

Nerven in Zahlen:
Die Nervenzellen im menschlichen Körper zu zählen, ist nicht möglich. Schätzungen gehen davon aus, dass der Mensch mehrere 100 Milliarden Nervenzellen besitzt, wobei die Nervenfasern eine Gesamtlänge über einer Million Kilometer haben.

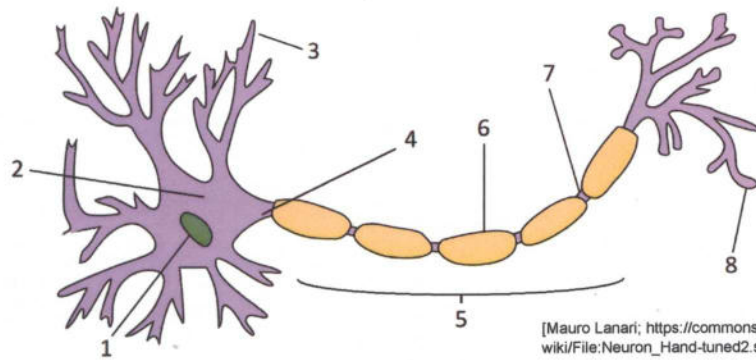
griechisch:
dendron = Baum
axis = Straße

Beschrifte die einzelnen Teile des Neurons und gib jeweils seine (physikalische) Funktion an.

5. Neuronale Signalleitung

5.1 Nervenzellen

Aufbau eines Neurons (=Nervenzelle)



[Mauro Lanari; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron_Hand-tuned2.svg; mit Zahlen]

Nr.	Bezeichnung	Funktion
1	Zellkern	Stoffwechsel der Zelle
2	Zellkörper	
3	Dendriten	Empfang von Signalen benachbarter Zellen
4	Axonhügel	Signalweiterleitung ans Axon
5	Axon	elektrische Signalleitung
6	Myelinscheide	elektrische Isolation → schnellere Signalleitung
7	Ranvier'scher Schnürring	keine Isolation, viele Na^+ -Kanäle
8	Endknöpfchen	Kontakt zu Nachbarzelle, Synapse

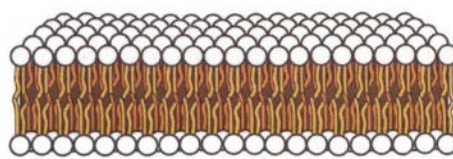
5.1 Nervenzellen

1

Nervenzellen sind (wie alle anderen Zellen auch) von einer Zellmembran umgeben. Diese wollen wir zunächst aus biologischer Sicht betrachten.

Zellmembran

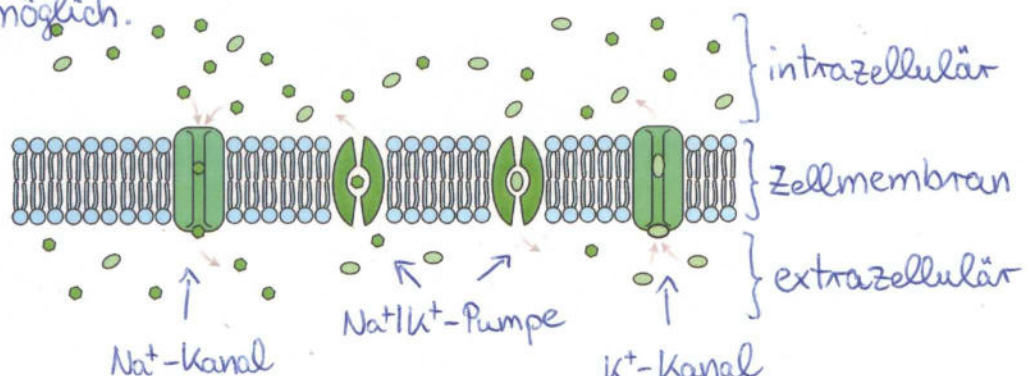
Die Zellmembran umgibt die Nervenzelle und trennt das Zellinnere (intrazellulärer Raum) vom Zelläußeren (extrazellulärer Raum). Die Membran hat eine Dicke von 5 – 10 nm und besteht aus einer Phospholipid-Doppelschicht.



hydrophil
(=wasserliebend)
hydrophob; 2 Fettsäuren
(=wasserabweisend)

Die Zellmembran grenzt den inneren vom äußeren Bereich einer Zelle ab.
Die Ionenkanäle sind Proteine, die durch die Zellmembran reichen. Sie sind für Ionen durchlässig. Der Transport erfolgt passiv, also ohne Energieeinsatz.
Bei der Natrium-Kalium-Pumpe findet ein aktiver Transport statt, das heißt unter Einsatz von ATP (Energie).
Durch ihre besonderen Eigenschaften ist eine Nervenzelle innen elektrisch anders geladen als außen, es gibt also eine Potentialdifferenz.

Die Zellmembran ist für Wasser durchlässig und für Ionen (K^+ , Na^+ , Cl^-) undurchlässig. Ein Ionenaustausch ist nur durch Ionenkanäle und die Natrium-Kalium-Pumpe möglich.



5.1 Nervenzellen

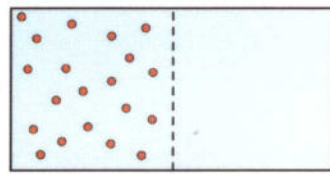
2

Um diese Potentialdifferenz an der Zellmembran verstehen zu können, müssen wir uns zunächst die Vorgänge bei der Diffusion und bei der Osmose anschauen.

Die Diffusion kannst du in einem einfachen Experiment selbst beobachten. Gibst du einen Tropfen Tinte in ein Glas mit warmem Wasser, so verteilt so die Tinte gleichmäßig im ganzen Glas.

Diffusion

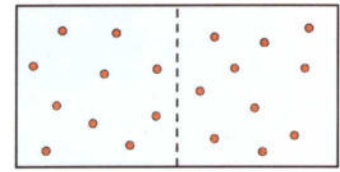
Wir betrachten ein Wassergefäß, in dem ein ungeladenes Molekül gelöst ist. Zu Beginn befinden sich alle gelösten Moleküle auf der linken Seite. Nach einiger Zeit stellt sich eine gleichmäßige Verteilung ein.



Konzentrationsgefälle

→ F_{chemisch}

Zeit →



Konzentrationsgleichgewicht

$F_{\text{chemisch}} = 0$

Gibt es in einem Stoffgemisch ein Konzentrationsgefälle, so versuchen die Stoffe sich gleichmäßig zu verteilen. Dieser Vorgang heißt Diffusion. Wir beschreiben dies mit einer chemischen Kraft; diese ist umso größer, je größer das Konzentrationsgefälle ist.

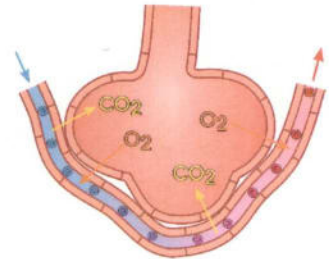
Der Mensch besitzt etwa 300 Millionen Lungenbläschen mit einer Gesamtoberfläche von ca. 100 m².

Beschreibe anhand der Grafik, welcher Prozess dort abläuft.

Anwendung: Atmung

An der großen Oberfläche der Lungenbläschen diffundiert CO₂ aus dem Blut in die Atemluft und O₂ ins Blut.

5.1 Nervenzellen



[domdomegg; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gas_exchange_in_the_aveolus.svg] 3

Da die Diffusion ein statistischer Prozess ist, lässt sich dieser mit einem Tabellenkalkulationsprogramm simulieren. (Wenn du im ntg-Zweig bist, dann kennst du dies von der Methode der kleinen Schritte.)

Stelle eine Iterationsformel auf, mit der N_{links} und N_{rechts} für alle Zeiten berechnet werden kann.

Berechne anschließend die fehlenden Werte der Tabelle und fülle diese aus.

Das Diagramm zeigt die Molekülverteilung in den ersten 50 Zeitschritten.

Beschreibe das Diagramm.

Simulation der Diffusion

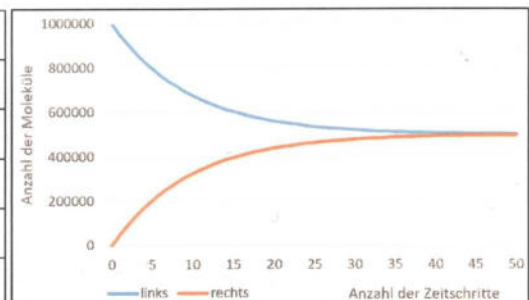
Wir simulieren die Diffusion von oben. Dazu setzen wir als Startwert die Anzahl der gelösten Moleküle auf der linken Seite $N_{\text{links},0} = 1\,000\,000$ und auf der rechten Seite gleich $N_{\text{rechts},0} = 0$. Nun sollen bei jedem weiteren Zeitschritt (Δt) immer 5 % der gelösten Moleküle die Seite wechseln.

$$N_{\text{links},\text{neu}} = N_{\text{links},\text{alt}} \cdot 0,95 + N_{\text{rechts},\text{alt}} \cdot 0,05$$

$$N_{\text{rechts},\text{neu}} = 1\,000\,000 - N_{\text{links},\text{neu}}$$

$$N_{\text{links},2} = \underbrace{950\,000}_{N_{\text{links},1}} \cdot 0,95 + \underbrace{50\,000}_{N_{\text{rechts},1}} \cdot 0,05 = 905\,000$$

#	N_{links}	N_{rechts}
0	1 000 000	0
1	950 000	50 000
2	905 000	95 000
3	864 500	135 500
4	828 050	171 950



Nach einiger Zeit sind links und rechts gleich viele Moleküle.

5.1 Nervenzellen

An einer Zellmembran ist die Situation etwas komplexer als bei der Diffusion. Die Zellmembran ist eine semipermeable Membran, sie ist also für manche Stoffe durchlässig, für andere nicht.

Zeichne die auftretenden Kräfte bei den Wassergefäßen ein und fülle die Lücken im Text aus.

5.2 Membranpotential

Osmose

Wir betrachten ein Wasserglas, in dem auf der rechten Seite eine ungeladene Substanz gelöst ist. In der Mitte des Glases befindet sich eine **semipermeable Membran**. Sie ist für Wasser durchlässig, nicht aber für die gelöste Substanz.

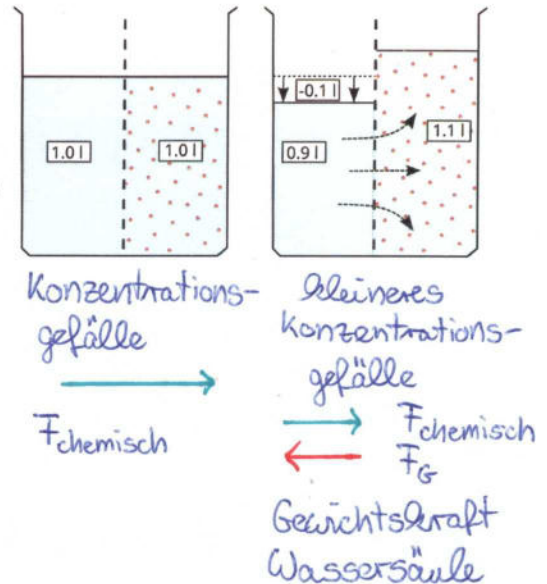
Aufgrund des Konzentrationsgefälles wirkt eine chemische Kraft. Da die Substanz nicht durch die Membran diffundieren kann, wirkt die Kraft

auf die Wassermoleküle

Diffundiert Wasser nach rechts, wird das Konzentrationsgefälle geringer, die chemische Kraft wird kleiner.

Aufgrund der steigenden Wassersäule wird die Gewichtskraft auf der rechten Seite größer und wirkt der chemischen Kraft entgegen.

Heben sich beide Kräfte gegenseitig auf, so stellt sich ein Gleichgewicht ein.



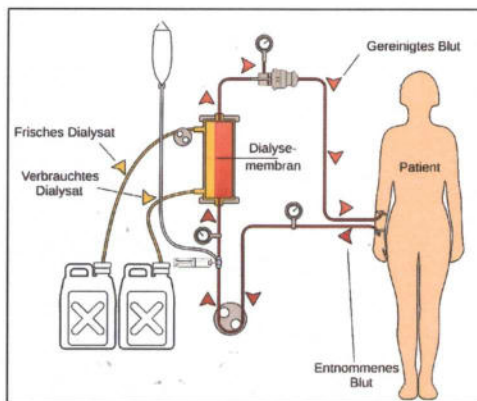
Die Diffusion durch eine semipermeable Membran heißt **Osmose**.

Bei der Osmose stellt sich neben dem Konzentrationsungleichgewicht in der Regel ein weiteres Ungleichgewicht ein. (hier: Höhe der Wassersäule)

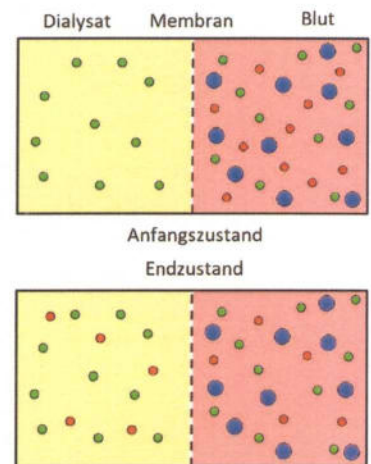
Die Niere filtert überflüssige und schädliche Substanzen aus dem Blut. Diese werden dann über den Urin ausgeschieden. Dies ist überlebensnotwendig, da es sonst zu einer Vergiftung des Körpers kommen würde.

Patienten mit Nierenversagen müssen daher zur Dialyse. Dabei wird das Blut mithilfe einer Maschine durch Osmose gefiltert. Die Schwierigkeit liegt darin, dass schädliche Stoffe durch die Membran diffundieren müssen, andere lebensnotwendige Stoffe hingegen nicht diffundieren dürfen.

Anwendung: Dialyse



[YassineMrabet, Cjesch; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hemodialysis-de.svg>; gekürzt]



Beschreibe anhand der Bilder, was mit den verschiedenen Blutbestandteilen bei der Dialyse passieren soll und wie das gewährleistet werden kann.

- Biomoleküle (z. B. Proteine, Blutkörperchen) → sind zu groß und passen nicht durch die Membran
- Schadstoffe (z. B. Harnstoff) → sollen aus dem Blut ins Dialysat diffundieren
- Elektrolyte (z. B. Kalium, Kalzium) → müssen im Blut bleiben

Der Prozess der Osmose läuft sehr langsam ab. Daher dauert eine Dialysebehandlung etwa 4-5 Stunden. Diese muss meist dreimal pro Woche durchgeführt werden.

Damit nur die Schadstoffe aber nicht die Elektrolyte herausgefiltert werden, muss das Dialysat dieselben Elektrolytenkonzentrationen aufweisen, wie das Blut des Patienten.

Wir betrachten eine Nervenzelle im Ruhezustand, also wenn gerade kein Nervensignal übertragen wird.

Außerhalb der Zelle befinden sich Na^+ und Cl^- Ionen, innerhalb der Zelle K^+ und große Anionen A^- (z.B. Proteine).

Im Ruhezustand sind nur die Kalium-Kanäle geöffnet, die Zellmembran ist also nur für K^+ -Ionen durchlässig.

Zeichne jeweils die auftretenden Kräfte ein und fülle die Lücken im Text aus.

Aufgrund der beteiligten elektrischen Ladungen stellt sich bei den Kalium-Ionen kein Konzentrationsgleichgewicht ein.

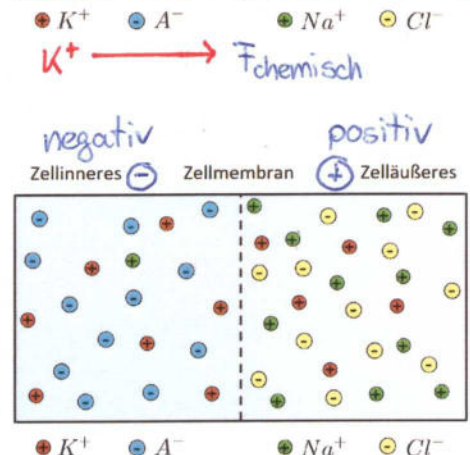
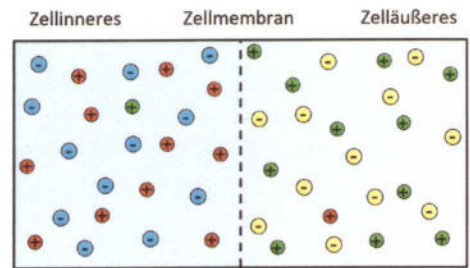
Membranpotential (= Ruhepotential)

Aufgrund der Konzentrationsgefälle wirkt auf alle Substanzen eine chemische Kraft. Da die Membran aber nur für K^+ -Ionen durchlässig ist, müssen wir ausschließlich die Kraft auf die Kaliumionen betrachten (nach rechts).

Es wandern K^+ -Ionen nach rechts. Das Zelläußere lädt sich positiv, das Zellinnere negativ auf. Dadurch entsteht auch eine elektrische Kraft, die der chemischen Kraft entgegenwirkt. Sind beide Kräfte gleich groß, entsteht ein Gleichgewichtszustand.

Ruhepotential: Nervenzellen sind im Ruhezustand elektrisch geladen (innen negativ, außen positiv). Die Potentialdifferenz beträgt ca. -70 mV .

5.2 Membranpotential



$\rightarrow F_{\text{chemisch}}$
 $\leftarrow F_{\text{el}}$
 (Abstoßung gleicher Ladungen)

Nun wollen wir die Kalium-Ionen-Verteilung simulieren. Da nun auch Ladungen im Spiel sind, die die Diffusion beeinflussen, wird die Situation viel komplizierter.

Stelle eine Iterationsformel auf, mit der N_{links} für alle Zeiten berechnet werden kann.

Berechne anschließend die fehlenden Werte der Tabelle und fülle diese aus.

Das Diagramm zeigt die Ionenverteilung in den ersten 50 Zeitschritten.

Beschreibe das Diagramm.

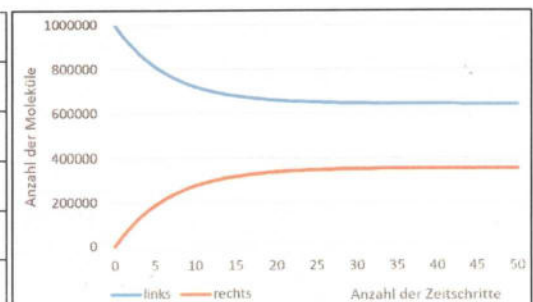
Simulation der Kaliumverteilung

Wir simulieren die Kalium-Ionen-Verteilung von oben. Dazu setzen wir als Startwert die Anzahl der Kalium-Ionen auf der linken Seite $N_{\text{links},0} = 1\,000\,000$ und rechts gleich $N_{\text{rechts},0} = 0$. Nun sollen wieder bei jedem Zeitschritt (Δt) 5 % der gelösten Moleküle die Seite wechseln. Beim Wechsel von links nach rechts verringert sich dieser Wert mit zunehmendem Ladungsunterschied um $0,000\,000\,04$ pro Kalium-Ion auf der rechten Seite, beim Wechsel von rechts nach links vergrößert sich die Wechselwahrscheinlichkeit um denselben Wert.

$$N_{\text{links},\text{neu}} = N_{\text{links},\text{alt}} - N_{\text{links},\text{alt}}(0,05 - N_{\text{rechts},\text{alt}} \cdot 0,000\,000\,04) + N_{\text{rechts},\text{alt}}(0,05 + N_{\text{rechts},\text{alt}} \cdot 0,000\,000\,04)$$

$$N_{\text{links},2} = 950\,000 - 350\,000(0,05 - 50\,000 \cdot 0,000\,000\,04) + 50\,000(0,05 + 50\,000 \cdot 0,000\,000\,04) = 907\,000$$

#	N_{links}	N_{rechts}
0	1 000 000	0
1	950 000	50 000
2	907 000	93 000
3	870 020	129 980
...



Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem links mehr K^+ -Ionen sind als rechts.

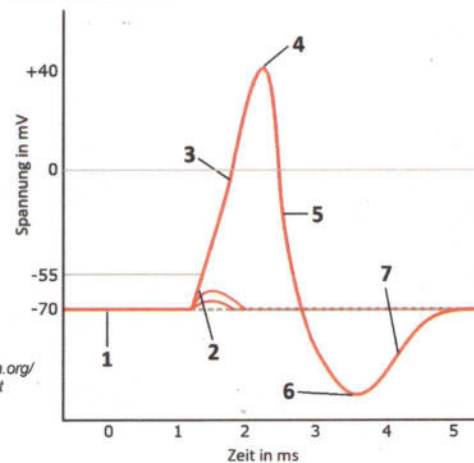
5.2 Membranpotential

Kommt von den Dendriten ein Signal an, dann wird der Axonhügel polarisiert und am Axon liegt eine zusätzliche Spannung an. Ist diese Spannung groß genug, dann wird ein Aktionspotential ausgelöst.

[Chris 73, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Action_potential.svg; mit

5.3 Aktionspotential

Aktionspotential



- ① Ruhepotential
- ② Reiz
- ③ Depolarisation
- ④ Overshoot
- ⑤ Repolarisation
- ⑥ Hyperpolarisation
- ⑦ Wiederherstellung des Ruhepotentials

1: Ruhepotential siehe 5.2

2: Reiz

Übersteigt die Spannung einen Schwellenwert (überschwelliger Reiz), dann werden alle Na^+ -Kanäle geöffnet. Bei einem unterschwelligen Reiz passiert nichts.

→ „Alles-oder-Nichts-Gesetz“

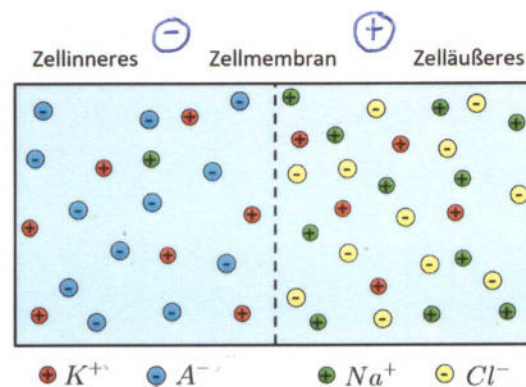
5.3 Aktionspotential

1

Durch einen überschwelligen Reiz haben sich die Natriumkanäle geöffnet.

Zeichne die auf die K^+ - und Na^+ -Ionen wirkenden Kräfte ein und beschreibe, was nun mit den Ionen passiert.

3: Depolarisation



K^+ : $\rightarrow F_{\text{chemisch}}$
 $\leftarrow F_{\text{el}}$
 heben sich auf

Na^+ : $\leftarrow F_{\text{chemisch}}$
 $\rightarrow F_{\text{el}}$

beide Kräfte nach innen!

Na^+ -Ionen strömen lawinenartig ins Zellinnere. Dabei findet eine Potentialumkehr statt, Zelle innen positiv und außen negativ geladen (+30mV)

4: Overshoot

Die Na^+ -Kanäle schließen sich.

5.3 Aktionspotential

2

Nachdem sich die Na^+ -Kanäle geschlossen haben, müssen wir uns nun wieder auf die Kalium-Ionen fokussieren.

Zeichne die auf die K^+ -Ionen wirkenden Kräfte ein und beschreibe, was nun mit den Ionen passiert.

Nun ist das Zellinnere wieder negativ und das Zelläußere positiv geladen. Trotzdem ist das Ruhepotential noch nicht wieder hergestellt.

Beschreibe den Unterschied zum Ruhepotential.

Die Wiederherstellung des Ruhepotentials kann nicht mehr von selbst ablaufen. Dies ist nur unter Einsatz von Energie möglich.

Bei einer absoluten Refraktärzeit von 2 ms sind bei einem starken Reiz 500 Aktionspotentiale pro Sekunde möglich. Bei einem schwachen Reiz (und einer gesamten Refraktärzeit von 5 ms) sind nur 200 Aktionspotentiale pro Sekunde möglich.

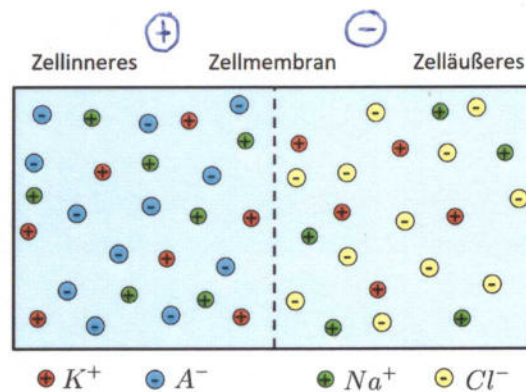
Es gibt eine riesengroße Menge an Nervengiften. Sie stören meist die Funktion von Ionenkanälen und können bis zum Tod führen.

Nervengifte kommen in der Natur bei giftigen Pflanzen und Tieren vor, in der Kriegsführung zählen sie zu den chemischen Kampfstoffen.

Sie werden aber auch in der Medizin eingesetzt.

Wir betrachten exemplarisch drei Stoffe, welche die Natriumkanäle hemmen, so dass diese sich nicht mehr öffnen können. Dadurch können keine Aktionspotentiale ausgelöst werden.

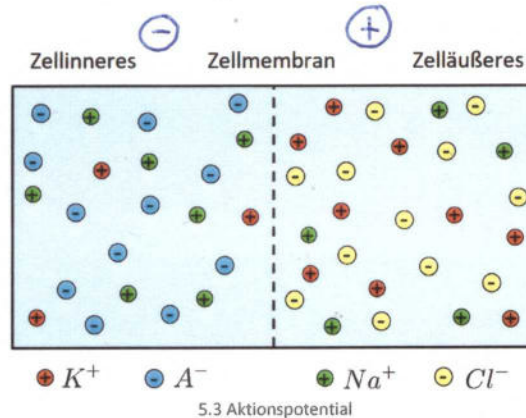
5: Repolarisation



K^+ : $\rightarrow F_{\text{chemisch}}$
 $\rightarrow F_{\text{el}}$
 beide Kräfte nach außen!

K^+ -Ionen strömen aus der Zelle hinaus.

6: Nachhyperpolarisation



im Gegensatz zum Ruhepotential sind nun die K^+ -Ionen außen und die Na^+ -Ionen innen.

5.3 Aktionspotential

3

7: Wiederherstellung des Ruhepotentials

Die Natrium-Kalium-Pumpe transportiert unter Energieeinsatz (ATP) Na^+ nach außen und K^+ nach innen, bis das Ruhepotential wieder hergestellt ist.

Refraktärzeit

- **absolute Refraktärzeit:** Zelle ist in dieser Zeit nicht erregbar (max. 2 ms)
- **relative Refraktärzeit:** weitere 3 ms; Phase 7 im Diagramm; Aktionspotential kann nur durch Reize ausgelöst werden, die wesentlich stärker sind. (Ansonsten wird der Schwellenwert nicht erreicht.)

Eigenschaften des Aktionspotentials

- Die Amplitude und die Dauer eines Aktionspotentials sind immer gleich („Alles-oder-Nichts-Gesetz“)
- Je höher die Reizstärke ist, desto höher ist die Frequenz der Aktionspotentiale.

Anwendung: Nervengifte

- Fugu-Vergiftung (Gift des Kugelfischs):
hemmt muskuläre Signalübertragung → Lähmungserscheinungen; innerhalb von 24h Tod durch Atemlähmung
- Medikament bei epileptischem Anfall:
hemmt vorübergehend muskuläre Signalübertragung → Krämpfe lösen sich
- Lokalanästhetikum (örtliche Betäubung):
vorübergehende Blockade der Na^+ -Kanäle in Nervenzellen → Schmerzweiterleitung blockiert

Bevor wir ein Aktionspotential physikalisch modellieren können, müssen wir zunächst das Auf- und Entladen eines Kondensators betrachten.

Beschreibe den Ladevorgang eines Kondensators.

Die Formeln für das Aufladen und Entladen eines Kondensators entnehmen wir aus der Formelsammlung.

Nun wird die Spannungsquelle entfernt und der Kondensator kann sich über den Widerstand R entladen.

Beschreibe den Entladevorgang eines Kondensators.

Nun soll ein physikalisches Modell mit einfachen Bauteilen entwickelt werden, mit dem man die Vorgänge an der Zellmembran beschreiben kann.

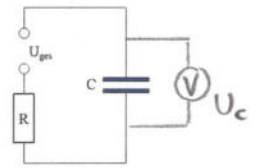
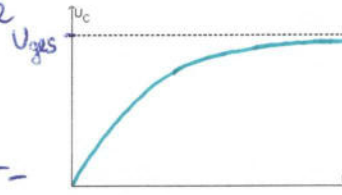
Ziel in der Schule ist es aber nicht, alle biologischen Details möglichst exakt im physikalischen Modell zu beschreiben. Vielmehr geht es darum, mit wenigen einfachen Bauteilen die wesentlichen Eigenschaften einer Nervenzelle zu simulieren.

Im Ruhepotential ist der Kondensator ungeladen, die Spannung U_c an der Zellmembran ist also 0. Dies steht scheinbar im Widerspruch zur Realität, da die Spannung -70 mV beträgt. Für die Simulation eines Aktionspotentials ist dies aber nicht relevant, da hier lediglich die Spannungsänderung von Bedeutung ist.

5.4 Physikalisches Modell eines Neurons

Aufladen eines Kondensators

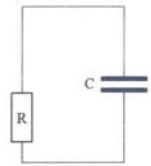
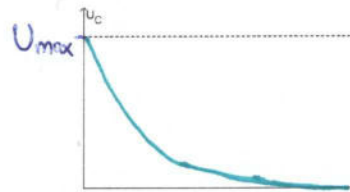
Anfangs gelangen viele Ladungen auf den Kondensator. Dann hindern die schon vorhandenen Ladungen den Zustrom weiterer Ladungen immer mehr.



$$U_c = U_{ges} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Entladen eines Kondensators

Die Ladungen auf dem Kondensator stoßen sich ab \Rightarrow anfangs stärkere Entladung als später



$$U_c = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

5.4 Physikalisches Modell eines Neurons

1

Biophysikalische Modellierung eines Axonabschnitts

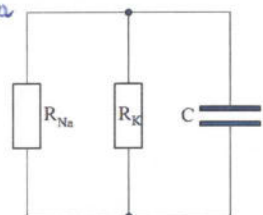
① Zellmembran \rightarrow trennt unterschiedlich geladene Bereiche voneinander

\rightarrow Plattenkondensator C $C \begin{array}{c} \text{außen} \\ \text{Zellmembran} \\ \text{innen} \end{array}$

② Ionenkanäle $\rightarrow K^+$ - und Na^+ -Kanäle können unterschiedlich durchlässig sein

\rightarrow veränderliche Widerstände R_K und R_{Na}

- Ruhepotential: $R_{Na} = \infty$; $R_K = \text{groß}$
- Depolarisation: $R_{Na} = \text{klein}$; $R_K = \text{groß}$
- Repolarisation: $R_{Na} = \infty$; $R_K = \text{klein}$



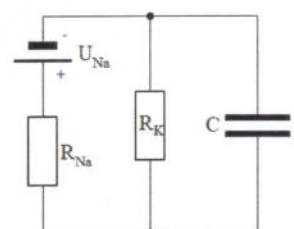
③ Natrium-Kalium-Pumpe \rightarrow tauscht positive Ladungen gegen positive Ladungen aus

\rightarrow kann vernachlässigt werden

④ äußerer Reiz \rightarrow Öffnung der Na^+ -Kanäle und Einstromen von Na^+ -Ionen

\rightarrow Batterie U_{Na}

Ist R_{Na} unendlich groß, kann trotz der Batterie kein Strom fließen.



5.4 Physikalisches Modell eines Neurons

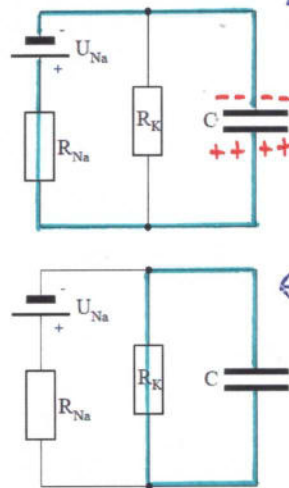
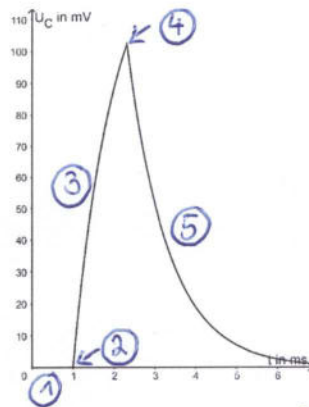
2

Mit dem obigen Modell erhält man die abgebildete Kurve für die Spannung U_c an der Zellmembran. Diese kommt von der Form her einem Aktionspotential nahe, lediglich die Hyperpolarisation kann damit nicht dargestellt werden.

Beschreibe nun die einzelnen Phasen des modellierten Aktionspotentials.

Hodgkin-Huxley-Modell:
Die britischen Physiologen und Biophysiker ALAN LLOYD HODGKIN (1914 – 1998) und ANDREW FIELDING HUXLEY (1917 – 2012) entwickelten ähnliches Modell, aber mit Einbeziehung der Natrium-Kalium-Pumpe sowie Leckströmen. Mit höherer Mathematik lässt sich damit ein Aktionspotential nahezu perfekt simulieren. Sie erhielten dafür 1963 den Nobelpreis für Medizin.

Aktionspotential im Modell



5.4 Physikalisches Modell eines Neurons

① Ruhepotential:

$R_{Na} = \infty$; $R_K = \text{groß}$
→ kein Stromfluss
→ Kondensator ungeladen; $U_c = 0$

② Reiz:

R_{Na} wird sehr klein

③ Depolarisation:

Kondensator wird schlagartig aufgeladen

④ Overshoot:

R_{Na} wird ∞
 R_K wird sehr klein

⑤ Repolarisation, Wiederherstellung des Ruhepotentials:

Kondensator wird über R_K entladen

a) Berechne die elektrische Feldstärke unter der Annahme, dass sich die Zellmembran als Plattenkondensator beschreiben lässt.

b) Bestimme die Spannung, die an einem Plattenkondensator mit Plattenabstand 5 cm angelegt werden muss, um dieselbe elektrische Feldstärke zu erreichen.

Übungsaufgabe: Elektrische Feldstärke an der Zellmembran •

Im Ruhepotential liegt an der Zellmembran eine Spannung von 70 mV an, die Zellmembran hat im Mittel eine Dicke von 7 nm.

$$a) E = \frac{U}{d} = \frac{70 \text{ mV}}{7 \text{ nm}} = \frac{0,07 \text{ m}}{7 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \underline{\underline{10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}}} \quad (10 \text{ Millionen})$$

$$b) U = E \cdot d = 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 0,05 \text{ m} = 500 000 \text{ V} = \underline{\underline{5 \cdot 10^5 \text{ V}}}$$

Übungsaufgabe: Entladen eines Kondensators ••

Ein Kondensator mit der Kapazität C wird über einen Widerstand R entladen.

$$a) \frac{1}{2} U_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{T_{1/2}}{RC}}$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{T_{1/2}}{RC}$$

$$-RC \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) = T_{1/2}$$

$$\underline{\underline{RC \cdot \ln(2) = T_{1/2}}}$$

$$b) 0,25 U_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{T_{1/2}}{RC}}$$

$$\ln(0,25) = -\frac{T_{1/2}}{RC}$$

$$C = -\frac{t}{R \cdot \ln(0,25)} = -\frac{0,068 \text{ s}}{700 000 \Omega \cdot \ln(0,25)} = \underline{\underline{7 \cdot 10^{-8} \text{ F}}}$$

a) Leite eine Formel für die Zeit $T_{1/2}$ her, nach der Kondensator zur Hälfte entladen ist.

Hinweis: $\ln(u^v) = v \cdot \ln(u)$

b) Ein Kondensator wird über einen Widerstand $R = 700 \text{ k}\Omega$ in der Zeit $t = 68 \text{ ms}$ zu 75 % entladen. Berechne die Kapazität C des Kondensators.

Zur Diagnose verschiedener Nervenerkrankungen ist eine Untersuchung der Nervenleitung erforderlich.

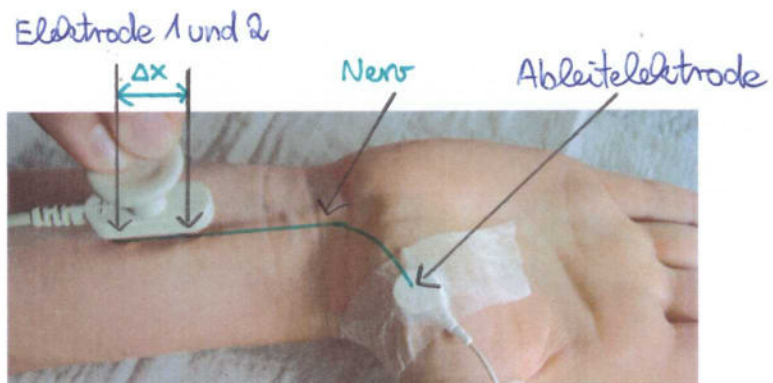
Wir werden hier zwei verschiedene Möglichkeiten kennenlernen, die Elektroneurographie (ENG) und die transkranielle Magnetstimulation (TMS).

Die Elektroneurographie eignet sich gut für Nervenbahnen nahe der Hautoberfläche.

5.5 Nervenleitgeschwindigkeit

Elektroneurographie (ENG)

Die Elektroneurographie ist eine Untersuchungsmethode, bei der die Nervenleitgeschwindigkeit gemessen wird. Dabei wird mittels einer Elektrode ein elektrischer Impuls auf einen Nerv übertragen, wodurch ein Aktionspotential ausgelöst wird. Dieses wird an einer anderen Stelle des Nerven registriert und die benötigte Zeit gemessen. Um Störeffekte (z.B. Zeit zwischen Erzeugung des elektrischen Impulses und Entstehung des Nervensignals) herauszurechnen, wird die Messung nacheinander von zwei Elektroden (Abstand Δx) durchgeführt und die Zeitdifferenz $\Delta t = t_1 - t_2$ berechnet.



[Private individual, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nerve_conduction_velocity.jpg]

5.5 Nervenleitgeschwindigkeit

Als Nervenleitgeschwindigkeit ergibt sich damit:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{t_1 - t_2}$$

Bei tieferliegendem Gewebe, insbesondere im Gehirn, ist die Elektroneurographie nicht anwendbar.

Hier kann aber mit Magnetfeldern gearbeitet werden, da diese menschliches Gewebe ohne Abschwächung durchdringen.

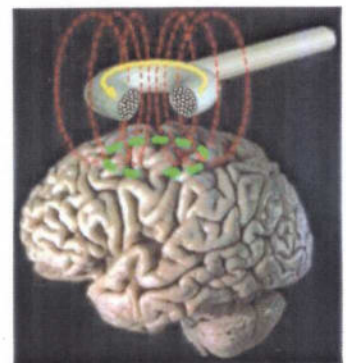
Neben der Diagnose wird die TMS auch als Therapie eingesetzt, beispielsweise bei Depressionen.

Transkranielle Magnetstimulation (TMS)

Bei der transkraniellen (=schädeldurchdringend) Magnetstimulation wird eine Magnetspule über den Kopf gehalten.

Für den Bruchteil einer Sekunde fließt ein Strom mit 15000 A (gelb), was ein Magnetfeld der Stärke 2,5 T (rot) erzeugt. (Dieses ist etwas 100 000 mal stärker als das Erdmagnetfeld.) Durch die schnelle Magnetfeldänderung wird ein Stromfluss (grün) parallel zur Spule erzeugt.

Dieser erregt Nervenzellen in diesem Bereich, deren Signale an anderen Stellen im Körper gemessen werden können, zum Beispiel als Muskelkontraktion.



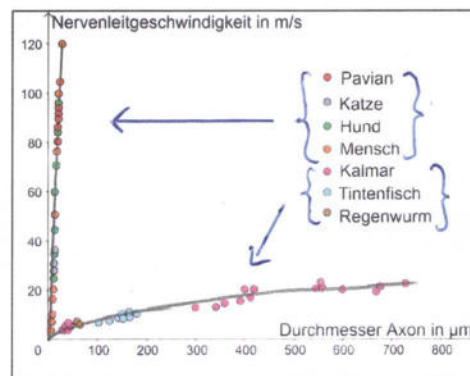
5.5 Nervenleitgeschwindigkeit

2

Bei verschiedenen Tierarten wurden die Nervenleitgeschwindigkeit sowie der Axondurchmesser an verschiedenen Nervenbahnen gemessen. Die Ergebnisse sind im Diagramm dargestellt.

Beschreibe die Auffälligkeiten des Diagramms. Welche Folgerungen kann man daraus ableiten?

Nervenleitgeschwindigkeiten im Tierreich



Wirbeltiere

Wirbellose Tiere



offenbar zwei Klassen von Axonen

Wirbeltiere bilden um das Axon eine Myelinscheide aus, wirbellose Tiere hingegen nicht.

Möglichkeiten zur Steigerung der Nervenleitgeschwindigkeit:

- Axondurchmesser vergrößern
- Myelinscheide ausbilden

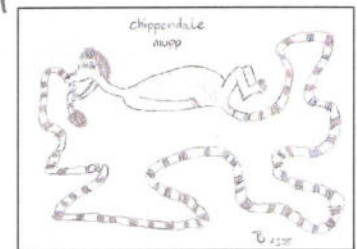
Übungsaufgabe: chippendale mupp • aus Diagramm

$$v = \frac{s}{t} \Rightarrow s = v \cdot t = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8 \text{h}$$

$$= 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8 \cdot 60 \cdot 60 \text{s} = 288\,000 \text{m}$$

$$= \underline{\underline{288 \text{ km}}}$$

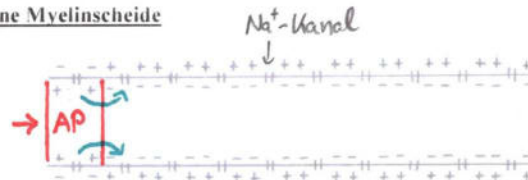
5.5 Nervenleitgeschwindigkeit



Der „chippendale mupp“ ist ein Fabelwesen mit einem langen Schwanz. Vor dem Schlafen beißt er sich ins Ende des Schwanzes, damit er 8 Stunden später vom Schmerz geweckt wird. Nimm an, dass der chippendale mupp nichtmyelinisierte Axone mit einem Durchmesser von 200 μm besitzt und berechne die Länge des Schwanzes.

Die Signalleitung ohne Myelinscheide wird als „kontinuierlich“ bzw. „aktiv“ bezeichnet. Aufgrund ihrer geringen Geschwindigkeit ist sie zur Übertragung über größere Strecken ungeeignet.

Signalleitung ohne Myelinscheide

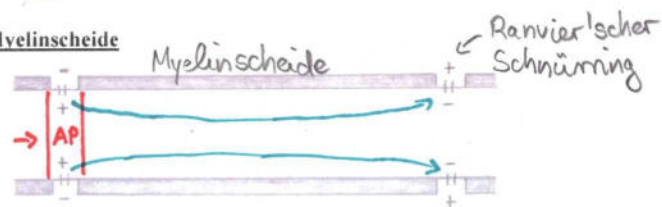


Aktionspotential (AP): Na⁺ - Ionen strömen in die Zelle. Das elektrische Potential wird mit zunehmender Entfernung schnell schwächer

⇒ Nur am nächsten Na⁺ - Kanal wird ein Aktionspotential ausgelöst.

⇒ Signalleitung langsam

Signalleitung mit Myelinscheide



Aktionspotential (AP): Na⁺ - Ionen strömen in die Zelle. Die Myelinscheide sorgt für eine gute elektrische Isolation ⇒ Das elektrische Potential nimmt mit zunehmender Entfernung nur langsam ab

⇒ Am Na⁺ - Kanal in großer Entfernung wird ein Aktionspotential ausgelöst.

⇒ Signalleitung schnell

Die Signalleitung mit Myelinscheide wird als „saltatorisch“ bezeichnet. Dabei findet an den Ranvier'schen Schnürringen eine aktive und an den myelinisierten Axonen eine passive Signalleitung statt.

Bei der Autoimmunerkrankung Multiple Sklerose werden die Myelinscheiden durch Zellen des eigenen Immunsystems zerstört
→ Signalleitung wird gestört
→ Verlust motorischer Koordination, Lähmungen, Sehstörungen, ...