

(Physiologisches Laboratorium in Leyden.)

**Die galvanometrische Registrirung
des menschlichen Elektrokardiogramms, zu-
gleich eine Beurtheilung der Anwendung des
Capillar-Elektrometers in der Physiologie¹⁾.**

Von

W. Einthoven.

(Mit 2 Textfiguren und Tafel VII.)

Bis jetzt konnte das von Aug. D. Waller²⁾ entdeckte menschliche Elektrokardiogramm nur mit Hülfe des Capillar-Elektrometers hergestellt werden. Die mittelst dieses Instrumentes geschriebene Curve gibt bei der blossen Betrachtung eine ganz fehlerhafte Vorstellung der Potentialschwankungen, welche während der Registrirung wirklich vorhanden waren. Wünscht man letztere kennen zu lernen, so muss man sie aus der Form der registrirten Curve, den Eigenschaften der gebrauchten Capillarröhre, der angewendeten Vergrösserung und der Bewegungsgeschwindigkeit der lichtempfindlichen Platte berechnen. Auf diese Weise gelangt man zu der Construction einer neuen Curve, deren Form den genauen Ausdruck der wirklichen Potentialschwankungen darstellt.

Zur Erläuterung mag ein Beispiel dienen³⁾.

Fig. 1 stellt die registrirte Curve des Herrn v. d. W. bei Stromableitung von rechter und linker Hand dar, während Fig. 2 die construirte Curve wiedergibt.

Die Unterschiede springen in's Auge. Man vergleiche namentlich die Spitzen *C* und *D* in der registrirten Curve mit den ent-

1) Anlässlich eines Auftrages des internationalen Comitees für die Unification der Methoden in der Physiologie.

2) Philosoph. Transactions of the Royal Soc. of London vol. 180 B p. 169—194. 1889.

3) Pflüger's Arch. Bd. 60 S. 101. 1895.

Curve mittelst Construction eine neue Curve anzufertigen, wobei man genaue Messungen ausführen muss, die meistens noch mit verschiedenen Berechnungen verbunden sind.

Ich habe ein Mittel zu finden gesucht, der Construction einer neuen Curve so viel wie möglich zu entgehen, und schliesslich ein Instrument herstellen lassen, das einer Anzahl von Anforderungen Genüge leisten kann und namentlich im Stande ist, das menschliche Elektrokardiogramm unmittelbar in nahezu richtigen Verhältnissen zu schreiben.

Dieses Instrument — das Saitengalvanometer — besteht der Hauptsache nach aus einem dünnen versilberten Quarzfaden, der wie eine Saite in einem starken magnetischen Felde ausgespannt ist. Führt man einen elektrischen Strom durch den Quarzfaden, so zeigt dieser eine Bewegung, die ebenso wie die Quecksilberbewegung im Capillar-Elektrometer bei starker Vergrösserung beobachtet und photographirt werden kann. Indem man die Saite stärker oder schwächer spannt, ist man im Stande, die Empfindlichkeit des Galvanometers innerhalb weiter Grenzen sehr genau zu reguliren.

Die Theorie sowohl wie die praktischen Einzelheiten des neuen Instrumentes mögen hier unerwähnt bleiben¹⁾. Nur in Rücksicht auf die Vergleichung mit dem Capillar-Elektrometer ist es nicht ohne Interesse, einige Eigenschaften, wodurch das Saitengalvanometer sich auszeichnet, näher zu erörtern.

Selbstverständlich müssen wir dem Umstande Rechnung tragen, dass durch den Ausschlag des Saitengalvanometers eine Stromstärke, durch den Ausschlag des Capillar-Elektrometers eine elektrische Spannung gemessen wird. Aber hierzu bemerken wir, dass jedes Mal, wenn man Schwankungen der Spannung oder der Stromstärke

the Royal Soc. of London vol. 48 p. 89. 1890. — Id., On the time-relations of the excursions of the capillary electrometer. Philos. Trans. of the Royal Soc. of London vol. 183 A p. 81. 1892. — J. Burdon-Sanderson, The electrical response to stimulation of muscle. Part II. The journal of physiol. vol. 23 p. 325. 1898. — Eine Vereinfachung der Ausmessung im rechtwinkligen Coordinatensystem findet man bei S. Garten, Ueber ein einfaches Verfahren zur Ausmessung der Capillarelektrometer-Curven. Pflüger's Archiv Bd. 89 S. 613. 1902. In letzterer Schrift wird auch ein Ueberblick über die anderen Messungsverfahren gegeben.

1) Siehe über dieselben W. Einthoven, Ein neues Galvanometer. Drude's Annalen der Physik. Auch in „Onderzoekingen“ Physiol. Laborat. Leyden 2. Reihe Bd. 5.

misst, der Quecksilbermeniscus sowohl wie die Saite sich in Bewegung befinden. Und während der Bewegung muss das Capillar-Elektrometer durch elektrischen Strom geladen oder entladen werden, während die Saite im magnetischen Felde eine gegenelektromotorische Kraft entwickelt. Ausserdem muss bei constantem, grossem Widerstande mit zu vernachlässigender Selbstinduction, wie es bei elektrophysiologischen Untersuchungen in der Regel vorkommt, die Stromstärke von Augenblick zu Augenblick proportional der wirksamen elektromotorischen Kraft sein. So dass der principielle, zwischen dem Elektrometer und dem Galvanometer bestehende Unterschied keine Verhinderung für die gegenseitige Vergleichung beider Instrumente zu sein braucht.

Das Saitengalvanometer bietet, verglichen mit dem Capillar-Elektrometer, verschiedene Vorzüge.

1. Erstens wird in vielen Fällen und jetzt besonders beim Registriren des menschlichen Elektrokardiogramms der Ausschlag des Saitengalvanometers bei vollkommener Aperiodicität schneller und grösser sein als derjenige des Capillar-Elektrometers. Diese grössere Empfindlichkeit des Saitengalvanometers muss theilweise dem Umstande zugeschrieben werden, dass ein feiner Quarzfaden trotz seiner grösseren Länge doch um viele Male leichter ist als ein Quecksilberfaden des Capillar-Elektrometers. Ein Quarzfaden kann 10 Mal dünner sein, also einen 100 Mal geringeren Querschnitt besitzen, während das specifische Gewicht des geschmolzenen Quarzes ungefähr 5 bis 6 Mal kleiner ist als dasjenige des Quecksilbers. Ausserdem muss bei der Berechnung der lebendigen Kraft einer sich bewegenden Quarzsaite in Betracht gezogen werden, dass nur die Mitte, d. h. also der die grösste Verschiebung zeigende Theil, mikroskopisch beobachtet wird. Alle anderen Theile der Saite bewegen sich weniger.

2. Indem man die Spannung der Saite ändert, kann man die Empfindlichkeit des Saitengalvanometers innerhalb weiter Grenzen leicht und genau reguliren, so dass man bei der Herstellung der Curven gleichsam von selbst dazu kommt, das Verlangen des internationalen Comitees für die Unfication der Methoden in der Physiologie zu befriedigen. Es kostet keine Mühe, dafür zu sorgen, dass die Anzahl der Millimeter eines Ausschlages in einfachem Verhältniss zu der Anzahl der Millivolts der entsprechenden Spannung oder zu der Anzahl der Micrampères der Stromstärke steht.

3. Im Saitengalvanometer ist der Ausschlag genau proportional der Stromstärke, und besteht eine vollkommene Gleichheit zwischen den Ausschlägen nach rechts und nach links, während beim Capillar-Elektrometer sowohl die Proportionalität zwischen den Ausschlägen und den Potentialunterschieden wie die Gleichheit der Ausschläge nach dem Quecksilber und nach der Schwefelsäure hin oft viel zu wünschen übrig lassen.

4. Im Capillar-Elektrometer wird die Bewegung des Meniscus gedämpft durch die Reibung von Quecksilber und Schwefelsäure beim Hindurchströmen durch eine enge Röhre. Unsichtbar kleine Verunreinigungen können die Bewegung des Quecksilbermeniscus erschweren und sogar ganz verhindern. Manche Capillarröhre musste schon nach relativ kurzem Gebrauch durch eine neue ersetzt werden, weil die Bewegung des Meniscus „stockte“.

Im Saitengalvanometer dahingegen sind Luftdämpfung und elektromagnetische Dämpfung wirksam, welche beide an Regelmässigkeit nichts zu wünschen übrig lassen. Die elektromagnetische Dämpfung kann ausserdem durch Veränderung der Feldstärke und des Widerstandes im Galvanometer nach Willkür beeinflusst werden.

5. Die elektrische Isolation des Saitengalvanometers ist leichter herzustellen als diejenige des Capillar-Elektrometers, und eine Erscheinung wie das „Kriechen“ kommt beim Galvanometer nicht vor.

6. Die Saite bietet gewisse Vorzüge bei der Beobachtung und der Projection eines stark vergrösserten Bildes. Die Apertur des Linsensystems, das bei der Bildformung gebraucht wird, ist bekanntlich ein wichtiges Moment für den Betrag der nützlichen Vergrösserung, die angewendet werden kann. Nun kann man zwar bei der Projection des Quecksilbermeniscus im Capillar-Elektrometer Linsen mit einer möglichst grossen Apertur benutzen, es ist aber deutlich, dass dieselben keinen Vortheil bieten können, solange die Beleuchtungslinsen eine geringere Apertur besitzen¹⁾. Beim Capillar-Elektrometer ist die Beleuchtungslinse durch die Röhre oder das Kästchen mit Schwefelsäure von dem Quecksilberfaden getrennt²⁾; der Objectabstand dieser Linse muss also relativ gross, ihre Apertur klein sein.

1) Man beachte, dass es sich hier um die Abbildung undurchsichtiger Gegenstände handelt.

2) Wenigstens wenn man behufs der Projection keine anderen, wichtigeren Vortheile preiszugeben wünscht.

Dahingegen kann man beim Saitengalvanometer ebenso gut die Beleuchtungslinse wie die bilderzeugende Linse bis auf eine willkürlich kleine Distanz der Saite anschieben. Man wird also in den Stand gesetzt, Trockensysteme von möglichst grosser Apertur mit gutem Erfolg zu benutzen.

Gewöhnlich projicirt man das Bild auf eine nahe vor der photographischen Platte befindliche Cylinderlinse, welche das Licht senkrecht zur Richtung ihrer Achse concentriren soll. Bei einer derartigen Concentration des Lichtes ist die Saite auf's Neue im Vortheil gegen den Quecksilbermeniscus. Denn beim geraden Saitenbilde bleibt die scharfe Abgrenzung zwischen Licht und Dunkel unverändert, während der runde Quecksilbermeniscus nothwendiger Weise einen unscharfen Saum bilden muss.

7. Und schliesslich ist die Behandlung des Saitengalvanometers einfacher. Man bedarf keiner besonderen Manipulationen, um das Werkzeug nach dem Gebrauch in Ruhe zu setzen. Es steht also immer für eine eventuelle Messung sofort bereit, was vom Capillar-Elektrometer nicht gesagt werden kann.

Auf Tafel VII sind die mittelst des Saitengalvanometers registrirten Elektrokardiogramme von sechs Personen reproducirt. Während des Photographirens der Curven wurde jedes Mal durch das regelmässige Anbringen von Schatten nach der vorzüglichen Methode Garten's¹⁾ ein Coordinatensystem auf der empfindlichen Platte entworfen. Der gegenseitige Abstand der Linien ist so gewählt, dass das ganze Feld in Quadrate von ungefähr 1 qmm getheilt ist.

Die Bewegungsgeschwindigkeit der photographischen Platte beträgt 25 mm pro Secunde, so dass eine Abscisse von 1 mm den Werth von 0,04 Secunde hat, während die Saitenspannung derart regulirt ist, dass ein Ordinat von 1 mm einer elektromotorischen Kraft von 10^{-4} Volt entspricht. Durch die Wahl dieser runden Zahlen entsprechen die Curven den schon oben erörterten Anforderungen des internationalen Comitees.

Am unteren Ende der meisten Photogramme sieht man eine Normalcurve abgebildet, die hergestellt wurde, indem man den

1) Dr. Siegfried Garten, Ueber rhythmische elektrische Vorgänge im quergestreiften Skelettmuskel. Abhandl. der kgl. sächs. Gesellsch. der Wissenschaften zu Leipzig, math.-phys. Classe, Bd. 26 Nr. 5 S. 331. 1901.

menschlichen Körper durch einen gleich grossen Rheostatenwiderstand ersetzte und dann plötzlich eine elektromotorische Kraft von 1 Millivolt in den Kreis einschaltete. In Nr. 6 ist das Schreiben der Normalcurve unterlassen, während in Nr. 4 zwei Mal 1 Millivolt angebracht worden ist. Diese Figur zeigt die vollkommene Proportionalität der Ausschläge mit den elektromotorischen Kräften.

Obgleich die Vergrösserung eine 660fache ist und man also nicht erwarten darf, dass die Ränder der Saite scharf abgebildet sind, so ist man doch im Stande, eine Randverschiebung von 0,1 mm mit Sicherheit wahrzunehmen. Dazu betrachte man nur eine der Normalcurven, z. B. Nr. 4; man kann sich leicht überzeugen, dass die Ausschläge für 1 und 2 Millivolt hier bis auf weniger als 0,1 mm genau 10 und 20 mm betragen.

Die Bewegung der Quarzsaite ist, wie man an den Normalcurven sehen kann; aperiodisch und sehr schnell, so dass das galvanometrisch registrierte Elektrokardiogramm ziemlich genau den Ausdruck der Potentialschwankungen darstellt, welche während der Registrierung zwischen der rechten und linken Hand der Versuchsperson vorhanden waren. Dies trifft für die niedrigeren Spitzen *P*, *Q*, *S* und *T* in der Regel ohne merklichen Fehler zu. Für die hohe und scharfe Spitze *R* jedoch müsste namentlich in den Photogrammen 3 und 4 eine Correction angebracht werden, und zwar müsste der äusserste Gipfel der Spitze ein wenig nach links und oben verschoben werden. Die erforderliche Correction bleibt jedoch gering und beträgt nach einer globalen Schätzung für die Verschiebung nach links weniger als 0,2 mm und für die Erhöhung weniger als 1 mm.

Wünscht man eine grosse Genauigkeit zu erzielen, so kann man die Curven des Saitengalvanometers ganz auf dieselbe Weise wie diejenigen des Capillar-Elektrometers behandeln und aus den der registrierten Curve entnommenen Daten eine neue Curve construiren. Aber dies wird in vielen Fällen kaum nöthig sein.

Das Photogramm Nr. 3 stellt das Elektrokardiogramm derselben Person dar, deren capillar-elektrometrische Curve in der Textfigur abgebildet ist. Vergleicht man die registrierte Curve Nr. 3 der Tafel mit der früher construirten Curve der Fig. 2 im Text, so fällt es auf, dass beide einander sehr ähnlich sind. Die Spitzen *P*, *Q*, *R*, *S* und *T* sind nicht nur in beiden Curven vorhanden, sondern haben auch in beiden die gleiche relative Höhe. In der construirten Curve ist 1 Millivolt Ordinatlänge einer Abscissenlänge von 0,1 Secunde

gleich gemacht, während in der galvanometrischen Curve 1 Millivolt Ordinatlänge einer Abscissenlänge von 0,4 Secunde entspricht. Die galvanometrische Curve ist also in der Richtung der Abscissen zusammengedrückt, was auch schon bei oberflächlicher Betrachtung der Curve in die Augen fällt.

Ferner macht die galvanometrische Curve wegen der gleichmässigen Uebergänge von der einen Spitze nach der anderen den Eindruck, dass sie in den kleinen Einzelheiten besser mit der Natur übereinstimmt als die construirte Curve. Der Natur der Sache nach konnte nur eine beschränkte Anzahl von Punkten dieser letzteren genau berechnet werden, während man den übrigen Theil der Curve derart construiren musste, dass man die berechneten Punkte so gleichmässig wie möglich mit einander verband. Aber diese kleinen Unterschiede sind unbedeutend.

Es dürfte einigermaassen befriedigen, dass mit Hülfe des neuen Instrumentes auf anderem Wege und auf einfache Weise eine vollkommene Bestätigung der Resultate gefunden wird, welche sich früher mit Hülfe des Capillar-Elektrometers und durch Vermittlung von mehr oder weniger ausführlicher Berechnung und Construction ergeben hatten. Denn hierdurch wird ein zweifacher Beweis geliefert: erstens für die Tüchtigkeit der Theorie und die praktische Brauchbarkeit der früher angewendeten Methoden und zweitens für die Richtigkeit und die Genauigkeit des neuen Instrumentes selbst.

Die sechs Elektrokardiogramme von Tafel VII sind aus einer grösseren Zahl ausgewählt und nach den Dimensionen der abwärts gerichteten Spitze *S* — siehe die Textfigur — geordnet. Bei 1 und 2 bleibt die Curve auf der Stelle, wo *S* sich befinden sollte, oberhalb der Nulllinie der Diastole; bei 3 und 4 ist *S* nur klein, bei 5 und 6 dahingegen gross. Die Nummern 1 und 6 geben in dieser Hinsicht die äussersten an, welche in unserer Sammlung von Elektrokardiogrammen vorhanden sind, während dahingegen Nr. 8, das Elektrokardiogramm des Herrn v. d. W., eine Art von Norm darstellt, womit wir alle anderen Nummern leicht vergleichen können.

Merkwürdig ist die Constanz der Form der Curve für eine bestimmte Person. Diese Form scheint sich im Laufe der Zeit sogar so wenig zu verändern, dass man mit nur geringer Uebung manches Individuum an seinem Elektrokardiogramm wieder erkennen kann.

Wir schliessen diesen Aufsatz mit einer Bemerkung über die

kleinen, unregelmässigen Schwingungen, die in den meisten Elektrokardiogrammen sichtbar sind, wo sie eine Höhe von 0,1 bis 0,5 mm und mehr erreichen, aber bisweilen, z. B. in Nr. 1 des Herrn A d., auch ganz wegbleiben können. Diese Schwingungen werden nicht durch Erschütterungen des Bodens oder andere, durch eine mangelhafte Untersuchungstechnik bedingte Unregelmässigkeiten erzeugt, was leicht durch die vibrationslose Normalcurve, die man am Ende nahezu jeder Reihe von Elektrokardiogrammen findet, bewiesen wird. Sie müssen also durch elektromotorische Wirkungen im menschlichen Körper selbst hervorgerufen werden, und es taucht die Frage auf, ob sie ihren Ursprung der Herzthätigkeit oder vielleicht der Wirkung anderer Organe verdanken. Wir dürfen erwarten, dass eine absichtlich angestellte Untersuchung auf diese Frage eine entscheidende Antwort zu bringen vermag.
