

## Elektrophysiologische Messungen im Physikunterricht

Friederike Appold, Markus Elsholz, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg  
[Friederike.Appold@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:Friederike.Appold@physik.uni-wuerzburg.de), [Markus.Elsholz@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:Markus.Elsholz@physik.uni-wuerzburg.de),  
[Thomas.Wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:Thomas.Wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de)

### Kurzfassung

Elektrophysiologische Sensoren, die für den Einsatz im Biologie-Unterricht angeboten werden, können auch im Physik-Unterricht verwendet werden. Damit können physikalische Sachverhalte wie Dipole und elektrische Felder in biologische Kontexte eingebettet unterrichtet werden und so das Elektrokardiogramm, das Elektromyogramm und das Elektrokulogramm behandelt werden.

### 1. Motivation

Die IPN-Interessensstudie [1] zeigte, dass alle Interessenstypen Interesse für den Bereich Mensch und Natur haben, z.B. für Physik in der Medizin. Insbesondere das Sachinteresse von Mädchen wird vom Kontext bestimmt, wobei der Bezug zum menschlichen Körper ein höheres Interesse der Mädchen nach sich zieht.

Mit Hilfe der elektrophysiologischen Sensoren, die für den Einsatz im Biologie-Unterricht konzipiert sind, können die Schülerinnen und Schüler einen Einblick erlangen, wie physikalische Messprozesse in der Medizin verwendet werden. Durch die elektrophysiologischen Messungen können beispielsweise die elektrischen Felder und Dipole in biologische Kontexte eingebettet unterrichtet werden. So kann Physik am menschlichen Körper bzw. im medizinischen Kontext vermittelt werden.

In Bayern wurde für die elfte Jahrgangsstufe die Lernplanalternative „Biophysik“ geschaffen, in der Physik in biologischen und medizinischen Kontexten behandelt werden soll. Hier bieten sich auch die elektrophysiologischen Sensoren an.

### 2. Grundlagen elektrophysiologischer Messungen

Über der Zellmembran einer erregbaren Muskelzelle im menschlichen Körper fällt im Ruhezustand aufgrund von unterschiedlichen Ionenkonzentrationen im Zellinnen- und -außenbereich eine Spannung von ca. -90 mV ab (Innenraum negativ geladen, siehe Abb. 1 und 2).

Bei Erregung einer Zelle kommt es zu einem Einstrom von Natriumionen, wodurch es kurzzeitig zu einer Umkehrung der Ladungsverhältnisse kommt (Depolarisation): im Zellinneren überwiegen positive Ladungen, der Außenbereich ist negativ geladen (siehe Abb. 2).

Betrachtet man Verbände von erregten und nicht-erregten Zellen, so ist das eine extrazelluläre Gebiet negativ, das andere positiv geladen und es entsteht

ein Dipol zwischen den beiden geladenen Bereichen (siehe Abb. 3).

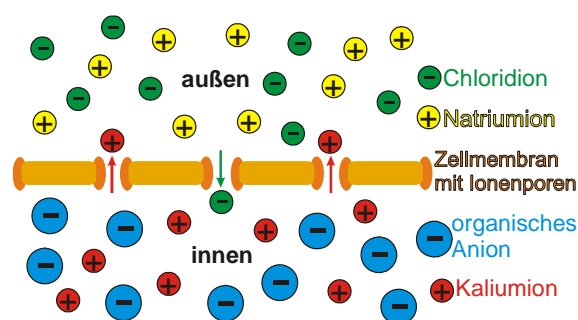


Abbildung 1: Ladungstrennung bei einer Zelle (nach [2])

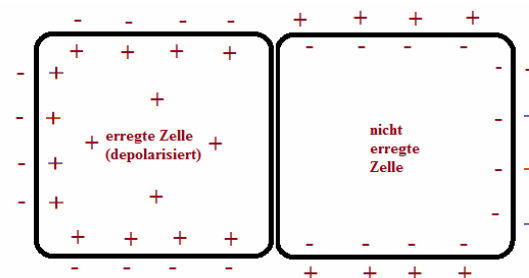


Abbildung 2: Außenräume der Zellen

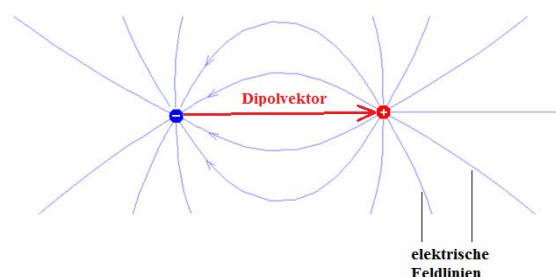


Abbildung 3: Entstehung des Dipols

Solche Dipole gibt es zum einen im Herzen und in den Muskeln des menschlichen Körpers und zum anderen auch am Auge. Das menschliche Auge an sich stellt einen Dipol dar. Wird das Auge bewegt,

verändert sich der Dipol und damit das elektrische Feld. Zieht sich ein Muskel zusammen, ändert sich ebenfalls das elektrische Feld. Analog dazu verändert sich der Dipol im Herzen während eines Kontraktionszyklus. Auf diesen elektrischen Feldern mit ihren Änderungen durch Muskelaktivität basieren die elektrophysiologischen Messungen.

### 3. Entstehung eines Elektrokardiogramms

Bei der Aufnahme eines Elektrokardiogramms (EKG) werden das elektrische Feld des Herzens, sowie seine Veränderungen aufgezeichnet. Beim Abgreifen der Spannung an mindestens zwei Punkten der Körperoberfläche spricht man von Ableitungen. Anschaulich wird dabei der dreidimensionale Dipolvektor des Herzens, der sich in Betrag und Richtung ständig verändert, zunächst in die zweidimensionale Körperebene und anschließend auf die eindimensionale Verbindungslinie der Messelektroden projiziert. Um detailliertere Informationen zu erlangen, werden in der Praxis diese Ableitungen von verschiedenen Positionen erstellt. Dabei orientiert man sich unter anderem am sogenannten Einthoven-Dreieck (siehe Abb. 4).

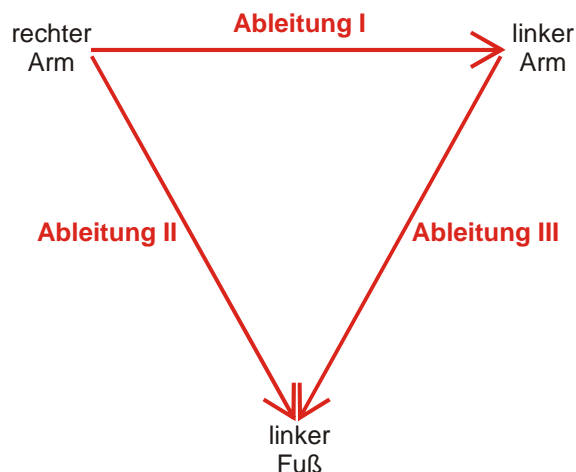


Abbildung 4: Das Einthoven-Dreieck

Der Dipolvektor beschreibt während des Erregungszyklus des Herzens bestimmte Bahnen. Diese Bewegungen ergeben im Eindimensionalen die charakteristische Kurve eines Elektrokardiogramms. Dabei wird die Spannung gegenüber der Zeit aufgetragen. Breitet sich die Erregung des Herzens über die Vorhöfe aus, so ziehen sich die Muskeln zusammen (siehe rot markierter Bereich in Abb. 5) und erregte Zellen stehen nicht-erregten Zellen gegenüber. Der in der Abbildung bereits ins Zweidimensionale projizierte Vektor wird ins Eindimensionale projiziert und gegenüber der Zeit aufgetragen. Die Erregung breitet sich gleichmäßig über die Struktur des Herzens aus und der entstandene Dipol verändert sich dynamisch.

So entsteht eine charakteristische EKG-Kurve (siehe Abb. 6) mit einer P-Welle, die die Erregung der Vorhöfe zeigt, dem QRS-Komplex, der Informatio-

nen über Erregung und deren Ausbreitung in den Kammerwänden liefert, der ST-Strecke, die die vollständige Kammererregung anzeigt, sowie der T-Welle, die aus der Rückbildung der Erregung in den Kammern resultiert.

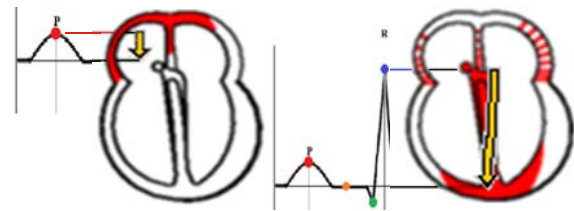


Abbildung 5: Entstehung einer EKG-Kurve

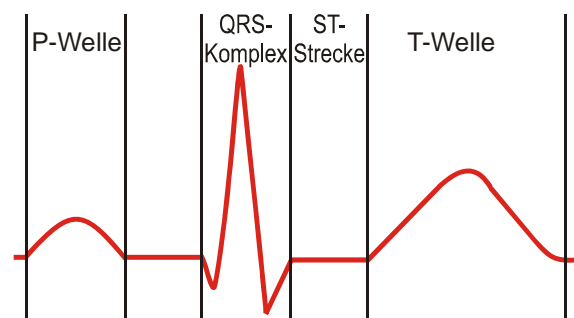


Abbildung 6: charakteristische EKG-Kurve

### 4. Umsetzung in der Schule

Im Rahmen einer Staatsexamensarbeit „Elektrophysiologische Messungen im Physikunterricht - EKG, EMG, EOG“ [3] wurden Unterrichtsstunden erstellt, in denen die elektrophysiologischen Sensoren der Lehrmittelfirmen eingesetzt wurden. Die Unterrichtseinheit unterteilte sich in vier Stunden und wurde an einem bayerischen Gymnasium in zwei Biophysik-Kursen der 11. Jahrgangsstufe durchgeführt.

Zunächst wurden in der ersten Stunde die Grundlagen geschaffen, wozu besprochen wurde, welche Prozesse in einer menschlichen Zelle vonstatten gehen. Daran anknüpfend wurde in der zweiten Stunde die Entstehung des elektrischen Dipolfeldes erarbeitet. Am Ende wurde ein Elektromyogramm (EMG) ohne und eines unter Belastung an einem Schüler aufgezeichnet und im Klassenverbund das Ergebnis betrachtet und diskutiert. Bei einem EMG wird die Spannung an einem Muskel, die die Aktivität des Muskels zeigt, gegenüber der Zeit aufgetragen. In der dritten Unterrichtsstunde erarbeitete man das Zustandekommen einer EKG-Kurve. Durch Betrachtung der einzelnen Vorgänge im Herzen soll den Schülerinnen und Schülern bewusst werden, wie eine charakteristische EKG-Kurve entsteht. In der vierten Stunde nahmen die Schülerinnen und Schüler in Gruppen selbstständig EKG-Kurven in Ruhe und nach Belastung auf. Anschließend sollten die beiden erhaltenen Diagramme miteinander verglichen werden. Jede Gruppe bekam dafür einen EKG-Sensor, einen Laptop mit der passenden Software,

sowie jede Schülerin und jeder Schüler eine detaillierte Anleitung.

Während der ersten Unterrichtseinheit wurden dabei Probleme bei dem Verständnis der einzelnen Vorgänge im menschlichen Körper und bei der Vorstellung der Projektion des dreidimensionalen Vektors auf eine Dimension festgestellt. Dadurch gab es auch Schwierigkeiten, das Zustandekommen einer EKG-Kurve zu verstehen. Um dem entgegenzuwirken, wurde beim zweiten Durchlauf kleinschrittig vorgegangen und jeder Vorgang einzeln und ausführlich behandelt. Um die Vorstellungsprobleme zu beheben, wurde zur Veranschaulichung der Projektionen ein einfaches Herzmodell eingesetzt.

### 5. Veranschaulichung an einem einfachen Herzmodell

Wie oben bereits erwähnt liegen die Dipolvektoren der Herzmuskelzellen irgendwie im dreidimensionalen Raum. Der dreidimensionale Summenvektor wird zunächst auf eine Ebene (die Körperebene) projiziert. Zum besseren Verständnis der Schülerinnen und Schüler dient ein einfaches, gegenständliches Modell des Herzens (siehe Abb. 7). Der dreidimensionale Pfeil im Modell wird mit Hilfe eines Tageslichtprojektors auf eine Leinwand projiziert (siehe Abb. 8).



Abbildung 7: Das einfache Herzmodell

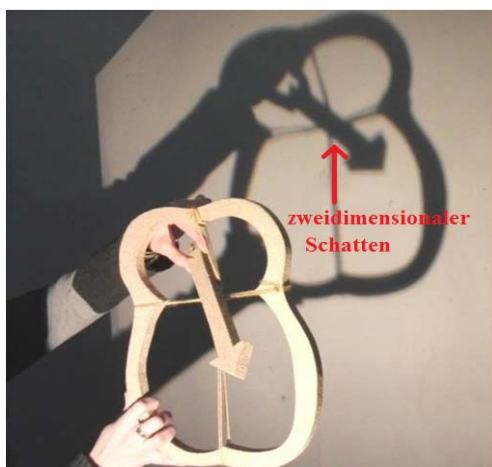


Abbildung 8: Zweidimensionaler Schatten

Der zweidimensionale Vektorschatten wird anschließend nochmals ins Eindimensionale projiziert und gegenüber der Zeit aufgetragen. Um den Schülerinnen und Schülern das Zustandekommen der EKG-Kurve zu verdeutlichen, werden die einzelnen charakteristischen Punkte der EKG-Kurve im Herzmodell nachgestellt und die zwei Projektionen von den Schülerinnen und Schülern selbst vollzogen.

### 6. Elektromyogramm-Aufnahme

In der zweiten Unterrichtsstunde wurde ein Elektromyogramm aufgenommen. Dabei wurde der Bizeps eines Schülers vermessen. Wie die Elektroden angeschlossen werden müssen zeigt Abb. 9.

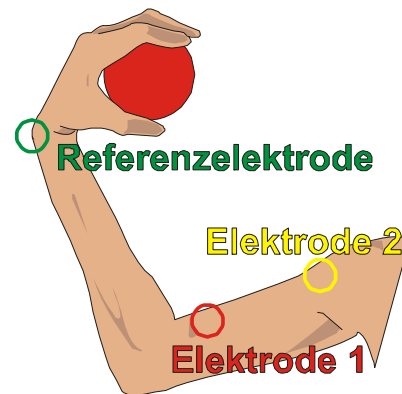


Abbildung 9: Vermessen eines Bizeps

In der ersten Messung wurde der Arm ohne Belastung gebeugt und wieder entspannt. Beim zweiten Durchgang drückt eine weitere Person gegen den Arm des Probanden, um die Belastung des Bizeps zu steigern. Anstatt einer zweiten Person kann der Proband auch eine Masse von ungefähr fünf Kilogramm in die Hand nehmen und den Arm wieder beugen und strecken.

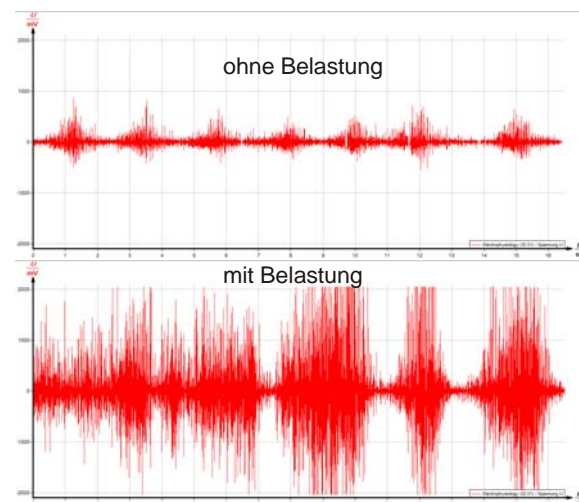


Abbildung 10: aufgenommene Elektromyogramme

Die gemessenen Elektromyogramme werden verglichen und die Bewegungen analysiert. Zunächst ist zu erkennen, dass die Amplituden im oberen Diagramm eine geringere Höhe aufweisen. Der Proband

hat den Bizeps in der zweiten Messung mehr beansprucht und anfangs nicht entspannt. In den ersten Sekunden des zweiten Durchgangs wurde stetig gegen das Gewicht gedrückt, ähnlich wie beim Armdrücken. Die Phasen, in denen der Bizeps nicht beansprucht wurde, gleichen sich in beiden Diagrammen.

Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Beugung und eine Streckung ohne Belastung zusammen ungefähr zwei Sekunden dauerten. Dieser Bewegungsablauf weist immer ungefähr die gleiche Dauer auf. Dies ist unter Belastung nicht der Fall. Die Werte für die Dauer dieser Bewegung sind unterschiedlich. Da eine zweite Person geholfen hat, müssen ihre Tätigkeit mitberücksichtigt werden. So variierte die Kraft, die auf den Probanden ausgeübt wurde.

### 7. Sensoren verschiedener Lehrmittelfirmen

Bei der Durchführung im Unterricht mussten verschiedene EKG-Sensoren verwendet werden, da von keiner Firma ausreichend viele zur Verfügung standen. Im Folgenden werden die verwendeten miteinander verglichen. Bei den Sensoren handelt es sich um den Cobra4-Sensor aus dem elektrophysiologischen Set von Phywe, dem EKG-Sensor von Pasco und die EKG/EMG-Box des Cassy-Systems von LD-Didaktik (siehe Tab. 1).

Eigenschaften	Phywe (Cobra4)	Pasco (Pasport)	LD-Didaktik (Cassy)
Messungen	EKG, EMG, EOG	EKG	EKG, EMG
Abtastrate in Hz	1000	200	80
Ableitungen bei dem EKG-Signal	Ableitung I nach Einthoven	Ableitung I nach Einthoven	Ableitung I, II, III nach Einthoven
Übertragung	Kabel, Funk	Kabel, Bluetooth	nur Kabel

Tabelle 1: Sensoreigenschaften

Bei den Übertragungen der gemessenen Signale gibt es Unterschiede. So können beim Cobra4-Sensor die Daten anstatt über USB-Kabel auch mit dem „Wireless-Link“ über ein eigenes Funksystem an die Software „measure“ weitergeleitet werden. Bei dieser Funkübertragung können noch gleichzeitig weitere Sensoren für ein paralleles Messen angeschlossen werden, ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen, beispielsweise neben einem EKG-Sensor ein Pulssensor. Beim Pasport-System von Pasco gibt es zwar auch die Möglichkeit der kabellosen Signalübertragung an das Programm „DataStudio“ durch den „AirLink“ über Bluetooth. Dies erlaubt aber nicht, einen zweiten Sensor über Bluetooth für eine weitere, gleichzeitige Messung zu verwenden. Von

LD-Didaktik gibt es dagegen keine kabellose Übertragungsform.

Bei Phywe und LD-Didaktik sind neben dem EKG noch andere elektrophysiologische Messungen mit diesen Sensoren möglich. Dabei können mit dem elektrophysiologischen Cobra4-Sensor jeweils noch Elektromyo- und Elektrokulogramme aufgezeichnet werden. Die EKG/EMG-Box von LD-Didaktik eignet sich noch für die Aufnahme von Elektromyogrammen. Außerdem kann der Sensor von LD-Didaktik neben der Ableitung I nach Einthoven, die alle Systeme können, auch noch die Ableitungen II und III gleichzeitig aufnehmen.

Beim Arbeiten mit den Sensoren taten sich Vor- und Nachteile der einzelnen betrachteten Geräte auf. Alle drei sind für den Physikunterricht geeignet und können dort eingesetzt werden. Aber nur bei den Sensoren von Phywe und Pasco ist durch die kabellose Übertragung die Aufnahme von Elektrokardiogrammen während einer Belastung möglich. Die Einzelmessleitungen aller Sensoren sind sehr empfindlich und dadurch störanfällig. So können die Messungen sehr leicht verfälscht werden. Ein weiteres Manko ist, dass man die mitgelieferten selbstklebenden Einwegelektroden zusätzlich fixieren muss, da diese den Hautkontakt schnell verlieren, und so kein Signal an die Software geschickt wird und damit kein Diagramm aufgezeichnet werden kann.



Abbildung 11: Überkleben der Einwegelektroden

### 8. Fazit

Alles in allem ist es also möglich, elektrophysiologische Sensoren gewinnbringend im Physikunterricht einzusetzen. Dies bietet eine neue Möglichkeit, elektrische Felder auf eine andere Art zu behandeln und ist nicht nur in einer Lehrplanalternative wie in Bayern möglich, sondern auch im regulären Physikunterricht, wenn elektrische Felder thematisiert werden. Die Sensoren an sich liefern ein schönes Alltagsbeispiel der Anwendung physikalischer Inhalte bzw. die Physik am menschlichen Körper einen interessanten Kontext. Elektrophysiologie kann also nicht nur im Biologieunterricht, sondern auch im Physikunterricht einen Platz einnehmen.

## 9. Literatur

- [1] Häußler, Peter; Bündler, Wolfgang; Duit, Rein-  
ders; Gräber, Wolfgang; Mayer, Jürgen (1998):  
Naturwissenschaftsdidaktische Forschung –  
Perspektiven für die Unterrichtspraxis. Leibniz  
Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften,  
Kiel
- [2] Neuro-Fuzzy AG des Instituts für Informatik  
der Westfälischen Wilhelms Universität Müns-  
ter: Einführung in Neuronale Netze,  
[http://wwwmath.uni-muenster.de/  
SoftComputing/lehre/material/ wwwnscript](http://wwwmath.uni-muenster.de/SoftComputing/lehre/material/wwwnscript)
- [3] Appold, Friederike (2011): Elektrophysiologi-  
sche Messungen im Physikunterricht-EKG,  
EMG, EOG, Staatsexamensarbeit Universität  
Würzburg