

Viskosimetrische Studien über den Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand des Blutes und dessen Komponenten.

Von

E. Rothlin.

(Aus dem physiologischen Institute Zürich. Direktor: Prof. Dr. W. R. Hess.)

Mit 6 Textabbildungen.

(Eingegangen am 2. Oktober 1919.)

Die innere Reibung von Lösungen ist eine physikalische Eigenschaft von additivem Charakter. Der Strömungswiderstand einer homogenen wie heterogenen Lösung beim Fließen durch eine Kapillare ist nicht gleich der Summe der Strömungswiderstände der Komponenten, sondern der Ausdruck von einander überlagernden Faktoren, abhängig von den physikalisch-chemischen Beziehungen zwischen den Komponenten der Lösung. Die Grundlage der Methodik für die Bestimmung der inneren Reibung hat Poiseuille¹⁾ durch seine ausgezeichneten

Untersuchungen geschaffen, und der gefundene Ausdruck: $V = \frac{\pi r^4 p t}{8 l \eta}$

gibt die Beziehungen zwischen der inneren Reibung und den Kapillarkonstanten, dem treibenden Drucke und der Ausflusszeit wieder. Die Gültigkeit dieses Poiseuille'schen Gesetzes ist keine unumschränkte, sondern besteht nur unter Strömungsbedingungen, wo der treibende Druck dem Strömungswiderstande proportional verläuft. In diesem Strömungsbereiche bilden Druckgefälle mal Ausflusszeit ein konstantes Produkt. Reynolds²⁾ hat nachgewiesen, dass die Poiseuille'sche Strömungsformel nur in jenem Strömungsgebiete die tatsächlichen Verhältnisse wiedergibt, solange die Flüssigkeit unter Benetzung der Kapillarwand in Form konaxialer Flüssigkeitszylinder in geordneter, gleitender Bewegung durch die Kapillare fließt. Wird nämlich eine obere kritische Geschwindigkeit erreicht, so tritt eine Disproportionalität zwischen dem treibenden Drucke und dem Strömungswiderstande auf, die Produkte aus pt (Druckgefälle mal Ausflusszeit) sind nicht mehr konstant, das Poiseuille'sche Gesetz hat seine Gültigkeit verloren.

1) Poiseuille, Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides de nature différente dans les tubes de très petits diamètres. Annal. de Chim. et Phys. 3. Ser. 1843, p. 36.

2) Reynolds, On experim. investigation of the circumstances, which determine whether the motion of water shall be direkt or sinuous etc. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A. vol. 174. Part. II. p. 935. 1883.

Die Flüssigkeit fließt unter diesen Versuchsbedingungen in ungeordneter wirbelbildender Bewegung durch die Kapillare. Man nennt dieses Strömungsgebiet das turbulente oder das hydraulische. Das Poiseuille'sche Gesetz ist für homogene Flüssigkeiten im Gebiete der gleitenden Bewegung als allgemein gültig nachgewiesen und bisher fast allgemein auch auf die Verhältnisse bei Lösungen von heterogenem Charakter ohne die nötige Kritik übertragen worden. In früheren Arbeiten habe ich die Beziehungen zwischen dem treibenden Drucke und dem Strömungswiderstande bzw. die Frage der Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes bei hydrophilen kolloidalen Lösungen¹⁾ und beim Blute und dessen Komponenten²⁾ ausführlich behandelt. Dabei zeigte sich, dass eine Einschränkung der Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes unter bestimmten Versuchsbedingungen sowohl bei gewissen hydrophilen kolloidalen Lösungen als beim Blut und dessen Komponenten im Gebiete der gleitenden Bewegung besteht. Gegenstand der Untersuchung in diesem Aufsätze ist der Einfluss eines anderen physikalischen Faktors, der Temperatur, auf die Strömungsverhältnisse beim Blute und dessen Komponenten. Thorpe und Rodger³⁾ haben durch gründliche Untersuchungen gewisse Gesetzmässigkeiten über das Verhalten des Temperaturkoeffizienten bei homogenen Flüssigkeiten und Lösungen gefunden. Es ist nun zu untersuchen, ob bei den heterogenen Lösungen wie dem Blute, dem Blutserum und den Formelelementen in 0,9 % NaCl-Lösung ähnliche Beziehungen zwischen dem Strömungswiderstande und dem Temperaturkoeffizienten bestehen, trotzdem deren Strömungsverhältnisse, wie soeben erwähnt, im Gebiete der gleitenden Bewegung, unter bestimmten Bedingungen, von jenen der homogenen Flüssigkeiten abweichen. Die bisherigen diesbezüglichen Untersuchungen haben meist nur den qualitativen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf die innere Reibung oder die quantitativen Verhältnisse nur innerhalb enger Temperaturgrenzen berücksichtigt. Unsere Aufgabe soll es sein, beim defibrinierten Blute, den gewaschenen Formelelementen in 0,9 % NaCl-Lösung und bei dem Blutserum den Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den Strömungswiderstand in qualitativer und quantitativer Hinsicht zu analysieren. Wir verfolgen dabei sowohl physikalisch-chemische als physiologische Interessen.

1) E. Rothlin, Über die Methodik der Viskositätsbestimmung bei organischen Kolloiden. Biochem. Zeitschr. Bd. 93 S. 34.

2) E. Rothlin, Kritische Studien über die physikalischen Bedingungen bei der Messung der inneren Reibung des Blutes und dessen Komponenten. Diese Arbeit wird in der Zeitschrift für klin. Medizin erscheinen.

3) Thorpe u. Rodger, On the relations between the viscosity of liquids and their chemical nature. Phil. Trans. London. A. vol. 185 Part. II. p. 390—710. 1894.

1. Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf die innere Reibung des Blutserums.

Der für vorliegende Untersuchungen verwendete Apparat ist ein Hess'sches Viskosimeter¹⁾, in der Ausführung, wie ich sie anderorts eingehend beschrieben und dargestellt habe²⁾. Dabei wird die relative innere Reibung bestimmt, welche das Hess'sche Prinzip bei einem einmaligen Versuche direkt abzulesen erlaubt. Das Viskosimeter war mit zwei Adnexapparaten versehen, von denen der eine das Druckgefälle bzw. die Durchflussgeschwindigkeit und der andere die Versuchstemperatur innerhalb bestimmter Grenzen zu variieren gestattete.

Die einleitenden Bemerkungen über die Bedeutung des Druckgefälles bzw. der Durchflussgeschwindigkeit für die Messung der inneren Reibung finden hier insofern Anwendung, als ich nachgewiesen habe, dass Blutserum²⁾ ähnlich wie das Blut nur in einem „oberen“ Druckbereiche dem Poiseuille'schen Gesetze folgt. Dieser Tatsache wurde bei meinen Untersuchungen dadurch Rechnung getragen, als ich stets unter physikalischen Bedingungen arbeitete, wo das Poiseuille'sche Gesetz für Blutserum Anwendung findet und meine erhaltenen Werte beim Blutserum somit als solche der inneren Reibung bezeichnet werden dürfen.

In Vorversuchen prüfte ich erst das zeitliche Verhalten der inneren Reibung des Blutserums vom Zeitpunkt der Entnahme desselben. Dabei zeigte sich, dass mit wenig Ausnahmen das hämoglobinfreie Blutserum, im Eisschrank aufbewahrt, während Tagen keine Veränderungen erfährt, welche sich viskosimetrisch nachweisen lassen.

In der vorliegenden Versuchsanordnung der Bestimmung der relativen inneren Reibung beziehen wir den Einfluss der Temperatur der Versuchsflüssigkeit auf jenen der Vergleichsflüssigkeit (Wasser). Wenn nun der Temperaturkoeffizient von Versuchsflüssigkeit und von Wasser nicht gleich ist, so muss die relative innere Reibung bei verschiedenen Temperaturen verschieden ausfallen. Mit anderen Worten, wir erhalten unter diesen Umständen andere Werte bei einer Versuchstemperatur von 15° als von 38°. Für unsere Bestimmungsmethode berechnen wir den Einfluss der Temperatur aus dem Verhältnis: Relative innere Reibung des Blutserums bei x^0

Relative innere Reibung von Wasser bei x^0 ; den Zähler des Bruches lesen wir am Viskosimeter direkt ab, und der Nenner wird stets gleich 1 gesetzt. Ist nun der Quotient des Bruches bei verschiedenen Temperaturen gleich, so heisst das, dass die innere Reibung des Blutserums sich quantitativ gleich verändert wie diejenige des Wassers. Ist der

1) Hess, Ein neuer Apparat zur Bestimmung der Viskosität des Blutes. Münch. med. Wochenschr. Bd. 45 Nr. 32. 1907.

2) E. Rothlin, loc. cit. S. 196.

Quotient kleiner, so wird die innere Reibung des Blutserums stärker herabgesetzt als diejenige des Wassers. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich bald, dass übereinstimmende und vergleichbare Resultate nur gewonnen werden können, wenn die Einwirkung der Temperatur in der ganzen Versuchsreihe gleichmässig durchgeführt wird. Eine bestimmte Temperatur liess ich daher stets während 5 Minuten einwirken, daran schloss sich eine Messung an, dann folgte die rasche Einstellung der nächst höheren Temperatur, welche wieder während 5 Minuten einwirkte usw. Eine Versuchsserie ist somit mit derselben Probe eines Blutserums durchgeführt. Ich gebe in den folgenden Tabellen I, II und III die Versuchsergebnisse von einem Rinderserum, einem Schweineserum und einem Schafserum wieder. Die Sera sind nach Gerinnung des Blutes und Auspressen des Blutserums durch Abpipettieren gewonnen und vor dem Versuche zentrifugiert worden.

Tabelle I.

Rinderserum, gewonnen nach spontanem Auspressen des Blutkuchens.

Versuchs-tempera-tur	Relativ innere Reibung	Abnahme der relativen inneren Reibung pro Grad Temperatur	Absolute innere Reibung in C-G-S-Einheiten	Abnahme der absoluten inneren Reibung pro Grad Temperatur
12°	1,91	0,006	0,02378	0,00064
17°	1,88	0,004	0,02056	0,00051
22°	1,86	0,004	0,01802	0,00043
27°	1,84	0,004	0,01587	0,00033
32°	1,82	0,002	0,01424	0,00030
37°	1,81	0,004	0,01274	0,00025
42°	1,79		0,01148	

Tabelle II.

Schafserum, gewonnen nach spontanem Auspressen des Blutkuchens.

Versuchs-tempera-tur	Relative innere Reibung	Abnahme der relativen inneren Reibung pro Grad Temperatur	Absolute innere Reibung in C-G-S-Einheiten	Abnahme der absoluten inneren Reibung pro Grad Temperatur
26°	2,10	0,005	0,01852	0,00041
30°	2,08	0,005	0,01689	0,00035
34°	2,06	0,005	0,01549	0,00037
38°	2,04	0,007	0,01406	0,00029
42°	2,01	0,005	0,01289	0,00021
46°	1,99	0,01	0,01204	0,00022
48°	1,97	0,005	0,01159	0,00021
50°	1,96	0,000	0,01117	0,00015
52°	1,96	+ 0,0025	0,01087	0,00017
56°	1,97	+ 0,01	0,01018	0,00006
60°	2,02	+ 0,04	0,00983	+ 0,00004
62°	2,10		0,00992	

Nach 1 Stunde bei 48° 2,33 relative innere Reibung. Nach 2 Stunden bei 38° 2,45 relative innere Reibung.

Tabelle III.

Schweineserum, gewonnen nach spontanem Auspressen des Blutkuchens.

Versuchstemp ^{er} atur	Relative innere Reibung	Abnahme der relativen inneren Reibung pro Grad Temperatur	Absolute innere Reibung in C-G-S-Einheiten	Abnahme der absoluten inneren Reibung pro Grad Temperatur
26°	1,83		0,01613	
30°	1,81	0,0050	0,01470	0,00033
34°	1,80	0,0025	0,01354	0,00029
38°	1,79	0,0025	0,01234	0,00030
42°	1,78	0,0025	0,01141	0,00023
46°	1,77	0,0025	0,01071	0,00017
50°	1,77	0,0000	0,01008	0,00016
54°	1,78	+ 0,0025	0,00949	0,00015
58°	1,83	+ 0,0125	0,00917	0,00008
62°	1,95	+ 0,0300	0,00921	+ 0,00001

Nach 20 Minuten bei 50° 2,0 relative innere Reibung. Nach 10 Stunden bei 20° 2,06 relative innere Reibung.

Die Inkonstanz des Quotienten (Werte der relativen inneren Reibung in den Stäben 2 der Tabellen I, II und III) für alle drei angeführten Beispiele ergibt, dass der Temperaturkoeffizient auf die innere Reibung des Blutserums und des Wassers einen verschiedenen Einfluss hat. Die Abnahme dieses Quotienten beweist, dass Temperaturerhöhung die innere Reibung des Blutserums stärker herabsetzt als diejenige des Wassers unter gleichen Versuchsbedingungen, das heisst innerhalb der untersuchten Temperaturen von 12–50° bzw. 52°. Die Abnahme der relativen inneren Reibung pro Grad Temperatur ist erheblich bei niedriger als bei höherer Temperatur und zwischen 30–48° bzw. 50° innerhalb der Fehlerbreite der Methodik ziemlich konstant. Bei 50° bzw. 52° wird ein Minimum der relativen inneren Reibung beim Blutserum erreicht, denn bei weiterer Erhöhung der Temperatur wächst die relative innere Reibung des Blutserums, und zwar viel rascher als sie bis zu dieser Temperatur abgenommen hat. Die Abb. 1 gibt

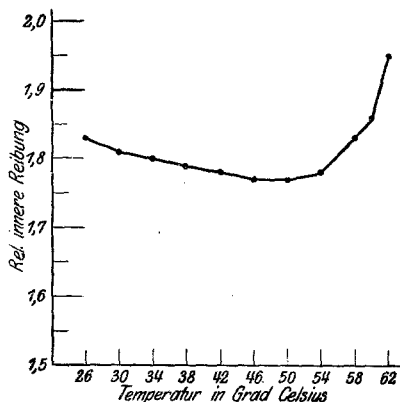


Abb. 1. Diese Abbildung gibt in graphischer Darstellung die Werte der relativen inneren Reibung des Blutserums bei verschiedenen Temperaturen wieder. Die Kurve entspricht den Werten der Tabelle III. Auf der Abszisse ist die jeweilige Versuchstemperatur, auf der Ordinate die relative innere Reibung eingetragen. Der Verlauf der Kurve zeigt eine Abnahme der relativen inneren Reibung bis auf 46°, zwischen 46° und 50° bleibt dieselbe konstant, es entspricht dies dem Minimum der relativen inneren Reibung. Oberhalb 50° nimmt dieselbe sehr rasch zu.

für die Versuchstemperatur zu kennen und mit dem gefundenen Quotienten x (relative innere Reibung) zu multiplizieren. Die so berechneten Werte¹⁾ der absoluten inneren Reibung in den Tabellen I, II und III sind in C-, G-, S-Einheiten ausgedrückt.

Bei Erhöhung der Temperatur verhält sich auch die absolute innere Reibung bei allen drei Serien übereinstimmend. Ein Vergleich der Stäbe 3 und 5 in den Tabellen I, II und III ergibt, dass die absolute innere Reibung im Gegensatz zur relativen mit Zunahme der Temperatur innerhalb 12 bis ca.

60° kontinuierlich, aber immer weniger abnimmt. Der Temperaturkoeffizient ist somit von grösserem Einfluss auf die absolute innere Reibung bei niederen als bei höheren Temperaturen, analog wie beim Wasser, wie ein Vergleich der Kurven A und B in der Abb. 2 ergibt. Der Verlauf beider Kurven lässt

diese ungleichmässige Abnahme des Reibungskoeffizienten mit Zunahme der Temperatur erkennen, denn sie bilden nicht gleichmässig abfallende Gerade.

Zwischen 26° und 38° trifft dies zwar annähernd zu. Die Kurve A für Blutserum nimmt dagegen zwischen 38° und 58° einen zunehmend flacheren Verlauf, das heisst der Reibungskoeffizient nimmt mit Erhöhung der Temperatur immer weniger ab, bis er bei 58° bzw. 60° ein Minimum erreicht. Denn wird die Temperatur weiter erhöht, so wächst der Reibungskoeffizient wieder. Aus den Tabellen I, II und III geht nun aber hervor, dass die absolute innere

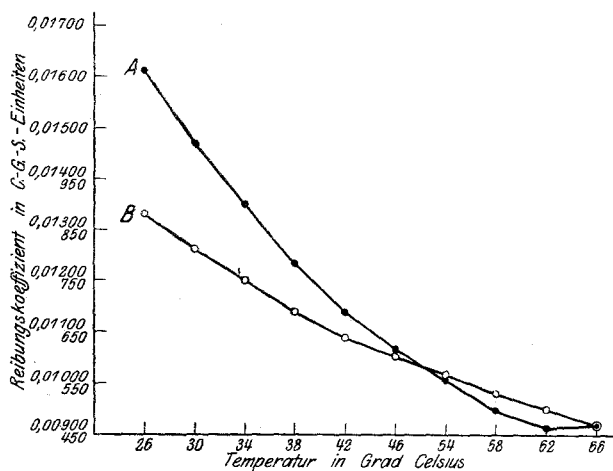


Abb. 2. Diese Abbildung gibt den Verlauf der absoluten inneren Reibung vom Blutserum der Tabelle II in Kurve A und von Wasser in Kurve B bei verschiedenen Temperaturen wieder. Auf der Abszisse ist die Versuchstemperatur, auf der Ordinate der Reibungskoeffizient in C-G-S-Einheiten eingezeichnet. Die oberen Zahlen beziehen sich auf das Blutserum, die unteren auf das Wasser. Die Viskositätskurve des Blutserums zeigt einen steten, immer flacher werdenden Verlauf bis auf 58°, bei welcher kritischen Temperatur das Minimum der absoluten inneren Reibung erreicht wird.

Die innere Reibung nimmt nachher wieder zu.

1) Die Reibungskoeffizienten für Wasser sind aus Landolt-Börnstein physikal.-chemische Tabellen II. Aufl. 1894 entnommen.

Reibung des Blutserums, wenn die Temperatur des Minimums erreicht wurde, bei nachheriger Abkühlung stets erhöht bleibt. Das Blutserum erfährt unter dieser Behandlung irreversible Veränderungen, welche zu einer bleibenden Erhöhung der inneren Reibung führen.

2. Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes.

Während das Blutserum, im Eisschrank aufbewahrt, innerhalb einiger Tage keine Änderung der inneren Reibung erfährt, zeigt das defibrinierte Blut unter denselben Konservierungsbedingungen oft schon nach Stunden Erscheinungen der Hysteresis, welche sich viskosimetrisch in einer Erhöhung des Strömungswiderstandes kundgeben. Diese Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes sind gewonnen durch Serienversuche mit einer und derselben Blutprobe unter Verwendung von verschiedenem Druckgefälle bzw. Durchflussgeschwindigkeiten bei Versuchstemperaturen von 16–50° mit gewissen Intervallen. Eine Versuchstemperatur liess ich stets erst 5 Minuten einwirken und führte dann den Serienversuch aus. Um eine Sedimentierung der roten Blutkörperchen zu vermeiden, wurde das defibrinierte Blut auch in der Zwischenzeit beständig durch die Kapillare hin- und hergeschoben. Denn durch Vorversuche konnte ich nachweisen, dass unter diesen Bedingungen die innere Reibung des defibrinierten Blutes konstant bleibt. Die bestimmten Werte des relativen Strömungswiderstandes bei verschiedenem Druckgefälle für die untersuchten Temperaturen habe ich in ein Koordinatensystem in grossem Maassstabe eingetragen, wobei auf den Ordinaten der relative Strömungswiderstand und auf den Abszissen das zugehörige Druckgefälle eingezeichnet wurde. Aus diesen übereinander gelagerten Kurven, von denen jede einer bestimmten Versuchstemperatur entsprach, konnte ich den relativen Strömungswiderstand für die Druckgefälle von 60, 20, 10, 5 und 1,5 cm Hg bei den verschiedenen Versuchstemperaturen herauslesen. Auf diese Weise gelangte ich zu den Tabellen IV A, B, C, D, E. In analoger Weise wie beim Blutserum berechnete ich aus den gefundenen Werten der relativen inneren Reibung die absolute innere Reibung in C-G-S-Einheiten. In Stab 3 der genannten Tabellen finden wir ferner die Abnahme des relativen Strömungswiderstandes pro Grad Temperatur und in Stab 5 diejenige des absoluten Strömungswiderstandes innerhalb der untersuchten Temperaturintervalle. Da in einem „unteren“ Druckgebiete, das heisst bei langsamsten Durchflussgeschwindigkeiten, nicht mehr die innere Reibung des Blutes allein gemessen wird, sondern ein komplexer Strömungswiderstand, so wäre es unrichtig, in vorliegenden Versuchen durchgehend von relativer oder absoluter innerer

Reibung zu sprechen, denn dies trifft in Wirklichkeit nur für die Druckgefälle zwischen 60 und 30 cm Hg exakt zu. Aus diesem Grunde wählte ich die allgemeinere Bezeichnung relativer und absoluter Strömungswiderstand.

Tabelle IV A.

Versuchstemp.	Rel. Strömungswiderstand bei 60 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungswiderstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungswiderstand bei 60 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungswiderstandes pro Grad Temp.
16°	4,22	0,041	0,04733	0,00148
22°	3,97	0,021	0,03346	0,00095
30°	3,80	0,020	0,03086	0,00072
38°	3,64	0,020	0,02510	0,00057
42°	3,56	0,020	0,02283	0,00046
45°	3,50	+ 0,004	0,02146	0,00028
50°	3,52		0,02005	

Tabelle IV B.

Versuchstemp.	Rel. Strömungswiderstand bei 20 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungswiderstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungswiderstand bei 20 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungswiderstandes pro Grad Temp.
16°	4,42	0,040	0,04957	0,00152
22°	4,18	0,025	0,04049	0,00102
30°	3,98	0,022	0,03232	0,00076
38°	3,80	0,020	0,02620	0,00058
42°	3,72	0,026	0,02386	0,00051
45°	3,64	+ 0,030	0,02232	0,00015
50°	3,79		0,02159	

Tabelle IV C

Versuchstemp.	Rel. Strömungswiderstand bei 10 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungswiderstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungswiderstand bei 10 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungswiderstandes pro Grad Temp.
16°	4,58	0,036	0,05137	0,00152
22°	4,36	0,026	0,04224	0,00106
30°	4,15	0,032	0,03370	0,00086
38°	3,89	0,015	0,02682	0,00058
42°	3,83	0,010	0,02456	0,00042
45°	3,80	+ 0,044	0,02330	0,00008
50°	4,02		0,02290	

Tabelle IV D.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
16°	4,85		0,05440	
22°	4,58	0,045	0,04437	0,00167
30°	4,39	0,023	0,03565	0,00109
38°	4,05	0,042	0,02792	0,00097
42°	3,98	0,017	0,02552	0,00060
45°	3,95	0,010	0,02422	0,00043
50°	4,41	+ 0,092	0,02512	+ 0,00018

Tabelle IV E.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 1,5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 1,5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
16°	5,57		0,06247	
22°	5,30	0,045	0,05135	0,00185
30°	4,88	0,052	0,03963	0,00147
38°	4,55	0,041	0,03137	0,00103
42°	4,33	0,055	0,02777	0,00090
45°	4,35	+ 0,007	0,02667	0,00037
50°	5,05	+ 0,14	0,02876	+ 0,00042

Die Betrachtung des Einflusses des Temperaturkoeffizienten auf den relativen Strömungswiderstand des defibrierten Blutes kann uns auch hier nur vom praktischen Standpunkte aus interessieren, da die tatsächlichen Verhältnisse allein in den Werten des absoluten Strömungswiderstandes wiedergegeben werden. Die Abb. 3 bringt den Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den relativen Strömungswiderstand bei verschiedenem Druckgefälle zur Darstellung. Der relative Strömungswiderstand nimmt innerhalb 16—45° ab. Der Verlauf der Kurven zeigt ferner die Unregelmässigkeit der Abnahme des relativen Strömungswiderstandes, wie sie in den Tabellen IV A—E in den Stäben 3 verzeichnet sind. Ebenso erkennen wir in diesen Kurven die Unterschiede, die bestehen je nach dem Druckgefälle, bei welchem der relative Strömungswiderstand gemessen wird. Die Kurven bei 60, 20, 10 und 5 cm Hg Druckgefälle verlaufen nicht parallel, sondern mit abnehmendem Druckgefälle immer steiler, und besonders bei 1,5 cm Hg Druckgefälle wird der relative Strömungswiderstand in viel stärkerem Maasse von der Temperatur beeinflusst, denn diese Kurve fällt innerhalb 16° bis

45° viel steiler ab als die übrigen. Bei 45° für die Messungen von 60 bis 5 cm Hg und bei 42° für die Messung bei 1,5 cm Hg wird ein Minimum des relativen Strömungswiderstandes erreicht, denn bei weiterer Erhöhung der Temperatur nimmt der relative Strömungswiderstand wieder zu, und zwar um so rascher, je niedriger das Druckgefälle ist.

Von grösserer Bedeutung ist die Analyse der absoluten Verhältnisse.

Die Werte in den Tabellen IV A—E in den Stäben 4 und 5 zeigen den ziemlich regelmässigen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand. Diese Regelmässigkeit kommt innerhalb 16° und 45° am besten in dem steten Verlauf der Kurven in Abb. 4 zum Ausdruck. Der absolute Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes wird wie derjenige des Blutserums innerhalb dieser Temperaturen mit zunehmender Temperatur immer weniger herabgesetzt. Der verschiedene Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes je nach dem angewandten Druckgefälle bzw. Durchflussgeschwindigkeit zeigt sich auch hier deutlich. Die Kurven verlaufen von links nach rechts nicht parallel, sondern nähern sich von

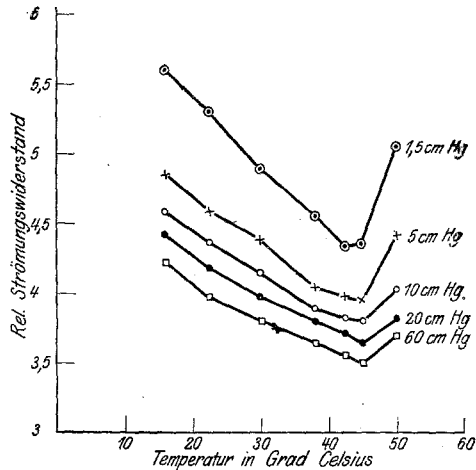


Abb. 3. Die Kurven der Abbildung 3 entsprechen den Werten des relativen Strömungswiderstandes des defibrinierten Blutes in den Tabellen IV A—E (Stab 2). Die Kurven zeigen den verschiedenen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den relativen Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes bei verschiedenem Druckgefälle. Jede Kurve ist am rechten Ende mit dem Druckgefälle in cm Hg bezeichnet, bei welchem die Messungen bei den verschiedenen Versuchstemperaturen vorgenommen wurden. Von 16°—45° erkennt man den verschiedenen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den relativen Strömungswiderstand im stets steileren Verlauf der Kurven mit abnehmendem Druckgefälle. Bei 45° wird ein Minimum erreicht, darauf nimmt der relative Strömungswiderstand wieder zu.

16—45° immer mehr, das heisst je kleiner das angewandte Druckgefälle ist, desto grösser ist die Abnahme des absoluten Strömungswiderstandes für eine bestimmte Temperatur. Von 45—50° hat der Temperaturkoeffizient auf den absoluten Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes keinen gleichsinnigen Einfluss. Die Kurven gehen hier auseinander. Denn während für die Druckgefälle von 60 und 20 cm Hg innerhalb dieser Temperaturen der Reibungskoeffizient noch

stetig, wenn auch immer langsamer, abnimmt, bleibt derjenige für 10 cm Hg Druckgefälle konstant und der absolute Strömungswiderstand bei 5 und 1,5 cm Hg ge-

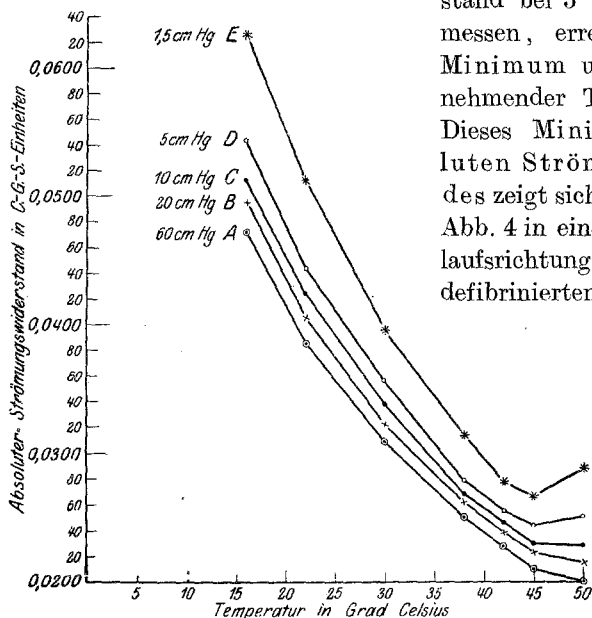


Abb. 4. Die Kurven A—E geben die Werte des absoluten Strömungswiderstandes in C-G-S-Einheiten für das defibrierte Blut der Tabellen IV A—E (Stab 4) wieder. Die Kurven zeigen den verschiedenen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand des defibrierten Blutes je nach dem Druckgefälle, bei welchem die Messung ausgeführt wird. Denn die Kurven verlaufen nicht parallel zueinander, sondern konvergieren zwischen 16° und 45° und divergieren zwischen 45° und 50°.

messen, erreicht bei 45° ein Minimum und wächst mit zunehmender Temperatur wieder. Dieses Minimum des absoluten Strömungswiderstandes zeigt sich in den Kurven der Abb. 4 in einer Umkehr der Verlaufsrichtung. Das Verhalten des defibrierten Blutes verschiedener Tierarten wie Pferd, Kuh, Rind, Schwein ist mit dem angeführten Beispiele übereinstimmend. Es

bestehen wohl quantitative, nicht aber qualitative Unterschiede. Wie

andernorts ¹⁾ mitgeteilt, hat der Temperaturkoeffizient einen gleichen Einfluss auf den Strömungswiderstand des Normalblutes. Eine so

ausgedehnte Untersuchung, wie sie hier mit dem defibrierten Blute unternommen wurde, konnte mit dem Normalblute ohne Zusatz gerinnungshemmender Mittel nicht durchgeführt werden. Die dort angeführten Resultate lassen aber auf ganz analoge Verhältnisse schließen.

3. Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand gewaschener Formelemente in physiologischer Kochsalzlösung.

Eine vergleichende Studie über den Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand des Blutes und dessen Komponenten erforderte ferner eine gleichsinnige Untersuchung bei den Formelementen des Blutes wie beim defibrierten Blute. Zu diesem Zweck habe ich

1) Rothlin, E. loc. cit. S.

die Formelemente des defibrinierten Blutes mittelst Zentrifugieren, durch acht- bis zehnmaliges Waschen mit 0,9 %iger NaCl-Lösung vom Serum möglichst befreit. Im übrigen war der Versuchsplan wie beim defibrinierten Blute. Auch hier wurde die Versuchslösung zur Verhinderung der Sedimentierung der Formelemente während der Zwischenzeiten stets in der Kapillare hin- und herbewegt. Die nun folgenden Tabellen sind auf dieselbe Weise erhalten worden, wie das für das defibrinierte Blut beschrieben wurde.

Tabelle VA.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 60 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 60 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
17°	3,61		0,03949	
30°	3,21	0,031	0,02607	0,00108
38°	3,12	0,011	0,02151	0,00057
42°	3,12	0,000	0,02001	0,00038
46°	2,97	0,037	0,01797	0,00051
50°	3,02	+ 0,012	0,01720	0,00019

Tabelle VB.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 20 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 20 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
17°	3,71		0,04058	
30°	3,31	0,031	0,02688	0,00105
38°	3,25	0,007	0,02241	0,00056
42°	3,25	0,000	0,02084	0,00039
46°	3,17	0,020	0,01918	0,00041
50°	3,22	+ 0,012	0,01834	0,00021

Tabelle VC.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 10 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 10 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
17°	3,81		0,04168	
30°	3,41	0,031	0,02769	0,00108
38°	3,34	0,009	0,02303	0,00058
42°	3,36	+ 0,005	0,02155	0,00037
46°	3,25	0,027	0,01966	0,00047
50°	3,45	+ 0,050	0,01965	0,000002

Tabelle VD.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
17°	4,05		0,04430	
30°	3,57	0,037	0,02899	0,00118
38°	3,43	0,018	0,02365	0,00067
42°	3,43	0,000	0,02200	0,00041
46°	3,38	0,012	0,02045	0,00039
50°	3,72	+ 0,085	0,02120	+ 0,00019

Tabelle VE.

Versuchs- temperatur	Rel. Strömungs- widerstand bei 1,5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des rel. Strömungs- widerstandes pro Grad Temperatur	Absol. Strömungs- widerstand bei 1,5 cm Hg Druckgefälle	Abnahme des absol. Strömungs- widerstandes pro Grad Temp.
17°	4,75		0,05196	
30°	4,10	0,050	0,03330	0,00144
38°	3,88	0,027	0,02775	0,00069
42°	3,77	0,027	0,02618	0,00039
46°	3,80	+ 0,007	0,02399	0,00055
50°	4,37	+ 0,142	0,02489	+ 0,00022

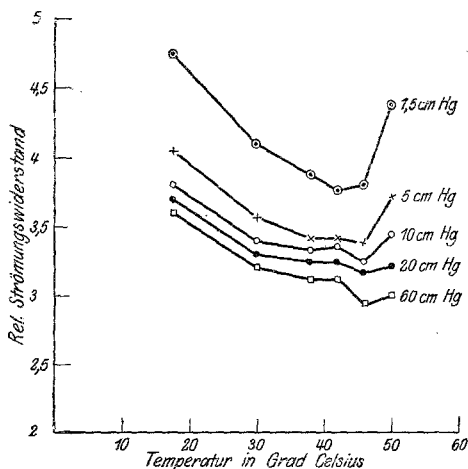


Abb. 5. Die Kurven dieser Abbildung zeigen den verschiedenen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den relativen Strömungswiderstand der Formelemente in 0,9% NaCl-Lösung bei verschiedenem Druckgefälle, ganz analog wie die Abbildung 3 für das defibrierte Blut. Auch hier zeigt sich ein um so steilerer Verlauf der Kurve, je geringer das angewandte Druckgefälle ist, was besonders für die Kurve bei 1,5 cm Hg zutrifft.

Die charakteristischen Merkmale für den Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den relativen und absoluten Strömungswiderstand, wie sie beim defibrierten Blute gefunden wurden, treffen wir auch hier für die Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung wieder, was ohne weiteres aus den Kurven in der Abb. 5 für den relativen und jenen der Abb. 6 für den absoluten Strömungswiderstand hervorgeht. Gewisse Unterschiede sind wohl da, sie sind aber nicht prinzipieller Natur. So zeigt sich, dass zwischen 38° und 42° der relative Strömungswiderstand

der Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung für die Messungen bei 60 bis 5 cm Hg Druckgefälle konstant bleibt, um dann wieder abzunehmen bis auf 46°, wo das Minimum des relativen Strömungswiderstandes erreicht wird. Zwischen 46° und 50° nimmt der relative Strömungswiderstand wieder zu, und zwar um so mehr, je geringer das angewandte Druckgefälle ist. Die Werte des absoluten Strömungswiderstandes verhalten sich viel regelmässiger. Der Einfluss des Druckgefälles kommt auch hier zum Ausdruck wie beim defibrierten Blute. Die

Kurven in der Abb. 6 sind bei 17° am weitesten voneinander entfernt, sie nähern sich bis auf 38° und verlaufen von dieser Temperatur bis 46° ganz parallel. Von 46–50° finden wir denselben ungleichsinnigen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand der Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung, je nach dem ver-

wendeten Druckgefälle, wie beim defibrierten Blute. Es besteht zwischen diesen beiden Versuchslösungen in diesem Temperaturgebiet eine vollständige Übereinstimmung. Für die Messungen bei 60 bis 20 cm Hg Druckgefälle nimmt der absolute Strömungswiderstand bei den Formelementen noch ab, bei 10 cm Hg bleibt derselbe innerhalb dieser Temperaturen konstant und dürfte ein Minimum erreicht haben. Bei 5 und 1,5 cm Hg dagegen wird das Minimum bei 46° erreicht, und der absolute Strömungswiderstand nimmt bis auf 50° wieder rasch zu.

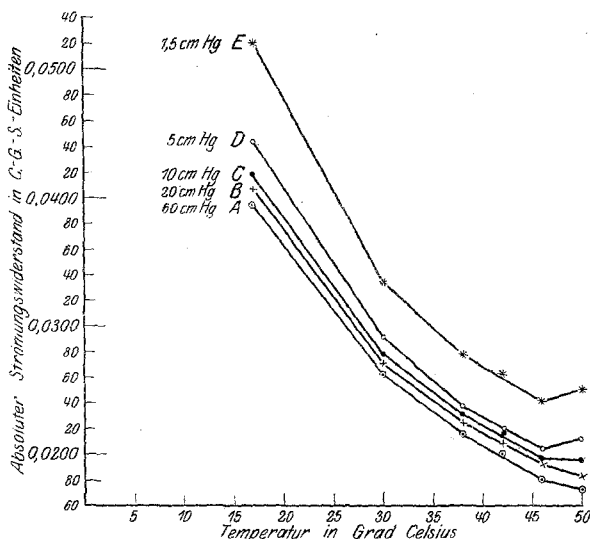


Abb. 6. Die Kurve A–E geben die Werte des absoluten Strömungswiderstandes für die Formelemente in 0,9% NaCl-Lösung der Tabellen V A–E (Stab 4) wieder. Man erkennt den verschiedenen Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand der Formelemente je nach dem angewandten Druckgefälle, denn die Kurven konvergieren zwischen 17° und 46° und divergieren zwischen 46° und 50°.

Diskussion der Resultate.

Ich habe erwähnt, dass Blutserum während Tagen im Eisschrank aufbewahrt viskosimetrisch keine Veränderungen im Sinne einer Hysteresis aufweist. Diese Erscheinung ist um so bemerkenswerter, als wir hier ein Emulsoid vor uns haben, von denen schon Graham allgemein aussagte, dass bei diesen kolloidalen Lösungen „nie Ruhe herrsche“. Ob unter den erwähnten Bedingungen beim Blutserum ein absoluter Gleichgewichtszustand besteht, ist dadurch nicht bewiesen, doch sind Veränderungen physikalisch-chemischer Natur kaum anzunehmen, denn die Viskosimetrie ist sehr empfindlich und steht in bezug auf Empfindlichkeit gegenüber Zustandsänderungen bei hydrophilen kolloidalen Lösungen den andern physikalisch-chemischen Untersuchungsmethoden kaum nach. Diese Konstanz des Strömungswiderstandes beim Blutserum nach Entnahme des Blutes berechtigt zur Annahme, dass die ziemlich rasch eintretenden Veränderungen des Strömungswiderstandes beim defibrinierten Blute mit dem Verhalten der Formelemente im Blute in Beziehung zu bringen sind. Ferrai¹⁾ konnte ferner eine beobachtete sprungweise Erhöhung des Strömungswiderstandes von defibriniertem infizierten Blute im Anfangsstadium der Fäulnis ebenfalls auf Veränderungen der Formelemente und nicht auf solche des Blutserums zurückführen.

Aus den experimentellen Daten kennen wir die Bedeutung und die Unterschiede des Temperaturkoeffizienten auf die relative und absolute innere Reibung des Blutserums. Die Ergebnisse der relativen inneren Reibung sind für die praktische Bestimmung der Viskosität des Blutserums von Wichtigkeit, denn bei der Subtilität dieser Bestimmungsmethode muss der Einfluss der Temperatur für eine erfolgreiche Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. Versuche über den Einfluss der Temperatur auf die relative innere Reibung sind von Mayer²⁾ an Pferdeplasma mit Zusatz von FNa und MgSO_4 ausgeführt worden. Eigentümlich ist in diesen Versuchen, dass innerhalb Temperaturen von 40–60° die relative innere Reibung konstant bleibt, während dieselbe in den Versuchen von Rossi³⁾ und in den meinen bis auf 58 bzw. 60° kontinuierlich abnimmt. Ob das Blutplasma sich diesbezüglich anders verhält oder ob eine besondere Einwirkung der genannten Elektrolytzusätze anzunehmen ist, kann ich

1) Ferrai, Ricerche viscosimetriche sul sangue asfittico. Arch. di fisiol. t. 1 p. 385–397. 1904.

2) Mayer, Etude viscosimetrique sur la coagulation des albuminoïdes du plasma sanguin par la chaleur. C. R. Soc. de Biol. t. 54 p. 367–369. 1902.

3) Rossi, La viscosità e la resistenza elettrica del siero di sangue a temperature diverse e prossime a quella dell'organismo. Arch. di fisiol. t. 1 p. 500–504. 1904.

nicht entscheiden; scheint mir aber wenig wahrscheinlich. Dieses Resultat von Mayer ist um so weniger verständlich, als das Blutplasma bekanntlich bei niedrigerer Temperatur koaguliert wegen des Fibrinogens als das Blutserum. Es könnte sich aber auch um weniger genaue Messungen handeln, infolge Verwendung eines weniger empfindlichen Apparates.

Die tatsächlichen Verhältnisse gehen allein aus den absoluten Werten der inneren Reibung bei verschiedener Temperatur hervor. Burton-Opitz¹⁾ hat aus zwei Versuchsreihen mit einer Anordnung von Hürthle geschlossen: „Diese Abnahme (des Reibungskoeffizienten) ist für dasselbe Temperaturintervall bei verschiedener Temperatur nicht gleich, sondern grösser bei höherer Temperatur, ähnlich wie beim Wasser und wässrigen Lösungen.“ Tatsächlich nimmt der Reibungskoeffizient des Wassers von 15–30° um 0,003382 und zwischen 30° und 45° um 0,001990 ab, und das ist das Temperaturgebiet, innerhalb dessen die Versuche von Burton-Opitz vorgenommen wurden. Ein analoges Verhalten geht aus meinen Resultaten der Tabellen I, II und III, für Blutserum sowie aus dem Verlauf der Kurven für Blutserum und Wasser in der Abb. 2 hervor. Nun sind aber die Resultate der einen Versuchsreihe von Burton-Opitz derart, dass ebenso das Gegenteil des Autors behauptet werden könnte. Der von Burton-Opitz gezogene Schluss stützt sich auf ein zu geringes und nicht übereinstimmendes Versuchsmaterial. Wenn Rossi eine gleichmässige Abnahme der inneren Reibung des Blutserums innerhalb 30–44° angibt und von dieser Temperatur an bis 56° eine immer geringer werdende Abnahme findet, so stimmen meine Versuche mit der letzteren Angabe überein, nicht aber mit der ersteren. Auf Grund meiner Versuche kann ich den Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf die absolute innere Reibung des Blutserums folgendermaassen charakterisieren: Der Reibungskoeffizient des Blutserums wird innerhalb 12–58° bzw. 60° nicht gleichmässig, sondern mit steigender Temperatur immer weniger herabgesetzt. Der Verlauf der Kurve innerhalb dieser Temperaturen ist ein steter, aber immer flacher werdender. Eine Unstetigkeit der Viskositätskurve bei 44°, wie dies Rossi angibt, konnte ich nicht beobachten. Die absolute innere Reibung erreicht bei ca. 58–60° ein Minimum. Diese Temperatur kann als kritische bezeichnet werden, denn oberhalb dieser kritischen Temperatur nimmt die absolute innere Reibung des Blutserums wieder zu. Die Viskositätskurve weist somit bei dieser kritischen Temperatur einen Wendepunkt auf, wie die Kurve A in Abb. 2 dies darstellt. Beim

1) Burton-Opitz, Vergleich der Viskosität des normalen Blutes mit der des Oxalatblutes, des defibr. Blutes und des Blutserums bei verschiedener Temperatur. Pflüger's Ach. Bd. 82 S. 464–473. 1900.

Überschreiten dieser kritischen Temperatur treten im Blutserum irreversible Veränderungen der kolloidalen Teilchen auf, welche wohl in einer Agglomeration bzw. Assoziation der dispergierten Phase beruhen. Diese ersten irreversiblen Veränderungen des Blutserums bei der Hitzekoagulation können makroskopisch nicht wahrgenommen werden, sie sind nur durch so feine Indikatoren, wie dies die Viskosimetrie besonders für die hydrophilen kolloidalen Lösungen ist, der Untersuchung zugänglich. Aus den Erfahrungen der Immunitätslehre wissen wir, dass beim Vorgang der Inaktivierung des Blutserums schon bei Temperaturen unterhalb der genannten kritischen, biologisch äusserst wichtige Veränderungen eintreten. Diese sind aber viskosimetrisch nicht nachweisbar, denn die innere Reibung des Blutserums vor und nach Erwärmung auf 56° ergibt bei derselben Temperatur zum Beispiel bei 30° gemessen denselben Wert, was auch von Rossi beobachtet wurde. Diese Veränderungen beim Vorgang der Inaktivierung bestehen daher wahrscheinlich nicht in Veränderungen des Dispersitätsgrades der kolloidalen Teilchen, sondern eher der chemischen Konstitution. Bei solchen Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf die Veränderungen der physikalisch-chemischen und biologischen Eigenschaften des Blutserums muss auf die Reaktion desselben ein besonderes Gewicht gelegt werden. Denn infolge der potentiellen Alkalinität des Blutserums tritt die makroskopisch sichtbare Hitzekoagulation des Blutserums bei ca. 70° ein, während ein neutrales oder leicht saures Blutserum nach Patéin¹⁾ schon bei 56° die ersten Erscheinungen der Koagulation aufweist.

Haro²⁾ und Ewald³⁾ haben zuerst nachgewiesen, dass die innere Reibung des defibrinierten Blutes mit zunehmender Temperatur abnimmt. Eigentümlicherweise hat Lewy⁴⁾ fast eine Konstanz der inneren Reibung des defibrinierten Blutes zwischen 27° und 45° beobachtet; erst von dieser Temperatur an soll dieselbe dann rasch abnehmen. Dieser Befund von Lewy kann nur auf Versuchsfehlern beruhen, denn alle späteren Autoren wie Burton-Opitz, Hess, Determann usw. konnten innerhalb dieser Temperaturen eine Herabsetzung der inneren Reibung beim Blute konstatieren. Die Frage ist nun, in welcher Weise wird die innere Reibung des Blutes durch den

1) Patéin, Contributions à l'étude de l'action de la chaleur sur le sérum sanguin. C. R. de la Soc. de Biol. t. 60—61, I. p. 724. 1906.

2) Haro, Essai sur la transpirabilité du sang. Gazette hebdomadaire. Nr. 11, 1873.

3) Ewald, Über die Transpiration des Blutes. Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abt. 1877 S. 208.

4) Lewy, Die Reibung des Blutes. Pflüger's Arch. Bd. 65 S. 447 bis 472. 1896.

Temperaturkoeffizienten herabgesetzt? Determann¹⁾ sagt: „dass der Temperaturkoeffizient von Wasser und Blut verschiedensinnig verläuft, deshalb muss der Viskositätswert desselben Blutes bei 38° und 20° auf den jeweiligen Wasserviskositätswert bezogen, ein absolut verschiedener sein.“ Aus dem Vergleich der Kurven in Abb. 3 und 4 für das defibrinierte Blut und der Kurve B in Abb. 2 für Wasser geht hervor, dass innerhalb Temperaturen von 20° bis 38° die Abnahme der inneren Reibung des Blutes und des Wassers bei Erhöhung der Temperatur nicht „verschiedensinnig verläuft“, sondern gleichsinnig, das heisst je höher die Temperatur, desto geringer der herabsetzende Einfluss derselben auf die innere Reibung von Wasser und Blut. Dabei bestehen natürlich quantitative Unterschiede gemäss der Verschiedenheit der inneren Reibung, zufolge der sehr verschiedenen Zusammensetzung der beiden Versuchslösungen. Für Determann handelt es sich aber um die Frage, ob die Bestimmung der inneren Reibung für praktische Zwecke bei Zimmer- oder bei Körpertemperatur vorgenommen werden soll. Hess²⁾ hat nachgewiesen, dass die innere Reibung des Blutes beim normalen Menschen zwischen 17° und 37° um ca. 16% abnimmt, und er findet eine gute Konstanz dieser Abnahme. Hess kommt zum Schlusse, dass die bei Zimmertemperatur gewonnenen Werte ein genaues Maass sind für die bei 37° geltenden Verhältnisse. Determann misst nun ferner mit seiner Apparatur nicht die relative innere Reibung des Blutes, sondern einen komplexen relativen Strömungswiderstand, wie ich schon früher dargelegt habe³⁾ Denn bei seiner Versuchsanordnung arbeitet er nur mit Druckgefälle von ca. 10–15 cm Wasser, wo nachgewiesenermaassen bei den üblich verwendeten Kapillardurchmessern das Poiseuille'sche Gesetz für das Blut nicht mehr gilt. Meine experimentellen Ergebnisse zeigen aber, dass ein wesentlich verschiedener Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den Strömungswiderstand des Blutes besteht, je nach dem Druckgefälle bzw. der Durchflussgeschwindigkeit, bei welcher die Messung vorgenommen wird. Es müssen sich auch aus diesem Grunde bei Determann's Messungen Abweichungen ergeben, verglichen mit Resultaten, welche unter Versuchsbedingungen gewonnen wurden, wo die Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes auch für Blut garantiert war. Wenn Burton-Opitz⁴⁾ fand: „dass die Änderung der Vis-

1) Determann, Die Viskosität des menschlichen Blutes. Monographie. Wiesbaden 1910.

2) Hess, Die Bestimmung der Viskosität des Blutes. Münch. med. Wochenschr. Jahrg. 54 S. 2225. 1907.

3) E. Rothlin, loc. cit. S. 196, 2.

4) Burton-Opitz, Vergleich der Viskosität des normalen Blutes mit der des Oxalatblutes, des defibrinierten Blutes und des Blutserums bei verschiedener Temperatur. Pflüger's Arch. Bd. 82 S. 464–473. 1900.

kosität (des defibrierten Blutes) innerhalb der untersuchten Temperaturen (15–40° C.) für gleiche Temperaturunterschiede konstant ist“, so ist einmal auf die nicht unerheblichen Unregelmässigkeiten in seinen Versuchsergebnissen hinzuweisen. Ferner ergibt die Versuchsreihe der Tabelle VII S. 470 von Burton-Opitz eine Abnahme und nicht eine Konstanz der inneren Reibung bei Erhöhung der Temperatur. Auf Grund meiner Untersuchungen an Blutproben verschiedener Tierarten, die qualitativ ganz übereinstimmende Resultate ergaben, nimmt der absolute Strömungswiderstand des defibrierten Blutes zwischen 16° und 45° mit steigender Temperatur immer weniger ab, analog wie beim Wasser und wässrigen Lösungen. Die Versuchsergebnisse bei den Formelementen in 0,9%iger NaCl-Lösung sind prinzipiell jenen des defibrierten Blutes gleich. Damit kann ich die Auffassung von Burton-Opitz nicht teilen, wenn er sagt: „Das Blut zeigt bezüglich seiner Viskosität eine Abweichung von Flüssigkeiten, welche keine geformten Bestandteile enthalten, insofern, als die Änderung seiner Viskosität mit steigender Temperatur eine gleichmässige ist, während sie bekanntlich für Wasser und wässrige Lösungen in rascherem Verhältnisse abnimmt.“

Ein wesentlicher Unterschied im Einfluss der Temperatur auf den Strömungswiderstand des defibrierten Blutes und den Formelementen in 0,9%iger NaCl-Lösung einerseits und homogenen Lösungen andererseits besteht in einem andern Sinne, indem bei den ersteren Versuchsmedien der Temperaturkoeffizient bei verschiedenen Druckgefällen bzw. Durchflussgeschwindigkeiten verschieden ist. Denn beim defibrierten Blute und bei den Formelementen in 0,9%iger NaCl-Lösung ist innerhalb 15–45° die Herabsetzung des Strömungswiderstandes bei 5 und 1,5 cm Hg Druckgefälle, das heisst im Strömungsbereiche, wo das Poiseuille'sche Gesetz für diese Versuchsmedien nicht mehr gilt, bedeutend erheblicher als im oberen Druckgebiete, wo dieses Gesetz gilt. Dieser experimentelle Befund kann vorläufig nur konstatiert werden. Die Erklärung dieser Erscheinung ist wahrscheinlich in dem Einfluss der Temperatur auf jene Faktoren zu suchen, welche die Abweichung des Blutes und der Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung vom Poiseuille'schen Gesetze verursachen, welche in einer früheren Arbeit behandelt wurden¹⁾. Die verschiedene Beeinflussung des Strömungswiderstandes beim defibrierten Blute und den Formelementen in 0,9%iger NaCl-Lösung durch den Temperaturkoeffizienten je nach dem angewandten Druckgefälle, macht sich innerhalb der Temperaturen von 45° und 50° noch in erheblicherem Maasse geltend.

1) E. Rothlin, Loc. cit. S. 196, 2.

Während der Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den absoluten Strömungswiderstand von 16° bis auf 45° bei verschiedenen Druckgefällen ein gleichsinniger mit quantitativen Differenzen ist, besteht unter denselben Versuchsbedingungen zwischen 45° und 50° ein ungleichsinniges Verhalten. Denn bei niedrigen Druckgefällen von 5 und 1,5 mm Hg wird bei 45° das Minimum des absoluten Strömungswiderstandes erreicht (Abb. 4 Kurven *E* und *D*), was bei höheren Druckgefällen nicht der Fall ist (Kurven *A* und *B* in derselben Abbildung). Ferner nimmt der absolute Strömungswiderstand für niedrige Druckgefälle zwischen 45° und 50° zu und derjenige für höhere Druckgefälle noch ab. Da die Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung dieselben Verhältnisse aufweisen (Abb. 6), muss diese Erscheinung auch beim defibrinierten Blute auf die besonderen Strömungsverhältnisse der Formelemente zurückgeführt werden. Für die Erklärung dieser experimentellen Ergebnisse glaube ich vorläufig eine quellende Einwirkung der Temperatur auf die Formelemente annehmen zu können, die um so deutlicher zum Ausdruck kommt, je geringer das angewandte Druckgefälle ist. Hämatokritische Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf das Volumen der Formelemente des Blutes werden darüber entscheiden können. Eine Durchprüfung dieser experimentellen Befunde bei andern kolloidalen Lösungen mit der Einschränkung der Gültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes bei langsamen Durchflussgeschwindigkeiten scheint mir für die Analyse über den Einfluss und die Bedeutung der physikalischen Faktoren von Druck bzw. Durchflussgeschwindigkeit und Temperatur für die Gesetzmässigkeiten beim Strömen von heterogenen Lösungen durch Kapillaren von grosser Wichtigkeit zu sein.

Für die Strömungsverhältnisse im Organismus beim Warmblüter lässt sich auf Grund dieser Ergebnisse sagen, dass bei den vorkommenden Temperaturen und zwar sowohl unter normalen als pathologischen Zuständen die innere Reibung des Blutes dem Minimum des absoluten Strömungswiderstandes ziemlich nahe kommt. Das Minimum des absoluten Strömungswiderstandes dürfte aber selbst unter Strömungsbedingungen nicht erreicht werden, wenn das Poiseuille'sche Gesetz im Organismus nicht gelten sollte, da dieses Minimum auch für niedrigste Druckgefälle erst bei 45° gefunden wurde. Ausserdem darf aus der Tatsache, dass Blut beim Strömen durch kapillare Glasröhren nur unter bestimmten Versuchsbedingungen dem Poiseuille'schen Gesetze folgt, nicht per analogiam auf eine Ungültigkeit dieses Gesetzes im Organismus geschlossen werden, wie dies zum Beispiel Rothmann¹⁾ tut. Denn wir besitzen heute noch nicht genügend

1) Rothmann, Ist das Poiseuille'sche Gesetz für Suspensiomen gültig? Pflüger's Arch. Bd. 155 S. 318. 1914.

experimentelle Daten, welche eine solche Annahme in einwandfreier Weise erlauben. Diese Ergebnisse über den Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf das Blut und dessen Komponenten von Warmblütern sollen durch analoge Untersuchungen beim Blut von Kaltblütern erweitert werden. Denn die scheinbar ungünstigen Strömungsverhältnisse infolge der niederen Temperatur beim Kaltblüter können in Wirklichkeit günstiger sein als eine Übertragung der Verhältnisse beim Warmblüter erwarten lässt.

Schlussfolgerungen.

1. Blutserum im Eisschrank aufbewahrt, zeigt während Tagen eine Konstanz der inneren Reibung, während das defibrinierte Blut oft schon nach Stunden eine Erhöhung der inneren Reibung erfährt.

2. Der Reibungskoeffizient des Blutserums wird innerhalb $12-58^{\circ}$ bzw. 60° nicht gleichmässig, sondern mit steigender Temperatur immer weniger herabgesetzt.

3. Bei 58° bzw. 60° wird ein Minimum der absoluten inneren Reibung beim Blutserum erreicht. Diese Temperatur wird als kritische bezeichnet. Oberhalb dieser kritischen Temperatur nimmt der Reibungskoeffizient des Blutserums wieder zu; es treten dabei irreversible Veränderungen der kolloidalen Teilchen des Blutserums ein.

4. Der Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes und dessen Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung nimmt zwischen 16° und 45° mit steigender Temperatur immer weniger ab, analog wie beim Blutserum bzw. dem Wasser und den wässrigen Lösungen.

5. Der Einfluss des Temperaturkoeffizienten auf den Strömungswiderstand des defibrinierten Blutes und dessen Formelemente in 0,9%iger NaCl-Lösung ist abhängig von dem Druckgefälle bzw. der Durchflussgeschwindigkeit, bei welcher die Messung vorgenommen wird.