Über Elastizität und Innendruck der Gewebe.

Von

Martin Gildemeister und Luise Hoffmann.

(Aus der physikalischen Abteilung des Physiologischen Instituts der Universität Berlin.)

Mit 1 Textabbildung.

(Eingegangen am 4. März 1922.)

Wenn man ein Organ, z. B. einen menschlichen Arm, betastet, so setzt es dem Eindringen des tastenden Fingers einen gewissen Widerstand entgegen, nimmt aber im allgemeinen nach Aufhören des Druckes wieder seine frühere Form an. Die Autoren, die sich zuerst mit dieser Eigenschaft genauer beschäftigt haben¹⁾, sprechen von der Härte der Gewebe und nennen z. B. den tätigen Muskel härter als den ruhenden. Der eine von uns hat vor einiger Zeit über diesen Gegenstand Untersuchungen angestellt²⁾ und hat darauf hingewiesen, daß man es hier nicht mit Härte im physikalischen Sinne zu tun hat, sondern mit Elastizität. Die physikalische Härte wird bestimmt, indem man dem zu prüfenden Gegenstand eine bleibende Deformation erteilt, einen Ritz, eine Delle, einen Sprung; sie gibt sich kund durch den Widerstand gegen Trennung vorher verbundener Teile, sie gehört in die Begriffskategorie der Festigkeit. Es ist also in diesem Sinne nicht richtig, nach der Härte eines Muskels oder eines Luftreifens zu fragen, denn beide nehmen keine dauernde Deformation auf Druck an.

Die Widerstände dieser Objekte gegen Formveränderung rühren von elastischen Gegenkräften her; ebenso haben wir in obigem Beispiel, dem menschlichen Arm (Haut + Unterhautgewebe + Muskel) von Elastizität zu sprechen, und zwar in diesem Falle (im Gegensatz zu der bei Zug zur Geltung kommenden Dehnungselastizität) von Eindringungselastizität, für welche in der angeführten Arbeit die Bezeichnung Resistenz, allenfalls auch in Anlehnung an den populären Sprachgebrauch Tasthärte, vorgeschlagen wurde.

R. Springer hat im Anschluß daran Versuche über die Resistenz menschlicher Muskeln mitgeteilt³⁾, über den Einfluß von Geschlecht,

¹⁾ A. Noyons und J. von Uexküll, Die Härte der Muskeln. Zeitschr. f. Biol. **56**, 139. 1911.

²⁾ M. Gildemeister, Die sogenannte Härte tierischer Gewebe und ihre Messung. Zeitschr. f. Biol. **63**, 183. 1914.

³⁾ R. Springer, Untersuchungen über die Resistenz (die sogenannte Härte) menschlicher Muskeln. Zeitschr. f. Biol. **63**, 201. 1914.

Lebensalter, Ermüdung, Nervenreizung, Belastung u. a. m. Die Ergebnisse können hier übergangen werden; von der Methode wird noch unten die Rede sein. Das Wesentliche an ihr war, daß sie längeren Druck mit seinen unerwünschten Folgen — elastische Nachwirkung, Reizung, Wasserverschiebung — vermied.

In der vorliegenden Arbeit haben wir uns der Körperdecke — Haut und Unterhautgewebe — zugewandt und ihre Resistenz zu bestimmen gesucht, hauptsächlich in der Erwartung, daraus Schlüsse auf den Druck der das Gewebe durchtränkenden Flüssigkeit ziehen zu können. Das ist uns unseres Erachtens innerhalb gewisser Grenzen gelungen. Im letzten Teil der Arbeit soll erörtert werden, wie sich unsere Gewebedruckwerte zu den von anderer Seite gefundenen Werten des Capillardrucks verhalten, wobei die Theorien der Lymphbildung in Betracht zu ziehen sind.

Allgemeines über Messung der Resistenz.

Der elastische Widerstand gegen Eindrücke wird bei unbelebten Objekten gewöhnlich so gemessen, daß ein Druckkörper einfacher Form, z. B. ein Kugelabschnitt, gegen dieselben gedrückt wird und gleichzeitig Druck und Tiefe des Eindrucks festgestellt werden¹⁾. Nach ähnlichen Grundsätzen verfahren auch die Autoren, die sich mit der Tasthärte der Muskeln beschäftigten²⁾. Jedoch macht sich bei solchem Verfahren die elastische Nachwirkung geltend, so daß bei gleichbleibendem Druck die Tiefe der Delle mit der Zeit wächst. Dadurch werden naturgemäß genaue Messungen unmöglich gemacht. Deshalb hat der eine von uns in der oben (S. 153 Anm. 2) zitierten Untersuchung eine Momentanmethode ausgearbeitet, bei der der Druckkörper nur eine sehr kurze Zeitspanne gegen das Gewebe angepreßt wird. Bei den *Springer*-schen Versuchen wurde ein kleiner Metallkörper, etwa von der Größe und Form eines flachen 2 g-Gewichtes, auf die Haut über dem zu untersuchenden Muskel (*Biceps brachii*) geklebt und mit einer Stromquelle und einem elektrischen Meßinstrument verbunden. Ein gleichfalls in den Stromkreis eingeschaltetes Metallhämmerchen, das in der Ruhelage dicht vor dem Druckplättchen hing, wurde nun um einen jedesmal gleichen Winkel gehoben und prallte nach dem Loslassen gegen die Spitze des Plättchens, dieses in den Muskel eindrückend und für die Dauer der Berührung den Stromkreis schließend. Vorherige Modellversuche hatten gezeigt, daß die Dauer der Berührungszeit und damit auch der Galvanometerausschlag dem Quadrate des Eindringungs-

¹⁾ M. Gildemeister, Über die Elastizität von Leimgallerten. *Zeitschr. f. Biol.* 63, 175. 1914.

²⁾ Siehe die Literatur in den angeführten Arbeiten von *Gildemeister* und *Springer*.

moduls umgekehrt proportional war Oder kürzer: Je resistenter der Muskel, desto kleiner der abgelesene Ausschlag. Das Wesentliche bei dieser Anordnung ist, daß es nicht auf die Tiefe des Eindrucks, sondern auf einen Zeitfaktor ankommt, der gesetzmäßig mit der Elastizitätskonstanten zusammenhängt und der sich nur wenig mit der Fallgeschwindigkeit des Hammers ändert. Das Instrument wurde das ballistische Elastometer genannt.

Wir hielten diese Methode zu dem vorliegenden Zweck für geeignet. Da wir die Eindrückbarkeit nur der obersten Körperschichten messen wollten, mußten wir natürlich das Trägheitsmoment des Hammers und seine Fallgeschwindigkeit so gering machen, daß er nicht bis auf die Unterlage (Fascie, Muskel, Knochen) durchschlug, was streng genommen wohl eine unmögliche Forderung ist. Denn es wird einen, wenn auch praktisch oft zu vernachlässigenden, Einfluß auf die Eindrückbarkeit einer Körperstelle auch bei den kleinsten Eindrücken haben, ob das gedrückte Gewebe unter sich ein gleichartiges oder ein strafferes Widerlager hat. Innerhalb der Grenzen der hier überhaupt erreichbaren Genauigkeit glauben wir aber diesen Versuchsfehler vernachlässigen zu können.

Auch die von den oben angeführten Autoren ausgebildeten Druckmethoden dürften sich, wenn man die Druckzeit soweit wie möglich verkürzt, von den durch die elastische Nachdehnung hervorgerufenen Fehlern befreien lassen.

Über den Zusammenhang zwischen Druck der Gewebsflüssigkeit und Resistenz.

Wir wollen in erster Annäherung annehmen, daß der Druck, den unser Finger beim zarten Betasten von Haut + Unterhautzellgewebe verspürt, davon herrührt, daß die Hohlräume dieser Gewebe mit Flüssigkeit unter einem gewissen hydrostatischen Druck erfüllt sind. Diese Annahme setzt voraus, daß wir nicht auf straffere Gewebe durchdrücken und ist zunächst nur zulässig für Stellen, an denen Fascien, Muskeln oder Knochen ziemlich tief liegen und das Unterhautgewebe gut entwickelt ist, wie z. B. die Beugeseite des Unterarms dicht unter dem Ellbogengelenk bei nicht zu fettarmen Personen. Es ist klar, daß in Wirklichkeit verschiedene Einflüsse sich geltend machen werden, die den Gegendruck des Gewebes größer erscheinen lassen, als ihn eine mit Flüssigkeit desselben hydrostatischen Druckes gefüllte Blase mit membranöser (also nicht mit Steifigkeit behafteter) Wand ausüben würde. Das sind: Die Steifigkeit der Oberhaut; die harte Unterlage; die Unterteilung in kleinere Hohlräume, wodurch an den Grenzflächen durch Oberflächenwirkung gewissermaßen Häutchen mit den Eigenschaften fester Membranen entstehen; die Verbindung der in der Gewebsflüssig-

keit verteilten Zellen durch fasrige Brücken, die vielleicht nicht immer, aber doch sicher teilweise bei Verschiebung durch Außendruck angespannt werden. Daß das Gewebe von Strängen vielleicht höheren Innendrucks (Gefäßen) durchzogen ist, ist dann ohne Bedeutung, wenn sich auch hinter ihnen Gewebsflüssigkeit befindet, so daß sie ausweichen können. Ebenso ist es — genügende Schlaffheit und Dehnbarkeit der Verbindungsstränge vorausgesetzt — in unserem Schema gleichgültig, daß die Zellen wahrscheinlich wegen ihres Gehaltes an gequollenen Kolloiden einen viel höheren hydrostatischen Innendruck haben als die umspülende Lymphe.

Wir denken uns das Gewebe also vorläufig etwa so aufgebaut: Ein Hohlraum ist bekleidet mit einer Hülle von gewisser Steifigkeit (Haut). Darin liegen zahlreiche kleine Gebilde, durch nicht oder nur wenig gespannte dehnbare Brücken verbunden, unbekannten, aber hohen Innendrucks (Zellen, Fasern verschiedener Art). Zwischen ihnen bleiben zahlreiche kleine Hohlräume, die größtenteils miteinander in Verbindung stehen, erfüllt mit einer praktisch ruhenden Flüssigkeit, die unter dem zu messenden hydrostatischen Druck steht. Die vertikale Ausdehnung jedes Systems kommunizierender Hohlräume wird als so klein vorausgesetzt, daß die Zunahme des hydrostatischen Drucks nach der Tiefe hin, die durch die Schwere verursacht ist, gegen den Gesamtdruck vernachlässigt werden kann.

Alle die oben angeführten Umstände bewirken, daß die Hülle sich schwerer wird eindrücken lassen als bei dem Idealmodell, der Blase mit membranöser Hülle. Die Resistenz des Gewebes wird also größer erscheinen, als sie infolge des Gewebsdruckes eigentlich sein müßte. Man wird also bei jedem elastizitätsmessenden Verfahren zunächst nur einen oberen Grenzwert des Gewebsdruckes bestimmen. Nimmt man aber an, wie es wohl zulässig ist, daß die Fälschung hauptsächlich von der Steifigkeit der Oberhaut herrührt, so wird man durch Vergleich mit einem Modell, das eine Hülle *noch größerer Steifigkeit* hat, auch einen unteren Grenzwert finden. Dieses Verfahren, das weiter unten noch erläutert wird, haben wir hier angewendet.

Methodik.

Die meisten Versuche wurden am Unterarm gesunder männlicher und weiblicher Personen im Alter von 20—30 Jahren angestellt. Der Arm wurde möglichst zwanglos in Supination auf ein niedriges Tischchen gelegt und zunächst an der weichsten Stelle, einige Zentimeter distal von der Ellbeuge, mit einem ebenen Metallplättchen, das oben eine kleine Spitze trug, versehen. Dieses wurde durch Mastisol oder durch ein durchlöcherntes Kautschukpflaster befestigt. Später wurde der Druckkörper anders angeordnet. Siehe darüber S. 157. Dicht über der Spitze schwebte, an einer kleinen weichen Spiralfeder hängend, ein Stahlhämmerchen mit polierter Unterfläche an einem wagerechten, um eine gleichfalls wagerechte Achse drehbaren Stiel. Plättchen und Hammer bildeten zusammen

mit zwei Akkumulatoren, einem Widerstand und einem Milliampereometer einen Stromkreis. Der Zeiger des letztgenannten Instrumentes wurde etwas beschwert, um die Schwingungsdauer zu verlängern und so die Ablesung der kurzen Ausschläge zu erleichtern. Die Konstanten des Hammers wurden mehrfach geändert; zuletzt hatte er einen zylindrischen Kopf von 12,5 mm Dicke, 17 mm Höhe und 13,5 g Gewicht, einen Holzstiel von 165 mm Länge, der über den Drehpunkt um 90 mm verlängert war und in 50 mm Abstand von der Achse ein Gegengewicht von 39,4 g trug. Sein Trägheitsmoment betrug 4700 g cm^2 , seine Endgeschwindigkeit, wenn er bis zu einem Anschlag gehoben und dann auf das Plättchen fallen gelassen wurde, etwa 30–50 cm/sec.

Die ersten Versuche ergaben sehr ungleichmäßige Zeigerausschläge. Das lag einerseits an dem schlechten Sitz des ebenen Plättchens auf der leicht gewölbten Armfläche, andererseits an der zu großen getroffenen Masse (Plättchen + bewegter Gewebeteil) im Vergleich zu der Hammermasse. Es machte den Eindruck, als ob der Hammer sich nach der ersten Berührung wieder von der getroffenen Spitze trennte, um sie dann etwas später wieder einzuholen. Bei den *Springerschen* Ver-

Abb. 1. Ballistisches Elastometer für wagerechte Flächen. *H* metallener Hammerkopf, *G*₁ Gegengewicht, *Pl* Zelluloidplättchen, oben darauf eine Metallspitze, *G*₂ Gegengewicht, an sehr leichtem Rahmen, *A* Achse, um die sowohl der Hammer, als der das Plättchen tragende Rahmen drehbar sind. *F* Feder, die den Hammerstiel wagerecht hält. *B* Anschlag, um immer dieselbe Fallhöhe zu sichern. — *H* und *Pl* sind durch biegsame Drähte, die zuerst bis in die Nähe der Achse geführt sind, mit einer Stromquelle und einem Meßinstrument verbunden.

suchen konnte das Trägheitsmoment und die Fallgeschwindigkeit des Hammers viel größer bemessen werden, und wahrscheinlich war das der Grund der viel gleichmäßigeren Resultate gewesen.

Nach vielen Versuchen verließen wir die Plättchenmethode ganz und gingen dazu über, die Haut mit feinen Netzen aus Kupferdraht (von 0,09 mm Durchmesser) oder Silberbändern (sog. Plätt, $0,01 \times 1 \text{ mm}$ stark) zu belegen. Diese wurden mit einem Stoffrand umgeben und dieser durch Binden oder Kleben am Arm befestigt. Das konnte nur mit einer gewissen Spannung geschehen, wodurch die Steifigkeit der Oberhaut in unerwünschter Weise vermehrt wurde. Der Hammer wurde bei diesen Versuchen unten leicht abgerundet. Wir möchten die Netz-methode, jedoch nur mit Kupferdraht, nicht mit dem zur Wellenbildung neigenden Plätt, bei ziemlich resistenten Objekten für entwicklungsfähig halten.

Schließlich fanden wir ein weit vollkommeneres Verfahren (siehe die Abbildung). Es wurde ein leichter, aber starrer Hebel aus durch Leisten verstärktem Papier angefertigt, ebenso lang wie der Hammerstiel und um dieselbe Achse, aber unabhängig von ihm, drehbar. Er trug genau unter der ebenen Hammerfläche ein Zelluloidplättchen von der Form einer Kugelkalotte (Kugelradius 6,5 mm, Durchmesser der oberen ebenen Fläche 12 mm, Höhe etwa 3 mm). Auf dieser letzteren war eine kleine Messingspitze befestigt, die für den elektrischen Kontakt mit dem

Hammer sorgte. Das Plättchen wurde mit seiner Rundung auf die zu untersuchende Stelle gelegt und durch ein jenseits der Achse angebrachtes Gegengewicht der Auflagedruck beinahe auf Null herabgebracht. Durch die gemeinsame Drehungsachse war nun genau zentrisches Auftreffen des Hammers gesichert, durch die rundliche Form gleichförmige Auflage und Berührung mit der Haut. Die Zeigerausschläge blieben jetzt bei ungeänderten Versuchsbedingungen bis auf 1—2% konstant.

Versuche.

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Plättchen wurde auf die zu untersuchende Körperstelle, wie schon erwähnt, meistens die Beugeseite des Unterarms, einige Zentimeter von der Ellbeuge entfernt, gelegt, wo es dank des Gegengewichtes ohne merklichen Druck ruhte. Von dem Augenblick an, wo der fallende Hammer aufschlug, bildete er mit dem Plättchen zusammen gewissermaßen eine zusammenhängende Masse, die sich mit einer gewissen Geschwindigkeit im Sinne des Hammerfalls bewegte. Sie hatte dabei den mit zunehmender Tiefe des Eindrucks wachsenden Gegendruck des deformierten Gewebes zu überwinden, bis ihre lebendige Kraft erschöpft war und die Rückbewegung einsetzte. Nach einiger Zeit — bei vollkommener Symmetrie der Vor- und Rückbewegung dann, wenn das Gewebe wieder in Normalstellung kommt — werden sich Hammer und Plättchen trennen und der elektrische Kontakt ist unterbrochen. Das schwere System Hammer + Plättchen + bewegter Gewebeteil macht also, schematisch betrachtet, eine Halbschwingung.

In einem Teil der Versuche beschäftigten wir uns mit der Frage, wie die Resistenz des Gewebes von der Blutfülle und dem Blutdruck abhängt, ohne zunächst den absoluten Werten der abgelesenen Zahlen Beachtung zu schenken. Die Blutfülle des Armes änderten wir in zweierlei Weise, nämlich durch mehr oder weniger starkes Abschnüren der Oberarmvenen (*Biersche Stauung*), und durch vollständiges Abschnüren aller Oberarmgefäße nach vorherigem Hochhalten und Ausdrücken des Armes (*Esmarchsche Blutleere*).

Wir möchten noch einmal darauf aufmerksam machen, daß je „härter“ das Gewebe, desto kürzer die Stoßzeit, also desto kleiner die Zahlen.

Es wurden 9 Versuchspersonen untersucht.

Stauung. Die Versuche verliefen ganz gleichartig, und wir können uns deshalb auf Beispiele beschränken.

Starke Stauung. Herr J. E., 27 Jahre alt, mittleres Fettpolster. Linker Unterarm Beugeseite $3\frac{1}{2}$ cm von der Ellbeuge. Ellbogen im Winkel von 150° gebeugt.

Ungestaut 145 Skalenteile. Anlegen der Binde. Nach 2 Minuten 145, nach 5 Minuten 120—110, nach 8 Minuten 90. Armumfang um

1 cm vergrößert. Abnahme der Binde. Starke Hyperämie, starke Rötung. Nach 2 Minuten 150.

Schwache Stauung. Fr. E. P., 29 Jahre alt, mittleres Fettpolster. Dieselbe Stelle wie oben. Ungestaut 220. Nach Anlegung der Binde allmähliche Verkleinerung der Zahlen. Nach 30 Minuten 180. Nach Abnahme der Binde 220—230.

Wir können unsere Beobachtungen so zusammenfassen: Sehr bald nach Anlegung der Stauungsbinde beginnt die Resistenz zu steigen, zuerst ganz langsam, so daß nach 2 Minuten nur eine kleine Veränderung zu bemerken ist, dann rascher. Von der 10. bis zur 30. Minute kaum eine Veränderung. Nach Abnahme der Binde Erreichung des Normalzustandes in etwa 2 Minuten. Manchmal, so auch in den obigen Beispielen, geht dann die Resistenz unter den Normalwert hinunter, aber nur so wenig, daß wir zweifelhaft sind, ob hier nicht Zufälligkeiten im Spiele sind.

Daß die absoluten Zahlen in obigen Beispielen differierten, lag daran, daß die elektrischen Widerstände im Kreise nicht dieselben waren.

Blutleere. Auch hier können wir uns der großen Gleichartigkeit der Ergebnisse wegen auf die Mitteilung von Beispielen beschränken.

Fr. H. v. P., 27 Jahre alt. Gutes Fettpolster. Linker Arm Beuge-seite $3\frac{1}{2}$ cm von der Ellbeuge. Unterarmumfang 24 cm. Vor Abschnürung 154 Skalenteile. Nach Abschnürung, in Abständen von 1 Minute gemessen: 150, 150, 154, 156, 158, 158. Nach 10 Minuten 158. Abnahme der Binde, reaktive Hyperämie. Nach je $\frac{1}{2}$ Minute gemessen: 158, 158, 158, 154, 152, 152, 154, 154, 154.

Herr J. E., 27 Jahre alt, mittleres Fettpolster. Untersuchte Stelle wie vorher. Normalwert 145. Nach Abschnüren nach 1 Minute: 140, 2 Minuten 145, 3 Minuten 150, 5 Minuten 152, 7 Minuten 154, 8 Minuten 152. Abnahme der Binde, reaktive Hyperämie: Nach je 1 Minute 150, 148, 148, 145.

Wir können die Beobachtungen bei Blutleere so zusammenfassen: Gleich nach dem Anlegen der Binde entweder noch keine Veränderung der Resistenz oder eine kleine Vermehrung. Dann innerhalb 5 Minuten eine geringe Verminderung, sodann längere Zeit Konstanz. Nach Wiederherstellung des Blutumlaufes in 3—5 Minuten Erreichung des status quo ante, manchmal in der Zeit des „Kribbelns“ von vorübergehender Erhärtung unterbrochen.

Was den Grund für diese Schwankungen der Resistenz anbetrifft, so werden wir zunächst an Veränderungen des Capillardrucks denken. Dieser geht nach der Stauung, wenn der Widerstand in den Venen vermehrt ist, zweifellos sehr schnell in die Höhe. Die Resistenz bewegt sich in derselben Richtung, aber mit deutlicher Latenz; erst nach 2 Minuten beginnt sie zu steigen, um sich dann noch bis zur 10. Minute in demselben Sinne zu verändern.

Nach Abnahme der Binde dauert es auch 1—2 Minuten, ehe die alten Werte wieder erreicht sind. Vielleicht ist die oben erwähnte, nach Wiedereintritt der normalen Strömungsverhältnisse manchmal zu beobachtende kurze „Erweichung“ auf die vorausgegangene durch die Stauung hervorgerufene Dehnung der Haut zu beziehen, wodurch diese schlaffer und leichter eindrückbar geworden ist (elastische Nachwirkung).

Im blutleeren Arm ist der Capillardruck vermindert; jedoch erst nach einigen Minuten sinkt die Resistenz. Umgekehrt bei Abnahme der Binde. Daß in der Zeit der sensiblen Reizung (sofort nach Abschnürung, sowie in der Zeit der Hyperämie) die Resistenz manchmal für kurze Zeit zuzunehmen scheint, liegt wohl daran, daß nach den *Springerschen* Versuchen die *Muskeln* resistenter werden, wenn sensible Nerven gereizt sind. Denn wenn unser Hämmerchen auch nur wenig in das Gewebe eindringt, so wird sich eine stärkere Veränderung in den elastischen Konstanten der Unterlage und der Nachbarschaft doch geltend machen müssen.

Wir möchten noch bemerken, daß die *Stauung* bei einem 65jährigen Arteriosklerotiker die Resistenz in dem oben geschilderten Sinne veränderte, daß aber bei *Anämisierung* und nach Wiedereutritt des Blutes die Elastometerzahlen nur sehr wenig schwankten.

Hautspannung. Wie schon oben erwähnt, muß man annehmen, daß außer dem hydrostatischen Innendruck auch die Beschaffenheit der obersten Schicht die Resistenz des Gewebes beeinflussen wird. In demselben Sinne sprachen die oben erwähnten Erfahrungen über die Nachwirkung der Stauung. Wir haben nun die Hautspannung dadurch verändert, daß wir den Ellbogen in verschiedenem Winkel beugen ließen, wobei die untersuchte Stelle immer die oben beschriebene war (Beugeseite des Unterarms, 3—4 cm vom Ellbogengelenk). Wie erwartet, wuchs die Resistenz mit zunehmender Streckung.

Beispiel: Frl. M. Sch., 30 Jahre alt, mittleres Fettpolster. Arm zuerst gestreckt, dann immer mehr bis zu 90° gebeugt. Elastometerzahlen: 160, 180, 210, 220.

In den obigen Versuchen betrug der Ellbogenwinkel immer 110 bis 150° und wurde in jedem einzelnen konstant gehalten.

Verschiedene Körperstellen. In dieser Beziehung verfügen wir nur über wenige Erfahrungen, weil die Entkleidung unserer Versuchspersonen äußerer Umstände halber sich nicht durchführen ließ und die leicht zugänglichen Körperstellen sich wegen geringer Dicke des Unterhautgewebes zur Untersuchung schlecht eignen. Die Elastometerzahlen scheinen an der üblichen Stelle des Armes und am Beine in der Gegend des Fibulaköpfchens ungefähr die gleichen zu sein. Ebenso fanden wir an den Wangen und am Ohrläppchen fast dieselben Werte.

Absolute Eichung des Elastometers. Wie schon oben erwähnt, kam es uns hauptsächlich darauf an, den hydrostatischen Innendruck des Gewebes zu ermitteln. Wir verfahren dabei zuerst folgendermaßen: Eine *Recklinghausensche* Manschette, wie sie zur Bestimmung des menschlichen Blutdrucks dient, wurde mit einem Gebläse und einem Manometer verbunden und bei wechselndem Innendruck mit dem Elastometer untersucht. Hier nahm natürlich die Resistenz mit vermindertem Innendruck ab, jedoch war sie selbst bei dem mit nur 2 mm Quecksilberdruck aufgeblasenen Luftkissen immer noch größer als beim Arm. Das heißt also, der Arm verhielt sich nach diesen Versuchen als ob er einen Gewebsdruck von weniger als 2 mm Hg hätte. Das ist sehr unwahrscheinlich.

Zweifelloos kam das daher, daß das Kissen eine sehr steife Hülle hatte (Gummi von mehr als 1 mm Dicke). Die menschliche Oberhaut erwies sich beim Abheben einer Falte als viel biegsamer und dehnbarer. Deshalb fertigten wir dünnwandigere Modelle an, ohne aber rechten Erfolg zu haben. Kollodiumbeutel und Säcke aus Goldschlägerhaut (Peritoneum) hielten nicht dicht oder bekamen Brüche und Falten und ließen deshalb die notwendige Konstanz vermissen. Schließlich fanden wir, angeregt durch eine Bemerkung von Herrn Dr. *Freise*, das geeignete Material in den frischen Lungen gesunder Katzen und Kaninchen, die geeignet gelagert und aufgeblasen sehr konstante Resultate lieferten. Sie mußten unter etwa 20 mm Hg Innendruck gesetzt werden, um dieselbe Resistenz zu zeigen wie das normale Unterarmgewebe. Den Maximalwerten (stärkste Stauung) entsprachen etwa 35 mm Hg.

Nun ist aber die Pleura viel zarter als die Oberhaut, und man darf aus diesen Versuchen nicht schließen, daß der Arm einen Innendruck von 20 mm Hg habe. Seine Resistenz rührt her von der Steifigkeit der Haut und dem Innendruck, die der Lunge praktisch nur vom Innendruck. Deshalb müssen wir 20 mm Hg als den oberen Grenzwert betrachten, während 2 mm Hg (Luftkissen mit sehr steifer Umhüllung) einen unteren Grenzwert darstellt. Wir werden wohl nicht fehlgehen, wenigstens nicht in der Größenordnung, wenn wir den Innendruck an der von uns gemessenen Stelle zu etwa 10 mm Hg ansetzen und weiter folgern, daß er bei stärkster Stauung um mindestens den gleichen Betrag steigen kann.

Unsere Versuche, diese Schlüsse durch Herstellung von besseren Eichmodellen mit einer Umhüllung, die in bezug auf Steifheit und Elastizität etwa der Haut entspräche, zu erhärten, scheiterten. Klopft man auf wassergefüllte Gummibeutel, so geraten sie in Eigenschwingungen, deren Periodenlänge außer von der Spannung der Wand auch von der bewegten Masse abhängt. Die Stoßzeit ist also hier kein brauchbares Maß des Innendrucks. Füllt man sie aber mit Luft, so folgt ihre De-

formation ganz anderen Gesetzen als tierisches Gewebe: bei lokalem Druck werden die benachbarten Teile der Hülle sich weniger hervorzubuchten haben, weil der Inhalt kompressibel ist¹⁾.

Besprechung der Ergebnisse.

Wir sind auf Grund der beschriebenen Versuche zu dem Schlusse gekommen, daß der hydrostatische Innendruck des Unterhautgewebes am Unterarm unter normalen Verhältnissen etwa 10 mm Hg beträgt (mit einer Unsicherheit von einigen Millimetern nach unten und oben), und es hat sich weiter gezeigt, daß er bei venöser Stauung ansteigt (bis auf mehr als das Doppelte), jedoch mit deutlicher Latenz, um nach Wiederherstellung des normalen Blutlaufes wieder in wenigen Minuten auf die Norm zu sinken. Im blutleeren Arm sinkt er ein wenig und erreicht nach Abnahme der Binde wieder seinen Normalwert; auch hier vergeht eine meßbare Zeit bis zur Erreichung des Gleichgewichts.

Das spricht dafür, daß wir es hier tatsächlich mit dem Gewebsdruck und nicht mit dem Druck in den Gefäßen zu tun haben. Steigt der Druck in den kleinsten Gefäßen, denen wir Wasserdurchlässigkeit zuschreiben, so wird Wasser in die Gewebsspalten gepreßt, wodurch auch der Gewebsdruck wächst. Umgekehrt ist es bei Herabsetzung des Gefäßdruckes, und diese Vorgänge werden Zeit erfordern.

Wenn wir uns nach direkten Messungen des Gewebsdruckes früherer Autoren umsehen, so ist die Ausbeute nur sehr gering. *Landerer*²⁾ hat Hohlnadeln unter die Haut geführt, sie mit einem mit Kochsalzlösung gefüllten Steigrohr verbunden und denjenigen Außendruck aufgesucht, bei dem Flüssigkeit weder aus- noch einströmte. Er fand im Unterhautzellgewebe des Beines eines gesunden Menschen 55 cm Wasser gleich 40 mm Hg, und gibt weiter an, daß die Zahlen bei Stauung steigen, bei Blutleere sinken. *Landerers* Wert ist also mehrfach größer als der unsrige, jedoch mit einer ziemlich rohen Methode und an einer anderen Körperstelle gewonnen.

*L. Hill*³⁾ hat in neuester Zeit dasselbe Verfahren angewandt, es aber insofern verfeinert, als er im Rohre eine kleine Luftblase als Index anbrachte. Er fand nur einige Millimeter Hg.

¹⁾ Denselben Einwand könnte man gegen die Verwendung der Lunge als Eichmodell erheben. Jedoch liegen hier wegen der Unterteilung in kleinste Hohlräume, in denen die Luft bei plötzlichen Stößen sozusagen kleben bleibt, die Verhältnisse wohl ähnlich wie im flüssigkeitsdurchtränkten Gewebe. Für den tastenden Finger hat die aufgeblasene Lunge große Ähnlichkeit mit straffem Gewebe, eine luft-erfüllte Blase aber nicht.

²⁾ *A. Landerer*, Die Gewebsspannung in ihrem Einfluß auf die örtliche Blut- und Lymphbewegung. Leipzig 1884.

³⁾ *L. Hill* und *J. M. McQueen*, The measurement of capillary bloodpressure in man. Brit. journ. of exp. pathol. **2**, 1. 1921. — *L. Hill*, Blood vessels and pressure. The Lancet 1920, S. 359.

Das Einstichverfahren läßt den Einwand zu, daß vielleicht größere Abflußwege der Lymphe eröffnet werden, in denen natürlich der Druck niedriger ist als in den engen Zellspalten, von deren hydrostatischem Druck ihrer großen Anzahl und Ausdehnung wegen der von außen meßbare Gewebsdruck in erster Linie abhängen wird. Wenn man dies annimmt, so harmonisiert unser Wert gut mit dem *Hills*chen.

Nun kann man den Gewebsdruck aus dem Capillardruck schätzen, wenn man sich auf den Boden einer physikalisch-chemischen Lymphbildungstheorie stellt. Leider herrscht aber über den Betrag des Capillardrucks sehr wenig Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Forschern. Wir können uns die genauere Erörterung dieser Frage ersparen, weil *R. Tigerstedt* in jüngster Zeit darüber ausführlich berichtet hat¹⁾.

Es sind im wesentlichen 2 Methoden verwendet worden, die Druck- und die Ausflußmethode. Bei ersterer wurde auf eine Hautstelle gedrückt, bis sich eine Farbenveränderung zeigte; bei der zweiten wurde die Haut verletzt und ein Flüssigkeitsgegendruck angebracht, der die Blutung gerade aufhören ließ. Methode 1 gibt hohe Werte (bis zu 40 mm Hg), wenn man bis zur vollständigen Erblassung drückt (*N. v. Kries* und spätere Autoren), niedrige (wenige Millimeter Hg), wenn man sich mit der ersten Abnahme der Rötung begnügt [*Basler*²⁾]. Im ersten Fall jedoch komprimiert man, wie besonders *L. Hill*³⁾ in neuester Zeit ausgeführt hat, zuerst die kleinen Gefäße niedrigsten Innendrucks, also die kleinen Venen. Dadurch steigt der Blutdruck auf den der Stelle, wo die nächsten Kollateralen abgehen, also auf den Arterioldruck, und wenn man weiter bis zur völligen Erblassung drückt, findet man zu hohe Werte. *Hill* glaubt diesen Fehler durch so schnelle Kompression, daß der Druckanstieg sich nicht ausbilden kann, vermeiden zu können und benutzt dazu einen Wasserstrahl; er begeht aber den Fehler, den Druck, den dieser beim Anprall gegen das Gewebe ausübt, gleich demjenigen zu setzen, den eine ruhende Wassersäule gleicher Steighöhe ausüben würde, während er mindestens doppelt so hoch ist⁴⁾. Deshalb

¹⁾ *R. Tigerstedt*, Die Strömung des Blutes in den Capillaren und Venen. *Ergebn. d. Physiol.*, herausgeg. von L. Asher und M. Spiro, 18. Jahrg., 1. 1920.

²⁾ *A. Basler*, Untersuchungen über den Druck in den kleinsten Blutgefäßen der menschlichen Haut. I—III. *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* **147**, 393. 1912; **157**, 345. 1914; **171**, 389. 1919.

³⁾ A. a. O.

⁴⁾ Siehe *A. Föppl*, Vorles. üb. techn. Mechanik, 6. Aufl., 1920, S. 375. Wenn ein Wasserstrahl senkrecht gegen eine Wand prallt, so ist unter der Annahme, daß die Wasserteilchen senkrecht zu der Strahlachse ausweichen, der hydrodynamische Druck gegen die Wand doppelt so groß, wie der hydrostatische Druck gegen diese Wand wäre, wenn sie so gegen das Gefäß hin verschoben würde, daß sie die Ausflußöffnung vollständig abspernte. In Wirklichkeit wird ein Teil des Wassers zurückprallen, wodurch der Stoßdruck noch vermehrt wird.

sind die niedrigen *Hillschen* Werte (10 mm Hg und weniger) nicht vertrauenswürdig.

Begnügt man sich mit der ersten Verfärbung der Haut, so läßt sich dagegen sagen, daß ein elastisches Rohr, das unter einem gewissen Innendruck steht, sich schon bei der geringsten Vermehrung des Außendrucks verengen muß, und daß deshalb die *Baslerschen* Werte wahrscheinlich zu niedrig sind.

Setzt man eine Hautwunde, so wird man Arterien, Capillaren und Venen eröffnen. Ob alle 3 Gefäßarten offen und durchgängig bleiben, ist sehr fraglich, es ist immerhin möglich, daß die Arterien wegen ihrer Enge und ihrer Muskulatur, die Capillaren wegen ihrer Enge sich schnell verstopfen, und daß man deshalb nur den Venendruck mißt.

Die Frage des normalen mittleren Capillardrucks ist also noch ungeklärt, und man kann nur soviel sagen, daß er zwischen 40 und einigen Millimetern Hg liegen wird. Da nach den Versuchen von *Moritz* und *v. Tabora*¹⁾ der Druck in den Armvenen etwa 4 mm Hg beträgt, wird man den mittleren Capillardruck des Armes bei Haltung in Herzhöhe unseres Erachtens auf 20—30 mm Hg schätzen können.

Was nun die Beziehungen zwischen Capillar- und Gewebsdruck anbetrifft, so hat darüber schon vor längerer Zeit *Starling*²⁾ eine plausible Theorie aufgestellt, die in letzter Zeit von *Bayliss*³⁾ wieder aufgenommen worden ist. Er nimmt an, daß die Wand der kleinsten Gefäße für Wasser und Salze durchgängig, für Kolloide undurchgängig ist. Dann muß sich zwischen Blut und Lymphe ein Gleichgewichtszustand einstellen: Wie in einem Osmometer Gleichgewicht besteht, wenn der innere hydrostatische Druck minus dem inneren osmotischen Druck gleich dem äußeren hydrostatischen minus dem äußeren osmotischen Druck ist, so auch hier. Wir haben also: innerer hydrostatischer Druck h minus dem inneren krystalloidosmotischen Druck kr minus dem inneren kolloidosmotischen ko muß gleich sein dem äußeren hydrostatischen H minus dem äußeren krystalloidosmotischen Kr minus dem äußeren kolloidosmotischen Druck Ko ; $h - kr - ko = H - Kr - Ko$. Nun ist aber der Druck der Krystalloide innen und außen gleich, weil die Gefäße dafür durchgängig sind, also $kr = Kr$. Das gibt $h - ko = H - Ko$ oder $H = h - (ko - Ko)$. Setzen wir den kolloidosmotischen Druck ko des Blutes gleich 32 mm Hg, den der Lymphe halb so groß, also 16 mm,

¹⁾ *F. Moritz* und *D. von Tabora*, Die exakte Venendruckbestimmung beim Menschen. Verhandl. d. Kongr. f. inn. Med. **26**, 378. 1909. Dtsch. Arch. f. klin. Med. **98**, 475. 1910.

²⁾ *E. H. Starling*, On the absorption of fluids from the connective tissue spaces. Journ. of physiol. **19**, 321. 1896.

³⁾ *W. M. Bayliss*, The action of gum acacia on the circulation. Journ. of pharm. and exp. ther. **15**, 29. 1920. — Siehe auch die klare Darstellung im Lehrbuch von *M. v. Frey*, Vorlesungen über Physiologie, 3. Aufl., 1920, S. 89.

so ist $ko - Ko = 16$ mm. Die letzte Gleichung heißt also in Worten: *Der Gewebsdruck muß um 16 mm Hg niedriger sein als der hydrostatische Druck an der Stelle des Gefäßsystems, an der weder Wasser in die Gewebe hinaustritt noch umgekehrt.* Diesen Neutralpunkt werden wir in die Capillaren verlegen dürfen.

Vergleichen wir dieses Ergebnis mit unseren Messungsergebnissen, so erhalten wir eine sehr befriedigende Übereinstimmung. Wir haben den-Capillardruck gleich 20—30 mm Hg gesetzt und für den Gewebs-Druck etwa 10 mm Hg gefunden. Auch die Erhöhung des letzteren bei Stauung, seine Erniedrigung bei Blutleere fügt sich gut in dies Schema.

Allerdings ist kürzlich eine Arbeit von *Ellinger* und *Heymann*¹⁾ erschienen, die dieser Berechnungsart den Boden zu entziehen scheint²⁾. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß die Blutkolloide außer ihrem osmotischen noch einen mehr als eine Atmosphäre betragenden Quellungsdruck haben. Es würde dann in unserer Gleichung $H = h - (ko - Ko)$ auf der rechten Seite ein negatives Glied stehen, das gleich der Differenz der Quellungsdrücke im Blut und in der Lymphe, also etwa gleich einer halben Atmosphäre, wäre. Dann verliert die Gleichung ihren Sinn. Das *Starling-Bayliss*sche Schema wäre dann auf die Lymphbildung nicht anwendbar, und die Übereinstimmung unserer Messungsergebnisse mit den daraus errechneten müßte als zufällig gelten. Das würde aber unseres Erachtens den Wert unserer Befunde nicht beeinträchtigen.

Zusammenfassung.

Der elastische Widerstand der lockeren Gewebe gegen kurzdauernden Druck hängt in erster Linie ab von dem hydrostatischen Druck der Zwischenzellenflüssigkeit, in zweiter von der Beschaffenheit, insbesondere der Steifheit und Spannung, der obersten Schicht. Es wird eine Vorrichtung beschrieben, um die Druckelastizität (Resistenz) der Körperoberfläche zu messen. Das Prinzip derselben ist von *Gildemeister* schon früher angegeben worden: auf der Haut wird ein ganz oder teilweise elektrisch leitendes, mit einer Stromquelle und einem Meßinstrument verbundenes Plättchen befestigt. Darauf wird mit einem leichten metallischen gleichfalls in den Stromkreis eingeschalteten Hämmerchen geklopft. Je größer der elastische Widerstand, desto kürzer die Berührungszeit („Stoßzeit“), desto kleiner also der Ausschlag des Meßinstruments. Dieses *ballistische Elastometer* wird dadurch verbessert,

¹⁾ *A. Ellinger* und *P. Heymann*, Die treibenden Kräfte für den Flüssigkeitsstrom im Organismus. I. Osmotische Wirkungen und Quellungsdruck der Eiweißkörper. Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmakol. **90**, 336—392. 1921. Hierin auch eine ausführliche Darstellung der *Starling-Bayliss*schen Theorie.

²⁾ Siehe auch die Bedenken von *R. Höber* gegen derartige schematische Betrachtungsweisen. Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe, 4. Aufl., 1914, S. 629.

daß das Druckplättchen nicht mehr auf der Haut befestigt wird, sondern durch ein leichtes Gestänge geführt, ihr nur lose aufruhrt. Damit wird festgestellt, daß die Resistenz des Unterarms sich bei Veränderung der Blutzirkulation in gesetzmäßiger Weise ändert. Legt man eine Binde zu venöser Stauung an, so beginnt die Resistenz sehr bald zu steigen, zuerst ganz langsam, so daß nach 2 Minuten nur eine kleine Veränderung zu bemerken ist, dann rascher. Von der 10. bis zur 30. Minute bei schwacher Stauung kaum eine Veränderung. Nach Abnahme der Binde Erreichung des Normalzustandes in etwa 2 Minuten.

Schnürt man den Arm ganz ab (*Esmarchsche Blutleere*), so laufen Veränderungen umgekehrten Sinnes ab, aber in viel kleinerem Ausmaß.

Die Resistenz geht anscheinend dem Capillardruck parallel. Bemerkenswert ist aber die zeitliche Verzögerung im Betrage von einigen Minuten. Das spricht dafür, daß wir es hier mit einer Wirkung des vom Capillardruck abhängigen Gewebsdruckes zu tun haben.

Außerdem spielt die Hautspannung eine Rolle: Je mehr der Ellbogen gestreckt wird, desto größer erscheint die Resistenz.

Um die absoluten Werte des Gewebsdruckes zu ermitteln, wurde das Elastometer an Modellen (luftgefüllten Gummibeuteln, frischen Lungen von Katzen und Kaninchen) geeicht. Der Gewebsdruck des Unterarms ergibt sich zu etwa 10 mm Hg mit einer Unsicherheit von einigen Millimetern nach oben und unten.

Die einschlägigen unmittelbaren Messungen früherer Autoren weichen zu stark voneinander ab, als daß sie zum Vergleich herangezogen werden könnten.

Nach der *Starling-Bayliss*schen Theorie der Lymphbildung muß der hydrostatische Druck der Lymphe gleich dem Capillardruck sein, vermindert um die Differenz der kolloidosmotischen Drücke im Blut und in der Lymphe. Der letztere Subtrahend beträgt etwa 16 mm Hg.

Die zweite Unbekannte, der Capillardruck, ist noch nicht hinreichend bekannt. Es wird gezeigt, daß sich gegen alle bisher veröffentlichten Messungen Einwände erheben lassen. Die Mehrzahl der Messungen ergibt Werte zwischen 20 und 30 mm Hg. Das würde zu Werten des Gewebsdruckes führen, die mit den unsrigen gut übereinstimmen.

Wir haben uns bisher eingehend nur mit dem Gewebsdruck an Körperstellen beschäftigt, die in Herzhöhe lagen. Einige orientierende Versuche schienen zu zeigen, daß er am Beine von derselben Größenordnung ist. Da so gut wie nichts darüber bekannt ist, wie hoch hier der Capillardruck ist, enthalten wir uns jeder Erörterung darüber, ob das *Starling-Bayliss*sche Schema auch hier zu annehmbaren Werten führt.