

## Elektrisierende Hirnkurven - Konzeption eines Schülerforschungstages zur Elektroenzephalographie

Markus Feser\*, Markus Elsholz\*, Thomas Trefzger\*

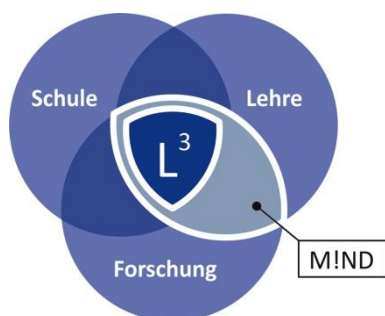
\* Universität Würzburg, Physik und ihre Didaktik, Campus Hubland Nord  
markus.feser@physik.uni-wuerzburg.de, markus.elsholz@uni-wuerzburg.de,  
thomas.trefzger@uni-wuerzburg.de

### Kurzfassung

Neben der Elektrokardiographie (EKG) bietet die Elektroenzephalographie (EEG) einen weiteren attraktiven Kontext für die Behandlung elektrischer Felder im Unterricht. Eine geeignete didaktische Aufbereitung für den Physikunterricht in der Sekundarstufe II existiert allerdings noch nicht. Die Konzeption eines Schülerforschungstages im Lehr-Lern-Labor des Didaktikzentrums M!ND der Universität Würzburg stellt hierfür einen ersten Vorschlag dar. Unter Anleitung und mit Hilfe eines speziell für den Forschungstag konzipierten Workbooks erarbeiten die Schüler/innen zentrale Teilaspekte der Elektroenzephalographie, angefangen bei den neurobiophysikalischen Grundlagen, über Aspekte der Elektroden- und Verstärkertechnik bis zu Details der Auswertung typischer EEG-Kurven. Dazu führen die Schülerinnen und Schüler geeignete Analogieversuche durch, experimentieren an elektrischen Ersatzschaltkreisen und nehmen selbst EEG-Kurven auf.

### 1. M!ND-Center

Das M!ND-Center ist ein Lehr- und Forschungsverbund aller Didaktiken der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultäten der Universität Würzburg. An der Schnittstelle von Forschung, Lehre und Schule fördert es die Begegnung und den Austausch zwischen Wissenschaftler/innen, Lehramtsstudierenden, Lehrkräften und Schüler/innen. Kernelement des M!ND bilden die Lehr-Lern-Labore  $L^3$ .



**Abb. 1:** Das M!ND-Center ist Schnittstelle von Schule, Lehre und Forschung (fachdidaktisch und fachwissenschaftlich).

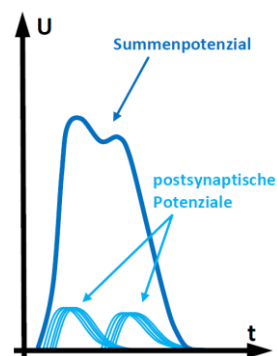
Hier entwickeln Studierende zusammen mit Fachdidaktikern und Fachwissenschaftlern Experimentierumgebungen und Vermittlungskonzepte zu aktuellen wissenschaftlichen Themengebieten und erproben und evaluieren diese bei Durchführungen mit Schulklassen vor Ort in den Lehr-Lern-Laboren des M!ND-Centers. Das  $L^3$  wird von Schüler/innen im Klassenverbund besucht, die beim selbstständigen Experimentieren in Kleingruppen von Lehramtsstudierenden intensiv betreut werden. Die damit verbundene Erhöhung des Praxisbezugs während des Studiums führt in der subjektiven Einschätzung der

Studierenden zu einer Zunahme ihrer Unterrichtskompetenz [1]. Für die fachdidaktische Forschung ergibt sich die einmalige Möglichkeit, Lehr-Lern-Prozesse unter Laborbedingungen zu studieren und sukzessive zu optimieren.

### 2. Bioelektrizität der Hirnrinde

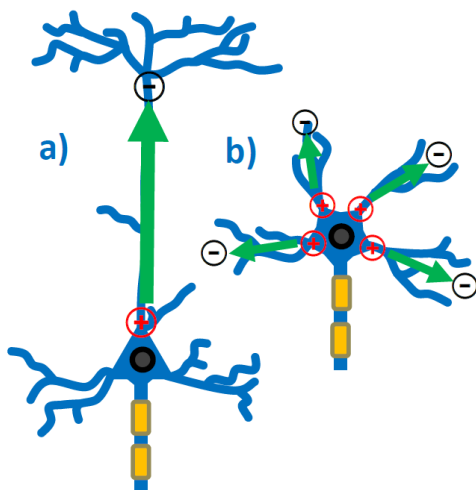
Bevor in Kapitel 3 und 4 der Schülerforschungstag beschrieben wird, sollen kurz einige neurobiophysikalische Grundlagen zur Elektroenzephalographie dargestellt werden:

In der Hirnrinde (Kortex) treten, aufgrund starker Vernetzung der Neuronen mit tiefer liegenden Hirnregionen, synaptische Signalleitungsprozesse nie vereinzelt, sondern synchronisiert auf [2]. Im extrazellulären Raum überlagern sich deshalb eine Vielzahl elektrischer Potenziale, die bei diesem Signalleitungsprozess entstehen, sog. postsynaptische Potenziale. Diese Überlagerung, die man in ihrer Fernwirkung kortikales Feldpotential nennt [2], ist stark genug, dass sie selbst an der Schädeloberfläche noch nachweisbar ist (Abb. 2).



**Abb. 2:** Skizzenhafte Überlagerung postsynaptischer Potenziale zu einem starken Summenpotenzial im Kortex.

Die Elektroden eines EEG-Geräts erfassen die Fernwirkung synchron auftretender synaptischer Signalleitungsprozesse in der Hirnrinde. Die dabei gemessenen Spannungen sind allerdings extrem gering. Typischerweise liegen sie im Bereich von maximal  $100 \mu\text{V}$  [3].



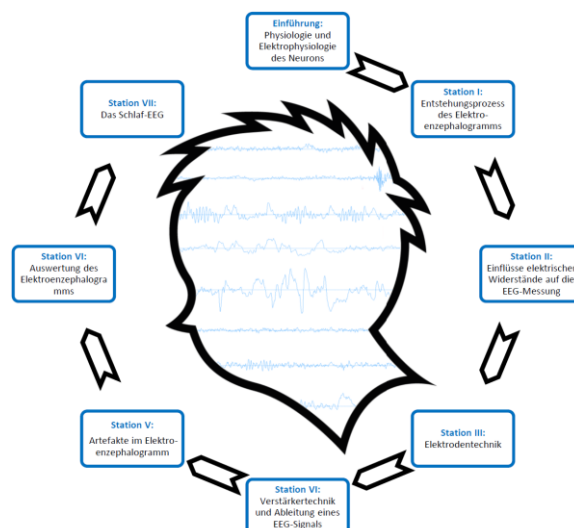
**Abb. 3:** Veranschaulichung kortikaler Dipole an den Dornfortsätzen von Pyramiden- (a) und Sternzellen (b); zu beachten ist, dass die Richtung der Dipolvektoren üblicherweise genau entgegen der in der klassischen Physik üblichen gewählt ist.

Im Wesentlichen gibt es in der Hirnrinde zwei Neuronentypen: Pyramiden- und Sternzellen. Mit Hilfe kortikaler Dipolvektoren, die an den Dornfortsätzen dieser Neuronen entstehen, wird der Entstehungsprozess des EEGs besonders anschaulich (Abb. 3): Den maßgebenden Anteil an der EEG-Messkurve haben Dipole, die senkrecht zur Kopfoberfläche entstehen. Diese werden bei Erregung von Pyramidenzellen (a) erzeugt. Die Erregung von Sternzellen (b) hingegen spielt für das EEG kaum eine Rolle, da sich die Dipole hier in der Summe gegenseitig auslöschen [2].

### 3. Konzeption des Schülerforschungstages

Die Elektroenzephalographie (EEG) bietet einen attraktiven Kontext für die Behandlung elektrischer Felder im Unterricht. Eine didaktische Aufbereitung für den Physikunterricht in der Sekundarstufe II existiert allerdings noch nicht.

Die Konzeption eines Schülerforschungstages im Lehr-Lern-Labor des Didaktikzentrums M!ND der Universität Würzburg stellt hierfür einen ersten Vorschlag dar. Unter Anleitung und mit Hilfe eines speziell für den Forschungstag konzipierten Workbooks erarbeiten die Schüler/innen in insgesamt acht Etappen zentrale Aspekte und Grundprinzipien der Elektroenzephalographie (Abb. 4).



**Abb. 4:** Ablauf des Schülerforschungstages als Makrostruktur; die Schüler/innen erarbeiten an acht in ihrer Reihenfolge festen Etappen zentrale Aspekte des EEGs mit dem Ziel die Grundprinzipien der Elektroenzephalographie als ein facettenreiches Gesamtes darzustellen.

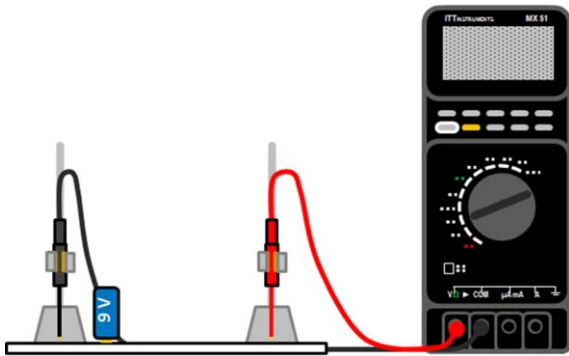
Konzipiert ist der Schülerforschungstag für Schüler/innen der 11. Jahrgangsstufe, insbesondere für Schüler/innen des bayerischen Gymnasiums, die die im Zuge der G8-Reform neu eingeführte Lehrplanalternative Biophysik gewählt haben.

### 4. Methodische Vielfalt des Schülerforschungstages

Allgemein findet sich bundesweit die Elektroenzephalographie bereits seit gut einem Jahrzehnt in einer Vielzahl der aktuell gültigen Physiklehrpläne. Typischerweise wird sie dabei als Additum im Kontext Physik und Medizin oder als praxisorientierte Thematik des statischen elektrischen Feldes genannt. Das Konzept des Schülerforschungstages berücksichtigt diese beiden Facetten gleichermaßen. Insbesondere zeichnen sich die verschiedenen Etappen des Schülerforschungstages durch die in ihrer zu Grunde liegenden Methodik mannigfaltigen Aufgabenstellungen an die Schüler/innen sowie die Vielfaltigkeit der schülergerechten Aufbereitung der entsprechenden Sachkontexte aus.

#### 4.1. Veranschaulichung durch ein Analogieexperiment

Der bioelektrische Entstehungsprozess des Elektroenzephalogramms lässt sich durch ähnliche Analogieexperimente veranschaulichen, wie sie bereits für das Elektrokardiogramm entwickelt und vorgestellt wurden [4]. Für die Versuchsaufbauten werden bewusst möglichst oft einfachste Mittel verwendet, die insbesondere den Schülerinnen und Schülern aus ihrem Alltag bekannt sind, z. B. handelsübliche 9V-Blockbatterien als einfaches, statisches Dipolmodell oder Kochsalzlösungen unterschiedlicher Konzentrationen als Modell ionenleitender Körperflüssigkeiten.

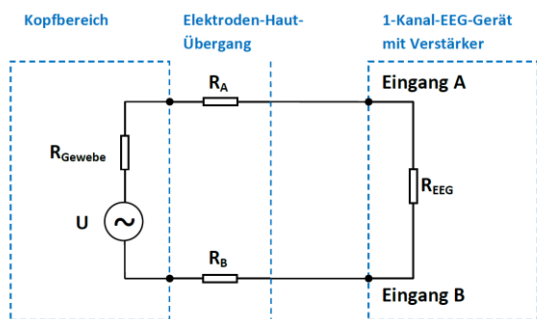


**Abb. 5:** Aufbau eines Analogieexperimentes zum Dipolmodell der EEG-Entstehung; die Schüler/innen positionieren 9V-Blockbatterien (Modelldipole) geometrisch unterschiedlich zu fest positionierten Messelektroden und protokollieren die dabei an einem Voltmeter gemessenen Gleichspannungen.

Im Speziellen ist es durch den Einsatz unterschiedlicher Alltagsgegenstände als Analogiegeber sowohl möglich das membranbiophysikalische als auch das Dipolmodell der EEG Entstehung zu veranschaulichen, wodurch die Schüler/innen letztendlich beide Modelle miteinander in Beziehung stellen können.

#### 4.2. Experimentieren an Ersatzschaltkreisen

Ersatzschaltkreise bieten nicht nur eine theoretische Veranschaulichung des Eingangsbereichs eines EEG-Geräts, sondern lassen sich auch unkompliziert mit Hilfe geeigneter Bauelemente durch die Schüler/innen unter Anleitung nachbilden (Abb. 6).

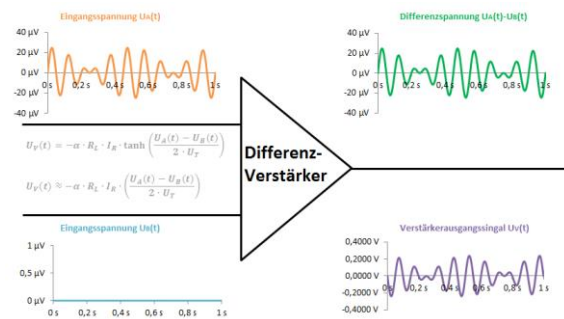


**Abb. 6:** Einfaches Ersatzschaltbild des Eingangsbereichs eines 1-Kanal-EEG-Geräts [5]; die Potentialschwankungen im Kortex werden durch eine Wechselspannungsquelle sowie organische Gewebestrukturen und zentrale Bauteile des EEG-Geräts durch ohmsche Widerstände elementarisiert.

Im Rahmen des Schülerforschungstages experimentieren die Schüler/innen mit solchen nachgebildeten Ersatzschaltkreisen. Sie variieren dabei die Dimensionierung der verschiedenen Bauelemente und erkunden hierdurch besondere Merkmale und Eigenschaften der EEG-Technik, deren Kenntnis sie benötigen, um anschließend eine EEG-Kurve korrekt interpretieren zu können bzw. um die eigentliche elektroenzephalographische Messkurve von unvermeidbaren Messfehlern, sog. Artefakten unterscheiden zu können.

#### 4.3. Arbeiten mit Computersimulationen

Die in der Elektroenzephalographie notwendige Differenzverstärkung hat zur Folge, dass eine EEG-Aufzeichnung stets ein Kunstprodukt der von Messelektroden erfassten Potenziale ist [2]. Halbleiter und Mikroelektronik spielen in vielen aktuellen gymnasialen Physiklehrplänen (z. B. Bayern) allerdings eine untergeordnete Rolle, es ist daher davon auszugehen, dass die wenigsten Schüler/innen mit den Funktionsweise von Transistor und Operationsverstärker hinreichend für das Verständnis der Grundprinzipien der EEG-Verstärkertechnik vertraut sind. Die Schüler/innen erarbeiten die Verstärkertechnik im Rahmen des Schülerforschungstages daher nicht anhand geeigneter mikroelektronischer Schaltungen sondern mit Hilfe einer speziell für den Schülerforschungstag entwickelten Computersimulation.



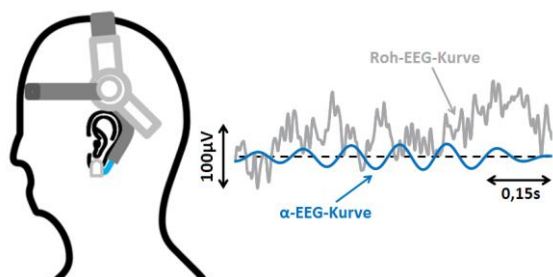
**Abb. 7:** Beispiel des Ausgabebildschirms der Simulation einer Referenzableitung; allgemein lassen sich in der Computersimulation die Amplituden, Frequenzen und Modulationen der Eingangssignale sowie die Parameter des Differenzverstärkers sowohl durch direkte Eingabe, wie auch durch Verwenden vorgefertigter Schieberegler verschieden einstellen, wobei sich der Ausgabebildschirm interaktiv an die momentane Einstellung anpasst. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Szenarien leicht simulieren.

Diese Computersimulation eines Differenzverstärkers bietet den Schüler/innen die Möglichkeit schnell, intuitiv und wenig arbeitsintensiv dies in unterschiedliche Szenarien zu simulieren und so unter anderem Vor- und Nachteile von bipolarer und Referenzableitung (Abb. 7) sowie die Grenzen der Differenzverstärkung phänomenologisch zu erkunden, ohne dabei auf die genaue mikroelektronische Architektur des Differenzverstärkers eingehen zu müssen.

#### 4.4. Aufzeichnen eigener elektroenzephalographischer Messkurven

Nachdem die notwendigen physikalischen und biophysikalischen Grundlagen gelegt sind, nehmen die Schüler/innen und Schüler von sich selbst elektroenzephalographische Kurve auf und untersuchen diese anhand der Auswertungsparameter Amplitude, Frequenz und Morphologie. Dabei stellen sie fest, dass oftmals erst bei einer Bandpassfilterung der Roh-EEG-Kurve auf bestimmte empirisch und historisch

bedingte Frequenzintervalle, sog. EEG-Bänder [3], eine sinnvolle Auswertung möglich ist (Abb. 8).



**Abb. 8:** Ausschnitt einer mittels Referenzableitung zwischen Stirn und Ohrhäppchen aufgenommenen Roh-EEG-Kurve, sowie deren Filterung dieser auf den Frequenzbereich des sog.  $\alpha$ -EEGs zwischen acht und dreizehn Hertz. Die Roh-EEG-Kurve erscheint dabei chaotisch und wenig aussagekräftig, während sich im  $\alpha$ -EEG eine klare sinus- und spindelförmige Modulation zeigt.

Des Weiteren beobachten die Schüler/innen Veränderungen im EEG bei verschiedenen körperlichen und geistigen Zuständen, z.B. beim Kopfrechnen, bei Entspannung oder in verschiedenen Phasen des Schlafes. Letzteres wird speziell in der abschließenden Etappe des Schülerforschungstages thematisiert, die sich mit einem der bedeutsamsten und gleichzeitig alltagsnahsten Anwendungsbeispiele der Elektroenzephalographie, dem Schlaf-EEG [6], beschäftigt.

## 5. Ausblick

Der vorgestellte Schülerforschungstag bietet erstmals die Möglichkeit durch geeignete (Analogie-) Experimente und Elementarisierungen die Elektroenzephalographie in einer für Schüler/innen der Sekundarstufe II geeigneten und gleichzeitig interessanten Art und Weise darzustellen. Eine vollständige Durchführung des Schülerforschungstages am M!ND-Center der Universität Würzburg hat allerdings noch nicht stattgefunden. Dies ist jedoch im Rahmen weiterer fachdidaktischer Forschungsarbeit, die sowohl Durchführung, Evaluation als auch Verbesserung des soeben vorgestellten Konzepts beinhaltet für die Zukunft fest geplant.

## 6. Literatur

- [1] Völker, Matthias; Trefzger, Thomas (2010): Lehr-Lern-Labore zur Stärkung der universitären Lehramtsausbildung. In: Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2010, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/173> (Stand: 5/2013)
- [2] Hans-Christian Hansen et al. (2012): Klinische Elektroenzephalographie. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, S. 1-67
- [3] Hans-Günther Niebeling et al. (1980): Einführung in die Elektroenzephalographie. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, S. 73 ff.
- [4] Elsholz, Markus; Appold, Friederike; Trefzger, Thomas (2011): Physik mit Herz – Ein Lehr-Lern-Labor zur Biophysik. In: Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2011, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/286> (Stand: 5/2013)
- [5] Ray Cooper et al. (1984): Elektroenzephalographie, Technik und Methoden, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart S. 52 ff.
- [6] Werner P. Koella (1988): Die Physiologie des Schlafes, Eine Einführung, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart S. 13 ff.