13 28
—
ARBEITSPHYSIOLOGIE

**ZEITSCHRIFT FÜR DIE PHYSIOLOGIE DES MENSCHEN
BEI ARBEIT UND SPORT**

UNTER MITWIRKUNG VON

F. G. BENEDICT-BOSTON, **A. BETHE**-FRANKFURT A. M., **A. DURIG**-WIEN
G. EMBDEN-FRANKFURT A. M., **W. R. HESS**-ZÜRICH, **L. VON KREHL**-HEIDELBERG
G. LILJESTRAND-STOCKHOLM, **J. LINDHARD**-KOPENHAGEN
O. RIESSER-BRESLAU

HERAUSGEGEBEN VON

E. ATZLER UND **M. RUBNER** †
DORTMUND BERLIN

Sonderabdruck aus 5. Band. 6. Heft

Edgar Atzler und Gunther Lehmann:
**Über ein neues Verfahren zur Darstellung
der Herztätigkeit (Dielektrographie)**

BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1932

(Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie, Dortmund-Münster.)

Über ein neues Verfahren zur Darstellung der Herztätigkeit (Dielektrographie).

Von
Edgar Atzler und Gunther Lehmann.

Mit 30 Textabbildungen.

(Eingegangen am 5. Mai 1932.)

Inhaltsverzeichnis.

- I. Einleitung (S. 636).
- II. Physikalische Grundlagen (S. 638).
- III. Der Dielektrograph (S. 644).
- IV. Die Durchführung der Herzaufnahme (S. 646).
- V. Modellversuche (S. 647).
- VI. Die physiologischen Grundlagen des Dielektrogramms (S. 651).
- VII. Festlegung der 4 Hauptphasen der Herzrevolution im dielektrographischen Kurvenzug (S. 653).
- VIII. Die einzelnen Phasen der Herzrevolution im Dielektrogramm des gesunden Menschen (S. 656).
 - A. Die Systole (S. 658).
 - a) Die Anspannungszeit (S. 658).
 - b) Die Austreibungszeit (S. 659).
 - B. Die Diastole (S. 663).
 - a) Die Entspannungszeit (S. 663).
 - b) Die Einströmungszeit (S. 663).
- IX. Die Prüfung der Herzfunktion mit Hilfe des Dielektrographen (S. 666).
- X. Die dielektrographische Analyse pharmakologischer Beeinflussung der Herztätigkeit (S. 671).
- XI. Das Dielektrogramm des kranken Herzens (S. 674).
- XII. Die Aufnahme peripherer Pulse mit dem Dielektrographen (S. 678).
- XIII. Zusammenfassung (S. 679).
- XIV. Literatur (S. 680).

I. Einleitung.

Wenn der Arzt das Herz eines Menschen untersucht, so verfolgt er letzten Endes das Ziel, zu einem Urteil über die Leistungsfähigkeit dieses Organs zu gelangen. Der Herzkranke und der Rekonvaleszent müssen wissen, welche Anstrengungen sie sich zumuten dürfen. Ist schon in einfach gelagerten Fällen ein hohes Maß von Erfahrung erforderlich, um richtige therapeutische Anordnungen zu treffen, so

wachsen die Schwierigkeiten, wenn der Arzt junge Leute bei der Berufswahl beraten soll. Wie soll er einem noch in der Entwicklung befindlichen Organismus ansehen, ob die Anstrengungen eines Berufes oder eines Sports auf die Dauer ausgehalten werden können?

Ein gewissenhafter Arzt bewahrt einen Herzkranken dadurch vor Schaden, daß er ihm auf Grund seiner Erfahrungen nur ein ganz bestimmtes Maß körperlicher Bewegungen konzedierte. Damit gewährt er seinem Patienten einen gewissen Schutz, aber die „wissenschaftlich“ richtige Entscheidung hat er nicht getroffen. Das ist offenbar erst dann der Fall, wenn der Kranke die ihm verbliebene Arbeitskraft voll ausnutzen kann. Der Arzt unserer Tage kann aber den Herzkranken nicht bis zu der zulässigen Belastungsgrenze arbeiten lassen, sondern er muß aus Gründen der Sicherheit wesentlich darunter bleiben.

Die alten Ärzte waren darauf angewiesen, die Leistungsfähigkeit des Herzens nach dem Aussehen und Verhalten des Patienten, nach der Farbe der Lippen, nach dem Puls bei Ruhe und bei Arbeit und ähnlichen Symptomen zu beurteilen. Die modernen Herzuntersuchungsmethoden haben die alten Verfahren in dieser Beziehung nicht weit überflügelt. Die Registrierung des Erregungsablaufes im Elektrokardiogramm besagt wenig über die Funktionstüchtigkeit des Herzens.

Bei dieser Sachlage ist es zu verstehen, daß man allseits mit großem Eifer an die Aufgabe heranging, eine zuverlässige Herzfunktionsprüfung zu schaffen; aber man hat dieses Ziel bis heute noch nicht voll erreicht. Unter den registrierenden Methoden setzten manche Autoren eine Zeitlang besondere Hoffnungen auf die Kardiographie, andere verhielten sich skeptisch; so schrieb im Jahre 1909 Nicolai¹ „die Herzstoßkurve erlaubt kaum etwas anderes zu erkennen als die Tatsache, daß sich das Herz überhaupt bewegt hat“.

Nur bei wenigen Personen ist es möglich, gute Kardiogramme zu registrieren. Das ist dann der Fall, wenn das Fettpolster nur mäßig entwickelt ist, die Interostalräume weit genug sind und das Herz anatomisch günstig gelagert ist. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, so kann man nach einem Vorschlage von Fredericq², Minkowsky³ u. a. doch noch ein Kardiogramm erhalten, wenn man die Herzbewegungen, insbesondere diejenigen des linken Vorhofes von der Speiseröhre aus registriert: Oesophageales Kardiogramm. Diese Methode konnte sich aus begreiflichen Gründen nicht einbürgern.

Wie wertvoll das Kardiogramm für die Physiologie und Pathologie des Herzens ist, das erkennt man aus einem Aufsatz von Frey⁴ über den Spitzenstoß, der auf den Arbeiten von Frank und Hess⁵ und Weitz⁶ fußt. Frey veröffentlicht eine Reihe von Kardiogrammen, bei deren Betrachtung sich wohl jeder Internist wünschen mag, daß es nicht nur in einzelnen Fällen, sondern bei allen Herzkranken möglich sein müßte, das Kardiogramm aufzunehmen. Die Methode, die wir im folgenden ausführlich beschreiben, erlaubt es in allen Fällen, die Form- und Größenänderung des

Herzens auf eine neuartige, allgemein anwendbare Weise zu registrieren; sie berechtigt zu der Hoffnung, daß man mit ihrer Hilfe die Tätigkeit des menschlichen Herzens von einem neuen Standpunkt aus betrachten kann.

II. Physikalische Grundlagen.

Das Prinzip unserer Registriermethode beruht darauf, daß man das menschliche Herz zwischen die Platten eines Kondensators bringt und die durch den Herzschlag entstehenden Kapazitätsänderungen registriert. *Cremer*⁷ hat im Jahre 1907 zwischen zwei Kondensatorplatten ein Froschherz isoliert aufgehängt und mit Hilfe eines Saitenelektrometers beobachten können, daß der Kondensator rhythmische Änderungen seiner Kapazität erfährt, die offenbar auf die Bewegungen des Herzens zurückzuführen sind. *Cremer* ging dieser Beobachtung in seinen späteren Arbeiten nicht weiter nach. Es kam ihm nur darauf an, zu zeigen, daß eine mechanische Bewegung eines Organs ohne direkte Berührung aufgezeichnet werden kann.

Auch *Höber*⁸ brachte wenige Jahre später organisches Material in das Kondensatorfeld und maß die Kapazitätsänderungen; er verfolgte dabei aber nicht den Zweck, Formveränderungen des eingebrachten Materials zu registrieren, sondern wollte das innere Leitvermögen von Zellen ermitteln. Auf den ersten Blick scheinen die *Höberschen* Untersuchungen nur in einem sehr äußerlichen Zusammenhange mit den unseren zu stehen. Sie erleichtern uns aber das Verständnis der physikalischen Grundlagen, auf denen sich unser Verfahren aufbaut.

Wie bekannt, ist die Kapazität eines Plattenkondensators proportional der Plattenfläche ($r^2\pi$) und der Dielektrizitätskonstanten (ϵ) des Zwischenmediums und umgekehrt proportional dem Abstand der beiden Platten (a). Wir können also schreiben

$$(1) \quad C = \frac{r^2 \epsilon}{4a}.$$

Diese einfache Formel ist jedoch nur eine Näherungsformel, die annähernd richtig ist, wenn der Plattenabstand relativ zur Plattengröße sehr klein ist. Dieser Fall ist bei uns wegen der Abmessungen des menschlichen Thorax nicht gegeben. Wir müssen daher die Randladungen berücksichtigen, wie es die vollständige *Kirchhoffsche*⁹ Formel tut:

$$(2) \quad C = \frac{r^2 \epsilon}{4a} + \frac{r \epsilon}{4\pi} \left[\ln \frac{16 \pi r}{a} + 1 + f\left(\frac{d}{a}\right) \right]$$

Da wir dünne Platten verwenden, kann der Ausdruck $f\left(\frac{d}{a}\right)$, in dem d die Dicke der Platte ist, vernachlässigt werden. Trotzdem ergibt sich beim Einsetzen von Zahlenwerten, daß der zweite Term, der zu dem einfachen Ausdruck der Gleichung (1) als Korrektur hinzutritt, größer ist als dieser selbst.

Bringt man zwischen die Platten eines Kondensators einen beliebigen Körper, so steigt die Kapazität, gleichgültig, ob dieser Körper den Strom leitet oder ob ihm die Eigenschaften eines Isolators zukommen. Trotz des gleichen Endeffektes handelt es sich in beiden Fällen um ganz verschiedene Vorgänge. Bringt man einen metallischen Körper in das Kondensatorfeld, so ist das letzten Endes dasselbe, als ob man den Abstand zwischen den beiden Kondensatorplatten verringert hätte. Beim Einbringen einer nicht metallischen Substanz, die den Strom praktisch nicht leitet, wirkt sich nur die Änderung der Dielektrizitätskonstanten aus. Die Kapazität steigt, weil die Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums größer geworden ist. Leitet eine Substanz, die in das Kondensatorfeld gebracht wird, den Strom schlecht, so konkurrieren beide Vorgänge miteinander. Das quantitative Verhältnis der beiden Vorgänge zueinander hängt nun aber nicht, wie man erwarten sollte, nur von der Dielektrizitätskonstanten und der Leitfähigkeit des Zwischenmediums, sondern auch von der Art der Aufladung des Kondensators ab.

Legen wir den Kondensator in einen Wechselstrom, so vertauschen die Platten mit jedem Wechsel ihren Ladungssinn. Durch das dielektrische Zwischenmedium fließt zwar kein Leitungs-, aber ein Verschiebungsstrom. Befindet sich ein schlechter Leiter zwischen den Platten, so fließt in ihm außerdem ein echter Leitungsstrom. Solange die Wechselfrequenz gering ist, genügt schon eine sehr geringe Leitfähigkeit, um die Entstehung eines Verschiebungsstromes praktisch unmöglich zu machen. Steigt jedoch die Frequenz über ein gewisses Maß, erreicht sie speziell Werte von 100 Millionen pro Sekunde, wie bei Kondensatoren in Ultrakurzwellenschwingungskreisen, so nimmt der Verschiebungsstrom auf Kosten des Leitungsstromes immer mehr zu. Die Bedeutung der Leitfähigkeit tritt also gegenüber der Dielektrizitätskonstanten immer mehr zurück. Es ist also denkbar, daß unter derartigen Verhältnissen der in das Kondensatorfeld gebrachte menschliche Körper nicht nur als Leiter, sondern daneben auch als Dielektrikum wirkt.

Bringt man einen nichtleitenden Körper zwischen die Platten eines Luftkondensators, so ändert man die Dielektrizität des Zwischenmediums. Wir dürfen nicht mehr mit der Dielektrizitätskonstanten der Luft rechnen, sondern mit einem Wert, der von der Dielektrizitätskonstanten des eingebrachten Körpers und seiner Größe abhängt. Es läßt sich nicht von vornherein übersehen, ob die Kapazitätsänderung in einer Beziehung zur Änderung der Querschnittsfläche oder zum Volumen des Körpers steht.

Eine Überschlagerrechnung, die allerdings den wirklichen Verhältnissen nur in erster Annäherung gerecht wird, gibt uns einen Anhaltspunkt. Die beiden

Kondensatorplatten A_1 und A_2 (Abb. 1a), von denen jede die Oberfläche $r^2\pi$ habe, befinden sich in einer gegenseitigen Entfernung a ; das Medium habe die Dielektrizitätskonstante ε_1 .

Abb. 1.

Wir bringen jetzt in das Kondensatorfeld in der aus Abb. 1a ersichtlichen Weise einen zylindrischen Nichtleiter hinein, dessen Grundfläche ebenfalls $r^2\pi$ ist, während seine Höhe b ist. Die Dielektrizitätskonstante dieses Körpers sei ε_2 . Wir erhalten dann eine mittlere Dielektrizitätskonstante

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1(a-b) + \varepsilon_2 b}{a}$$

Die Kapazität dieses Kondensators mit dem Zwischenmedium von der Dielektrizitätskonstanten ε_m ist also [siehe Formel (1)]:

$$C_2 = \frac{r^2}{4a} \frac{\varepsilon_1(a-b) + \varepsilon_2 b}{a}$$

Eine einfache Umformung ergibt:

$$(3) \quad C_2 = \frac{r^2 \varepsilon_1}{4a} + \frac{r^2 b}{4a^2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1).$$

Aus der rechten Seite dieser Gleichung ergibt sich, daß die neue Kapazität C_2 des Kondensators, die ursprünglich $\frac{r^2 \varepsilon_1}{4a}$ war, nach dem Einbringen des Körpers um $\frac{r^2 b}{4a^2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ größer geworden ist. Die Kapazitätsänderung erfolgt also proportional der Fläche und Dicke des Körpers und proportional der Differenz der beiden Dielektrizitätskonstanten ε_2 und ε_1 .

Die auf S. 638 angegebene exaktere Formel ändert hieran nichts. Beim Einbringen eines kleineren Körpers werden die Feldlinien nach dem Körper zu abgebogen (Abb. 1b). Eine so einfache schematische Berechnung läßt sich daher nicht durchführen. Wir können aber erwarten, daß die Beeinflussung größer ist, als es nach der obigen Betrachtungsweise zu erwarten wäre. Trotzdem wird maßgebend für die Kapazitätsänderung die Dielektrizitätskonstante und das Volumen des eingebrachten Körpers sein.

In der Kapazitätsmessung haben wir also eine Methode, die es ermöglicht, das Volumen eines Körpers zu bestimmen, sofern sich seine Dielektrizitätskonstante von der des Zwischenmediums unterscheidet. Erfährt der Körper Änderungen seines Volumens, so kann man diese als Kapazitätsänderungen erfassen. Der Gedanke liegt nahe, dieses Prinzip zu benutzen, um die Volumänderungen eines Organs zu registrieren.

Aussichtsreich liegen in dieser Hinsicht die Verhältnisse beim Herzen. Dieses Organ vergrößert und verkleinert sich innerhalb der stark lufthaltigen Lunge. Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ist bekanntlich etwa 81, die der Luft = 1. Die Dielektrizitätskonstante von Blut und wasserreichem Gewebe ist vermutlich nicht wesentlich

von 81 verschieden. Die Differenzen der Dielektrizitätskonstanten zwischen Lunge und Herz sind also sicher groß genug, um zu einer Volumregistrierung verwandt zu werden.

Es wäre eine lockende Aufgabe, nach diesem Prinzip die Schlagvolumkurve des Herzens zu registrieren. Wir können jetzt schon sagen, daß man dieses Ziel aus verschiedenen Gründen nicht in vollem Umfange erreichen kann. Vor allem werden die durch den Herzschlag bedingten Bewegungen der Brustwand, die man als Kardiogramm registriert, in die Kurve eingehen. Immerhin gelangt man zu Kurven, die bis zu einem gewissen Grade Schlußfolgerungen auf die Größe des Schlagvolumens erlauben, darüber hinaus aber sehr charakteristische Bilder der Herztätigkeit ergeben, die vielleicht sowohl für die Physiologie wie die Pathologie und Pharmakologie des Herzens von Interesse sein mögen.

Aus den obenerwähnten Gründen ist es unzweckmäßig, mit konstanten Ladungen des Kondensators oder relativ langsamen Schwingungen zu arbeiten. Wir haben eine Anordnung mit konstanten Ladungen ausprobiert. Es gelang uns, bestenfalls Bewegungen des menschlichen Brustkorbes darzustellen. Eine Apparatur, die Einzelheiten der Herztätigkeit zeigt, muß so beschaffen sein, daß die Ladungen und Entladungen des Kondensators in einigen hundertmillionstel Sekunden erfolgen.

Verbindet man die beiden Kondensatorplatten, die ungefähr die Größe des Herzens haben und deren gegenseitige Entfernung etwa 20 cm beträgt, durch einen Metallbügel, so erhält man einen Schwingungskreis, der aus einer Kapazität und einer sehr kleinen Selbstinduktion besteht.

Erregen wir diesen Schwingungskreis induktiv durch ein schwingendes System, so schwingt er um so stärker mit, je genauer er auf die Wellenlänge dieses Systems abgestimmt ist. So lange sich am Plattenabstand und dem verbindenden Bügel nichts ändert, hängt die Abstimmung von den Kapazitätsänderungen des Kondensators ab, die durch die Tätigkeit des zwischen den Kondensatorplatten schlagenden Herzens hervorgerufen werden.

Eine ähnliche Anordnung hat *Schliephake*¹⁰ für die Zwecke der Hochfrequenztherapie angewandt. Er spricht auch an einer Stelle seiner interessanten Arbeiten von Pendelungen seines im Anodenkreis liegenden Amperemeters, die den Pulsschlägen entsprachen. *Schliephake* ging dieser Beobachtung nicht weiter nach. Wir konnten andererseits seine Anordnungen nicht für unsere Versuche übernehmen, da wir im Gegensatz zu *Schliephake* jede Erwärmung der untersuchten Körperteile sorgfältig vermeiden mußten. Wir waren daher gezwungen, mit einer möglichst geringen Sendeenergie auszukommen.

In bezug auf die zu verwendende Wellenlänge sind wir an einen relativ engen Bereich gebunden. Aus der Tatsache, daß der Verschiebungsstrom gegenüber dem Leitungsstrom um so mehr zunimmt, je kürzer die Wellenlänge ist, ergibt sich die Forderung, mit einer möglichst kurzen Welle zu arbeiten. Andererseits ergeben sich aus den mittleren Dimensionen des menschlichen Körpers gewisse Minimaldimensionen für den Kondensator und die als Selbstinduktion wirkenden Verbindungsbügel, die das Unterschreiten einer bestimmten Wellenlänge praktisch verhindern.

Die Wellenlänge, auf die ein Schwingungskreis abgestimmt ist, ergibt sich aus der Größe der Kapazität (C) und der Größe der Selbstinduktion (L) nach der *Thomson'schen* Formel

$$(4) \quad \lambda = 2\pi \sqrt{L \cdot C}.$$

Bei einem Plattenradius von 7,5 cm, einem Plattenabstand von 20 cm und Luft als Zwischenmedium berechnet sich die Kapazität C unseres Kondensators nach der Formel 2 zu 3,05 cm. Dieser Wert ist jedoch nur ein Minimalwert. Wenn sich der Körper zwischen den Platten befindet, erhalten wir eine wesentlich höhere Kapazität. Würden sich 20 cm Wasser zwischen den Platten befinden, so würde die Kapazität 247 cm betragen. Da die Dielektrizitätskonstante der Brust als ganzes sicher kleiner als die des Wassers ist und der Plattenabstand meist größer als 20 cm gewählt werden muß, so ist 247 cm als Maximalwert zu betrachten.

Zur Berechnung der Selbstinduktion benutzen wir die Formel für das Rechteck:

$$L = \left\{ 4 \left[a \ln \frac{2ab}{\varrho(a+p)} + b \ln \frac{2ab}{\varrho(b+p)} - 2(a+b-p) \right] + (a+b) \right\} 10^{-9} \text{ Henry.}$$

Hierin bedeutet L die Selbstinduktion, a und b die Seitenlängen des Rechteckes in Zentimeter, ϱ den Halbmesser des Leiterquerschnittes. a beträgt in unserem Falle 26 cm, $b = 55$ cm und $\varrho = 0,15$ cm. p berechnet sich als $\sqrt{a^2 + b^2}$. Wir erhalten für L den Wert $1603 \cdot 10^{-9}$ Henry. Demnach ist $L = 1603$ cm.

Legen wir diese Werte für L und C zugrunde, so ergibt sich, daß unser Schwingungskreis, wenn der Kondensator nur Luft enthält, auf eine Wellenlänge $\lambda = 4,4$ m bei Füllung des Kondensators mit Wasser auf $\lambda = 6,29$ m abgestimmt ist.

Wird ein Schwingungskreis durch eine Sendeeinrichtung erregt, so erreichen seine Schwingungen dann ein Intensitätsmaximum, wenn die Sendewelle mit der Eigenfrequenz des Schwingungskreises übereinstimmt. Weicht dessen Eigenfrequenz von der des Senders ab, so nimmt die Intensität des Mitschwingens um so mehr ab, je weiter sich beide voneinander entfernen. Die Beziehung zwischen beiden ist da-

durch charakterisiert, daß die zuerst langsame Abnahme der Intensität allmählich schneller wird. Nach einem Teil, den wir als praktisch geradlinig ansehen können, nimmt die Intensität des Mitschwingens langsamer ab, bis dieses schließlich ganz aufhört.

Würden wir in dem Bereich völliger Resonanz zwischen Sender und Schwingungskreis arbeiten, so würde eine Vergrößerung und Verkleinerung der Kapazität in gleicher Weise eine Schwächung des Mitschwingens auslösen. Die erhaltenen Kurven wären nicht deutbar. Um dem Richtungssinne und der Größenordnung nach eindeutige Beziehungen zwischen den Kapazitätsänderungen und den Intensitätsschwankungen zu erhalten, sind wir gezwungen, in dem geradlinigen Teil der Abstimmungscharakteristik zu arbeiten. Als Sendewelle kommt daher eine Wellenlänge in Frage, die wenig außerhalb des erwähnten Abstimmungsbezirktes liegt.

Der Versuch ergab, daß unser Schwingungskreis selbst dann, wenn sich zwischen den Platten des Kondensators nur Luft befindet, die Abstimmung also sehr schlecht ist, noch mit geringer Intensität mitschwingt. Bringt man zwischen die Kondensatorplatten ein entsprechendes Glasgefäß, so kann man sich leicht davon überzeugen, daß mit allmählichem Einfüllen von Wasser in dieses Gefäß die Intensität des Mitschwingens regelmäßig ansteigt, ohne daß aber bei Innehaltung der angegebenen Dimensionen ein Maximum erreicht würde.

Um sicher zu gehen, daß wir bei sehr verschieden dicken Körpern, die oft auch eine Änderung des Plattenabstandes notwendig machen, nicht aus dem geradlinigen Teil der Abstimmungscharakteristik heraus geraten, schalteten wir dem Untersuchungskondensator einen variablen Drehkondensator von 0—500 cm Kapazität parallel. Zu Beginn jeder Aufnahme wird mit Hilfe dieses „Ausgleichskondensators“ auf die gleiche Schwingungsintensität eingestellt und dadurch die Sicherheit geschaffen, daß wir stets an der gleichen Stelle der Abstimmungscharakteristik arbeiten.

Um die Intensität der Schwingungen zu messen, kann man so verfahren, daß man einen Krystalldetektor in den Schwingungskreis einschaltet und parallel zu diesem ein Milliampereometer legt. Diese einfache Vorrichtung genügt, um die bisher beschriebenen Erscheinungen zu beobachten. Die Verwendung einer Röhrengleichrichtung hat den Vorteil, daß gleichmäßigere Bedingungen für eine Registrierung geschaffen werden. An die Gleichrichterröhre kann in bekannter Weise eine Verstärkerröhre geschaltet werden, die den Strom so weit verstärkt, daß die erhaltene Kurve mit einem beliebigen elektrischen Registrierinstrument von genügend hoher Eigenfrequenz aufgenommen werden kann.

III. Der Dielektrograph*.

Die Apparatur, die wir uns nach den in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Prinzipien aufbauten, nahm im Laufe der Zeit mit der wachsenden Erfahrung immer handlichere und bequemere Formen an. Da es sich bei diesen Konstruktionsabänderungen aber niemals um prinzipielle Dinge gehandelt hat, begnügen wir uns mit einer Beschreibung der letzten Form, trotzdem eine Reihe der später zu schildernden Modellversuche und Herz-aufnahmen noch mit den älteren Apparaturen gemacht worden sind.

Abb. 2.

Das Schaltungsschema der Gesamtapparatur geben wir in Abb. 2 wieder. Der linke Teil der Skizze zeigt den Kurzwellensender. Er arbeitet in der heute jedem Radiobastler bekannten Dreipunktschaltung mit Gitterblockierung. Der Schwingkreis mit seinen frequenzbestimmenden Teilen, der Einwindungsspule und dem Kondensator liegt zwischen Anode und Gitter. Als Senderöhre (*SR*) dient eine Großlautsprecherröhre (Telefunken R.E. 604). Von dem Sendebügel *S* aus wird ein zweiter Schwingungskreis (*Sch*) induziert, zwischen dessen Kondensatorplatten (*C*₁) das Herz der zu untersuchenden *Vp.* zu denken ist. *C*₂ ist der dem Untersuchungskondensator parallel geschaltete variable „Ausgleichskondensator“. Die beiden Hälften dieses Schwingungskreises sind mit der Heizung, bzw. Anode einer Gleichrichterröhre (*GR*) (Telefunken R.E. 074) galvanisch gekoppelt, deren Gitter mit der Anode kurz geschlossen ist. Der gleichgerichtete Strom wird dann der Kraftverstärkerröhre (*VR*) (Telefunken R.E. 134) zugeführt, in deren Anodenstromkreis das Registrierinstrument liegt. Verschiedene Drosselspulen (*Dr*) verhindern das Einbrechen hochfrequenter Schwingungen in den Verstärker und ermöglichen die Verwendung der gleichen Heiz- und Anodenbatterie für alle Röhren.

In den Anodenstrom der Endverstärkerröhre ist ein Milliampereometer eingeschaltet. Um ihm eine größere Empfindlichkeit geben zu können, ist eine Kompensationsbatterie (*Kb*) vorhanden, die den Anodenstrom wegkompensiert, so daß nur noch seine Schwankungen sichtbar bleiben. Durch einen doppelpoligen Umschalter kann vom Milliampereometer auf ein registrierendes Galvanometer umgeschaltet werden. Die fertige Apparatur in ihrer gegenwärtigen Form ist in Abb. 3 wiedergegeben. Links sehen wir die beiden Platten des Untersuchungskondensators. Die Drähte des Schwingungskreises sind durch die Röhren (*RR*) abgeschirmt. Alle übrigen Teile, mit Ausnahme der Batterien, sind in einem gemeinsamen Blechkasten untergebracht. An seiner Stirnwand sehen wir eine

* Der Apparat wird von der Firma Siemens Reiniger Verza, Berlin, in den Handel gebracht.

Reihe von Bedienungsknöpfen. Ein Schalter bedient die Heizung für alle 3 Röhren, ein anderer die Kompensation. Durch Drehen des Knopfes ganz links (mit „Sender“ bezeichnet) kann man der Heizung der Senderröhre einen kleinen Widerstand vorschalten und dadurch die Sendenergie schwächen. Der mittlere Knopf „Kompensation“ reguliert einen Widerstand im Kompensationskreis; durch den oberen Knopf kann man das Milliampereometer grob oder fein einstellen. Der Knopf ($M-S$) rechts unten endlich bedient den doppelpoligen Umschalter zum Registrierinstrument.

Die Kontakte (+ —) dienen zur Ableitung zum Registrierinstrument. An der linken Seitenwand befindet sich der Drehknopf für den variablen „Ausgleichskondensator“. Schließlich können durch die Schraubvorrichtungen (*Sch*) die Arme des Schwingungskreises etwas gespreizt werden, so daß der Plattenabstand des Untersuchungskondensators vergrößert wird.

Abb. 3.

Die Batterien für den Dielektrographen sind in den beiden Kästen K_1 und K_2 untergebracht. K_1 enthält die Heizakkumulatoren (4 V), einen 2 V-Akkumulator für die Kompensation, sowie eine Gitterbatterie (24 V) für die Senderröhre. Der Kasten K_2 enthält Hochspannungsakkumulatoren (220—240 V) für die Anodenspannungen. Es empfiehlt sich nicht, die gebräuchlichen Hochspannungstrockenbatterien zu verwenden, da sie sich bei der notwendigen Stromentnahme von 100—150 mA zu schnell erschöpfen. Auch ist es nicht vorteilhaft, den Anodenstrom dem Gleichstromnetz zu entnehmen, da sich die bei wechselnder Netzbelastung eintretenden Spannungsschwankungen allzu störend bemerkbar machen. Die Zuleitungen von den Batterien zum Dielektrographen müssen durch Metallröhren sorgfältig abgeschirmt werden.

Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, den abschirmenden Kasten des Dielektrographen nicht, wie das gewöhnlich geschieht, mit der Erde zu verbinden. Trotzdem der Apparat bei uns in einem Saitengalvanometerhäuschen streng wechselstromfrei aufgestellt ist, ergibt eine Verbindung mit der Erde stets Wechselstromstörungen. Wir isolieren den Schutzkasten sorgfältig durch Gummifüße gegen die Erde. Das Potential des Schutzkastens der Erde gegenüber ist daher nicht Null, sondern undefiniert, ein Schönheitsfehler, der aber keine praktischen Konsequenzen zu haben scheint. Dagegen ist es notwendig, den Untersuchungstisch, auf dem der Patient liegt, zu erden, da sonst Aufladungserscheinungen auftreten, welche es unmöglich machen, neben dem Dielektrogramm auch das Elektrokardiogramm aufzunehmen.

IV. Die Durchführung der Herzaufnahme.

Zur Durchführung von Herzaufnahmen ist der Dielektrograph an einem Untersuchungstisch seitlich fest montiert (Abb. 4). An der Stelle der Kondensatorplatten war der Tisch ausgesägt worden und eine dicke Glasplatte wurde in dieses Loch eingefügt. In der Nähe der Kondensatorplatten befanden sich keine Metallteile. Die Tischplatte kann mitsamt dem Dielektrographen durch einige Handgriffe wagerecht, steil oder schräg gestellt werden, ohne daß sich die relative Lage des Brustkorbes des Untersuchten zu den Kondensatorplatten wesentlich

Abb. 4.

ändert. Sobald sich die zu untersuchende Person auf den Tisch gelegt hat, kontrolliert man durch Perkussion, ob das Herz richtig zwischen den Kondensatorplatten liegt. Dann stellt man die obere Kondensatorplatte so, daß ihr Abstand vom Körper etwa 3 cm beträgt. Nunmehr wird der Heiz- und der Kompensationsstrom eingeschaltet. Der Kompensationswiderstand ist dabei zunächst voll eingeschaltet. Am Amperemeter sieht man einen Ausschlag von 15–30 mA. Durch entsprechendes Regulieren des „Ausgleichskondensators“ wird der Zeiger des Galvanometers auf einen bestimmten Ausschlag (z. B. 20 mA) gebracht. Dadurch erreicht man, daß man bei allen Personen unabhängig von deren Dicke mit der gleichen Abstimmung arbeitet. Nunmehr schaltet man allmählich den Kompensationswiderstand aus und bringt damit den Zeiger des Milliampere-meters bis auf 0–3 mA zurück. Da der Zeiger sich jetzt bereits mit der Atmung bewegt, kann man nur auf einen ungefähren Wert einstellen. Will man sich davon überzeugen, daß der Apparat richtig arbeitet, so macht man jetzt das Milliampere-

meter empfindlicher (Skala = 2–5 mA). Der Zeiger überstreicht jetzt synchron mit den Atembewegungen die ganze Skala. Läßt man die Vp. den Atem anhalten, so pulsiert die Nadel im Rhythmus der Herztätigkeit; die Ausschläge betragen etwa 0,1–0,3 mA.

Um eine Kurve der Herzaktion zu erhalten, schaltet man mit Hilfe des erwähnten Knopfes vom Milliampereometer auf das Registrierinstrument um. Wir benutzen ausschließlich das *Edelmansche* Saitengalvanometer in Verbindung mit dem *Edelmanschen* Schaltkomplex. Das Galvanometer wird zweckmäßig mit einer Gold- oder Platinsaite von etwa 5 μ Dicke ausgestattet. Der Schaltkomplex enthält eine Kompensationseinrichtung, die zur Feinstellung verwendet wird. Unter Vor- und Parallelschaltung entsprechender Widerstände wird die Saite in das Gesichtsfeld gebracht. Ähnlich wie am Milliampereometer sieht man an der Saite zunächst die Atembewegungen, denen als kleine Unregelmäßigkeiten die Herzschläge aufgepflanzt sind. Die Vp. erhält jetzt den Auftrag, den Atem auf der Höhe eines normalen Inspiriums anzuhalten. In diesem Moment nimmt man den Parallelwiderstand weg. Dadurch steigert man die Empfindlichkeit des Saitengalvanometers so weit, daß die einzelnen Herzschläge eine Amplitude von etwa 3 cm erreichen. Einige von ihnen photographiert man in der üblichen Weise. Die untere Kurve *b* der Abb. 5 stellt eine auf diese Weise gewonnene Kurve eines gesunden Herzens dar. Auf Einzelheiten der Kurve wollen wir später eingehen.

An Stelle der Kompensationseinrichtung des Schaltkomplexes kann auch, wie das oft bei der Elektrokardiographie geschieht, ein Kondensator entsprechender Kapazität eingeschaltet werden. Die Aufnahmetechnik gestaltet sich dann einfacher, denn man umgeht die Kompensationseinrichtung; und die zu untersuchende Person braucht während der Aufnahme den Atem nicht anzuhalten, da die langsamen Atemschwankungen vom Kondensator nicht durchgelassen werden. Die Kurve *a* auf Abb. 5, die man auf diese Weise erhält, stellt ungefähr die erste Ableitung der mit der Kompensation gewonnenen Kurve dar. Sie ist aber aus diesem Grunde sehr viel schwerer zu deuten. Die untere Kurve *b* auf dieser Abbildung stammt von der gleichen Vp. wie die obere Kurve, sie ist aber, wie schon erwähnt, durch Kompensation gewonnen worden. Man sieht auf den ersten Blick, daß das relativ klare und einfache Bild der unteren Kurve in einem wohlthuenden Gegensatz zu dem unübersichtlichen oberen Kurvenzug steht, der durch Kondensation gewonnen wurde.

Abb. 5. Vp. E. G., 21 jähr. Laborantin.
a) mit Kondensator aufgenommen,
b) ohne Kondensator aufgenommen.

V. Modellversuche.

Wir wollen uns zunächst ein Bild verschaffen, wie weit unsere theoretisch abgeleitete Annahme zutrifft, daß beim Einbringen eines Körpers von abweichender Dielektrizitätskonstante in das Kondensatorfeld eine dem Volumen des Körpers entsprechende Kapazitätsänderung erfolgt. Dieses Experiment läßt sich praktisch nicht einfach in der Weise anstellen, daß man zwischen die Kondensatorplatten beispielsweise ein

Glas stellt, das man sukzessive mit bekannten Wassermengen immer mehr anfüllt, und dabei die zu den einzelnen Wassermengen gehörigen Galvanometerausschläge beobachtet. Sobald sich nämlich eine Person in der Nähe des Kondensators bewegt, treten störende Kapazitätsänderungen auf. Wir halfen uns so, daß wir durch eine lange Schlauchleitung dem Glasgefäß zwischen den Kondensatorplatten bekannte Wassermengen zuführten. Es zeigte sich bei diesen Vorversuchen, daß der Ausschlag des Milliampereometers (die Versuche wurden ohne graphische Aufzeichnung ausgeführt) proportional der eingebrachten Wassermenge stieg. Die Apparatur zeigte 5 ccm Wasser durch einen Ausschlag von etwa 0,1 Milliampere an.

Die Proportionalität zwischen Größe des Ausschlages und dem Wasservolumen bleibt auch gewahrt, wenn sich die Gestalt des Wasser-

Abb. 6.

volumens ändert. Um diesen für die Beurteilung der Herzkurven besonders wichtigen Vorversuch durchzuführen, gingen wir in folgender Weise vor: Wir füllten durch einen Gummischlauch einen dünnwandigen Gummiball, der in einen leeren Meßzylinder hinein hing, mit einer Salzlösung an; er vergrößert, wie man leicht einsieht, seine Kugelform so lange, bis die Wandung des Glaszylinders einen Widerstand bietet. Pumpt man jetzt noch weiter Salzlösung in den Gummiball hinein, so nimmt er eine wurstförmige Gestalt an. Derselbe Versuch wurde dann mit dem gleichen Ballon in einem Standzylinder mit weiterem Durchmesser wiederholt, so daß der Übergang von der Kugel- zur Wurstform bei einem anderen Wasservolumen erfolgte. Immer zeigte sich, daß die Größe des Galvanometerauschlages proportional der Menge der Salzlösung anstieg, die Form war belanglos.

Um diesen Vorgang registrieren und auswerten zu können, ließen wir ein an 2 Fäden aufgehängtes Wasserglas so durch das Kondensatorfeld hin- und herpendeln, daß das Glas auf beiden Seiten über den Rand des Kondensators hinausschwang und auf seinem Weg die Mitte des Feldes passierte. Die Galvanometerkurve sank ab, sobald sich das Wasserglas von der Mitte entfernte, und geriet in ihre Nullage, wenn sich das Glas außerhalb des Feldes befand. Die Amplituden der registrierten Kurven wachsen, wie wir auf Grund unserer Vorversuche erwarten mußten, proportional der eingefüllten Wassermengen.

Abb. 6 zeigt einen Eichversuch, bei dem ein Erlemeyerkolben von 250 ccm durch das Kondensatorfeld schwang. Die Abszisse zeigt die eingefüllte Wassermenge, die Ordinate die Höhe des auf der photo-

graphierten Kurve gemessenen Ausschläges. Zunächst wurden je 20 cem Wasser eingefüllt, die gemäß der Form des Kolbens flache Scheiben bildeten. Die Eichkurve ist geradlinig. Sie bleibt aber auch geradlinig, wenn der Kolben auf 200 cem aufgefüllt ist, trotzdem jetzt das neu zugeführte Wasser die Form einer Säule von relativ kleinem Durchmesser hat.

In Abb. 7 ist das Ergebnis eines Versuches wiedergegeben, bei dem das schwingende Glas mit steigenden Mengen von Flüssigkeiten verschiedener Dielektrizitätskonstanten gefüllt war. Es wurden verwendet:

	Dielektrizitätskonstante
Wasser	81,0
Äthylalkohol	26,0
Aceton	21,5
Paraffinöl	2,0

Abb. 7.

Jede untersuchte Substanz ergibt eine gerade Linie von bestimmtem Neigungswinkel. Tragen wir die Tangenten dieser Neigungswinkel als Ordinaten in ein Diagramm ein, dessen Abszisse die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante ist, so ergibt sich sehr genau eine gerade Linie (Abb. 8).

Der Ausschlag ist demnach proportional dem Volumen des in das Kondensatorfeld gebrachten Körpers und der Quadratwurzel aus seiner Dielektrizitätskonstanten. Nehmen wir an Stelle von Wasser eine Salzlösung oder auch Blut, so sind die erhaltenen Ausschläge um wenige Prozente größer als bei reinem Wasser. Wir sehen daraus, daß unter den beschriebenen Verhältnissen die Leitfähigkeit des eingebrachten Körpers im Vergleich zu seiner Dielektrizitätskonstanten nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Abb. 8.

Die einfachen Beziehungen, die bisher beschrieben worden sind, gelten streng nur im mittleren Teile des Kondensatorfeldes. In der Randzone des Feldes ist die Empfindlichkeit geringer, in unmittelbarer Nähe der Platten größer als sie nach den gewonnenen Regeln sein sollte.

Die Versuche mit dem schwingenden wassergefüllten Glasfläschchen können in besonders günstig gelagerten Fällen als Eichprinzip benutzt werden, wenn man aus der Amplitudenhöhe einer an einem tierischen

Organ erhaltenen Kurve die Größe der Volumänderungen zahlenmäßig erfassen will. Freilich werden sich die Kapazitätsänderungen nicht auf den Leerwert des Kondensators aufbauen. Das umgebende Gewebe und das untersuchte Organ selbst bringen die Kapazität auf ein bestimmtes Ausgangsniveau, auf dem sich die durch die Organtätigkeit bedingten Kapazitätsschwankungen aufbauen. Dieses Grundniveau kann man aber auch im Modellversuch nachahmen, indem man eine Glasschale ins Kondensatorfeld stellt, die so hoch mit Wasser angefüllt wird, bis die Kapazität des Kondensators das gewünschte Maß erreicht hat. Man arbeitet dann in dem gleichen Empfindlichkeitsbereich der Apparatur wie bei der Aufnahme.

Hat man als Ziel der dielektrographischen Methode die Registrierung der Herztätigkeit im Auge, so ist der wichtigste Unterschied zwischen den natürlichen Verhältnissen und den besprochenen Modellversuchen der, daß das zu untersuchende Organ seine Volumänderungen innerhalb des Thorax, also in einer es allseitig umgebenden Umhüllung erleidet, die ein verhältnismäßig gutes Leitvermögen besitzt. Es ist nicht von vornherein zu übersehen, ob bei einer solchen Anordnung die pendelnde Wasserflasche noch imstande wäre, die Kapazität des Kondensators zu verändern.

Bringt man einen Leiter oder einen Isolator in das elektrische Feld des Kondensators, so werden auf beiden Seiten des Körpers die Feldlinien nach ihm hingezogen. Wie wir schon oben sahen, bricht aber das Feld im Innern eines Leiters vollständig zusammen, während der Isolator vom Feld durchsetzt wird. Die Registrierung eines Vorganges im Innern des Thorax würde unmöglich sein, wenn das umgebende Gewebe eine so hohe Leitfähigkeit besäße, daß das Feld auf der Oberfläche des Leiters vollständig aufhört. Der folgende Modellversuch zeigt uns indessen, daß diese Befürchtung nicht zutrifft.

Wir formierten einen rechteckigen Tunnel aus einem Holzgestell, das etwa 2 cm dick mit Mullbinden umwickelt wurde, die mit physiologischer Kochsalzlösung durchtränkt waren. Dieser Tunnel wurde so zwischen die Kondensatorplatten gebracht, daß die Feldlinien das Tunnellumen senkrecht durchsetzten. Da der Tunnel auf beiden Seiten weit aus dem Kondensatorfeld herausragte, konnten wir das Wasserfläschchen nicht, wie bei den früheren Versuchen durch das Kondensatorfeld pendeln lassen. Wir ließen es vielmehr an einem Seil entlang durch den Tunnel gleiten. Sobald das Wasserfläschchen die Feldlinien des Kondensators schnitt, schlug die Saite des Galvanometers aus. Der Ausschlag stieg proportional der Wassermenge, die das Fläschchen enthielt.

Im Gegensatz zu der im Modell verwandten Lage von kochsalzgetränktem Mull ist die Brustwand nicht nur anatomisch, sondern auch

in bezug auf ihre elektrischen Eigenschaften sehr viel komplizierter gebaut. Es erschien uns daher zweckmäßig, im Modellversuch den tatsächlichen Verhältnissen noch näher zu kommen.

Wir eviszerierten zu diesem Zweck den Thorax eines toten Hundes, legten eine Gummiblase, von der eine Schlauchleitung nach außen führte, hinein, schlossen den Thorax mit ein paar Klammern und brachten das ganze in unser Kondensatorfeld. Wurde jetzt durch den Schlauch Kochsalzlösung in die Gummiblase gebracht oder aus ihr herausgezogen, so war am Galvanometer ein entsprechender Ausschlag zu sehen. Da es bei diesem Versuch nicht möglich war, jederzeit zu kontrollieren, ob nicht die Füllung und Leerung der Gummiblase zu einer Bewegung der Thoraxwand geführt hat, wurden die Versuchsbedingungen dadurch noch strenger gestaltet, daß in die Brusthöhle ein Glaskolben gelegt wurde und in diesen erst die Gummiblase. Trotzdem jetzt natürlich eine Bewegung der Brustwand bei der Füllung und Leerung der Gummiblase bestimmt nicht mehr auftreten konnte, war der Galvanometerausschlag auch jetzt noch einwandfrei erkennbar. Damit ist bewiesen, daß es prinzipiell möglich ist, Vorgänge, die sich im Innern des Thorax abspielen, mit unserer Methode zu registrieren.

VI. Die physiologischen Grundlagen des Dielektrogramms.

Die Modellversuche, die wir soeben geschildert haben, zeigten uns, daß es prinzipiell möglich ist, die Volumänderungen des in der luftgefüllten Lunge arbeitenden Herzens mit Hilfe der Kapazitätsänderungen eines Kondensators darzustellen. Man erhält eine Kurve, welche die Volumschwankungen des Herzens widerspiegelt, aber es ist nicht zu erwarten, daß es sich um eine reine Volumkurve handelt. Denn gleichzeitig mit dem Volumen des Herzens ändert sich auch seine Form und seine relative Lage zu den Kondensatorplatten. Dabei wird das Blut zwischen dem mittleren Bereich des Kondensatorfeldes und der Randzone hin- und hergeschoben. Da die Mittelzone eine größere Empfindlichkeit aufweist als die Randzone, so folgt, daß bestimmte Lage- und Formveränderungen des Herzens sich im Dielektrogramm widerspiegeln müssen.

Aber darüber hinaus wird noch ein weiterer, mit der Herztätigkeit eng verbundener Vorgang durch die Dielektrographie mitregistriert: die Brustwandbewegungen, welche in dem gewöhnlichen Kardiogramm, der Herzspitzenstoßkurve, registriert werden. Da diese Bewegungen selbst wieder das Abbild von Volum-, Form- und Lageänderungen des Herzens sind, so werden im Dielektrogramm die gleichen Vorgänge am Herzen gewissermaßen gleichzeitig auf zwei verschiedenen Wegen registriert.

Um das Dielektrogramm (DEG) richtig zu deuten, wäre es vorteilhaft zu wissen, welchen Anteil die unmittelbare Registrierung der Volum-, Lage- und Formveränderungen des Herzens und welchen die auf dem Umwege über die Brustwandpulsationen aufgezeichnete Herztätigkeit am Zustandekommen des DEG hat.

Eine solche Analyse könnte man vornehmen, indem man von derselben Versuchsperson in der gewöhnlichen Weise das Kardiogramm und das Dielektrogramm aufnimmt und die erhaltenen Kurvenbilder miteinander vergleicht. Aber abgesehen davon, daß es nicht bei jedem Menschen gelingt, ein brauchbares Kardiogramm aufzunehmen, liegt noch eine weitere Schwierigkeit darin, daß man von den verschiedenen Teilen der Brustwand verschiedene Kardiogramme erhält; bei richtiger Lagerung der Vp. erhält man dagegen nur ein einziges Dielektrogramm (vgl. Abb. 9). Alle die verschiedenen Kardiogramme, die wir von der Brustwand eines Menschen abgeleitet haben, unterschieden sich deutlich von den dielektrographischen Kurven. Wir werden auf die näheren Einzelheiten noch in einem späteren Kapitel zu sprechen kommen. Hier genügt die Feststellung, daß wir auf Grund dieser Unterschiede annehmen dürfen, daß im Dielektrogramm die Brustwandbewegungen, welche nur ein indirektes Bild der Herzbewegungen vermitteln, den charakteristischen Kurvenzug der eigentlichen Volum-, Lage- und Formänderungen des Herzens nicht wesentlich bestimmen. In dieser Ansicht werden wir noch durch die

Abb. 9. EKG, Dielektrogramm und drei von verschiedenen Stellen abgeleitete Kardiogramme derselben Vp. (Za., 16 jähriger Lehrling).

Überlegung bestärkt, daß in unserem Falle, wo die anatomischen Verhältnisse für eine Aufnahme des Kardiogramms besonders günstig lagen, der auf diese umfangreichen Brustwandbewegungen zu beziehende Teil sich im Dielektrogramm sehr viel stärker ausdrücken müßte als in den vielen Fällen, wo es nur schwer möglich ist, ein brauchbares Kardiogramm zu erhalten.

Es bietet sich noch eine weitere Möglichkeit, den Anteil der Brustwandbewegungen an der Dielektrographenkurve zu ermitteln; sie besteht darin, daß man die Brustwandbewegungen künstlich unterdrückt. Wir suchten dies dadurch zu erreichen, daß wir eine Versuchsperson, der wir einen Gipsverband um den Thorax gelegt hatten, dielektrographierten. Die erhaltene Kurve unterschied sich nicht von der

Normalkurve dieses Menschen. Wir waren aber nicht ganz sicher, daß die Brustwand dem hartgewordenen Gips überall genügend fest anlag.

Wir modifizierten daher den Versuch, indem wir von der ganzen Brustwand ein Negativ in Gips herstellten. Dieser Abdruck wurde durch eine dicke Holzlatte und durch ein System kräftiger Schrauben so fest auf die Brust aufgedrückt, wie es die Vp. noch eben aushalten konnte. In dieser prokrustischen Lage wurde die Kurve aufgenommen, die sich nur ganz unwesentlich von der vorher aufgenommenen Normalkurve der Vp. unterschied.

Es wäre falsch, hieraus den Schluß zu ziehen, daß unter normalen Umständen die Brustwandbewegungen im Dielektrogramm überhaupt nicht registriert werden. Wir müssen vielmehr folgern, daß die Volum-, Form- und Lageänderungen, die auf dem Umwege über die Brustwandbewegungen registriert werden, das eigentliche Dielektrogramm nur unwesentlich ändern. Dieser Befund deckt sich also mit demjenigen, den wir aus der vergleichenden Betrachtung des Kardio- und des Dielektrogrammes herleiten konnten.

Bei Frauen mit sehr großen Brüsten dürften allerdings andere Gesetze gelten. Man kann bei solchen Frauen oft schon mit bloßem Auge erkennen, daß sich die Brust ausgiebig mit dem Herzschlag bewegt. Da die Schwingungen der Brust sicher keine verzerrungsfreie Wiedergabe der Brustwandbewegungen sind, so ist bei der Auswertung derartiger Kurven Vorsicht geboten. Allerdings scheinen, wie wir hier vorwegnehmen wollen, pathologische Erscheinungen am Herzen so weitgehende Änderungen am Dielektrogramm hervorzubringen, daß sie auch in diesen Fällen ohne weiteres sichtbar bleiben.

VII. Festlegung der vier Hauptphasen der Herzrevolution im dielektrographischen Kurvenzug.

Das Dielektrogramm verdankt seine Entstehung einer Reihe recht verschiedener Geschehnisse. Form-, Volum- und Lageänderungen interferieren in schwer zu übersehender Weise. Es handelt sich um eine sehr komplexe Kurve, deren Deutung offenbar nicht einfach ist.

In Abb. 10 geben wir das Dielektrogramm eines zweifellos gesunden Herzens wieder. Um uns in dem komplizierten Kurvenzug zurechtzufinden, haben wir genau darunter das Elektrokardiogramm in erster Ableitung geschrieben. Wir wollen nun untersuchen, ob sich im Dielektrogramm charakteristische Kurvenpunkte finden, welche mit den verschiedenen Klappenbewegungen in einem ursächlichen Zusammenhang stehen. Gelingt es solche Punkte zu finden, so kann man die vier charakteristischen Phasen einer Herzrevolution begrenzen. Lewis gibt für diese Zeitabschnitte bei einer Gesamtdauer der Herzrevolution von 0,95 Sekunde folgende Sekundenwerte an:

Die erste isometrische Phase (Anspannungszeit). . .	0,05 Sek.
Die Austreibung.	0,33 „
Die zweite isometrische Phase (Entspannungszeit). .	0,06 „
Die Einstromung	0,51 „
Sa.	<u>0,95 Sek.</u>

Unserer Abb. 10 haben wir einen Fall zugrunde gelegt, bei dem die Dauer eines Herzschlages etwas mehr als 0,95 Sekunde betrug. Entsprechend den Werten von *Lewis* sind nun die einzelnen Phasen auf einer Linie über dem EKG markiert. Von den 4 Punkten, an denen sich diese Phasen berühren, sind gestrichelte Linien senkrecht nach

Abb. 10. Dielektrogramm eines gesunden Herzens. (A. H. S., 34-jähriger Akademiker.)

oben in das Dielektrogramm gezogen. Treffen diese Linien mit genügender Genauigkeit auf charakteristische Kurvenpunkte, so berechtigt uns das zu der Annahme, daß diese Kurvenpunkte mit den jeweiligen Klappenbewegungen übereinstimmen. Die auf diese Weise im Dielektrogramm identifizierten Punkte sind mit 3, 4, 6 und 1 bezeichnet.

Der Punkt 4 folgt kurz auf die R-Zacke. Wir sehen an dieser Stelle einen sehr scharfen und plötzlichen Übergang aus einer kurzen geradlinigen Strecke, die parallel zur Abszisse oder etwas schräg nach oben verläuft. Es kann wohl kein Zweifel bestehen, daß Punkt 4 der Öffnung der Aortenklappe entspricht. Der Punkt 4a* kommt dafür nicht in Betracht, da er von der R-Zacke zu weit entfernt ist. Bei Punkt 4 beginnt demnach die Austreibung. Da sich in dieser Phase das Volumen des Herzens verkleinert, so mußten wir erwarten, daß die Kurve von Punkt 4 ab steil absinkt. Das ist in der Tat der Fall. Aber wir sehen,

* Die zwischen den mit Zahlen bezeichneten Hauptpunkten liegenden Punkte sind jeweils mit Buchstaben bezeichnet. Zwischen 4 und 5 liegen also 4a, 4b usw.

daß dieser Kurventeil, der sich von Punkt 4 zu Punkt 5 erstreckt, durch die Zacken 4a und 4b unterbrochen ist, auf die wir in einem späteren Abschnitt noch zurückkommen werden. Bei Punkt 5 sinkt die Kurve nicht mehr tiefer, trotzdem hier lange vor Ende der Systole die Austreibung noch nicht beendet sein kann. Die wirkliche Bedeutung des Punktes 5 ist uns noch nicht klar. Zeitlich dürfte er etwa an der Stelle liegen, wo die schnelle Austreibung in eine langsamere übergeht (*Starling*).

Es dürfte in mancher Hinsicht von Vorteil sein, daß man auf solch einfache Weise die Systole in zwei Teile zerlegen kann. Wir stellten z. B. fest, wie wir im Kapitel X noch zeigen werden, daß sich unter der Einwirkung von bestimmten Stoffen das zeitliche Verhältnis dieser beiden Systolenteile gegenüber der Norm verändert.

Das Kurvenstück vor Punkt 6 führt bei allen Kurven, die im Liegen, und bei den meisten, die im Stehen aufgenommen wurden, steil nach oben. Man denkt also zunächst an eine Volumvergrößerung in diesem Abschnitt der Herztätigkeit. Wenn man nun auch erwarten darf, daß vor dem Aortenklappenschluß, der bei Punkt 6 erfolgt, eine kleine Blutmenge prädiastolisch in die Kammer zurückfließt, so dürfte diese doch im Verhältnis zum Schlagvolumen zu klein sein, als daß sie einen derartig großen Ausschlag im Dielektrogramm hervorrufen könnte.

Die Identität des Punktes 6 mit dem Schluß der Aortenklappe haben wir zunächst nur aus der zeitlichen Lage erschlossen. Bei manchen Kurven (s. z. B. Abb. 12 d, e) sehen wir jedoch an dieser Stelle Schwingungen auftreten, die dem zweiten Herzton unmittelbar entsprechen. Die Strecke von 6 bis 1 muß demnach der zweiten isometrischen Phase entsprechen. Wie bei der ersten isometrischen Phase sehen wir ein geradliniges, schräg nach unten geneigtes Kurvenstück.

Bei Punkt 1 beginnt die Diastole; der Kurvenzug wendet sich steil nach oben; das ist wohl zweifellos ein Zeichen dafür, daß das Blut zu Beginn der Diastole schnell in die Kammern einströmt. Nach einem mehr oder weniger steil nach oben verstoßenden Höcker folgt eine Spitze nach unten (Punkt 2). Wir heben diesen Punkt hervor in der Annahme, daß er geeignet ist, den Anfangsteil der Diastole mit schneller Einströmung von dem zweiten Teile langsamer Einströmung zu trennen.

Von Punkt 2 bis Punkt 3 verläuft die Kurve auf Abb. 10 nach Art eines mit kleinen Erhebungen besetzten Plateaus. Diese Zacken dürften mit der Vorhoftätigkeit in Verbindung stehen. Die Strecke von 2c bis 3 entspricht der Vorhofssystole. Daß die Tätigkeit der Vorhöfe bei normalen Herzen einen so verhältnismäßig geringen Einfluß ausübt, erklärt sich unschwer daraus, daß das Gesamtvolumen des Herzens durch die Vorhoftätigkeit wenig beeinflusst wird. Punkt 3 geht der R-Zacke unmittelbar voraus; er muß daher dem Beginn der ersten isometrischen Phase entsprechen.

VIII. Die einzelnen Phasen der Herzrevolution im Dielektrogramm des gesunden Menschen.

Als sich im Laufe unserer Untersuchungen eine genügend große Reihe von Dielektrogrammen gesunder Menschen angesammelt hatte, mußten wir feststellen, daß sich alle Kurven in den Hauptzügen durch-

a) St., 21jähriger Schlosser, sehr gut trainierter Langstreckenläufer.

b) Ju., 20jährige Studentin.

c) Pr., 21jährige Studentin, gute Schwimmerin.

d) D., 19jähriger Student, kräftiger Körperbau, gut trainiert.

e) Le., 35jähriger Akademiker.

f) Fr., 21jähriger Student, Schwimmer, mäßig trainiert.

Abb. 11a-f. Dielektrogramme gesunder Herzen.

aus ähnelten, daß sie aber in Einzelheiten sehr voneinander abwichen. Bis heute hat sich unser Kurvenmaterial weiter vergrößert, trotzdem fanden wir noch niemals zwei Personen, deren Dielektrogramme sich genau glichen. Wenn wir uns auch aus dieser Vielgestaltigkeit des Kurvenbildes versprechen können, daß die Dielektrographie sehr viele charakteristische Einzelheiten der Herztätigkeit zu enthüllen vermag,

so macht es die große Variabilität der Kurvenbilder andererseits sehr schwierig, die Grenzen zwischen „normal“ und „krankhaft“ festzulegen. Wir wissen ja nicht einmal, ob sich das DEG eines Menschen mit zunehmendem Alter ändert. Wir konnten in der relativ kurzen Zeitspanne des Bestehens unserer Apparatur nur zeigen, daß die gleichen

a) Chl., 20 jähr. Student, kräftig, gut trainiert.

b) Bu., 21 jähriger Student, wenig trainiert.

c) Kr., 16 jähriger Laufbursche, schwäch-
tiger Körperbau.

d) Re., 21 jährige Studentin, wenig sport-
liche Betätigung.

e) Sa., 19 jähriger Student, wenig sportliche
Betätigung, sehr kleines Herz.

f) Ne., 27 jähriger Bergmann, mittelkräf-
tiger Körperbau.

Abb. 12a—f. Dielektrogramme gesunder Herzen.

Personen, die in Abständen von mehreren Monaten untersucht wurden, immer wieder exakt das gleiche Kurvenbild lieferten.

Wir müssen vorläufig als „normal“ alle die DEG ansehen, welche von solchen Herzen stammen, bei denen anamnestisch nichts auf eine Erkrankung hinweist und bei denen mit den üblichen klinischen Methoden nichts Krankhaftes festgestellt werden konnte. Diese Definition ist sicher nur vorläufig, denn es ist denkbar, daß die Dielektrographie

pathologische Erscheinungen eines Herzens klarzulegen vermag, die seinem Träger keine Beschwerden machen und die sich dem Nachweis durch die bisher üblichen klinischen Untersuchungsverfahren entziehen.

In Abb. 11a—f und 12a—f sind eine Reihe von Kurven wiedergegeben, welche von gesunden Versuchspersonen stammen. Sie sind alle im Liegen aufgenommen. An Hand dieser Kurven wollen wir die einzelnen Phasen der Herzrevolution besprechen.

A. Die Systole.

a) *Die Anspannungszeit.* Wir wollen zunächst durch eine Überlegung festzustellen versuchen, welchen Kurvenverlauf wir in der Anspannungszeit erwarten müssen, wenn unsere Methode ausschließlich die Volumenänderungen des Herzens erfassen würde. Da in dieser Phase der Herztätigkeit alle Klappen geschlossen sind, so können die Kammern ihr Volumen nicht ändern. Selbst wenn die Atrioventrikularklappen vor dem wachsenden Kammerdruck zurückweichen, so ändert sich wohl damit die Form, nicht aber, wie *W. Frey*¹¹ schreibt, das Volumen des Herzens. Danach wäre zu erwarten, daß die Dielektrographenkurve in der Anspannungszeit horizontal verläuft. Wir müssen jedoch noch einen weiteren Vorgang in Rechnung stellen. Kurz vor Beginn der Anspannungszeit hat der Vorhof seine Systole schon beendet, und neues Blut strömt ihm zu. Eine reine Volumenkurve müßte somit in der Anspannungszeit sanft ansteigen. Nun erleidet aber das Herz in dieser Phase sowohl Form- wie auch Lageänderungen.

Zunächst wird durch die kräftige Zunahme des intraventrikulären Druckes die Gestalt des Herzens stark beeinflußt. Aus rein hydrostatischen Gründen müßte sich das Herz der Kugelgestalt annähern. Man könnte sich vorstellen, daß dabei die Spitze des Herzens eingezogen und durch den mittleren Teil die Brustwand vorgedrängt wird. Gleichzeitig hiermit ändert sich die Lage des Herzens durch die noch wenig untersuchten Drehbewegungen.

Diese Form- und Lageänderungen sind nach der heute geltenden Ansicht im Kardiogramm zu erkennen. *Frank* und *Hess*⁵ sprechen von einer Anspannungswelle, die meist zweiphasig ist und sich aus einer positiven Erhebung und einem negativen Abfall zusammensetzt. In den Kardiogrammen von *Weitz*⁶, die an der Herzspitze aufgenommen worden sind, ist die Anspannungsphase durch besonders hohe Zacken charakterisiert. Vergleichen wir hiermit die Kurvenbilder dieser Strecke im Dielektrogramm!

In Abb. 10 sehen wir auf der Strecke zwischen Punkt 3 und 4, die der Anspannungszeit entspricht, nichts von diesen Zacken, sondern lediglich eine fast horizontale Linie. Eine leicht nach oben gerichtete Strecke sehen wir auf den DEG der Abb. 11c und 12a. In Abb. 11a,

b, d und 12b, c, d, f verläuft das Kurvenstück stärker nach oben, nach unten senkt sich die Kurve in 14a.

Einen zweiphasigen Verlauf, der an den entsprechenden Kurventeil der Kardiogramme erinnert, zeigen die Bilder 11e und f. Allerdings sind die Bewegungen, die dabei auftreten, recht klein. Zacken von der Größe, wie sie bei den *Weitzschen* Kardiogrammen zu sehen sind, konnten wir niemals beobachten.

Wir sehen also, daß die Dielektrographenkurve in der Anspannungszeit meist so verläuft, wie man es erwarten müßte, wenn das DEG von den Volumschwankungen des Herzens beherrscht wird. Nur in wenigen Fällen gewinnen auch diejenigen Vorgänge, welche die typischen Schwankungen des Kardiogramms in dieser Phase auslösen, auf das DEG einigen Einfluß.

Die Dauer der Anspannungszeit betrug bei unseren Fällen meist 0,05—0,06 Sekunden. Werte von 0,04 und 0,07 traten nur ganz gelegentlich auf. Werte unter 0,04 fanden wir nur unmittelbar nach starken Arbeitsleistungen.

b) *Die Austreibungszeit.* Nach den Erfahrungen, die wir soeben in der Anspannungszeit gemacht haben, müssen wir erwarten, daß sich die Volumänderung, welche das Herz in der Austreibungszeit erleidet, in einer ausgesprochenen Senkung unserer Kurve widerspiegelt.

Allerdings dürfte die Kurve unmittelbar nach der Öffnung der Aortenklappe nicht plötzlich absinken, sondern sie müßte zunächst langsam und dann zunehmend schneller und schneller fallen; denn im ersten Beginn der Austreibung wird das Blut innerhalb des Kondensatorfeldes aus der Kammer in den sich anfüllenden Conus arteriosus und Aortenbogen verschoben. Wir müßten weiter erwarten, daß die dielektrographische Kurve ihren tiefsten Punkt kurz vor dem Schluß der Aortenklappe, also dicht vor Punkt 6, erreicht.

Durchmustern wir nun daraufhin in den Abb. 11 und 12 die einzelnen Dielektrogramme, die von herzgesunden Menschen aufgenommen worden sind, so zeigt sich, daß die erwartete Senkung bei allen Kurven vorhanden ist, daß aber viele Einzelheiten im Widerspruch zu unseren Erwartungen stehen.

Von einem allmählichen Beginn der Systole ist, wie man sich sofort überzeugen kann, im allgemeinen keine Rede; gelegentlich sehen wir zwar unmittelbar nach der Aortenöffnung eine nach oben gerichtete Zacke, aber niemals einen langsam einsetzenden und dann schneller werdenden Abfall. Weiter widerspricht den Vorstellungen, die wir uns über den Kurvenverlauf gemacht haben, daß sich in vielen Fällen die Kurve nach Punkt 5, der annähernd in der Mitte der Austreibungszeit liegt, wieder stark erhebt. Im vorangegangenen Kapitel haben wir das schon kurz erwähnt.

Manchmal ist dieser letzte, ansteigende Teil der systolischen Kurve sehr kurz und niedrig. Wir kommen dann mit der Erklärung aus, daß etwas Blut beim Schluß der Aortenklappe zurückströmt (Abb. 11c, e, 12 d). In anderen Fällen versagt diese Erklärung offenbar. In vielen Fällen (Abb. 11a, e, f, 12 a, 13) steigt die Kurve von Punkt 5 bis 6 auf etwa ein Drittel der ganzen Kurvenhöhe, in anderen Fällen erreicht sie die Hälfte oder überschreitet sie sogar (11b, c). Es wäre natürlich abwegig, aus diesem Kurvenverlauf den Schluß zu ziehen, daß sich das Herzvolum in dieser Phase der Herztätigkeit vergrößert. Wir müssen vielmehr eine bestimmte Herzbewegung, vielleicht eine Drehung annehmen. Es ist aber auch denkbar, daß sich das in dieser Phase hart kontrahierte Herz der Brustwand anpreßt und diese vorwölbt, ein Vorgang, der mit dem ersterwähnten verbunden sein kann.

Wenn die Kurvenbilder den bisher zugrunde gelegten allgemeinen Verlauf: Senkung bis Punkt 5, dann mehr oder weniger starke Erhebung bis Punkt 6, nicht voll zu entsprechen scheinen, so kommt das daher, daß der nach unten gerichtete Kurventeil stets 2 Zacken aufweist, die im einzelnen sehr verschieden geformt sein können.

So sehen wir z. B. in Abb. 11d, daß unmittelbar nach der Aortenklappenöffnung die Kurve ihre Abwärtsbewegung durch eine nach oben gerichtete Zacke (Punkt 4a) unterbricht, die oft die höchste Spitze des Dielektrogramms überhaupt bildet (12 e, f). Die Lage dieser Spitze wechselt sehr. Gelegentlich liegt sie so hoch oben, daß sie sich direkt an die Aortenöffnung (Punkt 4) anschließt. In diesen Fällen (12 e, f) geht also die Kurve gar nicht erst nach unten; die Austreibung beginnt mit einer nach oben gerichteten Zacke, der die Senkung erst nachfolgt. In anderen Fällen sehen wir die Zacke nach unten rücken bis in das untere Drittel der Abwärtsbewegung (11 e, f).

Trotzdem sich diese Zacke an den verschiedensten Stellen des absteigenden Schenkels zu befinden scheint, ist das zeitliche Intervall zwischen dem Beginn der Austreibung und Zacke doch relativ konstant und beträgt etwa $\frac{10}{100}$ Sekunden. Die verschiedene Lage der Zacke scheint im wesentlichen eine Folge der verschiedenen Steilheit des absteigenden Schenkels der Kurve zu sein: je steiler die Kurve abfällt, um so tiefer muß die Zacke sitzen. Wie ihre Lage, so ist auch die Größe der erwähnten Zacke sehr verschieden. Gelegentlich kann sie so klein werden, daß sie nur als Verdickung im Kurvenzug eben erkennbar ist (11b, 12 a, d). In anderen Fällen ist sie wesentlich breiter (11c, f).

Es kann wohl kein Zweifel bestehen, daß die beschriebene erste Zacke im Beginn der Austreibungszeit mit jener nach oben gerichteten Welle identisch ist, die man im Kardiogramm unmittelbar nach der Öffnung der Aortenklappe beobachtet, und die hier als „Aortenöffnungswelle“ bezeichnet wird. Diese Welle, deren Größe im Kardiogramm sehr verschieden zu sein scheint, wird von Hess auf eine

Formveränderung zurückgeführt, die das Herz beim Einstromen des Blutes in den Conus arteriosus erfährt. *Weitz* dagegen steht auf dem Standpunkt, daß der Anstieg durch eine Lageveränderung des Herzens hervorgerufen wird. Während aber *Weitz* seine Kardiogramme meist an der Herzspitze aufnimmt, stützt sich *Hess* auf Basiskardiogramme, die eine bessere Vergleichsmöglichkeit mit den Dielektrogrammen zu bieten scheinen. Auch das Zeitintervall zwischen der Öffnung der Aortenklappe und Entstehung der Zacken spricht dafür, daß die *Hesssche* Erklärung der Aortenöffnungswelle für das Dielektrogramm übernommen werden kann.

Hess entwickelt etwa folgenden Gedankengang. Wenn der Druck im Ventrikel so weit gestiegen ist, daß er den diastolischen Blutdruck in der Aorta übersteigt, so öffnen sich die Aortenklappen, aber die Blutsäule setzt sich zunächst nur langsam in Bewegung, da das Blut in der Peripherie Widerstand findet, und der Trägheitswiderstand der stagnierenden Blutsäule überwunden werden muß. Das Blut strömt also nicht so schnell aus der Aorta ab, wie es eingepreßt wird. Dadurch wird namentlich der Conus arteriosus und der Anfangsteil der Aorta gedehnt. Diese Dehnung erreicht ihren Höhepunkt in dem Moment, wo der Blutdruck maximal ist. Das ist etwa 10/100 Sekunde nach der Öffnung der Aortenklappe der Fall, also zum gleichen Zeitpunkt, in dem auch unsere Zacke erscheint.

Wodurch die verschiedene Lage und Größe der besprochenen Zacke veranlaßt ist, ist nicht ohne weiteres klar. Wir sehen, daß sie bei der gleichen Vp. je nach der Körperstellung verschieden sein kann. In Abb. 13 sind 3 Kurven wiedergegeben, die unmittelbar nacheinander im Stehen, Liegen und Hängen (Kopf nach unten) gewonnen wurden. Die Zacke liegt hier beim Stehen am tiefsten und rückt bei den folgenden Kurven immer weiter nach oben. Häufiger sehen wir, daß im Gegenteil die Zacke im Stehen nach oben rückt (Abb. 16).

Stets findet sich im Verlauf der systolischen Abwärtsbewegung, wie erwähnt, noch eine zweite Zacke (4 b), die je nach ihrer Größe und Lage allerdings ebenfalls recht verschieden aussieht. In Abb. 13 a gleicht sie annähernd der vorangehenden ersten Zacke, in 13 b ist sie nur noch als Knoten, 13 c nur als ganz leichte Verdickung im unteren Kurventeil sichtbar. Eine ähnliche Verdickung sehen wir in 11 d und 12 d; in 12 c ein kurzes, fast wagerechtes Stück, in 11 f eine kräftige Zacke. In 11 a und 11 e liegt die gleiche Zacke am tiefsten Punkt der Kurve, so daß diese die Form einer nach unten gerichteten Doppelspitze annimmt. Die erste Spitze kann dabei tiefer stehen als die zweite (Abb. 12 b), in anderen Fällen liegt die Zacke wohl ebenfalls am tiefsten Kurvenpunkt, sie ist aber zu klein, um dieses Bild entstehen zu lassen, es kommt nur zu einer schiefen Form des Kurventeils (11 b, c).

Ebenso wie bei der ersten Zacke der Austreibungsperiode sind wir auch bei dieser zweiten auf Vermutungen über ihre Entstehung angewiesen. Die beiden Zacken folgen sehr rasch aufeinander. Diese geringe zeitliche Differenz macht es möglich, daß die erste Zacke einem bestimmten Vorgang am linken Herzen ihre Entstehung verdankt, während die zweite Zacke auf den prinzipiell gleichen Vorgang im rechten Herzen zurückzuführen ist.

Man müßte in diesem Fall erwarten, daß sich die beiden Zacken unter dem Einfluß bestimmter Faktoren in gleichem Sinne verändern. Das ist nun in der Tat der Fall, wie man in Abb. 14 sieht. Unter dem Einfluß maximaler Ausatmung werden beide Zacken sehr klein oder verschwinden sogar. Auch beim Übergang aus der stehenden in die liegende Stellung verändern sich beide Zacken ganz entsprechend (Abb. 13 a, b). Wenn wir eine große Reihe von Dielektrogrammen durchmustern, so werden wir meist folgende Beziehungen zwischen den beiden Zacken sehen: ist die erste groß, so gilt das fast immer auch für die zweite, ist die erste sehr klein, so verschwindet die zweite fast ganz. Eine Verbreiterung der zweiten Zacke konnten wir schon

Abb. 13. Vp. J. F., 28 jähriger Mann.
a) stehend, b) liegend, c) hängend.

Abb. 14. Le., 35 jähr. Akademiker. Aufnahmen bei verschiedenen Atemstellungen.
a) Maximal eingeatmet, b) normal eingeatmet, c) normal ausgeatmet, d) maximal ausgeatmet.

öfters bei Überleistungstörungen im rechten Bündel beobachten, ein Befund, der sehr für unsere oben erwähnte Annahme spricht.

Wir haben, wie schon erwähnt, den Punkt, an dem die systolische Kurve nach oben umbiegt, mit Punkt 5 bezeichnet, um hierdurch die Austreibungszeit in zwei Teile zu zerlegen. Die eigenartige Form oder

die Gabelung dieses Teiles macht es schwierig, den Punkt 5 in allen Kurven in gleicher Weise zu wählen. Er kann daher kaum eine Rolle spielen für den Vergleich von Kurven verschiedener Personen. Er leistet aber, wie wir sehen werden, wertvolle Dienste bei der Untersuchung von Einflüssen pharmakologischer und anderer Art auf das Herz.

B. Die Diastole.

a) *Die Entspannungszeit.* Die Entspannungszeit, welche vom Moment des Aortenklappenschlusses bis zur Öffnung der Mitralklappe dauert, ist im Dielektrogramm ein sehr charakteristisches Kurvenstück, das uns direkt zur Orientierung dienen kann. Wie verschiedenartig auch die Bilder bei den einzelnen Kurven sein mögen, fast immer finden wir, daß das Dielektrogramm von der Aortenschlußzacke in einem geradlinigen Stück entweder horizontal verläuft (11a, e), wenig nach unten geneigt ist (11b, c, d) oder steiler nach abwärts führt (11f, 12 a bis f). Ganz horizontaler Verlauf ist selten.

Aus diesem Verhalten ist natürlich nicht zu folgern, daß sich das Herzvolumen in der Entspannungszeit verkleinert. Da alle Klappen geschlossen sind, kann sich das Volumen der Ventrikel in dieser Phase der Herztätigkeit nicht ändern. Die beginnende Füllung der Vorhöfe könnte eher eine Vergrößerung erklären. Das Absinken unserer Kurve muß demnach auf eine Herzbewegung zurückgeführt werden.

Oft beobachteten wir, daß unser geradliniges Kurvenstück um so mehr geneigt ist und um so tiefer herabführt, je höher die Kurve prädiastolisch angestiegen war (Abb. 11f). In diesen Fällen kann man sich leicht vorstellen, daß die Bewegung, die zur Entstehung der aufwärtsführenden Kurventeile führt, hier wieder zurückgeht. In anderen Fällen allerdings versagt diese Erklärung; so sehen wir z. B. in 12 e und f, daß sich die Kurve in der Entspannungszeit stark senkt, ohne daß vorher eine Erhöhung stattgefunden hat. Irgendwelche Besonderheiten weist das kurze Kurvenstück der Entspannungszeit nicht auf. Am Punkt 6, der dem Schluß der Aortenklappe entspricht, sieht man auf vielen Kurven feine Schwingungen, die dem zweiten Herzton ihre Entstehung verdanken. Die Kurven der Abb. 12 c, d, e, f und 13 a zeigen die Schwingungen besonders gut.

Die Dauer der Entspannungszeit übertrifft stets die Dauer der Anspannungszeit. Sie beträgt meist 7—9, seltener 6—12 Hundertstel Sekunden.

b) *Die Einströmungszeit.* Nach einer heute von vielen Physiologen vertretenen Ansicht füllt sich das Herz in der Diastole in der Weise, daß das Blut unmittelbar nach der Öffnung der Atrioventrikularklappen kräftig in die Ventrikel einströmt (*Starling*). In der Mitte der Diastole ist das Herz schon weitgehend mit Blut gefüllt. Von da ab

fließt das Blut nur noch langsam ein. Durch die jetzt einsetzende Tätigkeit der Vorhöfe werden keine großen Blutmengen mehr in Bewegung gesetzt.

Manche Autoren neigen im Gegensatz hierzu der Ansicht zu, daß sich die Blutzufuhr zu den Kammern über die ganze Diastole etwa gleichmäßig verteilt (*Howell*). Und schließlich sei noch die dritte, älteste Theorie erwähnt, wonach sich die Kammern fast ausschließlich durch die Kontraktion der Vorhöfe füllen sollen (*Harvey, Huxley*).

Welche von diesen drei Anschauungen richtig ist, müßte man wohl aus dem Dielektrogramm entnehmen können; sahen wir doch, daß wir mit dieser Methode in der Hauptsache Volumkurven registrieren.

Durchmustern wir daraufhin in den Abb. 11 und 12 die Dielektrogramme, so bemerken wir, daß sich die Kurve in den meisten Fällen von Punkt 1 ab, wo sich die Atrioventrikularklappen öffnen, rasch erhebt. Es folgt ein mehr oder weniger nach oben vorspringender Gipfel und dann die nach unten gerichtete Zacke, die wir als Punkt 2 bezeichnet haben. Diese Zacke kann scharf ausgesprochen (Abb. 11b, c, e) oder nur angedeutet sein (11d). In den meisten Fällen (Abb. 11a bis d, f, 12a) steigt die Kurve nach diesem Punkt 2 nicht mehr, sondern geht in ein Plateau über. Das Verhalten der Kurven bei diesen Herzen spricht dafür, daß sich die Kammern bereits im ersten Teil der Diastole, der durch die Punkte 1 und 2 begrenzt ist, fast vollständig mit Blut gefüllt haben.

Einen anderen Füllungsmechanismus scheinen die Herzen aufzuweisen, deren Kurven in Abb. 12 c, e, f wiedergegeben sind. Hier steigt die Kurve noch weit über den Punkt 2 hinaus. Die ganze Zeit der Diastole wird zur Füllung in Anspruch genommen.

Die Kurvengestaltung im zweiten Teil der Einstromungsperiode von Punkt 2—3 richtet sich nach den Vorgängen, die im ersten Teil der Diastole stattgefunden haben. Ist das Herz bereits im ersten Teil der Diastole nahezu vollständig angefüllt, so muß der zweite Teil im Prinzip die Form einer Horizontalen annehmen (11a, b, c, d, f). Auf dieser Horizontalen sehen wir mindestens einen (11c), oft aber auch zwei Wellenzüge (11a, f), von manchmal flachem (11d), manchmal steilem Verlauf (11e). Die letzte dieser Wellen ist sicher durch die Tätigkeit der Vorhöfe bedingt. Auf den meisten Diagrammen senkt sich die Kurve vor dem Punkt 3 ein Stück nach unten (11c, 12b), was wir wohl als einen Ausdruck der Vorhofskontraktion betrachten dürfen.

Da die Ventrikel bei Beginn der Vorhofskontraktion schon ganz oder fast ganz gefüllt sind, muß die Kontraktion der Vorhöfe Blut in die Venensysteme zurückdrücken. Das Herz als Ganzes erfährt also in dieser Phase eine Volumverminderung.

Ein anderes Bild bietet sich in der zweiten Hälfte der Diastole, wenn das Blut auch noch in dieser Phase der Herztätigkeit den Kammern in erheblichen Ausmaßen zuströmt. Dann pflegt die diastolische Kurve ihren höchsten Punkt nicht vor Punkt 2, sondern erst beim Beginn der Vorhofsystole kurz vor Punkt 3 (12 b, c, d, e, f) zu erreichen.

Wir haben in der Besprechung bisher angenommen, daß sich in unserer dielektrographischen Kurve während der Einströmungszeit die Volumänderungen dieser Phase widerspiegeln. In der Tat läßt sich aus unserer Kurve ein Füllungsmechanismus des Herzens herauslesen, der plausibel erscheint. Trotzdem ist es notwendig, nachzuweisen, daß dieser Kurvenabschnitt nicht durch interferierende Form- und Lageänderungen des Herzens bedingt ist.

Diesen Beweis können wir zunächst nur indirekt führen. Wir werden im nächsten Abschnitt zeigen, daß Einwirkungen auf den Kreislauf, welche den Füllungsmechanismus in bekannter Weise beeinflussen, im Dielektrogramm Änderungen hervorrufen, die den Vorstellungen von einer Volumkurve entsprechen.

Die zweite Phase der Einströmungszeit stellt offenbar einen Ruhepunkt in der Herztätigkeit dar. Wir nähern uns damit den Vorstellungen von *Y. Henderson*¹², der für diese Pause die Bezeichnung Diastase einführt. Aus unseren Kurven ersehen wir, daß diese Zeitreserve bei den meisten Herzen ziemlich groß ist. Auf diese Reserve greift das Herz zurück, wenn kleine Frequenzsteigerungen notwendig werden. Wir sahen wiederholt, daß z. B. nach körperlicher Arbeit die übrigen Phasen der Herztätigkeit ganz unverändert bleiben, während der zweite Teil der Diastole sich soweit verkürzt, daß er fast verschwindet. Betrachtet man die Kurven der Abb. 11 und 12, so wird man bemerken, daß selbst beim Vergleich von Kurven, die von verschiedenen Personen stammen, die Länge des zweiten Teiles der Diastole (Punkt 2—3) größeren Schwankungen unterworfen ist, während die Dauer aller anderen Abschnitte relativ konstant bleibt.

Wenn wir auf Grund der bisherigen dielektrographischen Messungen zu der eingangs aufgeworfenen Frage des Füllungsmechanismus Stellung nehmen, so müssen wir auf Grund unserer Aufnahmen, die eine Beobachtung des menschlichen Herzens unter durchaus natürlichen Bedingungen gestatten, zu der Ansicht gelangen, daß bei der Mehrzahl der gesunden Herzen die Füllung im ersten Teil der Einströmungszeit (rapid inflow) (*Starling*) annähernd vollständig ist, während der zweite Teil mehr eine Ruheperiode darstellt im Sinne der Diastase von *Henderson*. Daneben gibt es aber auch Herzen, die wohl kaum als pathologisch anzusehen sind, bei denen die Füllung während der ganzen Einströmungszeit gleichmäßig erfolgt. Man hat aber nie den Eindruck, daß die Vorhofkontraktion den Hauptteil der Ventrikelfüllung bedingt.

IX. Die Prüfung der Herzfunktion mit Hilfe der Dielektrographie.

Wir haben bei Besprechung der Kurven gesehen, daß man trotz der Vielgestaltigkeit des Dielektrogramms doch in der Lage ist, den Kurvenverlauf in seinen Hauptzügen zu deuten. Wir sind aber noch keineswegs imstande, die Kurve in all ihren Einzelheiten richtig zu verstehen. Manche dieser heute noch unklaren Details wird man vielleicht in ihrer Bedeutung richtig einschätzen, wenn man durch Arbeit, Lageänderungen und dergleichen den Kreislauf in einem bekannten Sinne beeinflußt und feststellt, wie sich dabei das Dielektrogramm verändert. Versuche, die wir in dieser Richtung durchgeführt haben, zeigten uns, daß dieser Weg aussichtsreich ist. Sie zeigten uns aber

darüber hinaus, daß das Dielektrogramm auch in seinen uns schon bekannten Teilen durch diese Einwirkungen so charakteristische Änderungen erfährt, daß es aussichtsreich erscheint, sie zur Grundlage einer Herzfunktionsprüfung zu machen. Es ist bekannt, daß das Schlagvolumen stark von der Körperlage abhängt. Wir müssen infolgedessen auch enge Beziehungen zwischen dem Füllungsmechanismus des Herzens und der Körperlage erwarten. Wir konnten das in der Tat bestätigen. Mit Hilfe unseres kippbaren Aufnahmetisches haben wir an einigen Versuchspersonen

Abb. 15. L., 52-jähriger Beamter a. D. Leichte Arteriosklerose. Obere Kurve im Liegen, untere Kurve im Stehen aufgenommen.

unmittelbar hintereinander je eine Aufnahme im Stehen und Liegen gemacht (siehe die Abb. 13, 15, 16). Fast immer sehen wir, daß sich die Kammern im Stehen während der ganzen Diastole anfüllen, während im Liegen der Füllungsvorgang bei den gleichen Personen bei Punkt 2 schon so gut wie beendet ist. Nur ganz selten sahen wir, daß auch im Stehen ein Plateau im zweiten Teil der Diastole vorhanden ist.

Ehe wir aus dieser wichtigen Beobachtung weitere Schlußfolgerungen ziehen, müssen wir uns mit einigen naheliegenden Einwänden auseinandersetzen: Man könnte einwerfen, daß man nur deshalb verschiedene Kurven im Stehen und Liegen erhält, weil das Herz beim Übergang von der einen Körperlage zur anderen seine Lage im Brustkorb ändert.

Um beurteilen zu können, worauf die beschriebenen Unterschiede im Dielektrogramm bei Lageänderung zurückzuführen sind, beein-

flußten wir den Füllungsvorgang des Herzens auf andere Weise als durch den Übergang vom Stehen zum Liegen. Wenn auch dann noch der gleiche Effekt im DEG zu erzielen ist, dann kann der durch die Herzverlagerung im Brustkorb bedingte Fehler keine große Rolle spielen.

Am lebenden Menschen hat man in der Art der Atmung ein einfaches Mittel, den Kreislauf zu beeinflussen. Es ist bekannt, daß durch Pressen das Schlagvolumen so stark herabgesetzt werden kann, daß der Blutdruck im großen Kreislauf stark sinkt (Preßdruckprobe *Bürgers*). In Abb. 14 sind 4 DEG abgebildet, die von der gleichen Vp. in verschiedenen Atemstellungen gewonnen sind. Während sich bei normaler

a) Fr. wie Abb. 11f.

b) A. H. S. wie Abb. 10.

c) Chl. wie Abb. 12a.

d) Bu. wie Abb. 12b.

Abb. 16a—d. Im Stehen aufgenommene Dielektrogramme.

Einatmung (b), bei normaler Ausatmung (c) und bei maximaler Ausatmung (d) das Herz immer annähernd in der gleichen Weise füllt, sehen wir, daß bei maximaler Einatmung (a) die Kurve wesentlich verändert ist. Das Kurvenstück, das der Entspannungszeit entspricht (6—1), ist beträchtlich nach oben gerückt. Das Kurvenstück 1—2, die Zeit des schnellen Einstromes, ist ganz niedrig geworden. Die Kurve steigt über den Punkt 2 hinaus weiter an, ähnlich, wie wir das in Abb. 13 beim Stehen gesehen haben.

Trotz des eindeutigen Ausfalles dieser Versuche schien es uns im Hinblick auf unsere nur indirekte Beweisführung wünschenswert, die Füllung des Herzens noch auf eine andere Weise experimentell zu beeinflussen. Wir gingen in der Weise vor, daß wir am Hunde die zirkulierende Blutmenge verringerten. Da das DEG nur bei Atemstillstand aufgenommen werden kann, so bereitet der Tierversuch ge-

wisse Schwierigkeiten. Wir brachten den Hund, der zwischen den Kondensatorplatten auf der Seite lag, in Narkose und beatmeten ihn künstlich. Hierbei wurde absichtlich überventiliert, so daß nach dem Abstellen der künstlichen Atmung eine Apnoe von einigen Sekunden eintrat. In dieser Zeit wurde die Aufnahme gemacht (Abb. 17). Die obere Kurve, die zunächst gewonnen wurde, gleicht in allen wesentlichen Teilen der menschlichen Kurve. Ohne Schwierigkeiten gelingt es, die Punkte 1—6 zu identifizieren. Die untere Kurve wurde aufgenommen, nachdem dem Hund 250 ccm Blut aus der Art. fem. entzogen worden waren. Gleichzeitig wurde Morphium gegeben.

Abb. 17. Dielektrogramme eines 20 kg schweren Hundes. Zwischen der oberen und unteren Aufnahme wurden dem Hunde 250 ccm Blut entzogen.

Aus der Kurve gewinnt man den Eindruck, daß das Herz völlig leer schlägt. Der Punkt 1 ist kaum mehr zu erkennen, der Anstieg nach Punkt 1 fehlt ganz. Erst in der Anspannungszeit geht die Kurve nach oben. Die erste nach der Aortenöffnung auftretende Zacke springt mächtig nach oben vor. Alle diese Versuche weisen nach derselben Richtung; sie bestärken uns in unserer Vermutung, daß man aus dem Kurvenstück 1—3 charakteristische Eigentümlichkeiten des Füllungsvorganges herauslesen kann.

Ob sich freilich auf diese Beobachtungen eine brauchbare Herzfunktionsprüfung aufbauen läßt, wird sich erst zeigen, wenn an einem noch größeren Untersuchungsmaterial der Füllungsmechanismus beim Stehen und Liegen studiert und das dielektrographische Ergebnis mit den anderen Untersuchungsmethoden verglichen sein wird.

Herzen, bei denen auch im Stehen der Teil 1—2 relativ hoch und deutlich ist, bei denen daher der ganze diastolische Teil konkav gegen die Abszisse ist, müssen sich offenbar relativ gut anfüllen (Abb. 16 a). Kurven dagegen, bei denen der Beginn der Diastole nicht oder nur wenig hervorspringt, zeigen während der ganzen Diastole einen mehr oder weniger geradlinigen Verlauf (16 c) oder sind sogar konvex gegen die Abszisse (16 d). Derartige Kurven weisen auf eine recht schlechte Füllung hin. In diesen Kurven springen oft die Zacken 4 a und 4 b in der Austreibungszeit besonders deutlich hervor (s. a. Abb. 15). In Analogie zu der im Hundeversuch gewonnenen Kurve der Abb. 17 hätte man in diesem Verhalten den Ausdruck eines relativ zur Herzgröße kleinen Schlagvolumens zu erblicken.

Wie empfindlich das Herz auf geringfügige Änderungen der hydrostatischen Verhältnisse im Kreislauf reagiert, sieht man daran, daß schon eine geringe Neigung der Versuchsperson genügt, um den Kurvenverlauf im Dielektrogramm zu ändern. Die obere Kurve in Abb. 18 wurde im Liegen, die untere in Schräglage mit einer Neigung von etwa 30° gewonnen. Wir sehen, daß sich durch die Lageänderung die anfängliche Füllung, die von Punkt 1—2 reicht, verkleinert. Weiter bemerken wir an der schräg nach oben gerichteten Strecke 2—3, daß auch der zweite Teil der Diastole dem Füllungsvorgang dienstbar gemacht wird.

Abb. 18. Ep., 24-jährige Laborantin. Obere Kurve horizontale Lage, untere Kurve Schräglage.

a) Pr. wie Abb. 11c.

b) Fr. wie Abb. 11f.

Abb. 19a—b. Dielektrogramme nach körperlicher Arbeit (Turnstunde).

Der systolische Kurventeil zeigt, daß schon eine so geringe Neigung genügt, um die Unterschiede zwischen Stehen und Liegen, die Abb. 16 im Vergleich zu 10—12 sowie Abb. 13 und 15 zeigen, entstehen zu lassen. Die Zacke 4 a wächst und rückt nach oben, die Zacke 4 b wird ebenfalls größer. Auch der Punkt 6 rückt nach oben. Da die Bedeutung der systolischen Zacken 4 a und 4 b noch nicht vollkommen klar ist, sind wir vorläufig auch nicht in der Lage, den Entstehungsmechanismus dieser Veränderungen ganz zu verstehen.

Wenn schon die Lageänderung das Dielektrogramm in solch typischer Weise verändert, so dürfen wir auch einen Einfluß der körperlichen Arbeit auf unsere Kurve erwarten. Abb. 19 zeigt die DEG von 2 Vpn. nach einer Turnstunde. Die Ruhekurven der beiden Vpn. sind in Abb. 11 c und f wiedergegeben. Der auffallendste Unterschied, der beim Vergleich von 11c mit 19a und 11f mit 19b hervortritt, ist das Wegfallen des zweiten Teiles der Diastole. Punkt 2 und 3 fallen zusammen. Die Zacke 4 a rückt nach oben.

In Abb. 20 sind 4 DEG wiedergegeben, die von der gleichen Vp. stammen. Die erste Aufnahme ist in ausgeruhtem Zustande im Liegen gemacht. Es ist zweifelhaft, ob die Kurve als völlig normal anzusprechen ist. Das EKG zeigt eine sehr große und etwas verbreiterte S-Zacke, woraus man auf ein relatives Überwiegen des rechten Ventrikels zu schließen berechtigt ist. Der eigenartige Verlauf des DEG im zweiten Teil der Systole ist vielleicht der Ausdruck für diese kleine Anomalität. In Abb. 20 c ist die Kurve wiederum im Liegen, aber nach einer relativ anstrengenden Turnstunde aufgenommen. Wir sehen,

a) Liegend vor der Turnstunde.

b) Stehend vor der Turnstunde.

c) Liegend nach der Turnstunde.

d) Stehend nach der Turnstunde.

Abb. 20a—d. Der Einfluß körperlicher Arbeit auf das Dielektrogramm im Liegen und Stehen. (La., 20jähriger Student, 1,90 m groß, Ruderer und Radfahrer.)

daß die Beschleunigung des Herzschlages durch ein völliges Verschwinden des zweiten Teiles der Diastole (2—3) und eine Verkleinerung des ersten Teiles zustande kommt. Die systolischen Kurventeile sind demgegenüber sehr viel weniger verkürzt. Im Stehen (b und d) tritt der Unterschied weniger stark hervor. Immerhin sehen wir, daß der diastolische Teil, der in b noch leicht konkav gegen die Abszisse ist, in a eher konvex wird. Die Füllung des Herzens nach der Turnstunde ist also im Stehen ebenso wie im Liegen schlechter als vorher.

In Abb. 21 ist das DEG eines gesunden jungen Mannes unmittelbar vor und nach einem Langstreckenlauf wiedergegeben*. Das vor dem

* Einzelheiten über die dielektrographische Analyse des Erholungsvorganges unter Berücksichtigung des Trainingszustandes werden demnächst von *Lehmann* und *Steinhaus* veröffentlicht.

Lauf sehr lange diastolische Kurvenstück 2—3 ist nach dem Lauf ganz verschwunden, alle übrigen Teile sind in verschiedenem Maße verkürzt. Auch die isometrischen Phasen machen hiervon keine Ausnahme, doch ist ihre Verkürzung nicht sehr bedeutend. Der Punkt 6 (Schluß der Aortenklappe) springt bei dieser Vp. im Ruhezustand scharf nach oben heraus. Nach dem Lauf sehen wir nichts mehr davon; 6—1 verläuft horizontal. Die Zacke 4 a, die hier bei Ruhe tief sitzt, rückt nach dem Lauf, wohl im Zusammenhang mit der schlechteren Füllung, nach oben.

Vor dem Lauf.

Nach dem Lauf.

Abb. 21. Der Einfluß eines Langstreckenlaufes auf das Dielektrogramm.
(Fl., 28-jähriger Akademiker.)

X. Die dielektrographische Analyse pharmakologischer Beeinflussung der Herztätigkeit.

Allein die Tatsache, daß es möglich ist, aus unserer Kurve die Dauer der einzelnen Phasen des Herzschlages zu bestimmen, läßt das DEG geeignet erscheinen, um pharmakologische Einwirkungen auf das Herz zu erforschen. Ob sich darüber hinaus noch weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben, muß die Zukunft lehren.

Wir berichten in folgendem über einige Vorversuche auf diesem Gebiete. In Abb. 22 ist ein Adrenalinversuch wiedergegeben. 0,3 ccm Suprarenin 1:1000 wurden subcutan injiziert. Abb. 22 a ist vorher, Abb. 22 b 13 Minuten nachher aufgenommen. Die Abbildung gibt die Größenverhältnisse der Kurven nicht richtig wieder. Die Kurven b—e sind mit größerem Vorschaltwiderstand aufgenommen als die übrigen. Wäre das nicht der Fall, so würden sie etwa die doppelte bis dreifache Größe haben. Sehen wir von diesen Größenunterschieden ab, so ist ein wesentlicher Formunterschied vor allem in der ersten Hälfte der Systole festzustellen.

Die Kurve in der Anspannungszeit wird bei b deutlich zweiphasig, ein Verhalten, das noch 40 Minuten nach der Injektion (e) bemerkbar ist. Augenfalliger ist die Veränderung in der Austreibungszeit. Die Zacke 4 a, die die Austreibung unterbricht, ist relativ verkleinert, ihre Lage aber unverändert. Der Punkt 5 dagegen springt außerordentlich viel weiter nach unten vor, als das sonst jemals der Fall ist. Auf den Aufnahmen c bis f sehen wir diese Veränderung sich allmählich zurückbilden. 72 Minuten nach der Injektion gleicht die Kurve wieder der

vor der Injektion gewonnenen. Mißt man die Dauer der einzelnen Phasen der Herzrevolution aus, so ergibt sich eine Verkürzung des ersten Teiles der Austreibungszeit (Punkt 4—5). Um ein Bild von der Stärke der Adrenalineinwirkung zu geben, die den Aufnahmen der Abb. 22 zugrunde liegt, sei erwähnt, daß der Blutdruck zur Zeit der

a) Vor der Injektion.

b) 13 Min. nach der Injektion.

c) 19 Min. nach der Injektion.

d) 31 Min. nach der Injektion.

e) 40 Min. nach der Injektion.

f) 53 Min. nach der Injektion.

g) 72 Min. nach der Injektion.

Abb. 22a—g. Die Wirkung einer subkutanen Injektion von 0,3 ccm Adrenalin 1:1000.
(Le., wie Abb. 14.)

Aufnahme a 119/79 mm Hg, zur Zeit der Aufnahme b 138/58 und im Moment der Aufnahme g 125/74 betrug.

Abb. 23 zeigt die zeitliche Auswertung eines gleichartigen Adrenalinversuches an einer anderen Vp. Der systolische Blutdruck stieg in diesem Versuch nur von 121 auf 131 mm Hg, der diastolische fiel von

78 auf 62 mm. In der Abb. 23 bedeutet die Ordinate die Dauer der einzelnen Herzphasen in hundertstel Sekunden, die Abszisse die Zeit in Minuten. Die obere Kurve stellt die Dauer einer ganzen Herzrevolution dar, die von 98,8 auf 82,4 absinkt, um dann wieder zu steigen. Die zweite Kurve von oben gibt die Dauer des Zeitintervalls zwischen Punkt 4 und 5 wieder, also den ersten Teil der Austreibungszeit. Die Kurve geht derjenigen des ganzen Herzschlages weitgehend parallel. Die Frequenzzunahme ist also fast ausschließlich auf eine Verkürzung des ersten Teiles der Austreibung zurückzuführen. Der zweite Teil der Austreibung (5—6) ändert seine Länge unter dem Einfluß des Adrenalins praktisch nicht. Die Entspannungszeit (6—1) zeigt ebenso wie die Anspannungszeit (3—4) nur auf dem Gipfel der Adrenalinwirkung eine geringe Verkürzung, der nachfolgende Anstieg beider ist aber nach unseren sonstigen Erfahrungen wahrscheinlich nicht auf das Adrenalin, sondern auf das langdauernde Liegen zurückzuführen. Die Zeit der anfänglichen Einströmung (1—2) ist unter dem Einfluß des Adrenalins nicht verkürzt, zur Zeit der maximalen Wirkung sogar verlängert. Der zweite Teil der Einströmungszeit (2—3) verkürzt sich anfänglich, um später, wie in den meisten Fällen, stärker zu schwanken.

Abb. 23. 0,3 ccm Adrenalin (1:1000) subkutan.
(Vp. A. H. S., wie Abb. 10.)

In einer zweiten Versuchsreihe stellten wir uns die Aufgabe, die flüchtige Amylnitritwirkung auf das Herz im diektrographischen Bilde festzuhalten (Abb. 24). Unmittelbar nach der ersten Aufnahme atmete die Vp. drei Atemzüge lang Amylnitrit ein. Die weiteren Aufnahmen sind in rascher Folge hergestellt. Im Gegensatz zum Adrenalin sehen wir viel weniger den systolischen als den diastolischen Teil der Kurve verändert. Bei der Aufnahme b steigt das DEG von Punkt 1 zu Punkt 2 sehr viel höher und steiler. Bei der Aufnahme c, die etwa eine halbe Minute nach der Einatmung des Amylnitrits aufgenommen wurde, wird die Wirkung bereits wieder schwächer. 0,84 Minuten nach der Einatmung ist sie verschwunden. Dieser rasche Ablauf der Wirkung

bestätigt also durchaus den subjektiven Eindruck, daß die Wirkung des Amylnitrits auf das Herz außerordentlich schnell vorübergeht.

a) Vor der Applikation.

b) 0,25 Min. nach dem Einatmen.

c) 0,49 Min. nach dem Einatmen.

d) 0,84 Min. nach dem Einatmen.

Abb. 24a—d. Die Wirkung von Amylnitrit. (Gu., 26jähriger Dipl.-Ing.)

XI. Das Dielektrogramm des kranken Herzens.

Wenn wir auch hoffen dürfen, daß uns die Dielektrographie im Verein mit anderen Methoden dem Ziele näher bringen wird, die Leistungsfähigkeit des gesunden und des kranken Herzens zu beurteilen und den Erfolg therapeutischer Maßnahmen abzuschätzen, so ergibt sich doch aus unseren bisherigen Darlegungen, daß bis dahin noch manche Schwierigkeit zu überwinden ist. Trotzdem glauben wir sagen zu können, daß die neue Methode es verdient, vom Kliniker als diagnostisches Hilfsmittel herangezogen zu werden, da pathologische Veränderungen am Herzen sehr prägnante Dielektrogramme liefern, die sich von den normalen deutlich unterscheiden.

Im folgenden wollen wir einige DEG pathologisch veränderter Herzen wiedergeben, die wir dank der freundlichen Mithilfe der Herrn Prof. Eppinger, Prof. Berg und Dr. Schürmeyer aufnehmen konnten. Es ist nicht unsere Absicht, in diesem Kapitel zu Fragen der Herzpathologie irgendwie Stellung zu nehmen; wir wollen lediglich auf dieses vielleicht wichtigste Anwendungsgebiet der neuen Methode hinweisen.

In Abb. 25 geben wir zunächst die DEG zweier Fälle von Aorteninsuffizienz. Beides waren relativ alte Fälle mit vollkommener Kompensation. Bei beiden Kurven springt sofort in die Augen, daß mit der Öffnung der Aortenklappe sofort eine außerordentlich scharf und

steil nach unten gehende systolische Senkung einsetzt. Der hypertrophierte und dilatierte Ventrikel treibt eine vergrößerte Blutmenge mit großer Schnelligkeit aus. Der außerordentlich steile Abfall der Kurve im Beginn der Systole ist nach den Vorstellungen, die wir uns vom Zustandekommen des DEG gemacht haben, durchaus verständlich.

Vö., 61jähriger Händler.

Mü., 26jähriger Kontorist.

Abb. 25. Aorteninsuffizienzen im Dielektrogramm.

In Abb. 26 sind eine Reihe sehr verschiedener Mitralfehler zusammengestellt. Beim Fall a handelt es sich um eine Frau, die sich völlig gesund fühlte, jedoch angab, früher einmal einen Herzfehler gehabt zu haben. Sowohl der perkutorische wie auch der auskultatorische Befund waren normal. Wir sehen im DEG, daß die bei Punkt 1 beginnende Einstromung zunächst sehr mangelhaft ist. Der Punkt 2 liegt auffallend niedrig. Die Vorhofzacke zwischen 2 und 3 ist groß. Beide Symptome sprechen für eine leichte Stenose der Mitralis. Die Zacke 4 a erscheint etwas verbreitert. Beim Falle b, der klinisch bedeutend schwerer ist, erscheint hinter der kleinen Zacke 4 a eine weit größere, die nach oben gerichtet ist. Wir finden diese Zacke bei der Mehrzahl aller Mitralfehler, ja sie scheint ein Hauptcharakteristicum für Mitralfehler zu sein. Trotzdem ist ihre Bedeutung nicht ganz klar. Bei einer Mitralinsuffizienz müssen wir erwarten, daß, sobald der Druck im Ventrikel eine gewisse Grenze überschreitet, Blut durch die undichte Atrioventrikularklappe in den Vorhof zurücktritt. Dadurch könnte in der dielektrographischen Kurve im Austreibungsteil ein Bild, wie es 26b zeigt, entstehen.

Eine ähnliche, meist allerdings wohl niedrigere Zacke, wie wir sie bei Mitralfehlern in der Regel sehen, ist auch im Kardiogramm zu beobachten und wird von *Frey* auf die Hypertrophie zurückgeführt. Für diese Erklärung spricht die Tatsache, daß die erwähnte Zacke manchmal (z. B. in Abb. 26 c und d) so groß werden kann, daß sie durch das Zurücktreten von Blut in den Vorhof allein nicht mehr hinreichend geklärt werden kann. An der Hand eines geeigneten Krankenmaterials wird sich diese Frage klären lassen.

In Abb. 26 c sehen wir wieder die schlechte Füllung infolge der Stenose. Eine Vergrößerung der Vorhofszacke fehlt hier. In Abb. 26 c

und d ist die pathologische Zacke in der Austreibungszeit so groß geworden, daß das ganze Kurvenbild der Kurve eines gesunden Herzens kaum mehr ähnlich ist. In Abb. 26d sehen wir nur noch 3 Zacken, die kleine spitze Zacke der Aortenöffnung über der R-Zacke des EKG, davor die vergrößerte Vorhofzacke, dahinter die erwähnte pathologische Zacke.

a) Alter Mitralfehler leichtester Art.
(Fr., 34 jährige Putzfrau.)

b) Mitralinsuffizienz und Stenose, mittel-schwerer Fall. (Mi., 18 jähr. Mädchen.)

c) Schwerer Mitralfehler. (Bo., 34 jährige Hausfrau.)

d) Schweres Mitralvitium. (Ru., 24 jähr. Kaufmann.)

e) Schwere Mitralstenose, Vorhofflimmern, Arrhythmia perpetua. (Br., 23 jähr. Mädchen.)

Abb. 26a—e. Mitralfehler im Dielektrogramm.

In Abb. 26 e ist das DEG eines schweren Mitralvitiums wiedergegeben. Wir sehen zunächst, wie die starke Arrhythmie im DEG ganz verschiedenen Größen der einzelnen Herzschläge entspricht. Es kann wohl kaum zweifelhaft sein, daß das Herz bei seinen einzelnen Schlägen mit wechselnden Füllungen arbeitet. Das Kurvenbild zeigt wenig Einzelheiten. Im aufsteigenden Teil sehen wir stets eine feine Zacke; sie entspricht unserem Punkt 4, also der Aortenöffnung, wie ein Vergleich mit dem EKG lehrt. Die große darauffolgende Zacke ist wohl aus derjenigen hervorgegangen, die wir bereits bei den leichteren

Mitralfehlern kennengelernt haben. Die Vorhöfe flimmern in diesem Falle, nur gelegentlich scheint noch eine normale Kontraktion aufzutreten. Es fehlt daher auch meist eine Vorhofsacke im DEG.

Abb. 27. Mitralinsuffizienz und Stenose, Bradykardie. (EL, 54 jähriger Händler.)

Abb. 27 stammt von einem Falle, der klinisch als Mitralinsuffizienz und Stenose diagnostiziert wurde. Wir sehen die für die Stenose charakteristische geringe Füllung zwischen Punkt 1 und 2. Entsprechend der sehr ausgesprochenen Bradykardie ist das Zeitintervall zwischen Punkt 2 und 3 sehr lang. Der eigenartige Verlauf der Kurve in der Systole dürfte vielleicht auf die Überleitungsstörung im rechten Bündel zu beziehen sein.

Abb. 28 ist eine Aufnahme, die wir bei einem Fall von angeborenem Herzfehler gewannen. Wahrscheinlich handelt es sich um einen Defekt im Ventrikelseptum. Das Eigenartige dieser Kurve tritt vor allem bei der Aufnahme im Stehen deutlich in Erscheinung. Es erscheint verfrüht, die Kurven schon im einzelnen deuten zu wollen.

Abb. 28. Angeborener Herzfehler. Wahrscheinlich Defekt im Ventrikelseptum. (Kö., 24 jähriges Hausmädchen.)
a = liegend, b = stehend.

Zum Abschluß der pathologischen Bilder geben wir in Abb. 29 einen Fall schwerster Arrhythmie wieder. Bei diesem Falle war auffällig, daß die im EKG gezählte Herzfrequenz niemals mit der Zahl der Radialpulse übereinstimmte. Das EKG zeigt, daß im Wechsel mit scheinbar normalen Herzschlägen Extrasystolen und Überleitungsstörungen auftreten. Im DEG sehen wir den Ablauf dieser anormalen Herzkontraktionen. Wir sehen aber weiter, daß auch die im EKG gleich erscheinenden Herzschläge in ihrem Effekt sehr verschieden sind. Neben Herzschlägen mit einer mächtig entwickelten scharfen Austreibung finden wir Herzschläge mit ganz geringer Austreibung. Wir haben also die

Möglichkeit, im DEG diese frustanen Kontraktionen und ihre Unterschiede gegenüber den normalen besser zu studieren als im EKG. Neben den Rhythmusstörungen leidet der Patient an einer Aorteninsuffizienz, die sich im DEG durch die schnelle Kontraktion verrät.

Abb. 29. Schwere Arrhythmie, Leitungsstörungen, Extrasystolie, Aorteninsuffizienz. (Be., 22-jähriger Kaufmann.)

XII. Die Aufnahme peripherer Pulse mit dem Dielektrographen.

Das Dielektrogramm gibt in erster Linie Volumschwankungen eines im Kondensatorfeld befindlichen Körpers wieder. Es liegt auf der Hand, daß sich daher mit dem Dielektrographen nicht nur Aufnahmen vom Herzen selbst, sondern ebenso auch von allen anderen Körperteilen machen lassen, deren Volumen schnellen Änderungen unterworfen ist. Es ist also möglich, mit dem Dielektrographen ähnlich wie mit einem Plethysmographen Volumpulse zu registrieren. Abb. 30 gibt ein vom

Abb. 30. Dielektrogramm vom Oberschenkel abgeleitet.

Oberschenkel gewonnenes DEG wieder. Die gleichzeitige Aufnahme des DEG von verschiedenen Körperstellen ermöglicht es, auf bequeme Weise die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Pulswelle zu bestimmen.

Derartige Extremitätenaufnahmen haben gegenüber den üblichen Plethysmogrammen den großen Vorteil der Trägheitsfreiheit und scheinen

geeignet, über den Zustand der peripheren Gefäße Aufschlüsse zu geben. Insbesondere ist es möglich, im Falle endarteriitischer oder spastischer Gefäßverengungen zu entscheiden, wie weit die Durchblutung eines bestimmten Gebietes unterbrochen ist. Wir konnten uns bei einem geeigneten Falle davon überzeugen, daß die Empfindlichkeit der Methode weit größer ist als die der sonst in diesen Fällen angewandten Verfahren zum Nachweis der Pulsation. Man wird also den Dielektrographen in solchen Fällen heranziehen, wenn man die Frage entscheiden soll, ob eine Amputation indiziert ist oder nicht. Die Methode kann uns aber auch darüber orientieren, ob sich unter dem Einfluß der ein-

geleiteten Therapie der darniederliegende Kreislauf in der von Gangrän bedrohten Extremität wieder erholt.

XIII. Zusammenfassung.

Die beschriebene Methode der Dielektrographie beruht auf der Tatsache, daß die Kapazität eines Kondensators durch Volumschwankungen eines im Felde dieses Kondensators befindlichen Körpers, dessen Dielektrizitätskonstante von der des Zwischenmediums abweicht, beeinflußt wird. Liegt der Kondensator in einem Schwingungskreis, der induktiv erregt wird, so ändert sich die Intensität des Mitschwingens entsprechend den Kapazitätsänderungen. Nach Gleichrichtung und Verstärkung kann daher eine Kurve der Kapazitätsänderungen und damit der Volumschwankungen des im Feld befindlichen Körpers geschrieben werden.

Es wird ein Apparat beschrieben, in dem dieses Prinzip zur Aufzeichnung von Herzkurven Verwendung findet. Die Handhabung des Apparates wird erläutert.

In Modellversuchen wird die prinzipielle Richtigkeit der Grundlagen überprüft und gezeigt, daß innerhalb gewisser Grenzen die erhaltenen Ausschläge proportional dem Volumen und der Quadratwurzel der Dielektrizitätskonstante, dagegen unabhängig von der Form des Körpers sind. Es wird gezeigt, daß eine Registrierung auch dann möglich ist, wenn die zu registrierenden Vorgänge in einem Raum stattfinden, der durch einen schlechten Leiter allseitig begrenzt ist. Speziell ist es möglich, Vorgänge zu registrieren, die sich im Innern des Brustkorbes abspielen.

Auf Grund theoretischer Überlegungen ist zu erwarten, daß neben reinen Volumänderungen des Herzens auch Form- und Lageänderungen registriert werden, da diese zu Verschiebungen zwischen dem Mittelfeld des Kondensators und den Randzonen führen. Ferner müssen die im mechanischen Kardiogramm registrierten Bewegungen der Brustwand in das Dielektrogramm eingehen. Es zeigt sich jedoch, daß eine Ausschaltung dieser Bewegungen durch einen Gipsverband keine deutliche Änderung der Kurve bedingt. Der Vergleich mit dem Kardiogramm zeigt charakteristische Unterschiede.

Auf Grund gleichzeitiger Aufnahmen des Dielektrogramms und des Elektrokardiogramms werden die Hauptphasen der Herztätigkeit festgelegt.

An Hand einer größeren Anzahl von Dielektrogrammen gesunder Versuchspersonen, die große individuelle Unterschiede aufweisen, wird der Kurvenverlauf während der Anspannung, Austreibung, Entspannung und Einströmung im einzelnen diskutiert. Bei Besprechung der diastolischen Kurve wird zu der Frage der Einströmungsgeschwindigkeit in

dem Sinne Stellung genommen, daß im Liegen bei den meisten normalen Herzen im ersten Teil der Diastole die Füllung bereits fast vollständig ist.

Die Zurückführung der Formen der diastolischen Kurve auf den Füllungsmechanismus wird durch Versuche gestützt, in denen die Füllung in bekannter Weise beeinflußt wird. Hierzu dienen Aufnahmen in verschiedenen Körper- und Atemstellungen sowie Aufnahmen an Hunden vor und nach der Entziehung von Blut.

Der Unterschied der im Stehen und Liegen gewonnenen Dielektrogramme sowie die Veränderungen des Dielektrogramms nach körperlicher Arbeit sprechen für die Verwendbarkeit dielektrographischer Aufnahmen im Sinne einer Funktionsprüfung des Herzens.

An zwei Serien von Dielektrogrammen wird die Einwirkung von Adrenalin und von Amylnitrit auf das Herz demonstriert.

Die Aufnahmen pathologischer Herzen weisen charakteristische Unterschiede gegenüber normalen auf. An Hand einiger Aufnahmen wird ein vorläufiger Überblick über die Bilder gegeben, die bei einigen typischen Herzfehlern zu beobachten sind.

Mit Hilfe des Dielektrographen können auch Volumpulse an den Extremitäten aufgenommen werden.

Literaturverzeichnis.

- ¹ Nicolai, Georg Fr., Nagels Handbuch der Physiol. I., 717. — ² Fredericq, Trav. Lab. **1**, 90 (1886). — ³ Minkowski, O. D., Dtsch. med. Wschr. **1906**, Nr 31. — ⁴ Frey, W., Handbuch der normalen u. pathol. Physiologie, **7/1**, 221. Berlin: Julius Springer. — ⁵ Frank u. Hess, Erg. inn. Med. **14**, 359 (1915). — ⁶ Weitz, Erg. inn. Med. **22**, 402 (1922). — ⁷ Cremer, Max, Münch. med. Wschr. **1907**, Nr 33. — ⁸ Höber, Pflügers Arch. **133**, 237 (1910). — ⁹ Zit. nach Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik., S. 658. — ¹⁰ Schliephake, Z. exper. Med. **66**, 212 (1928). — ¹¹ Frey, W., Der Spitzenstoß. Handb. Bethe, **7/1**, 221. — ¹² Henderson, Y., Amer. J. Physiol. **16**, 325 (1906).