

Die Elektronik der Nervenzelle

I Ruhezustand der Nervenzelle (1): Unsere Zellen sind mit einer wässrigen Lösung gefüllt, die geladene Teilchen (=Ionen) enthält. Einzelne Zellen sind durch **Membranen** (Lipid-Doppelschicht) voneinander abgegrenzt. Die Ionen können die Membran nicht durchqueren, außer durch Kanäle, die nur bestimmte Ionen zu bestimmten Zeiten durchlassen (vgl. Abb.1 **K⁺-Kanal** und **Na⁺-Kanal**). Die Membranen von Nervenzellen besitzen außerdem eine **Natrium-Kalium-Pumpe**, die unter Einsatz des Moleküls Adenosintriphosphat (ATP) immer jeweils zwei Kalium-Ionen (K⁺-Ionen) von außen in die Zelle transportiert und gleichzeitig drei Natrium-Ionen (Na⁺-Ionen) von innen nach außen befördert. Der Kalium-Kanal ist im Ruhezustand geöffnet, weswegen die Kalium-Ionen wieder aus der Zelle herauswandern können, der Natrium-Kanal ist allerdings verschlossen (vgl. roter Querbalken in der Abb.1).

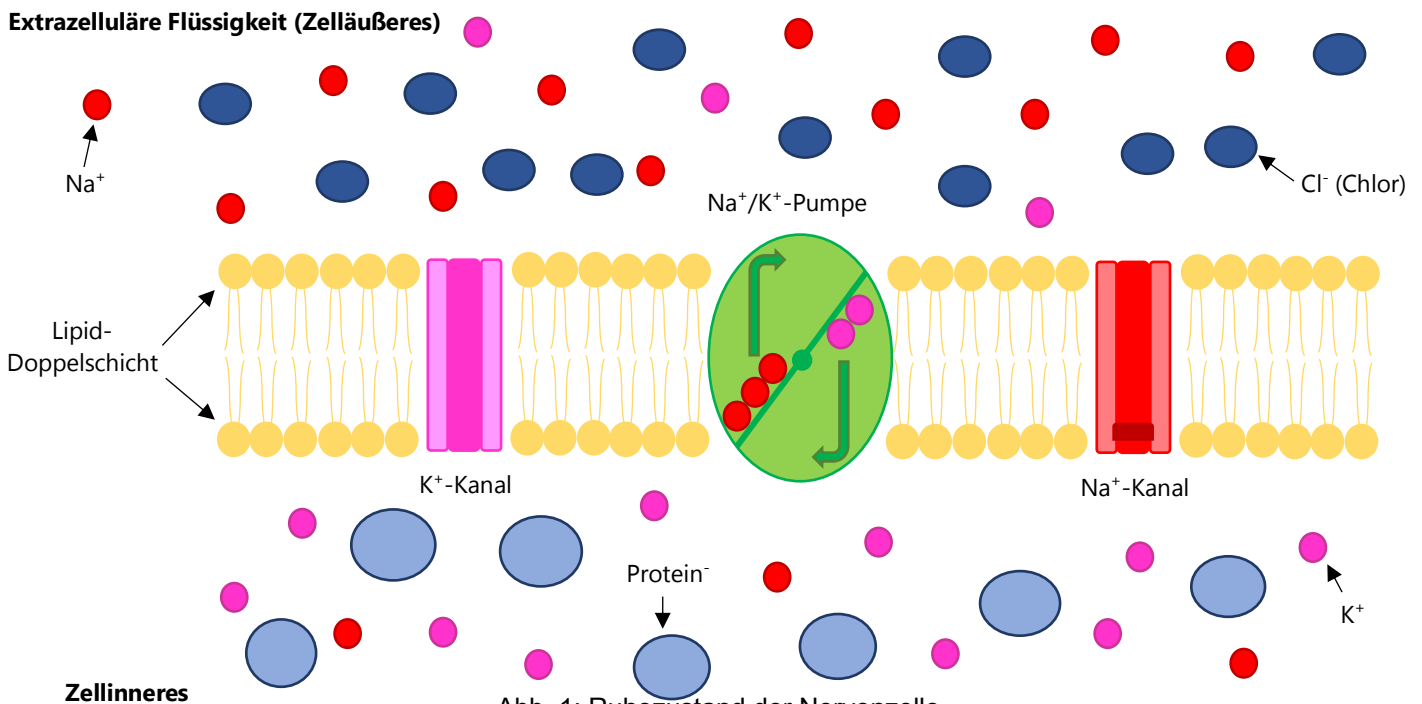
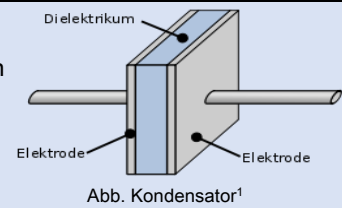


Abb. 1: Ruhezustand der Nervenzelle

- 1) Lies den Text zum „Ruhezustand der Zelle (1)“ und betrachte die Abb.1. Benenne die verschiedenen Ionen, die im Zellinneren und –äußeren auftreten und welche Ladung sie besitzen.
- 2) Beschreibe, welche Ionen wandern können und auf welche Weise!

III Experiment:

Der Kondensator: Ein Kondensator besteht aus zwei Platten (Elektroden), die durch eine isolierende Schicht (Dielektrikum) getrennt sind. Zwischen den beiden Platten gibt es zu Beginn keine Potentialdifferenz, weil die Platten ungeladen sind. Schließt man eine Gleichspannungsquelle an den Kondensator an, so erhält der Leiter, der mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist, einen Überschuss an negativen Ladungsträgern. Es entsteht somit eine Potentialdifferenz zwischen den beiden Leitern. Der Kondensator lädt sich auf.

Abb. Kondensator¹

Die Potentialdifferenz bleibt auch erhalten, wenn die Spannungsquelle wieder entfernt wird. Der Kondensator speichert daher elektrischer Ladung. Ein geladener Kondensator dient in einem geschlossenen Stromkreis als Spannungsquelle und entlädt sich, bis die Potentialdifferenz zwischen den beiden Leitern wieder Null beträgt.

Das Schaltsymbol des Kondensators sind zwei parallele Linien: $\text{--}\parallel\text{--}$

- 1) Lies den Infotext „Der Kondensator“ und ordne die folgenden Bestandteile der Nervenzelle elektronischen Bauteilen zu (Mehrfachzuordnungen sind durch Zahlen gekennzeichnet):

Zellmembran(2)

Natrium-Kalium-Pumpe

Kaliumkanäle

Spannungsquelle(2)

Kondensator

Widerstand

- 2) Stelle das Erreichen des Ruhzustands und den aktiven Zustand der Zelle jeweils mithilfe eines Schaltplanes dar! *Hinweis: Auch wenn die Spannung und der Widerstand der Nervenzelle durch verschiedene Komponenten realisiert werden, kann sich im Experiment auf eine Spannungsquelle bzw. einen Widerstand beschränkt werden.*

Führe nun das Experiment durch:

- 3) Baue die elektronische Schaltung, die das Erreichen des Ruhezustands darstellt, gemäß deines Schaltplanes auf. Du erhältst eine Kondensator (1000 μF) und einen Widerstand (Glühlampe 12 V/0,1 A). Lege 10 V Gleichspannung an. Beschreibe, was beim Erreichen des Ruhezustands passiert!
- 4) Verändere nach kurzer Zeit deinen Schaltkreis, sodass er der Zelle im aktiven Zustand entspricht. Beschreibe, was im aktiven Zustand passiert!

¹ Quelle: Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)) Online-Zugriff am 12.6.2020.

5) a) Erkläre, wie sich die Prozesse in der Nervenzelle verändern würden, wenn ein Kondensator (Zellmembran) mit einer großen bzw. kleinen Kapazität eingesetzt wird!

b) Erkläre, wie sich die Prozesse in der Nervenzelle verändern würden, wenn ein großer bzw. kleiner Widerstand (Zellmembran) eingesetzt wird!

Die Kapazität C: Die Kapazität C gibt an, wie viel Ladung ein Kondensator bei vorgegebener Spannung speichern kann. Die Einheit der Kapazität ist Farad (F). Die Kapazität C von Biomembranen kann mit der folgenden Formel berechnet werden: $C = \frac{\epsilon_{rel} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$. Dabei ist ϵ_{rel} die Dielektrizitätszahl von Biomembranen, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante mit rund $8,9 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$, A der Flächeninhalt und d der Abstand zwischen den beiden Platten.

6) Lies den Infotext „Die Kapazität“ und berechne die Kapazität der gegebenen Zellmembran! Die Membran einer Nervenzelle im Rückenmark besitzt eine Länge l von ca. 1 m. Die Membran selbst ist wie ein Hohlzylinder mit einem Radius r von 10^{-5} m aufgebaut. Die Dicke d (=Plattenabstand der Membran) beträgt $5 \cdot 10^{-9}$ m. Die Dielektrizitätszahl für Biomembranen ϵ_{rel} beträgt 3.

7) a) Wie groß ist der Betrag der elektrischen Feldstärke der Membran, wenn die Spannung $U=0,1$ V beträgt und sich das elektrische Feld mit der Formel $E = \frac{U}{d}$ berechnen lässt?

Hinweis: Die Elektrische Feldstärke beschreibt, wie stark das Feld ist, d.h., wie groß die Kraft auf einen Ladungsträger im elektrischen Feld ist.

b) Wie verhält sich dein Ergebnis zur elektrischen Feldstärke, die bei einem Gewitter für einen Blitz erforderlich ist ($3.000.000$ V/m)? Stufe die elektrische Feldstärke der Membran zwischen sehr klein und sehr groß ein!

8) Denkaufgabe: Pfeilgiftfrösche scheiden über ihre Hautdrüsen hochgiftige Batrachotoxine aus. Für den Menschen sind schon wenige Milligramm des Gifts tödlich, da es die Membranspannung abbaut, mit denen die Herz- und Atemmuskulatur gesteuert wird. Ziehe mithilfe deiner gewonnenen Informationen Schlüsse, wie der Wirkmechanismus des Gifts funktioniert!

Die Elektronik der Nervenzelle (Lösungsvorschlag)

I Ruhezustand der Nervenzelle (1): Unsere Zellen sind mit einer wässrigen Lösung gefüllt, die geladene Teilchen (=Ionen) enthält. Einzelne Zellen sind durch **Membranen** (Lipid-Doppelschicht) voneinander abgegrenzt. Die Ionen können die Membran nicht durchqueren, außer durch Kanäle, die nur bestimmte Ionen zu bestimmten Zeiten durchlassen (vgl. Abb.1 **K⁺-Kanal** und **Na⁺-Kanal**). Die Membranen von Nervenzellen besitzen außerdem eine **Natrium-Kalium-Pumpe**, die unter Einsatz des Moleküls Adenosintriphosphat (ATP) immer jeweils zwei Kalium-Ionen (K⁺-Ionen) von außen in die Zelle transportiert und gleichzeitig drei Natrium-Ionen (Na⁺-Ionen) von innen nach außen befördert. Der Kalium-Kanal ist im Ruhezustand geöffnet, weswegen die Kalium-Ionen wieder aus der Zelle herauswandern können, der Natrium-Kanal ist allerdings verschlossen (vgl. roter Querbalken in der Abb.1).

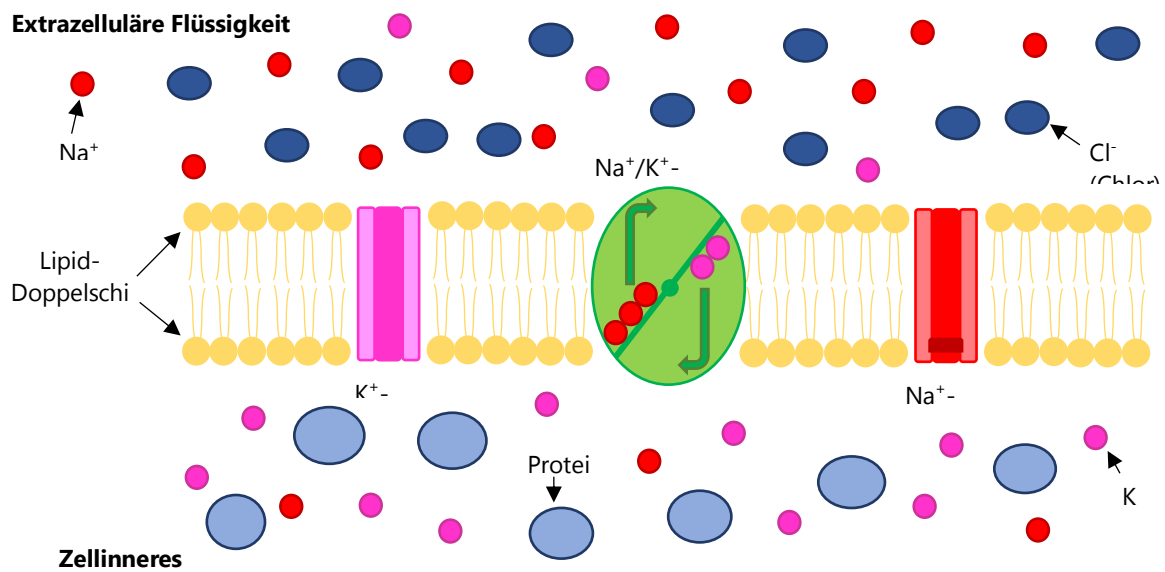


Abb. 1: Ruhezustand der Nervenzelle

- 1) Lies den Text zum „Ruhezustand der Zelle (1)“ und betrachte die Abb.1. Benenne die verschiedenen Ionen, die im Zellinneren und –äußeren auftreten und welche Ladung sie besitzen. **(W)**

Zellinneres: Proteine (negativ geladen); viele Kalium-Ionen (positiv geladen); wenige Natrium-Ionen (positiv geladen)

Zelläußeres: Chlor-Ionen (negativ geladen); viele Natrium-Ionen (positiv geladen); wenige Kalium-Ionen (positiv geladen)

- 2) Beschreibe, welche Ionen wandern können und auf welche Weise! **(W)**

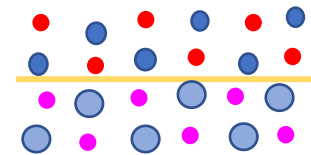
Die Kalium-Ionen können durch den Kalium Kanal wandern. Die Natrium-Kalium-Pumpe befördert jeweils zwei Kalium-Ionen von außen nach innen und drei Natrium-Ionen von innen nach außen.

I Ruhezustand der Nervenzelle (2):

Elektrische Potentialdifferenz: Gleichnamige Ladungen (z.B.: positiv und positiv) stoßen einander ab und ungleichnamige Ladungen (negativ und positiv) ziehen einander an. Da Ionen geladen sind, streben sie an, eine möglichst gleichmäßige Ladungsverteilung zwischen dem Zellinneren und dem Zelläußeren herzustellen. Wenn die Ladungsträger zwischen Innen- und Außenraum nicht gleichmäßig verteilt sind, dann gibt es eine Potentialdifferenz zwischen dem Zellinneren und dem Zelläußeren. Das ist gleichbedeutend mit einer elektrischen Spannung. Damit sich Ladungen bewegen, muss es eine Potentialdifferenz geben und diese ist umso größer, je mehr der die Ladungsverteilung von einer gleichmäßigen Verteilung der positiven und negativen Ladungen abweicht.

Chemische Potentialdifferenz: Unabhängig von ihrer Ladung streben die verschiedenen Ionen außerdem an, sich gleichmäßig zwischen Innen- und Außenraum zu verteilen.

- 3) Lies den Text zum „Ruhezustand der Zelle (2)“ und stelle grafisch eine Möglichkeit dar, wie eine minimale elektrische Potentialdifferenz der Ionen zwischen Innen- und Außenraum der Zelle aussehen könnte! (W)

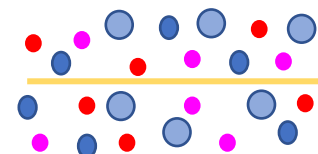


Eine mögliche Ladungsverteilung könnte folgendermaßen aussehen:

Die Proteine und Kalium-Ionen befinden sich alle im Zellinneren und sind hier gleichmäßig verteilt. Die Chlor- und Natrium-Ionen befinden sich im Zelläußeren und sind ebenfalls gleichmäßig verteilt. So sind im Innen- und Außenraum der Zelle jeweils gleich viele positive wie negative Ladungsträger und diese auch gleichmäßig über den Raum verteilt.

- 4) Stelle grafisch eine Möglichkeit dar, wie eine minimale chemische Potentialdifferenz der Ionen zwischen Innen- und Außenraum der Zelle aussehen könnte! (W)

Die verschiedenen Teilchen sind innen und außen gleichmäßig verteilt (gleich viele von jeder Sorte).



- 5) Argumentiere, was dafür und was dagegen spricht, dass die K^+ -Ionen den Kalium-Kanal nutzen, um zurück in den Außenraum der Zelle zu wandern! (S)

Wenn die Kalium-Ionen nach außen wandern, vergrößert sich die elektrische Potentialdifferenz, da das Zellinnere durch die Natrium-Kalium-Pumpe, die mehr positive geladene Ionen nach außen transportiert, ohnehin schon für einen Überschuss an negativ geladenen Teilchen sorgt. Das spricht also gegen das Wandern der Kalium-Ionen nach außen.

Wenn die Kalium-Ionen nach außen wandern, verkleinert sich die chemische Potentialdifferenz, da im Zellinneren viel mehr Kalium-Ionen als Natrium-Ionen sind und die Natrium-Kalium-Pumpe regelmäßig wieder Kalium-Ionen in die Zelle befördert. Das spricht also für das Wandern der Kalium-Ionen nach außen.

- 6) Wenn sich die chemische und elektrische Potentialdifferenz im Gleichgewicht befinden, entsteht zwischen Innen- und Außenraum der Zelle eine Potentialdifferenz von -70 mV. Was lässt sich hinsichtlich dieser Potentialdifferenz in Bezug auf die Ladungsverteilung sagen? **(W)**

Da mehr positive Ladungen durch die Natrium-Kalium Pumpe nach außen transportiert werden und die positiv geladenen Kalium-Ionen zusätzlich zurückwandern, bis sich die chemische und die elektrische Potentialdifferenz im Gleichgewicht befinden, befindet sich im Inneren der Zelle ein negativer Ladungsüberschuss. Daher kommt auch das negative Vorzeichen.

II Zelle empfängt Reiz:

- 1) Wenn die Nervenzelle ein Signal (z.B.: Sehzelle empfängt Lichtstrahl) erhält, das den Schwellenwert (-40 mV) überschreitet, öffnen sich die zuvor verschlossenen spannungsabhängigen Natrium-Kanäle. Wie werden sich die Na^+ -Ionen hinsichtlich der chemischen bzw. elektrischen Potentialdifferenz verhalten? **(W)**

Aufgrund der elektrischen Potentialdifferenz (negativer Ladungsüberschuss im Inneren) werden die positiv geladenen Natrium-Ionen, den Kanal nutzen, um von außen nach innen zu wandern. Da sich im Zellinneren viel mehr Kalium- als Natrium-Ionen befinden, werden sie auch aufgrund der chemischen Potentialdifferenz von außen nach innen wandern.

- 2) Stelle eine Vermutung an, wie sich der numerische Wert der Potentialdifferenz zwischen Innen- und Außenraum verändern wird, wenn die Zelle einen Reiz empfängt! **(E)**

Die Potentialdifferenz zwischen Innen- und Außenraum wird sich verringern \rightarrow ist im Ruhezustand größer als im gereizten Zustand.

III Experiment:

Der Kondensator: Ein Kondensator besteht aus zwei Platten (Elektroden), die durch eine isolierende Schicht (Dielektrikum) getrennt sind. Zwischen den beiden Platten gibt es zu Beginn keine Potentialdifferenz, weil die Platten ungeladen sind. Schließt man eine Gleichspannungsquelle an den Kondensator an, so erhält der Leiter, der mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist, einen Überschuss an negativen Ladungsträgern. Es entsteht somit eine Potentialdifferenz zwischen den beiden Leitern. Der Kondensator lädt sich auf.

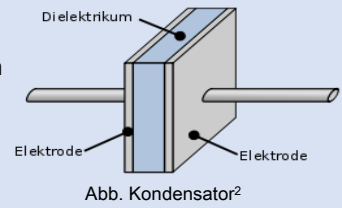



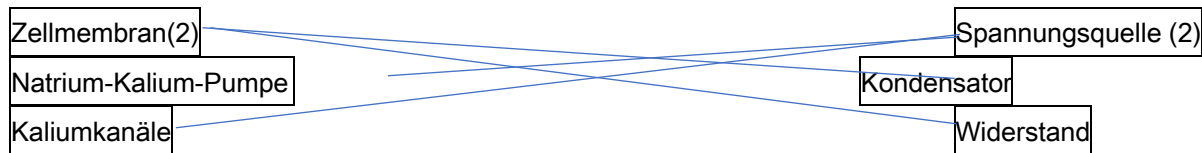
Abb. Kondensator²

Die Potentialdifferenz bleibt auch erhalten, wenn die Spannungsquelle wieder entfernt wird. Der Kondensator speichert daher elektrischer Ladung. Ein geladener Kondensator dient in einem geschlossenen Stromkreis als Spannungsquelle und entlädt sich, bis die Potentialdifferenz zwischen den beiden Leitern wieder Null beträgt.

Das Schaltsymbol des Kondensators sind zwei parallele Linien: 

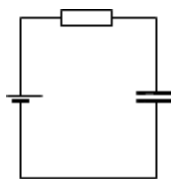
- 1) Lies den Infotext „Der Kondensator“ und ordne die folgenden Bestandteile der Nervenzelle elektronischen Bauteilen zu (Mehrfachzuordnungen sind durch Zahlen gekennzeichnet):

(W)

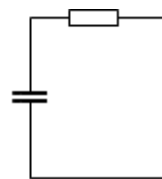


- 2) Stelle das Erreichen des Ruhezustands und den aktiven Zustand der Zelle jeweils mithilfe eines Schaltplanes dar! (W)

Hinweis: Auch wenn die Spannung und der Widerstand der Nervenzelle durch verschiedene Komponenten realisiert werden, kann sich im Experiment auf eine Spannungsquelle bzw. einen Widerstand beschränkt werden.



Erreichen des Ruhezustands



aktiver Zustand

² Quelle: Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)) Online-Zugriff am 12.6.2020.

Führe nun das Experiment durch:

- 3) Baue die elektronische Schaltung, die das Erreichen des Ruhezustands darstellt, gemäß deines Schaltplanes auf. Du erhältst eine Kondensator (1000 μF) und einen Widerstand (Glühlampe 12 V/0,1 A). Lege 10 V Gleichspannung an. Beschreibe, was beim Erreichen des Ruhezustands passiert! **(E)**

Im Ruhezustand wird der Kondensator von der Gleichspannungsquelle geladen. Das Lämpchen leuchtet nur kurz auf (=kurzer Stromstoß, der den Kondensator lädt).

- 4) Verändere nach kurzer Zeit deinen Schaltkreis, sodass er der Zelle im aktiven Zustand entspricht. Beschreibe, was im aktiven Zustand passiert! **(E)**

Das Lämpchen leuchtet wieder kurz auf (Der Kondensator wird durch einen Stromstoß entladen).

- 5) a) Erkläre, wie sich die Prozesse in der Nervenzelle verändern würden, wenn ein Kondensator (Zellmembran) mit einer großen bzw. kleinen Kapazität eingesetzt wird! **(E)**

Im Ruhezustand sorgt der Kondensator (=Zellmembran) dafür, dass die Potentialdifferenz von -70 mV zwischen Innen- und Außenraum der Zelle erhalten bleibt, die durch die Spannungsquellen aufgebaut wird (=Speicherfunktion). Im aktiven Zustand entlädt sich der Kondensator und die Potentialdifferenz zwischen Innen- und Außenraum verringert sich. So kann ein Signal erkannt und weitergeleitet werden. Eine große Kapazität sorgt dafür, dass mehr elektrische Energie gespeichert werden kann, welche dann im aktiven Zustand in Bewegungsenergie der Ionen umgewandelt werden kann.

- b) Erkläre, wie sich die Prozesse in der Nervenzelle verändern würden, wenn ein großer bzw. kleiner Widerstand (Zellmembran) eingesetzt wird!

Die verschiedenen Widerstände sorgen dafür, dass sich die Potentialdifferenz zwischen Innen- und Außenraum nicht sofort wieder ausgleicht. Ohne Widerstand würden sich die Ladungsträger fast augenblicklich (großer Stromfluss) ausgleichen. Ein eingehendes Signal könnte nicht erkannt und weitergeleitet werden. Je größer der Widerstand ist, desto weniger Elektronen können sich zwischen Innen- und Außenraum pro Zeiteinheit bewegen.

Die Kapazität C: Die Kapazität C gibt an, wie viel Ladung ein Kondensator bei vorgegebener Spannung speichern kann. Die Einheit der Kapazität ist Farad (F). Die Kapazität C von Biomembranen kann mit der folgenden Formel berechnet werden: $C = \frac{\epsilon_{rel} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$. Dabei ist ϵ_{rel} die Dielektrizitätszahl von Biomembranen, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante mit rund $8,9 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$, A der Flächeninhalt und d der Abstand zwischen den beiden Platten.

- 6) Lies den Infotext „Die Kapazität“ und berechne die Kapazität der gegebenen Zellmembran! Die Membran einer Nervenzelle im Rückenmark besitzt eine Länge l von ca. 1 m. Die Membran selbst ist wie ein Hohlzylinder mit einem Radius r von 10^{-5} m aufgebaut. Die Dicke d (=Plattenabstand der Membran) beträgt $5 \cdot 10^{-9}$ m. Die Dielektrizitätszahl für Biomembranen ϵ_{rel} beträgt 3. **(W)**

$$C = \frac{\epsilon_{rel} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} = \frac{\epsilon_{rel} \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l}{d} = 3,35 \cdot 10^{-7} F$$

- 7) a) Wie groß ist der Betrag der elektrischen Feldstärke der Membran, wenn die Spannung $U=0,1$ V beträgt und sich das elektrische Feld mit der Formel $E = \frac{U}{d}$ berechnen lässt?

Hinweis: Die Elektrische Feldstärke beschreibt, wie stark das Feld ist, d.h., wie groß die Kraft auf einen Ladungsträger im elektrischen Feld ist. (W)

$$E = \frac{U}{d} = \frac{0,1 V}{5 \cdot 10^{-9} m} = 20.000.000 \frac{V}{m}$$

- b) Wie verhält sich dein Ergebnis zur elektrischen Feldstärke, die bei einem Gewitter für einen Blitz erforderlich ist ($3.000.000$ V/m)? Stufe die elektrische Feldstärke der Membran zwischen sehr klein und sehr groß ein! **(S)**

Die Feldstärke der Zellmembran ist mehr als das 6-fache als bei einem Blitz und somit sehr groß.

- 8) Denkaufgabe: Pfeilgiftfrösche scheiden über ihre Hautdrüsen hochgiftige Batrachotoxine aus. Für den Menschen sind schon wenige Milligramm des Gifts tödlich, da es die Membranspannung abbaut, mit denen die Herz- und Atemmuskulatur gesteuert wird. Ziehe mithilfe deiner gewonnenen Informationen Schlüsse, wie der Wirkmechanismus des Gifts funktioniert! **(W, S)**

Im Verlauf der vorangehenden Aufgaben wurde erarbeitet, dass die Potentialdifferenz an der Zellmembran Voraussetzung dafür ist, dass ein Signal erkannt und weitergeleitet werden kann. Nur durch die Potentialdifferenz im Ruhezustand kann eine Veränderung der Differenz (durch ein Signal) erst erkannt werden. Das Gift des Frosches zerstört die Membranspannung und verhindert so, dass die Organe arbeiten können.

„Aus einer Maus einen Elefanten machen“



Teil I: Stoffwechselintensitäten verschiedener Tiere:

Infotext Stoffwechselintensität: Säugetiere haben das ganze Jahr über eine annähernd konstante Körpertemperatur von ca. 37 °C. Sowohl die Maus als das kleinste an Land lebende Säugetier als auch der Elefant als das größte an Land lebende Säugetier schaffen es also, diese Körpertemperatur aufrecht zu erhalten. Dafür wird Energie benötigt, die im Wesentlichen über die Nahrung aufgenommen wird. Die Stoffwechselintensität P eines Tieres gibt an, wie viel Energie pro Zeiteinheit in Form von Nahrung aufgenommen wird. Durch Vergleich verschiedener Tiere hat sich ergeben, dass die Stoffwechselintensität P proportional zu $m^{3/4}$ ist ($P \sim m^{3/4}$).

- 1) Die Maus ist mit einer Masse von $m_{\text{Maus}} = 21 \text{ g}$ das kleinste lebende Säugetier. Sie besitzt eine Stoffwechselintensität von $P_{\text{Maus}} = 0,17 \text{ W}$. Schätze die Stoffwechselintensität eines Elefanten P_{Elefant} mit $m_{\text{Elefant}} = 4 \text{ t}$ mithilfe des gegebenen Proportionalitätsverhältnisses ab!

- 2) Verwende die unten stehende Tabelle 1, um zu überprüfen, wie genau sich die Stoffwechselintensität des Menschen P_{Mensch} mit dem obigen Verhältnis $P \sim m^{3/4}$ abschätzen lässt! Benenne die Größenordnung der Abweichung!

Tier	Masse in $m[\text{kg}]$	Stoffwechsel- intensität in $[\text{W}]$
Maus	0,021	0,17
Frosch (bei 25°C)	0,035	0,018
Ratte	0,282	1,36
Meerschweinchen	0,410	1,70
Katze	3,00	7,38
Kaninchen	4,33	9,22
Hund	6,60	13,93
Schimpanse	38,00	52,82
Schaf	46,40	60,78
Mensch	70,00	80,00
Kuh	600,00	384,00

Tabelle 1: Stoffwechselintensitäten einiger Tiere³

³ Kleiber, M. (1967): Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Hamburg: Parey, S. 175.

Teil II: Grundumsätze verschiedener Tiere:

Infotext Grundumsatz: Der Grundumsatz ist diejenige Wärmemenge (in Kilojoule), die von einem Körper in völlig nüchternem Zustand bei absoluter Ruhe innerhalb von 24 Stunden benötigt wird. Für einen 70 kg schweren Menschen beträgt er ca. 7000 kJ.

- 3) Der Grundumsatz der Maus ist pro Gramm Körpergewicht 65-mal höher als der des Menschen und 200-mal höher als der des Elefanten. Berechne sowohl den Grundumsatz der Maus als auch den des Elefanten!

- 4) Elefanten ernähren sich hauptsächlich von Gräsern. 1 kg Gras enthält eine Energiemenge von 6 MJ. Berechne, wie viele kg Gras ein Elefant fressen müsste, um seinen Grundumsatz zu decken? (Wir nehmen an, dass der Elefant die Energiemenge, die das Gras bereitstellt, vollständig verwerten kann.)

- 5) Berechne, wie viele kg Nahrung der Elefant zu sich nehmen müsste, wenn sein Grundumsatz pro Gramm Körpergewicht so hoch wäre wie der der Maus?

- 6) Ziehe aus deinen bisherigen Ergebnissen Schlüsse, wie sich auf Basis der bisherigen Aufgaben die Stoffwechselintensität bzw. der Grundumsatz bei kleinen Tieren (wie der Maus) von denen bei großen Tieren (wie dem Elefanten) unterscheiden?

Teil III: Das Verhältnis zwischen Körperoberfläche und Volumen verschiedener Tiere:

- 7) Der Durchmesser des Körpers einer 21 g schweren Maus beträgt ca. 3,4 cm.⁴ Berechne näherungsweise die Körperoberfläche und das Volumen der Maus, wenn der Körper der Maus als rund angenommen wird!
- 8) Begründe nun: Wenn der Durchmesser eines Elefanten 3,4 m betragen würde, um das Wievielfache würde sich die Oberfläche bzw. das Volumen des Elefanten vergrößern?
- 9) „Aus statischen Gründen benötigen große Tiere ein wesentlich stabileres Skelett als kleine Tiere.“⁵ Bei der Maus macht das Skelett 5 % ihrer Masse aus beim Elefanten 30% seiner Masse. Erläutere, wie diese Informationen mit dem geringeren Grundumsatz bzw. der geringeren Stoffwechselintensität des Elefanten zusammenhängen könnten?

⁴<https://www.humane-endpoints.info/de/maus/physiologische-parameter> (Online-Zugriff am 22.6.2020).

⁵https://books.google.at/books?id=MoQkBgAAQBAJ&pg=PA67&lpg=PA67&dq=knochenbau+maus+elefant&source=bl&ots=ooEHq1BW4z&sig=ACfU3U1T1RIRk6PmCMPkkTAR7_6t0Mwkbw&hl=de&sa=X&ved=2ahUKEwi_7seq2_rhAhWQ_CoKHSowCpgQ6AEwEHoECAcQAQ#v=onepage&q=knochenbau%20maus%20elefant&f=false (Online-Zugriff am 22.6.2020).

„Aus einer Maus einen Elefanten machen“
(Lösungsvorschlag)



Infotext Stoffwechselintensität: Säugetiere haben das ganze Jahr über eine annähernd konstante Körpertemperatur von ca. 37 °C. Sowohl die Maus als das kleinste an Land lebende Säugetier als auch der Elefant als das größte an Land lebende Säugetier schaffen es also, diese Körpertemperatur aufrecht zu erhalten. Dafür wird Energie benötigt, die im Wesentlichen über die Nahrung aufgenommen wird. Die Stoffwechselintensität P eines Tieres gibt an, wie viel Energie pro Zeiteinheit in Form von Nahrung aufgenommen wird. Durch Vergleich verschiedener Tiere hat sich ergeben, dass die Stoffwechselintensität P proportional zu $m^{3/4}$ ist ($P \sim m^{3/4}$).

- 1) Die Maus ist mit einer Masse von $m_{\text{Maus}} = 21 \text{ g}$ das kleinste lebende Säugetier. Sie besitzt eine Stoffwechselintensität von $P_{\text{Maus}} = 0,17 \text{ W}$. Schätze die Stoffwechselintensität eines Elefanten P_{Elefant} mit $m_{\text{Elefant}} = 4 \text{ t}$ mithilfe des gegebenen Proportionalitätsverhältnisses ab! (W)

$$P_{\text{Maus}}/m_{\text{Maus}}^{3/4} = P_{\text{Elefant}}/m_{\text{Elefant}}^{3/4} \rightarrow P_{\text{Elefant}} = P_{\text{Maus}}/m_{\text{Maus}}^{3/4} * m_{\text{Elefant}}^{3/4} = \underline{1550 \text{ W}}$$

- 2) Verwende die unten stehende Tabelle 1, um zu überprüfen, wie genau sich die Stoffwechselintensität des Menschen P_{Mensch} mit dem obigen Verhältnis $P \sim m^{3/4}$ abschätzen lässt! Benenne die Größenordnung der Abweichung! (E)

Tier	Masse in m[kg]	Stoffwechselintensität in [w]
Maus	0,021	0,17
Frosch (bei 25°C)	0,035	0,018
Ratte	0,282	1,36
Meerschweinchen	0,410	1,70
Katze	3,00	7,38
Kaninchen	4,33	9,22
Hund	6,60	13,93
Schimpanse	38,00	52,82
Schaf	46,40	60,78
Mensch	70,00	80,00
Kuh	600,00	384,00

Tabelle 1: Stoffwechselintensitäten einiger Tiere⁶

$$P_{\text{Mensch}} = P_{\text{Maus}}/m_{\text{Maus}}^{3/4} * m_{\text{Mensch}}^{3/4} = \underline{75 \text{ W}}$$

Die Abweichung bei der Abschätzung durch das Proportionalitätsverhältnis liegt im Einerbereich (10⁰).

⁶ Kleiber, M. (1967): Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Hamburg: Parey, S. 175.

Infotext Grundumsatz: Der Grundumsatz ist diejenige Wärmemenge (in Kilojoule), die von einem Körper in völlig nüchternem Zustand bei absoluter Ruhe innerhalb von 24 Stunden benötigt wird. Für einen 70 kg schweren Menschen beträgt er ca. 7000 kJ.

- 3) Der Grundumsatz der Maus ist pro Gramm Körpergewicht 65-mal höher als der des Menschen und 200-mal höher als der des Elefanten. Berechne sowohl den Grundumsatz der Maus als auch den des Elefanten! **(W)**

7000 kJ/70000 g → Ein Mensch benötigt = 0,1 kJ Energie pro Gramm Körpergewicht

- Eine Maus benötigt pro Gramm Körpergewicht 6,5 kJ und somit bei einem Körpergewicht von ca. 20 g → $6,5 \text{ kJ} \cdot 20 = 130 \text{ kJ}$ → Grundumsatz Maus = 130 kJ
- Ein Elefant benötigt pro Gramm Körpergewicht $6,5 \text{ kJ} / 200 = 0,033 \text{ kJ}$. $m_{\text{Elefant}} = 4 \text{ t}$, daher 130000 kJ Grundumsatz

- 4) Elefanten ernähren sich hauptsächlich von Gräsern. 1 kg Gras enthält eine Energiemenge von 6 MJ. Berechne, wie viele kg Gras ein Elefant fressen müsste, um seinen Grundumsatz zu decken? (Wir nehmen an, dass der Elefant die Energiemenge, die das Gras bereitstellt, vollständig verwerten kann.) **(W)**

$130000 \text{ kJ} / 6000 \text{ kJ} = \underline{22 \text{ kg}}$

- 5) Berechne, wie viele kg Nahrung der Elefant zu sich nehmen müsste, wenn sein Grundumsatz pro Gramm Körpergewicht so hoch wäre wie der der Maus? **(W)**

$6,5 \text{ kJ} \cdot 4000000 \text{ g} = \underline{26\,000\,000 \text{ kJ}}$ Grundumsatz

$26\,000\,000 \text{ kJ} / 6000 \text{ kJ} = \underline{4333 \text{ kg}}$

- 6) Ziehe aus deinen bisherigen Ergebnissen Schlüsse, wie sich auf Basis der bisherigen Aufgaben die Stoffwechselintensität bzw. der Grundumsatz bei kleinen Tieren (wie der Maus) von denen bei großen Tieren (wie dem Elefanten unterscheiden)? **(S)**

Lösungsvorschlag: Die Stoffwechselintensität und der Grundumsatz sind bei kleinen Tieren vergleichsweise hoch. Sie müssen also im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht um ein Vielfaches mehr Nahrung zu sich nehmen als große Tiere, um lebensfähig zu sein.

- 7) Der Durchmesser des Körpers einer 21 g schweren Maus beträgt ca. $3,4 \text{ cm}^7$. Berechne näherungsweise die Körperoberfläche und das Volumen der Maus, wenn der Körper der Maus als rund angenommen wird! (W)

Lösung: $A = 4 \cdot r^2 \cdot \pi = 4 \cdot 1,7^2 \cdot \pi = \underline{36,3 \text{ cm}^2}$ $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 1,7^3 = \underline{20,6 \text{ cm}^3}$

- 8) Begründe nun: Wenn der Durchmesser eines Elefanten 3,4 m betragen würde, um das Wievielfache würde sich die Oberfläche bzw. das Volumen des Elefanten vergrößern? (W)

Lösung: A vergrößert sich mit r^2 , daher um das 10000-fache (10^4). V vergrößert sich mit r^3 , daher sogar um das 1000000-fache (10^6).

- 9) „Aus statischen Gründen benötigen große Tiere ein wesentlich stabileres Skelett als kleine Tiere.“⁸ Bei der Maus macht das Skelett 5 % ihrer Masse aus beim Elefanten 30% seiner Masse. Erläutere, wie diese Informationen mit dem geringeren Grundumsatz bzw. der geringeren Stoffwechselintensität des Elefanten zusammenhängen könnten? (S)

Lösungsvorschlag: Das Skelett ist im Vergleich zu anderen Teilen des Körpers (z.B.: Organe) nicht sehr stoffwechselaktiv. Somit ist der Anteil an stoffwechselaktiven Teilen des Körpers bei großen Tieren geringer als bei kleinen Tieren und dadurch auch der Grundumsatz bzw. die Stoffwechselaktivität.

⁷<https://www.humane-endpoints.info/de/maus/physiologische-parameter> (Online-Zugriff am 6.5.2019).

⁸https://books.google.at/books?id=MoQkBgAAQBAJ&pg=PA67&lpg=PA67&dq=knochenbau+maus+elefant&source=bl&ots=ooEHq1BW4z&sig=ACfU3U1T1RIRk6PmCMPkkTAR7_6t0Mwkbw&hl=de&sa=X&ved=2ahUKewi_7seq2_rhAhWQ_CoKHSowCpgQ6AEwEHoECAcQAQ#v=onepage&q=knochenbau%20maus%20elefant&f=false (Online-Zugriff am 6.5.2019)