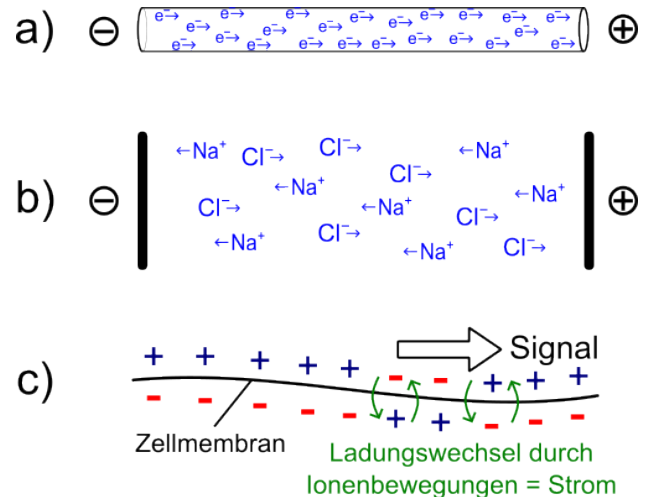


**1. Ladungstransport als Grundlage des elektrischen Stroms**

**Elektrischer Strom ist der gerichtete Transport von Ladungsträgern.** In Elektrokabeln und elektronischen Schaltkreisen werden als Ladungsträger Elektronen transportiert, durch metallische Werkstoffe hindurch (vgl. Abb. 1.1a). Schaltet man den Strom aus, liegt das Metall völlig unverändert vor.

Der Stromfluss in wässrigen Lösungen erfolgt hingegen stets durch frei bewegliche Ionen, denn freie Elektronen ( $e^-$ ) existieren in wässriger Lösung nicht. Zudem liegen nach dem Stromfluss durch eine Lösung die örtlichen Ionenkonzentrationen verändert vor (vgl. Abb. 1.1b).

An der Zellmembran fallen Stromflussrichtung und Signalrichtung auseinander: Während die Ionen hauptsächlich von der einen Seite auf die andere Seite der Membran wechseln, erfolgt die Signalweiterleitung entlang der Zellmembran. (vgl. Abb. 1.1c)



**Abb. 1.1:** Stromfluss im Metallkabel, in einer wässrigen Lösung und an einer Zellmembran. Quelle: e.W.

**2. Von der Spannungsmessung zum Ruhepotential**

Die Messung von elektrischen Spannungen an Neuronen ist technisch schwierig, denn sie sind meist mikroskopisch klein. Für die ersten Messerfolge und der Interpretation der Ergebnisse wurden ALAN HOLDING, Sir JOHN LECCES und ANDRE HALLEY 1963 mit dem *Nobelpreis für Physiologie und Medizin* ausgezeichnet. Sie waren bahnbrechend für das Verständnis der Erregungsweiterleitung in Nervenzellen. Die Messungen gelangen ihnen an **Riesenaxonen spezieller Tintenfisch-Neuronen**, denn sie sind bis zu tausend mal dicker als andere Axone. Aufgrund des technischen Fortschritts sind heute Messungen auch an Neuronen von Säugetieren möglich. Es zeigt sich hier, dass zwischen dem Zellinneren und dem Extrazellularraum an der Membran eine elektrische Spannung von  $U \approx 0,07 \text{ V} \approx 70 \text{ mV}$  vorliegt.

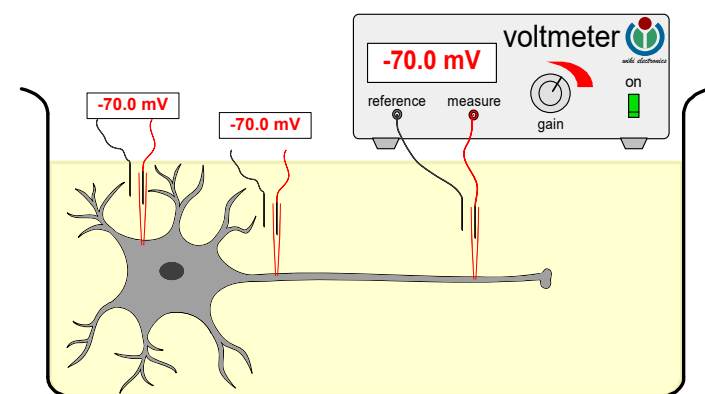
bereich beispielsweise  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  und im Innenbereich  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  vor, so beträgt die Temperaturdifferenz  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Würde man den äußeren Ort als Bezugspunkt nehmen und hier die Temperatur  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  zuordnen, so läge die Temperatur im Inneren bei  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ähnlich verhält es sich bei Spannungsmessungen. Ordnet man der Bezugs Elektrode im Zelläußeren das Potential  $0 \text{ mV}$  zu, so beträgt das Potential im Zellinneren, das Membranpotential, von Säugetier-Nervenzellen,  $E \approx -70 \text{ mV}$ . Dieser Wert wird **Ruhepotential** genannt, denn er gilt für ruhende Nervenzellen von Säugetieren, die nicht mit einer Weiterleitung eines Signals beschäftigt sind. Bei nicht-tierischen Zellen, beispielsweise bei Pflanzen oder Bakterien ist der Wert häufig negativer.

Das Membranpotential beruht darauf, dass die Konzentrationsverhältnisse der Ionen zwischen innen und außen, also zwischen dem Cytoplasma und der extrazellulären Flüssigkeit grundlegend verschieden. Das ist nur aufgrund der Trennung dieser beiden Räume (Kompartimente) durch die Zellmembran möglich. In ihrer Grundstruktur ist sie für Ionen eigentlich undurchlässig. Für das Membranpotential sind vor allem die Kaliumionen ( $K^+$ ), die Natriumionen ( $Na^+$ ), die Chloridionen ( $Cl^-$ ) und einige sonstige größere Anionen, bspw. negativ geladene Proteinmoleküle (zusammengefasst als  $A^-$ ) verantwortlich.

**Abb. 2.2:** Typische Konzentrationen an einem Säugetier-Neuron:

| Ionenart | Konzentration außen an der Membran in $\frac{\text{mmol}}{\text{L}}$ | Konzentration innen an der Membran $\frac{\text{mmol}}{\text{L}}$ |
|----------|--|---|
| $Na^+$   | 144  | 9   |
| $K^+$    | 4  | 140   |
| $Cl^-$   | 120  | 6   |
| $A^-$    | 5  | 155   |

Q: wikipedia.de, Stichwort: Ruhemembranpotential, (Mittelwertbildung)



**Abb.2.1:** Aufbau zur Messung der Spannung. Die Messelektrode durchsticht die Zellmembran des Neurons und misst das Potential auf der Cytoplasmaseite. Die Zelle befindet sich in einer physiologischen Kochsalzlösung. Nicht maßstabsgerecht! Q: e.W.

**Elektrischen Spannungen (U) sind Potentialdifferenzen ( $\Delta E$ ) zwischen zwei Potentialen (E).** Eine Analogie finden wir bei den Größen *Temperaturdifferenz* und *Temperatur*. Ein Temperaturdifferenz ( $\hat{=}$  Spannung) kommt zustande, wenn zwei Orten sich in ihrer Temperatur ( $\hat{=}$  Potential) unterscheiden. Liegt im Außen-

**2.1:** Begründen Sie mithilfe der Tabelle, dass ein Membranpotential von  $-70 \text{ mV}$  plausibel ist.

### 3. Wie kommt das Ruhepotential zustande? Ein Gedankenexperiment

Von den Ionen, die für die Ausbildung des Membranpotentials verantwortlich sind, ist die Membran nur für  $K^+$  durchlässig. Hierfür existieren in der Zellmembran ständig geöffnete Kalium-Ionenkanäle.

Neben diesen ständig geöffneten Kalium-Ionenkanälen gibt es auch weitere Ionenkanäle, die sich erst bei bestimmten Ereignissen öffnen. Diese sind jedoch im Ruhezustand größtenteils geschlossen, so dass die ruhende Membran für diese Ionenarten nahezu undurchlässig ist.

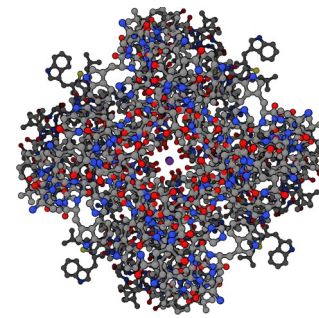
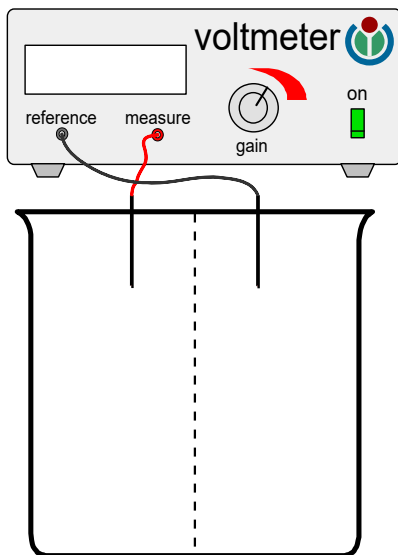


Abb. 3.1: Räumliches Molekülmodell eines  $K^+$ -Ionenkanal: In der Mitte passiert gerade ein  $K^+$ -Ion. Q: wikicommons. A: Bensaccount. Proteindatabase. CC.

3.1 Es gibt auch synthetisch hergestellte Membranen, die ausschließlich für  $K^+$ -Ionen selektiv durchlässig sind. Wir nehmen an, ein Gefäß ist durch eine solche selektiv für  $K^+$ -Ionen permeable Membran in zwei Hälften geteilt. Auf der linken Seite füllen wir in Gedanken eine Kaliumchlorid-Lösung ( $KCl_{aq}$  = frei bewegliche  $K^+$ - und  $Cl^-$ -Ionen) und platzieren die Messelektrode eines Spannungsmessgerätes. Die Gegenseite wird mit Wasser gefüllt und die Bezugslektrode angeschlossen. Entwickeln Sie Hypothese zur Teilchenverteilung und machen Sie eine begründete Aussage über die gemessene Spannung („Membranpotential“).



Unter den physiologischen Konzentrationen liegt das Potential der  $K^+$ -Ionen bei ca.  $E \approx -90$  mV. Auch die  $Cl^-$ -Ionen bilden ein analoges Potential mit  $E \approx -80$  mV aus, bei den  $Na^+$ -Ionen liegt es bei  $E = +70$  mV. Fasst man alle Einzelpotentiale zusammen, resultiert das Ruhepotential von  $E = -70$  mV.

Der Wechsel von  $Na^+$ -Ionen von außen nach innen kann aufgrund des Bestrebens zum Konzentrationsausgleich nicht ganz unterbunden werden, es gibt also einen bestimmten  $Na^+$ -Leckstrom. Jedes wechselnde Ion verringert das Membranpotential, da die jeweiligen Ladungsüberschüsse außen und innen verringert werden. Aufgrund dessen können auch weitere Kaliumionen nach außen strömen. Das Membranpotential würde deshalb innerhalb kürzester Zeit zusammenbrechen, wenn es nicht die **Natrium-Kalium-Pumpen** gäbe.

Diese Proteine sind in regelmäßigen Abständen in den Zellmembranen fest integriert. Unter Energieverbrauch, d.h. unter ATP-Spaltung, pumpen sie - entgegen der Konzentrationsgradienten - ständig  $Na^+$  auf die Außenseite und  $K^+$  auf die Innenseite. Bei der Spaltung von 1 ATP-Molekül werden 3  $Na^+$  nach außen und 2  $K^+$  nach innen befördert: Die Natrium-Kalium-Pumpe ist also

verantwortlich dafür, dass sich die Ungleichverteilung von  $Na^+$  und  $K^+$ -Ionen ausbildet und aufrechterhalten wird.

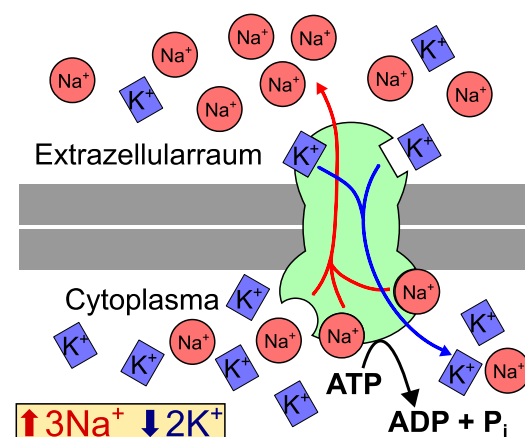


Abb. 3.2: Na-K-Pumpe: Zum Transport stülpt sich das Protein um und entlässt die Ionen jeweils auf der anderen Seite. Q: e.w.

3.2 Erklären Sie, weshalb Adenosinriphosphat (ATP) zu Adenosindiphosphat (ADP) und Phosphat gespalten werden muss.

Lernvideo zum Zustandekommen des Ruhepotenzials (ca. 6 min): <https://youtu.be/lq46lu3WouY>

