



Physiologie im Schulunterricht Physik

GABRIEL ANDRÉ GREGOR

GABRIEL.ANDRE.GREGOR@GMAIL.COM

Zusammenfassung

Verschiedenste Gründe mögen Physiklehrer und -lehrerinnen davor zurückschrecken lassen biologische Themen in ihren Unterricht aufzunehmen: Furcht vor unbekanntem Terrain, Abneigung gegen zu starke Vereinfachungen komplexer Systeme oder die Ansicht, Physik müsse erst an tradierten Modellsystemen durchdringend verstanden werden, bevor man sie auf Lebensprozesse anwenden kann. In dieser Arbeit soll aufgezeigt werden, dass der Physikunterricht tatsächlich die einzige Gelegenheit bietet, etliche der faszinierendsten Phänomene der Biologie überhaupt im schulischen Rahmen zu behandeln.

1 Biologie im Physikunterricht?

Das Schulfach Physik streift die Physiologie, ein Teilgebiet der Biowissenschaften, mit dem es den Wortstamm φύσις (griech. für „Natur“) teilt, typischerweise bei Behandlung der Galvanischen Zelle in der Unterstufe (vgl. Lackner & Wukowich 2016, S. 100). Mögliche weitere Berührungspunkte in der Oberstufe sind das EKG und die elektrische Reizleitung, Wärmehaushalt und Energieumsatz im menschlichen Körper sowie Fluidodynamik des Blutkreislaufes und bildgebende Verfahren in der medizinischen Diagnostik (siehe dazu Jaros 2007). Anders als die „übliche“ Ausrichtung des Physikunterrichts auf technische Anwendungen, die vor allem bei männlichen Lernenden auf hohes Interesse stoßen, bietet die Physik innerhalb der Physiologie eine hervorragende Möglichkeit, um Schülerinnen anzusprechen, deren naturwissenschaftliche Interessen am Ende der Sekundarstufe I tendenziell stärker im Bereich Körperfunktionen und Medizin beheimatet sind (Holstermann und Bögeholz 2007, S. 75). Zudem gewinnt man mit der Einbeziehung von Physiologie in den Physikunterricht ein enorm weites Gebiet an tagesaktuellen Bezügen, so auch den Nobelpreis für Physiologie und Medizin, der in seiner Geschichte häufig für physikalisch hochinteressante Errungenschaften vergeben wurde: Wärmeerzeugung in Muskeln (1922), EKG (1924), Mutationen durch Röntgenstrahlen (1946), physikalischer Mechanismus der Erregungen in der Schnecke des Ohres (1961), Erregung und Hemmung durch Ionen an der Nervenzellmembran (1963), Computertomographie (1979), Informationsbearbeitung im Seh wahrnehmungssystem (1981) und Abbildung mit Magnetresonanz (2003) (vgl. deacademic.com (04.02.2019)).

Nicht zuletzt war einer der bahnbrechendsten naturwissenschaftlichen Erfolge des letzten Jahrhunderts, die Strukturaufklärung der DNA, ein gemeinsamer Erfolg aller Naturwissenschaften, wobei der physikalische Beitrag in der zu diesem Zeitpunkt noch relativ jungen Technik der Röntgenbeugung bestand. Viele Physiker widmeten daraufhin der aufkommenden Molekularbiologie ihr Lebenswerk (Donald 2012 [online - Beitrag ohne Seitenangabe]). Und das obwohl biologische Systeme in ihrer Komplexität dem „Geschmack“ vieler Physiker so sehr widersprechen, da sie im Allgemeinen nur schwer modellierbar sind und in den seltensten Fällen auch nur in guter Näherung erschöpfend physikalisch verstanden, geschweige denn beschrieben werden können. Biophysik besaß daher lange den Nimbus unsauberer oder wenig exakter Physik - ein Verständnis, das sich mehr und mehr ändert, sodass Physiker nicht länger nur indirekt durch die Entwicklung bildgebender Verfahren an biologischer Forschung beteiligt sind. Die Interdisziplinarität hat allerdings noch keinerlei Einzug in Grundvorlesungen gefunden (vgl. Donald 2012).

Die Verantwortung zur Vermittlung physikalischer Inhalte im Kontext biologischer Systeme liegt auf den Schultern der Physiklehrerinnen und -lehrern einer Schule. Wie Crouch & Heller (2012) feststellen, sind die Physikvorlesungen für Biologen häufig zeitlich gedrängte Lehrveranstaltungen, die so mit der Vermittlung angeblicher Grundlagen vollgefüllt sind, nämlich den identen Inhalten, die auch die Physikstudierenden zu bewältigen haben, wenn auch mit geringerem mathematischem Niveau, dass für biologische Anwendungen physikalischer Konzepte keine Zeit mehr bleibt (S.1). Zeitgleich wird aber biologische wie medizinische Forschung derart stark von physik-basierter Technologie

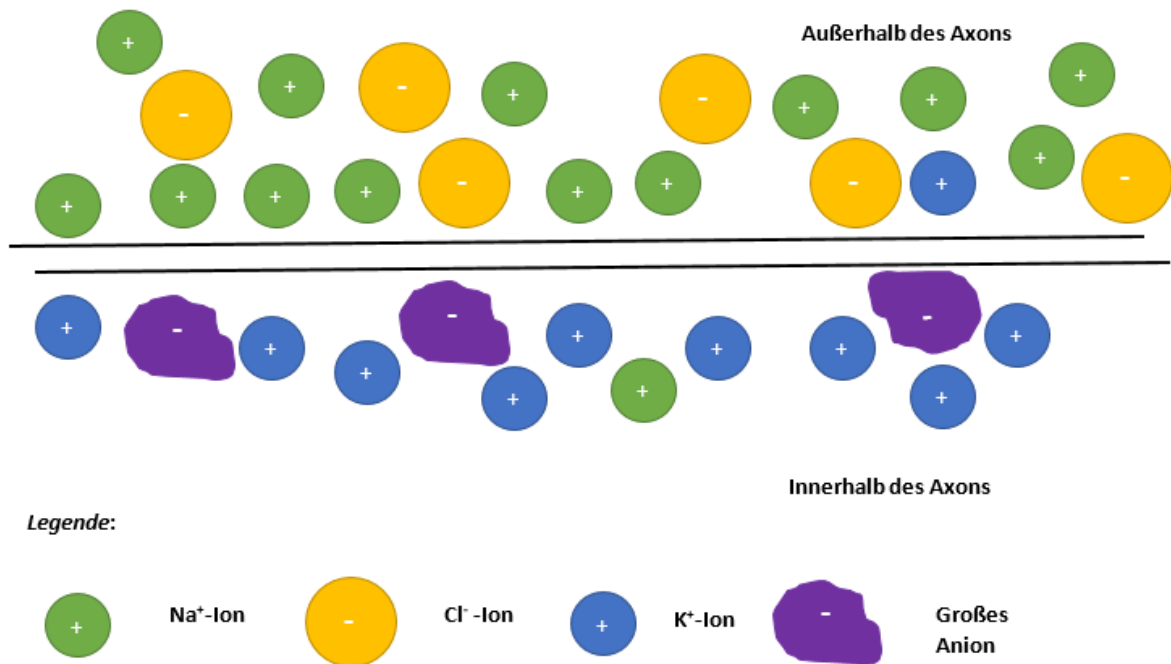


Abb. 1: Schema der Axon-Membran (nach Davidovits 2013, S. 176).

bestimmt, dass für deren verständige Handhabung ein tieferes physikalisches Verständnis, eine höhere mathematische Kompetenz und bessere Problemlösefähigkeit von Nöten wären, als sie bislang von Studierenden biowissenschaftlicher Hauptfächer erwartet wurden (ebd.). Die Relevanz der Physik- Lehrveranstaltungen wird von den Studierenden hingegen häufig sogar stark angezweifelt. Diesen Feststellungen kann sowohl in Bezug auf den Inhalt der Lehre wie auch auf die Haltung der Studierenden betreffs der Ausbildung von Biologielehrerinnen und -lehrern in Österreich nur zugestimmt werden¹. Welche biologieverwandten Inhalte bieten sich nun aber für den Physikunterricht in der Schule an? Im Folgenden werden einige potenzielle Themen diskutiert.

2 Elektrizität im Körper: Das Nervensystem

Die offensichtlichste und vermutlich bedeutendste physiologische Verwendung von Elektrizität erfolgt im Nervensystem, das aus rund 10^{10} Neuronen aufgebaut ist. Weder die Speicherung noch die Prozessierung von Information in diesem System sind im Detail verstanden, wohl aber die Reizleitung. Empfängt ein Neuron einen

entsprechenden Stimulus, wird dieser in Form elektrischer Pulse entlang des kabelähnlichen Zellkörpers fortgeleitet, wobei Stärke und Dauer der Pulse konstant sind, die Reizstärke ist einzig in der Pulsfrequenz codiert (Davidovits 2013, S. 173-174).

Die gelösten Salze im wässrigen Milieu innerhalb der Neuronen und ihrer unmittelbaren Umgebung machen die Zellflüssigkeit zu einem verhältnismäßig guten Leiter. Der Vergleich zum technischen Kabel wird oft bemüht, hinkt aber gewaltig: Der Widerstand dieser Flüssigkeit übertrifft jenen von Kupfer um das 10^8 -fache (Davidovits 2013, S. 176).

Die Widerstände der zellinternen und -externen Flüssigkeit sind nahezu gleich, ihre chemische Zusammensetzung jedoch grundlegend verschieden. Während außerhalb des Axons der Nervenzelle gehäuft Na^+ - sowie Cl^- -Ionen auftreten, sind es im Zellinneren überwiegend K^+ -Ionen sowie organische Anionen. Die Zellmembran, die sehr gute isolierende und damit ladungstrennende Eigenschaften besitzt, ist im Ruhezustand fast ausschließlich für K^+ -Ionen in Richtung Zellaußenseite permeabel. Da diese jedoch auf der Zellinnenseite einen Anionen-

¹ vgl. die Semesterübersicht der Vorlesung „Physik für Biologinnen und Biologen“ an der Universität Wien: <https://biologische.physik.univie.ac.at/download.html> (04.02.2019)

Überschuss zurücklassen, erfolgt der Netto-Kaliumausstrom nur so lange, bis die Kraft des Konzentrationsgradienten durch das sich aufbauende negative elektrische Potential ausgeglichen wird. Das negative Potential auf der Zellinnen-seite beträgt daher typischerweise -70 mV im Ruhezustand. Als Referenz wird dabei konventiongemäß die Zellaußenseite willkürlich auf 0 mV festgesetzt, weshalb in der Zellphysiologie vornehmlich von Potentialen und weniger von Spannung die Rede ist. Dies mag für die SuS gewöhnungsbedürftig sein, unterstreicht aber die physikalische Aussage, dass es sich dabei um die jeweilige potentielle Energie pro Einheitsladung handelt, hervorgerufen durch den Ionen-Konzentrationsgradienten und die selektive Durchlässigkeit der Axonmembran für Kaliumionen.

Das berühmte Aktionspotential entsteht nun durch eine Stimulus-abhängige Änderung der Membranleitfähigkeiten: Für einen sehr kurzen Zeitraum öffnen sich Na^+ -Kanäle in der Zellmembran und erlauben ein Umpolen des Membranpotentials auf rund $+30$ mV. In einer darauffolgenden Hyperpolarisationsreaktion werden -90 mV erreicht, bevor erneut die -70 mV des Ruhepotentials eingestellt werden können (siehe Abb. 2). Die Leitungsgeschwindigkeit dieser Potentialänderung, in deren Frequenz sowohl die Reize der Sinneswahrnehmung als auch die Befehle an die Muskulatur codiert werden, erreicht in großen Axonen 100 m/s. (Davidovits 2013, S. 177)

3 Anwendung im Schulunterricht: RC-Glieder anhand erregbarer Zellen verstehen

Die Phospholipid-Doppelschicht der Zellmembran besitzt durch ihre Ionen-Undurchlässigkeit ladungstrennende Eigenschaften. Ihr lässt sich eine Kapazität zuordnen: Werden für die Membrandicke fünf Nanometer angenommen und wird die Dielektrizitätskonstante auf einen Wert von drei geschätzt, so beträgt die Membrankapazität etwa 1 bis $3 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Gleichzeitig passieren Ionen diese Membran, jedoch mit einer 10^8 Mal geringeren Geschwindigkeit als ihrer Diffusionsgeschwindigkeit im Zellplasma. Dies spricht für einen hohen Membranwiderstand. Tatsächlich sind einzelne Ionenkanäle für diese verhältnismäßig geringe Leitfähigkeit verantwortlich. (vgl. Eckert 1986, S. 119-120)

Zusammenfassend lassen sich diese beiden Eigenschaften der Membran als RC-Glied darstellen, wobei die kapazitiven Eigenschaften der

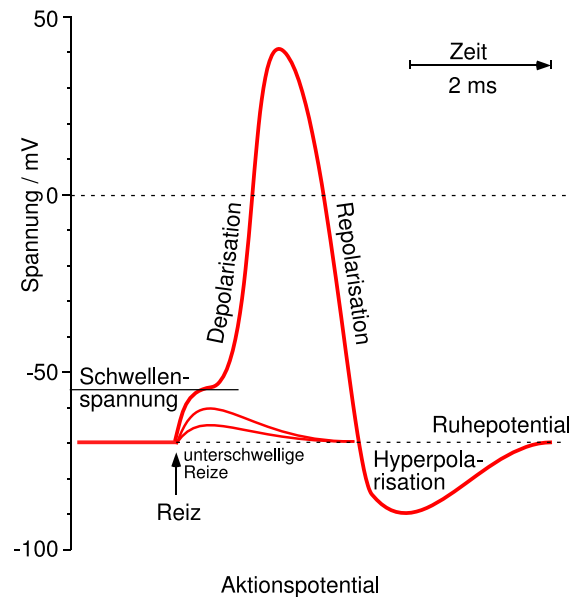


Abb. 2: Gängige Darstellung eines Aktionspotentials. (Von <https://commons.wikimedia.org>)

Membran als Kondensator modelliert werden, und der Widerstand symbolhaft für die zahlreichen und unterschiedlichen Ionenkanäle steht. Und tatsächlich: Experimentell lässt sich zeigen, dass eine Membran, die einem stufenartigen Strompuls ausgesetzt wird, eine exponentielle Entladekurve ausführt, wie dies für ein RC-Glied erwartet wird. Im Schulunterricht bietet es sich daher an, die SuS die Zeitkonstante $\tau = RC$ eines solchen Membran-RC-Gliedes berechnen und anschließend mit Hilfe von Simulationssoftware quasi-experimentell bestimmen zu lassen. Das ist jene Zeit, nach welcher das Membran-Potential nach einem mit einer Elektrode von außen applizierten Ionen-Strompuls auf $1/e \approx 0,37$ seines ursprünglichen Wertes abgenommen hat, gemäß folgender Gleichung (Eckert 1986, S. 121):

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{x}{\tau}}$$

Für V_0 werden hier in grober Näherung 100 mV angenommen. Für R wurde im Folgenden der spezifische Membranwiderstand gesetzt, für den $16 \text{ k}\Omega\text{cm}^{-2}$ gewählt wurden, was in einem realistischen Bereich liegt (vgl. spektrum.de). Für C wurde der spezifische Membranwiderstand mit $1 \mu\text{Fcm}^{-2}$ gewählt.

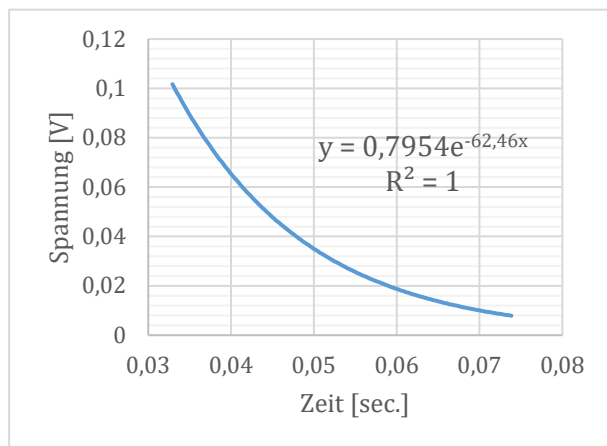


Abb. 3: Entladekurve eines RC-Gliedes

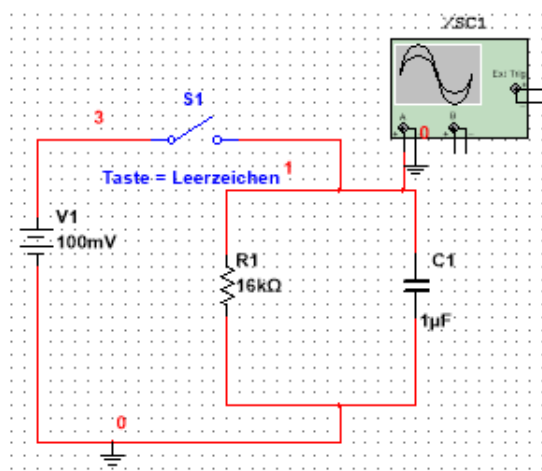


Abb. 4: RC - Schaltung im Simulationsprogramm „Multisim“ der Firma National Instruments.

4 Das Axon der Nervenzelle als elektrisches Kabel

Obwohl es erhebliche Unterschiede zwischen einem technischen Kabel und dem Axon einer Nervenzelle zu beachten gibt, lässt doch die

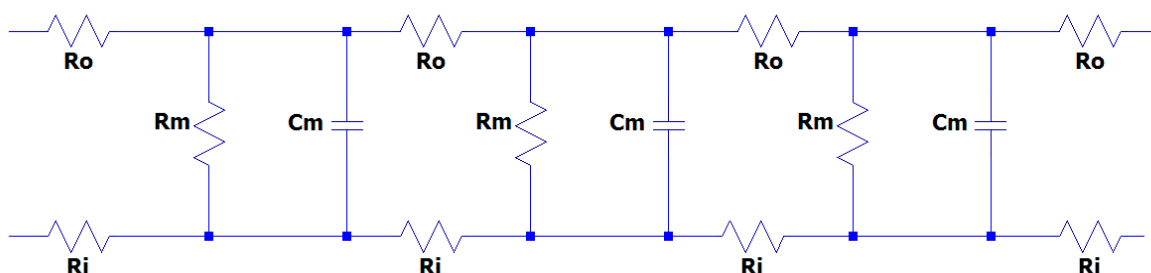


Abb. 5: Modell des Axons als Kabel.

Stromflüsse außerhalb der Zellmembran (Ro), innerhalb der Membran (Ri) und über die Membran (Rm) durch Widerstände berücksichtigt. (nach Davidovits 2013, S. 179; Schaltbild erstellt mit LTspice XVII)

modellhafte Vorstellung eines in einer Elektrolytlösung liegenden isolierten Kabels etliche Schlüsse zu. Die auf diese Weise erfolgende Schaffung eines nicht existenten Modellsystems, auf welches allein die physikalische Darstellung exakt zutrifft, ist für die Physik charakteristisch und kann daher Ausgangspunkt für didaktische Überlegungen sein den SuS auf diese Weise auch die Natur der Naturwissenschaften näher zu bringen.

Da es sich infolge der Ionenkanäle um ein leckendes Kabel handelt, lässt sich ein Axon als Reihenschaltung von RC-Gliedern betrachten. Dabei sind vier Ströme zu beachten: Die Ströme innerhalb und außerhalb der Membran, der kapazitive Strom über die Membran und der Strom durch die Ionenkanäle (Davidovits 2013, S. 178-179). Einige Eigenschaften des Axons können jedoch mit diesem einfachen Modell nicht erklärt werden: So würde die Signalweiterleitung in einem technischen RC-Glied mit beinahe Lichtgeschwindigkeit erfolgen, im Axon ist diese jedoch auf maximal 100 m/s beschränkt. Andererseits würden die oben dargestellten RC-Glieder in Reihe die elektrische Energie sehr schnell in Wärme dissipieren. Man müsste dem Rechnung tragen, indem man viele Signalgeneratoren in das Modell integriert, denn im Axon wandert das Signal ohne jeden Verlust seiner Amplitude. Dadurch wäre die Analyse der Schaltung mit schulischen Mitteln allerdings nicht mehr möglich. (Davidovits 2013, S. 179-180).

Die für weite Teile des Tierreichs geltenden Prinzipien der Reizleitung verlassend, wird nun eine konkrete Art mit ihren beeindruckenden elektrischen Eigenschaften und Fähigkeiten eingehender betrachtet.

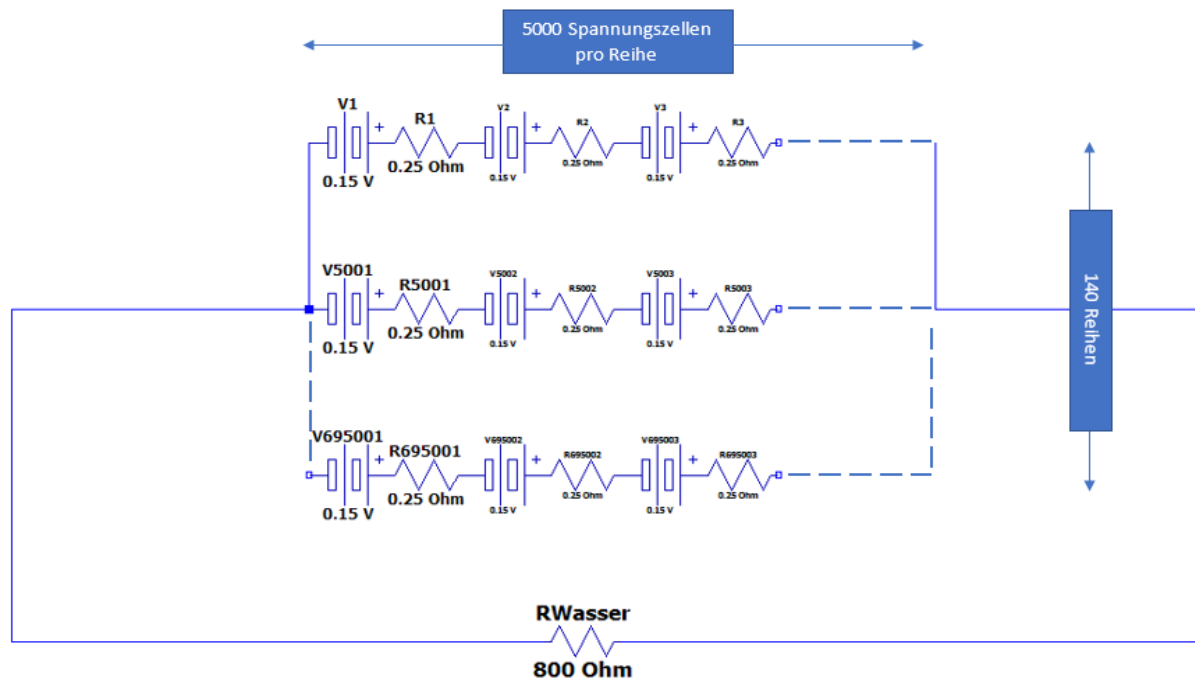


Abb. 6 – Ersatzschaltbild für den Zitteraal

(nach Halliday, Resnick & Walker 2005, S. 793). Schaltbild erstellt mit LTspice XVII.

5 Die Physik einer Spezies: Der Zitteraal

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Zitteraal hat lange Tradition. So berichtet Alexander von Humboldt in den *Annalen der Physik* darüber, dass Einheimische in Guyana diese Fische aus dem Wasser holten, indem sie Pferde in einen Tümpel trieben, an deren Körpern sich die alarmierten Fische so lange entluden, bis sie, ermüdet von der langen Verteidigungsreaktion, gefangen werden konnten. Allerdings ertranken dabei auch zwei der Pferde, gelähmt von den Entladungen (vgl. Humboldt 1807, S. 34-43).

Anwendung im Unterricht: Der Spannungsteiler

In den 200 Jahren, die seit der Publikation dieses Reiseberichtes Humboldts vergangen sind, wurden immer wieder kritische Stimmen laut, da es in all der Zeit keine weiteren Berichte zu einem derartigen Verhalten der Zitteraale gab. Kenneth Catania von der Vanderbilt University in Nashville zufolge verteidigen sich Zitteraale hingegen tatsächlich auf diese Weise: Sie springen aus dem Wasser, pressen ihren Körper gegen einen mutmaßlichen Feind, in diesem Fall gegen einen sich nähernden leitenden Gegenstand mit angeschlossener Messapparatur, und geben elektrische Hochspannungs-Salven ab. Durch den Sprung aus dem Wasser erreichen sie einen höheren Stromfluss durch den Angreifer/ Feind und geringere Verluste durch das Umgebungswasser. Catania konnte so Ströme von ca. 0,9

Ampere bei einer Spannung von über 250 V messen (Catania 2016, S. 6982-6983). Der Zitteraal und der potentielle Feind bilden für die kurze Dauer des Sprungs zusammen mit dem Umgebungswasser einen **Spannungsteiler**: Der Stromfluss ist vom Kopf ausgehend Richtung Schwanz des Fisches gerichtet. Während sich der Zitteraal aus dem Wasser erhebt, nimmt damit der Widerstand im Schaltkreis zu, denn der Strom kann nun allein durch den über das Wasser hinausragenden Teil des Feindes fließen. Einen zweiten, kleineren Widerstand stellt die kleine Strecke Wassers bis zum Schwanzende des Zitteraals dar (Catania 2016, S. 6982).

Der Zitteraal bietet sich somit an, für die Vermittlung von Spannungsteiler-Schaltungen im Schulunterricht sowie für Rechenbeispiele herangezogen zu werden. Auch der Reisebericht Humboldts wäre in eine solche Stundenplanung mit einzubeziehen.

Auf Nahrungssuche

Auf der Jagd hingegen verhält sich der Zitteraal völlig anders. Um seine Beute, kleine Fische, zu lähmen, gibt er Hochspannungspulse mit einer Frequenz von 400 Hz ins Umgebungswasser ab. Circa drei Millisekunden nach Einsetzen einer solchen Salve sind die Beutetiere bewegungsunfähig und werden vom Zitteraal verschlungen (Catania 2014, S. 1231-1234). Catania konnte auch zeigen, dass diese elektrischen Signale die

Motoneurone der Beutetiere beeinflussen: Kleine Fische, denen das Synapsen-Gift Curare injiziert worden war, um ihre ACh-Synapsen zu hemmen (da es sich bei den Electroplaques des Zitteraals selbst um Derivate von Muskelzellen handelt, besitzen auch diese ACh-Synapsen. Siehe **Abb. 6**), reagierten nicht länger mit Muskel-Tension auf die Salven des Zitteraals (Catania 2014, S. 1231-1234).

Am Beginn eines Angriffs entdeckte Catania jeweils Doublets von Pulsen, gefolgt von einer verhältnismäßig längeren Pause. Er konnte nachweisen, dass dies der Signalfolge in den Motoneuronen der Beutefische entspricht, um möglichst hohe Muskeltension zu erzeugen. Zitteraale senden also zunächst ein Doublet und zwingen so kleine Beutefische in ihrer Umgebung, die sich versteckt halten, zu einer krampfhaften Bewegung. Haben diese sich erst verraten, schlägt der Zitteraal ca. 40 Millisekunden später mit einer vollen 400 Hz-Entladung zu und verschlingt sie (Catania 2014, 1231-1234)

Halliday, Resnick und Walker (2005) gehen in ihrem Standardlehrwerk für Physikstudierende einen ähnlichen Weg, wie er eingangs für die Physikvorlesungen für Studierende der Biowissenschaften empfohlen wurde: Sie erheben biologische Phänomene zum Studienobjekt für Studierende des Hauptfaches Physik und machen den Zitteraal zum Thema ihres Kapitels *Stromkreise* machen (S. 777-806). Das auf der vorigen Seite abgebildete Beispiel lässt sich ohne weiteres in den Schulunterricht übertragen, wird dabei doch die Addition von Widerständen und, weniger üblich, die Addition von Spannungsquellen geübt. So lassen sich die 5000 im Beispiel in Serie geschalteten Electroplaques (die biologischen Spannungsquellen in Form modifizierter Muskelzellen) sehr leicht durch ein vereinfachtes Ersatzschaltbild darstellen. In einem weiteren Schritt enthält das Schaltbild schließlich nur noch eine äquivalente Spannungsquelle von 750 V und einen äquivalenten Widerstand von 8,93 Ω neben dem Widerstand des Wassers von 800 Ω . Dies lässt auf einen Gesamtstrom von 0,93 A in diesem Modell schließen, wohingegen der Strom in jeder der 140 Zellreihen 6,6 mA beträgt.

Aufbau der Electroplaques - Anwendung im Unterricht: Addition von Potentialdifferenzen

Abb. 6 veranschaulicht schematisch den Aufbau der winzigen Batterien, jener Zellen, die für den

Spannungsaufbau im Zitteraal verantwortlich sind, und bei welchen es sich um abgewandelte Muskelzellen handelt (Gotter 2012, S. 1027). Es sind diese Elektrozyten, die von Halliday, Resnick & Walker 2005 als Spannungsquellen inklusive internem Widerstand dargestellt wurden. Sie bilden in ihrer Gesamtheit das Hauptorgan und erfüllen den bei weitem größten Teil des Körpers eines Zitteraals. Die Diagramme sollen veranschaulichen, wie diese Zellen in ihrem Ruhezustand ein negatives, inneres Membranpotential aufweisen, wie dies z.B. ja auch für Nervenzellen zutrifft. Den Schalter zur Aktivierung dieser zellulären Spannungsquellen bilden die Synapsen von Nervenendigungen, die über eine Acetylcholin-Ausschüttung einen plötzlichen Natrium- und Calciumioneneinstrom bewirken, wodurch eine transzelluläre Potentialdifferenz von 150 mV entsteht. Werden mehrere solcher Electroplaques in Serie geschaltet, addieren sich ihre Potentialdifferenzen auf, was für SuS nicht sofort einsichtig sein dürfte. Möglicherweise hilft hier die einfache Vorstellung, dass die angegebenen Potentiale (+65 mV bzw. -85 mV) jeweils in Bezug auf die jeweilige Außenseite der Membran gelten, von welcher die Ionen einströmen (auf der Seite positiven Potentials) bzw. in Richtung welcher sie ausströmen (auf der Seite negativen Potentials), sodass sich ein gerichteter Ionenstrom entlang des gesamten Fischkörpers ergibt. Dieser verursacht, dass die Potentialdifferenz zwischen Kopf und Schwanz tatsächlich mehrere hundert Volt betragen kann, da die zellulären Schalter, nämlich die Synapsen der Neurone, exakt synchron für den Ioneneinstrom in allen Electroplaques sorgen.

6 Zusammenfassung

Der Artikel verfolgte das Ziel, die Scheu vor der Beschäftigung mit (neuro-)physiologischen Inhalten im Unterricht zu nehmen und Möglichkeiten des Einsatzes physiologischer Phänomene aus dem Tierreich im Physikunterricht aufzuzeigen, anhand derer grundlegende elektrische Phänomene und Schaltungen verstanden oder illustriert werden können. Der Einwand, dass dies gerade am Beginn stehenden Lernenden eher zu Verwirrung dienen könnte, wird der Meinung des Autors nach durch das Faszinationspotential authentischer Systeme an Stelle von Labor- oder bloß gedanklichen Modellsystemen aufgewogen.

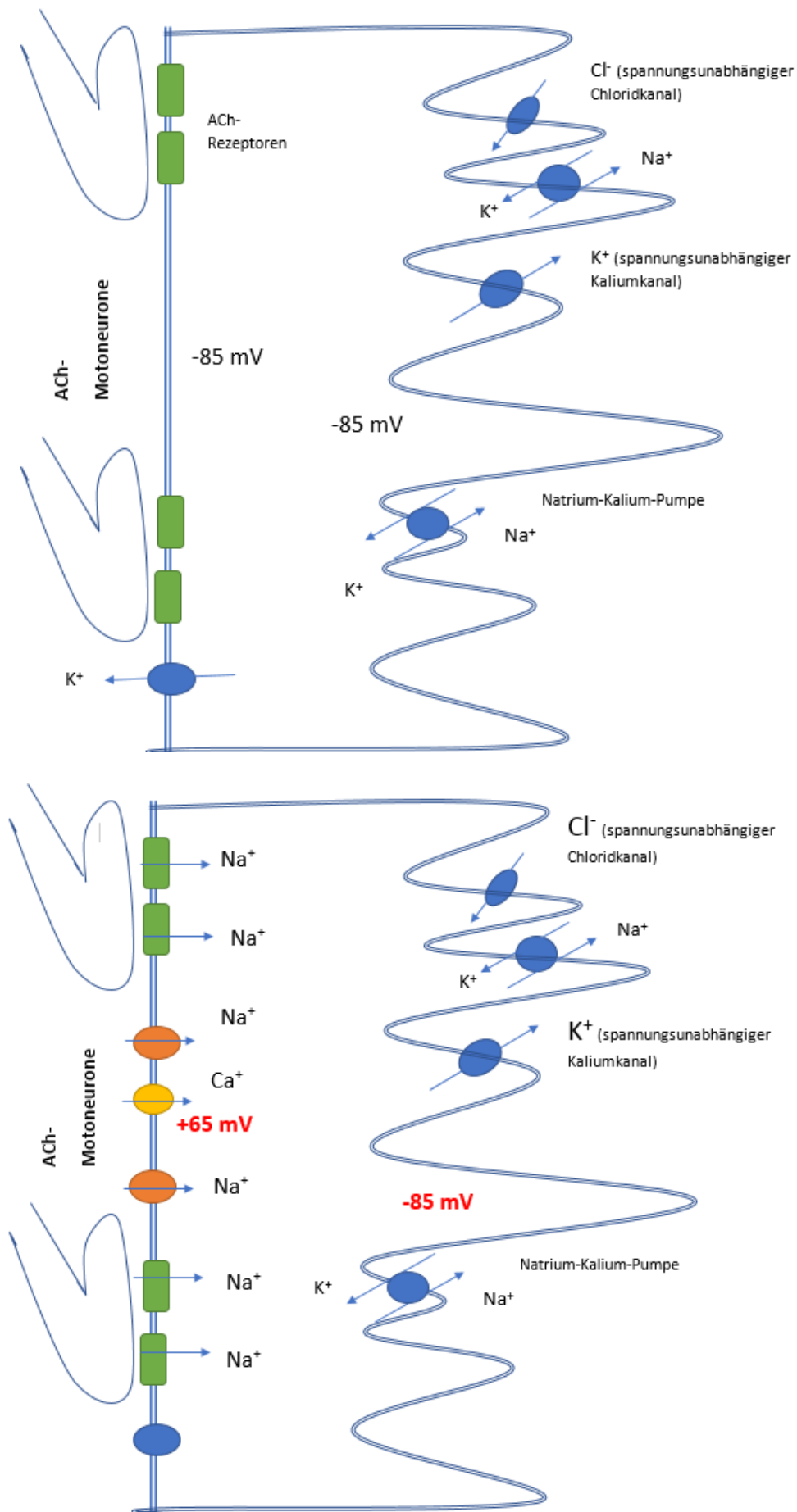


Abb. 7: Elektrozyten ruhend (oben) und stimuliert (unten). (nach Gotter et al. 2012).



7 Literatur

- Catania, K. C. (2016) Leaping eels electrify threats, supporting Humboldt's account of a battle with horses. *PNAS June 21, 2016 113 (25) 6979-6984*; published ahead of print June 6, 2016;
<https://doi.org/10.1073/pnas.1604009113>
(24.02.2019)
- Catania, K.C. (2014) The shocking predatory strike of the electric eel. *Science 05 Dec 2014: Vol. 346, Issue 6214, pp. 1231-1234*;
http://science.sciencemag.org/content/346/6214/1231?ijkey=773ed2ef97fdbad2efbfd5ab3d83a510a23dffe&keytype=tf_ipsecsha
(24.02.2019)
- Crouch, C.H. & Heller, K. (2012) *Teaching Physics to Life Science Students – Examining the Role of Biological Context*. Part of the Physics Education Research Conference series. Omaha, Nebraska: August 3-4, 2011. Volume 1413, Pages 159-162. <https://www.compadre.org/portal/items/detail.cfm?ID=11835> (04.02.2019)
- Davidovits, P. (2013) *Physics in Biology and Medicine*. Elsevier: London, San Diego, Waltham
- Donald, A. (2012) Where Physics meets biology. The Guardian. <https://www.theguardian.com/science/occams-corner/2012/aug/17/physics-biology> (23.02.2019)
- Eckert, R. (1986) *Tierphysiologie*. Thieme: Stuttgart
- Haliday, D. & Resnick, R. & Walker, J. (2005) *Physik*. Wiley-VCH: Weinheim
- Gotter, A. & Dedman, J.R. & Kaetzel, M.A. (2012) Electrocytes of Electric Fish. *Cell Physiology Source Book. 855-869*. Academic Press: San Diego. https://www.researchgate.net/publication/287258832_Electrocytes_of_Electric_Fish (24.02.2019)
- Grodzicki, M. (2018) *Ausgewählte Kapitel aus Theoretischer Physik für Lehramt*. Vorlesung an der Universität Salzburg im Wintersemester 2018/19.
- Holstermann, N. & Bögeholz, S. (2007) Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; Jg. 13. http://archiv.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/006_Holster_13.pdf (04.02.2019)
- Humboldt, A. (1807) Jagd und Kampf der electrischen [sic!] Aale mit Pferden. *Annalen der Physik 25, S. 34-43*.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb34462944f/date18070101.item#resultat-id-3> (04.02.2019)
- Jaros, A. (2007) *Physik compact. Themenheft Medizin und Physik*. öbv: Wien
- Lackner, A. & Wukowich, M. (2017) *schwereelos. Physik 3. E*. Dorner: Wien