

1. Überblick

Auf der dendritischen Seite der Neuronen kann es bei entsprechenden Signalen durch die vorangegangene Nervenzelle oder durch eine Sinneszelle zur Öffnung von Ionenkanälen kommen. Positiv geladene Na⁺-Ionen strömen dort in die Zelle und erhöhen das Membranpotential, das im Ruhezustand bei vielen Nervenzelltypen ungefähr -70 mV beträgt, lokal auf weniger negative Werte, beispielsweise auf -55 mV. Es kommt also zur **Depolarisation**. Je nach Reizintensität kann diese unterschiedlich stark ausfallen. Auf der Membrannenseite diffundieren die eingeströmten Na⁺-Ionen vom Ort des Konzentrationsüberschusses in alle Richtungen, dem Konzentrationsgradienten folgend. Auch auf der Außenseite diffundieren Ionen und gleichen den Konzentrationsunterschuss der durch den Einstrom entstanden ist aus. Die Depolarisation breitet sich also passiv durch Diffusion von Ionen entlang der Membran aus und kann so den **Axonhügel** erreichen.

Erst am Axonhügel entscheidet sich, ob das Signal in Form eines **Aktionspotentials** an die nächste Zelle weiter

geleitet wird. Ist dies der Fall, kommt es zu einer **lawinenartigen Veränderung des Potentials**. Sie bewegt sich durch das ganze Axon bis zu den Synapsen fort. Beim Aktionspotential kommt es sogar kurzfristig zur Umpolarisation: Das Potential auf der Cytoplasmaseite wird kurzfristig sogar positiv, das Potential außerhalb negativ (vgl. Abb. 1.1). Anschließend kommt es durch eine Repolarisation zur Herstellung der ursprünglichen Verhältnisse.

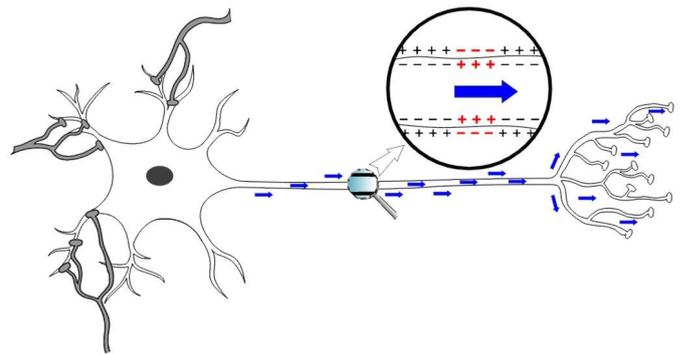


Abb. 1.1: Ausbreitung des Aktionspotentials. Markieren Sie die dendritische Seite und den Axonhügel! Q: e.w.

1.1 Bei der Entstehung eines Aktionspotentials gilt das **Alles-oder-Nichts-Gesetz**, das in folgender Abbildung dargestellt ist. Analysieren und interpretieren Sie die Abbildung und gehen Sie dabei auf diese Bezeichnung ein.

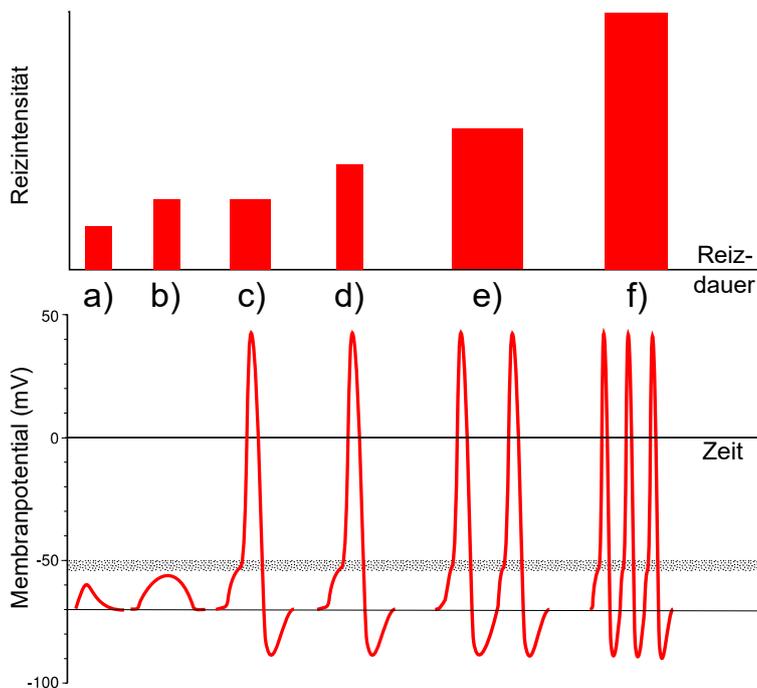


Abb. 1.1: Entstehung von Aktionspotentialen. Q: e.w.

2. Bildung des Aktionspotentials

Voraussetzung für die Ausbildung eines Aktionspotentials ist die spezifische Ausstattung der Axonmembran mit verschiedenen **spannungsgesteuerten Ionenkanälen**. Sie öffnen sich, wenn das Potential einen bestimmten **Schwellenwert** überschreitet, d.h. beispielsweise das Potential von -70 mV auf -55 mV angehoben wird. Das Öffnen beruht darauf, dass sich die Form der Proteinmoleküle, die den Kanal aufbauen, von der Potentialdifferenz (Spannung) abhängt. Ändert sich Potentialdifferenz durch Depolarisation, so kommt es zu einer vorübergehenden Formänderung der Moleküle zur vorübergehenden Öffnung der Kanäle. Nach wenigen Millisekunden kommt es zu einem selbsttätigen Verschluss.

Spannungsgesteuerte Na^+ -Ionenkanäle finden sich am gesamten Axon. Eine Depolarisation, die sich bis zum Axonhügel ausgebreitet hat, kann dort, wenn sie einen Schwellenwert von ca. -55 mV übersteigt, zur kurzzeitigen Öffnung einiger dieser Kanäle führen. Na^+ -Ionen strömen aufgrund des chemischen Potentials ($\hat{=}$ Konzentrationsgefälle) und elektrischen Potentials ($\hat{=}$ Ladungsunterschied) in das Zellinnere und depolarisieren die Membran an dieser Stelle. Dadurch werden weitere dieser spannungsempfindlichen Na^+ -Ionenkanäle geöffnet und noch mehr Ionen können einströmen. Die *positive Rückkopplung* führt zu einem sich selbst verstärkenden Na^+ -Einstrom. Es kommt dabei kurzzeitig sogar zum **Overshoot**. Damit ist die kurzzeitige Ladungsumkehr gemeint, denn das Membranpotential ist in diesem Zeitraum durch die eingeströmten Na^+ -Ionen innen gegenüber dem Außenpotential sogar positiv. Noch bevor das Potentialmaximum im Overshoot erreicht ist, schließen sich die erste spannungsabhängigen Na^+ -Kanäle nach ca. 2 Millisekunden wieder von selbst und sind dann vorübergehend blockiert (inaktiviert).

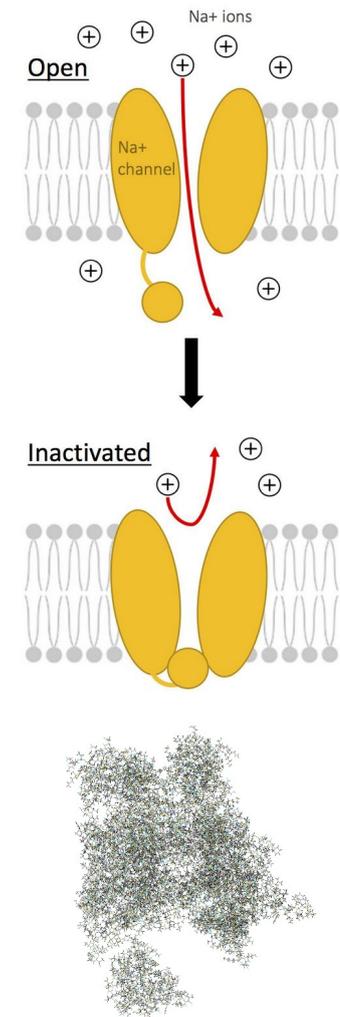


Abb. 2.1: Spannungsabhängiger Na^+ -Kanal. Q: wikicommons, A: oben: Tryptofish, unten: Lesuperfétatoire, verändert.

[Link zum animierten GIF des \$\text{Na}^+\$ -Kanals.](#)

Bei einem ähnlichen Schwellenwert wie die *spannungsabhängigen Na^+ -Kanäle* (-55 mV) kommt es auch zur Öffnung *spannungsabhängiger K^+ -Ionenkanäle*. Die entsprechende Veränderung der Molekülform erfolgt hier jedoch mit größerer Trägheit. Anfänglich überwiegt deshalb Na^+ -Einstrom. Erst bei Überschreitung des Potentialmaximums sind so viele K^+ -Ionenkanäle geöffnet, dass der K^+ -Ionen-Ausstrom zu einer **Repolarisation** führt. Auch das spontane Schließen der *spannungsabhängigen K^+ -Ionenkanäle* erfolgt mit großer Trägheit. So kommt es durch den Ausstrom von K^+ -Ionen kurzfristig sogar zu einer **Hyperpolarisation**. Das Potential wird negativer als das eigentliche Ruhepotential. Durch die Arbeit der **Natrium-Kalium-Pumpe** gleicht sich das Membranpotential wieder dem Ruhepotential an.

Die *spannungsabhängige Natriumkanäle* sind nach dem Verschluss **vorübergehend inaktiv**. Verantwortlich hierfür ein ballförmiger Molekülteil, der den Kanal in dieser Zeit

blockiert (vgl. *Abb. 2.1!*). Die Inaktivierung wird erst aufgehoben, wenn das Membranpotential wieder ausreichende negativ ist, z.B. -70 mV . Dann falten sich die Kanalproteine so um, dass der Ball wieder in die ursprüngliche Lage zurück klappt. Der Na^+ -Kanal ist jetzt zwar weiterhin geschlossen aber wieder aktivierbar.

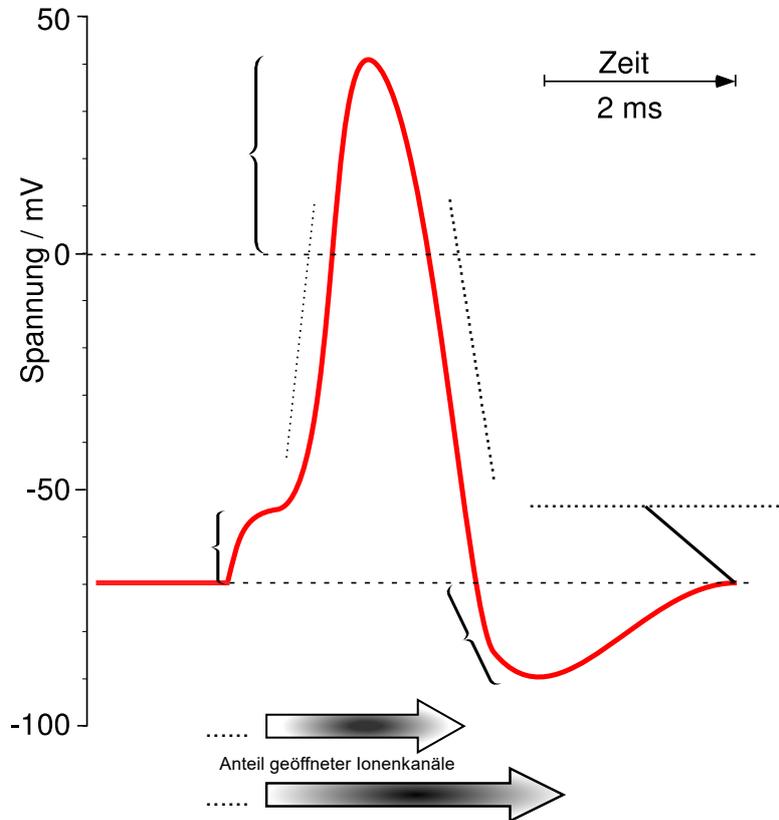
Die *vorübergehende Inaktivierung* führt dazu, dass an dieser Stelle gar kein neues Aktionspotential entstehen kann, selbst wenn das Schwellenpotential (noch) überschritten ist. Diese Zeitdauer wird **absolute Refraktärzeit** genannt. Darüber hinaus kann während der Phase der Hyperpolarisation nur durch einen außergewöhnlich starken Reiz der Schwellenwert erreicht werden. Diese Zeitdauer wird **relative Refraktärzeit** genannt. Sie limitiert die maximale Anzahl auf ungefähr 500 Aktionspotentiale pro Sekunde.

Durch ein einzelnes Aktionspotential werden die Ionenkonzentrationen außen und innen nur sehr geringfügig

verändert. Der großen Vorrat an Na^+ -Ionen außen und K^+ -Ionen innen erlaubt es einer Nervenzelle sehr viele Aktionspotentiale in kurzer Zeit zu bilden.

Aktionspotentiale sind nicht auf Nervenzellen beschränkt. Auch andere Zellen sind elektrisch aktivierbar und zeigen solche lawinenartig ablaufende Potentialänderungen. Dazu gehören Pflanzenzellen, einzellige Tiere und auch Pilzzellen.

2.1 Beschriften Sie das Aktionspotential an allen geschweiften Klammern und gepunkteten Linien. Beschriften Sie an den Pfeilen unten, welche Ionenkanäle jeweils dargestellt sind. Q: basierend auf Abb. aus wikicommons. A: Diberrri_et_al (verändert)



simpleclub-Lernvideo „Aktionspotential“ zur Festigung des Wissens (9 min): <https://youtu.be/T-YQRCWnoJs>: Einzelne Aspekte sind etwas detaillierter dargestellt. lokal vorhanden.

