

Aus dem Universitätslaboratorium für Physikalische Therapie
in Bologna.

Die Wirkung der Heilgymnastik auf die Blutzirkulation im Lichte der Hydrodynamik.¹⁾

Von Prof. S. Salaghi.

Verschiedene Methoden der physikalischen Therapie haben, obgleich sie nach der Art ihrer Ausführung so sehr voneinander abzuweichen scheinen, eine ähnliche mechanische Beeinflussung der Blutzirkulation miteinander gemein. Sie verursachen nämlich in den Gefäßen jenes Körperteils, wo sie zur Anwendung

¹⁾ Vortrag, gehalten auf Einladung des Vorstandes auf dem IV. Internationalen Kongreß für Physiotherapie. Berlin, 26. bis 30. März 1913.

kommen, mehrfach wiederholte Verengerungen mit nachfolgender Erschlaffung. Augenfällig ist diese Wirkung bei der Massage und bei der Heilgymnastik. Bei dieser letzteren macht sie sich beim Wechsel von Muskelzusammenziehung und Muskeler schlaffung, von Faszienspannung und Faszientenspannung geltend.¹⁾

Jede solche Veränderung des Gefäßlumens setzt sich in eine zentripetal gerichtete Propulsion der Blutsäule um, ein Vorgang, der durch die Konfiguration des Gefäßapparates begünstigt wird. Im Vergleich zum Arteriensystem hat nämlich das Venensystem eine um vieles größere Kapazität, es setzt der Blutströmung einen ganz minimalen Widerstand entgegen und ist überdies an vielen Stellen mit Klappen versehen.

Außer diesen mehr offenkundigen Eigenschaften hat der Gefäßapparat auch noch andere, tieferliegende und erst beim Versuche hervortretende Eigentümlichkeiten, die einer rückläufigen Bewegung des Blutes entgegenwirken. Es sind dies jene Tatsachen, die ich seit dem Jahre 1890 durch Versuche an Organen nachweisen konnte, die vom Körper losgelöst und nach den für die Einleitung der künstlichen Zirkulation üblichen Regeln präpariert waren (1).

Diese Organe wurden in ein Onkometer wasserdicht eingeschlossen, ihre Gefäße kommunizierten mit außen angebrachten graduierten Behältern. Wenn man nach Unterbrechung der Zirkulation auf ihre Oberfläche mittels einer Pumpe eine abwechselnd einsetzende und wieder aussetzende Kompression einwirken ließ, kam man zu folgenden Ergebnissen: Während der Kompression tritt das in jenen enthaltene Blut fast ausschließlich durch die Venen und nur in ganz geringer Menge durch die Arterien aus. Das aus diesen letzteren ausfließende Blutquantum beträgt bei den Extremitäten nur ungefähr $\frac{1}{10}$, bei den Nieren $\frac{1}{10}$, bei der Milz²⁾ $\frac{1}{43}$ des Abflusses aus den Venen.

Bei der Leberarterie konnte aus anatomischen Gründen ein vergleichender Versuch nicht vorgenommen werden.

Dieses große Mißverhältnis in der Abflußmenge gibt gewiß eine Vorstellung von dem so hochgradigen Ueberwiegen der Kapazität des Venensystems gegenüber dem Arteriensystem. Es wirkt jedoch auch noch eine andere, merkwürdige Tatsache mit, nämlich die, daß in den kleinen Gefäßen das durch die äußere Kompression eingepreßte Blut eine rückläufige Bewegung nicht einschlagen kann, sondern nur in zentripetaler Richtung fließt.

Dies erkennt man bei Fortsetzung des Versuches. Wenn man nämlich der Oberflächenkompression die Entlastung folgen läßt, wobei die Organe mit der Wiederaufnahme ihres ursprünglichen Volumens Blut aus den äußeren graduierten Behältern aspirieren, zeigt sich in der Tat, daß dieses durch die Arterien nicht mehr in minimaler Menge, sondern reichlich einströmt, und zwar im Durchschnitt in einer Menge, die ungefähr das 13fache der früher während der Kompression aus den Arterien ausgeströmten Blutmenge beträgt. Das Maximum — das 24,6fache — wird bei der Leberarterie, das Minimum — das 1,44fache — bei der Nierenarterie beobachtet. Das entgegengesetzte Verhalten, jedoch in geringerem Maße, findet bei den Venen statt.

Es setzen also die Blutgefäße — selbstverständlich die kleinen — auch dort, wo keine Klappen vorhanden sind, einer rückläufigen Blutbewegung schon an und für sich einen beträchtlichen Widerstand entgegen. Diese von mir im Jahre 1890 dargelegten Resultate wurden neulich auch von anderen be-

stätigt (2, 3). Schon damals versuchte ich, dafür eine Erklärung zu geben.

Infolge der kontinuierlich nach der gleichen Richtung stattfindenden Blutströmung ist anzunehmen, sagte ich, daß sich die Innenflächen, die Neigungswinkel, die Krümmungen, die Verbreiterungen der Gefäße der konstanten Stromrichtung anpassen mußten, lauter Umstände, die, wenn man wohl überlegt, einer entgegengesetzten Stromrichtung hinderlich wären. Eine analoge Anpassung beobachtet man in größerem Maßstabe bei den Flußufeln.

Es findet also aus verschiedenen Gründen ein Zusammenwirken des vom Herzen ausgehenden Antriebes mit jenen Impulsen statt, die das Blut in den peripherischen Abschnitten des Kreislaufs durch abwechselnde Kompressionen und Entlastungen von Gefäßbezirken erhalten kann. Es ist nach dem Gesagten wohl verständlich, daß die Muskeln durch abwechselnde Kontraktionen und Entspannungen auf das Blut wie ebensoviele Saug- und Druckpumpen einwirken werden. Die systolisch-diastolischen Vorgänge, die auf diese Weise an den Gefäßen stattfinden, sind ausschließlich passiver Natur. Der Einfluß auf die Blutbewegung wäre vielleicht noch größer, wenn nach der Anschauung von Hasebröck (4) während der Muskelaktion an den Gefäßen auch aktive diastolisch-systolische Vorgänge stattfinden würden.

Es findet wohl bei der Fortbewegung des Blutes ein Zusammenwirken zwischen der zentralen und der peripherischen Triebkraft statt, doch besteht zwischen diesen Kräften ein Unterschied, der von der Verschiedenheit des Angriffspunktes auf den Zirkulationsapparat abhängt. Während das Herz das Blut aus den Venen in die Arterien pumpt, treibt die an der Peripherie einsetzende Kraft es aus den Arterien in die Venen und muß infolgedessen die Tendenz haben, den Blutdruck in den Arterien herabzusetzen. Tatsächlich hat bei Tierversuchen die Muskelarbeit fast immer eine Herabsetzung des Blutdruckes zur Folge gehabt (Marey, Kaufmann, Zuntz).

„Charakteristisch ist, daß die Herabsetzung des Blutdruckes so gleich mit Beginn der Arbeit eintritt, während der ganzen Dauer der Arbeit anhält, und daß nach Aufhören der Arbeit die normale Druckhöhe in kurzer Zeit wieder erreicht wird.“

Beim Tierversuch steht die untersuchte Arterie in direkter Verbindung mit dem Manometer, sodaß dabei der Blutstrom keine Störung erleidet. Beim Menschen hingegen verursachen die Sphygmomanometer eine hochgradige Störung der lokalen Zirkulation, indem sie die Arterie abschließen. Da tritt nun ein anderer Faktor mit ins Spiel, dem man Rechnung tragen muß. Durch die Umwandlung der lebendigen Kraft in Druck infolge des durch das Instrument gesetzten Widerstandes entsteht ein kinetischer Druckanteil, der den ursprünglichen Druck lokal erhöht. Wenn die Zirkulation eine Beschleunigung erfährt, z. B. bei Muskelarbeit, wächst dieser Druckanteil in hohem Maße, da bekanntlich die lebendige Kraft mit dem Quadrate der Geschwindigkeit zunimmt. In der Pulskurve fällt nun das Maximum des kinetischen Druckanteiles mit dem Druckmaximum zusammen, sodaß der systolische Druck um vieles höher erscheinen kann, als er es tatsächlich ist.¹⁾

¹⁾ Um bei elastischen Röhren, wie es die Arterien sind, zu erkennen, wie sich bei den herzsystolischen Verstärkungen der Blutströmung die Druckkurve und die Geschwindigkeitskurve zueinander verhalten, haben

wir die Differentialbeziehung: $\frac{\partial p}{\partial t} = Av + B \frac{\partial v}{\partial t}$ In dieser be-

zeichnen $\frac{\partial p}{\partial t}$ und $\frac{\partial v}{\partial t}$ die Differentialquotienten des Druckes p, bzw.

der Geschwindigkeit v in bezug auf die Zeit t. A und B sind Konstante, die vom Durchmesser und der Elastizität des Rohres, von der Reibung und vom spezifischen Gewicht der Flüssigkeit abhängen. Zu der erwähnten Beziehung gelangt man nach Betrachtung der Bewegung einer Flüssigkeit in elastischen Röhren und nach Anwendung der Fourierschen Serie für die periodischen Funktionen. Aus dieser ist ersichtlich, daß das Maximum der Geschwindigkeit um ein Zeitteilchen dem Maximum des Druckes vorangeht. Diese Tatsache wurde auch experimentell bei Tieren gefunden. (Chauveau.) Diese geringe Verzögerung, die beim Druckmaximum zur Beobachtung gelangt, stellt die Zeit dar, welche die lebendige Kraft benötigt, um den Widerständen gegenüber sich in Druck umzuwandeln. Obiger kinetischer Druckanteil, der den gleichen Ursprung hat wie der übrige Druck, wird indessen nicht der Geschwindigkeitskurve, sondern der Druckkurve folgen, sodaß in dem Werte des systolischen Druckes neben dem Maximum des prä-

¹⁾ Damit befaßte ich mich ausführlich a. a. O. (Collezione italiana di lecture sulla Medicina, Serie VIII, N I, 1898, pag. 28. Milano.)

²⁾ Das enorme Mißverhältnis, das in der Milz bei einem auf ihre Oberfläche ausgeübten Druck zwischen der Abflußmenge aus Arterie und Vene beobachtet wird, findet ein Gegenstück in anderen charakteristischen Besonderheiten, die von mir an diesem Organe gefunden wurden. Bei Einleitung der künstlichen Zirkulation nimmt die Intensität der Durchströmung bzw. die Größe des Abflusses aus der Vene in demselben Maße zu, als das Blut mit physiologischer Kochsalzlösung verdünnt wird, um das Maximum bei reiner physiologischer Kochsalzlösung oder vielmehr bei Wasser zu erreichen; ein Verhalten, das bei keinem anderen Körperteile beobachtet wurde. Und beim Wasser nimmt die Durchströmungsintensität so lange noch weiter zu, bis die aus der Vene abfließende Flüssigkeit zum größten Teil die beim Passieren der Gefäße angenommene blutige Färbung wieder verloren hat. Andererseits nimmt, wenn man die Blutkonzentration allmählich steigert, die Intensität der Durchströmung viel früher und viel rascher ab als in den anderen Organen. Kurz, physikalisch verhält sich die Milz gegenüber dem bei der künstlichen Zirkulation veränderten Blut wie ein Filter. (S. Salaghi, Archives italiennes de Biologie. Tome LVIII, Fasc. I, 1912.)

Infolge einer unrichtigen Deutung des Torricellischen Gesetzes $h = \frac{v^2}{2g}$ (5) war man der Ansicht gewesen, daß man bei der klinischen Blutdruckmessung den durch die lebendige Kraft beigetragenen Anteil des Druckes vernachlässigen und daher den erhaltenen Wert als Ausdruck des alleinigen präexistierenden Druckes betrachten könne. Angesichts der bei ruhiger Zirkulation nicht übergroßen Geschwindigkeit der arteriellen Blutströmung ist sicherlich der manometrische Wert der lebendigen Kraft gering. Jedoch hat, wie ich a. a. O. hervorgehoben habe (6), diese Erwägung einem groben Versehen Raum gegeben. Die Torricellische Formel gibt nämlich theoretisch die Höhe jenes Druckes an, den die Volumeinheit der in Bewegung befindlichen Flüssigkeit auf eine Fläche ausüben würde, die ihrem Laufe kein Hindernis entgegengesetzt. Hier ist gerade das Gegenteil der Fall, indem das Messungsverfahren der lokalen Strömung das größte Hindernis in den Weg legt. Da genügt nicht mehr die Torricellische Formel, sondern man muß auch den Phänomenen der Bewegungsstörung Rechnung tragen, die sich auf die stromaufwärts befindlichen Schichten der Flüssigkeitssäule fortpflanzt und beträchtlichere Drucksteigerungen hervorruft.

Die Phänomene der Bewegungsstörung haben erst vor wenigen Jahren durch die Untersuchungen des Ingenieurs Allievi¹⁾ eine praktische und genaue Darstellung erfahren. Sie sind vorwiegend lokaler Natur. In der Ferne verlieren sie sich rasch unter Befolgung von Schwingungsgesetzen nach den Regeln des Stoßes, und sie wiederholen sich bei jeder Wellenbewegung. Eine analoge Erscheinung kommt beim Anschlagen der Meereswellen gegen einen Felsen zustande, und der dabei entwickelte mechanische Effekt nimmt beträchtlich zu, wenn das Meer bewegt bzw. wenn die Geschwindigkeit der Wellenbewegung vergrößert ist. Wenn andererseits die lokalen Widerstände abnehmen, wandelt sich ein Teil des Druckes in lebendige Kraft um und erhöht damit die Strömungsgeschwindigkeit in jenem Gefäßgebiet. Wenn man z. B. nach Anämisierung eines Gefäßgebietes dieses plötzlich dem Blutzuflusse wieder öffnet, wird, da die lokalen Widerstände nun auf ein Minimum reduziert sind, die Geschwindigkeit im ersten Momente um vieles größer erscheinen, als sie es tatsächlich ist.²⁾

Es wäre also unrichtig, wenn man, nach dem Vorschlage von Fellner, auf Grund eines ähnlichen Verfahrens die Zirkulationsgeschwindigkeit bestimmen wollte (7), (8).

Das über die Deutung der Sphygmomanometerwerte Gesagte muß hinsichtlich des Gärtnerschen Tonometers eine Einschränkung erfahren. Bei diesem Instrumente wird ein Teil des kinetischen Druckanteils, der, wie gesagt, beim Arterienverschlusse entstanden ist, durch das Nachfolgen einer entgegengesetzten Erscheinung neutralisiert. Da die Blutwelle bei der allmählichen Öffnung des arteriellen Gefäßlumens in ein anämisiertes Gefäßgebiet einschießt, stößt sie im ersten Moment auf weit geringere Widerstände. Es wandelt sich daher ein Teil des Druckes seinerseits wieder in lebendige Kraft

existierenden Druckes auch noch das Maximum des kinetischen Druckanteils enthalten sein wird, der dem durch das Sphygmomanometer der Blutbewegung gesetzten Hindernisse seine Entstehung verdankt. Die Analyse obiger Differentialbeziehung, die hier aus Raumrücksichten unterblieben ist, wurde a. a. O. in leicht faßlicher und gleich einem beliebigen Rechenexempel gemeinverständlicher Weise dargelegt. (Archives générales de Médecine 1907, Nr. 7.)

¹⁾ Allievi, Revue de Mécanique, janvier et mars 1904. Bei dem durch den vollständigen Abschluß eines Rohres bedingten einfachen Stoß gibt er für den Maximaldruck H die Formel: $H = y_0 + \frac{\alpha v_0}{g}$ an. In dieser bezeichnen y_0 und v_0 den Druck bzw. die Geschwindigkeit vor der Bewegungsstörung, α ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle.

²⁾ Das Verhältnis zwischen der den Gesamtdruck darstellenden Triebkraft des Herzens H , dem Blutdruck in den großen Arterien stromaufwärts der Zirkulationswiderstände p und der lebendigen Kraft $\frac{v^2}{2g}$

wird durch die Formel der Hydrodynamik $H = \alpha p + \beta \frac{v^2}{2g}$ ausgedrückt.

Aus dieser entnimmt man, daß, bei gleichbleibendem Gesamtdruck H mit Zunahme einer der beiden Funktionen die andere abnimmt und umgekehrt. Man muß daran festhalten, daß der Druck jenem Teil der Triebkraft des Herzens entspricht, der zur Ueberwindung der Zirkulationswiderstände aufgebraucht wurde, die lebendige Kraft stellt den anderen Teil derselben dar, der die Blutbewegung besorgt. Die lebendige Kraft, und keineswegs der Druck ist es, der uns über die größere oder geringere Zirkulationsgeschwindigkeit belehrt. Der in den letzten Jahren von Strasburger, v. Recklinghausen u. a. unternommene Versuch, die funktionelle Diagnostik der Zirkulation auf die mittels des Sphygmomanometers erhobenen Blutdruckbefunde aufzubauen, beruhte daher auf irrigen Voraussetzungen. Dies habe ich ausführlich a. a. O. dargelegt. (Rivista critica di Clinica medica, 1908, Nr. 3—4.)

um, und es verringert sich dementsprechend der bei der Messung erhaltene Wert. Im einzelnen Falle wird die erstere oder die letztere Beeinflussung des Druckes überwiegen, wahrscheinlich je nach dem Grade der Beschleunigung des Blutstromes. Winternitz fand bei Muskelarbeit mit dem Gärtner Herabsetzung (9), Grebner und Grünbaum Erhöhung des Blutdruckes (10).

Theoretisch, nach der Lehre der Hydrodynamik, bleibt es indessen festgestellt, daß in den mit den gewöhnlichen Sphygmomanometern erhaltenen Druckwerten ein durch die Anbringung der Instrumente entstandener kinetischer Anteil mit enthalten ist, deren Größe mit dem Variieren der Geschwindigkeit des Blutstromes beträchtlich variiert.

Praktisch wurde diese Tatsache von mir an einem Kreislaufmodell (11) und später am Menschen mit dem von mir angegebenen Sphygmodynamometer (12) bestätigt. Dieses Instrument zeigt zugleich mit dem Blutdruck auch noch die relative Höhe des aus der Umwandlung der lebendigen Kraft stammenden kinetischen Druckanteils an. Es zeigte nun nach mäßiger körperlicher Anstrengung bei Gesunden eine Zunahme des systolischen Druckes an, was mit den Angaben der anderen Beobachter übereinstimmt. Aber gleichzeitig ließ es beinahe eine Verdoppelung des dynamischen Wertes erkennen, ein Zeichen, daß im Druckwerte ein größerer kinetischer Druckanteil enthalten war als bei der vorher im Ruhezustande vorgenommenen Messung, und zwar als Folge der erhöhten Zirkulationsgeschwindigkeit (13). Uebrigens stimmt die Sphygmographenkurve nach Muskelarbeit mit den aus Tierversuchen bekannten Ergebnissen überein.

Zusammenfassung. Obige Ausführungen veranschaulichen die intime Einwirkung mechanischer Prozeduren auf die Zirkulation. Letztere wirken an der Peripherie des Kreislaufs fördernd ein, indem sie das Blut aus den Arterien in die Venen pumpen, also umgekehrt wie das Herz. Sie haben daher die Tendenz, den Druck in den Arterien herabzusetzen; und zwar ist dies keine bloße Vermutung, sondern eine unbestreitbare Tatsache.

Die gewöhnlichen klinischen Sphygmomanometer geben diese Vorgänge unrichtig wieder. Da ihre Werte einen kinetischen Druckanteil mit enthalten, die infolge der Beschleunigung der Zirkulation noch um vieles größer geworden ist, lassen sie den systolischen Druck höher erscheinen, als er tatsächlich ist. Es handelt sich dabei um die lokale Folgeerscheinung einer Bewegungsstörung. Es ergibt sich somit die Erklärung für den Widerspruch zwischen den bei Muskelarbeit im Tierversuch und am gesunden Menschen erhobenen Blutdruckbefunden.

Die vorliegende Studie bietet ein bezeichnendes Beispiel für den Einklang zwischen der Theorie der Hydrodynamik und ihrer praktischen Uebertragung auf die Blutzirkulation. Das über die Muskelarbeit Gesagte gilt ebenso auch für die anderen mechanischen Prozeduren, die, von außen einwirkend, eine analoge zirkulationsbefördernde Wirkung entfalten und die in das Gebiet der Heilgymnastik gehören.

Literatur: 1. S. Salaghi, Gazzetta med. lombarda 1890, Nr. 44. — 2. Cönen und Wiewiörowski, Beiträge zur klinischen Chirurgie 1911, Nr. 1 u. 2. — 3. M. Rothmann, Berliner klinische Wochenschrift 1912, Nr. 21. — 4. Deutsches Archiv für klinische Medizin 1911, Bd. 102, H. 5 u. 6. — 5. H. v. Recklinghausen, Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie 1901, Bd. 46, H. 1 u. 2, S. 118. — 6. Rendiconti della R. Accademia dei Lincei. Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali. Luglio 1912. — 7. Bruno Fellner jun., diese Wochenschrift 1909, Nr. 5. — 8. S. Salaghi, Rivista critica di Clinica medica 1909, Nr. 41. — 9. W. Winternitz, Physiologische Grundlagen der Hydro- und Thermo-therapie, Stuttgart 1906, S. 42. — 10. Zitiert bei M. Herz, Lehrbuch der Heilgymnastik 1903, S. 351. — 11. S. Salaghi, Archives générales de Médecine 1906, Nr. 40. — 12. Derselbe, Il Policlinico, Sezione med., 1909, Nr. 3. Das Instrument wird von O. Marzocchi, Mechaniker des Physiologischen Instituts an der königl. Universität Bologna, Via Irnerio 2, geliefert. — 13. Derselbe, Bullettino delle scienze mediche 1909, Nr. 4.