Einige Demostrationen mit Randbemerkungen über Hämodynamik

Autor(en): **Müller, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie Suisse des Sciences Medicales = Bollettino dell' Accademia Svizzera delle Scienze Mediche**

Band (Jahr): **12 (1956)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-307246

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

D.K. 612.15

Einige Demonstrationen mit Randbemerkungen über Hämodynamik

Von **A. Müller**, Fribourg

Die Hämodynamik im weitesten Sinne stellt wahrscheinlich das meistbearbeitete Gebiet der Physiologie dar. In den letzten 150 Jahren haben sich fast alle Physiologen in irgendeiner Weise mit Kreislaufproblemen beschäftigt. Unser Wissen ist damit stetig vermehrt, aber nicht in entsprechender Weise vertieft worden. Viele wichtige Probleme der Hämodynamik können auch heute nur als teilweise gelöst betrachtet werden. Dies soll an Hand einiger Versuche gezeigt werden.

Wenn wir die Zuleitung (d. i. das zwischen Herz und Kapillaren eingeschaltete Rohrsystem, also das arterielle Gefäßsystem) einer genaueren Analyse unterziehen wollen, können wir unserer Betrachtung mit Nutzen drei Strömungsmodelle zugrunde legen.

1. Modell: Ein dünnwandiger, ovaler Gummiball, der leicht von der Hand umfaßt werden kann, ist mit einer einige Meter langen Stahlröhre starr verbunden. Die Röhre besitzt an ihrem Ende ein erweitertes, ebenfalls starres Ansatzstück, in dem mehrere enge Röhrchen von einigen cm Länge eingesetzt sind. Die ganze Leitung ist mit verdünntem Glycerin gefüllt. Das 2. Modell ist mit dem ersten identisch. Am Eingange, dicht hinter dem Gummiball, befindet sich aber ein Windkessel zwischengeschaltet. (Der Windkessel ist ein im unteren Teile Flüssigkeit, im oberen Teile Luft enthaltendes, abgeschlossenes Gefäß.) Im 3. Modell ist die Stahlröhre durch einen langen, gleichmäßigen und sehr dehnbaren Schlauch ersetzt.

Sucht man die im Gummiball enthaltene Flüssigkeit immer schneller in das Leitungssystem zu pressen, so fühlt die drückende Hand beim ersten Modell einen zunehmenden Widerstand, der der Entleerungsgeschwindigkeit sogar eine Grenze setzt, während im 2. und 3. Modell die Entleerung ohne große Kraftänderung beliebig rasch möglich bleibt. Betrachtet man den Ausfluß, so beobachtet man beim ersten Modell ein Ausspritzen, bei den anderen Modellen ein an- und abschwellendes Ausströmen. Diese Unterschiede beruhen darauf, daß im ersten Modell die

Hand die Gesamtflüssigkeit beschleunigen und den dabei auftretenden Reibungswiderstand überwinden muß, während die gleiche Hand im 2. Modell fast nur die Luft im Windkessel zu komprimieren braucht.

Im 3. Modell liegen die Verhältnisse schwieriger. Sie sehen hier einen mit Flüssigkeit gefüllten, dünnwandigen, gleichmäßigen, 15 m langen Schlauch aus Paragummi mittels einer etwas eigentümlichen Aufhängevorrichtung horizontal gelagert. In diesem Schlauche wird mit Hilfe einer Pumpvorrichtung periodisch eine bestimmte Flüssigkeitsmenge hinein- und hinausgepreßt. Sie können die dadurch entstehende Druckwelle, die über den Schlauch hin gegen das Ende zuwandert, an der Quer- und Längsdehnung des Schlauches mit bloßem Auge beobachten. Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Der Mathematiker *Korteweg* hat das Problem unter bestimmten Annahmen streng gelöst und fand folgendes Ergebnis:

$$c = \sqrt{\frac{E \cdot d}{2r \cdot \varrho}}$$

c bedeutet die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, E den Elastizitätsmodul des Wandmaterials, d die Wanddicke, r den Schlauchradius und ϱ die Dichte der Flüssigkeit. Mißt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit an diesem hier aufgehängten Schlauche, so erhält man einen Wert, der nur wenige % vom theoretischen abweicht, wenn der Druckverlauf harmonisch (streng sinusförmig), die Frequenz niedrig und die Druckamplitude klein ist. Legt man aber den Schlauch auf eine Unterlage, oder steigert man die Frequenz oder die Druckamplitude, dann ändert die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Läßt man einen Wellenzug durch den Schlauch wandern, dann zeigt das Experiment, daß der Wellenkopf mit einer andern Geschwindigkeit wandert als der Wellenberg bzw. das Wellental. Unterhält man im Schlauche eine stationäre Strömung und überlagert dieser Strömung eine Druckwelle, dann wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, je nachdem sie sich mit oder gegen die Strömung fortpflanzt, vergrößert oder verkleinert entsprechend der Formel $c = c_0 \pm kv$ (c_0 bedeutet die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei ruhender Flüssigkeit, v die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, k weicht nicht stark von 1 ab). Letzteres können Sie am folgenden Versuche selbst bestätigen. Ein 10 m langer gleichmäßiger Schlauch besitzt in seiner Mitte einen Seitenast, in dem Druckwellen erzeugt werden können. Im Abstande von 450 cm von der Schlauchmitte befindet sich links und rechts eine Vorrichtung, die bei der Ankunft der Druckwelle ein Lichtsignal auslöst. Wir lassen zuerst eine Druckwelle bei ruhender Flüssigkeit über beide Hälften des Schlauches wandern. Sie sehen, daß die beiden Lam-

pen gleichzeitig aufleuchten. Nun wird im Schlauche eine stationäre Strömung von links nach rechts hergestellt und wiederum eine Druckwelle ausgelöst. Sie sehen sehr deutlich, daß die Lampe rechts vor derjenigen links aufleuchtet.

Ich habe Ihnen den Versuch vordemonstriert, weil dieses Verhalten physikalisch nicht leicht zu verstehen ist. Die *ruhende* Rohrwand bildet ja einen wesentlichen Bestandteil des Wellenleiters. Es ist deshalb auch erst vor ganz kurzer Zeit dem Mathematiker *Morgan* gelungen, diese Erscheinung theoretisch zu deuten.

Wenn nun die Ausbreitung der Druckwellen für «unendlich» lange gerade Leitungen noch nicht völlig geklärt ist, so ist dies erst recht nicht der Fall, wenn wir es mit einem komplizierteren, verzweigten System zu tun haben. Es war deshalb ein großes Wagnis, mit diesen noch mangelhaften Kenntnissen über Schlauchwellen Formeln zur Berechnung des Schlagvolumens aufzustellen, eine Bemerkung, die ich bereits vor 25 Jahren meinem Freunde *Brömser* gegenüber machte, als er seine Schlagvolumenformel bekanntgab.

Wir wollen nun auch den *Reibungswiderstand* genauer untersuchen. Zur Berechnung desselben benützt man die Poiseuillesche Formel, die nach dem Ohmschen Gesetz umgeformt ist $R = \frac{U}{J} = \frac{P}{V} = \frac{8\,\eta\,l}{\pi\,r^4} = W$. W bedeutet den Widerstand, η die Viskosität, l die Länge und r den Radius der Röhre.

Ich zeige Ihnen der Reihe nach drei verschiedene Strömungsarten: 1. Eine Suspension, deren Zusatzteilchen kugel- bzw. scheibchenförmig sind, strömt durch eine gleichmäßige Röhre, deren Durchmesser größer als der Kugel- bzw. Scheibchendurchmesser, aber kleiner als deren doppelter Wert ist. Während die Flüssigkeit ohne Zusatzteilchen in zur Achse parallelen Fäden mit nach der Achse hin zunehmender Geschwindigkeit strömen würde, sehen Sie hier ein gänzlich umgeformtes Strömungsbild. Abb. 1 und 2 zeigen schematisch die Vorrichtung zur Herstellung einer derartigen Strömung. Ermittelt man den Wert für W experimentell, so ergibt sich, daß er nicht konstant bleibt, wie es die Formel verlangt, sondern außer von der Konzentration der suspendierten Substanz von der Teilchenform und dem Verhältnis

$$D = \frac{\text{größte Teilchenlänge}}{\text{Rohrdurchmesser}}$$

abhängt. Diese Strömungsform ist die einfachste, die bei heterogenen Flüssigkeiten auftritt und ist einer mathematischen Behandlung weitgehend zugänglich. Sie entspricht den Strömungsverhältnissen in unseren Kapillaren.

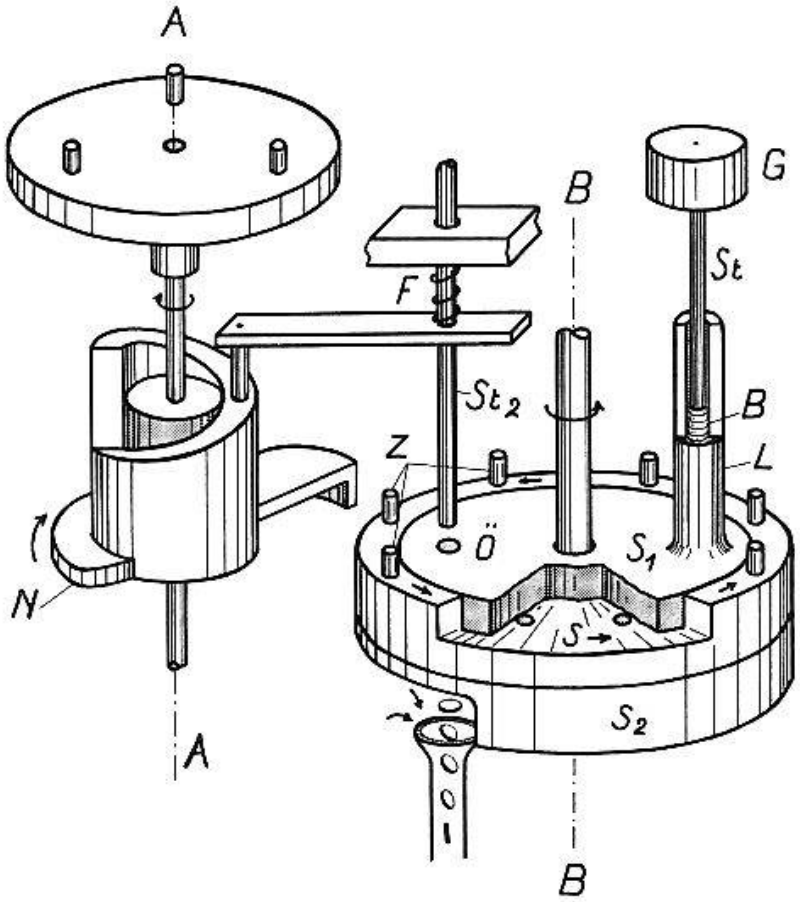

Abb. 1. Scheibchenmaschine. Die Modellscheibchen B werden in das Rohr L eingefüllt und durch den mit dem Gewicht G belasteten Stempel nach unten gedrückt. Zwischen den ruhenden Scheiben S_1 und S_2 befindet sich eine um die Achse B–B drehbare Scheibe S. In die drehbare Scheibe ist ein Kranz von Löchern gebohrt, in welche die Modellscheibchen gerade hineinpassen. Der überhöhte Rand der Scheibe S ist mit einer Anzahl von Zapfen Z versehen. Eine Drehung der Nockenwelle A–A bewirkt dann mit Hilfe der Nocke N eine ruckartige Drehung der Scheibe S, die so berechnet ist, daß dabei jeweils eines der Löcher der Scheibe S unter die Bohrung des Rohres L zu stehen kommt. Auf diese Weise wird ein Modellscheibchen nach dem andern von der Drehscheibe S mitgenommen bis es unter die in die feste Scheibe gebohrte Öffnung Ö zu stehen kommt. In diesem Augenblick stößt der Stöpsel St_2 das betreffende Scheibchen durch ein weiteres Loch in die Scheibe S_2 nach unten, so daß es in die trichterförmige Mündung des Beobachtungsrohres fällt, wo es von der Strömung mitgenommen wird. Die Bewegung des Stöpsels St_2 wird ebenfalls von der Nockenwelle A–A aus gesteuert, wie dies aus der Abbildung ohne weiteres ersichtlich ist.

Beim 2. Versuchsmodell strömt Glycerin, in dem flache Kautschukzylinderchen von 3 mm Durchmesser und 0,8 mm Dicke gleicher Dichte wie das Glycerin suspendiert sind, durch eine Röhre von 15 mm Innendurchmesser. *D* beträgt also $^1/_5$. Beim ersten Versuche mit der Konzentration von 5% bemerken Sie, daß die Teilchen in drei verschiedenen Lagen durch die Röhre strömen (vgl. Abb. 3). Die mit *A* bezeichneten Teilchen wandern mit großer Geschwindigkeit in der Rohrachse, die *B-Teilchen* gleiten sehr langsam der Rohrwand entlang, der größte, mit

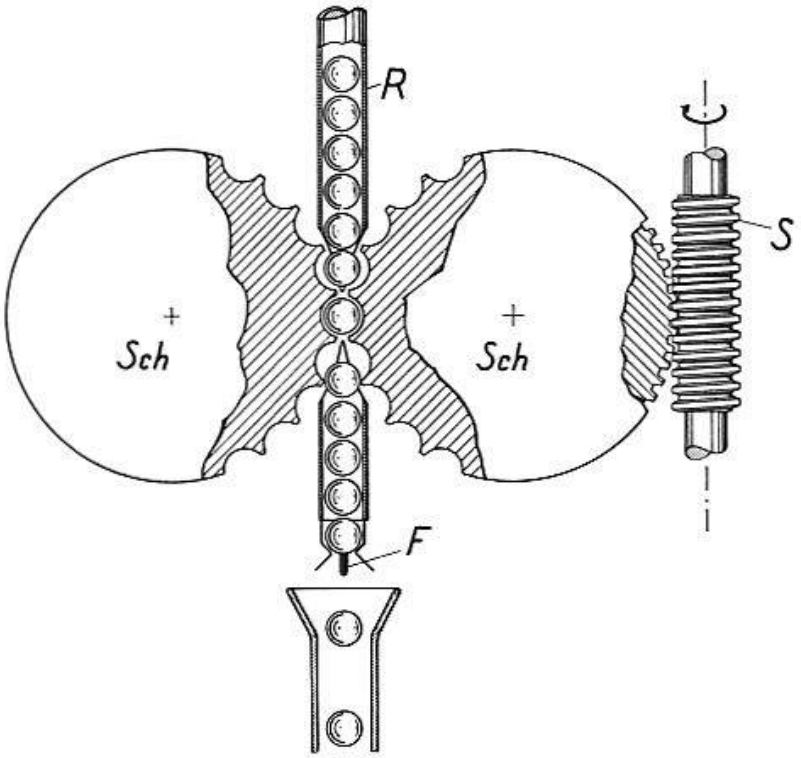

Abb. 2. Kugelmaschine. Die in der Abbildung schematisch dargestellte Maschine bewirkt, daß die Modellkügelchen in gleichen, durch die Umdrehungszahl der Maschine gegebenen Zeitabständen in das Beobachtungsrohr gelangen, wo sie von der Strömung mitgeführt werden. Der wesentliche Teil besteht aus zwei dicken Messingscheiben, auf deren Umfang halbkugelförmige Vertiefungen eingefräst sind. Hinter den beiden Messingscheiben befinden sich zwei gleich große Zahnräder, die ineinander eingreifen und mit Hilfe der Schnecke S in gegensinnige Umdrehung versetzt werden. Die beiden Federn F am unteren Ende des Rohres R halten jede Kugel so lange fest, bis sie von der nächstfolgenden ausgestoßen wird. Auf diese Weise wird dafür gesorgt, daß die Kugeln wirklich in genau gleichen Zeitabständen das Rohr R verlassen. Die beiden kleinen Führungsschienen Sch verhindern ein Ausweichen der Kugeln senkrecht zur Zeichenebene.

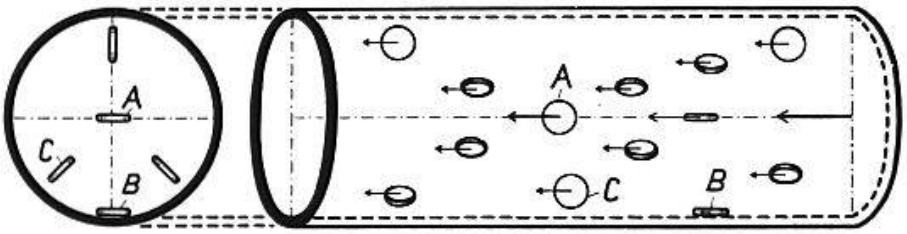

Abb. 3. Schematische Darstellung der Scheibchenbewegung bei niedriger Konzentration.

C bezeichnete Teil bewegt sich in einem bestimmten Abstand von der Rohrachse rotierend und radial ausgerichtet. Lassen wir die Strömungsgeschwindigkeit durch Vergrößerung des Druckgefälles ansteigen, dann sieht man eine deutliche Bewegung der suspendierten Teilchen nach der Rohrachse zu. Beim zweiten Versuch ist die Konzentration der Suspension auf 15 % erhöht worden. Sie sehen, wie nun die Teilchen aneinander-

stoßen. Dadurch entsteht eine sehr unregelmäßige Strömung. Diese beiden Versuche zeigen mit aller Deutlichkeit, daß es sich hier um eine sehr komplizierte Strömung handelt, die von der geordneten Poiseuilleschen Strömung stark abweicht, obschon es sich um Strömungen mit kleinen Reynoldsschen Zahlen handelt. Diese Strömungsformen, bei denen D kleiner als $\frac{1}{2}$, aber größer als $^1/_6$ ist, stellen die interessantesten Strömungen einer heterogenen Flüssigkeit dar. Der Widerstand ist auch hier abhängig von der Konzentration, von D und von der Teilchenform. Er ist aber außerdem eine komplizierte Funktion der Geschwindigkeit. Für diese Strömung ist insbesondere charakteristisch, daß sehr leicht Störungen durch Verkeilungen auftreten. In unserem Kreislaufe ist dieser Strömungstyp in den Arteriolen, Venulen und kleinsten Arterien mit Durchmessern kleiner als 50 μ vorhanden. In diesem Gefäßabschnitte treten wahrscheinlich ebenfalls leicht Störungen durch Verkeilung der Blutkörperchen auf, dies ganz besonders, wenn die Gefäße wenig dehnbar sind. Es gelingt übrigens auch experimentell nie, eine länger dauernde Strömung mit Blut in derartigen Röhrchen zu unterhalten.

Beim 3. Strömungsmodell können Sie die Strömung einer homogenen und einer heterogenen Flüssigkeit gleichzeitig beobachten. Sie sehen zwei gleich große Reservoirs, an die zwei Stahlröhren von 3 m Länge und 10 mm Durchmesser angeschlossen sind. Im ersten Gefäß befindet sich verdünntes Glycerin, im zweiten eine 40%ige Suspension von passend ausgesiebtem Kautschukstaub. Der mittlere Durchmesser dieser Kautschukteilchen beträgt 100 μ. D ist also ungefähr $^1/_{100}$. Das Glycerin im ersten Gefäß ist in der Verdünnung so ausgewählt worden, daß es, mit einem gewöhnlichen Viskosimeter gemessen, mit der Kautschuksuspension isoviskös ist. Lassen wir nun durch Öffnen des Rohrverschlusses beide Flüssigkeiten durch die Röhren abströmen und beobachten den Ausflußstrahl und das Sinken der Niveaustände in den Reservoirs, so sehen wir deutliche Differenzen zwischen der homogenen und der heterogenen Flüssigkeit. Bei der homogenen Flüssigkeit bemerken Sie z. B. ein plötzliches Umschlagen der turbulenten Strömung in die Laminärströmung. Bei der heterogenen Flüssigkeit ist hingegen das langdauernde Hin- und Herpendeln zwischen den beiden Strömungsformen besonders auffallend. Die Ausströmungszeit ist bei der heterogenen Flüssigkeit merklich länger. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich, daß auch diese Suspension mit sehr kleinem D immer noch alle deutlichen Zeichen der Heterogenität aufweist. Daraus können wir den Schluß ziehen, daß für die Strömung des Blutes in den großen und mittelgroßen Arterien ebenfalls die Gesetzmäßigkeiten der heterogenen Flüssigkeit gelten müssen.

Alle diese Versuche beweisen, daß die Widerstandsrechnung unter Benützung der Poiseuilleschen Formel nur eine grobe Annäherung an die Wirklichkeit geben kann.

Zusammenfassung

Es werden einige Versuche über Schlauchwellen und über stationäre Strömungen heterogener Flüssigkeiten in Einzelröhren demonstriert. Damit wird dargelegt, daß die nach den bekannten Formeln berechneten Schlagvolumen und Reibungswiderstände nur als grobe Annäherungswerte betrachtet werden dürfen.

Résumé

L'auteur décrit quelques essais d'écoulement de liquides hétérogènes dans des tuyaux isolés, leur écoulement laminaire et leur écoulement turbulent. Il démontre par ces expériences que les volumes par pulsation, calculés selon les formules connues, ainsi que les coefficients de frottement ne sont que des valeurs très approximatives.

Riassunto

Vengono esposti alcuni esperimenti concernenti correnti pulsanti e stazionarie di fluidi eterogenei in tubi singoli. Si dimostra così che la gettata pulsatoria e le resistenze d'attrito calcolate mediante le note formule vanno considerate unicamente quali valori grossolanamente approssimativi.

Summary

Some experiments were demonstrated on the intertubular waves and on stationary flows of heterogenic liquids in individual pipes. It was thereby shown that the stroke volume and the friction resistance as reckoned by the usual formulae can only be regarded as rough approximate values.