

Ein einfaches Instrumentarium zur Herstellung des Elektrenkephalogramms.

Von

L. J. Koopman und N. Hoelandt, Amsterdam.

Mit 5 Textabbildungen.

(Eingegangen am 21. Februar 1936.)

H. Berger in Jena hat uns in seinen grundlegenden Arbeiten erstmalig den Weg gezeigt, in welcher Weise die Ströme der grauen Hirnrinde graphisch dargestellt werden können¹. Diese Ströme setzen sich zusammen aus den von ihm genannten α -Wellen mit superponierten β -Wellen; die β -Wellen sind als die Resultante der Aktionsströme der Hirnzellen selbst anzusehen, während er die α -Wellen als eine Begleiterscheinung der psychophysischen Tätigkeit, welche unter Umständen zu Bewußtseinserscheinungen führt, betrachtet. Die Tatsache des Vorhandenseins dieser α -Wellen wurde unter anderem von *Adrian* und *Matthews* bestätigt².

Berger hat uns in seinen allerersten Arbeiten EEGe gezeigt, welche mit einem *Edelmannschen* Saitengalvanometer aufgenommen worden waren. Der Strom wurde dabei verschiedentlich, nach der von ihm beschriebenen Methode, mit Nadelelektroden — an der Spitze mit einem Chlorsilberüberzug versehen — an der grauen Hirnrinde selbst, ferner an der Dura, und schließlich am unversehrten Schädel unter dem Periost abgenommen und dabei Übereinstimmung in der Form der Kurven gefunden. Es handelte sich hierbei also um reine *Stromkurven* und die Schwierigkeiten, welche hier bei der Aufnahme entstehen, sind wohlbekannt:

Verschiedenheiten des Ohmschen Widerstandes des zwischen Stromerzeuger und Stromabnahmestellen gelegenen stromdurchflossenen Gebietes; Möglichkeit der Elektrolyse und Polarisation an den Elektroden; hierdurch entstehen Kurvenverzerrungen, welche aber durch besondere Maßnahmen zum größten Teil beseitigt werden können.

Berger hat später mit einem von Siemens & Halske eigens für seine Zwecke gebauten Oszillographen gearbeitet; der große Vorteil dieses Instrumentariums ist, daß dabei der Ohmsche Widerstand der Gewebe eine untergeordnete Rolle spielt, weil eine reine *Spannungskurve* graphisch aufgenommen wird.

Das EEG wird dabei in einer *bipolaren* Ableitung entweder vom unversehrten Schädel unter dem Periost oder mit flachen, auf der Haut liegenden Silberelektroden abgenommen: *Berger* hat in seinen wiederholten Versuchen eine absolute Kongruenz der Kurven festgestellt,

sowohl bei Abnahme direkt von der grauen Hirnrinde mit Silber-Nadel-elektroden als auch bei Abnahme der Spannungskurve mittels silberner Plattenelektroden (6×8 cm) occipito-frontal.

Wir selbst haben die Bestätigung dieser Tatsache auch bereits im Tierversuch in der Neurochirurgischen Abteilung des Herrn Dr. Ign. *Oljenick* (Akademisches Krankenhaus, Amsterdam, Abteilung Prof. *B. Brouwer*) festgestellt. Es lag also auf der Hand, auf diesem Wege weiterzugehen.

Die Schwierigkeit, diese Versuche in jeder psychiatrischen Klinik durchführen zu können, ist nun rein praktisch-finanzierlicher Art: ein Oszillograph kostet nämlich rund etwa hfl. 5000.—!

Abgesehen von der Frage in welcher Weise die Energie in der grauen Hirnrinde *erzeugt* wird ³, stellten wir zunächst folgendes Postulat auf:

Es muß möglich sein mit einem einfachen, bzw. billigen, aber absolut zuverlässig arbeitenden Instrumentarium eine richtige, unverzerrte Spannungskurve der Hirnströme aufzunehmen, wobei die Elektroden in einfacher Weise an dem unversehrten Schädel des Patienten befestigt werden können.

Auf Grund unserer eben genannten Tierversuche in der Klinik des Herrn Dr. *Oljenick*, sowie der dabei gewonnenen Kurven, überlegten wir uns zunächst, wie die Energieverteilung im betreffenden Objekt vor sich geht. Nur in dieser Weise ist es möglich, zu einem klaren Einblick in die elektrischen Vorgänge in der grauen Hirnrinde zu kommen.

Die Potentiale, welche von der grauen Hirnrinde abgenommen werden, wechseln periodisch Richtung und Amplitudengröße; sie sind also als Wechselströme einer gewissen Frequenz anzusehen.

Es gibt nun zwei Wege, diese Energie abzunehmen:

1. mittels Kondensatorelektroden;
2. mittels direkter Abnahme von Strom oder Spannung.

Zu 1. Falls wir die Energie nach der erstgenannten Methode abnehmen würden, so setzen wir voraus, daß sich die elektrische Energie der grauen Hirnrinde auf dem Wege der kapazitiven Kopplung mit der Muskelschicht auf dem Schädel überträgt; da diese Muskelschicht einen bestimmten elektrischen Widerstand hat, so wird hier eine Potentialverteilung stattfinden.

Angenommen nun, daß sich die Energie kapazitiv überträgt, so wird dieselbe wiederum mittels Kondensatorelektroden abgenommen werden können.

Diese kapazitive Energieübertragung hängt aber wiederum von der nachfolgenden einfachen mathematischen Überlegung ab:

$$R_c = \frac{1}{\omega C},$$

wobei

R_c = Widerstand eines Kondensators im Wechselfeld,
 $\omega = 2\pi \sim$, wobei \sim = Frequenz des betreffenden Wechselstromes,
C = Kapazität des Kondensators ist.

Aus dieser einfachen Formel ersieht man sofort, daß R_c im umgekehrten Verhältnis steht zur Frequenz, mit anderen Worten, bei niedriger werdender Frequenz wächst R_c dementsprechend und umgekehrt.

Aus sämtlichen von *Berger* sowie der übrigen Autoren publizierten Kurven geht nun hervor, daß es sich hier um Niederfrequenzströme handelt, so daß es ausgeschlossen ist, die Energie mittels Kondensator-elektroden abzunehmen.

Zu 2. Die graue Hirnrinde wird umgeben von Schichten, welche je einen verschiedenen spezifischen Widerstand haben; es ist hier zu unterscheiden zwischen der Hirnrinde selbst, den Hirnhäuten, der Tabula interna, der Diploe, der Tabula externa, sowie der Kopfschwarte. Alle diese Gebilde haben einen verschiedenen spezifischen Ohmschen Widerstand: sie sind für elektrische Ströme mehr oder weniger leitfähig. Dementsprechend verteilt sich das Potential in einer Weise, als wenn die fraglichen Schichten einer Energiequelle parallelgeschaltete Widerstände wären. Wir haben, wie bereits gesagt, im Tierversuch die verschiedenen Schichten untersucht, und dabei stellte sich an Hand der gewonnenen Kurven heraus, daß dieselben einen synchronen Verlauf hatten.

Es ergab sich weiterhin, daß die Potentiale in den verschiedenen Schichten kongruent sind: hätten wir uns nun einer Apparatur bedient, welche eine Stromabnahme infolge seines Eigenwiderstandes verursacht, so würde dieser Widerstand naturgemäß eine Änderung in der Potentialverteilung in den zwischen den Elektroden gelegenen Schichten herbeiführen. Diese Änderung würde größer werden, je nachdem der Widerstand des Meßkreises kleiner wird (man muß hierbei auch den Übergangs-widerstand an den Ableitungsstellen in Betracht ziehen).

*Tönnies*⁴ hat im „Journal für Psychologie und Neurologie“ bereits eine theoretische Darstellung der möglichen Energieverteilung gegeben und dies an Hand eines Schemas der Äquipotentiallinien erläutert, wir möchten an dieser Stelle auf diese Darlegung verweisen.

Gleichzeitig bemerken wir aber, daß es unseres Erachtens vom technisch-physikalischen Standpunkt aus nicht richtig ist, auf der einen Seite von irgendeiner Stelle der grauen Hirnrinde und andererseits vom Auge abzuleiten. In dieser Weise werden immer größere oder kleinere Potentialverschiebungen entstehen, infolge des verschiedenen spezifischen Widerstandes der zwischenliegenden Gewebe. Falls man nämlich die graue Hirnrinde als Energiequelle betrachtet, so liegen die verschiedenen Gewebeteile als Vorschaltwiderstände mit ihr in Serie, jedes Gewebeteil hat aber, wie gesagt, eine verschiedene spezifische Leitfähigkeit, so daß

hierdurch Potentialverzerrungen zustande kommen. Die *Bergersche* Methode zur Herstellung des EEGs ist also im Prinzip nach unserem Ermessen die richtige Methode, da sämtliche Gewebeteile als zum Meßkreise parallelgeschaltete Widerstände liegen und die Spannungskurve unverzerrt abzunehmen gestatten.

Falls man also ein entsprechend empfindliches Instrumentarium verwendet, welches ein reines Potentialmeßinstrument ist, so wird man das erwartete Resultat erreichen.



Abb. 1. Tragbarer Verstärker-Elektrokardiograph. Maßstab 1 : 10. Ein Kasten von $23 \times 54 \times 26$ cm Größe enthält den Aufnahmegerät, ein zweiter von den gleichen Abmessungen die Batterien, den Akkumulator, die Anschlußkabel und alles sonstige Zubehör. Die Gewichte der Kästen einschließlich Zubehör betragen 19 und 21 kg.

Ein derartiges Instrumentarium stellt der transportable Siemens-Verstärker-Elektrokardiograph dar, der laut Angabe der Siemenswerke gerade für elektrophysiologische Messungen jeder Art geeignet ist.

Der Siemens-Verstärker-Elektrokardiograph ist ein sog. Dreiröhrenverstärker (Abb. 1); obwohl die Eigenfrequenz, sowie die Einstellzeit ($8\sigma = 8$ Millisekunden) des Galvanometers für die in Frage kommende Frequenz der Hirnströme völlig ausreichend sind, war die Meßempfindlichkeit des Instrumentariums jedoch nicht groß genug *.

Aus den *Bergerschen* EEG geht hervor, daß die Frequenz der α -Wellen im Durchschnitt 10 Hz je Sekunde, die Frequenz der β -Wellen durchschnittlich 30 Hz je Sekunde beträgt, für diese Frequenzen reicht die Eigenfrequenz des Galvanometers vollständig aus.

* Wir schlagen vor, die Bezeichnung σ , welche in der medizinischen Literatur vielfach verwendet wird, zu ersetzen durch das Wort Millisekunde, das auf dem ganzen Gebiet der Physik gebräuchlich ist.

Zur Erhöhung der Meßempfindlichkeit konstruierten wir daher einen Vorverstärker in einem Kasten (Abb. 2), der in einfacher Weise auf die Kontaktstifte des Verstärker-Elektrokardiographen aufgesteckt wird *. Hierdurch wurde eine ausreichende Erhöhung der Meßempfindlichkeit erreicht.

Unsere ersten Versuche mit diesem erweiterten Instrumentarium an einem normalen gesunden Menschen haben wir in Zusammenarbeit mit Dr. *J. A. J. Barnhoorn* und Dr. *J. P. de Smet* (R. K. Psychiatrische Inrichting „St.

Willibrordus-Stichting“) in Heiloo (Niederlande) ausgeführt, wobei die Plattenelektroden auf der Kopfhaut occipito-frontal befestigt wurden. Es ist nicht erforderlich die Kopfhaare abzurasieren. Diese Elektroden

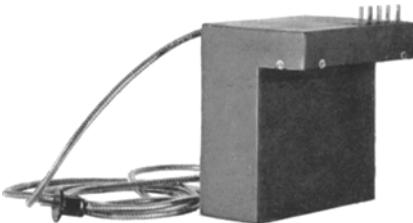


Abb. 2. Vorverstärker.

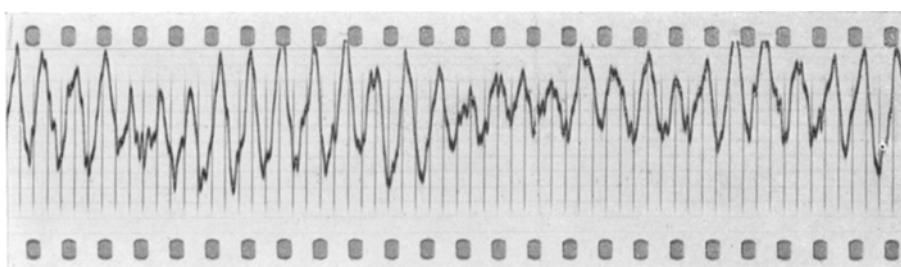


Abb. 3. Elektrenkephalogramm der „St. Willibrordus-Stichting“, Heiloo.

wurden zunächst mittels Gummibänder gehalten, dies ist nicht praktisch, denn die Elektroden können sich während des Betriebes verschieben; eine ausgezeichnete Methode ist aber, die Elektroden in einer gewöhnlichen Bademütze zu befestigen, wobei die Elektroden in einem Längsschlitz verschoben werden können, es empfiehlt sich zur besseren Kontaktbildung zwischen Elektrode und Kopfhaut einen in Kochsalzlösung getränkten Flanellappen zu legen, ferner zum besseren federnden Anpressen zwischen Elektrode und Bademütze einen Gummischwamm anzubringen.

Bereits die ersten Kurven zeigten uns, daß wir das Richtige getroffen hatten. Abb. 3 zeigt einen Teil der ersten mit diesem Vierröhrenverstärker in der „St. Willibrordus-Stichting“ zu Heiloo aufgenommenen Kurve,

* Die Herstellung dieser Zusatzapparatur wurde in den Werkstätten der N. V. Almara zu Amsterdam (Tochtergesellschaft der Siemens-Reinigerwerke A. G. Berlin) ausgeführt.

welche in tadelloser Weise die α - und β -Wellen zeigt. Unsere erste Aufgabe konnten wir daher als gelöst betrachten.

Das zweite Postulat formulierten wir folgendermaßen:

Es muß möglich sein, dem Patienten irgendeinen Reiz zu geben, so daß derselbe als Funktion der Zeit in der Kurve studiert werden kann. Die Reaktionszeit des Patienten muß dabei einwandfrei aus der Kurve ersehen werden können unter völliger Ausschaltung der Reaktionszeit des Experimentators selbst.

Falls man z. B. einen Lichtreiz geben will, so ist es ausgeschlossen die *genaue* Reaktionszeit des Patienten der Kurve zu entnehmen, falls man lediglich am Instrumentarium den Drehzeiger zur Angabe der abgelaufenen Filmlänge zu Hilfe nimmt.

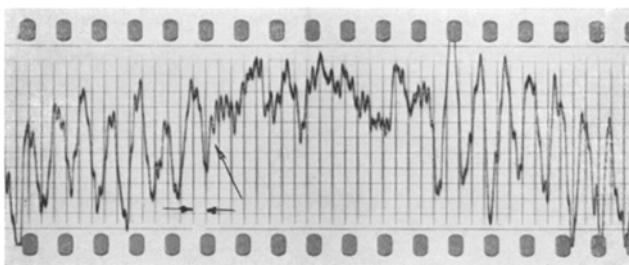


Abb. 4. Kurve mit Zeitmarkierung. Jeder Teilstreich 0,05 s; bei \rightarrow \leftarrow wurde ein Lichtreiz gegeben, die Reaktionszeit des Patienten beträgt 0,05 s (bei \nwarrow ist deutlich der Spannungsabfall in der Kurve zu erkennen).

Es kommt weiter noch der Fehler der Reaktionszeit des Experimentators selbst, der den Lichtreiz gibt, hinzu oder gar von einer dritten Person geben läßt durch Einschaltung eines Lichtsignals. Dies sind große Fehlerquellen, welche unbedingt beseitigt werden mußten, ehe das Instrument der Praxis übergeben werden konnte.

Wir haben hier eine einfache zweckentsprechende Lösung gefunden und durchgeführt:

Es befindet sich immer auf dem Film unterhalb der aufgenommenen Kurve eine flachgezogene Linie, an der man erkennen kann, daß man die Kurve richtig (also nicht unterst oben) betrachtet. Wir haben nun eine Federvorrichtung angebracht, welche von einem neben dem Handgriff am Filmkasten montierten kleinen Hebel betätigt wird, die ausgezogene Linie unterbricht und den Zeitpunkt genau markiert. Dieser Hebel ist ferner zwangsläufig mit einem Relais verbunden, das wiederum entweder eine elektrische Glühbirne, oder ein Klingelsignal betätigt, oder aber einen faradischen Strom ganz kurz einschaltet. Falls man nun durch Umlegen dieses kleinen Hebels das Relais einschaltet, wird mit der Zeitmarkierung gleichzeitig zwangsläufig entweder ein Licht-, Hör- oder ein Gefühlsreiz gegeben.

Da nun, wie bereits gesagt, die Einschaltung des gewählten Signals zwangsläufig im gleichen Moment der Zeitmarkierung erfolgt und in dieser Weise die subjektiven Faktoren ausgeschaltet werden, kann man jetzt aus der Kurve mit Leichtigkeit die Reaktionszeit des Patienten entnehmen (s. Abb. 4).

Die Kurve der Abb. 4 ist in folgender Weise auszuwerten: Der Zwischenraum zwischen je zwei Vertikalstrichen bedeutet $\frac{1}{20}$ s, es gibt deren 6 je Zentimeter Filmlänge, die Papiergeschwindigkeit je Minute beträgt also 2 m. Auf 1 cm Papierlänge zählen wir 3 α -Wellen, auf 2 m (je Minute) wären dies also 600 α -Wellen, in 1 s also $600 : 60 = 10 \alpha$ -Wellen.

Da nach *Berger* die Periodizität der α -Wellen beim gesunden Menschen etwa 10 Hz je Sekunde beträgt, so können wir hier mit Sicherheit annehmen, daß unser Instrumentarium in tadelloser Weise die α -Wellen der grauen Hirnrinde wiedergegeben hat.

Das gleiche gilt für die β -Wellen, wir zählen hier die 3fache Zahl dieser Wellen je Zentimeter Papierlänge, dies stimmt ebenfalls mit den *Bergerschen* Angaben überein: die β -Wellen haben ungefähr die 3fache Frequenz der α -Wellen.

Aus der Kurve Abb. 4 kann man ebenfalls bei $\rightarrow \leftarrow$ ersehen, daß nach Erteilung eines Lichtreizes die Reaktionszeit der Versuchsperson 0,05 s beträgt, ferner daß bei \nwarrow ein Spannungsabfall einsetzt, der die Kurve verzerrt, erst nach 0,9 s treten die α -Wellen wiederum unverzerrt auf.

Die Kurve (Abb. 5) wurde aufgenommen in der R.K. Psychiatrisch-Neurologischen Klinik „St. Jacobus-Stichting“ (Arzt-Direktor Dr. *Ed. Hoelen*) zu Wassenaar (Holland).

Herr Dr. *L. J. Franke* schreibt uns dazu: „Es handelt sich um eine 27jährige Patientin mit rezidivierender Encephalitis lethargica. Sie zeigt die Symptome: Somnolenz, Störungen im Körperschema, Augenmuskellähmungen, Störungen im Gebiet der sensorischen sowie der sensiblen Funktionen (letztgenannte Störungen deuten auf eine Thalamuserkrankung).“

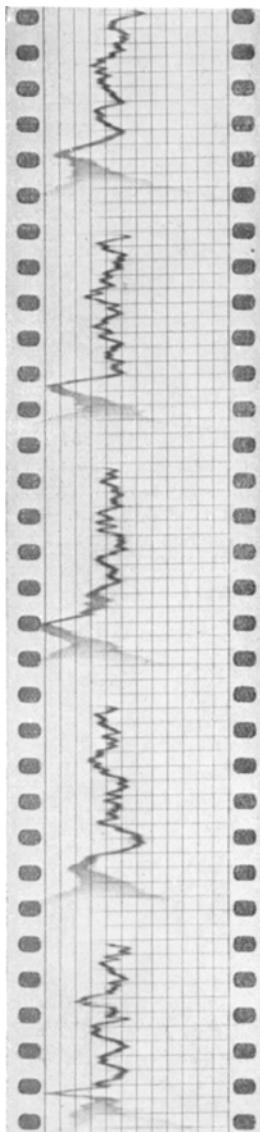


Abb. 5. Elektrenkephalogramm der „Jacobus-Stichting“, Wassenaar.

Während der Aufnahme der Kurve wurden der Patientin in regelmäßigen Zeitabständen Gefühlsreize gegeben; die Kurve selbst ist etwa 3 m lang und zeigt immer das gleiche Bild.

Wir können also sagen, daß dieses Instrumentarium voll und ganz den Ansprüchen der EEG genügt und dasselbe in richtiger Weise die elektrischen Vorgänge in der grauen Hirnrinde wiedergibt.

Die letztgenannten Versuche zur Vervollkommnung des Instrumentariums wurden von uns im Burgerziekenhuis zu Amsterdam (Arzt-Direktor Dr. S. C. M. Spoor) unter Mitwirkung des Herrn Dr. M. J. ten Raa, Provinzielle Anstalt „Duinenbosch“ zu Bakkum ausgeführt.

Sowohl Herr Dr. Spoor als auch Herr Dr. ten Raa haben uns hier viele Ratschläge erteilt, wofür wir an dieser Stelle unseren Dank zum Ausdruck bringen.

Literaturnachweis.

- ¹ Berger: Arch. f. Psychiatr. 1. Mitt. **87**, 527 (1929). — J. Psychol. u. Neur. 2. Mitt. **40**, 160 (1930). — Arch. f. Psychiatr. 3. Mitt. **94**, 16 (1931); 4. Mitt. **97**, 6 (1932); 5. Mitt. **98**, 234 (1932); 6. Mitt. **99**, 555 (1933); 7. Mitt. **100**, 301 (1933); 8. Mitt. **101**, 452 (1933); 9. Mitt. **102**, 538 (1934). — Z. Psychol. **126** (1932); **132**, 360 (1934). — ² Adrian, E. D. u. B. H. C. Matthews: Brain **57**, Teil 4 (1934, Dez.); **58**, Teil 3 (1935, Sept.). — ³ Siehe die sub 2 genannten Arbeiten in „Brain“, ferner die sub 4 genannte Arbeit von Tönnies. — ⁴ Tönnies: J. Psychol. u. Neur. **45**, H. 2/3, 154—171 (1933).
-