



# Physikalische Phänomene in der Biologie

– Elektrizität in Nervenzellen –

DAGMAR, WERDENICH

[DAGMAR.WERDENICH@STUD.SBG.AC.AT](mailto:DAGMAR.WERDENICH@STUD.SBG.AC.AT)

## Zusammenfassung

Fächerübergreifender Unterricht in Biologie und Physik bietet die Möglichkeit, ein besseres Verständnis komplexer Sachverhalte zu entwickeln. Physikalische Inhalte sind für Schülerinnen und Schüler oft schwer verständlich, da zumeist kein unmittelbarer Zusammenhang zur eigenen Lebenswelt besteht. Eines der faszinierendsten Beispiele der Elektrizität in der Biologie bietet das Nervensystem. Durch die Veranschaulichung der engen Verbindung der beiden Unterrichtsfächer soll das Verständnis verbessert und das Interesse sowie die Motivation erhöht werden.

## 1 Einleitung

Innerhalb der Biologie finden sich zahlreiche Phänomene, welche auf physikalischen Prozessen beruhen, wie beispielsweise die Blutzirkulation, die Atmung oder der Wärmetransport (Feynman et al., 2011, Fritsche, 2013). Umso wichtiger ist es, diese Parallelen im Schulunterricht einzubauen und den Lernenden die Zusammenhänge erkennen und verstehen zu lassen.

Studien wie TIMSS und PISA zeigen, dass es vielen Schülerinnen und Schülern Probleme bereitet, mathematisch-naturwissenschaftliche Kenntnisse auf neue Situationen zu übertragen. Die Förderung von vernetztem Denken im naturwissenschaftlichen Unterricht durch fächerübergreifenden Unterricht könnte hier Abhilfe schaffen.

Die Auswirkungen auf Lernende in Bezug auf fächerübergreifenden Unterricht sind durchaus positiv. So führte diese Unterrichtsmethode zu einer größeren Selbstständigkeit, einem umfassenderen Repertoire an naturwissenschaftlichen Methoden, besondere Denk- und Lernfähigkeit beim Lösen komplexer Probleme, verstärkte das Selbstkonzept von Mädchen signifikant und erhöhte das Interesse der Jugendlichen (Labudde, 2003).

Um das Interesse am Unterrichtsfach Physik zu steigern, ist es besonders wichtig, Verknüpfungen zur Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler oder auf den menschlichen Körper herzustellen (Strahl & Preißler, 2014).

Untersuchungen an Interessentypen weisen darauf hin, dass die Mehrzahl der Lernenden dem Typus Mensch und Natur (Erklärung von Naturphänomenen (inkl. menschlicher Körper)) angehören. Wichtig ist hierbei auch, die richtigen Unterrichtsmethoden zu verwenden. In Bezug auf den Physikunterricht werden beson-

ders aktiv-handwerkliche Tätigkeiten (Versuche bauen/durchführen) und physikalisch-wissenschaftliche Tätigkeiten (Versuche beobachten, eigene Meinung bilden) als beliebteste Tätigkeiten genannt (Hoffmann et al., 1998). Elektrizität wird normalerweise mit Technik in Verbindung gebracht, aber sie spielt auch in vielen biologischen Prozessen, wie der Kontrolle von Muskelbewegungen, eine bedeutsame Rolle. Die vermutlich spannendste und faszinierendste Anwendung von elektrischen Phänomenen bei Lebewesen findet sich im Nervensystem (Davidovits, 2008).

Um Schülerinnen und Schülern ein besseres Verständnis der Funktion von Nervenzellen zu ermöglichen, ist es erforderlich, die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene zu verstehen. Zudem bietet dies auch die Möglichkeit bereits gelernte Inhalte der Physik zu wiederholen und zu vertiefen.

Im Folgenden soll veranschaulicht werden, wie ein fächerübergreifender Unterricht in Bezug auf Biologie und Physik am Beispiel von Nervenzellen und Elektrizität gestaltet werden kann.

## 2 Das Nervensystem

Das Nervensystem stellt das wohl komplizierteste Organ dar, das wir im Bereich der lebenden Organismen kennen. Die Grundbausteine, spezialisierte Zellen, sogenannte Nervenzellen oder Neurone, bilden ein komplexes, weit verzweigtes Netzwerk und dienen der Aufnahme, Verarbeitung und Weiterleitung von Informationen (Campbell & Reese, 2011; Davidovits, 2008).

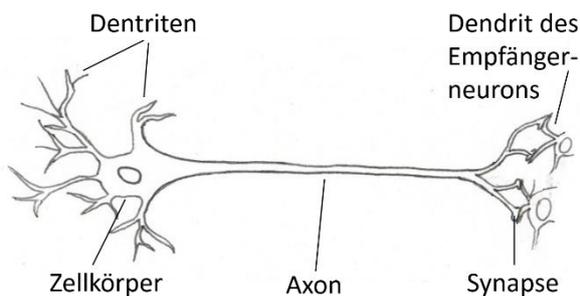
Betrachten wir den Aufbau des Nervensystems, so gliedert sich dieses in zwei Komponenten. Zum einen besteht es aus dem Zentralnervensystem (ZNS) das aus dem Rückenmark und dem Gehirn gebildet wird. Im Gehirn werden

Informationen analysiert und gespeichert, beim Menschen sind hierfür 100 Milliarden Neurone verantwortlich, wobei jedes Neuron wieder mit ca. 1000 Synapsen verbunden ist.

Die zweite Komponente wird vom Peripheren Nervensystem gebildet, dieses beinhaltet jene Nervenzellen, die Informationen vom bzw. zum ZNS leiten (Campell & Reece 2011).

Innerhalb der Nervenzellen können drei wichtige funktionale Typen unterschieden werden: *Motoneurone*, leiten Informationen aus dem ZNS an die Muskeln weiter und diese führen Bewegungen aus. *Sensorische Neurone* übertragen Informationen von sensorischen Rezeptoren (Sinneszellen) über Umweltreize in einer Sinnesbahn ans Gehirn. *Interneurone* schließlich sind sogenannte „Umschaltstellen“. Sie übertragen Informationen zwischen den Neuronen (Davidovits, 2008, Kandel, 2006).

Die Nervenzelle besteht aus dem Zellkörper, aus Dendriten (Ausläufer) und einem Hauptfortsatz (Axon) (Kahle, 1991). Abbildung 1 zeigt einen schematischen Aufbau einer Nervenzelle.



**Abb. 1** – Schematischer Aufbau einer Nervenzelle (nach Kandel, 2006).

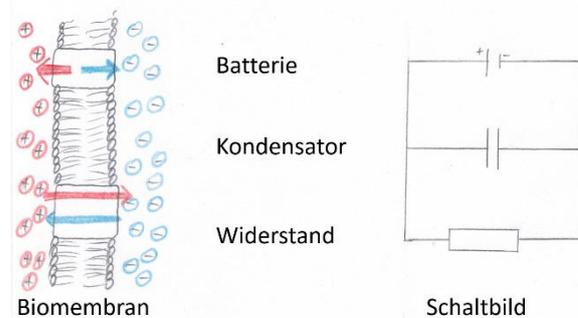
Die Informationsweiterleitung in einem Neuron läuft immer nur in eine Richtung. Der Signalempfang findet über weitverzweigte Ausläufer, die Dendriten statt. Hier kommt es zum Input der Information. Am gegenüberliegenden Teil des Zellkörpers befindet sich das Axon, das die Outputfaser der Nervenzelle darstellt. Über die Präsynaptische Endigung und die Synapse wird die Information auf die benachbarte Nervenzelle übertragen (Campell & Reese, 2011).

Dringen wir noch tiefer in die Struktur der Zellen vor, gelangen wir zu den Membranen. Und hier kommt nun die Physik ins Spiel. Eine faszinierende Eigenschaft von Membranen ist, dass sie elektrisch aufladbar sind. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Ionenkonzentrationen inner- bzw. außerhalb der Zelle. Verschiedene Ionen liegen in unterschiedlichen Konzentrationen vor und über Ionentransportmechanismen (Ionenpumpen) wird dieser Ionenkonzentration

gradient aufrechterhalten. Es kommt somit zu einer Trennung von Ladungen und dem Aufbau eines elektrischen Feldes. Für den Organismus ist wichtig, dass Energie in Form einer elektrischen Spannung gespeichert wird. Neben chemischen Bindungen stellt dies nämlich den wichtigsten Energiespeicher dar (Fritsche, 2013, Wehner & Gehring, 2007).

### 3 Membranen als Kondensatoren

Diese beschriebene Membran mit getrennten Ladungen entspricht einem klassischen Kondensator, welcher der Speicherung von Energie dient. Aus der Physik kennen wir Folgendes: zwei elektrische Leiter werden geladen (in unserem Falle die Biomembranen mit den unterschiedlichen wässrigen Lösungen auf beiden Seiten), indem die Ladung  $q$  von einem Leiter auf den anderen übertragen wird. Auf der einen Seite der Membran sitzt eine positive Ladung, auf der anderen Seite eine negative, dazwischen befindet sich eine isolierende Schicht (Tipler & Mosca, 2015). Durch das ständige Trennen der Ladungen wird die Membranspannung analog einer Batterie aufgebaut. Die Undurchlässigkeit der Membran für Ionen wirkt wie ein Kondensator, der Energie speichert und die Ionenkanäle stellen die Widerstände dar, durch welche selektiv Ionen fließen können (Fritsche, 2013.). Abbildung 1 zeigt ein Schaltbild mit den Eigenschaften der Biomembran.



**Abb. 2** – Schaltbild mit den Eigenschaften der Biomembran (nach Fritsche, 2013).

Anhand der bekannten Formel eines Plattenkondensators lässt sich die Kapazität berechnen. Die Membran des Axons stellt einen dünnen Hohlzylinder dar mit dem Radius  $r = 1,00 \cdot 10^{-5}m$ , einer Länge  $l = 1,00m$ , und einer Dicke (Plattenabstand)  $d = 5,00 \cdot 10^{-9}m$ . Der Flächeninhalt ergibt sich aus  $A = 2\pi r l$ , die Dielektrizitätskonstante von Biomembranen  $= 3,00$ . Somit erhalten wir:

$$C = \frac{\epsilon_{rel}\epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon_{rel}\epsilon_0 2\pi r l}{d} = 4\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_{rel} r l}{2d} =$$

$$\frac{3,00 \cdot (1,00 \cdot 10^{-5} \text{m}) \cdot (1,00 \text{m})}{(8,99 \cdot 10^9 \text{Nm}^2\text{C}^{-2}) \cdot 2(5,00 \cdot 10^{-9} \text{m})} = \mathbf{334 \text{nF}}$$

Berechnen wir das elektrische Feld  $E$  der Membran, erhalten wir erstaunliche Werte. Die Spannung  $U = 100 \text{mV}$ , die Dicke  $d$  wiederum  $d = 5,00 \cdot 10^{-9} \text{m}$ .

$$E = \frac{U}{d} = \frac{0,100 \text{V}}{(5,00 \cdot 10^{-9} \text{m})} = \mathbf{20 \text{MV/m}}$$

Bei dieser Größenordnung entstehen an der Luft schon Blitze, wir sehen hier sehr eindrucksvoll, dass Membranen bis ans Limit aufgeladen sind!

Was macht Neuronen nun so besonders, dass sie in der Lage sind, elektrische Signale zu erzeugen? Damit ein elektrische Potential entstehen kann, sind drei notwendigen Voraussetzungen zu erfüllen:

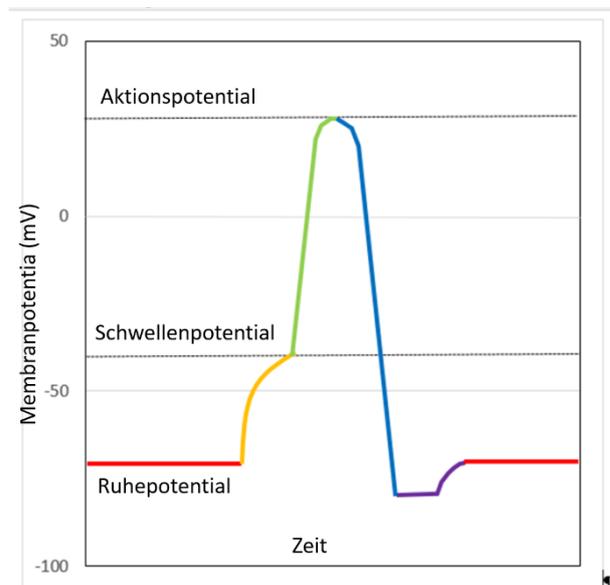
1. Unterschiedliche Ionenkonzentrationen innerhalb und außerhalb der Zellmembran: die Außenseite der Membran entspricht der von Meerwasser mit positiv geladenen  $\text{Na}^+$ - und negativ geladenen  $\text{Cl}^-$ -Ionen. Auf der Innenseite befinden sich positiv geladene  $\text{K}^+$ -Ionen und negativ geladene organische Moleküle, dazwischen bildet die Membran (5-10nm) einen relativ guten Isolator. Prinzipiell haben Körperflüssigkeiten eine relativ gute Leitfähigkeit von ca. 2 S/m (Pfützner, 2012). Verglichen mit Kupfer besitzen sie jedoch einen 100 Million-mal größerem spezifischen Widerstand (Fritsche, 2013).
2. Die Membran muss eine unterschiedliche Durchlässigkeit für  $\text{K}^+$ - und  $\text{Na}^+$ -Ionen besitzen. Die spezifischen Eigenschaften der Membran machen diese hochdurchlässig für  $\text{K}^+$ -Ionen, nur wenig durchlässig für  $\text{Na}^+$ -Ionen und undurchlässig für organische Ionen. Dies bewirkt die Entstehung eines negativen Potentials im Inneren des Axons im Gegensatz zur Außenseite von ca.  $-70 \text{mV}$ .
3. Da ein konsequenter Leckeinstrom von  $\text{Na}^+$ -Ionen eintritt, werden  $\text{Na}^+$ -Ionen von innen nach außen gepumpt und somit das negative Potential im Ruhezustand aufrechterhalten ( $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -Pumpe). In dieser Situation wird noch kein elektrischer Impuls geleitet, es handelt sich um das sogenannte Ruhepotential (Wehner & Gehring, 2007).

#### 4 Entstehung eines elektrischen Signals

Wie kann es nun ausgehend vom Ruhepotential zur Entstehung eines elektrischen Signals kommen? Ist der eintreffende Reiz stark genug und ein bestimmter Schwellenwert von  $-40 \text{mV}$

wird überschritten, kommt es zu einem plötzlichen Anstieg des Potentials im Axoninneren vom Ruhepotential ( $-70 \text{mV}$ ) zu  $+30 \text{mV}$ . Anschließend fällt dieses Potential plötzlich auf  $-90 \text{mV}$  und kehrt in die ursprüngliche Lage des Ruhepotentials zurück, wobei die Dauer bei 1-2ms liegt. Dieser fortgeleitete elektrische Impuls, welcher aufgrund der Umpolung der Membran entsteht, wird Aktionspotential genannt und stellt den eigentlichen Nervenimpuls dar (Abb. 2). Die Amplitude des Potentials ist unabhängig von der Reizstärke und folgt einem „Alles-oder nichts-Prinzip“. Generell stellen Aktionspotentiale ein relativ starkes elektrisches Signal von ca.  $0,1 \text{V}$  dar. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei ca.  $25\text{-}100 \text{m/s}$  und sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sich ihre Amplitude mit unverminderter Größe entlang des Axons ausbreitet, also nicht an Intensität abnimmt (Davidovits, 2008).

Nervenimpulse kann man auch mit stereotypischen Morsezeichen des Nervensystems vergleichen. Die Stärke der Erregung wird allein über die Frequenz verschlüsselt (Frequenzcodierung), die Größe der Amplitude bleibt immer gleich. (Campell & Reece, 2011; Kandel, 2006; Wehner & Gehring, 2007).



**Abb. 3** – Membranpotentiale nach elektrischer Reizung einer Nervenzelle (nach Campell & Reece, 2011).

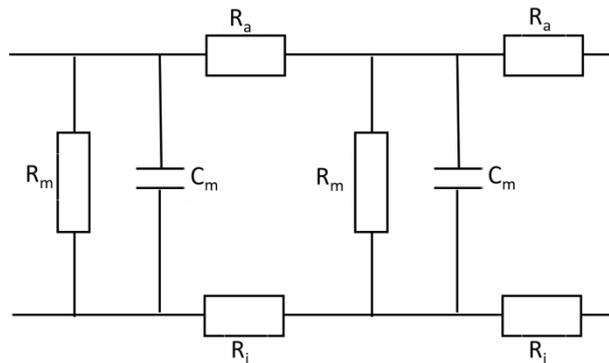
#### 5 Das Axon als elektrisches Kabel

Lässt sich nun ein Axon als ein isoliertes, elektrisches Kabel betrachten, dass in eine leitende Flüssigkeit eingetaucht ist? Um die Kabeleigenschaften zu spezifizieren, bedarf es vier elektrischer Parameter:

- a) Membrankapazität  $C_m$

- b) Membranwiderstand  $R_m$
- c) Widerstand außen  $R_a$
- d) Widerstand innen  $R_i$

Da der Widerstand und die Kapazität kontinuierlich über das Axon verteilt sind, müssen sehr kleine Abschnitte des Axons mit diesen vier Parametern betrachtet werden. Um das gesamte Axon zu veranschaulichen, verbinden wir diese Untereinheiten (Abb. 3). (Davidovits, 2008).



**Abb. 4** – Axon als elektrisches Kabel (nach Davidovits, 2008).

Und hier treten Widersprüche im Vergleich zu einem elektrischen Kabel auf. Dieser Schaltkreis erklärt **nicht** warum die Geschwindigkeit des elektrischen Impulses nur 100m/s und nicht Lichtgeschwindigkeit ist und weshalb die Stärke des elektrischen Impulses nicht abnimmt.

Wir können daraus folgern, dass das elektrische Signal im Axon **nicht** durch einen **passiven Prozess** weitergeleitet wird, ansonsten würde ein Signal im Finger noch in der Haut verebben (Kandel, 2006).

Beim Vergleich des Axons mit einem elektrischen Kabel ergeben sich also profunde Unterschiede. Diese liegen schon der Entstehung des Aktionspotentials zugrunde, das nach einem „Alles-oder-nichts-Prinzip“ funktioniert: entweder wird ein Aktionspotential produziert, oder es feuert gar nicht. Die Amplitude dieses Nervenimpulses wird ohne Abschwächung weitergeleitet. Nach Überschreitung des spezifischen Schwellenwertes wird die Durchlässigkeit für  $\text{Na}^+$ -Ionen plötzlich erhöht und  $\text{Na}^+$ -Ionen strömen ins Innere des Axons. Dies führt zu einer Umkehrung des Potentials – das Potential im Inneren wird positiv. Nach 1 ms kommt es zur Repolarisation, das Axon erneuert sich. Hierbei schließen sich die  $\text{Na}^+$ -Kanäle und die  $\text{K}^+$ -Kanäle öffnen sich – somit fällt das Potential auf einen Wert unterhalb des Ruhepotentials, nach einigen Millisekunden bereit für neuen Impuls. Diese „Störung“ wird sequentiell über ganzes Axon ausgebreitet, wie der Funke einer Zündschnur.

Das Aktionspotential wird also nicht gleichmäßig am Axon fortgeleitet, sondern **aktiv** immer wieder neu aufgebaut (Campbell & Reece, 2011, Wehner & Gehring, 2007).

Wir wollen nun noch die energetischen Kosten berechnen, die notwendig sind, um ein Axon wieder aufzuladen. Das Ruhepotential und das Aktionspotential nutzen die Energie, die im Konzentrationsgefälle der Ionen gespeichert ist. Hierbei spielen die eingangs schon erwähnte Energie der Biomembranen eine wesentliche Rolle und v.a. chemische Bindungen, allen voran ATP (Adenosintriphosphat), das als der wichtigste Energieträger bezeichnet werden kann.

Um die Energie  $E$  zu berechnen, benötigen wir die Kapazität  $C$  (aus dem vorangegangenen Beispiel kennen wir den Wert  $C = 334\text{nF}$ ) sowie den Spannungsunterschied zwischen innerer und äußerer Membran  $\Delta U = 0,1\text{V}$  (ergibt sich aus  $-70\text{mV}$  des Ruhepotentials bis  $+30\text{mV}$  des Aktionspotentials). Um einen Meter Axon wieder aufzuladen erhalten wir hierfür:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot (\Delta U)^2 = \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot 10^{-7} \text{F}) \cdot (0,100\text{V})^2 = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{J/m}$$

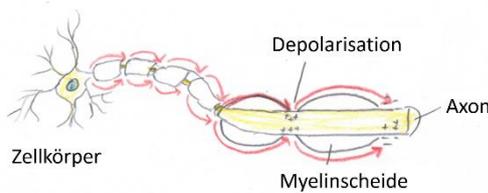
Dieser Wert mutet relativ gering an, bezogen auf den Gesamtverbrauch ergeben sich beeindruckende Zahlen. Beim Menschen macht das Gehirn nur ca. 2% der Körpermasse aus, verbraucht jedoch 20-25% der Gesamtenergie. Natürlich spielt hier nicht nur die Aufladung des Axons eine Rolle, sondern der Gesamtstoffwechsel der Neurone.

## 6 Elektrische Isolierung: Myelinscheiden

Ein Faktor, der die Fortleitungsgeschwindigkeit des elektrischen Signals beeinflusst, ist der Durchmesser des Axons: je dicker, desto rascher wird der Strom geleitet.

Hierbei fallen im Tierreich sehr unterschiedliche Werte auf. So besitzt der Tintenfisch mit  $500\mu\text{m}$  Durchmesser extrem dicke Axone, während die des Menschen lediglich  $5\text{-}20\mu\text{m}$  betragen (Wehner & Gehring, 2007). Um die Fortleitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, kam es beim Wirbeltierneuron zu einer Spezialisierung. Auf dem Axon befindet sich eine elektrische Isolierschicht, die sogenannten Myelinscheiden, dazwischen sind Stellen ausgespart (Ranvier-Schnürring). Bei der Reizleitung wird nur an den Schnürringen der elektrische Impuls gezündet, der Nervenimpuls „springt“ sozusagen von einem Schnürring zum nächsten (Abb. 5). Durch diese Funktionalitätsverbesserung erreicht das Säugeraxon die gleiche Leitungs-

geschwindigkeit wie der Tintenfisch (Campell & Reece, 2011; Wehner & Gehring, 2007).



**Abb. 5** – Reizleitung im myelinisierten Axon (nach Campell & Reece, 2011).

## 7 Synaptische Übertragung

Zuletzt betrachten wir noch, wie wird ein Nervensignal vom Axon auf eine andere Nervenzelle oder auf Muskelzellen weitergeleitet wird. Die Kontaktstelle zwischen Nervenzellen bildet die Synapse. Eine einzige Nervenzelle kann den Input von hunderten bis tausenden Synapsen erhalten und somit ergibt sich für den Menschen die Komplexität von bis zu einer Billiarde Synapsenverbindungen (Kandel, 2006).

Anders als bei der elektrischen Reizleitung funktionieren fast alle Synapsen über chemische Signalübertragung. Das eintreffende Aktionspotential depolarisiert die Membran wodurch sich spannungsgesteuerte Ionenkanäle öffnen. Dies setzt Neurotransmitter (Botenstoffe) in Quanten frei und diese diffundieren durch einen Spalt zur Nachbarzelle. Je nach Art der Neurotransmitter und der entsprechenden Rezeptoren werden Potentiale (erregend oder hemmend) in der Nachbarzelle ausgelöst. Somit wird das chemische Signal wieder in ein elektrisches Signal verwandelt (Campell & Reece, 2011, Wehner & Gehring, 2007).

## 8 Zusammenfassung

Fächerübergreifender Unterricht mit Physik sollte den Fachunterricht ergänzen und ein wichtiges Element in Schulen darstellen (Labudde, 2003).

Die Unterrichtsfächer Biologie und Physik bieten viele Parallelen und es gibt diverse Möglichkeiten diese im Unterricht einzubauen. Die Prinzipien der Neurobiologie und die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene der Elektrizität wurden im obigen Text veranschaulicht und Wege gezeigt, wie diese den Lernenden nähergebracht werden können. Durch das Erkennen und Verstehen der Zusammenhänge der Unterrichtsfächer soll ein besseres Verständnis für beide Fächer entwickelt werden und das Interesse gesteigert werden.

In weiterer Folge wäre es sicher erstrebenswert das Unterrichtsfach Chemie stärker einzubin-

den und Zusammenhänge zur Ionenregulation, Ionenhaushalt und chemische Bindungen näher zu erläutern.

## 9 Literatur

- Campell, N. A. & Reece, J.B. (2011) Biologie. Pearson Deutschland GmbH
- Davidovits, P. (2008) Physics in Biology and Medicine. Academic Press. Kapitel 13
- Feynman R, Leighton R, & Sands M. (2011) The Feynman Lectures on Physics. Volume I. New Millenium Edition. Basic Books. New York. Kapitel 3
- Fritsche, O. (2013) Physik für Biologen und Mediziner. Spektrum-Verlag. Kapitel 3
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998) Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel: IPN
- Kahle, W. (1991) Taschenatlas der Anatomie. Band 3: Nervensysteme und Sinnesorgane. 6.Aufl. Thieme Verlag.
- Kandel, E. (2006) Auf der Suche nach dem Gedächtnis. 4. Aufl. Pantheon Verlag
- Labudde, P. (2003) Fächerübergreifender Unterricht in und mit Physik: Eine zu wenig genutzte Chance. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 1(2). S. 48-66
- Pfützner, H. (2012) Angewandte Biophysik. 2. Aufl. Springer-Verlag Wien – New York. Kapitel 2.2
- Strahl, A. & Preißler, I. (2014) Fachdidaktik der Naturwissenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Physik. BoD. Kapitel 6
- Tipler, P.A. & Mosca, G. (2015) Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 7. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Wehner, R. & Gehring, W. (2007) Zoologie. 24. Aufl. Thieme Verlag