

Über das Elektrenkephalogramm des Menschen.

Von

Professor Dr. **Hans Berger**, Jena.

(Mit 17 Textabbildungen.)

(Eingegangen am 22. April 1929.)

Wie *Garten*¹, wohl einer der besten Kenner der Elektrophysiologie, mit Recht hervorgehoben hat, wird man kaum fehlgehen, wenn man jeder lebenden Zelle tierischer und pflanzlicher Natur die Fähigkeit zuschreibt, elektrische Ströme hervorzubringen. Man bezeichnet solche Ströme als bioelektrische Ströme, weil sie die normalen Lebenserscheinungen der Zelle begleiten. Sie sind wohl zu unterscheiden von den durch Verletzungen künstlich hervorgerufenen Strömen, die man als Demarkations-, Alterations- oder Längsquerschnittsströme bezeichnet hat. Es war von vornherein zu erwarten, daß auch im Zentralnervensystem, das doch eine gewaltige Zellanhäufung darstellt, bioelektrische Erscheinungen nachweisbar seien, und in der Tat ist dieser Nachweis schon verhältnismäßig früh erbracht worden.

*Caton*² hat bereits 1874 Versuche an Kaninchen- und Affenhirnen veröffentlicht, bei denen unpolarisierbare Elektroden entweder an der Oberfläche beider Hemisphären oder die eine Elektrode an der Hirnrinde, die andere an der Schädeloberfläche angelegt worden waren. Die Ströme wurden zu einem empfindlichen Galvanometer abgeleitet. Es fanden sich deutliche Stromschwankungen, die namentlich beim Erwachen aus dem Schlaf und beim Eintritt des Todes sich verstärkten, nach dem Tode schwächer wurden und dann vollständig schwanden. Schon *Caton* konnte nachweisen, daß starke Stromschwankungen bei Belichtung des Auges sich an der Hirnrinde einstellten, und er sprach bereits die Vermutung aus, daß unter Umständen diese Rindenströme zur Lokalisation innerhalb der Hirnrinde verwendet werden könnten.

*Fleischl von Marxow*³ hat im Jahre 1883 zuerst beobachtet, daß bei verschiedenen Tieren bei Ableitung von zwei symmetrisch gelegenen

¹ *Garten*: Die Produktion von Elektrizität. *Wintersteins* Handbuch der vergleichenden Physiologie 3. Bd., 2. Hälfte, S. 105.

² *Caton*: Brit. med. J. 2, 278 (1875). Ref. Zbl. Physiol. 4, Nr 25 (1890). Nach *Bechterew*: Die Energie des lebenden Organismus. S. 102. Wiesbaden 1902,

³ *Fleischl von Marxow*: Gesammelte Abhandlungen S. 410. Leipzig: J. A. Barth 1893 und Zbl. Physiol. 4 (1890).

Punkten der Oberfläche der Großhirnhemisphären mittels unpolarisierbarer Elektroden zu einem empfindlichen Galvanometer zunächst nur geringe oder keine Ausschläge auftraten, daß man dagegen durch periphere Reize, z. B. durch Belichtung der Augen, wenn die Elektroden in der Gegend der *Munkschen* Sehzentren lagen, deutliche Ausschläge erhielt. Chloroformierung hebt das Auftreten des Ausschlags am Galvanometer bei peripherer Reizung auf. Läßt man das Tier aus der Narkose erwachen, so treten wieder Stromschwankungen in der Hirnrinde bei peripherer Reizung zutage. Es gelang ihm, diese Ströme nicht nur von der bloßgelegten Hirnoberfläche, sondern auch von der harten Hirnhaut und sogar von dem des Periosts beraubten Schädelknochen abzuleiten. Er betont, daß man sehr darauf achten müsse, daß die Hirnrinde nicht auskühle, und fügt hinzu: „Es wird vielleicht sogar gelingen, durch Ableitung von der Kopfhaut die durch verschiedene psychische Akte am eigenen Gehirn entstehenden Ströme wahrzunehmen.“

*A. Beck*¹ hat auch an der Hirnrinde des Hundes mit unpolarisierbaren Tonelektroden und *Hermanns* Galvanometer gearbeitet. Er machte die wichtige Feststellung, daß, wenn man zwei beliebige Punkte der Rindenoberfläche miteinander verbindet, *ständig* ein an Stärke wechselnder Strom vorhanden sei. Die Schwankungen dieses Stromes fallen zeitlich mit der Atmung und den Pulsbewegungen nicht zusammen und sind auch unabhängig von Bewegungen des Tieres. Dieser Strom schwindet in der Narkose. Bei Reizung der peripheren Sinnesorgane, z. B. des Auges mit Magnesiumlicht, tritt eine starke Stromschwankung im gegenüberliegenden Occipitallappen auf, so daß man mit Hilfe dieser Stromschwankungen die Sehsphäre des Hundes abgrenzen kann.

Im Jahre 1892 haben dann *Beck* und *Cybulski*² weitere Untersuchungen an Affen und Hunden veröffentlicht. Sie fanden auch hier bei Verbindung zweier Stellen der Hirnrinde mit einem empfindlichen Galvanometer einen stetig vorhandenen, in der Stärke schwankenden Strom, bei dem sich ein Zusammenhang der Schwankungen mit dem Puls und der Atmung nicht feststellen läßt. Sie bemühten sich, noch besonders nachzuweisen, daß die Ströme in der Rinde selbst entstehen und nicht fortgeleitete Ströme darstellen. So ergab z. B. das Durchleiten starker Ströme durch die Kopfhaut keine Ablenkung der Galvanometernadel, während gleichzeitig die Hirnelektroden wie immer an ihrer Stelle lagen. Bei einer lokalen Reizung der Hirnrinde trat eine lokale Veränderung dieser Rindenströme ein. Bei Reizung der Vorderextremität trat im Gebiet des Sulcus cruciatus, bei Belichtung des Auges im Occipitallappen eine Stromschwankung auf. Diese elektrischen Veränderungen

¹ *Beck, A.*: Die Bestimmung der Lokalisation der Hirn- und Rückenmarksfunktionen vermittels der elektrischen Erscheinungen. Zbl. Physiol. 1890, Nr 16.

² *Beck* und *Cybulski*: Weitere Untersuchungen über die elektrischen Erscheinungen der Hirnrinde der Affen und der Hunde. Zbl. Physiol. 6, 1 (1892).

in der Hirnrinde entstanden um so leichter beim Affen und waren um so ausgesprochener, je näher der Reiz denjenigen stand, die in dem normalen Zustand auf das Tier einzuwirken pflegen. So wirkt z. B. leichtes Berühren mit der Hand stärker auf das Galvanometer als Kneifen der Haut. Die Verfasser sind der Meinung, daß diese elektrischen Erscheinungen an der Hirnrinde den einfachen psychischen Zuständen entsprechen.

Gotch und *Horsley*¹ haben an Katzen, Kaninchen und Affen experimentiert. Sie verwendeten unpolarisierbare Tonelektroden und das Capillarelektrometer von *Lippmann*. Sie verbanden verschiedene Teile der Hirnrinde untereinander. Dabei fehlten in Ruhe Ströme fast vollständig, jedoch trat bei jeder peripheren Reizung eine Stromschwankung auf.

*Danilewski*² hat 1891 Stromschwankungen bei peripherer Reizung an der Hirnrinde der Hunde festgestellt.

Auf Veranlassung von *Bechterew* benutzte *Larionow*³ 1899 und *Triwus*⁴ 1900 die in der Rinde auftretenden Stromschwankungen zur Lokalisation der Hör- und Sehsphäre des Hundes, ohne dabei wesentlich neue Feststellungen machen zu können.

1904 hat dann *Tschirjew*⁵ ähnliche Untersuchungen angestellt. Er kam zu der Überzeugung, daß eine Abhängigkeit dieser Ströme von der Bewegung des Blutes in den Hirngefäßen wahrscheinlich sei, so daß sie also nicht durch den Tätigkeitszustand des Zentralnervensystems hervorgerufen würden.

1912 hat dann *Kaufmann*⁶ an 24 Hunden experimentiert und mittels unpolarisierbarer Elektroden zu einem *Wiedemannschen* Galvanometer abgeleitet. Er konnte unzweideutig den physiologischen Ursprung der elektrischen Erscheinungen feststellen und auch *Tschirjews* Ansicht widerlegen. Er vermochte diese Ströme auch vom Schädelknochen abzuleiten. Er sah ebenfalls *ständig* spontane Schwankungen des Rindenstromes, und es gelang ihm auch der Nachweis von Veränderungen bei peripheren, z. B. bei optischen Reizungen.

*Prawdicz Neminski*⁷ hat dann 1913 zum ersten Male mit dem Saitengalvanometer beim Hunde die Rindenströme aufgenommen und den

¹ *Gotch* und *Horsley*: Zbl. Physiol. 1889. J₁ of Physiol. 1890.

² *Danilewski*: Zbl. Physiol. 5, Nr 1 (1891).

³ *Larionow*: Über die corticalen Hörzentren. Schriften der Klinik für Nerven- und Geisteskrankheiten. Petersburg 1899.

⁴ *Triwus*: Die negativen Stromschwankungen in der Hemisphärenrinde des Gehirns. Diss. St. Petersburg 1900.

⁵ *Tschirjew*: J. Physiol. et Path. gen. 4, 671 (1904) und Arch. Anat. u. Physiol. 1913. Physiol. Abt. S. 414, namentlich S. 442 u. 447.

⁶ *Kaufmann*: Elektrische Erscheinungen in der Großhirnrinde. Rev. Pysch., Neur. u. exper. Psychol. (russ.) 17, 403 (513) (1912). Ref. Z. Neur. 6, 1130 (1913).

⁷ *Prawdicz-Neminski*: Elektrische Gehirnerscheinungen. Zbl. Physiol. 1913, Nr 18, 951.

Einfluß peripherer Reize, die sich aber vorläufig auf die elektrische Reizung des Ischiadicus beschränkten, festgestellt.

1919 hat dann auch *Cybulski*¹ mit einem Mitarbeiter zusammen Aktionsströme des Großhirns bei Hunden und Affen mit Hilfe des Saitengalvanometers untersucht. Sie konnten die früheren Feststellungen von *Beck* und *Cybulski* nur bestätigen.

Eine größere Arbeit hat endlich im Jahre 1925 *Prawdicz Neminski*² in Pflügers Archiv veröffentlicht. Er weist darauf hin, daß so ständige Erscheinungen wie die spontanen Schwankungen der Ströme der Hirnrinde nicht von sämtlichen Forschern, sondern nur von *Beck*, *Danilewski* und *Kaufmann* festgestellt worden seien. Er selbst hat seine Untersuchungen an Hunden ausgeführt. Es wurde vermittels unpolarisierbarer Tonelektroden zu dem großen *Edelmanns*chen Saitengalvanometer abgeleitet. Es wurden außer dem „Elektrocerebrogramm“ auch der Gehirnpuls und der Blutdruck geschrieben. Auch *Neminski* kommt zu der Überzeugung, daß die Behauptung *Tschirjews*, daß eine einfache physikalische Beziehung zwischen den elektrischen Erscheinungen im Hirn und der Reibung des Blutes an den Wänden der Hirngefäße usw. bestünde, unzutreffend sei. Er konnte an dem mit dem *Edelmanns*chen Saitengalvanometer aufgenommenen Elektrocerebrogramm Wellen erster und zweiter Ordnung unterscheiden. Von den Wellen erster Ordnung kamen 10—15, von denen zweiter Ordnung 20—32 auf die Sekunde. Auch *Neminski* gelang es sowohl von der Dura, als auch vom Schädelknochen ebenso wie von der Hirnrinde selbst solche Schwankungen abzuleiten.

Die meisten der hier angeführten Autoren haben diese „Rindenströme“ als den Ausdruck der Tätigkeit der Hirnrinde des Tieres aufgefaßt, da sie sich bei Inanspruchnahme der Rindenzentren steigern, in der Narkose oder im Tod verschwinden. Es ist zweckmäßig, zwischen dem *ständig vorhandenen Strom*, der von der Hirnrinde abgeleitet werden kann, und seinen *Veränderungen bei peripheren Reizen* zu unterscheiden. Diese letzteren Stromschwankungen sind besonders empfindlich und schwinden sehr leicht bei Auskühlung der Rinde und aus sonst nicht ganz erklärlichen Gründen. Ob die Deutungen der Autoren wirklich zutreffen, ist noch immer keineswegs erwiesen. *Garten*³ hat sich dahin ausgesprochen, daß die elektrischen Erscheinungen im Zentralnervensystem entsprechend dem komplizierten Bau desselben verhältnismäßig vieldeutig seien. Werde ein Aktionsstrom beobachtet, so erhebe sich die erste Frage, ob dieser Aktionsstrom von den markhaltigen Nervenfasern stamme, oder ob er durch Erregung zahlreicher markloser Fasern

¹ *Cybulski*: Zbl. Physiol. 1919, 406.

² *Prawdicz Neminski*: Zur Kenntnis der elektrischen und der Innervationsvorgänge in den funktionellen Elementen und Geweben des tierischen Organismus. Elektrocerebrogramm der Säugetiere. Pflügers Arch. 209, 362 (1925).

³ Siehe Anmerkung 1 auf S. 527.

der grauen Substanz oder endlich durch Erregungsvorgänge der Ganglienzellen in der Rinde oder tiefliegender Kerne bedingt sei. *Garten* fügt hinzu: „Insbesondere werden sich bei Untersuchungen an der *Hirnrinde* die Verhältnisse komplizieren, da wir hier gleichzeitig Aktionsströme sehr verschiedener, bald tätiger, bald ruhender Systeme zu erwarten haben.“

Ich selbst habe 1902 mit dem Capillarelektrometer von *Lippmann* gearbeitet und mit Tonstiefelektroden von symmetrischen Stellen der beiden Großhirnhälften des Hundes entsprechend dem Vorgehen von *Fleischl von Marzow* Ströme abzuleiten versucht. In fünf Versuchen, an einer Katze und vier Hunden, gelang die Durchführung der Versuchsanordnung technisch einwandfrei, während mehrere andere Versuche mißglückten. Es fanden sich in diesen fünf Versuchen unabhängig von äußeren Reizen Schwankungen des Elektrometers, wenn die Elektroden an der Hirnoberfläche des nicht narkotisierten Tieres anlagen. Sie wurden auch einmal von zwei Stellen der Dura, die noch die beiden Großhirnhälften bedeckte, abgeleitet. Dagegen konnte das Auftreten von Stromschwankungen bei Reizung der peripheren Sinnesorgane im Gegensatz zu den Feststellungen von *Fleischl von Marzow* u. a. nur in einem einzigen dieser fünf Versuche nachgewiesen werden: Es trat beim Streichen der Vorderpfote des Hundes bei wiederholten Versuchen jedesmal eine sehr ausgesprochene Stromschwankung auf. Da es mir damals gerade auf die Einwirkung peripherer Reize auf diese von der Hirnrinde abgeleiteten Ströme ankam, so habe ich die Versuche abgebrochen.

Ich habe dann im Jahre 1907 nochmals einen Versuch mit dem Capillarelektrometer am Hunde angestellt, ohne jedoch die erwünschten Stromschwankungen bei Reizung peripherer Sinnesorgane feststellen zu können.

1910 habe ich dann mit dem kleinen *Edelmanns*chen Saitengalvanometer unter Verwendung unpolarisierbarer Tonstiefelektroden bei fünf Hunden versucht, von symmetrischen Stellen der Rinde Ströme zu erhalten. Es wurden zwar wieder in der Ruhe, d. h. ohne Einwirkung äußerer Reize, ständig kleinste Saitenschwankungen gesehen, aber auch diesmal traten größere Ausschläge weder beim Berühren der Pfote, noch bei Belichtung des Auges, noch auch bei Einwirkung starker Schallreize bei irgendeinem der untersuchten Hunde auf, obwohl sich die Tiere nicht in Narkose befanden.

Ich habe dann im vorigen Jahre, als meine unten mitzuteilenden Ergebnisse vom Menschen bereits vorlagen, nochmals drei Hunderversuche angestellt¹, bei denen das große *Edelmanns*che Saitengalvanometer und

¹ Bei allen diesen hier mitzuteilenden, seit 1924 angestellten Untersuchungen hat mir Herr Priv.-Doz. Dr. med. *Hilpert* stets in selbstlosester Weise mit Rat und Tat beigestanden, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank ausspreche.

das Doppelspulengalvanometer von Siemens und Halske, letzteres versehen mit besonders empfindlichen Einsätzen, zur Verwendung kamen. Die Hunde, die bei diesen Versuchen verwendet wurden, hatten etwa fünf Stunden vor dem Versuch innerlich 1,5 Veronal und dann noch 1 Stunde vor dem Beginn der vorbereitenden Operation 0,03—0,05 Morphin subcutan erhalten. In Anlehnung an einen Vorschlag von *Einthoven* für die Registrierung des Elektrokardiogramms beim Tiere habe ich, um die Auskühlung der Hirnrinde zu vermeiden, an Stelle der unpolarisierbaren Tonstiefelektroden, die ich früher benutzt hatte, frisch amalgamierte Zinkplättchen verwendet, die durch einen Schlitz der Dura in den Subduralraum eingeführt wurden. Diese Zinkplättchen hatten eine Länge von 12 mm und eine Breite von 4 mm; ihre vier Ecken waren, um Verletzungen zu vermeiden, abgerundet; an sie war der gut isolierte abführende Draht angelötet; sie hatten eine Fläche von 25 qmm.

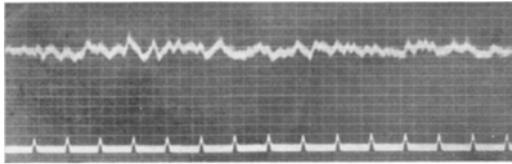


Abb. 1. 4-jährige Hündin; amalgamierte Zinkplättchenelektroden im Subduralraum rechts und links. Großes *Edelmannsches* Saitengalvanometer. Platinsäule von 10,800 Ohm. Kondensation. Widerstand im Elektrodenkreis = 360 Ohm, 10 mm = 0,001 Volt. Oben vom Hirn abgeleitete Kurve, unten Zeit in $\frac{1}{5}$ Sekunde.

Nachdem sie durch den Schlitz in der Dura eingeführt waren, durch den sie eben hindurchgingen, wurden sie in dem Subduralraum so weit vorgeschoben, daß sie in die seitlichen abhängigen Gegenden des Schädels zu liegen kamen, so daß sie mit der Oberfläche fest der von der Arachnoidea-Pia bedeckten Hirnrinde anlagen und von dem pulsierenden Gehirn gegen die Dura und gegen den Knochen gepreßt wurden. Die möglichst klein gehaltene Trepanationsstelle, die mit der *Lüerschen* Zange nur so weit erweitert wurde, daß die Zinkplättchen bequem eingeführt werden konnten, wurden mit dem bei Hirnoperationen am Menschen üblichen Wachs vollständig ausgefüllt. Durch diese Wachsmasse wurde der gut isolierte Draht hindurchgeleitet. Der Draht wurde selbst mit Wachs umgeben, und über den Trepanationsstellen wurde dann die Haut mit einigen Nähten festgelegt, so daß das Gehirn in keiner Weise der Austrocknung und Auskühlung ausgesetzt war.

Es konnte in Übereinstimmung mit den oben aus der Literatur angeführten Befunden festgestellt werden, daß sowohl bei der Anbringung dieser Elektroden über zwei Stellen derselben Hemisphäre, als auch dann, wenn die Elektroden über der rechten und linken Hemisphäre lagen, ein ständiger Strom vorhanden ist, der erhebliche Schwankungen aufweist.

Abb. 1¹ zeigt eine Aufnahme der ständigen cerebralen Stromschwankungen, die mit den amalgamierten Zinkplättchen von der rechten und linken Hemisphäre einer etwa vierjährigen Hündin zu dem großen Saitengalvanometer von *Edelmann* abgeleitet wurden. Die der Abbildung beigefügten Angaben enthalten weitere Einzelheiten über die Art der Aufnahme, den Widerstand und dergleichen mehr. Man erkennt in der Abb. 1 größere, länger dauernde und kleinere, kürzer dauernde, Schwankungen.

Genau mit der gleichen Anordnung wurden die von der Rinde beider Hemisphären ableitbaren Stromschwankungen mit dem für meine Zwecke viel empfindlicheren Spulengalvanometer von Siemens und Halske aufgenommen. Abb. 2 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus einer größeren Kurve, die in dieser Weise aufgenommen wurde, und zwar von derselben

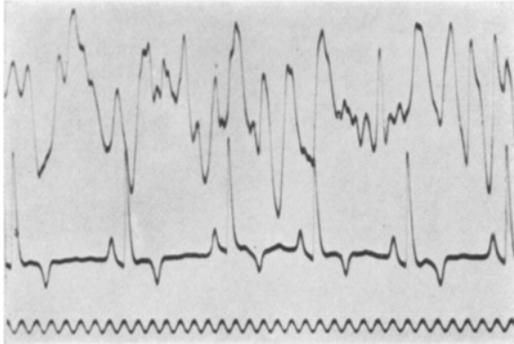


Abb. 2. Dieselbe Hündin wie in Abb. 1 und die gleiche cerebrale Ableitung. Doppelspulg galvanometer von Siemens und Halske. Zu oberst die vom Großhirn abgeleitete Kurve; darunter das Elektrokardiogramm, abgeleitet mit unter die Haut geschobenen amalgamierten Zinkstäbchen; unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden. Kondensation.

Hündin. Das Vorhandensein zweier Galvanometer ermöglichte es, gleichzeitig auch das Elektrokardiogramm aufzunehmen, das auf der Abbildung in der Mitte geschrieben ist, während oben die Kurve der cerebralen Schwankungen sich darstellt. Im Gegensatz zu der Aufnahme mit dem Saitengalvanometer geben hier die Zeitwerte Zehntelsekunden an. Das Elektrokardiogramm wurde nach dem Vorschlag von *Einthoven*² mit frisch amalgamierten Zinkstäben, die unter die Haut des Brustkorbes eingeschoben wurden, abgeleitet. Man sieht ohne weiteres, daß die Schwankungen, welche von der Oberfläche beider Hemisphären abgeleitet wurden, mit den Schwankungen des Elektrokardiogramms nicht zusammenfallen, so daß also nicht etwa die cerebrale Kurve ein entstelltes Elektrokardiogramm darstellt, eine Frage, auf

¹ Sämtliche Abbildungen sind *verkleinerte* Wiedergaben der Original-Kurven.

² *Einthoven*: Die Aktionsströme des Herzens. Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Bd. 8, 2. Hälfte, S. 790, 1928.

die wir auch noch einmal weiter unten in anderem Zusammenhang zurückkommen müssen.

Die Ausschläge der von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen sind bei einer Ableitung von zwei Hemisphären sehr viel ausgiebigere, als wenn von zwei Stellen derselben Hemisphäre, z. B. vorn von der Gegend des Sulcus cruciatus und dem Occipitallappen, abgeleitet wurde. Eine doppelseitige Unterbindung der Carotis communis hatte keinen Einfluß auf die Höhe der Ausschläge der cerebral abgeleiteten elektrischen Kurven. Allerdings wird dadurch, wie wir wissen, der Blutumlauf im Gehirn des Hundes keineswegs unterbrochen, wenn auch zunächst wohl wahrscheinlich die Blutzufuhr in ihrer Ausgiebigkeit etwas herabgesetzt wird. Auch ein vollständiges Verbluten aus der eröffneten, mit einer Kanüle versehenen Arteria femoralis führte bei einem anderen Hund zu keiner Abnahme, sondern sogar zu einer vorübergehenden Zunahme der Höhe der Ausschläge der von der Hirnrindenoberfläche abgeleiteten ständigen Stromschwankungen. Wie *Mosso*¹ gezeigt hat, ist es möglich, Hunde selbst aus tiefem Chloral-schlaf durch die Injektion von 0,01—0,02 Cocainum hydrochloricum zu erwecken. Bei einem Hunde, der in dem oben geschilderten Veronal-Morphin-Schlaf lag, wurde durch die intravenöse Injektion einer größeren Dosis von Cocainum muriaticum in die Vena jugularis eine erhebliche Zunahme der von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen erzielt. Allerdings nahm auch gleichzeitig die Höhe der Ausschläge des Elektrokardiogramms zu.

Da ich der Ansicht war, daß bei der von mir getroffenen Anordnung zwar das Austrocknen und Auskühlen der Hirnrinde vermieden wird, andererseits aber die eine größere Ausdehnung besitzenden Elektroden keineswegs gleichmäßig und immer unter demselben Druck bei den ständigen Hirnbewegungen der Hirnrindenoberfläche anliegen und so gewisse Versuchsfehler dadurch geschaffen werden, so beschloß ich, mich in anderer Weise davon zu überzeugen, daß die Schwankungen der von der Hirnrindenoberfläche abgeleiteten Kurven nicht lediglich durch die Gehirnbewegungen bedingt seien. Ich hatte zwar schon aus diesem Gesichtspunkt heraus die Unterbindung der Carotiden gemacht, dadurch aber natürlich die Zirkulation im Schädel, wie oben erwähnt, und damit die Gehirnbewegungen nicht vollständig aufgehoben, so daß dieser Versuch nichts gegen die Entstehung der Schwankungen der cerebralen Kurve durch die Hirnbewegungen beweist. Auch gegen den Versuch einer Verblutung aus der Art. femoralis kann man einwenden, daß eine vollständige Verblutung nicht eintritt und eine gewisse Menge von Blut zur Aufrechterhaltung gerade des cerebralen Kreislaufs noch ziemlich lange zurückgehalten wird. Außerdem könnte die eintretende

¹ *Meyer und Gottlieb*: Die experimentelle Pharmakologie. S. 28. Berlin 1920.

Blutleere des Gehirns durch Veränderungen des Volumens des Gehirns und der dadurch bedingten Abänderung der Berührungsflächen zwischen Elektroden und Gehirnoberfläche die Hirnkurve so entstellen, daß bindende Schlüsse daraus nicht möglich wären. Die von mir oben mitgeteilten Kurven auf Abb. 1 und 2 weisen zweifellos gewisse Entstellungen der cerebralen Stromschwankungen auf, da eben durch die cerebrale Zirkulation, auf die auch die Atmung durch Vermittlung der Venen in ausgiebigster Weise einwirkt, die in den Subduralraum eingeführten Zinkplättchen bald fester, bald weniger fest der Hirnoberfläche anliegen, was natürlich mit Änderung des Widerstandes und dadurch bedingter Änderung der Höhe der Ausschläge der Stromschwankungen einhergeht. Obwohl von anderen Autoren anscheinend genügend einwandfreie Feststellungen vorlagen, so drängte sich mir doch immer

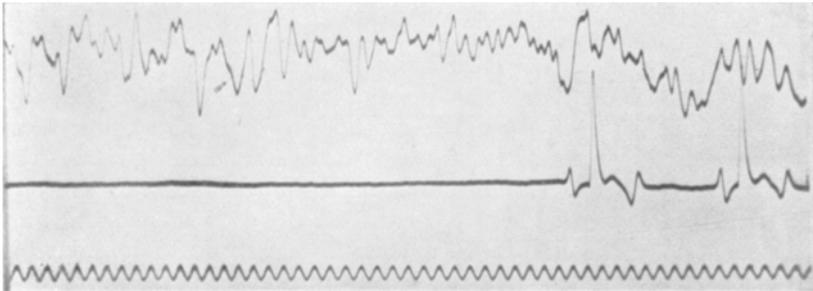


Abb. 3. Dieselbe Hündin wie in Abb. 1 und 2 und genau die gleichen Aufnahmebedingungen wie in Abb. 2. Oben die vom Großhirn abgeleitete Kurve, in der Mitte das Elektrokardiogramm, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

wieder die Besorgnis auf, ob die ständigen Schwankungen, welche von der Hirnoberfläche abzuleiten sind, nicht doch vielleicht nur durch die Hirnbewegungen hervorgerufen wären? Ich habe daher bei der vierjährigen Hündin, von der oben die Abb. 1 und 2 mitgeteilt wurden, eine Durchschneidung des oberen Halsmarkes gemacht, nachdem vorher eine intravenöse Injektion von 0,05 Muscarin in die Vena femoralis ausgeführt worden war. Die Atmung setzte aus, und nach kurzer Zeit schlug auch das Herz nur in großen Pausen.

Die Abb. 3 stellt einen Ausschnitt aus der so gewonnenen Kurve dar. Man sieht wieder in der Mitte das Elektrokardiogramm, in der oben angegebenen Weise abgeleitet. Bei Beginn des hier dargestellten Kurvenstücks hatte das Herz schon längere Zeit ausgesetzt. Es treten dann wieder nach längerer Zeit zwei Herzschläge auf, die durch eine kurze, aber doch längere als die normale Pause voneinander getrennt sind; dann tritt wieder ein längerer Herzstillstand ein. Man ersieht aus der Kurve, daß die zuoberst geschriebenen Stromschwankungen, die von den

beiden Hemisphären dieser Hündin abgeleitet wurden, auch während des Aussetzens des Herzens weiter bestehen. Sie haben eine gewisse Veränderung insofern erfahren, als sie jetzt viel regelmäßiger und auch etwas weniger ausgiebig geworden sind. Die Atmung setzt vollständig aus, so daß der durch die Vermittlung des Venensystems bestehende Einfluß der Atmung auf die Hirnzirkulation ebenfalls ausgeschaltet ist. Man sieht während der zwei Herzschläge, daß die cerebrale Kurve sofort wieder unregelmäßiger wird, ähnlich wie auf der Abb. 2. Also trotz vollständigen Darniederliegens der Zirkulation und der Atmung und trotz der dadurch bedingten Ausschaltung der durch die Gefäße hervorgerufenen Hirnbewegungen bestehen die Schwankungen der cerebralen Kurve weiter, so daß demnach, wie das auch von anderen Autoren hervorgehoben wurde, diese cerebralen Stromschwankungen nicht einfach die mechanische Folge der Gehirnbewegungen und überhaupt der Zirkulation im Gehirn sein können. Die auf Abb. 3 erhaltene Form der cerebralen Kurve wird wohl die richtigere sein, während die Kurven auf Abb. 1 und 2 eben durch die Gehirnbewegungen, an denen sowohl die Füllung der Arterien, als auch die Füllung der Venen und somit die Atmung beteiligt sind, entstellt sind. Es wird, wie schon hervorgehoben, bei den Bewegungen des Gehirns die Berührungsfläche zwischen der Gehirnoberfläche und den Elektroden verändert. Die Schwankungen der cerebralen Kurve entstehen zwar dadurch nicht, sie werden aber dadurch entstellt. Man kann meiner Ansicht nach z. B. auf der Abb. 2 in den Schwankungen der von der Hirnrindenoberfläche abgeleiteten Kurve eine Ähnlichkeit mit einer Venendruckkurve kaum verkennen. Wir werden später nochmals auf diese Frage zurückkommen müssen. Jedenfalls beweist der auf Abb. 3 wiedergegebene Versuch, daß auch nach Aussetzen der Atmung und Ausschalten der cerebralen Zirkulation regelmäßige Stromschwankungen von der Hirnoberfläche abgeleitet werden können, die also nicht lediglich durch Bewegungen des Gehirns und auch nicht durch Reibung des Blutes in den Gehirngefäßen bedingt sein können. Es ist dies somit eine Bestätigung der Ansicht der oben angeführten Autoren. Da bei allen cerebralen Ableitungen, die mit dem Saitengalvanometer und dem Doppelpulengalvanometer von mir ausgeführt wurden, ein Kondensator eingeschaltet war, so traten in den Kurven vor allem nur die rasch wechselnden Stromschwankungen zutage. Diese kürzeren Schwankungen zeigen im allgemeinen zwei verschiedene Längen. Man kann Wellen von etwas größerem Ausschlag und etwas größerer Dauer von durchschnittlich 90—100 σ und solche von kürzerer Dauer und geringerer Höhe von 40—50 σ unterscheiden, so daß auch diese Feststellungen mit den Mitteilungen von *Prawdicz-Neminski* im wesentlichen übereinstimmen, der Wellen erster Ordnung, von denen 11—15, und kürzere Wellen zweiter Ordnung, von denen 20—32 auf eine Sekunde kommen, unterscheidet. Nach meinen Feststellungen erreichen die Ausschläge

der von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen beim Hund eine durchschnittliche Größe von 0,0002—0,0006 Volt für die längeren, 90—100 σ dauernden Wellen und von 0,00013 Volt für die größten der kürzeren und an sich kleineren, nur 40—50 σ dauernden Wellen zweiter Ordnung.

Versuche über die Einwirkung peripherer Reize habe ich nicht wieder angestellt, da es mir jetzt nur auf die Untersuchung dieser *ständig* vorhandenen, von der Hirnrindenoberfläche abzuleitenden Stromschwankungen ankam. Ich brauche kaum darauf hinzuweisen, daß durch Sektion der Hunde festgestellt wurde, daß die in den Subduralraum eingeführten Elektrodenplättchen wirklich so lagen, wie beabsichtigt war, und daß keine mit dem bloßen Auge wahrnehmbaren Veränderungen im Subduralraum und auf der Oberfläche der Arachnoidea und der Pia hervorgerufen waren. Vor allen Dingen war auch nicht die kleinste Blutung nachweisbar. Selbstverständlich war der Tisch, auf dem sich der Hund während der Galvanometeraufnahme jeweils befand, durch Glasfüße gegen die Umgebung isoliert.

Über elektrische Vorgänge im Gehirn des *Menschen* liegen keine Untersuchungen vor, und es ist mir auch nicht bekannt, daß irgendwelche Kurven, die den hier mitzuteilenden entsprechen würden, veröffentlicht worden sind. Ich habe nach verschiedenen vergeblichen Versuchen am 6. 7. 24 bei einem 17jährigen jungen Mann die ersten einschlägigen Beobachtungen anstellen können. Dieser junge Mann war von *Guleke* wegen Tumorverdachts über der linken Großhirnhälfte palliativ trepaniert worden. Da sich bei ihm nach anfänglichem Zurückgehen der Hirndruckerscheinungen erneut solche eingestellt hatten, wurde die ursprüngliche Trepanationsstelle nach hinten zu erweitert, worauf die Hirndruckerscheinungen schwanden. Etwa 1 Jahr nach der zweiten Operation versuchte ich, im Bereich der Trepanationsstelle, wo der Knochen fehlte, mittels unpolarisierbarer Tonstiefelektroden und dem kleinen *Edelmannschen* Saitengalvanometer Ströme nachzuweisen. Die Versuche verliefen zunächst ergebnislos, und es gelang nur dann, wenn die beiden Tonstiefelektroden im Bereich einer senkrecht von oben nach unten durch die Mitte der erweiterten Trepanationsstelle verlaufenden Narbe, etwa 4 cm voneinander entfernt, angelegt wurden, ständige Schwankungen der Galvanometersaite bei starken Vergrößerungen, und zwar sowohl bei Einschaltung eines Platinfadens mit einem Widerstand von 5200 Ohm, als auch eines Quarzfadens mit einem Widerstand von 3200 Ohm zu erhalten. Außerhalb der sehr festen Narbe konnten im Bereich der Trepanationsstelle mit den Tonstiefelektroden keinerlei Schwankungen nachgewiesen werden. Es war dies das erste Ergebnis, das dafür sprach, daß wahrscheinlich beim Menschen ähnlich wie bei Kaninchen, Hunden und Affen sich ständige elektrische Ströme von der unversehrten Großhirnrindenoberfläche ableiten lassen.

Da mir lediglich das kleine *Edelmannsche* Saitengalvanometer zur Verfügung stand und so nur eine Beobachtung, aber keine Aufzeichnung der sehr kleinen Fadenschwankungen möglich war, beschloß ich, mir zunächst ein großes *Edelmannsches* Saitengalvanometer zu verschaffen, was mir auch nach längerer Zeit glücklich gelang. Aber gleich der erste damit angestellte Versuch verlief wieder ergebnislos. Bei einer 20 jährigen jungen Frau, bei der eine große Palliativtrepanation im Bereich des rechten Stirn- und Scheitelhirns vorlag, gelang es mir am 20. März 1925 nicht, mit unpolarisierbaren Pinselektroden von der Oberfläche des ziemlich stark vorgetriebenen Prolapses irgendeine Stromschwankungen zu erhalten. Allerdings war auch der Widerstand ein enorm hoher; er betrug nach den Messungen mit den *Edelmannschen* Apparaten 44 000 Ohm im Elektrodenstromkreis.

Es gelang mir später, auch in den Besitz eines von Siemens und Halske in den Handel gebrachten Doppelspulengalvanometers zu kommen, das sich für meine Untersuchungen ausgezeichnet bewährte. Ich bin zwar physikalisch nicht genügend vorgebildet, daß ich die Vorzüge und Nachteile eines Siemensschen Spulengalvanometers fachmännisch richtig beurteilen könnte, aber ich verweise auf die Arbeit von *Schrumpf* und *Zölllich*¹, die sich auf die Verwendbarkeit des Saiten- und Spulengalvanometers zur Aufnahme der Herzströme bezieht. Aus dieser Arbeit scheint mir doch hervorzugehen, daß das Spulengalvanometer empfindlicher ist als das Saitengalvanometer und daher für manche physiologische Untersuchungen ganz entschieden den Vorzug verdient. Wenn man oben Abb. 1 und 2 vergleicht, sieht man ohne weiteres die verschiedene Größe der Ausschläge der sonst unter gleichen Bedingungen aufgenommenen Stromschwankungen, die sich von der Rindenoberfläche des Hundes ableiten lassen. Wenn man am großen *Edelmannschen* Saitengalvanometer die Fadenspannung, wie es bei der Aufnahme der Herzkurven üblich ist, auf 10 mm = 0,001 Volt eicht, so ist demgegenüber der von mir am Galvanometer I zur Aufnahme der Hirnkurven verwendete Einsatz vielmal empfindlicher, und seine Ausschläge sind ungefähr $7\frac{1}{2}$ mal so groß als diejenigen, welche mit dem Saitengalvanometer bei der angegebenen Saitenspannung gewonnen werden. Ein Nachteil des Spulengalvanometers ist es, daß es nicht möglich ist, bei der von Siemens und Halske in den Handel gebrachten Form auch gleichzeitig den Widerstand im Elektrodenkreis zu messen. Wenn man aber, wie es bei mir der Fall war, gleichzeitig die *Edelmannsche* Einrichtung zur Verfügung hat, so kann diese Widerstandsbestimmung mit Leichtigkeit durchgeführt werden.

Ich habe in den folgenden Untersuchungen am Menschen statt unpolarisierbarer Elektroden Nadelelektroden verwendet, die nach dem

¹ *Schrumpf* und *Zölllich*: Saiten- und Spulengalvanometer zur Aufzeichnung der Herzströme. Pflügers Arch. 170 (1918).

Vorschlag von *Trendelenburg*¹ verzinkt und bis auf die Spitze durch einen Lacküberzug gegen die Umgebung isoliert wurden. Nadelelektroden sind auch sonst vielfach zur Ableitung von Aktionsströmen verwendet worden, so z. B. von *Straub* zur Ableitung der Herzströme, von anderen zur Ableitung der Aktionsströme der Muskeln usw. Über die Nadelelektroden sind verschiedene Angaben gemacht. So hat *Straub* einfache Nähnadeln, an die Kupferdrähte angelötet wurden, flach unter die Haut eingestochen. *Mann* und *Schleier*² verwendeten Neusilberelektroden. Ich habe also verzinkte Stahlnadeln verwendet. Nach den Ausführungen von *Gildemeister*³ und *Paul Hoffmann*⁴ ist die Verwendung unpolarisierbarer Elektroden zur Ableitung von Strömen aus dem menschlichen Körper dann keineswegs erforderlich, wenn es sich um die Registrierung schnell verlaufender Stromschwankungen handelt. Diese Nadelelektroden, die natürlich keineswegs vollständig unpolarisierbar sind, haben noch den großen Vorteil, daß man mit ihnen die Haut, die sehr komplizierte und durchaus nicht ohne weiteres übersehbare elektrische Verhältnisse nach den Untersuchungen von *Einthoven* und namentlich nach denen von *Gildemeister* darbietet, umgeht. Diese verzinkten Nadelelektroden wurden durch die Haut in das subcutane Gewebe eingeführt und lagen dann, wenn eine Knochenlücke vorhanden war, zwischen Dura und Haut, also epidural⁵. Es ist aus den Tierversuchen, die oben ausführlich wiedergegeben wurden, bekannt, daß man die sog. „Rindenströme“ auch von der Dura, sogar von dem des Periosts beraubten Knochen ableiten kann. Die Einstichstellen in der Haut, welche im Bereich der vorhandenen Knochenlücke lagen, wurden gejodet. Die bis auf die Spitze isolierten verzinkten Nadelelektroden wurden durch einen mehrstündigen Aufenthalt in einer 10⁰/₀igen Formalinlösung keimfrei gemacht und dann in eine sterilisierte physiologische Kochsalzlösung gebracht, um den letzten Rest des Formalins, das auf die Gewebe reizend wirken würde, abzuspülen. Die Nadeln wurden dann unter sorgfältiger Beachtung aller Vorschriften der Asepsis genau wie eine Injektionsnadel, die zur subcutanen Injektion verwendet wird, im Bereich einer von der Unterlage abgehobenen Hautfalte parallel zur Hautoberfläche eingeschoben, bis die Spitze sicher im subcutanen Gewebe, also epidural, lag. Irgendeine Verletzung konnte durch die sehr feinen Nadeln bei

¹ *Trendelenburg, W.*: Zur Methodik der Untersuchung von Aktionsströmen. Z. Biol. 74, 113 (1922).

² *Mann* und *Schleier*: Z. Neur. 91, 551 (1924).

³ *Gildemeister*: Passive elektrische Erscheinungen im Tier- und Pflanzenreich. Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie Bd. 8, 2. Hälfte, 2. Teil, S. 657.

⁴ *Hoffmann, Paul*: Ruhe- und Aktionsströme von Muskeln und Nerven. Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Bd. 8, 2. Hälfte, S. 703.

⁵ In manchen frischen Fällen waren wohl auch noch Reste des bei der Palliativtrepanation zurückgelassenen Periosts vorhanden.

dieser Art der Einführung nicht stattfinden. Zur Aufnahme der so epidural mit den Nadelelektroden abgeleiteten Stromschwankungen wurde vorwiegend das Doppelspulengalvanometer, einmal wegen seiner größeren Ausschläge und der besseren Kontrolle der auch während der Aufnahme ständig sichtbaren Kurven, sowie wegen des Vorzuges, daß diese Kurven schwarz auf weiß geschrieben werden, verwendet.

Bei einem 40jährigen Mann, bei dem ein großes Gliosarkom 5 Monate vorher von *Guleke* entfernt worden war, hatte sich im Bereich der Operationsstelle, an der man den Knochen vollständig weggenommen hatte, wieder eine starke Vorwölbung entwickelt, während gleichzeitig von neuem allgemeine Hirndruckerscheinungen auftraten. Bei diesem Mann wurde an zwei Stellen innerhalb der Knochenlücke, die über der linken Hemisphäre gelegen war, durch die oben erwähnten verzinkten, subcutan eingeführten Nadelelektroden, die in einer Entfernung von

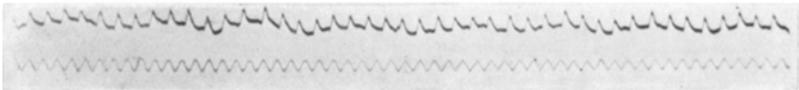


Abb. 4. 40jähriger Mann. Große linksseitige, von der Stirn bis in die Parietalgegend reichende Knochenlücke. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Nadelelektroden subcutan im Bereich der Knochenlücke, 4,5 cm voneinander entfernt. Oben Schwankungen der epidural abgeleiteten Kurve, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

4,5 cm voneinander lagen, zu dem Doppelspulengalvanometer abgeleitet. Der Mann lag in Rückenlage bequem auf einem Lager, das durch Glasfüße von der Umgebung isoliert war. Er verhielt sich während der Aufnahme vollständig ruhig. Es wurde eine Kurve geschrieben, aus der *Abb. 4* einen kleinen Ausschnitt darstellt. Während der Aufnahme war der Kondensator eingeschaltet und das sehr empfindliche Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers, das mit den Nadelelektroden in Verbindung stand, auf höchste Empfindlichkeit eingestellt. Das Galvanometer 2 war ebenfalls eingestellt und auch auf höchste Empfindlichkeit geschaltet, um mit Sicherheit auszuschließen, daß nicht etwa von außen kommende Ströme verzeichnet wurden. Auf der hier wiedergegebenen *Abb. 4* ist die vollständig ruhig stehende Linie des Galvanometers 2 nicht zu sehen, sondern die Zeitmarkierung, die $\frac{1}{10}$ Sekunden angibt, wurde an die mit den Nadelelektroden erhaltene Kurve aus Gründen der Platzersparnis etwas herangerückt. Man sieht aus der *Abb. 4* ohne weiteres, daß sich die epidural abgeleiteten Stromschwankungen aus zwei Wellenarten, die regelmäßig miteinander abwechseln, zusammensetzen. Die großen Wellen haben eine durchschnittliche Dauer von 90σ , die kleineren von 35σ . Man kann ferner an dieser Kurve auch leichte pulsatorische Schwankungen erkennen und feststellen, daß sechs große und sechs kleine Wellen der von der Dura abgeleiteten Kurve auf *eine* pulsatorische Schwankung von 0,75 Sekunden Dauer kommen. Ein Einfluß

der Atmung ist an der mehrere Meter langen Kurve, von der hier nur ein kleiner Abschnitt wiedergegeben ist, nicht erkennbar. Wir haben also hier sofort bei der Ableitung mit den epidural liegenden Nadelelektroden im Bereich der Schädellücke ständige Stromschwankungen, die auch in ihrem zeitlichen Ablauf ungefähr den zwei Wellenarten, die sich beim Hunde finden, entsprechen. Ich möchte nochmals darauf hinweisen, daß bei der Aufnahme der Kurven trotz der großen Knochenlücke ein erheblicher Hirndruck bestand. Der Mann ist dann einige Wochen später einem Rezidiv seiner Hirngeschwulst unter zunehmenden Hirndruckerscheinungen erlegen.

In einem anderen Falle war bei einem 19jährigen Mädchen wegen eines großen, in der Hypophysengegend gelegenen und auf der Röntgenplatte durch Kalkschatten erkennbaren Tumors von *Guleke* eine doppel-seitige temporale Entlastungstrepanation nach *Cushing* vorgenommen

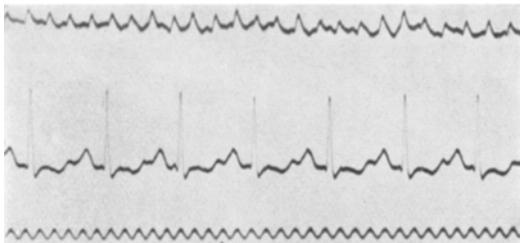


Abb. 5. 19jähriges Mädchen. Doppelseitige in der Temporalgegend gelegene Knochenlücke nach Palliativtrepanation. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Nadelelektroden subcutan rechts und links im oberen Teil der Knochenlücken. Elektrokardiogramm mittels Bleifolienelektroden von beiden Armen. Oben epidural abgeleitete Kurve, in der Mitte Elektrokardiogramm, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

worden. 6 Wochen nach der Operation waren die beiden Trepanationsstellen, an denen der Knochen vollständig entfernt war, stark vorgetrieben. Es wurden beiderseits am oberen Rand der rechten und linken Trepanationsöffnung subcutan verzinkte Nadelelektroden eingeführt, und es wurde zum Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers abgeleitet. Gleichzeitig wurde von beiden Armen mit Hilfe von Bleifolienelektroden, auf deren Anordnung wir später ausführlicher zurückkommen werden, zum Galvanometer 2 abgeleitet und so auch das Elektrokardiogramm fortlaufend geschrieben. Abb. 5 stellt wieder einen Ausschnitt aus der größeren, so gewonnenen Kurve dar. Es wurde wieder für beide Galvanometer des Doppelspulengalvanometers Kondensation eingeschaltet. Man sieht auf der Abb. 5 oben die mit den Nadelelektroden epidural von den beiderseitigen Knochenlücken abgeleiteten Stromschwankungen, in der Mitte die allbekannte Kurve des Elektrokardiogramms und unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden geschrieben. Es fällt sofort wieder die Übereinstimmung dieser Abbildung mit der Abb. 4 auf. Wir sehen auch

hier die großen und die kleineren Wellen, die sich regelmäßig abwechseln. Die größeren Wellen haben hier eine Länge von 90—100 σ , die kleineren von 40—50 σ . Man erkennt auch hier an manchen Stellen einen leichten Einfluß der Hirnpulsation auf die elektrischen Schwankungen, doch keineswegs so ausgesprochen wie auf Abb. 4. Ein Zusammenhang zwischen dem Elektrokardiogramm und der Hirnkurve besteht sicherlich nicht. Die Übereinstimmung der Abb. 4 und 5 ist eine ausgesprochene. Auch hier bestand noch trotz der doppelseitigen entlastenden Trepanation zur Zeit der Aufnahme dieser Kurven ein erheblicher Hirndruck.

Auch bei dieser epiduralen Ableitung mit Nadelelektroden hängt es ganz von den örtlichen Verhältnissen ab, ob die erzielten Kurven mehr oder minder deutlich sind. Eine kleine Verschiebung der Nadel im subcutanen Gewebe wirkt oft geradezu Wunder. Besonders hohe

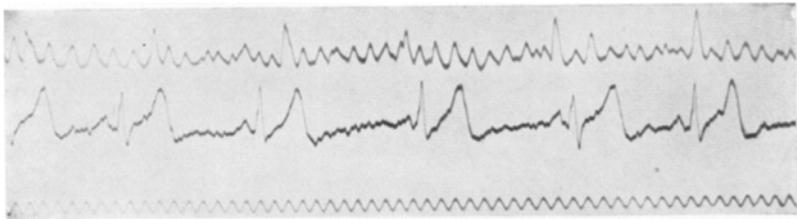


Abb. 6. 15-jähriges Mädchen. Große Palliativtrepanation über dem linken Stirnhirn. Doppelspülgalvanometer. Nadelelektroden im Bereich der Knochenlücke, subcutan, 6 cm voneinander entfernt. Widerstand = 1600 Ohm. Elektrokardiogramm mittels Siemensschen Bleibandeletroden von beiden Armen. Oben Kurve der epidural abgeleiteten Schwankungen, in der Mitte das pathologisch veränderte Elektrokardiogramm, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

Ausschläge und eine schöne Darstellung der Wellen der cerebralen Kurve wurden bei folgender Untersuchung erzielt:

Ein 15-jähriges Mädchen, bei dem ein großer Tumor im Marklager des linken Stirnhirns nach den klinischen Symptomen angenommen werden mußte, war von *Guleke* ausgiebig über der linken vorderen Schädelhälfte palliativ trepaniert worden, wobei der Knochen entfernt wurde. Etwa 8 Wochen nach der Operation wurden an zwei Stellen innerhalb der großen auf der linken Seite gelegenen Knochenlücke Nadelelektroden, die 6 cm voneinander entfernt waren, in das subcutane Gewebe eingeführt. Der im Elektrodenkreis bestehende Widerstand wurde mittels der *Edelmannschen* Vorrichtung auf 1600 Ohm bestimmt. An beiden Armen wurden die *Siemensschen* Bleibandeletroden zur Aufnahme des Elektrokardiogramms befestigt. Die epidural liegenden Nadelelektroden wurden mit dem auf Abb. 6 an oberster Stelle schreibenden Galvanometer 1, das auf höchste Empfindlichkeit eingestellt war, die Armelektroden mit dem in der Mitte schreibenden Galvanometer 2 in Verbindung gebracht. Die untere Kurve auf der Abb. 6 gibt die

Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden an. Es war Kondensation eingeschaltet. Aus Platzgründen sind die Kurven etwas zusammengedrückt, dabei sind jedoch genau die zeitlichen Verhältnisse gewahrt worden. Das in der Mitte geschriebene Elektrokardiogramm ist zweifellos pathologisch verändert und zeigt auch Unregelmäßigkeiten in der Schlagfolge des Herzens. Der Puls betrug bei der Kranken schon vor der Operation 51, nach der Operation zur Zeit dieser Aufnahme 54 Schläge in der Minute und war also sicherlich erheblich verlangsamt; außerdem war er stark unregelmäßig. Die zuoberst geschriebene Kurve der epidural abgeleiteten Stromschwankungen zeigt sehr große Ausschläge, läßt aber auch wieder den regelmäßigen Wechsel zwischen großen und kleinen Wellen genau wie auf den beiden vorher besprochenen Abb. 4 und 5 erkennen. Auch das zeitliche Ablaufverhältnis dieser Wellen erster und zweiter Ordnung ist ungefähr das gleiche. Die größeren Wellen haben eine durchschnittliche Dauer von 90 σ , die kleineren von 35—40 σ . Es springen in der obersten Kurve gelegentlich auffallend große Wellen ins Auge; ein Zusammenhang derselben mit den Ausschlägen des Elektrokardiogramms oder etwa mit den Pulsationen der Prolapsstellen, deren Ablauf sich aus dem Elektrokardiogramm berechnen läßt, besteht nicht. Auch hier lag ein erheblicher Hirndruck vor, wie sich das schon aus der Pulsverlangsamung ergibt. Die Trepanationsstelle war stark vorgewölbt.

Wir haben in den drei hier zuletzt mitgeteilten Fällen die gleichen Wellen der Hirnkurve vor uns. Auffallend ist die Regelmäßigkeit, mit der bei allen dreien die großen und die kleinen Wellen miteinander abwechseln, indem immer auf eine große Welle eine kleine, dann wieder eine große kommt und so fort.

In anderen Fällen habe ich so regelmäßige Kurven bei epiduraler Ableitung nicht erhalten. Bei einer 38jährigen Frau vermutete man nach dem klinischen Befund einen Tumor im Bereich der rechten vorderen Zentralwindung. Bei der Operation wurde von *Guleke* an der vermuteten Stelle in der Tiefe von 1,5 cm eine Cyste gefunden, deren Inhalt entleert wurde. Der Befund wurde als ein cystisch entartetes Gliom gedeutet. Der Knochen wurde an der Trepanationsstelle vollständig entfernt, da eine Entfernung der Geschwulst nicht möglich war und später Röntgenbestrahlung vorgenommen werden sollte. 4 Wochen nach der Operation wurde von zwei Stellen innerhalb der rechts gelegenen großen Knochenlücke mit subcutan eingeführten Nadelelektroden, die 6,5 cm voneinander entfernt waren, eine Kurve aufgenommen. Der Widerstand im Nadelelektrodenkreis betrug 1500 Ohm. Von den Armen wurde mit Bleifolienelektroden zu Galvanometer 2 des Doppelpulengalvanometers abgeleitet, während das Galvanometer 1 mit den Nadelelektroden verbunden war. Es wurde eine Kurve erhalten, von der Abb. 7 einen kleinen Ausschnitt darstellt. Zu oberst sind die epidural abgeleiteten Stromschwankungen mit dem auf höchste Empfindlichkeit eingestellten

Galvanometer I verzeichnet; in der Mitte befindet sich das Elektrokardiogramm, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden. Auch diese Aufnahme wie alle vorangehenden wurde bei Kondensation gemacht. Man findet auch hier dieselben, aus den vorausgehenden Kurven bekannten größeren und kleineren Schwankungen, von denen die ausgiebigeren hier 90 bis 100 σ , die kleineren 40—50 σ dauern. Es fehlt aber hier die durchgehende

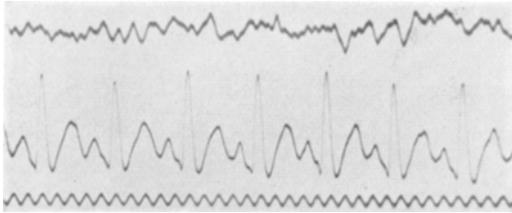


Abb. 7. 38 jährige Frau mit großer rechtsseitiger Knochenlücke in der Gegend der motorischen Region. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Nadelelektroden subcutan innerhalb der Knochenlücke, 6,5 cm voneinander entfernt. Widerstand = 1500 Ohm. Elektrokardiogramm mittels Bleifolienelektroden von beiden Armen. Oben epidural abgeleitete Kurve, in der Mitte Elektrokardiogramm, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

regelmäßige Anordnung, so daß je eine große und eine kleine Welle aufeinander folgen. Etwas rechts von der Mitte der Abbildung treten z. B. nacheinander einmal sieben kleine Wellen auf. Die Kurve erscheint überhaupt viel abwechslungsreicher als die in den vorangehenden Abbildungen dargestellten Kurvenstücke.

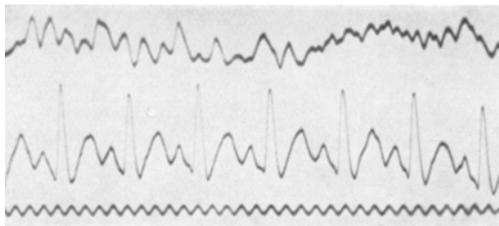


Abb. 8. 38 jährige Frau. Genau die gleichen Aufnahmebedingungen wie in Abb. 7 von dem gleichen Tage.

Das gleiche zeigt die Abb. 8, die einen Ausschnitt einer unter gleichen Bedingungen am gleichen Tage von derselben Kranken aufgenommene Kurve wiedergibt. Ich möchte diese hier wiedergegebene abwechslungsreichere Form der epidural abgeleiteten Stromschwankungen in Übereinstimmung mit anderen Kurven, die in derselben Weise gewonnen wurden und die ich hier nicht wiedergebe, darauf zurückführen, daß in diesen Fällen ein wesentlicher Hirndruck nicht vorlag. Die Trepanationsstelle lag zur Zeit der angestellten Untersuchungen durchaus in der Fläche des übrigen Schädels und war in keiner Weise vorgewölbt. Auch

sonst ließen sich bei dieser Kranken Hirndruckerscheinungen nicht feststellen. Aber auch diese Untersuchungen bestätigen doch das Vorkommen der zwei Wellenarten, einer längeren und einer kürzeren, wie sie auch von *Neminski* bei seinen Tierversuchen festgestellt wurden.

Es wäre aber nach meinen Erfahrungen ein Irrtum, anzunehmen, daß man diese Stromschwankungen, wie sie in all den vorangegangenen Kurven zutage getreten sind, nur bei Ableitung von der Dura des Großhirns erhalten könnte. Ich habe eine ganz ähnliche, wenn nicht gleiche Kurve auch von der Dura des Kleinhirns ableiten können. Ein 22jähriger junger Mann war vor 6 Jahren wegen einer in der linken Kleinhirnhälfte gelegenen Cyste von *Guleke* operiert worden. Damals war der Knochen vollständig entfernt worden. Der Betreffende hatte keinerlei Beschwerden mehr. Links ragte am Hinterkopf unter der Haut die nur von der Dura bedeckte Kleinhirnhälfte hervor. Es wurden Nadelelektroden, 5 cm

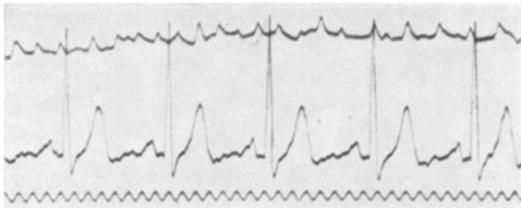


Abb. 9. 22 jähriger Mann. Knochenlücke über der linken Kleinhirnhälfte. Doppelspulg galvanometer. Kondensation. Subcutan 5 cm voneinander entfernt gelegene Nadelelektroden innerhalb der Knochenlücke. Elektrokardiogramm mittels Bleifolienelektroden von beiden Armen. Oben epidural vom Kleinhirn abgeleitete Kurve, in der Mitte Elektrokardiogramm, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

voneinander entfernt, im Bereich des linksseitigen Knochendefekts subcutan eingeführt und zum Galvanometer 1 des Doppelspulg galvanometers abgeleitet. Das Galvanometer 2 wurde mit den an beiden Armen angebrachten Bleifolienelektroden verbunden. Es war Kondensation eingeschaltet.

Abb. 9 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus einer großen Kurve, die so gewonnen wurde. Oben sind die Stromschwankungen geschrieben, die mit den Nadelelektroden von der Dura des Kleinhirns aus abgeleitet wurden, in der Mitte findet sich das Elektrokardiogramm, dessen größte Ausschläge an einigen Stellen mit Bleistift von mir etwas nachgezogen wurden, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden verzeichnet. Man sieht wieder die beiden Wellenarten von genau der gleichen Dauer, wie sie von der Dura des Großhirns abgeleitet werden konnten. Das einzige, was diese Kleinhirnkurve etwas von denen des Großhirns unterscheidet, ist der Umstand, daß hier auch ohne jeden Hirndruck die Kurve wieder eine sehr regelmäßige ist — auf eine große Welle kommt immer eine kleine Welle —, und ferner, daß die Wellen etwas weniger häufig auftreten.

Ich vermag aber nicht zu entscheiden, ob dies wirklich einen durchgreifenden Unterschied darstellt oder ob es nur ein zufälliger Befund ist.

Ich habe noch in einigen anderen Fällen mit subcutan, innerhalb einer Knochenlücke liegenden Nadelelektroden die Stromschwankungen von der Dura des Großhirns aufgenommen, ohne daß sich jedoch dabei etwas anderes ergeben hätte als das, was aus den hier mitgeteilten und besprochenen Kurven ersichtlich ist. Ich möchte aber nochmals, wie schon oben geschehen ist, darauf hinweisen, daß oft eine anscheinend unbedeutende Verschiebung einer Nadelspitze im subcutanen Gewebe eine große Wirkung auf die Güte der gewonnenen Kurven, d. h. auf die Höhe ihrer Ausschläge ausübt. Ich habe es auch in anderen Fällen, die hier nicht weiter mitgeteilt werden sollen, mehrmals verfolgen können, daß die mit den Nadelelektroden aufgenommenen Kurven, die einige Wochen nach der Palliativtrepanation ganz ausgiebig waren, mit zunehmendem Hirndruck bei Hereinwachsen des Tumors in die Trepanationsstelle, wie später durch die Obduktion festgestellt wurde, schlechter wurden. Auch dieser Umstand scheint mir ebenso wie vieles andere für die Entstehung der Stromschwankungen an Ort und Stelle in dem unterliegenden Gehirngewebe zu sprechen.

Als allgemeines Ergebnis dieser Ableitung mit epidural gelegenen Nadelelektroden möchte ich somit feststellen, daß es gelingt, ständige Stromschwankungen zu verzeichnen, die sich in zwei Arten von Wellen mit einer Durchschnittsdauer von 90σ und 35σ unterscheiden lassen. Die längeren Wellen von 90σ sind die höheren, die kürzeren, 35σ -Wellen, die weniger ausgiebigen. Von den größeren Wellen kommen nach diesen Feststellungen 10—11 auf 1 Sekunde, von den kleineren 20—30 auf 1 Sekunde. Die Größe der Ausschläge bei den größeren, 90σ -Wellen, läßt sich auf 0,00007—0,00015 Volt, die der kleineren, 35σ -Wellen, auf 0,00002—0,00003 Volt berechnen.

Ehe die im Auszug oben mitgeteilten epiduralen Nadelableitungen von zwei Stellen innerhalb einer Schädellücke gemacht wurden, hatte ich sehr viele Untersuchungen angestellt, bei denen von der Schädellücke einerseits und einer genau entsprechenden Stelle der gegenüberliegenden unversehrten Schädelhälfte andererseits zum Galvanometer abgeleitet wurde. Es wurden dabei anfänglich unpolarisierbare Elektroden, und zwar zunächst Tonstiefel- und Pinselektroden verwendet, die sich aber infolge des hohen Widerstandes als nicht geeignet erwiesen. Günstiger lagen die Verhältnisse bei den von Piper¹ angegebenen unpolarisierbaren Trichterelektroden. Der Widerstand dieser Elektroden betrug je nach der Größe der verwendeten Trichter und den örtlichen Verhältnissen im Bereich der Schädellücke und an der gegenüberliegenden Kopfseite 530—2500 Ohm. Gegen diese Elektroden, mit

¹ Piper: Elektrophysiologie menschlicher Muskeln. S. 20. Berlin: Julius Springer 1912.

denen schöne Aufnahmen erzielt wurden, bestehen aber gerade bei der Verwendung am Kopfe wegen der Möglichkeit der Verätzung der Haut durch die konzentrierte Zinksulfatlösung und der Gefahr, daß trotz der größten Sorgfalt eben doch einmal Flüssigkeitströpfchen in die Augenbindehaut gelangen könnten, die allergrößten Bedenken, so daß sie nur ganz selten und eigentlich nur, um Vergleichskurven zu erzielen, verwendet wurden. Da es sich um rasch wechselnde Stromschwankungen handelte, waren unpolarisierbare Elektroden, wie schon oben ausgeführt wurde, keineswegs notwendig. Ich ging daher zu den in ihrer Anwendung viel bequemerem und auch in jeder Weise ungefährlichen Metallelektroden über¹. Trockene Metallflächen, auf die Haut gebracht, haben ebenfalls einen sehr großen Widerstand. Derselbe ist sehr viel geringer, wenn eine feuchte Unterlage benutzt wird. Je größer die Elektrodenfläche, je konzentrierter die benutzte Salzlösung ist, die zur Anfeuchtung dient, und je wärmer die Haut ist, auf der die Elektroden aufliegen, um so geringer ist bekanntlich der zu erwartende Widerstand. Ich habe zunächst runde Kupferplatten mit einer wenig größeren Flanellunterlage, die mit 20%iger Kochsalzlösung getränkt war, benutzt. Sie hatten bei der örtlichen Anwendung, wo, wie gesagt, die eine Elektrode auf dem Schädeldefekt, die andere auf der genau entsprechenden Stelle der anderen Kopfseite lag, einen Widerstand von 240—1200 Ohm. Ich verwendete ferner große Platinbleche² ebenfalls mit einer in 20%iger Kochsalzlösung getränkten Flanellunterlage; sie hatten bei ihrer Anwendung je nach den örtlichen Verhältnissen einen Widerstand von 400—1400 Ohm. Ebenso wurden Silberelektroden benutzt mit einem Widerstand von 450—3000 Ohm. Da ein festes Anliegen der Metallplattenelektroden trotz untergelegten Flanellappens und etwaiger in 20%iger Kochsalzlösung getränkter Watte oft bei den Unebenheiten der Haut namentlich innerhalb einer Schädelücke schwierig war, so ging ich zu Bleiplattenelektroden über, die jeweils genau nach der Größe der Schädelücke aus Bleiblech herausgeschnitten und der Oberfläche durch Biegung u. dgl. entsprechend angepaßt wurden. Sie hatten je nach der Größe der Knochenlücke und den örtlichen Verhältnissen einen Widerstand von 500—7600 Ohm. Annähernd einen gleichen Widerstand hatten auch Bleibandeletroden, die in mehrfache Zickzacklinien zusammengelegt über dem Defekt und die genau entsprechende Stelle der gegenüberliegenden Schädelhälfte angeordnet wurden. Ich war aber eigentlich mit keiner dieser eben besprochenen Anordnungen wirklich zufrieden, da die Befestigung der Elektroden, auch wenn Gummibänder oder eine Gummibadekappe, die über den Schädel gezogen wurde,

¹ Schellong: Über exakte und nichtexakte Registrierung des menschlichen Elektrokardiogramms. Klin. Wschr. 1926, 541.

² Gildemeister: Über die Polarisation der Elektroden, die zu elektrisch-physiologischen Zwecken gebraucht werden. Z. biol. Techn. u. Meth. 3, 28 (1915).

verwendet wurden, doch immer Schwierigkeiten bereitete, und das feste Anliegen der Elektroden an der Hautoberfläche in keinem Falle sichergestellt war. Ich kam endlich auf den Gedanken, ganz dünne Bleifolien ähnlich dem für die Verpackung von Schokolade usw. verwendeten Stanniol zu benutzen. Diese Bleifolien konnten jederzeit nach der Form der Schädellücke geschnitten werden. Unter die Bleifolie wurde auf die Schädellücke ein einige Millimeter größeres, mit 20%iger Kochsalzlösung getränktes Flanellstück gelegt; ebenso wurde die Bleifolie wieder mit einem solchen Flanellstück bedeckt. An der entsprechenden Stelle der Gegenseite des Schädels wurde eine genau gleich große Bleifolie mit derselben Unterlage und Bedeckung aufgelegt. Diese Bleifolien wurden dann durch dünne Gummibinden, wie sie zu sonstigen medizinischen Zwecken Verwendung finden, die vielfach um den Schädel gewickelt wurden, festgelegt, so daß eine Verschiebung der Elektroden unmöglich war und die Elektroden möglichst fest gegen die Haut der Schädeloberfläche und die Haut der Schädellücke angepreßt wurden. So war auch ein Austrocknen der Elektroden, was für die Änderung des Widerstandes von allergrößter Bedeutung ist, vollständig vermieden, und es war möglich, längere Zeit hindurch vollkommen gleichmäßige Kurven zu erhalten. Der Widerstand, der dabei durch Verwendung möglichst großer Bleifolien erheblich herabgesetzt werden konnte, betrug nur 380—500 Ohm. Übrigens möchte ich auch hier gleich bemerken, daß ich in gleicher Weise das Elektrokardiogramm mit Vorliebe mit Bleifolienelektroden aufgenommen habe. Statt der von Siemens und Halske ihrem Doppelpulengalvanometer beigegebenen Bleibandelektrode wurde eine Bleifolienelektrode verwendet. Es wurde zunächst der Unterarm mit einer in 20%iger Kochsalzlösung getränkten Flanellbinde umwickelt, dann wurde eine entsprechend große Bleifolie einmal darumgeschlagen und darüber wieder eine feuchte Flanellbinde gewickelt. Das Ganze wurde dann mit einer Gummibinde bedeckt. Es konnte so ohne Austrocknung stundenlang ein immer gleichmäßiges Elektrokardiogramm erzielt werden. Es ist dies eine Anordnung, welche die von *Einthoven*¹ angegebene Aufnahmemöglichkeit des Elektrokardiogramms etwas abgeändert hat. *Einthoven* hat statt der Bleifolien verzinkte Drähte verwendet. Die hier vorgeschlagene und von mir vielfach verwendete Anordnung ist noch bequemer als die Verwendung des verzinkten Drahtes, der in zahlreichen Windungen um den Arm herumgelegt werden muß.

Es liegt mir vollständig fern, über Einzelheiten meiner zahlreichen Untersuchungen an Leuten mit Schädeldefekten zu berichten, und ich will nur auf zwei Beobachtungen etwas näher eingehen.

Bei der 19jährigen Kranken, von der oben Abb. 5 auf S. 541 mitgeteilt wurde, wurden auch in der oben geschilderten Weise Ableitungen

¹ *Einthoven*: l. c., S. 790.

von den Stellen der beiderseitigen Schädellücken mit Bleifolienelektroden gemacht. Es wurde dabei eine Kurve erzielt, aus der die Abb. 10 einen kleinen Ausschnitt leider in nicht ganz tadelloser Darstellung gibt. Zuoberst auf der Abbildung ist die Kurve der auf den beiderseitigen Schädellücken aufliegenden, mit dem Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers verbundenen Bleifolienelektroden geschrieben. Darunter folgt das Elektrokardiogramm, das von beiden Armen ebenfalls mittels der oben geschilderten Bleifolienelektroden zum Galvanometer 2 abgeleitet wurde. Unten sind wieder die Zeiten in $\frac{1}{10}$ Sekunden verzeichnet. Der Widerstand der Bleifolienelektroden auf den Schädellücken betrug 500 Ohm. Vergleichen wir die Abb. 5 und 10, so ist diese Abb. 10 eine etwas entstellte Wiedergabe der Kurve auf Abb. 5. Aber man sieht doch auch hier die längeren und kürzeren Wellen, wenn auch nicht

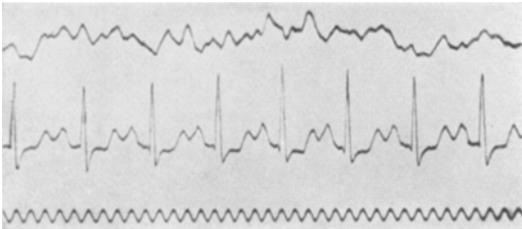


Abb. 10. 19 jähriges Mädchen. Doppelseitige, in der Temporalgegend gelegene Knochenlücke nach Palliativtrepanation. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Ableitung von den beiden Trepanationsstellen mit Bleifolienelektroden. Widerstand = 500 Ohm. Elektrokardiogramm mittels Bleifolienelektroden von beiden Armen. Oben die von der Haut der Knochenlücken abgeleitete Kurve, in der Mitte das Elektrokardiogramm, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden (vgl. Abb. 5).

entfernt alles so scharf hervortritt, wie auf der in Abb. 5 wiedergegebenen epiduralen Nadelableitung von demselben Mädchen. Jedenfalls beweist die Kurve aber das, daß man auch bei einer Ableitung von der Haut über den Schädellücken eine leidlich gute Kurve, die ebenfalls die kennzeichnenden Einzelheiten der beiden Wellenarten enthält, erreichen kann.

Ich teile hier noch eine zweite Beobachtung mit. Sie rührt von einem 43jährigen Juristen her, der 1914 durch Schrapnellenschuß an der Stirn rechts von der Mittellinie verwundet worden war, und bei dem an dieser Stelle ein etwa fünfmarkstückgroßer, stark pulsierender Knochendefekt vorlag. Nachdem die Haut an dieser Stelle und am Hinterhaupt mit Alkohol und Äther gut abgerieben worden war, wurde die etwas vertiefte Knochenlücke mit einem in 20%iger Kochsalzlösung getränkten Wattebausch ausgefüllt; darüber wurde eine Flannelschicht, dann eine dünne Bleifolie und darüber wieder eine zweite Flannelschicht gelegt. Genau dieselbe Elektrode wurde am Hinterhaupt in der Mittellinie etwas oberhalb der Protuberantia occipitalis externa aufgelegt. Die beiden Elektroden wurden mit einer Gummibinde, die fest um den Schädel

herumgewickelt wurde und noch durch eine zweite Binde verstärkt war, befestigt und so vor Austrocknung geschützt. Es wurde dann zum Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers abgeleitet, und so eine Kurve erzielt, von der Abb. 11 einen kleinen Ausschnitt darstellt. Es wurde auch gleichzeitig das Elektrokardiogramm geschrieben, das in diesem Falle mit den Siemensschen Bleibandelektroden von beiden Unterarmen abgeleitet wurde. Zuunterst der Kurve sieht man die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden. Es war wie immer Kondensation eingeschaltet. Herr Dr. G. verhielt sich während der Aufnahme leidlich ruhig. Er lag, wie alle anderen Personen, von denen Kurven aufgenommen wurden, in Rückenlage auf einem bequemen Lager, das durch Glasfüße gegen die Umgebung isoliert war. Die oberste Kurve der Abb. 11 zeigt in ausgezeichneter Weise

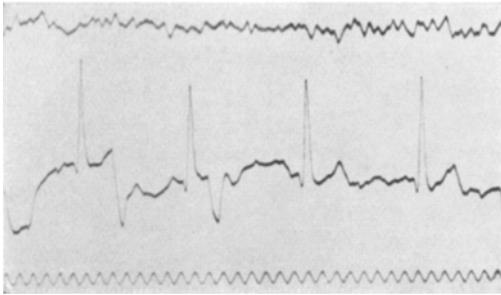


Abb. 11. 43 jähriger Mann. Knochenlücke auf der Stirn. Doppelspulengalvanometer, Kondensation. Ableitung von der Knochenlücke und vom Hinterhaupt mittels Bleifolienelektroden. Elektrokardiogramm mittels Bleibandelektroden nach Siemens von beiden Armen. Oben die von der Knochenlücke und vom Hinterhaupt abgeleitete Kurve, in der Mitte das Elektrokardiogramm, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

wieder die größeren und kleineren Wellen, die wir an allen anderen Kurven bisher beobachtet haben.

Die beiden hier mitgeteilten Kurvenstücke, die von der Haut der Schädellücken oder von der Haut einer Schädellücke in der Stirngegend und von einer Hautstelle am Hinterhaupt abgeleitet wurden, zeigen weitgehende Übereinstimmung mit den epidural abgeleiteten Stromschwankungen. In allen Fällen, in denen derartige Kurven abgeleitet wurden, vom Defekt und der gegenüberliegenden Stelle, erhielt man immer dieselben Befunde. Es wurden von mir im ganzen bei 38 Personen, bei 23 Männern und 15 Frauen, mit Schädellücken in 101 Sitzungen 506 meist meterlange Kurven aufgenommen, deren genaue Durcharbeitung diesen eben gegebenen Ausführungen zugrunde gelegt wurde. Man kann also nicht nur durch epidural liegende Nadelelektroden, sondern auch von der Haut über einer Schädellücke und der entsprechenden Stelle der Gegenseite ständige Schwankungen des elektrischen Stromes mit den zwei kennzeichnenden Wellenarten, den höheren, langsamer verlaufenden und den kürzeren, schneller verlaufenden, erzielen.

Von Anfang an war meine Hoffnung *die*, daß es gelingen möchte, bei unversehrtem Schädel von der menschlichen Kopfhaut Schwankungen des elektrischen Stromes abzuleiten, die man beim Tier von der Hirnoberfläche, bei Menschen mit Knochendefekten epidural erhalten kann, und so die Worte *Fleischls von Marxow* zu verwirklichen: „Es wird vielleicht sogar gelingen, durch Ableitung von der Kopfhaut die durch verschiedene psychische Akte am eigenen Gehirn entstehenden Ströme wahrzunehmen“, auf die bereits oben verwiesen wurde. Ich habe schon 1920 bei einem Studierenden der Medizin, der fast keine Haare mehr besaß und sich mir auf meine Bitte hin zu diesen Untersuchungen bereitwilligst zur Verfügung gestellt hatte, von verschiedenen Stellen seiner Kopfhaut, vorwiegend aber von entsprechenden Stellen der rechten

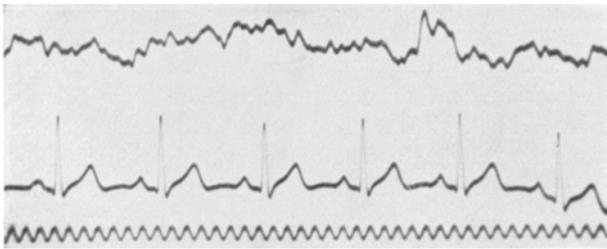


Abb. 12. Klaus im 16. Lebensjahre. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Nadelelektroden subcutan an Stirn und Hinterhaupt. Widerstand = 700 Ohm. Elektrokardiogramm mittels Bleifolienelektroden von beiden Armen. Oben die von der Kopfhaut abgeleitete Kurve, in der Mitte das Elektrokardiogramm, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

und linken Schädelhälfte, aber auch von der Stirn und Parietalgegend ein- und derselben Schädelhälfte mit Trichterelektroden nach *Piper* und subcutan eingeführten Nadelelektroden, die mit dem kleinen *Edelmanns*chen Saitengalvanometer, das mir damals außer dem Capillarelektrometer nach *Lippmann* zur Verfügung stand, verbunden waren, Stromschwankungen zu erhalten versucht, jedoch ohne jeden Erfolg. Jetzt war ich natürlich für diese Untersuchungen ganz anders vorbereitet. Es standen mir das große *Edelmanns*che Saitengalvanometer und namentlich auch das Doppelspulengalvanometer von Siemens und Halske zur Verfügung. Vor allem hatte ich aber auch schon zahlreiche Kurven von Leuten mit Schädelrücken aufgenommen, so daß ich nun ziemlich genau wußte, *was* zu erwarten sei. Ich verfolgte von Anfang an nicht nur rein wissenschaftliche, sondern auch praktische Ziele, da ich hoffte, diese Feststellungen vielleicht auch diagnostisch verwerten zu können, worauf ich unten noch einmal zurückkommen muß. Ich habe bei einer ganzen Reihe von gesunden Leuten mit unversehrtem Schädel Kurven aufgenommen und ich will gleich auf die Untersuchungsergebnisse in einigen kennzeichnenden Beispielen eingehen.

Bei meinem Sohn Klaus, der während dieser Untersuchungen im Alter von 15—17 Jahren stand, habe ich in 14 Sitzungen 73 Kurven aufgenommen. Zur Zeit der jeweiligen Untersuchung waren die Haare möglichst kurz geschnitten. Abb. 12 zeigt eine solche, von meinem Sohn Klaus gewonnene Kurve. Es waren verzinkte Nadelelektroden in der Mittellinie des Schädels vorn an der Stirn innerhalb der Haargrenze und hinten etwa zwei Finger breit über der *Protuberantia occipitalis externa* subcutan eingeführt worden. Der Widerstand dieser Nadelelektroden betrug nach Messung mit dem *Edelmanns*chen Apparat bei dieser Untersuchung 700 Ohm. Diese Nadelelektroden wurden mit dem Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers verbunden, während von beiden Armen mittels Bleifolienelektroden das Elektrokardiogramm zum Galvanometer 2 abgeleitet wurde. Es wurde wie in allen vorangehenden Untersuchungen Kondensation eingeschaltet. Man erkennt auf Abb. 12 an der zu oberst geschriebenen Kurve sofort deutlich die uns schon bekannten größeren Wellen von einer durchschnittlichen Dauer von 90 σ und die kleineren, durchschnittlich 35—40 σ beanspruchenden Schwankungen. Die mittlere Kurve stellt das Elektrokardiogramm dar. Unten ist die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden verzeichnet. Die Höhe der Ausschläge der mit den Nadelelektroden abgeleiteten elektrischen Schwankungen beträgt nach der Ausmessung einer gleichzeitig aufgenommenen Saitengalvanometerkurve für die größeren Wellen 0,00012—0,0002 Volt.

Betonen möchte ich noch, daß bei der Ableitung mit Nadelelektroden vom unversehrten Schädel auch bei ein- und demselben Menschen, z. B. bei meinem Sohn Klaus, sehr verschieden gute Kurven erzielt wurden und daß auch die kleinsten Verschiebungen der Nadel im subcutanen Gewebe oft eine ungeahnte und vor allem ungewollte Wirkung auf die Güte der Kurven haben. Es wurden von Klaus Kurven mit subcutanen Nadelelektroden auch biparietal, ferner von einem Stirn- und einem Parietalhöcker gekreuzt oder gleichseitig und noch in verschiedenen anderen Anordnungen abgeleitet. Die frontooccipitalen Nadelableitungen, wobei die Nadelelektroden genau in der Mittellinie des Schädels angeordnet waren, ergaben jedoch bei weitem die größten Ausschläge.

Bei Klaus wurde auch mit allen möglichen anderen Elektroden, Silber-, Platin-, Bleielektroden usw., abgeleitet, und zwar in verschiedener Anordnung auf der Hautoberfläche des Kopfes. Dabei ergab sich jedoch immer wieder, daß die Anordnung, wobei die Elektroden auf Stirn und Hinterkopf lagen, sich als die beste erwies. Ich will von den vielen Aufnahmen von Klaus nur noch in Abb. 13 einen kleinen Ausschnitt aus einer auf diese Weise erhaltenen Kurve mitteilen. Es wurden dabei Bleibandeletroden auf Stirn und Hinterkopf angebracht und durch Gummibänder festgelegt. Von diesen Bleibandeletroden wurde zu Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers abgeleitet; das Galvanometer 2 war auf höchste Empfindlichkeit eingestellt und wurde zur

Kontrolle benutzt, daß nicht etwa von außen kommende Ströme in den Galvanometerkreis einbrächen und die Untersuchung störten. Ich war damals noch sehr mißtrauisch gegen die erhaltenen Befunde und habe immer wieder derartige Vorsichtsmaßregeln angewendet. Die Linie des Galvanometers 2 verlief als eine vollständig gerade Linie ohne jede Schwankung; sie ist auf der Abb. 13 nicht wiedergegeben. Die zweite

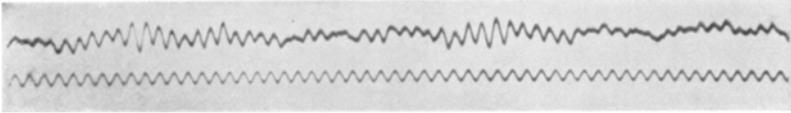


Abb. 13. Klaus im 15. Lebensjahre. Doppelpulengalvanometer. Kondensation. Ableitung von Stirn und Hinterhaupt mit Bleibandelektroden. Oben die von der Kopfhaut abgeleitete Kurve, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

Kurve, die die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden anzeigt, ist bei der Wiedergabe etwas näher an die Gehirnkurve herangerückt, und zwar aus Gründen der Platzersparnis. Die Kurven sind bei Kondensation aufgenommen.

Man sieht auch bei dieser Art der Aufnahme sehr schön die uns bekannten größeren und kleineren Wellen, wenn auch die letzteren etwas weniger deutlich sind als bei der Aufnahme mit den Nadelelektroden.

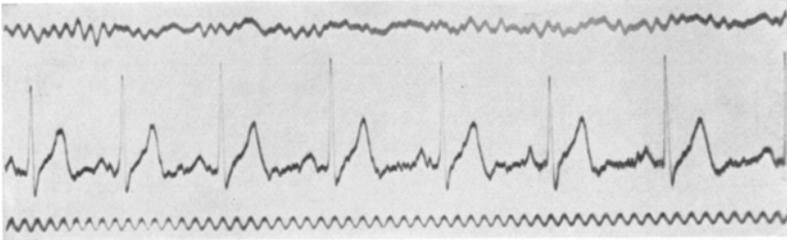


Abb. 14. 36-jähriger Mann mit Glatze. Doppelpulengalvanometer. Kondensation. Ableitung von Stirn und Hinterhaupt mit Bleifolienelektroden. Widerstand = 140 Ohm. Elektrokardiogramm mit Bleifolien von beiden Armen. Oben die von der Kopfhaut abgeleitete Kurve, in der Mitte das Elektrokardiogramm, unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

Auch von meiner Kopfhaut habe ich eine ganze Reihe von Kurven sowohl mit Nadelelektroden, als auch mit anderen Elektroden aufnehmen lassen, und zwar bei der verschiedensten Lage der Elektroden. Auch diese Kurven bestätigen im wesentlichen das hier bereits Mitgeteilte. Ich besitze von mir 56 Kurven, die in 11 Sitzungen von *Hilpert* verzeichnet wurden. Die Kurven von meiner *Kopfhaut* sind ebenso wie die von meinem Sohn Klaus gewonnenen nicht so schön wie diejenigen von Leuten, welche eine ausgedehnte Glatze oder am besten gar keine Haare besitzen. Nach diesem Gesichtspunkt habe ich mir eine Reihe von Leuten zur Untersuchung ausgesucht, bei denen ich dann Kurven aufnahm.

Abb. 14 stellt einen Ausschnitt aus einer derartigen Aufnahme dar. Sie stammt von einem 36-jährigen gesunden Mann, der eine ausgedehnte

Glatze besitzt und bei dem vor allem in der Stirn- und Hinterhauptgegend die Haare vollständig fehlten. Es wurde je eine große Bleifolienelektrode in der früher geschilderten Weise auf Stirn und Hinterkopf aufgelegt und mittels Gummibinden an dem Schädel befestigt. Von diesen Bleifolienelektroden auf Stirn und Hinterkopf wurde zu Galvanometer 1 des Doppelspulengalvanometers abgeleitet. Der Widerstand betrug bei dieser Anordnung für die beiden ziemlich großen Bleifolienelektroden nur 140 Ohm. Die oberste Kurve auf Abb. 14 zeigt die von Stirn und Hinterkopf auf diese Weise abgeleiteten Stromschwankungen, die mittlere zeigt das Elektrokardiogramm, das ebenfalls mittels Bleifolienelektroden, wie oben angegeben, von beiden Armen zu Galvanometer 2 abgeleitet wurde, unten ist die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden geschrieben. Es wurde wie immer mit Kondensator gearbeitet. Man erkennt an der leider etwas dick geschriebenen oberen Kurve aber doch die kennzeichnenden größeren und kleineren Wellen der Stromschwankungen, wie sie uns aus den epiduralen Ableitungen genügend bekannt sind.

Bei einem 37jährigen gesunden Mann ohne Schädeldefekt, mit ausgedehnter Glatze, habe ich von der Stirn und der Hinterhauptgegend nacheinander mit unpolarisierbaren Trichterelektroden nach *Piper*, mit subcutan eingeführten verzinkten Nadelelektroden und endlich mit den mehrfach geschilderten Bleifolienelektroden abgeleitet, um mich davon zu überzeugen, daß man trotz der Verschiedenheit dieser Elektroden und des verschiedenen Widerstandes, den sie darbieten, doch in allen wesentlichen Punkten übereinstimmende Kurven vom Schädel, die unschwer die größeren und kleineren Wellen, welche immer wieder besprochen wurden, zeigen, erhalten kann.

Ich habe im ganzen bei 13 gesunden Männern, und zwar vorwiegend Angestellten der mir unterstehenden Klinik, die ein Alter von 16 bis 65 Jahren aufwiesen, und bei einer Frau im Alter von 36 Jahren in 48 Sitzungen im ganzen 231 Kurven aufgenommen. Daß nur *eine* Frau untersucht wurde, liegt daran, daß die dichten Haare namentlich am Hinterkopf die Anbringung der Elektroden verhindern, bzw. einen so gewaltigen Widerstand bedingen, daß erfolgreiche Kurven nur bei Umgehung der Haut durch subcutan liegende Nadelelektroden erzielt werden. Bei der einen Frau, bei der ich dahingehende Untersuchungen anstellte, lag ein herdförmiger Haarausfall vor, so daß die Elektroden bequem auf der völlig haarfreien Hautoberfläche des Schädels lagen.

Ich möchte nochmals darauf hinweisen, daß alle nur denkbaren Zusammenstellungen der Lagen der Elektroden an der Hautoberfläche des Schädels von mir versucht worden sind; und zwar lagen die Elektroden bald auf beiden Stirnhöckern, dann wieder beiderseits im Planum temporale, eine Ableitung, die sich wegen des unterliegenden Musculus temporalis durchaus nicht empfiehlt. Es wurden ferner die Elektroden auf beide Parietalhöcker gelegt. eine sehr gute Art der Ableitung. Ferner

wurde die Ableitung von einem Stirnhöcker und dem gegenüberliegenden Parietalhöcker, aber auch von einem Stirnhöcker und dem gleichseitigen Parietalhöcker und endlich die Ableitung von Stirn und Hinterhaupt angewendet. Wie schon oben hervorgehoben, hat sich diese letztere Ableitung als die beste erwiesen, obwohl sie auch manche Nachteile darbietet, auf die wir später unten noch einmal zurückkommen müssen, wenn wir auf die Fehlerquellen eingehen werden. Von den verschiedenen Arten von Elektroden haben sich neben den für den Untersuchten etwas unbequemem, jedoch jederzeit auch bei stärkerem Haarwuchs verwendbaren, subcutan liegenden Nadelelektroden die Bleifolienelektroden, die ohne jede Belästigung längere Zeit liegen können, am besten bewährt.

Ich habe auch bei zahlreichen Untersuchungen den Versuch gemacht, mit den Elektroden einerseits vom Schädel, andererseits vom Körper abzuleiten, weil ich glaubte, daß man dann vielleicht die am Schädel zutage tretenden Stromschwankungen um so größer und schöner zur Darstellung bringen könnte. Alle diese Untersuchungen sind aber bisher ergebnislos verlaufen. Es ist bei allen diesen Versuchen das Elektrokardiogramm störend dazwischen gekommen. So habe ich z. B., wenn die eine Elektrode in der Mittellinie des Schädels auf der Stirn oder auf der Scheitelhöhe lag, eine andere gleich große Elektrode auf der Brust, dem Rücken, in der Lenden- oder Kreuzbeingegend angebracht oder als Band ringförmig um die ganze Brust gelegt wurde, immer mehr oder minder deutlich das Elektrokardiogramm erhalten. Ebenso traten Elektrokardiogrammkurven sofort auf, wenn von der Kopfhaut einerseits und andererseits von beiden auf dieselbe Elektrodenfläche aufgelegten Handinnenflächen oder von beiden Fußsohlen abgeleitet wurde. Auch bei der Anordnung, bei der eine Elektrode auf der Scheitelhöhe, die andere Elektrode am linken Unterschenkel oder Fuß oder am linken Arm oder an der linken Hand angebracht wurde, zeigte sich das Elektrokardiogramm. Ebenso trat bei einer Ableitung von der linken Kopfseite und dem linken Arm mehr oder minder entstellt das Elektrokardiogramm zutage. Nur bei einer Ableitung von der Scheitelhöhe und vom rechten Unterarm oder der rechten Hand erhielt ich eine zusammengesetztere Kurve, an der zwar die Anwesenheit des Elektrokardiogramms deutlich erkennbar war, daneben aber auch andere Schwankungen, so z. B. die längeren von den cerebralen Stromschwankungen sich nachweisen ließen. Jedenfalls ergab sich daraus, daß auch diese Kurve für meine Zwecke ungeeignet war. Man kann geradezu von einer *Allgegenwart* des Elektrokardiogramms sprechen, das alle derartigen Ableitungen unmöglich macht. Wir werden später darauf hinweisen müssen, daß auch gelegentlich sogar bei Ableitung von verschiedenen Stellen des Schädels Elektrokardiogrammkurven auftreten können. Ich habe daher alle Versuche, andere Ableitungsmöglichkeiten als die oben angegebenen zu finden, zunächst aufgegeben und bin auf die Ableitung von Stirn

und Hinterhaupt bei unversehrtem Schädel mittels Bleifolienelektroden immer wieder zurückgekommen.

Gehe ich nun auf die *Fehlerquellen* ein, die unter Umständen zur Verunstaltung der von dem Schädel abgeleiteten Kurven führen können, so sind so grobe Versuchsfehler, wie die Berührung der zwar durch Umwicklung isolierten Elektrodendrähte untereinander oder ein Aufliegen und Reiben dieser an Hautstellen des Kopfes leicht zu vermeiden. Auch starke Schwankungen der Zuleitungsdrähte können wohl dadurch, daß an der Stelle, wo sie eingeschraubt sind, Verschiebungen entstehen, bei der großen Empfindlichkeit des Galvanometers zur Entstellung der Kurven durch sog. Wackelkontakte führen, die aber meist leicht erkennbar und infolgedessen vermeidbar sind.

Wichtiger sind die Bewegungen, denen die auf der Hautoberfläche aufliegenden oder im subcutanen Gewebe befindlichen Elektroden ausgesetzt sind. Befinden sich die Elektroden im Bereich einer Knochenlücke, so pulsiert natürlich an dieser Stelle infolge der fortgeleiteten Hirnbewegungen die Dura und auch die darübergespannte Haut sehr lebhaft. So kann man auch an den mit Nadelelektroden, die epidural liegen, aufgenommenen Kurven oft sehr deutliche Hirnpulsationen erkennen. Oben in Abb. 4 treten solche zutage, und es wurde bei der Betrachtung dieser Kurve schon darauf hingewiesen, daß pulsatorische Schwankungen erkennbar seien und sechs größere und sechs kleinere Wellen auf je eine Hirnpulsation in jenem Falle kommen. Auf das Zustandekommen dieser Schwankungen hat vor allen Dingen *Sommer*¹ schon in ausgezeichneter Weise hingewiesen. *Sommer* hat hervorgehoben, daß aus den Veränderungen der Berührungsfläche der Elektroden, die ihrerseits wieder ihre Ursache in Druckdifferenzen haben, zeitlich entsprechende Schwankungen der Stromstärke zustande kommen. Selbst an den kleinen, zur Ableitung der Stromschwankungen in Abb. 4 verwendeten Nadelelektroden ist das, wie oben hervorgehoben wurde, noch deutlich zu erkennen. Sehr viel deutlicher natürlich ist das bei den der Haut aufliegenden Plattenelektroden der Fall, und dies war auch der Grund, daß ich später statt der Metallplatten Bleifolien verwendete, die durch eine stark angezogene Gummibinde möglichst fest auf die Unterlage angepreßt wurden. In dem Verlauf aufeinanderfolgender Hirnpulsationen kommt auch stets mehr oder minder deutlich der Einfluß der Atmung zur Auswirkung, da sie die Füllung der Hirnvenen in bestimmender Weise beeinflußt. Auch die durch die Atmung bedingten Druckdifferenzen an einer pulsierenden Hirnstelle wirken auf die Größe der Berührungsfläche der aufliegenden oder in das Gewebe eingeführten Elektroden und somit auch auf die Ausschläge des Galvanometers verändernd ein. Auf den eingangs wiedergegebenen Abb. 1 und 2 von einem Hunde, bei dem über beide Großhirn-

¹ *Sommer-Fürstenau*: Die elektrischen Vorgänge in der menschlichen Haut. Klin. psych. Krkb. 1, 197 (1906).

hälften amalgamierte Zinkplättchen in den Subduralraum eingeführt worden waren, wirkt, worauf schon oben einmal hingewiesen wurde, sich natürlich dieser Einfluß der durch die Füllung der Arterien und Venen bedingten Druckveränderungen und der damit Hand in Hand gehenden Veränderungen der Berührungsfläche zwischen Elektroden und Hirnoberfläche so stark aus, daß die von der Hirnoberfläche abgeleitete Kurve an manchen Stellen geradezu an eine Venenkurve erinnert. Zweifellos sind die Stromschwankungen, die mit dieser Anordnung von der Hirnoberfläche abgeleitet wurden, durch die Art der Aufnahme stark entstellt, aber für unsere obigen Betrachtungen kam das nicht störend in Frage. Diese von der Hirnoberfläche abgeleiteten Schwankungen entstehen nicht durch den Puls oder die Atmung bzw. die dadurch hervorgerufenen Hirnbewegungen, sondern sie werden nur durch die Vorgänge bei dieser Art der Aufnahme weitgehend abgeändert, was natürlich etwas ganz anderes ist. Allerdings drängt sich da doch jedem gewissenhaften Untersucher auch unwillkürlich die Frage auf: „Sind vielleicht diese von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen mit ihren zwei Wellenarten doch nur entstellte Hirnpulsationen, also hervorgerufen durch die Bewegungen des Blutes in den Hirngefäßen in den Arterien, Capillaren und Venen?“

Es ist richtig, daß der je einem Herzschlag entsprechende Hirnpuls, worauf schon *Mosso* und zahlreiche andere Untersucher hingewiesen haben, nicht eine einfache einmalige Erhebung der untersuchten Stelle der Hirnoberfläche darstellt, sondern sich meist aus drei größeren einzelnen Schwankungen zusammensetzt. Diese drei Schwankungen sind nicht alle gleich ausgesprochen, und bei genauerer Aufzeichnung der Hirnbewegungen kann man mit Leichtigkeit auch noch einige weitere Schwankungen nachweisen, so daß man schließlich auch die sechs größeren Wellen der Stromschwankungen, die auf je einen Hirnpuls kommen (S. 540), zusammenbringen würde. Ich meine aber, alle theoretischen Erörterungen sind in solchen Fragen nicht von Wert, und es ist richtiger diese Fragen experimentell zu prüfen.

Von dem 43jährigen Juristen wurde auf Abb. 11 (S. 550) ein Ausschnitt einer von der pulsierenden Knochenlücke und dem Hinterhaupt abgeleiteten Kurve mitgeteilt. Bei der Lage seiner Knochenlücke konnten sehr leicht die Bewegungen der darüber liegenden Haut mittels einer die ganze Stelle der Knochenlücke überdeckenden *Mareyschen* Aufnahmekapsel, die durch einen Schlauch mit einer Schreibkapsel mit Lichtschreibung verbunden war, aufgenommen werden. So wurde eine Kurve gewonnen, von der Abb. 15 einen Ausschnitt darstellt. Oben sind die Schwankungen der Haut der Knochenlücke mittels Luftübertragung und Lichtschreibung, unten ist die Zeit wie immer in $\frac{1}{10}$ Sekunden geschrieben. Man sieht, daß im Beginn jeder Hirnpulsation eine große, alle anderen überragende Welle sich einstellt und dann eine Reihe von

kleineren Schwankungen folgt. Die Größe der einzelnen Schwankungen ist eine sehr verschiedene, ebenso wie ihre Länge. Ich habe der Einfachheit halber gleich die Zeitwerte dieser Schwankungen auf die Originalkurve eingetragen. Man ersieht daraus jedenfalls, daß die zeitlichen Verhältnisse dieser Schwankungen andere sind als die der Wellen erster und zweiter Ordnung in den von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen. Wenn man diese hier dargestellte Kurve der Pulsationen der Knochenlücke mit der Kurve der Stromschwankungen von demselben Manne, wie sie auf Abb. 11 mitgeteilt wurden, vergleicht, so sieht man sofort, daß keineswegs jede pulsatorische Schwankung der Knochenlücke sich durch eine große überragende Schwankung aus den von dem Bereich des Defektes abgeleiteten Stromschwankungen heraushebt, sondern diese

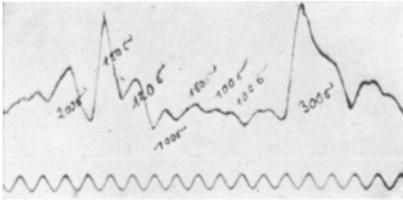


Abb. 15. 43-jähriger Mann. Knochenlücke auf der Stirn. Oben Schwankungen der Haut der Knochenlücke, aufgenommen mit einer *Mareys*-Kapsel und durch Luftübertragung fortgeleitet zu einer *Mareys*-Schreibkapsel mit Lichtschreibung. Unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden (vgl. Abb. 11).

Kurve der Stromschwankungen ist eine gleichmäßig fortlaufende, wobei große und kleine Wellen sich mehr oder minder regelmäßig abwechseln. Man kann mit Leichtigkeit aus der bekannten Verspätung, die zwischen der Herzbewegung und der Hirnpulsation besteht, den Zeitpunkt des Beginns jeder Pulsation auch für die vom Schädel abgeleitete Kurve aus dem gleichzeitig geschriebenen Elektrokardiogramm berechnen und somit einwandfrei

feststellen, daß nicht etwa der Beginn einer Hirnpulsation durch eine besonders große Welle der Stromschwankungen ausgezeichnet ist.

Da man aber trotzdem einwenden könnte, daß diese Luftübertragung auf eine Gummimembran, auf der ein Spiegel aufgeklebt ist, der als Lichthebel die Bewegungen aufschreibt, die zeitlichen Verhältnisse doch nicht ganz richtig wiedergäbe, so habe ich bei dem nämlichen Manne noch eine andere Methode der zeitlichen Registrierung der Bewegungen der pulsierenden Hautstelle verwendet. Ich habe mit einem *Edelmann*-schen Pulstelephon diese Bewegungen mit Hilfe des Galvanometers aufgeschrieben. Der aufnehmende Knopf des Pulstelephons wurde auf die Mitte der pulsierenden Knochenlücke gebracht; der Glaszylinder wurde bequem auf den Rand des Defektes der Knochenlücke aufgesetzt. Die Bewegungen des Knopfes bedingen Schwankungen der Mikrofonplatte eines Telephons, und die dabei entstehenden Ströme werden dem Galvanometer zugeleitet. Im vorliegenden Fall wurde das Doppelpulsgalvanometer verwendet. So ist eine Kurve entstanden, von der Abb. 16 einen Ausschnitt wiedergibt. Oben auf der Kurve ist eine einzelne Hirnpulsation, die durch die beiden tiefsten Stellen der Kurve abgegrenzt ist, wiedergegeben. Ich habe auch hier der Einfachheit halber die zeit-

lichen Werte der einzelnen Schwankungen, auf die es bei dieser Aufnahme allein ankommt, in die Kurve eingetragen. Die untere Zeitmarke gibt die Zeit wieder in $\frac{1}{10}$ Sekunden an. Jedenfalls ersieht man aber daraus, daß die Bewegungen an der Defektstelle sehr viel zusammengesetztere sind, als es zunächst den Anschein hat. Ich glaube auch, daß diese Bewegungen unter Umständen wohl auf die von einem Defekt selbst mit einer so anschmiegsamen Elektrodenform wie der angegebenen Bleifolie abgeleiteten Stromschwankungen einen verändernden Einfluß ausüben können. Ich bin aber der Meinung, daß die von der Haut einer Schädellücke abgeleiteten Stromschwankungen nicht etwa allein durch die Hirnbewegungen, d. h. also nur durch den Füllungszustand der Gefäße des Gehirns hervorgerufen werden. Die zeitlichen Verhältnisse dieser einzelnen Schwankungen und die Größenverhältnisse der einzelnen Schwankungen der Hirnbewegungen sprechen ganz entschieden dagegen. Ich kann mir z. B. nicht vorstellen, durch welche Wandlungen die Bewegungen der Dura bei der epiduralen Nadelableitung den gleichmäßigen Kurvenverlauf, wie ihn Abb. 4 (S. 540) darstellt, hervorrufen könnten, so daß auf jede einzelne Hirnbewegung sechs große, in ihrem Ausmaß fast völlig gleiche, und ebenso sechs kleine, wieder vollständig gleichmäßige Wellen kommen sollten. Aber als eine wichtige Fehlerquelle wird man bei der Aufnahme innerhalb von Knochenlücken die Bewegungen der Aufnahme- stelle und den dadurch bedingten wechselnden Druck gegen die Elektroden stets berücksichtigen müssen.

Man könnte denken, daß diese eben gemachten Ausführungen völlig überflüssig seien, da doch die Ableitung der Stromschwankungen mit den kennzeichnenden Wellen bei Leuten mit unversehrttem Schädel gelingt, bei denen scheinbar pulsatorische Schwankungen der Aufnahme- stelle deswegen nicht in Frage kommen, weil an der betreffenden Aufnahme- stelle keine Schädellücke vorhanden ist und also keine Hirnbewegungen vorliegen. Das wäre aber vollkommen irrig. Eine einfache Überlegung zeigt, daß die Haut überall pulsatorischen Schwankungen unterworfen ist, wie man das zur Genüge aus den plethysmographischen Untersuchungen weiß. Wären es aber nur Schwankungen der Gefäß- fülle, die man am Schädel mit oder ohne Knochenlücke als Strom- schwankungen ableiten kann, so müßte man eigentlich doch auch von allen anderen Körperstellen die gleichen Kurven erhalten, z. B. bei einer

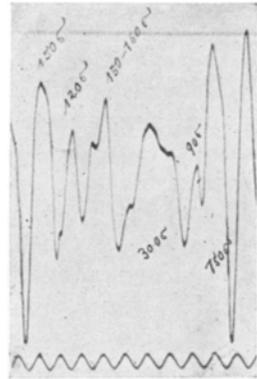


Abb. 16. 43 jähriger Mann. Knochenlücke auf der Stirn. Oben Aufnahme der Schwankungen von der Mitte der Knochenlücke mit dem Edelmannschen Pulstelephon und Galvanometer 2 des Doppelspulen galvanometers. Unten Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

Ableitung von dem Ober- und Unterarm, was nach eingehenden in dieser Richtung von mir angestellten Untersuchungen durchaus nicht der Fall ist. Man erhält in der Tat auch eine Kurve, die Stromschwankungen darbietet, jedoch keineswegs mit den kennzeichnenden Wellen erster und zweiter Ordnung. Nun könnte man dagegen wieder einwenden, daß die Verhältnisse an der Haut des Schädels eben insofern anders liegen, als hier die Haut über eine feste Knochenunterlage gespannt sei, während an den Armen Muskeln, Gefäße usw. unter der Haut liegen. Um auch diesem Einwand zu begegnen, habe ich von meinem rechten Schienbein mit Nadelelektroden, die 6 cm voneinander entfernt subcutan lagen und bis auf den Knochen vorgeschoben wurden, Kurven zum Doppelspulengalvanometer abzuleiten versucht. Ich habe, wenn das Galvanometer auf höchste Empfindlichkeit gestellt wurde, auch vereinzelte kleine Schwankungen photographisch festhalten können, aber nicht im entferntesten eine Kurve erhalten, wie ich sie vom Schädel abzuleiten imstande war. Ich habe mir auch gesagt, wenn die Gefäßfülle Schwankungen des elektrischen Stromes, wie er vom Schädel abgeleitet werden kann, hervorruft, so müßten doch bei einer künstlichen Erweiterung der Gefäße der Kopfhaut und des Gehirnes die Schwankungen der vermeintlich cerebral entstehenden Kurve größer werden. Ich habe bei mir mit über beiden Scheitelhöckern eingeführten, subcutan liegenden Nadelelektroden und einer Ableitung zum Galvanometer I des Doppelspulengalvanometers die bekannten und oben besprochenen Stromschwankungen darstellen können. Es wurde mir dann ein Taschentuch, auf das 5 Tropfen Amylnitrit soeben geträufelt waren, vor die Nase gebracht. Ich atmete das Amylnitrit ein, und nach kurzer Zeit trat eine starke Erweiterung der äußeren Gefäße des Gesichts und der Kopfhaut ein; ich merkte ein deutliches Klopfen der Temporales. Während der ganzen Zeit wurde fortlaufend die von den Scheitelhöckern abgeleitete Galvanometerkurve weitergeschrieben. Eine Zunahme der Höhe der Stromschwankungen trat nicht ein, obwohl doch Amylnitrit bei seiner Einatmung eine Erweiterung der Gefäße der Kopfhaut und der Hirngefäße hervorruft¹. Auch diese an mir selbst angestellte Beobachtung spricht gegen die rein vasculäre Entstehung der von der Kopfhaut und epidural beim Menschen abgeleiteten Stromschwankungen.

Ich habe dann endlich noch, um nichts, was mir einfiel, unversucht zu lassen und mich über diesen Punkt, der mir viele Sorgen machte, ganz zu beruhigen, bei meinem Sohn Klaus folgende Untersuchung angestellt: Ich habe von der Kopfhaut mit kleinen Bleifolienelektroden, die auf beiden Parietalhöckern in der angegebenen Weise auf einem Flanellappen lagen und mit einem solchen bedeckt waren und durch eine Gummibinde fest an den Schädel angepreßt wurden, zum Galvanometer I des Doppelspulengalvanometers abgeleitet. In der Mitte zwischen

¹ Meyer und Gottlieb: l. c., S. 308.

beiden Parietalhöckern war, genau in der Mittellinie, der Aufnahmestift des *Edelmannschen* Pulstelephons angebracht, das schon zur Darstellung des Pulses der Defektstelle bei Dr. G., wie oben berichtet wurde, verwendet worden war. Das Pulstelephon wurde mit Galvanometer 2 verbunden. So entstand die Kurve, von der Abb. 17 wieder einen Ausschnitt darstellt. Oben ist die uns bekannte Kurve der Stromschwankungen, wie sie sich von der Kopfhaut ableiten lassen, geschrieben; die Ausschläge sind zwar nicht sehr groß, da nur eine kleine Elektrodenfläche verwendet werden konnte und die Elektroden außerdem auf den wohl ziemlich kurz geschnittenen Haaren, aber doch keineswegs auf einem haarlosen Schädel lagen. Man kann aber für unseren vorliegenden Zweck genügend deutlich wenigstens die Wellen erster Ordnung an dieser obersten Kurve erkennen. In der Mitte sind die zeitlichen Verhältnisse der Bewegungen der Kopfhaut mittels des Pulstelephons verzeichnet. Unten ist die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden angegeben. Man sieht sofort, daß die mechanischen Schwankungen der Kopfhaut, die natürlich durch die wechselnde Gefäßfüllung bedingt sind, nicht mit den cerebralen Wellen *zeitlich* zusammenfallen. Andererseits war ich aber doch sehr erstaunt, welche erheblichen Schwankungen die Kopfhaut auch am unversehrten Schädel

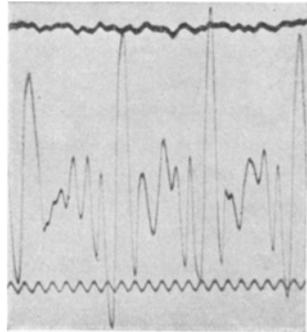


Abb. 17. Klaus im 16. Lebensjahre. Doppelspulengalvanometer. Kondensation. Ableitung von beiden Scheitelhöckern mit kleinen Bleifolienelektroden. Schwankungen der Kopfhaut zwischen den Scheitelhöckern geschrieben mit dem *Edelmannschen* Pulstelephon. Oben die von der Kopfhaut abgeleiteten Stromschwankungen, in der Mitte die mechanischen Schwankungen der Kopfhaut, unten die Zeit in $\frac{1}{10}$ Sekunden.

ausführt. Man erkennt daraus, wie gut es ist, derartige Untersuchungen anzustellen, um sich vor schwerwiegenden Irrtümern zu hüten.

Ich glaube, nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen den Einwand zurückweisen zu müssen, daß die oben ausführlich beschriebenen Stromschwankungen, wie sie sich von der Kopfhaut über Schädeldefekten oder auch von der des unversehrten Schädels und epidural ableiten lassen, *nur* der Ausdruck der Bewegungen des Gehirns oder nur der Kopfhaut seien, wie sie durch die wechselnde Fülle der Gefäße, Arterien, Capillaren und Venen, hervorgerufen werden. Wie ich schon einmal betonte, könnte man mit einer solchen Annahme auch keineswegs eine so regelmäßige, im wesentlichen immer gleich große Schwankungen darbietende Kurve innerhalb *eines* Herzschlags erklären, wie sie z. B. die Abb. 4 und 5 zeigen. Andererseits wären auch wieder *so* unregelmäßige Kurven, wie sie auf Abb. 7 und 8 wiedergegeben sind, lediglich durch Schwankungen der Gefäßfülle nicht leicht zu erklären.

Mit der Widerlegung der Annahme, daß die von der Kopfhaut oder epidural abgeleiteten Stromschwankungen durch die wechselnde Füllung der Gefäße der Kopfhaut oder des Gehirns bedingt seien, ist natürlich noch nicht der andere Einwand widerlegt, auf den *Tschirjew* hingewiesen hat, daß etwa diese elektrischen Erscheinungen durch Reibung des Blutes an den Gefäßwänden entstünden. Allerdings müßte man dann auch einen etwas anderen Verlauf dieser elektrischen Schwankungen und eben doch ein gewisses Parallelgehen mit der Pulswelle erwarten. Meiner Ansicht nach spricht aber auch das Tierexperiment gegen eine solche Annahme. Verblutenlassen bedingt eine vorübergehende Zunahme der Höhe der von der Hirnoberfläche des Hundes abgeleiteten Stromschwankungen; ebenso hat die doppelseitige Unterbindung der Carotiden keinen Einfluß auf ihre Größe; und endlich kann festgestellt werden, daß trotz Aussetzen des Herzschlages und der Atmung, wie dies Abb. 3 zeigt, die Stromschwankungen weiter bestehen bleiben. Ich glaube ebenso wie *Kaufmann*, *Cybulski* und *Prawdicz-Neminski*, daß der Einwand von *Tschirjew* nicht zutreffend ist.

Aber für den Menschen wäre wohl noch die Frage zu erwägen, ob nicht z. B. mit den subcutan ins Gewebe eingeführten Nadelelektroden Strömungsströme dargestellt werden¹. Man versteht unter Strömungsströmen solche elektrischen Ströme, die auftreten, wenn eine Flüssigkeit, in der sich die Elektroden befinden, aus der Ruhe in Strömung versetzt wird. Diese Strömungsströme stellen sich aber auch dann ein, wenn in der schon fließenden Flüssigkeit die Stromgeschwindigkeit sich ändert. So wird z. B. in jeder Arterie bei der Systole die Stromgeschwindigkeit gesteigert, und dementsprechend tritt dann an einer in die Arterie eingeführten Elektrode mit dem Puls zusammenfallend eine Schwankung auf. Diese Strömungsströme kämen nach meiner Ansicht für unsere Betrachtungen nur dann in Frage, wenn zufällig die Spitze der subcutan eingeführten Nadel in einem größeren Blutgefäß, das sich in der Tat im subcutanen Gewebe befinden kann, läge. Sicherlich würde dies aber nur ein Ausnahmefall sein und sich durch eine größere, an Ort und Stelle entstehende Blutung zu erkennen geben. Außerdem müßten dann diese Ströme auch wieder zeitlich mit der Pulswelle zusammenfallen.

Ebenso kommen nach meiner Ansicht die von *Helmholtz*² als Erschütterungsströme beschriebenen elektrischen Erscheinungen für die vorliegende Frage nicht in Betracht. Wenn lediglich die Erschütterung durch den Blutstrom oder auch die Strömung des Blutes im Unterhautzellgewebe auf die Elektroden fortgeleitet diese Schwankungen hervorbringen würden, warum treten sie denn dann nicht auch bei einer Ableitung vom Schienbein auf? Warum findet man nicht genau die gleichen,

¹ *Gollwitzer-Meier* und *Steinhausen*: Pflügers Arch. **220**, 551 (1928).

² *Wiedemanns Annalen der Physik* **11**, 737 (1880).

aus Wellen erster und zweiter Ordnung bestehenden Stromschwankungen am Unterarm usw. ? Alle diese Gründe scheinen mir gegen die Annahme eines *nur* vasculären Entstehens der oben geschilderten Stromschwankungen zu sprechen.

Ich muß aber noch auf eine andere Fehlerquelle, die Entstellungen der von der Kopfhaut bzw. epidural abgeleiteten Stromschwankungen unter bestimmten Bedingungen hervorrufen könnte, eingehen. Es sind dies Muskelbewegungen. Man könnte denken, daß an dem Zustandekommen dieser vom Schädel abgeleiteten Stromschwankungen Bewegungen im Bereich des *M. frontalis*, *M. occipitalis*, *M. corrugator supercilii*, der *M. ciliares*, des *M. orbicularis oculi*, der anderen Augenmuskeln, der Muskeln des äußeren Ohres, endlich des ganz gewaltigen *M. temporalis*, des *M. masseter* und vielleicht auch der mimischen Muskeln des Gesichts beteiligt seien. Daß es sich bei der oben wiederholt wiedergegebenen Kurve der vermeintlich cerebralen Stromschwankungen lediglich um fortgeleitete Muskelströme handele, wird jeder, der jemals Muskelströme mit dem Saiten- oder auch mit dem Spulengalvanometer aufgenommen hat, sofort ablehnen. Muskelströme sehen ganz anders aus. Es könnte sich aber um Verschiebung der Elektroden auf oder — bei den Nadelelektroden — in der Kopfhaut bzw. im subcutanen Gewebe infolge des Zuges dieser verschiedenen Muskeln handeln. Daß in der Tat durch Muskelzusammenziehungen, z. B. durch die Kontraktion des *M. frontalis*, die Berührungsfläche zwischen einer auf der Haut aufliegenden Elektrode und der Haut weitgehend beeinflußt werden kann und so Schwankungen eines bestehenden Stromes hervorgerufen werden können, hat *Sommer* in ausgezeichneter Weise in der oben angegebenen Arbeit dargetan. Aber auch hier führen alle theoretischen Erwägungen nicht zum Ziel, und es kommt auf eine experimentelle Prüfung an.

Ich habe also in einer Reihe von Untersuchungen den Einfluß absichtlich ausgeführter Muskelbewegungen im Bereich der obengenannten Muskelgruppen auf die vom Schädel abgeleiteten Kurven geprüft. Es hat sich dabei ergeben, daß der Einfluß dieser aktiven Muskelbewegungen sowohl auf Nadelelektroden im subcutanen Gewebe, als auch auf Bleifolienelektroden, die der Haut fest angepreßt sind, nachweisbar ist. Dieser Einfluß äußert sich bei eingeschaltetem Kondensator vorwiegend in einfachen Niveaushiftungen der Galvanometerlinie nach oben oder unten. Werden aber dieselben Bewegungen möglichst rasch hintereinander mehrmals ausgeführt, so kann es in der Tat zum Auftreten wellenartiger Schwankungen kommen. Sie unterscheiden sich aber immer noch weitgehend von den Wellen erster und zweiter Ordnung der vom Schädel abgeleiteten Kurven. Kaubewegungen, rasch hintereinander ausgeführt, bedingen Stromschwankungen von einer Dauer von durchschnittlich 400 σ , Stirnrunzeln solche von 450 σ ; am kürzesten verläuft noch möglichst rasch hintereinander ausgeführtes Augenblinzeln,

und es treten dann wellenartige Schwankungen von einer Dauer von 160—180 σ auf. Andere Bewegungen, z. B. Bewegungen des Kopfes als Ganzes, können ebenfalls wellenartige Schwankungen hervorrufen; diese Schwankungen betragen bei sehr rasch ausgeführtem Kopfnicken nach vorn und hinten etwa 250 σ , bei Kopfdrehen 200 σ usw. Sprechen, Zungenbewegungen, Mundbewegungen wie Mundspitzen, seitliches Verziehen desselben u. dgl., hatten keinen Einfluß auf die Ausschläge der vom Schädel abgeleiteten Kurve, wenn sie sich nicht mit anderen Bewegungen, z. B. Sprechen mit Kopfdrehen, Augenbewegungen usw., verbanden. Am deutlichsten war natürlich der Einfluß dieser Bewegungen, wenn an die Kopfhaut Metallplattenelektroden angelegt waren; aber, wie schon oben erwähnt, traten sie auch bei den häufig verwendeten Bleifolienelektroden und selbst bei Nadelelektroden auf! Wenn man sie kennt, sind sie leicht zu deuten. Bei Bleifolienelektroden auf Stirn und Hinterkopf war der Einfluß dieser Bewegungen sehr viel ausgesprochener, als wenn die Bleifolienelektroden auf beiden Scheitelhöckern angebracht waren; in letzterem Fall war der Einfluß all der obengenannten Bewegungen kaum mehr nachweisbar. Zweifellos ist diese größere Beeinflussbarkeit durch die aufgeführten Muskelbewegungen ein Nachteil der Ableitung mit Bleifolienelektroden auch von Stirn und Hinterhaupt. Die Deutung der Kurven leidet aber darunter kaum jemals ernstlich. Ich halte es für ganz ausgeschlossen, daß die oben mitgeteilten Stromschwankungen und deren Wellen erster und zweiter Ordnung lediglich durch diese Muskelbewegungen bedingt seien. Die Muskelbewegungen können aber die Stromschwankungen erster und zweiter Ordnung durch Änderung der Berührungsfläche zwischen Elektroden und Hautoberfläche oder auch zwischen den Nadelelektroden und dem umgebenden subcutanen Gewebe unter Umständen weitgehend verändern, somit doch einen Einfluß auf den Ablauf der Kurve gewinnen und zu Entstellungen führen. Wenn es sich bei den vermeintlich cerebral entstehenden Stromschwankungen vielleicht um nicht wahrgenommene Bewegungen handelte, so müßten diese doch über einer Knochenlücke genau so gut oder so schlecht verzeichnet werden können wie auf der Gegenseite. Untersuchungen an Leuten mit Schädelrücken haben aber einwandfrei ergeben, daß man z. B. mit epidural links im Bereich des Defektes liegenden Nadelelektroden die bekannte Kurve erhält, dagegen mit Nadelelektroden, die subcutan auf der rechten Seite dem intakten Schädel anliegen, zwar auch Schwankungen, aber nicht in so ausgesprochener Weise wie im Bereich der Knochenlücke gewinnt. Wären diese Schwankungen lediglich das Ergebnis nur fortgeleiteter Bewegungen, so müßten sie sich doch auf beiden Seiten gleich gut, vielleicht sogar auf der unversehrten Seite besser zeigen als auf der Gegenseite, wo bei der Operation Fasern des M. frontalis usw. durchgeschnitten oder sonst beschädigt worden sind. Man wird Muskelbewegungen als

Fehlerquelle bei der Ableitung der Stromschwankungen vom Schädel wohl berücksichtigen müssen. Ich glaube aber nicht, daß diese Stromschwankungen nur durch die Bewegungen der äußeren Muskeln am Kopfe oder auch durch die Bewegungen der Augenmuskeln bedingt seien.

Endlich könnte man auch noch daran denken, daß die Ströme eben doch in der menschlichen Haut entstünden und vielleicht die glatte Muskulatur, die *M. arrectores pilorum*, aber auch die Hautdrüsen, also die Talgdrüsen oder die Schweißdrüsen, dabei beteiligt seien¹. Drüsenströme verlaufen aber anders, so daß sie wohl ohne weiteres hier auszuschließen sein dürften. Anders steht es aber mit den der glatten Muskulatur zugehörigen *Musculi arrectores pilorum*. Ich habe die Stromschwankungen im subcutanen Gewebe im Bereich der Knochenlücke abgeleitet, also unter Umgehung der Haut. In der Haut entstehende Ströme könnten aber doch auch nach unten fortgeleitet werden, genau wie die vermeintlich von der Rindenoberfläche kommenden Ströme durch die Dura, vielleicht auch durch das Periost hindurch bis an die im subcutanen Gewebe liegenden Nadeln gelangen. Ich habe daher subcutan eingeführte, gerade chirurgische Nadeln auf der ganzen Oberfläche einschließlich der Spitze, soweit sie nach der darüberliegenden Haut zu zu liegen kamen, mit Lack überzogen und nur auf der Unterfläche ein kleines Stück der Spitze von Lack freigelassen. Die Stromschwankungen zeigten sich dabei in derselben Weise. Allerdings war auch so eine Fortleitung der Ströme von der Haut nach unten zu nicht ausgeschlossen. Merkwürdig wäre es aber, wenn es sich wirklich um aus der Haut stammende Ströme handelte, daß sie dann nur in der Kopfhaut, nicht aber auch z. B. an Bein, Unterschenkel bzw. Schienbein, aufträten, wo doch auch reichlich *M. arrectores pilorum* vorhanden sind. Auch vom Arm, wo bekanntlich auch die Haut Haare und dementsprechend *M. arrectores pilorum* enthält, können solche Kurven nicht gewonnen werden. Dies spricht meiner Ansicht nach ganz entschieden gegen die Entstehung der oben geschilderten Stromschwankungen in der Haut selbst. Ich glaube aber, zweimal Stromschwankungen bei Ableitung von der Hautoberfläche mittels Bleifolienelektroden gesehen zu haben, die vielleicht auf den Einfluß der *M. arrectores pilorum* zurückzuführen wären. Es stellte sich bei einem Mann, der an einem kalten Tage trotz einer ausreichenden Heizung im Untersuchungszimmer ziemlich froh, eine Gänsehaut ein, und gleichzeitig traten im Elektrokardiogramm *und* der von der Schädeloberfläche im Bereich einer Knochenlücke und von der Gegenseite abgeleiteten Kurve außer den gewohnten Schwankungen von 90 und 35 σ kurze Schwankungen von 17—20 σ auf. Sie waren, wie gesagt, sowohl am Elektrokardiogramm, als auch an der vom Schädel abgeleiteten Kurve, und zwar nicht nur

¹ Vgl. *Stöhr*: Lehrbuch der Histologie. 15. Aufl., S. 379, Abb. 330. 1912.

am Doppelspulengalvanometer, sondern auch am Saitengalvanometer nachweisbar. Ich vermute, daß diese kurzen Schwankungen mit der Gänsehaut in Zusammenhang standen und daß sie vielleicht durch die Kontraktion der *M. arrectores pilorum* hervorgerufen wurden. Beweisen kann ich das natürlich auch nicht.

Im Laufe der Untersuchungen ergab sich eine andere nicht unwesentliche Fehlerquelle, die eingehend berücksichtigt werden muß. Es ist dies die Tatsache, die ich schon einmal oben erwähnt habe, nämlich die Allgegenwart des Elektrokardiogramms. Ich habe oben schon ausgeführt, daß Ableitungen von Kopf und Rücken, Kopf und Brust usw. stets Elektrokardiogramme ergaben. Ich habe das Elektrokardiogramm sogar gesehen bei einer Bleifolienableitung vom Schädel, wobei die Bleifolienelektroden auf Stirn und Hinterhaupt lagen. Die Hauptschwankungen des Elektrokardiogramms waren in dieser Kurve unschwer erkennbar. Ich gelangte daher wenigstens vorübergehend zu der etwas merkwürdigen Ansicht, daß die vermeintlich von der Dura abgeleitete Kurve überhaupt nur ein entstelltes Elektrokardiogramm sei. Ein Elektrokardiogramm, abgeändert durch Veränderungen der Berührungsfläche der Elektroden infolge der wechselnden Blutfülle der Haut und des Gehirns, zu der sich vielleicht auch noch Veränderungen durch Polarisations- und Kapazitätserscheinungen der Haut hinzugesellten. Bei den Nadelelektroden umgeht man zwar die Haut, so daß diese mit ihren elektrischen Schwankungen nicht verändernd einwirken könnte; aber die Einwände der Abänderung der Berührungsfläche zwischen Elektrode und Gewebe und der Polarisation blieben bestehen¹. Die im Tierversuch gewonnene Abb. 3, wo bei aussetzendem Elektrokardiogramm die von der Hirnoberfläche abgeleiteten Stromschwankungen weiter bestehen, spricht entschieden dagegen, daß etwa die vermeintliche cerebrale Kurve nur ein abgeändertes Elektrokardiogramm sei. Jedenfalls hat mich aber die Tatsache des Auftretens eines entstellten Elektrokardiogramms gelegentlich einer Ableitung von der Kopfhaut später dazu geführt, daß ich bei allen diesen Untersuchungen außer den Stromschwankungen, die vom Schädel abgeleitet wurden, auch gleichzeitig das Elektrokardiogramm schrieb. Dieser Umstand war auch der Grund, daß ich auf den Besitz eines Doppelspulengalvanometers so besonders großen Wert legte. Das gleichzeitige Verzeichnen des Elektrokardiogramms hat auch den großen Vorzug, daß man aus der bekannten Verspätung des Pulses bei der Fortpflanzung nach dem Hirn an den Kurven, die vom Schädel abgeleitet sind, den Zeitpunkt des Eintritts der jeweiligen Hirnpulsationen, auch wenn sie

¹ *Anmerkung bei der Korrektur:* Ich habe inzwischen in mehreren Fällen mit chlorierten Silbernadeln, die nach *Proebster* (Über Muskelaktionsströme am gesunden und kranken Menschen, Stuttgart 1928, S. 10) praktisch als unpolarisierbar gelten können, im Bereich von Schädellücken genau die gleichen Kurven, wie sie oben mitgeteilt wurden, erhalten.

an den Kurven nicht erkennbar sind, doch durch Berechnung annähernd bestimmen kann.

Ich glaube somit, alle wesentlichen Einwände *gegen* die cerebrale Entstehung der hier mitgeteilten Kurven, die mich sehr ausführlich und immer wieder und wieder beschäftigten, besprochen und so meinen eigenen vielen Bedenken Genüge getan zu haben. Im übrigen verweise ich auf die Ergebnisse der oben gerade aus diesem Grunde etwas ausführlicher mitgeteilten Tierexperimente an Hunden und Affen, wie sie von *Caton* bis zu *Prawdicz-Neminski* angestellt wurden. Ich glaube in der Tat, daß die von mir hier ausführlich geschilderte cerebrale Kurve im Gehirn entsteht und dem Elektrocerebrogramm der Säugetiere von *Neminski* entspricht. Da ich aus sprachlichen Gründen das Wort „Elektrocerebrogramm“, das sich aus griechischen und lateinischen Bestandteilen zusammensetzt, für barbarisch halte, möchte ich für diese von mir hier zum erstenmal *beim Menschen* nachgewiesene Kurve in Anlehnung an den Namen „Elektrokardiogramm“ den Namen „*Elektrenkephalogramm*“ vorschlagen.

Ich glaube also in der Tat, das Elektrenkephalogramm des Menschen gefunden und hier zum ersten Male veröffentlicht zu haben.

Das Elektrenkephalogramm stellt eine fortlaufende Kurve mit ständigen Schwankungen dar, an der man, wie schon immer wieder hervorgehoben, die größeren Wellen erster Ordnung mit einer Durchschnittsdauer von 90σ und die kleineren Wellen zweiter Ordnung von durchschnittlich 35σ unterscheiden kann. Die größeren Ausschläge haben einen Wert von im Höchstmaß $0,00015$ — $0,0002$ Volt.

Ich habe zunächst nur diese ständigen Schwankungen untersucht, die den ständigen Schwankungen, wie sie von der Hirnrinde des Hundes und des Affen von *Cybulski*, *Kaufmann* und *Neminski* abgeleitet wurden, entsprechen. Vom Menschen waren bisher derartige Untersuchungen, wie gesagt, nicht bekannt. *Bissky*¹ hat zwar behauptet, „er habe den physiologischen Rhythmus des menschlichen Nervensystems entdeckt“, und festgestellt, daß „unser Nervensystem und Gehirn nur auf einen speziellen Wechselstrom mit einer bestimmten Anzahl von Schwankungen in der Sekunde reagiere“. Die Frequenz dieses Wechselstromes ist aber eine vielmals größere, als sie den von mir beim Menschen festgestellten Schwankungen erster oder zweiter Ordnung entspricht. Einer Arbeit von *Schulte*² über diese *Bisskysche* Methode entnehme ich, daß der verwendete Strom 335 Unterbrechungen in der Sekunde zeigte. Man ersieht jedenfalls daraus, daß diese *Bisskyschen* Untersuchungen mit unseren Feststellungen nichts zu tun haben. Denn von den größeren Wellen des menschlichen Elektrenkephalogramms kommen 10—11 auf

¹ *Friedländer*: Die *Bisskysche* Diagnostoskopie. Umschau 1926, S. 1053.

² *Schulte*: Über Elektrodiagnose seelischer Eigenschaften. Psychol. u. Med. 1, 62 (1925), namentlich S. 66.

1 Sekunde, von den kleineren 20—30 auf 1 Sekunde, also, wenn man beide Wellen zusammenrechnet, etwa 10—30 auf 1 Sekunde.

Im Gegensatz zu den *Bisskyschen* Phantastereien haben ernsthafte Untersucher einen ganz anderen Rhythmus des menschlichen Zentralnervensystems wahrscheinlich gemacht. Ich greife von vielen Untersuchungen nur diejenigen von *P. Hoffmann* und *H. Strughold*¹ heraus. Sie haben die willkürliche Innervation bei Bewegungen im Ellbogengelenk mit Hilfe der Aktionsströme beim Menschen eingehend untersucht, und sie kommen zu dem Ergebnis, daß sich ein doppelter Rhythmus der Aktionsströme nachweisen läßt. Sie unterscheiden einen Rhythmus A und einen Rhythmus B. Der Rhythmus A zeigt 10—50, der Rhythmus B 150—180 Stromstöße in der Sekunde. Diese Untersucher sprechen sich dahin aus, daß der Rhythmus A vermutlich von höheren Zentren herühre, während der Rhythmus B durch die Tätigkeit des letzten motorischen Neurons bedingt sei. Dieser Rhythmus A von 10—50 Stromstößen in der Sekunde, der hier den höheren Zentren des Zentralnervensystems zugeschrieben wird, würde mit unseren 10—30 Wellen des Elektrenkephalogramms in der Sekunde gut übereinstimmen. Jedenfalls zeigen aber schon diese objektiven Feststellungen von *Hoffmann* und *Strughold*, daß es überhaupt unrichtig ist, von einem Rhythmus des menschlichen Zentralnervensystems im allgemeinen zu sprechen. Die verschiedenen Abschnitte des Zentralnervensystems besitzen einen verschiedenen Rhythmus.

Gehen wir nun auf die Frage ein, wie das Elektrenkephalogramm überhaupt zustande kommt, so möchte ich nochmals darauf hinweisen, daß die Ableitung dieser Stromschwankungen nicht nur von der Dura des Großhirns, sondern auch von der über dem Kleinhirn gelegenen gelingt. Das Elektrenkephalogramm stellt also sicher nicht eine besondere Eigentümlichkeit des Großhirns dar, wenn vielleicht auch das Elektrenkephalogramm vom Kleinhirn eine etwas andere Form zeigt und seltenere große Stromstöße aufweist. Ob nun aber der Strom in der Rinde des Groß- und Kleinhirns oder in tieferen Teilen entsteht, das zu entscheiden, sind wir völlig außerstande, und ich möchte nochmals auf die oben wieder-gegebene Anschauung *Gartens*² verweisen. Es handelt sich aber bei den Schwankungen des Elektrenkephalogramms sicherlich nicht im strengen Sinne des Wortes um Ruhestrome, sondern es sind Aktionsströme, d. h. bioelektrische Erscheinungen, die die ständigen, im Zentralnervensystem stattfindenden Nervenprozesse begleiten. Denn wir müssen annehmen, daß das Zentralnervensystem nicht nur im Wachzustand, sondern immer sich in einer nicht unerheblichen Tätigkeit befindet. Dies gilt z. B. von der Rinde, in der außer den mit Bewußtsein verknüpften Vorgängen noch eine ganze Reihe von anderen Leistungen

¹ *Hoffmann, P.* und *H. Strughold*: Ein Beitrag zur Oszillationsfrequenz der willkürlichen Innervation. *Z. Biol.* 85, 599 (1927). Ref.: *Zbl. Neur.* 47, 614 (1927).

² *Garten*: 1. c.

abläuft. Ja man kann sagen, daß die mit den Bewußtseinserscheinungen verknüpften Vorgänge wohl nur einen kleinen Teil der gesamten Rindenarbeit darstellen. Selbstverständlich sind die im Elektrenkephalogramm ständig zutage tretenden elektrischen Erscheinungen nur Begleiterscheinungen der eigentlichen Nervenprozesse. Denn von der alten Ansicht, daß für die Leistungen im Zentralnervensystem elektrische Erscheinungen an sich von besonderer Bedeutung seien, ist man längst zurückgekommen. Es waren dies Ansichten, wie sie noch *Rolando* vertreten hat, der in der lamellären Anordnung des Kleinhirns seine besondere Bedeutung für die Entwicklung von Elektrizität sah, oder wie es auch *Baillarger* tat, wenn er den von ihm festgestellten sechsschichtigen Bau der Großhirnrinde mit der Anordnung der einzelnen Platten einer *Voltaschen* Säule verglich¹.

Wir sehen im Elektrenkephalogramm eine Begleiterscheinung der ständigen Nervenvorgänge, die im Gehirn stattfinden, genau wie das Elektrokardiogramm eine Begleiterscheinung der Kontraktionen der einzelnen Herzabschnitte darstellt.

Es drängten sich mir natürlich ganz von selbst mancherlei Fragestellungen bei den Untersuchungen auf, z. B. ob, wie es im Tierexperiment festgestellt ist, auch im menschlichen Elektrenkephalogramm unter der Einwirkung peripherer Reize Veränderungen sich einstellen; ferner die Frage, ob ein Unterschied des Elektrenkephalogramms im Wach- und Schlafzustande nachweisbar wäre, wie es sich in Narkose verhalte und dergleichen mehr. Vor allem aber, wie steht es denn mit der Frage, die *Fleischl von Marxow* schon vorschwebte, als er damals schrieb, daß man unter Umständen dahin kommen könne, die elektrischen Begleiterscheinungen der Vorgänge am eigenen Gehirn zu beobachten? Ist es möglich, den Einfluß intellektueller Arbeit auf das menschliche Elektrenkephalogramm, so weit es hier mitgeteilt wurde, nachzuweisen? Allzu große Hoffnungen darf man sich da natürlich von vornherein nicht machen, denn die geistige Arbeit fügt, wie ich schon an anderer Stelle ausgeführt habe, nur ein geringes Mehr zu der ständig und nicht nur im Wachzustand vor sich gehenden Rindenarbeit hinzu. Es wäre aber durchaus möglich, daß dieses Mehr sich bereits in dem Elektrenkephalogramm, das die ständige Tätigkeit des Gehirns begleitet, zu erkennen geben könnte. Ich habe natürlich zahlreiche derartige Versuche angestellt, bin aber zu einer *eindeutigen* Antwort nicht gelangt. Ich neige der Ansicht zu, daß bei anstrengender geistiger Arbeit die größeren, 90 σ im Durchschnitt dauernden Wellen, also die Wellen erster Ordnung, mehr zurücktreten und die kleineren, 35 σ -Wellen zweiter Ordnung häufiger werden. Bei völliger geistiger Ruhe, im Dunkeln, bei geschlossenen Augen erhält man die besten Elektrenkephalogramme, die beide Wellenarten in ziemlich regelmäßiger Anordnung zeigen. Diese Mitteilungen stützen sich vor allem auf Untersuchungen an gesunden

¹ *Soury. J.*: Systeme nerveux central. 1, 570 (Paris 1899).

Menschen, die keine Schädellücken darboten, bei denen also von der Kopfhaut mit Bleifolienelektroden abgeleitet wurde. Bei dieser Untersuchungsart, d. h. bei der Ableitung von der Haut, muß aber gerade das Dazwischenkommen des *Tarchanoff*-Phänomens¹ berücksichtigt werden. Das *Tarchanoff*-Phänomen, das namentlich auch bei intellektuellen Leistungen nachweisbar ist, kann durch Kompensationswirkung die größeren Ausschläge des Elektrenkephalogramms einebnen, so daß die Höhe der Wellen erster Ordnung abnimmt und man den Eindruck gewinnt, daß die kleineren Wellen stärker hervortreten. Man kann selbstverständlich dieser Täuschung durch Ausmessung der Länge der einzelnen Wellenarten entgehen; dafür braucht man aber natürlich sehr gut geschriebene Kurven. Ich habe namentlich bei den Versuchen mit meinem Sohn Klaus den Eindruck gewonnen, daß bei angestrenzter intellektueller Arbeit, aber auch schon bei starker Anspannung der Aufmerksamkeit die kleineren und kürzeren Wellen überwiegen. Jedoch kann dies keineswegs als eine endgültige Feststellung betrachtet werden, sondern es bedarf noch zahlreicher Nachuntersuchungen, so daß ich mich hier auf keine bestimmte Antwort festlegen möchte. Ich hoffe aber, später gerade noch über diese Frage berichten zu können. Von großem Interesse wäre natürlich auch die Untersuchung der Einwirkung von Medikamenten und Genußmitteln auf das Elektrenkephalogramm, so daß sich da wirklich eine Fülle von Fragestellungen darbietet, da wir hier im Elektrenkephalogramm vielleicht endlich einmal eine objektive Untersuchungsmethode der Vorgänge in den höheren Abschnitten des Zentralnervensystems vor uns haben. Es waren vorwiegend praktische Gesichtspunkte, die mich immer wieder seit vielen Jahren an dieser Aufgabe arbeiten ließen, namentlich auch *die* Frage, ob man vielleicht, ähnlich wie das beim Elektrokardiogramm für die Herzkrankheiten der Fall ist, eine objektive Untersuchungsmethode für *krankhafte* Veränderungen in der Tätigkeit des Zentralnervensystems auffinden könne, was dann natürlich auch diagnostisch von allergrößter Bedeutung werden könnte. Ich habe auch bereits in dieser Richtung eine Reihe von Untersuchungen angestellt. Bestimmte Angaben kann ich aber auch da nicht machen, da eindeutige Ergebnisse noch nicht vorliegen. Die Untersuchungen werden aber ebenso, wie die Untersuchungen der oben angedeuteten Fragen, so weit mir dies meine Zeit erlaubt, fortgesetzt, und ich hoffe, später darüber berichten zu können. Wünschenswert wäre es natürlich auch für die Verfolgung dieser Fragen, wenn zu diesen Untersuchungen noch empfindlichere Instrumente, wie sie die Technik in der Tat herzustellen imstande ist, verwendet werden könnten².

¹ *M. Gildemeister*: „Die Elektrizitätserzeugung der Haut und der Drüsen“, Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie, VIII, S. 776, 1928.

² Siemens und Halske hat mir auf meine Anfrage hin schon 1927 eine entsprechende Apparatur angeboten, deren Anschaffung aber für mich an den Kosten scheiterte.