

Worum geht es in diesem Beitrag?

In meinen Ausarbeitungen zur Energieerhaltung in der Kommunikation und den damit verbundenen Zusammenhang von Kommunikationsqualität und Konfliktpotential ist immer wieder die Rede davon, dass im menschlichen Körper Signale durch elektrische und chemische Kommunikation übertragen werden. Als Beispiel habe ich in meinem Buch „Kommunikationsqualität steigern & Konfliktpotentiale senken“ das Ohr als Beispiel für die Darstellung der Aufnahme eines Signals durch ein Sinnesorgan genutzt. Hier ist es so, dass Schallwellen auf das Trommelfell treffen und über ein kleines Hebelsystem mechanisch weitergeleitet und verstärkt werden. Sie treffen dann auf eine Membran (Basilarmembran), die zwei Flüssigkeiten im Innenohr von der Umgebung abtrennt. In diesen befinden sich Haarsinnszellen, die durch die eingetragene Energie bewegt werden. An der Basis der Haarsinnszellen führen chemische Synapsen zu den Nervenfasern. An dieser Stelle wird der Neurotransmitter Glutamat freigesetzt, wodurch bei der entsprechenden Nervenzelle ein elektrischer Impuls ausgelöst wird, welcher zur Weiterverarbeitung des Signals im Gehirn genutzt wird.

Woher kommt die Energie?

In verschiedenen Gesprächen ging es häufig um die Frage, wie ein Mensch Strom erzeugen würde. Irgendwo müsse die Elektrizität ja herkommen. Weil wenn nicht, dann könnte doch gegebenenfalls eine Energieerhaltung, die ich im Rahmen der Kommunikation (synonym einer goldenen Regel der Mechanik) beschrieb, so nicht zum Tragen kommen. Im Kontext meiner Thesen spielt es im Kern keine Rolle, wie Elektrizität erzeugt wird oder wie sie transportiert wird, sondern nur, dass sie umgewandelt und dabei Arbeit geleistet wird. Grundsätzlich besitzt Energie die Fähigkeit Arbeit zu leisten. Ob diese geleistet wird, hängt von den Unterschieden innerhalb der Energie ab, denn damit Arbeit geleistet werden kann, wird ein Ungleichgewicht benötigt. Die Differenz des Ungleichgewichtes ist die Energie, die beispielsweise für eine Anwendung zur Verfügung steht. Dabei kann Energie in einem System in verschiedenen Formen vorkommen, wie zum Beispiel als chemische, mechanische oder elektrische Energie.

Biologische Stromerzeugung: Ladungstrennung an der Membran

Sinneswahrnehmungen, Fühlen und Handeln basieren auf biologischen und damit auch auf physikalischen Grundlagen. Unser Nervensystem besteht aus Zellen und ist ein hochreguliertes, operativ geschlossenes System. Die Systemgrenzen sind die Zellmembranen, die das Innere der Nervenzellen von ihrer Umgebung abtrennen und damit unterschiedliche elektrische Ladungen innerhalb und außerhalb der Zelle ermöglichen. Menschliche Körper sind keine Gleichgewichtssysteme, sondern sie werden ständig in einem instabilen, aber geregelten Zustand gehalten. Die Zellen im Körper speichern potenzielle Energie, die über die Nahrung direkt in Form von chemischer Energie eingetragen wird. Diese Speicherung erfolgt über eine sogenannte Ladungstrennung an den Zellmembranen.

Physikalische Grundlagen: Energieerhaltung und Wirkungsgrad

Die Energieerhaltung ist ein Prinzip aller Naturwissenschaften und besagt, dass sich die in einem abgeschlossenen System vorhandene Gesamtenergie nicht ändert. Energie wird nur von einer Form in eine andere umgewandelt. Mit jeder Umwandlung geht ein Wirkungsgrad einher. Das bedeutet, dass ein Teil der Energie in eine für den Anwendungszweck unerwünschte Art umgewandelt wird, bei der Mechanik ist es zum Beispiel Wärme. Ein Wirkungsgrad ist somit zu einer Funktion notwendig und er bezeichnet die Effizienz als Verhältniszahl zwischen der Nutzenergie und der zugeführten Energie. Bei der technischen Elektrizität werden Elektronen (Materie) bei der Energieumwandlung bewegt und an dieser Stelle gibt es

einen Unterschied zur „menschlichen“ Elektrizität, bei der lokale Potentialzustände verändert werden. Im Folgenden versuche ich das hier so erklären, wie es mir möglich ist. Für verfeinerte oder tiefgreifendere Erläuterungen nutzen Sie bitte die Quellenangaben.

Der Motor: ATP und Ionenpumpen

Die Ladungstrennung der Zellen muss aktiv aufrechterhalten werden, weshalb der Körper ständig Energie, vor allem Adenosintri-phosphat (ATP)¹, aufwenden muss, weil die Ionen (elektrisch geladene Atome oder Moleküle) aktiv gegen ihr eigentliches Konzentrationsgefälle transportiert werden. Der Körper sortiert positiv geladene Teilchen (beispielsweise Natriumionen) überwiegend nach außen, während Kaliumionen und viele negativ geladene Teilchen, wie Proteine, eher innen zu finden sind. So entsteht ein Spannungsunterschied zwischen innen und außen, der als sogenanntes Membranpotenzial genutzt werden kann.

Das neuronale Signal: Zustandswechsel statt Materialtransport

Somit ist ein Ungleichgewicht in Form eines Potentialunterschiedes geschaffen, der über das Nervensystem kontinuierlich aufrechterhalten werden muss, denn gäbe es diesen Unterschied nicht, könnte keine Arbeit geleistet werden. Da Systeme immer ein Gleichgewicht anstreben ist es, wie oben beschrieben, notwendig, unter Energieaufwendung das System in einem Ungleichgewicht zu halten.

Der Unterschied, der zur Nutzung von Arbeit verfügbar ist, entsteht also nicht durch Bewegung von Materie, wie beispielsweise die der Elektronen, sondern durch eine Struktur. Die in den Zellen gespeicherte Energie ist damit der Potentialunterschied selbst. Ein neuronales Signal ist die kontrollierte Freisetzung der gespeicherten Energie, wobei die Information im Wechsel des Zustands liegt und eben nicht in deren Transport. Anders formuliert- durch einen lokalen Abbau des Unterschiedes wird Arbeit möglich (Bewegung, Wahrnehmung, Denken), die in diesem Fall den Ladungsunterschied von einer zur nächsten Zelle weiterträgt.

Energiefluss im Nervensystem

Die Energie wandert also nicht im Nervensystem als Paket von A nach B, sondern wird an jedem Ort immer wieder neu aus den Spannungs- und Konzentrationsunterschieden freigesetzt. Die Energiemenge im Gesamtsystem bleibt dabei erhalten. Sie wechselt nur ihre Form und den Ort ihrer Wirkung. Jede Zelle, die ein Signal weiterleitet, wird dabei zunächst energieärmer, weil ihr Ladungsunterschied teilweise abgebaut wird, und muss anschließend erneut Energie aufwenden, um das notwendige Ungleichgewicht wiederherzustellen. Am Ende der letzten Nervenzelle wird das Ladungspotential in eine chemische Botschaft verwandelt.

Kommunikationsqualität und Konfliktpotential

Auch neuronale Kommunikation benötigt hohe Kommunikationsqualität und funktioniert nur, solange Anschluss möglich ist. Diese ist abhängig von ausreichendem Potential, funktionierenden Systemgrenzen und geregelter Durchlässigkeit. Störungen dieser Bedingungen führen zu hohen Konfliktpotentialen, also dort, wo Systemgrenzen ihre regulierende Funktion verlieren. Konflikte lassen sich auf biologischer Ebene als Übertragungsphänomene verstehen, denn ein übererregtes Nervensystem gibt seinen Zustand weiter, die Regulationsfähigkeit senkt, die Reaktivität steigert und das Differenzierungsvermögen reduziert.

Die goldene Regel der neuronalen Energieerhaltung

Diese goldene Regel besteht aus drei Komponenten. Neben der **ATP-Investition**² gehören die **gespeicherte Ladungsspannung**³ und die **Signalarbeit**⁴ dazu. Somit lautet die Regel:

„Was du an ATP-Investition sparen möchtest, musst du bei gleicher Signalarbeit an gespeicherter Ladungsspannung hinzugeben.“

Exkurs: Ionen vs. Elektronen

Nun haben wir gelernt, an welchen Stellen sich die technische- und die menschliche Elektrizität unterscheiden. Es bleibt aber die Frage, ob denn die Ladungspotentiale nicht auch aus Elektronen zusammengesetzt sind und daher nicht doch auch Materie bewegt wird. Leider fehlt mir an dieser Stelle der Zugang zu entsprechenden Wissenschaftlerinnen, weshalb ich für die folgende Erklärung die KI Perplexity Research bemüht und die Antworten am Ende über ChatGPT und Google Gemini verifiziert habe. Im Anschluss habe ich meinen gesamten Text über Manus.ai prüfen, aber nicht umformulieren lassen. Zudem hat mir diese KI einen Foliensatz erstellt, um die Inhalte anschaulich darstellen zu können.

Hier nun die Antwort auf die verbliebene Frage, ob Ladungspotentiale nicht auch aus Elektronen zusammengesetzt sind:

„Sie haben eine echte physikalische Subtilität⁵ erkannt. Auf atomarer Ebene spielen natürlich auch im Nervensystem Elektronen eine Rolle, denn Ionen wie Natrium oder Kalium bestehen aus einem Atomkern und einer Hülle aus Elektronen. Die elektrische Ladung eines Ions ergibt sich daraus, dass ihm ein oder mehrere Elektronen fehlen oder zusätzlich vorliegen. Trotzdem funktionieren bioelektrische Signale im Körper anders als die technische Elektrizität im Stromkabel.“

In technischen Leitern bewegen sich freie Elektronen durch das Material und bilden so den Strom. Im Nervensystem dagegen bewegen sich ganze Ionen – also geladene Teilchen mit Kern und Elektronenhülle – durch bestimmte Kanäle in der Zellmembran. Die Membranpotenziale entstehen dadurch, dass der Körper diese Ionen räumlich trennt und innen und außen unterschiedliche Konzentrationen und Ladungen aufbaut. Entscheidend für das Verständnis ist daher: Die Elektronen sind zwar Teil der Ionen, aber die eigentliche Arbeit im Nervensystem geschieht über das Verschieben von Ionen und das gezielte Auf- und Abbauen von Ladungsunterschieden, nicht über einen freien Elektronenfluss wie im Kupferdraht.“

Fazit

Der Energietransport im menschlichen Körper ist anders als bei der technischen Elektrizität, hat aber für unsere Betrachtungen mit Blick auf die Thesen zur Kommunikation, Kommunikationsqualität und Konfliktpotential, keine besondere Bedeutung. Alle Aussagen zur Energieerhaltung lassen sich auch hier anwenden.

Quellen

Empfohlene Fachliteratur

Diese Standardwerke der Physiologie und Neurobiologie dienen als primäre Referenz für die grundlegenden Mechanismen:

Schmidt, R. F., Lang, F., & Heckmann, M. (Hrsg.). (2017). *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie* (33. Aufl.). Springer.

Attwell, D., & Laughlin, S. B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(10), 1133–1145.

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., & White, L. E. (2017). *Neuroscience* (6. Aufl.). Oxford University Press.

Laughlin, S. B., & Sejnowski, T. J. (2003). Communication in neuronal networks. *Science*, 301(5641), 1870–1874.

Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Reece, J. B. (2022). *Campbell Biologie* (12. Aufl.). Pearson Studium.

Nicholls, J. G., Martin, A. R., Fuchs, P. A., & Brown, D. A. (2012). *From Neuron to Brain* (5th ed.). Sinauer.

Nelson, P. (2014). *Biological Physics: Energy, Information, Life*. W. H. Freeman.

Hoffmann, P. (2012). *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*.

Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1987). *Der Baum der Erkenntnis. Goldmann. Operative Geschlossenheit, Systemgrenzen, Anschlussfähigkeit*

Luhmann, N. (1984). *Soziale Systeme*. Suhrkamp.

Fachartikel

Diese Quellen bieten spezifische Details und aktuelle wissenschaftliche Perspektiven:

Ionentransport und Aktionspotenziale (Fachzeitschrift)

Themen: Die Rolle von Ionenkanälen und Pumpen bei der Bildung von Aktionspotenzialen, die Bedeutung der Na⁺/K⁺-Pumpe.

Redaktion. (2015). Ionentransport im Dienst der Gesundheit. *Pharmazeutische Zeitung*, (33/2015). Verfügbarkeit: <https://www.pharmazeutische-zeitung.de/ausgabe-332015/ionentransport-im-dienst-der-gesundheit/>

Biologische Grundlagen der Elektrogenese (Universitäre Publikation)

Themen: Kompakte Darstellung der Mechanismen der Bioelektrizität, Ionenkanäle und ATP-Verbrauch.

Biologische Grundlagen der Elektrogenese. Universität des Saarlandes, Psychologie.

Verfügbarkeit: http://www.neuro.psychologie.uni-saarland.de/downloads/0809/EEG_10_11_08.pdf

Kopplung von neuronaler Erregung und Energiestoffwechsel

Themen: Der hohe Energiebedarf der Na-K-ATPase und die Energieerhaltung im neuronalen System.

Theoretische Untersuchungen zur Kopplung von neuronaler Erregung und neuronalem Energiestoffwechsel. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin. Verfügbarkeit:

<https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/17320> (Link zur Zusammenfassung/Metadaten)

National Institute of Neurological Disorders and Stroke: <https://www.ninds.nih.gov/>

Nature Education: <https://www.nature.com/subjects/education/nature>

Endnoten

¹ ATP steht für Adenosintriphosphat und ist das zentrale „Energieträger-Molekül“ in den Zellen. Es speichert Energie in den Bindungen seiner drei Phosphatgruppen und gibt diese Energie frei, wenn eine dieser Bindungen gespalten wird ($\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Phosphat}$), zum Beispiel um Ionenpumpen wie die Natrium-Kalium-Pumpe oder Muskelkontraktionen anzutreiben.

² Energieaufwand für Ionenpumpen für den Aufbau von Ungleichgewichten

³ Potenzielle Energie in Ionenkonzentrations- und Ladungsunterschieden – umgangssprachlich Ladungsspannung

⁴ Freisetzung bei Aktionspotenzialen für neuronale Funktionen

⁵ Eine echte physikalische Subtilität ist ein feiner, oft zunächst nicht offensichtlicher Unterschied oder eine Nuancen in physikalischen Prozessen, die für das korrekte Verständnis entscheidend ist, aber nicht sofort ins Auge springt.