**Vom Modellversuch zurück zur Realität**

Wir haben uns mit Hilfe von Modellversuchen hergeleitet, wie zwischen zwei Räumen, die durch eine selektiv permeable Membran getrennt sind, eine Potenzialdifferenz und damit eine Spannung entstehen k. Bei der realen Nervenzelle sind die Verhältnisse etwas komplizierter, da mehrere Ionentypen beteiligt sind. Die Entstehung des Ruhepotenzials basiert jedoch auf den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie die Ergebnisse unserer Modellversuche.

An der Entstehung des Ruhepotenzials sind im Wesentlichen vier Faktoren beteiligt:

* Die Konzentrationsgradienten der beteiligten Ionen.
* Die elektrischen Gradienten, die aufgrund der Ungleichverteilung der Ionen über die Membran hinweg entstehen.
* Die Selektivität der Membran für die beteiligten Ionensorten.
* die Natrium-Kalium-Pumpe

Die folgenden 7 Aufgaben sollen in Schritten dazu beitragen, das Zusammenspiel der Einflussfaktoren auf die Entstehung des Ruhepotenzials zu verstehen.

**Ionenverteilung und Ionenpermeabilität an der Nervenzellmembran**

**Situation der Nervenzelle in Ruhe – Ruhepotenzial**

1. Die Verteilung der beteiligten Ionen auf beiden Seiten der Membran:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Ladungsträger** | **[Konzentration]**  **extrazelluläre Flüssigkeit** | **[Konzentration]**  **Cytoplasma (intrazellulär)** |
| **Na +** | 144 mM | 7 – 11 mM |
| **K +** | 4 mM | 120 mM |
| **Cl -** | 120 mM | 4 – 7 mM |
| **Protein -**  (organische Anionen, oA) | ca. 5 mM | 150 mM |

1. Die Membranpermeabilität für die Ionen:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Ladungsträger** | **Membranpermeabilität** | **Begründung** |
| **Na +** | 0,04 \* | wenige Na+-Kanäle sind geöffnet |
| **K +** | 1 \* | K+-Kanäle sind geöffnet |
| **Cl -** | 0,43 \* | Cl- -Kanäle sind geöffnet, aber weniger als K+ |
| **Protein -** | 0 \* | Moleküle sind zu groß |

\* relative Werte – nach U. Helmich, 2016; bezogen auf die K+-Permeabilität

**Arbeitsauftrag:**

1. Stellen Sie die Ionenverteilung an der Nervenzellmembran bei stabilem Ruhepotenzial der nicht gereizten Nervenzelle dar. Skizzieren Sie dazu in der Abbildung die Verteilung der einzelnen Ionen anhand der Angaben aus der Tabelle a). Stellen Sie die Konzentrationsverhältnisse der Ionensorten durch die Größe des Ionensymbols dar. D.h. eine hohe Konzentration wird durch ein entsprechend größeres Ionensymbol ausgedrückt

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| extrazellulär | undefined | intrazellulär |

Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ionic_equilibrium_potential2.svg> (verändert)

1. Erläutern Sie, welche Ladung sich auf der intra- und extrazellulären Seite daraus ergibt.
2. Erläutern Sie, welche Wanderungsrichtung und -menge sich für die einzelnen Ionen ergeben würden, wenn dafür ausschließlich die jeweilige Membranpermeabilität sowie der Konzentrationsgradient verantwortlich wären. Verwenden Sie zur Simulation die Tischvorlage mit den zweidimensionalen Modellen der Ionen.
3. Neben der Membranpermeabilität und dem Konzentrationsgradienten gibt es mit dem elektrischen Gradienten einen dritten Einflussfaktor, der für die stabile Einstellung des Ruhepotenzials mit verantwortlich ist.

Erklären Sie, wie der elektrische Gradient die einzelnen Ionensorten beeinflusst, so dass die ungleiche Ionenverteilung im stabilen Ruhepotenzial aufrechterhalten wird. Verwenden Sie für Ihre Überlegungen die Tischvorlage mit Ionenmodellen.

1. Zeichnen Sie in Ihre Skizze aus Aufgabe 1 für jede Ionensorte den Konzentrations- und den elektrischen Gradienten als Pfeil mit jeweils den Verhältnissen entsprechender Richtung ein.
2. In unserem Modellversuch haben wir Natriumchlorid als Beispiel-Ionenpaar zur Herstellung eines Membranpotenzials verwendet. An der natürlichen Nervenzellmembran spielen nur verschiedene Ionen eine Rolle. Für die Ausbildung des Ruhepotenzials ist jedoch auch an der Nervenzellmembran aufgrund der Membranpermeabilität sowie des Konzentrations- und des elektrischen Gradienten jeder Ionensorte vor allem eine Ionensorte verantwortlich.

Erklären sie, welche Ionensorte an der realen Nervenzellmembran für die Ausbildung des Ruhepotenzials hauptsächlich verantwortlich ist.

1. Betrachtet man die Skizze mit den eingetragenen Konzentrations- und elektrischen Gradienten, so fällt auf, dass bei den Na+-Ionen beide Gradienten in die gleiche Richtung, von extra- nach intrazellulär, gerichtet sind. D.h. auf die Na+-Ionen wirken zwei starke Kräfte nach intrazellulär treibend. Beurteilen Sie, welche Konsequenz langfristig gesehen für das Ruhepotenzial an der Nervenzellmembran haben müsste. Beziehen Sie in Ihre Überlegungen auch Tabelle b) mit ein.

*Lösungsvorschlag*

1. Ionenverteilung im stabilen Ruhepotenzial der nicht gereizten Nervenzelle

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| extrazellulär  1_extra | undefined | Intrazellulär  1_intra |

1. Erläutern Sie, welche Ladung auf der intra- und extrazellulären Seite sich daraus ergibt.

*Intrazellulär entsteht eine negative und extrazellulär eine positive Ladung, da intrazellulär ein Überschuss an negativ geladenen Ionen vorhanden ist.*

1. Erläutern Sie, welche Wanderungsrichtung und -menge sich für die einzelnen Ionen ergeben würden, wenn dafür ausschließlich die jeweilige Membranpermeabilität sowie der Konzentrationsgradient verantwortlich wären. Verwenden Sie zur Simulation die Tischvorlage mit den zweidimensionalen Modellen der Ionen.

*Cl- und K+ würden aufgrund der geöffneten Kanäle mit ihrem Konzentrationsgradienten wandern. K+ also von intra- nach extrazellulär, Cl- umgekehrt. Dabei wäre K+ schneller als Cl, da K+-Ionen kleiner sind und zudem die Permeabilität der Membran für K+ viel höher ist. Na+ würde durch die geringe Membranpermeabilität nur wenig dem Konzentrationsgradienten folgen können, oA- könnte aufgrund der Teilchengröße überhaupt nicht dem Gradienten folgen, da es die Membran nicht passieren kann.*

1. Neben der Membranpermeabilität und dem Konzentrationsgradienten gibt es mit dem elektrischen Gradienten einen dritten Einflussfaktor, der für die stabile Einstellung des Ruhepotenzials mit verantwortlich ist.

Erklären Sie, wie der elektrische Gradient die einzelnen Ionensorten beeinflusst, so dass die ungleiche Ionenverteilung im stabilen Ruhepotenzial aufrechterhalten wird. Verwenden Sie für Ihre Überlegungen die Tischvorlage mit Ionenmodellen.

*🡪 Cl- könnte zwar durch die geöffneten Kanäle entlang des Konzentrationsgradienten wandern, wird aber infolge der elektrostatischen Abstoßung durch die intrazellulären oA- im extrazellulären Raum weitgehend zurückgehalten. Cl- -Ionen wandern daher nur wenig.*

*🡪 Na+ vermag trotz des Konzentrationsgradienten infolge der kaum geöffneten Kanäle (Leckstrom) nur wenig zu wandern, es wird zudem elektrostatisch von den Cl- angezogen und gleichzeitig von den intrazellulären K+ abgestoßen, so verbleibt es hauptsächlich im extrazellulären Raum.*

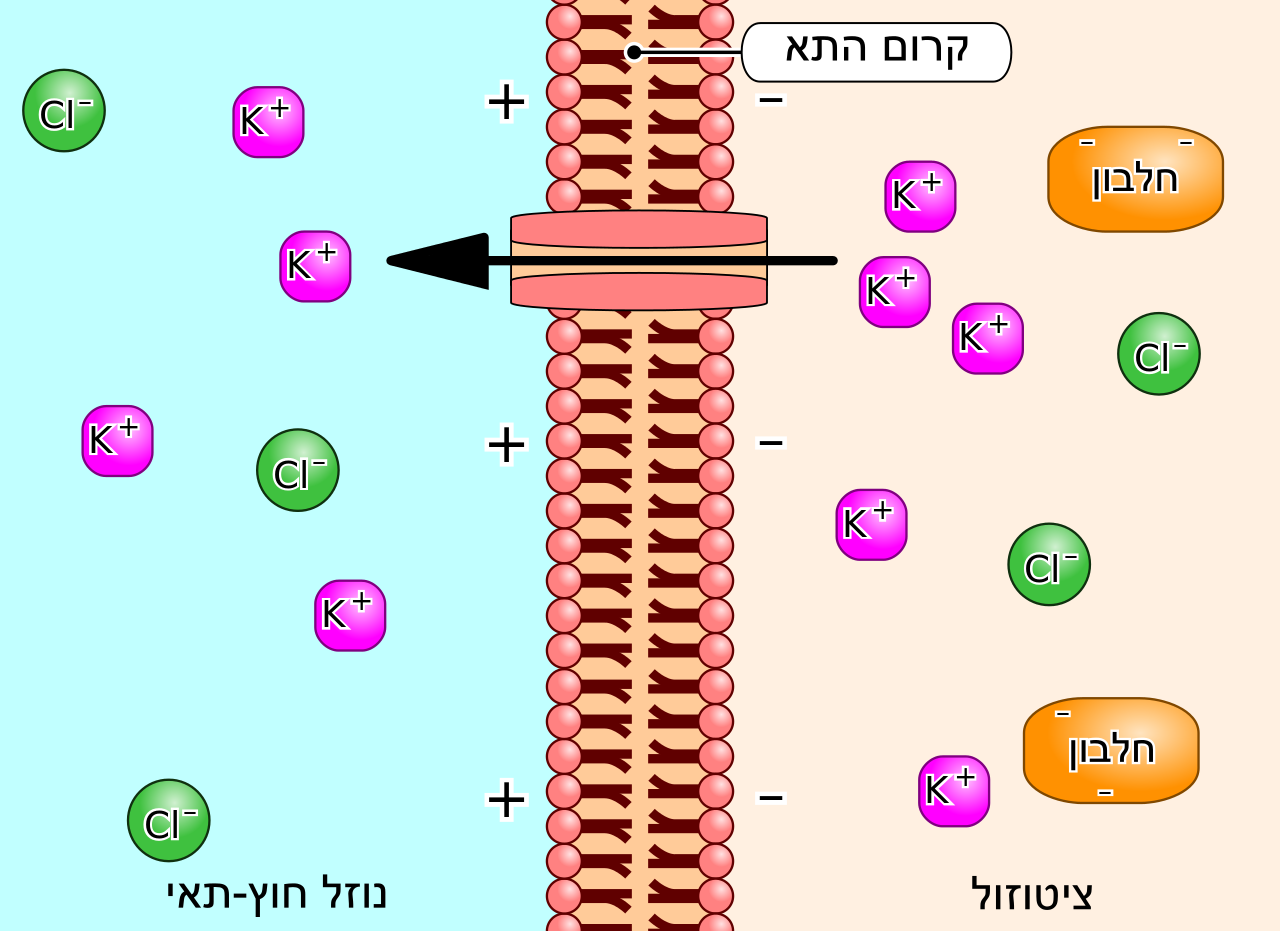
*🡪 K+ wandert zunächst über die geöffneten Kanäle entlang seines Konzentrationsgradienten in den extrazellulären Raum, wird aber dort von Na+ elektrostatisch abgestoßen und intrazellulär von den zurückbleibenden organischen Anionen angezogen, K+ verbleibt daher im Wesentlichen im intrazellulären Raum, ist aber aufgrund seines Konzentrationsgradienten und der Membranpermeabilität für K+ am beweglichsten.*

*🡪 auf die negativ geladenen organischen Anionen wirkt ein elektrischer Gradient von intra- nach extrazellulär, Sie wandern jedoch nicht, da die Membran für sie nicht permeabel ist.*

*Insgesamt entsteht für jedes Ion ein Wanderungsgleichgewicht zwischen den treibenden Kräften des Konzentrationsgradienten und des elektrischen Gradienten unter Berücksichtigung der Membranpermeabiliät.*

1. Zeichnen Sie in Ihre Skizze aus Aufgabe 1 für jede Ionensorte den Konzentrations- und den elektrischen Gradienten als Pfeil mit jeweils den Verhältnissen entsprechender Richtung ein.

extrazellulär intrazellulär



rote Pfeile: elektrischer Gradient

blaue Pfeile: Konzentrationsgradient

Hinweis: in der Darstellung wird ignoriert, dass die Pfeile nicht durch ein Kanalprotein gehen, da sie nicht die Wanderung der Ionen, sondern die Gradienten darstellen.

1. In unserem Modellversuch haben wir Natriumchlorid als Beispiel-Ionenpaar zur Herstellung eines Membranpotenzials verwendet. An der natürlichen Nervenzellmembran spielen nur verschiedene Ionen eine Rolle. Für die Ausbildung des Ruhepotenzials ist jedoch auch an der Nervenzellmembran aufgrund der Membranpermeabilität, sowie des Konzentrations- und des elektrischen Gradienten jeder Ionensorte vor allem eine Ionensorte verantwortlich.

Erklären sie, welche Ionensorte an der realen Nervenzellmembran für die Ausbildung des Ruhepotenzials hauptsächlich verantwortlich ist.

*An der realen Nervenzellmembran sind aufgrund der hohen Membranpermeabilität für K+ und des hohen Konzentrationsgradienten dieser Ionensorte vor allem die Kalium-Ionen für die Ausbildung des Membranpotenzials verantwortlich.*

*Das Ruhepotenzial der Nervenzellen ist also in erster Linie ein K+-Potenzial.*

*Zusatzinformation:*

*Im Modell wurde kein KCl verwendet, da die Kaliumionen in ihrer Größe den Chloridionen näherstehen und so eine geringere Potenzialdifferenz infolge der langsameren Wanderung entstehen würde.*

1. Da einige wenige Na+-Kanäle auch im Ruhezustand der Membran geöffnet sind, müsste aufgrund des elektrischen und des Konzentrationsgradienten für Na+ dieses langsam in die Nervenzelle eindringen. Da Na+ positiv geladen ist, müsste dies mit der Zeit zu einem Ladungsausgleich und damit zu einem Zusammenbruch des Membranpotenzials führen.

*Hinweis für die Lehrkraft: Die sich daraus ergebende Inkongruenzsituation kann für die Überleitung zum Thema Na+/K+-Pumpe verwendet werden.*