellen, die an der Flüssigkeitsregulation der Gehirnzellen beteiligt sind und für die Aufrechterhaltung des Kaliumhaushaltes sorgen. Weitere Gliazelltypen sind Mikrogliazellen, die für die Immunabwehr im zentralen Nervensystem sorgen und die Oligodendrozyten, die das Myelin der Axone des Zentralen Nervensystems bilden. Eine ähnliche Funktion erfüllen die Schwannschen Zellen im peripheren Nervensystem. Die Myelinschicht ist eine

⁸ Einen allgemeinen Überblick über Gliazellen findet man z. B. bei:

- Sadava, D., et al. (2019): Purves Biologie. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, Kapitel 44 „Nervenzellen, Gliazellen und Nervensysteme“

Biomembran um die Axone der Wirbeltiere, die die Geschwindigkeit der Erregungsleitung deutlich erhöht.

Gliazellen stehen vor allem im Zusammenhang mit der Zentralisation des Nervensystems und der daraus resultierenden Aufgabenteilung zwischen verschiedenen Zellen.⁹ In den Tierstämmen mit einem diffusen Nervensystem ohne nennenswerte Zentralisation wie bei Nesseltieren oder Rippenquallen finden sich keine Gliazellen. Schon bei den ursprünglichsten Bilateria-Gruppen wie den Xenacoelomorpha finden sich außer Neuronen auch andere Zelltypen, die Vorstufen von Gliazellen darstellen. Bei Plattwürmern (Platyhelminthes), welche über ein ursprüngliches Zentralnervensystem verfügen, enthalten eine Art von Stützzellen, die als die Vorläufer der Gliazellen angesehen werden könnten. Diese ursprünglichen Gliazellen haben lange Fortsätze, die vom Zellkörper ausgehen und einige Nervenzellknoten umschließen. Einige dieser Zellen enthalten Glykogen und dienen als Energiequelle für Nervenzellen. Bei Ringelwürmern (Anneliden) gibt es mehrere Typen von Gliazellen, die stützende oder ernährende Aufgaben übernehmen und den Astrozyten der Wirbeltiere ähneln. Das Nervensystem des Fadenwurms (Nematoda) *Caenorhabditis elegans* ist mittlerweile genau kartiert und besteht aus 302 Nervenzellen und 56 Gliazellen, von denen die meisten mit dem Sinnesapparat in Verbindung stehen. Sie steuern vor allem den Ionenhaushalt und sind an der Entwicklung der Nervenzellen beteiligt. Das Gehirn der Furchtfliege *Drosophila* hat etwa 90.000 Zellen, wovon 10% Gliazellen sind. Hier gibt es verschiedene Gliazelltypen, z. B. die Oberflächenglia, die die Blut-Hämolymp-Schranke bilden, Kortexgliazellen, die mit den Nervenzellen im Gehirn in Kontakt stehen und die Neuropilglia, die Axone und Synapsen bedecken. Chordaten haben grundsätzlich eine höhere Vielfalt an Gliazellen. Eine zunehmende Komplexität des Gehirns, die sich parallel zu einer gesteigerten intellektuellen Leistungsfähigkeit und einem erhöhten homöostatischen und energetischen Bedarf entwickelte, erforderte eine hohe Diversifizierung der Neuroglia bei Säugetieren, besonders bei Primaten.

Gliazellen sind transkriptionell vielfältig, und es wurden noch keine allgemeingültigen molekularen Marker entdeckt, die bei allen Gliazellen vorkommen. Doch bestimmte molekulare Marker die bei Wirbeltieren identifiziert wurden, wurden auch bei einigen Wirbellosen nachgewiesen. Erwähnenswert ist z. B. das Protein Gfap und Vimentin, welche zu den Intermediärfilamenten gehören und eine wichtige Rolle für die mechanische Stabilität der Zellen spielen.¹⁰

Die evolutionären Ursprünge der Mikroglia sind noch weitgehend unerforscht. Wahrscheinlich hängt ihre Funktion mit der Ausbildung der Barrieren zusammen, die das frühe Gehirn vom Blutkreislauf trennten. Diese Barrieren schränkten die Zugangswege für Immunzellen ein und erforderten somit ein spezialisiertes

⁹ Zur Evolution und Phylogenetik der Gliazellen siehe:

- Verkhatsky A et al. (2020). Evolution of Neuroglia. Adv Exp Med Biol 1175:15-44.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7188604/>

¹⁰ Zur Evolution der Transkriptionsfaktoren, die mit Gliazellen im Zusammenhang stehen siehe:

- Sheloukhova, L, Watanabe, H (2024). Evolution of glial cells: a non-bilaterian perspective. Neural Dev 19, 10 <https://doi.org/10.1186/s13064-024-00184-4>

Abwehrsystem. Dieses Problem wurde gelöst, nachdem Immunzellen einen Weg gefunden hatten, in das Nervengewebe zu wandern und dort zu verbleiben. Nachweise für phylogenetisch frühe Mikrogliazellen liegen für Ringelwürmer, Muscheln, Schnecken und einige Insekten vor.¹¹

Wahrscheinlich entwickelten sich Glia- und Nervenzellen aus einem gemeinsamen Vorfahren, wobei die Gliazellen die wichtige Aufgabe der Nährstoffversorgung gewährleisten, während die Nervenzellen vorrangig zur Informationsverarbeitung genutzt werden. Die Entwicklung der Nervenzelle mit ihrer Hauptaufgabe zur Informationsaufnahme, -weiterleitung und -verarbeitung erfordert einen hohen Stoffwechselumsatz, die die ersten Gliazellen leisten konnten. Die enge Interaktion zwischen Gliazellen und Neuronen förderte nicht nur das Überleben der Neuronen, sondern ermöglichte ihnen auch, schneller auf externe Reize zu reagieren, was als starkes Selektionskriterium erscheint.¹²

Myelin

Um den Informationsfluss über das Axon zu beschleunigen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dies kann durch eine Vergrößerung des Axondurchmessers erreicht werden, was bei vielen Wirbellosen zutrifft. Man kann sich das vorstellen wie bei einem Wasserschlauch: je dicker er ist, desto mehr Wasser kann in gleicher Zeit durchfließen. Das ist der Grund, warum zum Beispiel die Riesenaxone von Tintenfischen und Meeresschnecken einen Durchmesser von bis zu einem Millimeter haben. So erhöhen sie die Geschwindigkeit der Erregungsleitung im Axon. Ein besonderes Merkmal des Nervensystems der Wirbeltiere ist die Ausbildung der Myelinscheide an den Axonen zur schnelleren Reizweiterleitung. Hierfür sind die Oligodendrozyten und Schwann-Zellen verantwortlich.¹³

Myelin wird definiert als eine verdichtete, aus Gliazellen stammende, lipidreiche Hülle, die einen Abschnitt des Axons umgibt. Die Myelinscheiden der Axone werden durch Myelin-freie Abschnitte, die Ranvier-Schnürringe, unterbrochen, bei der die Membran des Axons freiliegt. Sie haben eine hohe Dichte an Natrium- und Kaliumkanälen. Ranvier-Schnürringe sind wichtig für die schnelle saltatorische Erregungsleitung. Das Aktionspotential läuft nicht kontinuierlich entlang der markhaltigen Nervenfasern, sondern „springt“ von Schnürring zu Schnürring. Zwischen diesen wird die elektrische Erregung durch die Isolation der Markscheide elektrotonisch weitergeleitet. Dies erlaubt eine sehr schnelle Ausbreitung des Nervenimpulses. Liegt die maximale Erregungsgeschwindigkeit bei nicht-myelinisierten Axonen bei maximal 30 Meter pro

¹¹ Siehe: Verkhratsky A et al. (2020). Evolution of Neuroglia. Adv Exp Med Biol 1175:15-44.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7188604/>

¹² Siehe: Rey S et al. (2021). Evolution of glial wrapping: A new hypothesis. Dev Neurobiol. 81(5):453-463.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32133794/>

¹³ Zur Rolle der Schwannschen Zellen und Myelinscheide siehe:

- Sadava, D., et al. (2019): Purves Biologie. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, Kapitel 44 „Nervenzellen, Gliazellen und Nervensysteme“

Sekunde (meist aber im Bereich von 1-3 Metern pro Sekunde), liegt sie bei myelinisierten Axonen etwa 100 Meter pro Sekunde.

Wie und wann könnte Myelin in der Abstammungslinie der Wirbeltiere entstanden sein?¹⁴ Anzumerken ist, dass auch einige Wirbellose Membranhüllen um ihre Axonmembranen haben, so einige, aber nicht alle, Ringelwürmer und Krebstiere. Sie unterscheiden sich aber von den Myelinschichten der Wirbeltiere. So ist die Hülle bei Wirbellosen unregelmäßig und weist weniger Schichten auf. Bei Wirbeltieren windet sich eine einzelne Schwann-Zelle oder ein Fortsatz eines Oligodendrozyten spiralförmig um das Axon und bildet mehrere membranöse Lamellen. Bei Krebstieren sendet eine einzelne Gliazelle mehrere Fortsätze aus, wobei jeder Fortsatz das Axon einmal umgibt. Ebenso wurde bisher keine molekulare Ähnlichkeit zwischen dem Myelin von Wirbeltieren und Wirbellosen festgestellt.

Kompakte Myelinscheiden fehlen bei kieferlosen und entwickelten sich erst mit den Gnathostomata. Fossilienfunde von Panzerfischen deuten darauf hin, dass der Durchmesser der Nerven bei Agnathen und Gnathostomata zwar gleich war, letztere aber deutlich längere Axone hatten, was die Notwendigkeit einer Myelinscheide unterstreicht, um die gleiche Erregungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Durch den Erwerb myelinisierter Nerven erlangten die Gnathostomata wohl eine bessere Fähigkeit zur Jagd auf Beute, während sie den Axondurchmesser im Vergleich zu ihren kieferlosen Vorfahren gleich oder sogar kleiner hielten. Die Umhüllung der Axone mit Gliazellenmembranen entstand in frühen Evolutionsformen. Zu Beginn unterstützte diese Umhüllung vermutlich die mechanische Stabilität der Axone und lieferte Energie. Gleichzeitig erhöhten die membranösen Lamellen der Gliazellen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Aktionspotentials, und sobald sie entstanden war, bot die Myelinisierung offensichtliche evolutionäre Vorteile. Einer der Vorteile war eine Erhöhung der Kompaktheit des Nervensystems und eine Verringerung des Energieverbrauchs für die Wiederherstellung des Ionenhaushalts.

Outro

Tatsächlich geht mir die Evolution des Wirbeltierkopfes wortwörtlich nicht aus dem Kopf. Wir haben gesehen wie die Wirbelsäule, der Schädel, der Kiefer und die Hirnnerven entstanden sind.

¹⁴ Siehe:

- Rey, S et al. (2021). Evolution of glial wrapping: A new hypothesis. Dev Neurobiol. 81(5):453-463. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32133794/>
- Verkhatsky A et al. (2020). Evolution of Neuroglia. Adv Exp Med Biol 1175:15-44. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7188604/>
- Zalc, B. (2016). The acquisition of myelin: a success story. Novartis Found Symp. 276:15-21; discussion 21-5, 54-7, 275-81. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16805421/>
- Zalc, B (2016). The acquisition of myelin: An evolutionary perspective. Brain Res. 1641(Pt A):4-10. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26367449/>
- Zalc, B, et al. (2008). The origin of the myelination program in vertebrates. Curr Biol. 18(12):R511-2. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18579089/>

Doch ihre Geschichte ist noch nicht zu Ende – denn schließlich könnt ihr diese Episoden alle sehen. Was uns aber fehlt ist eine der wohl wichtigsten Innovationen der Tierwelt, die sich in unserem Kopf finden: die Augen, das Fenster zur Außenwelt. Gleichzeitig wird von Evolutionsgegnern auf die Komplexität des Auges verwiesen, so als ob dahinter nur ein intelligenter Designer stecken könnte und niemals durch natürliche Prozesse entstanden sein kann. Doch ist das Auge wirklich zu kompliziert für die Evolution? Dies erfahrt ihr in der nächsten Episode. Also: Bleib dran, abonniere den Kanal – und begleite uns auf die Reise zur Evolution des Auges.