



Co-funded by
the European Union

Unterrichtseinheit: Neuronen: biologisches und physikalisches Modell der elektrischen Signalübertragung

DiFC – Universität Palermo

BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Inhalt

1. Neurowissenschaften.....	3
Neuronen: biologische und physikalische Modelle der elektrischen Signalübertragung	3
2. Modul erkunden	4
„Andockphase“	4
Brainstorming-Aktivitäten im Unterricht	4
Grundstufe.....	5
Neuronen	5
Die Entstehung des Nervenreizes.....	7
Das physikalische Modell der Signalausbreitung in einem Neuron	9
Fortgeschrittenes Niveau.....	12
Analyse des Modells aus mathematischer Sicht	12
Umgekehrtes Lernen:	15
3. Betriebsmodul.....	17
Grundstufe.....	17
Testen Sie Ihr Wissen	17
PhEt-Simulation: Neuron	18
PhEt-Simulation: Schaltkreis-Bausatz – Virtuelles Labor	18
Fortgeschritten.....	19
Probieren Sie es selbst aus:.....	19
4. Zusätzliches vertiefendes Material	19
5. Referenzen.....	19





Allgemeines Thema des Lernpfads	Neurowissenschaften
Spezifischer Name der Lerneinheit	Neuronen: biologisches und physikalisches Modell der elektrischen Signalübertragung
Alter der Zielgruppe	17–19 Jahre
Anforderungen an die Lernenden	Grundkenntnisse in Mathematik, Physik, Chemie und Biologie.
Beschreibung der Lerneinheit	Didaktische Beschreibung der Einheit Sie führt Lehrer und Schüler durch einen multidisziplinären Lehr-/Lernpfad, um die Grundlagen der Neurowissenschaften und die Beiträge der MINT-Fächer zur aktuellen Forschung, AR-Tool verbessert die Visualisierung und das Engagement
Thema: Beteiligte Parteien	Biologie, Chemie, Physik, Mathematik, Ingenieurwesen
Stichworte	Neuronen, synaptische Übertragung, elektrisches Signal, neuronale Kommunikation, AR, Assemblr EDU, szenenbasiertes Lernen, interaktive Visualisierung
Wichtige Qualifikationen, Fähigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	• Problemlösung, Design Thinking, logisches Denken • Konzeptionelle und praktische Kenntnisse in Physik, Chemie, Mathematik, Biologie • AR-basierte Fähigkeiten: 3D-Raumvisualisierung, szenenbasierte Navigation, digitale wissenschaftliche Modellierung





	• Interaktives Lernen durch Technologieintegration
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	Webressourcen, virtuelle Labore, Forschungsartikel, wissenschaftliche Datenbanken, Assemblr EDU- - Plattform mit PRO-Bibliothekszugang (anatomische 3D-Modelle, molekulare Darstellungen, Thunder-Particle-Effekte), benutzerdefinierte PNG-Navigationsschaltflächen
Bewertungskriterien und Bewertung	Unterschiedliche Kenntnisstufen der erreichten Konzepte und Fähigkeiten, einschließlich AR-basierter Bewertung durch Abschluss der Szenennavigation, gemeinsamer Interpretation synaptischer Prozesse und Demonstration des Verständnisses neuronaler Kommunikationsprinzipien durch interaktive 3D-Modellerkundung.





1. Neurowissenschaften

Neuronen: Biologische und physikalische Modelle der elektrischen Signalübertragung



Die Neurowissenschaften sind eine Gruppe von sehr unterschiedlichen Disziplinen, die sich mit dem Nervensystem befassen, d. h. mit dem Gehirn, dem Rückenmark und den im gesamten Körper vorhandenen Netzwerken von Neuronen. Im Laufe der Jahre haben sie sich die Methoden und Forschungstechniken der Mathematik, Physik, Informatik und Ingenieurwissenschaften angeeignet. Dank des grundlegenden Beitrags dieser Disziplinen sowie der Biologie, Chemie und Physiologie ist es möglich, Funktionsmodelle zu entwickeln, die das Verhalten biologischer Systeme wie des Gehirns erklären können.

Der Nobelpreisträger Eric Kandel schreibt: „Die Aufgabe der Neurowissenschaften besteht darin, das Verhalten anhand der Gehirnaktivität zu erklären. Wie kann das Gehirn seine Millionen einzelner Nervenzellen so steuern, dass sie Verhalten erzeugen, und wie können diese Zellen durch die Umgebung beeinflusst werden? Die letzte Grenze der Wissenschaft des Geistes, ihre ultimative Herausforderung, besteht darin, die biologischen Grundlagen des Bewusstseins und die mentalen Prozesse zu verstehen, durch die wir wahrnehmen, handeln, lernen und uns erinnern.“

Das menschliche Gehirn ist ein wunderbares, aber sehr komplexes System. Die funktionellen Einheiten des Nervensystems, die Neuronen, kommunizieren miteinander über elektrische Signale, die sich auch über große Entfernungen ausbreiten und Chemikalien, sogenannte Neurotransmitter, freisetzen.

Ziel der Studie ist es, durch die Vermittlung der Grundlagen der Neurowissenschaften das Interesse an einem Thema zu wecken, das sich gut für einen multidisziplinären Ansatz im Bereich MINT eignet, und die





Neugierde für ein Thema zu steigern, dessen Erforschung Spitzenforschung ist und wichtige Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gesundheit hat.

Die Erforschung der synaptischen Übertragung und der neuronalen Kommunikation kann durch den Einsatz von Augmented-Reality-Tools (AR) und -Ressourcen erheblich verbessert werden. Der Einsatz von AR-Technologie in der neurowissenschaftlichen Ausbildung erleichtert ein tieferes Verständnis komplexer neurobiologischer Prozesse.

Augmented Synapse: Reise ins Innere des Gehirns – Implementierung von Assemblr EDU

Diese AR-Erfahrung führt die Schüler durch aufeinanderfolgende Szenen, die den gesamten Prozess der synaptischen Übertragung veranschaulichen. Ausgehend von einem anatomischen Überblick über das menschliche Nervensystem gelangen die Schüler zu einer detaillierten Untersuchung einzelner Neuronen und der synaptischen Kommunikation. Unter Verwendung der PRO-Bibliothek von Assemblr EDU werden anatomisch genaue MotorNeuron- und SensoryNeuron-Modelle, molekulare Darstellungen von Neurotransmittern und Thunder-Particle-Effekte eingesetzt, um elektrische Impulse zu visualisieren. Die Schüler navigieren durch spezielle Szenen, die die Impulsauslösung, die Freisetzung von Neurotransmittern und den Signalempfang zeigen, begleitet von wissenschaftlichen Daten wie Spannungsmessungen und Übertragungsgeschwindigkeiten.

Pädagogische Vorteile von AR in den Neurowissenschaften

Augmented Reality überlagert die reale Welt mit virtuellen Elementen und schafft so eine interaktive Lernumgebung. In der neurowissenschaftlichen Ausbildung verbessert AR das Verständnis unsichtbarer biologischer Prozesse durch dreidimensionale Visualisierungen und schrittweise Erkundungen. Der szenenbasierte Navigationsansatz ermöglicht es den Studierenden, abstrakte Konzepte wie die Ausbreitung elektrischer Impulse und die Übertragung chemischer Signale konkret und visuell zu beobachten. Diese Methodik verbindet theoretisches Wissen mit beobachtbaren Phänomenen und unterstützt interdisziplinäre Verbindungen zwischen Biologie, Physik und Technologie, während die wissenschaftliche Genauigkeit bei der Darstellung synaptischer Prozesse gewahrt bleibt.

2. Modul erkunden

„Andockphase“

1) Reise in unser Gehirn – YouTube

<http://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=IrXuyxDt5jo>

Brainstorming-Aktivitäten im Klassenzimmer

Leitsatz: Alle Aktivitäten, die wir ausführen, und alle Emotionen, die wir empfinden, hängen von der Übertragung von Nervensignalen zwischen Neuronen ab. Wie kann organische Materie Informationen mit





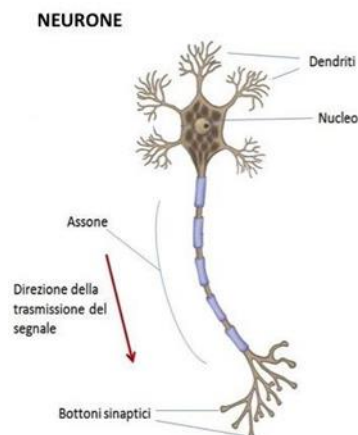
sehr hoher Präzision und Geschwindigkeit sammeln, analysieren und übertragen? Unser Wohlbefinden basiert auf der ordnungsgemäßen Funktion jedes Elements des neuronalen Netzwerks. Welche Technologien können eingesetzt werden, um einzugreifen, wenn etwas nicht richtig funktioniert?

Grundstufe

Neuronen

Wie ist ein Neuron aufgebaut?

Das menschliche Gehirn enthält etwa 100 Milliarden Zellen, Neuronen, die auf die Übertragung von Nervensignalen spezialisiert sind, die hauptsächlich elektrischer Natur sind. Ein Neuron besteht aus mehreren Teilen mit spezifischen Funktionen: einem Zellkörper (oder Soma), der den Zellkern enthält, Dendriten und einem Axon. Das Nervensignal, das von anderen Neuronen oder von den Rezeptororganen kommt, wird gesammelt und über die Dendriten, kurze und verzweigte Fortsätze des Zellkörpers, an den Zellkern weitergeleitet. Im Zellkörper wird das Signal verarbeitet und an das Axon weitergeleitet, einen sehr langen Fortsatz, dessen Aufgabe es ist, das elektrische Signal an andere Zellen weiterzuleiten. Das Innere des Neurons ist durch die Zytoplasmamembran von der äußeren Interstitialflüssigkeit getrennt. Axone sind manchmal über den größten Teil ihrer Länge von einem dicken isolierenden Material, der Myelinscheide, umgeben. An seinem Ende verzweigt sich das Axon in eine variable Anzahl von Enden, den synaptischen Knöpfen, wo das elektrische Signal durch einen Neurotransmitter in ein chemisches Signal umgewandelt wird.



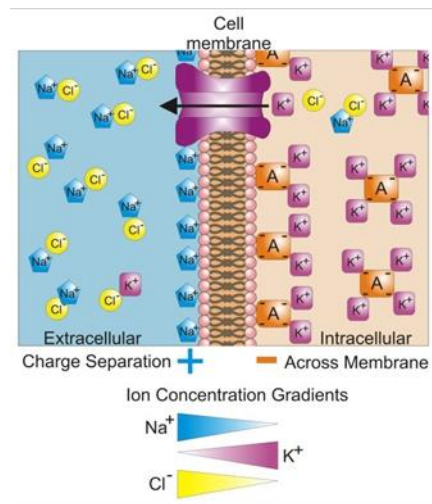
Quellbild: Online Medicine

Was passiert, wenn ein Neuron nicht stimuliert wird? Welche physikalisch-chemischen Eigenschaften ermöglichen es uns, das Verhalten des Neurons zu beschreiben?

Neuronen weisen einen Unterschied im elektrischen Potenzial zwischen der Innen- und Außenseite der Zytoplasmamembran auf, der hauptsächlich auf eine unterschiedliche Konzentration von Natrium- Na^+ - und Kalium- K^+ -Ionen auf den beiden Seiten der Membran zurückzuführen ist. Wenn sich das Neuron im Ruhezustand befindet, d. h. keine Signale überträgt, hat diese Potentialdifferenz, die als Ruhepotential



bezeichnet wird, Werte zwischen -60 mV und -80 mV. Die Zytoplasmamembran verfügt über Ionenkanäle und Pumpen, die sich als Reaktion auf bestimmte Reize öffnen und schließen, wodurch der Durchgang von Ionen reguliert und folglich das elektrische Potential verändert wird.



Das Innere der Zelle ist reich an K^+ -Ionen und negativen Ionen, die an organische Makromoleküle gebunden sind, während das Äußere der Zelle reich an Na^+ - und Cl^- -Ionen ist. Die Konzentration von Na^+ -Ionen und K^+ -Ionen wird durch drei Membranproteine reguliert, die als Ionenkanäle oder Pumpen bezeichnet werden:

- Natriumkanäle;
- Kaliumkanäle
- die Natrium-Kalium-Pumpe.

Die Membran der Nervenzelle verfügt über zahlreiche Kaliumkanäle: Diese Kanäle transportieren K^+ -Ionen aus dem Inneren der Membran nach außen, wodurch sie jedoch die Negativität im Inneren der Zelle erhöhen. Andererseits können negative Ionen im Inneren der Zelle nicht nach außen diffundieren, da sie zu groß sind, um die Membran zu passieren.

Natriumkanäle sind selten und neigen dazu, Natriumionen nach innen zu diffundieren.

Die Natrium-Kalium-Pumpe wirkt gegen die natürliche Richtung des Ionenflusses und drückt Na^+ aus der Zelle heraus und K^+ in die Zelle hinein. Im Ruhezustand ist die Membran praktisch undurchlässig für das Eindringen von Na^+ -Ionen.

Denken wir gemeinsam darüber nach: Neuronen sind die ältesten Zellen im Körper: Sie sind nicht in der Lage, sich zu vermehren, und im Falle von Läsionen, die zu ihrem Tod führen, können die umliegenden Zellen sie nicht ersetzen. Mit zunehmendem Alter lässt die Funktionsfähigkeit des Nervensystems nach: Die Forschung ist daher daran interessiert, neue Methoden zu finden, um die Fähigkeit des Gehirns zur Produktion neuer Neuronen (Neurogenese) zu verbessern und so das Lern- und Gedächtnisvermögen zu steigern. Was können Sie tun, um Ihre Neuronen gesund zu halten? Wie können Sie Ihren Geist trainieren?



Die Entstehung des Nervenreizes

Wie kommunizieren Neuronen?

Alle Signale von außen werden von den Dendriten aufgenommen und an den Zellkern weitergeleitet. Wenn ein Reiz am Zellkern eines Neurons ankommt, der das Ruhepotenzial bis zu einem Schwellenwert (etwa -50 mV) verändern kann, wird ein Aktionspotenzial oder Nervenimpuls erzeugt, der sich entlang des Axons ausbreitet.

Die Entstehung des Aktionspotentials hängt mit dem Austausch von Ionen durch bestimmte spannungsgesteuerte Kanäle für Natrium (Na^+) und Kalium (K^+) zusammen. Natriumkanäle öffnen sich zuerst, wenn das Potential den Schwellenwert erreicht, und drücken Ionen in die Zelle, die negativ ist, wodurch die Membran schnell depolarisiert wird. Der Fluss von Natriumionen innerhalb der Membran bewirkt eine Umkehrung der Polarität: Innerhalb der Membran gibt es nun einen Überschuss an positiver Ladung und außerhalb einen Mangel an positiver Ladung. Auf diese Weise depolarisiert sich die Membran, bis sie ein Potenzial von +50 mV erreicht, den Maximalwert des Aktionspotentials.



Der Depolarisierungszustand dauert jedoch nur 1 bis 2 Millisekunden. Danach schließen sich die spannungsgesteuerten Natriumkanäle und die spannungsgesteuerten Kaliumkanäle öffnen sich. Letztere öffnen sich langsamer und bleiben länger offen: Die K^+ -Ionen fließen zur Außenseite der Membran, die sich zu repolarisieren beginnt, wodurch das Potenzial wieder auf einen negativen Wert zurückkehrt. Der K^+ -Fluss hält an und erzeugt eine Phase der Hyperpolarisation, wobei das Potenzial negativer wird als das Ruhepotenzial. Schließlich schließen sich alle spannungsgesteuerten Kanäle und die Aktivität der Natrium-Kalium-Pumpe wird wieder aufgenommen, wodurch das Ruhepotenzial der Plasmamembran wiederhergestellt wird. Die Amplitude (etwa + 50 mV) und die Dauer (etwa 2 Millisekunden) des Aktionspotenzials sind fest, d. h. sie hängen nicht von der Stärke der Erregung ab.

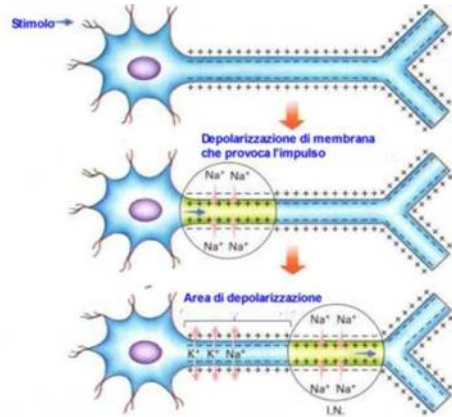
Wie breitet sich das Aktionspotential entlang des Axons aus?

Das elektrische Signal, das sich durch das Neuron ausbreitet und dann an nachfolgende Neuronen weitergeleitet wird, führt die folgende Abfolge extrem schneller Ereignisse aus:

- Der vom Zellkern verarbeitete elektrische Reiz bewirkt die Öffnung spannungsgesteuerter Natriumkanäle in einem Segment in der Nähe des Zellkerns; wenn der Schwellenwert erreicht ist, wird das erste Aktionspotential erzeugt.
- Die Depolarisation breitet sich entlang des Axons aus und bewirkt die Öffnung der Kanäle spannungsgesteuerte Natriumkanäle in benachbarten Membranbereichen; folglich wird ein zweites Aktionspotential erzeugt, das wiederum ein drittes erzeugt und so weiter.



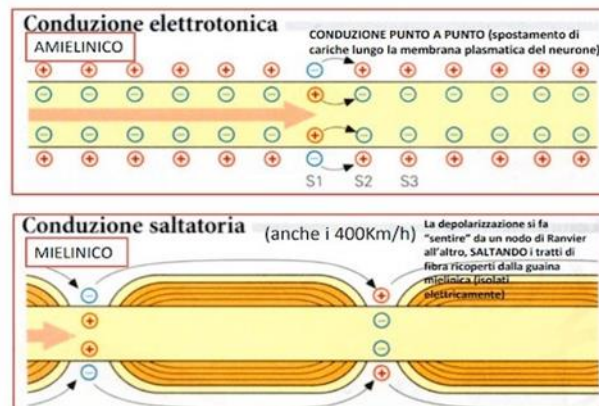
- Gleichzeitig öffnen sich in dem Bereich, der zuerst depolarisiert wurde, spannungsgesteuerte Kaliumkanäle, wodurch die Membran wieder auf das Ruhepotenzial zurückkehrt.
- Potenziale breiten sich nur in eine Richtung aus, da spannungsgesteuerte Natriumkanäle nach dem Schließen eine Refraktärphase durchlaufen, in der sie sich nicht wieder öffnen können.



Ausbreitung des Aktionspotentials entlang eines unmyelinisierten Axons: Video unter: Ausbreitung des Aktionspotentials in einem unmyelinisierten Axon – Animierte medizinische Physiologie – YouTube
<https://www.youtube.com/watch?v=RNdvkoiWOM&t=7s>

Welche Rolle spielt die Myelinscheide?

Mit einer Myelinscheide ummantelte Nervenfasern sind wasserundurchlässiger, da die Scheide als elektrischer Isolator wirkt: Folglich finden die Depolarisation und die Ausbreitung des Aktionspotentials nur in den Abschnitten statt, in denen sie nicht vorhanden ist, den sogenannten Ranvier-Knoten. Das Nervensignal „springt“ mit einer höheren Geschwindigkeit als bei unmyelinisierten Fasern von einem Knoten zum nächsten.



Denken wir gemeinsam darüber nach: Die Übertragung des elektrischen Signals zunächst in einer Nervenzelle und später zu anderen Nervenzellen erfolgt schnell und präzise. Die Übertragungsgeschwindigkeit und die Genauigkeit der Informationen sind entscheidende Faktoren für die korrekte Ausführung aller menschlichen Aktivitäten. Wenn etwas in diesem wunderbaren Mechanismus blockiert oder stoppt und eine neurologische Erkrankung verursacht, sind die Auswirkungen auf die



Lebensqualität der betroffenen Personen verheerend. Die Erforschung der Funktionsweise der Signalübertragung

Die neuronale Stimulation ist die Grundlage der fortschrittlichsten Neurotechnologien, die elektrische Stimulation als Therapie nutzen. Haben Sie schon einmal von Elektroden gehört, die bei gelähmten Patienten eingesetzt werden, die dadurch wieder laufen können?

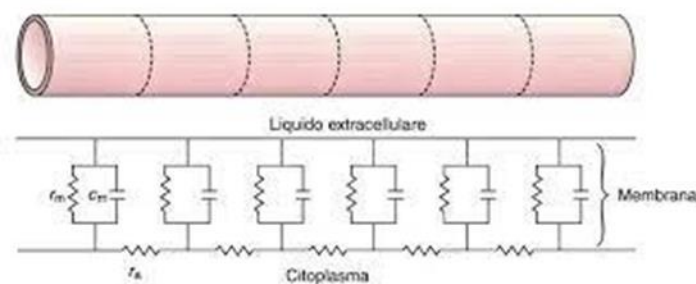
Das physikalische Modell der Signalausbreitung in einem Neuron

Welches physikalische Modell kann die Funktionsweise eines Neurons erklären?

Zur schnellen Auffrischung Ihrer Kenntnisse über Kapazität und Kondensatoren: Kondensatoren und Kapazität eines Kondensators (youmath.it)

Zur schnellen Auffrischung Ihrer Kenntnisse über Widerstand und Widerstände: Widerstände, elektrischer Widerstand und elektrische Widerstandsfähigkeit (youmath.it)

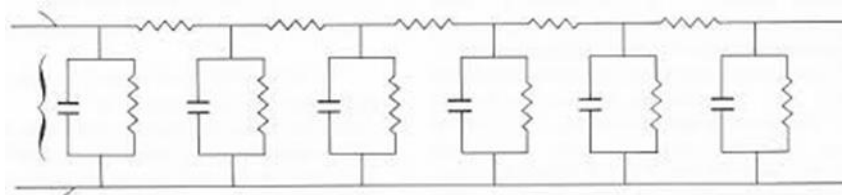
Das Axon ähnelt einem Koaxialkabel. Der innere Teil des Axons ist der zentrale leitende Kern des Kabels.



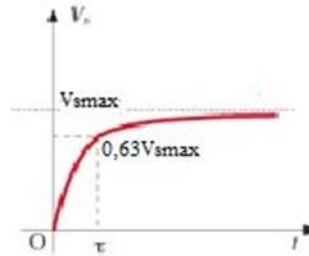
Seine Festigkeit ist hoch, was hauptsächlich auf seinen kleinen Querschnitt zurückzuführen ist. Um die elektrischen Eigenschaften des Zytoplasmas zu beschreiben, wird der Widerstand pro Längeneinheit r_i eingeführt.

Der äußere Teil des Axons ist ebenfalls ein Leiter, aber der äußere Abschnitt ist viel größer als der innere, sodass der Widerstand, den die interstitielle Flüssigkeit bietet, im Vergleich zum inneren vernachlässigbar ist. Die isolierende Membran bildet einen Kondensator, da sich das Innere und das Äußere des Axons wie zwei leitende Platten verhalten, die Ladungen mit entgegengesetzten Vorzeichen speichern. Parallel zum Kondensator muss ein Widerstand berücksichtigt werden, der den Ionenfluss durch die Membran selbst berücksichtigt. Um das elektrische Verhalten der Membran zu schematisieren, werden zwei Größen eingeführt: die Kapazität pro Längeneinheit C_m und die Leitfähigkeit pro Längeneinheit der Membran σ_m (αυσ δερ ωιρ den Widerstand der Membran pro Meter r_m αβλειτεν).

Das Axon kann dann durch einen Stromkreis schematisiert werden, der aus einer Abfolge von Maschen mit Widerständen und Kondensatoren besteht.



Das Reizpotenzial hängt von der Zeit und der Position entlang des Axons ab. Tatsächlich wird es durch zwei Parameter charakterisiert: die Zeitkonstante τ und die Raumkonstante λ . Das mathematische Modell des Stromkreises ermöglicht es uns, den Verlauf des Potenzials sowohl als Funktion der Zeit als auch als Funktion der Position abzuleiten. Im ersten Fall erhalten wir:



$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

wobei V_{smax} der vom Potential erreichte Maximalwert und $\tau = r_{mcm}$ ist.

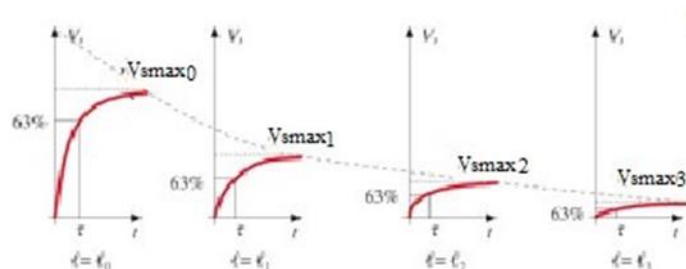
Die Zeitkonstante τ (in der Größenordnung von ms) ist das Zeitintervall, das das Reizpotential benötigt, um 63 % seines Maximalwertes zu erreichen: Sie ist ein Maß dafür, wie schnell das Neuron reagiert.

Je weiter wir uns von dem Punkt entfernen, an dem es erzeugt wird, desto stärker nimmt das Reizpotential aufgrund der kombinierten Auswirkungen der Widerstände r_i und r_m mit der Entfernung ab.

Das Reizpotential nimmt in der Regel gemäß folgender Gleichung ab:

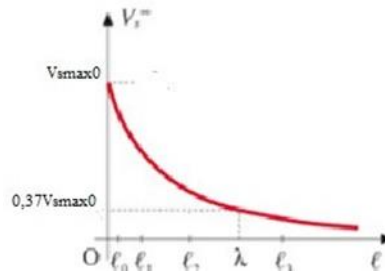
$$V_{smax}(x) = V_{smax0} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

wobei V_{smax0} das Reizpotential am Entstehungsort und λ die Raumkonstante ist.



Die Raumkonstante λ (in der Größenordnung von mm) ist die Entfernung, bei der die anfängliche Potentialdifferenz auf 37 % ihres Maximalwertes abfällt.





Sie ist ein Maß dafür, wie weit der Strom durch das Axon fließen kann, bevor er aufgrund von Leckströmen abklingt.

Nach einer zurückgelegten Strecke von λ hat sich das Signal also auf etwa 1/3 reduziert, und nach 2λ beträgt es etwa 1/7 des ursprünglichen Signals und kann das Aktionspotential nicht mehr auslösen. In Wirklichkeit legen die Reize aufgrund des Eingreifens anderer Mechanismen, die wir hier nicht berücksichtigen, erheblich längere Strecken zurück, in der Größenordnung von einigen Metern. Mathematisch wird die Raumkonstante wie folgt beschrieben:

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

Der Hauptfaktor, der den Innenwiderstand r_i beeinflusst, ist der Radius des Axons: Axone mit großem Durchmesser haben einen geringeren Widerstand gegen Längsstromflüsse und daher einen geringeren axialen Widerstand; folglich haben sie eine größere Raumkonstante. Tatsächlich nimmt λ mit der Quadratwurzel des Radius des Axons r_a zu.

$$\lambda \propto \sqrt{r_a}$$

Wovon hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Nervenimpulses ab?

Die Kenntnis der beiden Konstanten ermöglicht es uns, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Signals entlang eines Axons zu berechnen:

$$v = \frac{\lambda}{\tau}$$

und somit ableiten, dass

$$v \propto \sqrt{r_a}$$

Beziehung ableiten, die mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt.

Lassen Sie uns gemeinsam darüber nachdenken: Der Begriff „Modell“ ist eine Darstellung, manchmal eine Vereinfachung, die dessen Funktionsweise erklären kann. Die Verwendung eines physikalischen Modells zur Interpretation und zum Verständnis eines biologischen Phänomens entspricht dem von mehreren Neurowissenschaftlern hervorgehobenen Bedürfnis,





die Barrieren zwischen verschiedenen Disziplinen zu beseitigen und dabei die Ressourcen und Techniken verschiedener Disziplinen voll auszuschöpfen. Haben Sie schon einmal darüber nachgedacht, Ihr Wissen in anderen Bereichen als Ihrem eigenen einzusetzen?

Fortschrittenes Niveau

Analyse des Modells aus mathematischer Sicht

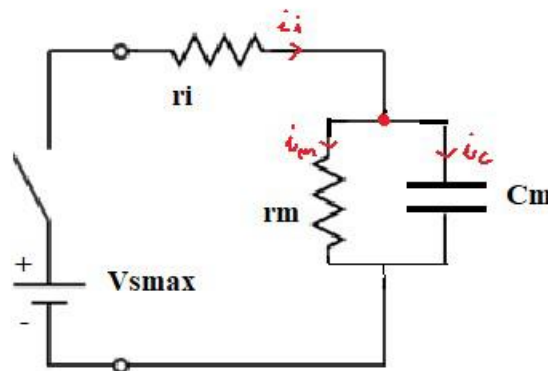
Betrachten wir den ersten elementaren Schaltkreis, mit dem wir das Axon schematisieren können.

Um den Verlauf des Potentials und der Ströme zu bestimmen, verwenden wir die Kirchhoffschen Gesetze:

$$V_{\text{smax}} = V_{r_i} + V_C$$

und

$$i_i = i_c + i_m$$



wobei V_{smax} das Potential über dem RC-Stromkreis ist, das wir uns als die elektrische Spannung eines Generators vorstellen, V_{r_i} die elektrische Spannung über dem Innenwiderstand des Axons und V_c die elektrische Spannung an den Enden des Kondensators C. Mit i_m bezeichnen wir auch den Strom durch die Membran.

Wir leiten i_c ab und drücken alles als Funktion der Potentiale aus:

$$i_m = \frac{V_c}{r_m}, \quad i_i = \frac{V_{\text{smax}} - V_c}{r_i}, \quad i_c = i_i - i_m$$

also was

$$i_c = \frac{V_{\text{smax}} - V_c}{r_i} - \frac{V_c}{r_m}$$

Da für einen Kondensator die folgende Beziehung gilt:





erhalten wir

$$V_c = \frac{q}{c_m}$$

$$i_c = \frac{V_{smax}}{r_i} - \frac{q}{r_i c_m} - \frac{q}{r_m c_m}$$

Leitet man den vorherigen Ausdruck in Bezug auf die Zeit ab, erhält man:

$$\frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{i_c}{c_m}$$

Dies ist eine lineare Differentialgleichung mit separierbaren Variablen, deren Lösung durch Integration erhalten wird:

$$\int \frac{di_c}{i_c} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{1}{c_m} \int dt$$

$$i_c(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Die Zeitkonstante τ ist

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m}$$

Die Konstante A wird durch die Anfangsbedingungen des Stromkreises bestimmt.

Für

$$t=0 \quad i_c(0) = A = i_i(0) = \frac{V_{smax}}{r_i}$$

und dann

$$i_c(t) = \frac{V_{smax}}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Normalerweise ist $r_m \sim 104 \Omega / m$ und $r_i \sim 1010 \Omega \mu$, wobei r_m im Vergleich zu r_i vernachlässigt werden kann, was eine Vereinfachung von τ ermöglicht:

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m} \sim r_m c_m$$

Wir finden dann die anderen Ströme als Funktion der Zeit:



$$i_m(t) = \frac{V_c}{r_m} = \int \frac{i_c(t)}{r_m c_m} dt$$

Die Lösung lautet:

$$i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Am Ende

$$i_i(t) = i_c(t) + i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 + \frac{r_m}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Für $t=0$ fließt der gesamte Strom durch den Widerstand r_i und lädt den Kondensator c_m auf. Es fließt kein Strom durch r_m , $i_m(0) = 0$, da dieser parallel zu c_m geschaltet ist und an seinen Enden keine elektrische Spannung aufweist.

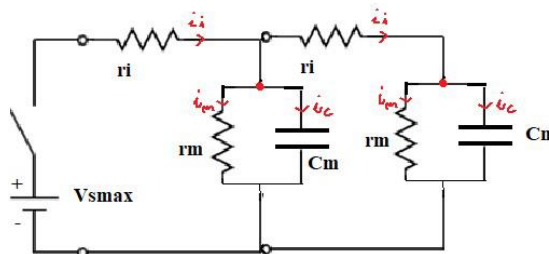
Für lange Zeiträume ($t \rightarrow \infty$) ist der Kondensator geladen und es fließt kein Strom mehr durch den Zweig, d. h. $i_c(\infty) = 0$, während der gesamte Strom durch den Innen- und Membranwiderstand fließt:

$$i_i(\infty) = i_m(\infty) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m}$$

Die analytisch ermittelten Ausdrücke für Ströme rechtfertigen ein Ergebnis, das wir zuvor eingeführt hatten, nämlich das Reizpotenzial:

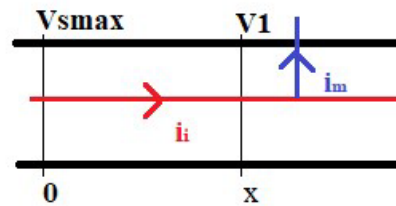
$$V_s(t) = V_{smax} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Um das Axon zu simulieren, betrachten wir andere ähnliche Schaltungen, die mit der ersten verbunden sind. Für diese zweite Schaltung ist das Potential oder die EMK nicht mehr V_{smax} , sondern das an den Enden der Parallelschaltung vorhandene Potential



$$V_c = i_m r_m = \frac{V_{smax} r_m}{r_i + r_m} \sim \frac{r_m}{r_i} V_{smax}$$





Das Reizpotenzial nimmt entlang des Axons ab.

Betrachten wir das Reizpotenzial V_{smax} am Punkt $x=0$. Seine Ausbreitung hängt vom Stromfluss innerhalb des Axons II ab, der wiederum (gemäß dem ersten Gesetz von Ohm) von der Potenzialänderung entlang des Axons abhängt:

$$i_i(x) = - \frac{1}{r_i} \frac{dV_s}{dx}$$

Das Minuszeichen hängt davon ab, dass der Strom von Punkten mit höherem Potential Punkte mit niedrigeren Potentialen fließt, dann in entgegengesetzter Richtung zum Gradienten von V_s . Der interne Strom nimmt ab, weil die Ladungen über den Strom im aus der Membran fließen:

$$\frac{di_i}{dx} = -i_m = - \frac{V_s}{r_m}$$

Durch Einsetzen erhalten wir die folgende Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$V_s = -r_m \frac{di_i}{dx} = \frac{r_m}{r_i} \frac{d^2 V_s}{dx^2}$$

Die Lösung lautet:

$$V_s(x) = V_{smax} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

mit

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

wie wir zuvor eingeführt hatten.

Flipped Learning:

Lesen Sie den vorgeschlagenen Artikel. Konzentrieren Sie sich dabei insbesondere auf die Untersuchung von Nervensignalen und elektrophysiologischen Techniken, die in dem Artikel beschrieben werden. Anschließend vervollständigen Sie die Untersuchung, indem Sie analysieren, welche Forschungsbereiche laut dem Artikel für die Untersuchung neuronaler Schaltkreise am effektivsten sind.



Articoli AIRInforma - Quando membrane, proteine e sali creano elettricità
AIRInforma: Il portale di divulgazione di AIRicerca - <http://informa.airicerca.org> - Pubblicato il 14-12-2015



Quando membrane, proteine e sali creano elettricità.

di Elia Magrinelli

Editor: Olivia Candini

Revisori Esperti: Annalisa Zuccotti, Giorgio Grasselli

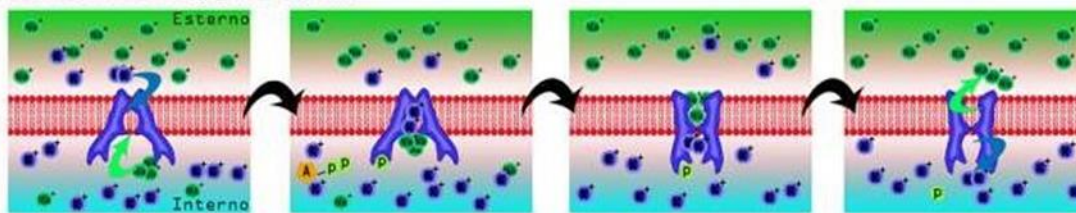
Revisori Naive: Michele Schiavina, Erika Ponzini



Parole Chiave: Biologia, Biologia Cellulare, Cervello, Medicina, Neuroni, Neuroscienze, Ricerca di Base, Ricerca in Vitro

Permalink: <http://informa.airicerca.org/2015/12/14/quando-membrane-proteine-e-sali-creano-elettricit>

doi: 10.13140/RG.2.2.12876.72328



Wir kommentieren die im Artikel vorgeschlagene Untersuchung von Nervensignalen:

Gängigste elektrophysiologische Techniken:

- Die Patch-Clamp-Technik
- Die Inside-Out- und Outside-Out-Technik
- Extrazelluläre Aufzeichnung

Besonders effektive Verbindungen mit der Elektrophysiologie:

Pharmakologie

Gentechnik, Optogenetik





3. Operationsmodul

Grundstufe

Testen Sie Ihr Wissen

Aktivität:

Wissenstest

Multiple-Choice-Fragen

1) Ein Neuron besteht aus:

- Dendriten, Zellkern, Axon, synaptischen Knöpfen
- Dendriten und Axon
- Zellkörper und Axon
- Dendriten, Zellkern, Axon, Myelinscheide

2) Welche der folgenden Aussagen zum Aktionspotential ist falsch?

- entspricht einer Hyperpolarisation
- wird nur als Reaktion auf einen Reiz ausgelöst
- beginnt nur, wenn ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird
- verursacht eine Polaritätsumkehr

3) Der Ausbreitungsprozess wird ausgelöst durch:

- dem Vorhandensein spannungsgesteuerter Kanäle für Na^+
- dem Vorhandensein einer bestimmten Refraktärzeit
- dem wiederholten Auftreten des auslösenden Reizes
- dem Vorhandensein von Potenzialen auch in den ruhenden Abschnitten

4) Das Ruhepotential ist zurückzuführen auf:

- Na^+ -Ionen außerhalb der Zelle und K^+ -Ionen innerhalb der Zelle
- Na^+ -Ionen innerhalb der Zelle und K^+ -Ionen außerhalb der Zelle
- Na^+ -Ionen innerhalb der Zelle und Cl^- -Ionen außerhalb der Zelle
- K^+ -Ionen außerhalb der Zelle und Cl^- -Ionen innerhalb der Zelle

5) Welche der folgenden Aussagen über das Kabelmodell ist falsch?

- Das Axon kann durch einen Stromkreis schematisiert werden, der zwei Widerstände und eine Kapazität in Reihe enthält
- Das Axon kann durch eine Abfolge von Maschen mit Widerständen und Kondensatoren schematisiert werden
- Der innere Teil des Axons hat einen sehr hohen Widerstand
- Die Membran selbst bildet einen Kondensator parallel zu einem Widerstand.





- 6) Kurze Antwort: Welchen Wert hat das Ruhepotenzial?
- 7) Offene Antwort: Wie breitet sich das Aktionspotential entlang des Axons aus?
- 8) Offene Antwort: Wie variiert das Reizpotenzial an einem bestimmten Punkt als Funktion der Zeit?
Geben Sie eine qualitative Beschreibung.
- 9) Ordnen Sie jede Frage der richtigen Antwort zu:
- Was misst die Raumkonstante?
 - Was misst die Zeitkonstante?
 - Wovon hängt die Raumkonstante ab?
 - Wovon hängt die Zeitkonstante ab?
- 10) Kurze Antwort: Wovon hängt die Geschwindigkeit der Nervenimpulsausbreitung in unmyelinisierten Neuronen gemäß dem Kabelmodell ab?

PhEt-Simulation: Neuron

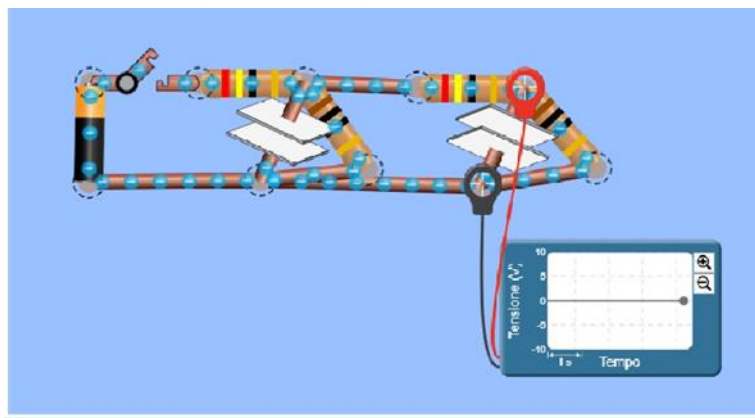
https://phet.colorado.edu/sims/html/neuron/latest/neuron_it.html

Aktivität:

- Link zum Arbeitsblatt auf Englisch: Neuron – Biologie | Neuronen | Zellen – Interaktive Simulationen von PhET (colorado.edu)
- Es untersucht das Verhalten eines Neurons bei Vorhandensein eines Aktionspotentials.

PhEt-Simulation: Schaltkreis-Bausatz – Virtuelles Labor

Schaltkreis-Bausatz: Virtuelles Labor (colorado.edu)



Aktivität:





- Link zum Arbeitsblatt auf Englisch: Schaltkreis-Bausatz: Virtuelles Labor – RLC-Schaltkreis | Wechselstromkreise | Kirchhoffsche Gesetze – Interaktive Simulationen von PhET (colorado.edu)
- Bauen Sie eine Schaltung, die das Verhalten des Kabelmodells des Neurons simuliert. Markieren Sie den potenziellen Trend über die Kondensatoren und prüfen Sie, ob er mit dem übereinstimmt, was Sie gelernt haben.

Fortgeschrittenes Niveau

Probieren Sie es selbst aus:

Als Anhaltspunkt und mit einer gewissen Annäherung, die die Variabilität der verschiedenen Axontypen und die unterschiedlichen Tierstrukturen berücksichtigt, hat ein Axon einen Radius in der Größenordnung von μm , einen Innenwiderstand pro Längeneinheit $r_i \sim 1010 \Omega / \text{m}$ und einen Transmembranwiderstand pro Längeneinheit $r_m \sim 104 \Omega / \text{m}$. Die Dicke der Membran beträgt etwa 10-8 m und die relative Dielektrizitätskonstante etwa 3.

1. Wählen Sie ein Kondensatormodell und dessen Kapazität aus und schätzen Sie anhand dieser Daten die Größenordnung der Kapazität pro Axonlängeneinheit (eine Kapazität pro Meter $\text{cm} \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ F/m}$).
2. Überprüfen Sie, ob die im explorativen Teil verwendeten Näherungen legitim sind, und berechnen Sie die Zeit- und Raumkonstante.
3. Schätzen Sie anschließend die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Signals und vergleichen Sie die erhaltenen Ergebnisse mit den experimentellen Daten.
4. Warum weicht die Ausbreitungsgeschwindigkeit von den experimentellen Ergebnissen ab? Wie können wir das Modell verbessern, um Ausbreitungsgeschwindigkeiten zu erhalten, die näher an den realen liegen?

4. Zusätzliches vertiefendes Material

Webbasierte Ressourcen:

Broschüre-NEUROSCIENCE-Battaglini (units.it): Informations- und Verbreitungshandbuch über Neurowissenschaften des BRAIN-Zentrums in Triest

<https://www2.units.it/brain/Manuali/Scienza%20del%20Cervello-web.pdf>: Ein populäres Handbuch zur Neurowissenschaft: interessante Verweise auf Forschungsf frontiers und Links zu anderen Websites

<https://userswww.pd.infn.it/~soramel/FisicaMedicina/Altro/CircuitiRC.pdf>: Vorstellung von RC-Schaltungen und deren Anwendung in der medizinischen Physik.

5. Referenzen

D. Sadava et al: Biologia.blu PLUS. Der menschliche Körper, Zanichelli

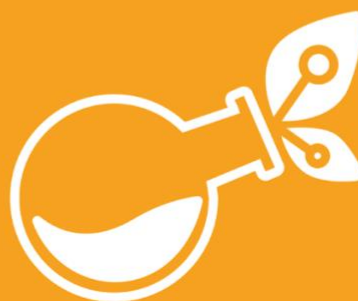
G. Bellini et al : Physik für die Medizin, Piccin

Walker J: PHYSIK: Theoretische Modelle und Problemlösung, 3 Linx





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

*Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.