

Entdeckung von Dipolfeldern mithilfe des EKGs in der 11. Klassenstufe des Gymnasiums

Hans-Otto Carmesin

*Gymnasium Athenaeum Stade, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade
Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien, Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade
Fachbereich 1, Institut für Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen

Kurzfassung

Das EKG ist den Schülerinnen und Schülern bekannt, betrifft den eigenen Körper und ist für das Leben relevant. Daher motiviert es die Lernenden. Hier zeige ich, wie diese anhand des EKGs Feldlinien elektrischer Dipole und Äquipotentiallinien in spielerischer, anschaulicher und problemlösender Weise sowie auf hohem Anforderungsniveau eigenständig entdeckt haben. Dabei wurden die EKGs als Low-Cost-Versuch mit Hilfe eines grafikfähigen Taschenrechners erstellt.

1. Einleitung

Das Elektrokardiogramm, kurz EKG, macht die elektrischen Vorgänge im Herzen mithilfe eines nichtinvasiven einfachen Gerätes sichtbar und ist daher ein Standardverfahren der medizinischen Messtechnik. Für seine Entdeckung erhielt Einthoven 1924 den Nobelpreis [1]. Das EKG ist auch für das Lernen günstig, denn Interessensstudien zeigen, dass den eigenen Körper betreffende Themen auch für den Physikunterricht besonders motivierend sind [2]. Hier zeige ich, wie die Schülerinnen und Schüler am Beispiel des EKGs auf spielerische, problemlösende, anschauliche und selbstständige Weise die Feldlinien des Dipols sowie die Methode der Äquipotentiallinien entdecken können.

Ich berichte über Erfahrungen aus dem Unterricht in einem Physikkurs auf erhöhtem Niveau in Klassenstufe 11 des Gymnasiums. Zur Aufnahme des EKGs verwendeten wir den grafikfähigen Taschenrechner sowie einen zugehörigen EKG-Sensor. Ich erläutere, wie Schülerinnen und Schüler diese Low-Cost-Geräte robust, sicher und einfach bedienen können. Auch erörtere ich eingehende didaktische Reduktionen.

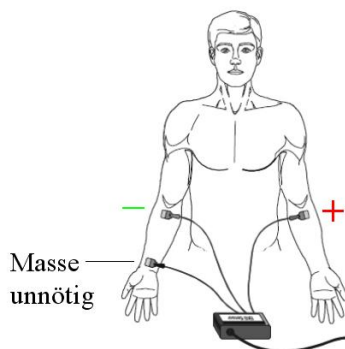


Abb.1: EKG-Sensor bei der ersten Messung.

2. Die erste Messung

Die Thematik habe ich schnell mit einer Frage nach elektrischen Spannungen am menschlichen Körper eingeführt. Die Lernenden wussten, dass im Krankenhaus EKGs erstellt werden. Daraufhin zeigte ich, wie wir EKGs auch mit Hilfe unseres grafikfähigen Taschenrechners herstellen können:

Wir messen die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten der Haut. Dazu befestigen wir in der rechten Ellenbogenbeuge ein Kontaktpflaster und schließen die grüne Krokodilklemme (negativ, s. Abb. 1) des Sensors an. Entsprechend befestigen wir in der linken Ellenbogenbeuge ein Kontaktpflaster mit der roten Krokodilklemme (positiv). Das dritte Kabel des Sensors hat eine schwarze Krokodilklemme, dient als Spannungsreferenz [3] und wurde hier nicht angeschlossen.

Wir verwenden¹ als Taschenrechner den CASIO FX-9860GII, als Messmodul das EA-200 von CASIO und als Sensor den EKG-Sensor von Vernier: Der Sensor wird an Kanal 1 des EA-200 gesteckt. Das EA-200 wird mit frischen Batterien betrieben und über das Datenkabel mit dem GTR verbunden. Im GTR wählen wir: das E-CON2-Menü, mit F1 Setup EA-200, mit WIZ



Abb.2: Die erste Messung (Screenshot): Abszisse: Zeit in s. Ordinate: Spannung etwa in mV.

¹ Geräte anderer Hersteller funktionieren sehr ähnlich.

den Wizard, mit F2 einen Vernier-Sensor, im Auswahlmenu das EKG, 2s, mit F1 OK, im Auswahlmenu Setup, EXE und zum Start der Messung nochmals EXE.

Als Ergebnis erhalten wir das EKG als Graph im Display (s. Abb. 2). Dabei ist der Vernier-Sensor bezüglich der Spannungseinheit nicht kalibriert [3]; das Spannungsmaximum liegt bei einer Größenordnung von 1 mV [4], die Spannungseinheit beträgt etwa 1 mV.

3. Erste spielerische Versuche

Nach der ersten Messung durften die Schülerinnen und Schüler ausprobieren, wie sie das EKG verändern können. Zunächst spannte die Versuchsperson Martin² die Muskeln an. Das EKG wurde heftig gestört. Die SuS erkannten, dass das EKG neben den elektrischen Signalen des Herzmuskels auch die der Skelettmuskeln aufzeichnet. Ab sofort musste Martin sich entspannen, was ihm mühelos gelang. Als nächstes wurden die Elektroden an andere Stellen geheftet. Es wurde immer ein periodisches Signal ähnlich dem von Abbildung 2 angezeigt. Allerdings änderte sich die genaue Form der Maxima und Minima ebenso wie die Spannungsdifferenz U zwischen dem höchsten Maximum und dem tiefsten Minimum. Diese Spannungsdifferenz beträgt beispielsweise bei Abb. 2 etwa $U = 1,4 \text{ mV} - 0,99 \text{ mV} \approx 0,4 \text{ mV}$, während es bei Abb. 10 etwa $1,8 \text{ mV} - 0,85 \text{ mV} = 0,95 \text{ mV}$ sind. Wir wählen diese Spannungsdifferenz U im Folgenden als Maß für die Spannung des EKGs.

Bei einem dieser spielerischen Versuche wurden beide Kontaktpflaster links des Herzens angebracht, s. Abb. 3. Dennoch gab es wieder den typischen periodischen Spannungsverlauf.

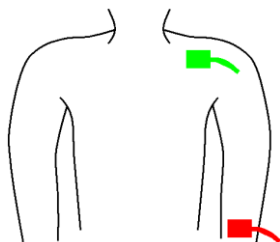


Abb.3: Selbst wenn beide Elektroden links des Herzens angebracht sind, entsteht der typische periodische Spannungsverlauf wie in Abb. 2.

4. Wie erzeugt das Herz eine Spannungsdifferenz im Arm?

Die SuS staunten darüber, dass die Spannungsdifferenz selbst dann auftrat, wenn beide Kontaktpflaster auf der gleichen Seite des Herzens angebracht war-

en. Die Frage nach der Entstehung dieser Spannung wurde zur Leitfrage:

Die SuS machten zunächst vage Vermutungen, dass Ströme oder Ladungen Ursachen sein könnten. Sie suchten dann nach elektrischen Ursachen im Herzen. Einige schlugen vor, dass im Herzen an einer Seite positive, an einer anderen negative Ladungen sitzen müssten, ähnlich wie bei einer Batterie. Nun bemerkten Sie, dass dann in der Umgebung auch ein elektrisches Feld vorhanden sein müsste. Ich ließ sie die Feldlinien auf einer Folie skizzieren (s. Abb. 4). Sie wussten bereits, dass im homogenen Feld die Spannung U zwischen zwei Punkten (mit Verbindungslinie in Feldrichtung) das Produkt aus dem Abstand d und der Feldstärke E ist, kurz $U = E \cdot d$. So entwickelten sie die Vermutung, dass die im Arm gemessene Spannungsdifferenz durch die Feldlinien eines im Herzen entstehenden elektrischen Dipols erklärbar ist. Ich forderte sie auf, dazu einen Kontrollversuch zu planen.

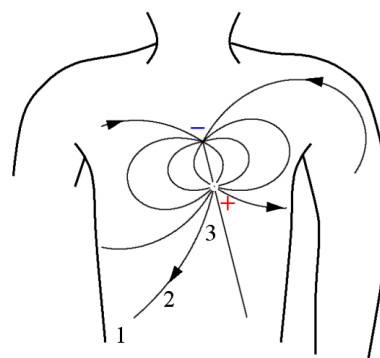


Abb.4: Die Schülerinnen und Schüler vermuteten im Herzen einen elektrischen Dipol. Sie skizzierten die zugehörigen Feldlinien und planten einen Kontrollversuch mit Hilfe der drei Messpunkte 1, 2 sowie 3.

Sie suchten für den Kontrollversuch nach einer besonders langen Feldlinie. Dabei kamen sie auf die Linie von 3 nach 1 in Abb. 4. Sie vermuteten, dass die Spannung U_{12} zwischen den Punkten 1 und 2 kleiner sein sollte als die Spannung U_{13} zwischen den Punkten 1 und 3. Denn der Abstand zwischen den Punkten 1 und 2 ist deutlich kürzer als der zwischen den Punkten 1 und 3. Sie führten den Versuch durch und erhielten die Spannungen $U_{12} = 0,5 \text{ mV}$ und $U_{13} = 2,5 \text{ mV}$. Das bestätigte die Vermutung in deutlicher Weise.

5. Linien konstanter Spannung

Als nächstes versuchten wir die Achse des Herzens zu bestimmen, also die Verbindungsstrecke zwischen den beiden Polen in Abb. 4. Die SuS erkannten, dass wir die genaue Lage der Feldlinien kaum direkt bestimmen konnten. Denn wie sollten wir eine Linie, entlang der die Spannung zunimmt, lokalisieren, wenn bei benachbarten Linien auch die Spannung zunimmt? Wir entschlossen uns stattdessen nach Linien konstanter Spannung zu suchen. Dazu

² Der Name ist frei erfunden. Martin hat morgens geduscht. Dadurch ist der elektrische Kontakt besonders effektiv, die Kontaktpflaster können mehrmals verwendet werden und es werden insgesamt nur zwei Kontaktpflaster für alle Versuche benötigt.

überlegten die SuS zunächst, wie diese Linien ungefähr liegen müssten:

Entlang einer Feldlinie nimmt die Spannung zu. In entgegengesetzte Richtung (180°) nimmt die Spannung ab. Also würde senkrecht zur Feldlinie (90°) die Spannung konstant bleiben (s. Abb. 5). Anschließend bestimmten sie eine Linie konstanter Spannung wie folgt: Sie befestigten ein Kontaktpflaster bei Punkt 1, hefteten das zweite an Punkt 2 und bestimmten die Spannung U_{12} wie oben beschrieben. Dann suchten sie nach einem Punkt 3 mit $U_{13} \approx U_{12}$ (s. Abb. 5). Entsprechend bestimmten sie weitere Punkte, erhielten die Spannungen $1,1 \text{ mV} \pm 0,2 \text{ mV}$, markierten diese auf Martins Brust und bestimmten so eine Linie konstanter Spannung.

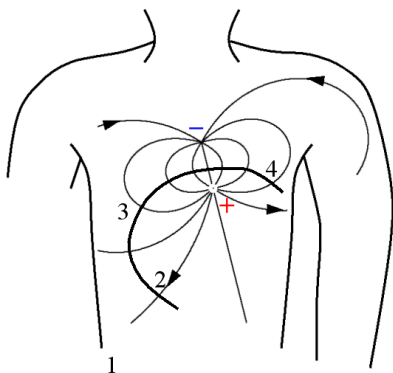


Abb.5: Die SuS bestimmten Linien konstanter Spannung und schätzten so die Lage der Achse des Herzens.

6. Was sind die Linien konstanter Spannung?

Nachdem die SuS die Nützlichkeit von Linien konstanter Spannung entdeckt hatten, führten wir die übliche Bezeichnung in sinnvoller Weise ein: Die SuS wussten bereits, dass die Spannung U_{12} die Energie ΔE_{12} pro Ladung q ist. Dieser Quotient wird auch Potential V genannt, kurz $V_{12} = \Delta E_{12}/q$. Demnach sind Linien konstanter Spannung Linien mit konstantem Potential, also Äquipotentiallinien.

7. Berechnung von Äquipotentiallinien

Als nächstes wollten wir die beobachteten Äquipotentiallinien berechnen. Wir begannen mit einem Fallbeispiel: Bei $(x|y) = (0,04\text{m}|0)$ ist die Dipolladung 11fC , während sich die Dipolladung -11fC bei $(-0,04\text{m}|0)$ befindet. Gesucht ist das Potential an dem Punkt $(0,08\text{m}|0,03\text{m})$. Die SuS berechneten zunächst die Energie für eine Probeladung 1pC bei $(0,08\text{m}|0,03\text{m})$ bezüglich der positiven Ladung 1pC : Der Abstand ist $\sqrt{(0,08-0,04)^2 + 0,03^2} \text{ m} = 0,05\text{m}$. Die Energie ist $E_1 = 11\text{fC} \cdot 1\text{pC} / (4\pi\epsilon_0 \cdot 0,05\text{m}) = 1,98\text{fJ}$. Entsprechend berechneten sie die Energie für diese Probeladung bezüglich der negativen Ladung -11fC : Der Abstand ist $\sqrt{(0,08+0,04)^2 + 0,03^2} \text{ m} = 0,124\text{m}$. Hier ist $E_2 = -11\text{fC} \cdot 1\text{pC} / (4\pi\epsilon_0 \cdot 0,124\text{m}) = -0,8\text{fJ}$. Sie addierten die Energien, um die Energie der Probeladung bezüglich des Dipols zu erhalten: $E = E_1 + E_2 = 1,18\text{fJ}$. Nun bestimmten sie das Poten-

tial, indem sie durch die Probeladung 1pC teilten: $V = E/1\text{pC} = 1,18\text{mV}$.

Die leistungsstärkeren SuS erstellten im Rahmen einer Binnendifferenzierung für dieses Rechenverfahren eine allgemeine Formel: Wir nannten den Ort der Probeladung \vec{r} und die Orte der Ladungen $\pm Q$ des Dipols \vec{r}_1 und \vec{r}_2 . So erhielten wir folgenden Term für das Potential:

$$V = Q/(4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_1|) - Q/(4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_2|)$$

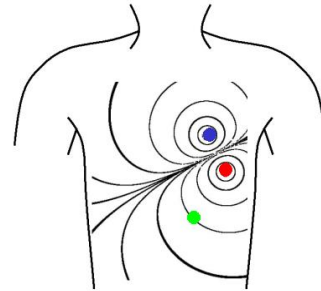


Abb.6: Äquipotentiallinien (schwarz). Grün: Aufpunkt \vec{r} . Rot: positive Ladung \vec{r}_1 . Blau: negative Ladung \vec{r}_2 .

Die Binnendifferenzierung war notwendig, da die SuS den Vektorbegriff im Mathematikunterricht noch nicht behandelt hatten. Anschließend lösten alle SuS zu diesem Term Übungsaufgaben. Hier bietet sich auch eine Veranschaulichung durch den grafikfähigen Taschenrechner an, s. Abb. 7 und 8. Auch können die SuS die Feldlinien und Äquipotentiallinien mit den Javaprogrammen visualisieren, die ich für die Abbildungen 4-6 entwickelt habe³.

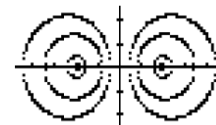


Abb.7: Äquipotentiallinien in der x-y-Ebene (Screenshot). Längeneinheit: 2 cm. Ladungen (Rechtecke) $Q = \pm 11\text{fC}$ bei $(\pm 4\text{cm}|0)$. Potentiallinien für $V = \pm 10 \text{ mV}$, $\pm 2,5\text{mV}$ und $\pm 1,25 \text{ mV}$.

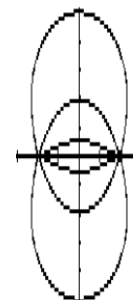


Abb.8: Feldlinien in der x-y-Ebene. Längeneinheit: 2 cm. Ladungen $Q = \pm 11\text{fC}$ bei $(\pm 4\text{cm}|0)$.

³ Die Java- und GTR-Programme stelle ich auf Anfrage zur Verfügung.

8. Lebensrettende Anwendung

Allein in Deutschland sterben jährlich 100 000 Menschen dadurch, dass das Herz aus dem Rhythmus gerät [5]. Dabei könnte meist geholfen werden, wenn innerhalb weniger Minuten wirksam gehandelt würde. Hierfür gibt es seit einigen Jahren Geräte, die Laien bedienen können und dürfen, sogenannte Defibrillatoren, s. Abb. 9. Es werden zwei Elektroden auf die Brust geklebt. Dann erstellt das Gerät das EKG, analysiert es und bietet bei Bedarf einen Stromstoß an, der das Herz wieder zum geordneten Schlagen anregt. Der Herzspezialist Gonska meint: „Wenn der Frühdefi unter optimalen Bedingungen eingesetzt würde, ließe sich die Überlebensquote beim plötzlichen Herz-Kreislauf-Stillstand auf 50 Prozent steigern.“



Abb.9: Defibrillator: Das Gerät darf von Laien bedient werden, erstellt das EKG und gibt nötigenfalls einen Stromstoß. So können allein in Deutschland jährlich tausende Menschenleben gerettet werden.

9. Didaktische Reduktionen

Das Herz wird in der Medizin etwas vereinfachend als zeitlich veränderlicher elektrischer Dipol dargestellt [4,6,7]. Diese Darstellung wird hier übernommen. Der zeitliche Verlauf des Dipols führt zu dem zeitlichen Verlauf des EKGs mit typischen Extrema, die mit den Buchstaben P, Q, R, S und T bezeichnet werden, s. Abb. 10.

a) besitzen.

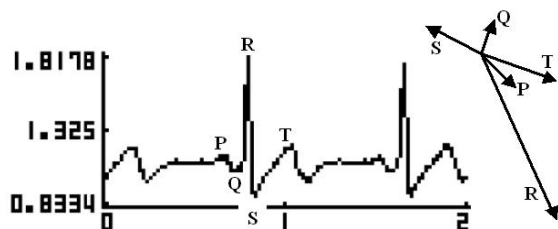


Abb.20: Zeitablauf bei einem Schüler-EKG (kommentierter Screenshot): Bei jedem Herzschlag treten die Minima Q und S sowie die Maxima P, R und T auf. Diese werden durch einen zeitlich veränderlichen Vektor eines elektrischen Dipols gedeutet, der sich im Herzen befindet.

Das elektrische Feld des Dipols wird durch elektrische Ladungen im Körper geringfügig abgewandelt [6,7]. Dieser Effekt wird bei der obengenannten

Deutung des EKGs in der Medizin oft vernachlässigt [4]. Das geschieht hier ebenso. Insbesondere würde sich mit dem hier verwendeten Gerät in der den Körper umgebenden Luft kaum ein EKG nachweisen lassen. Der periodische Verlauf des elektrischen Dipols, s. Abb. 10, wird hier zahlenmäßig durch zwei Extrema erfasst, s. o. Der elektrische Dipol wird hier durch zwei Punktladungen beschrieben. Diese didaktischen Reduktionen sind weitgehend in der Medizin erprobt, haben sich im Unterricht bewährt und erscheinen für die hier durchgeführte Analyse von Dipolfeldern sowie die Entdeckung von Äquipotentiallinien völlig unproblematisch. vorgenommen.

10. Erfahrungen mit der Unterrichtssequenz

Die SuS waren die ganze Zeit sehr motiviert. Sie waren während der Experimentier- und Entdeckungsphasen alle auf hohem Anforderungsniveau eigenständig aktiv. Hier wäre ein noch besseres Ergebnis zu erwarten, wenn ein Klassensatz der EKG-Sensoren verfügbar gewesen wäre. Ein Sensor kostet etwa 200 Euro.

Beim Aufstellen der Formel für das Potential war die Lernbarriere sehr hoch. Während die Beteiligung beim Fallbeispiel noch breit war, haben hauptsächlich leistungsstärkere Schüler den allgemeinen Term in binnendifferenzierter Weise entwickelt. Dieser Lernprozess ließe sich verbreitern, indem mehr Zeit eingeplant würde. Bei der anschließenden Anwendung der Formel waren wieder alle SuS selbstständig aktiv.

Die Unterrichtssequenz dauerte nur drei Unterrichtsstunden. Das war möglich, da die SuS sehr konzentriert und effektiv gearbeitet haben. Es kann durchaus sinnvoll sein, mehr Zeit für die Sequenz zu verwenden, beispielsweise bei der Entwicklung der Formel, s. o.

Die spielerischen Versuche der SuS waren gehaltvoll. Die resultierende Frage nach der Ursache der Spannungsdifferenz war zielführend für das Dipolfeld. Die SuS konnten alle Messungen mühelos durchführen und erhielten immer überzeugende Ergebnisse. Die SuS konnten selbstständig mit dem Dipol, dessen Feldlinien und dessen Äquipotentiallinien argumentieren und neue Versuche planen.

11. Zusammenfassung

Das EKG bietet einen motivierenden, lebensweltlichen, gesundheitsbezogenen, körperbezogenen [8,9], anwendungsorientierten, exemplarischen [10], kontextorientierten [11] und anschaulichen Zugang mit hoher Schüleraktivität zu den Themen Dipolfelder und Äquipotentiallinien. Dabei können die SuS spielerisch, entdeckend, problemlösend, zeitlich effektiv und auf hohem Niveau arbeiten. Daher empfehle ich die vorgestellte Unterrichtssequenz.

12. Literatur

- [1] Müller, Wieland; Bittmann, Frank; Winter, Rolf: Impulse Physik 2 : Medizin + Physik. Stuttgart: Klett, 1998.
- [2] Muckenfuß, Heinz: Lernen im sinnstiftenden Kontext. Berlin: Cornelsen, 1995.
- [3] Vernier (Hrsg.): EKG Sensor. Beaverton, 2004 (EKG-BTA or EKG-DIN). – Firmenschrift.
- [4] Schmidt, Robert F.; Thews, Gerhard: Physiologie des Menschen. Berlin: Springer, 1995.
- [5] Paschkewitz-Kloss, Marianne: Herzspezialist: Nicht allein auf Defibrillator verlassen. In: Badische Neueste Nachrichten 120 (2009–01–31)
- [6] Universität Tübingen (Hrsg.): EKG und Wheatstonesche Brücke. http://www.uni-tuebingen.de/fileadmin/Uni_Tuebingen/Fakultaeten/MathePhysik/Institute/IAP/MedPrakt/Anleitungen/V31.pdf. – Januar 2010.
- [7] Med. Hochschule Hannover (Hrsg.): Elektrisches Dipolfeld. <http://www.mh-hannover.de/fileadmin/institute/neurophysiologie/download/Versuchsskripte/V13.pdf>. – Januar 2010.
- [8] Carmesin, Hans-Otto: Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: Nordmeier, Volkhard (Hrsg.): Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns Media, 2001. - ISBN 3-931253-87-2
- [9] Carmesin, Hans-Otto: Messung von Beschleunigungen mit einer Bogenwasserwaage im Physikunterricht einer 11. Klasse. In: Nordmeier, Volkhard; Oberländer, Arne (Hrsg.): Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns Media, 2004. ISBN 3-86541-066-9
- [10] Wagenschein, Martin: Verstehen lehren. Weinheim: Beltz Verlag, 1999.
- [11] Duit, Reinders: Wie Ergebnisse fachdidaktischer Forschung zur Verbesserung des Physikunterrichts beitragen könnten. In: Nordmeier, Volkhard; Grötzebauch, Helmuth (Hrsg.): Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns Media, 2009. ISBN 978-3-86541-371-0