Ueber das Verhalten des Kautschuks zur Wärme und zur Belastung

von

J. Schmulewitsch,
pract. Arzt aus Kiew.

Den Einfluss der verschiedenen Temperaturen auf die Muskelsubstanz studirend, glaubte ich zu bemerken, dass entgegen dem bis jetzt geltenden, auf Analogien und Vermuthungen, wie durch directe Versuche bewiesenen Satze, laut welchem alle organischen Körper durch die Wärme gedehnt, durch die Kälte zusammengezogen werden — die Muskeln von der Wärme zusammenschrumpfen, von der Kälte dagegen gedehnt werden. Ich konnte aber den Erfolg der Einwirkung verschiedener Temperaturen auf die Muskelsubstanz nie rein vorstellen, (nicht einmal dem Sinne nach, geschweige quantitativ) weil

1) die physicalischen Erscheinungen sich mit den physiologischen mengten: das physikalische Zusammenschrumpfen schien bei einer gewissen Temperatur (ungefähr von 22 — 28° Cels. je nach verschiedenen Verhältnissen) in eine physiologische Contraction überzugehen.

2) Ist der Muskel als lebendiges Gewebe, vom Moment seiner Abtrennung aus dem Organismus, im Absterben begriffen, was nach der Meinung von pr. Wundt schon an und für sich ein Zusammenschrumpfen hervorruft.

3) Tritt schon bei verhältnissmässig sehr geringen Belastungen die elastische Nachwirkung so störend ein, dass es unmöglich schien, sich irgend eine Idee von den quantitativen Verhältnissen des Processes vorzustellen, wenn man nicht schon auf irgend welchem anderem Wege sich einen wenigstens annähernden Begriff über die Zahlen, welche zu erwarten wären, gebildet hat. Diesem Begriffe wollte ich auf folgendem Wege näher kommen.

In der Litteratur über die Einwirkungen verschiedener Temperaturen auf unorganische und organische Körper, habe ich nur zwei Körper gefunden, deren Erscheinungen beim Einwirken verschiedener Temperaturen analog denjenigen waren, welche ich bei dem Muskel eintreten sah; das waren: vulkanisirtes Kautschouk und äusserst feuchtes Holz. Ich habe nämlich in dem Philosophial Magazine und in den Proceedings for the Royal Society of London*) nur kurze Berichte gefunden über die Abhandlungen von Joule und Thomson über das Verhältniss der Wärme zur mechanischen Dehnung verschiedener

---

*) 1857. Vol. VIII. Seite 355. On the thermoelectricity of ferruginous Metals, and on the thermal effects of stretching solid Bodies. By J. P. Joule.

1857. Vol. VIII. Seite 564. On the thermal effects of longitudinal compression of Solids. By J. P. Joule and on the alterations of Temperature, accompanying changes of pressure in fluids, by W. Thomson.

1857. Vol. IX. Seite 3. On the expansion of Wood by Heat. By J. P. Joule.

1858. Vol. IX. Seite 254. On some thermodynamie properties of Solids. By J. P. Joule.

Körper, sowie über die Folgerungen, die sie aus diesen Versuchen gemacht haben, über den Einfluss der Wärme auf die Länge dieser Körper. Unter diesen Folgerungen war von besonderem Interesse für meinen Zweck folgender von Joule aufgestellter Satz: ein Stück vulkanisirtes Kautschouk, welches durch eine Last gedehnt wurde auf das Doppelte seiner Länge, wird bei Erhöhung seiner Temperatur bis 50° Cels. auf ein Zehntel seiner Länge verkürzt. Ich hatte also jetzt einen Körper, der wie der Muskel eine vollkommene Elasticität besitzt und der von der Wärme ebenso beeinflusst wird, wie der Muskel; den quantitativen Bestimmungen stand hier keine einzige der oben bezeichneten Schwierigkeiten im Wege; ich konnte mich also des Kautschuks bedienen, um mir einen Begriff zu machen über den ungefähren Werth der Zahlen, die ich bei dem Muskel erwarten konnte. Die elastische Nachwirkung war zwar auch beim Kautschuk ziemlich gross, aber sie war nie so störend wie bei dem Muskel, erstens weil sie viel langsamer und bei viel höheren Gewichten vor sich ging, und zweitens weil es immer eine Möglichkeit war sie abzuwarten, was bei dem Muskel nicht der Fall ist.

Ich nahm also einen Kautschukstreifen von der Dicke und Länge des Sartorius eines Frosches, da ich mit diesem Muskel experimentirte und da habe ich nach Einwirkung höherer Temperatur anstatt der erwarteten Zusammenziehung — Dehnung eintreten sehen.

Die Ursache dieses, dem Joul'schen geradezu entgegengesetzten Resultates habe ich gefunden in den kleinen Gewichten, die ich analog denjenigen bei den Muskelversuchen brauchte. Als ich in der That genau den Joul'schen Versuch wiederholte, d. h. ein Gewicht brauchte, durch welches das Streifchen ungefähr auf das Doppelte gedehnt wurde, habe ich bei Einwirkung einer höhern Temperatur constant Zusammenziehung eintreten gesehen. Es zeigte sich also, dass die Zusammenziehung (resp. Dehnung) des Kautschuks bei höheren (resp. niedern) Temperaturen von der Spannung, unter welcher der Streifen sich befindet, abhängt, und zwar wird

1) jeder Kautschukstreifen (Röhre, Strang), wenn wir von einer gewissen mittleren Temperatur ausgehen, bei Einwirkung höherer Temperatur gedehnt, und bei niederer zusammengezogen — wenn er wenig belastet ist; und im Gegentheil bei höherer Temperatur zusammengezogen und bei niederer gedehnt, wenn er viel belastet ist. — Als unmittelbare Folge dieses ersten Satzes liess sich noch folgender aufstellen.

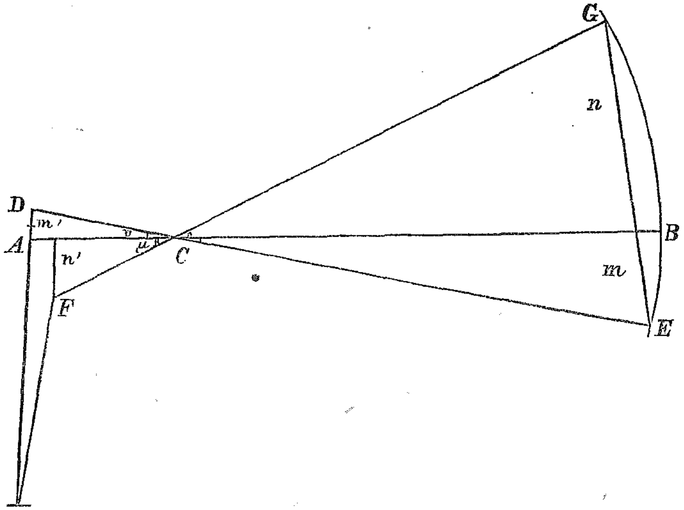
2) Zwischen den verschiedenen Belastungen existirt für jeden Streifen (Röhre, Strang) eine Grenzbelastung, bei welcher ihn höhere oder niedere Temperaturen weder dehnen, noch zusammenziehen.

Um diese Erscheinungen genauer zu studiren und besonders um sich von der Richtigkeit dieses zweiten a priori gestellten Satzes zu überzeugen, stellte ich Versuche mit folgendem, von Herrn Professor Fick eigentlich zur Untersuchung des Muskels construirten Apparate auf.

An einem festen Balken war ein genau equilibrirter Hebel angebracht, dessen einer kürzerer Arm einen Einschnitt in der Entfernung von 10^{mm} vom

Drehpunkte hatte; in diesem Einschnitte wurde ein Hacken mit zugeschärftem unterm Rande eingehängt; an diesem Hacken wurde das obere Ende des Streifens befestigt. Das untere Ende wurde am Boden eines metallenen Gefässes befestigt, welches mittelst einer Schraube in beliebiger Höhe auf einem mit dem Balken verbundenen senkrechten Stabe befestigt werden konnte, so dass das Centrum des Gefässes, wo der Hacken für das untere Ende war, und der Einschnitt auf dem kürzern Arme des Hebels, auf einer vertikalen Linie lagen. Auf diesem Stabe war eine Eintheilung in Millimètres, welche ich in meinen Versuchen die kleine Scala nennen werde, aufgetragen, so dass man ablesen konnte, um wie viel man das Gefäss höher oder niedriger gestellt hat. Das Gefäss selbst war 146^{mm} hoch und 30^{mm} im Durchmesser, so dass ein Streifen von 100^{mm} schon ungefähr auf die Hälfte seiner Länge gedehnt werden konnte, ohne aus dem Gefässe hervorzuragen. Die Befestigung der beiden Enden des Kautschukstreifens geschah mittelst metallener Klemmplatten von der Breite des gebrauchten Streifens und von 7^{mm} Länge. Auf dem anderen 591^{mm} langen Arme des Hebels war in einem 100^{mm} vom Drehpunkte entfernten Einschnitte ebenfalls ein Hacken mit einer Schneide eingehangen, welcher die Schale mit den Gewichten trug. Da also die Last auf den um das Zehnfache längeren Arm wirkte, so ist in meinen Versuchen als die wirkliche Spannung des Kautschuks diejenige anzunehmen, welche den zehnfachen dort angegebenen Belastungen entspricht. Die Bestimmung der wirklichen Grössen der Dehnung oder Zusammenziehung wurden einfach so ausgeführt, dass weit weg (591^{mm}) vom Drehpuncte des Hebels eine senkrechte in Mm. getheilte Scala, die ich die grosse nennen werde, aufgestellt war, vor welcher der Hebel spielte. Die Anzahl Scalentheile, welche bei der Längenänderung des Kautschukstranges der Zeiger passirte, wurde noch einfach mit $^{10}/_{591}$ multiplizirt und das Product für die Längenänderung genommen. Dass damit keine merkliche Fehler begangen wurden, wird folgende kurze Betrachtung klar machen:

Gesetzt AB wäre der horizontale Stand des Zeigers, DE seine Lage bei dem Anfange irgend eines



Versuches, FG seine Lage bei dem Ende dieses Versuches, so dass der Streifen sich um $\nu = m' + n'$ contrahirte. Da aber

$$m' = 10 \sin \nu$$
$$\text{und } n' = 10 \sin \mu$$
$$\text{so ist } \nu = m' + n' = 10 (\sin \nu + \sin \mu).$$

Diese Sinusen lassen sich berechnen aus den Tangenten, die uns aus den Gleichungen

$$tg\ \nu = \frac{m}{591}$$

$$tg\ \mu = \frac{n}{591}$$

bekannt sind. Wollen wir annehmen, dass $m = 20$ und $n = 30$ ist, dann haben wir

$$tg\ \nu = \frac{20}{591} \text{ woher } log tg\ \nu = 8{,}530$$

$$tg\ \mu = \frac{30}{591} \text{ woher } log tg\ \mu = 8{,}705$$

Da die Logarithmen der betreffenden Sinuse dieselben Grössen sind: so haben wir

$$log\ m' = 0{,}530 - 1 \text{ woher } m' = 0{,}338$$
$$log\ n' = 0{,}705 - 1 \text{ woher } n' = 0{,}507.$$

Wenn wir unsere Grössen m' und n' einfach bestimmen aus den Proportionen:

$$m' : AC = m : BC \text{ woher } m' = \frac{10.\,20}{591} = 0{,}338$$

$$n' : FC = n : BC \text{ woher } n' = \frac{10.\,30}{591} = 0{,}507$$

so bekommen wir bis auf ein Tausendstel genau dieselben Grössen. Da in meinen Versuchen die Ablenkung nie 50 Theilstriche der grossen Scala übertroffen, so konnte ich mich bei der Berechnung der Grössen des einfachen Verhältnisses der Länge der Aerme benutzen.

Die Regulirung der Temperatur wurde folgendermassen ausgeführt; neben dem Apparate wurden 2 Gefässe auf hohen Stativen aufgestellt; mittelst Eises und Erwärmens waren die Temperaturen des Wassers in den Gefässen constant auf 3 — 5° und auf 70 — 80° Cels. gehalten. Die hohe Stellung dieser Gefässe war die Ursache, dass das Niveau des Wassers in ihnen immer höher war, als in dem Gefässe des Apparates, mit welchem sie mittelst Hebel und Kautschukröhrchen communicirten. An diesem Kautschukröhrchen wurden Klemmpincetten angebracht, durch deren Oeffnen und Schliessen man jede beliebige Temperatur im Gefässe der Apparates erhalten konnte.

Aus einer grossen Anzahl von Versuchen will ich hier nur diejenigen mittheilen, die nothwendig sind, um die besprochenen Sätze zu bestätigen:

I. Versuch mit einem Röhrchen von 103mm. Länge und 5,5mm. Durchmesser, die Wand war 1mm. dick. Die Grössen sind alle in Millimètres angegeben.

Scalen.		Temperatur.	Last in Grammen auf der Schale.	Zeit.	Verlängerung				Verkürzung				Wirkliche Länge.	Gebliebene elastische Nachwirkung	
Kleine.	Grosse.				in Scalentheilen.	wirkliche	totale.	auf 1°	in Scalentheilen.	wirkliche.	totale.	auf 1°		in Scalentheilen.	wirkliche.
56	136	18	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103	—	—
58	131	16.6	3,2	$8^h3'$	—	—	—	—	—	—	—	—	105,085	—	—
—	130	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	125	26	—	—	5	0,08	—	—	—	—	—	—	105,165	—	—
—	118	37	—	—	7	0,12	—	—	—	—	—	—	105,285	—	—
—	107	48	—	—	11	0,19	—	—	—	—	—	—	105,475	—	—
—	111	37	—	—	—	—	—	—	4	0,07	—	—	105,405	—	—
—	117	27	—	—	—	—	—	—	6	0,1	—	—	105,305	—	—
—	125	19	—	—	—	—	—	—	8	0,14	—	—	105,165	—	—
—	128	16,2	—	$8^h16'$	—	—	—	—	3	0,05	—	—	105,115	—	—
»	»	»	—	»	»	»	0,39	0,012	—	—	0,36	—	—	2	0,03
64	137	17,6	13,2	$9^h12'$	—	—	—	—	—	—	—	—	111,015	—	—
—	136,5	17,8	—	– 15′	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	133	27	—	—	3,5	0,06	—	—	—	—	—	—	111,075	—	—
—	129	37	—	—	4	0,07	—	—	—	—	—	—	111,145	—	—
—	125	48	—	—	4	0,07	—	—	—	—	—	—	111,215	—	—
—	124	46	—	—	1	0,015	—	—	—	0,035	—	—	111,23	—	—
—	126	38	—	—	—	—	—	—	2	0,03	—	—	111,195	—	—
—	129	27	—	—	—	—	—	—	3	0,05	—	—	111,145	—	—
—	135	19,2	—	$9^h25'$	—	—	—	—	6	0,105	—	—	111,04	—	—
»	»	»	»	»	»	»	0,215	0,007	—	—	0,19	—	—	1,5	0,035
67	137	17,8	$17^h8'$	$10^h5'$	—	—	—	—	—	—	—	—	114,05	—	—

Scalen. Kleine.	Scalen. Grosse.	Temperatur.	Last in Grammen auf der Schale.	Zeit.	Verlängerung in Scalentheilen.	Verlängerung wirkliche.	Verlängerung totale.	Verlängerung auf 1°	Verkürzung in Scalentheilen.	Verkürzung wirkliche.	Verkürzung totale.	Verkürzung auf 1°	Wirkliche Länge.	Gebliebene elastische Nachwirkung in Scalentheilen.	Gebliebene elastische Nachwirkung wirkliche.
—	137	—	—	$10^{h}15'$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136,75	27	—	—	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136,75	37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136	48	—	—	0,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136	38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	136	19	—	$10^{h}25'$	—	—	—	—	—	—	—	—	114,07	—	—
»	»	»	»	»	»	»	»	0	—	—	—	0	—	1	0,02
71	152	19,2	23	$11^{h}12'$	—	—	—	—	—	—	—	—	117,816	—	—
—	151	—	—	- 15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	153	30	—	—	—	—	—	—	2	0,035	—	—	117,781	—	—
—	158	40,8	—	—	—	—	—	—	5	0,085	—	—	117,696	—	—
—	162	50,6	—	—	—	—	—	—	4	0,07	—	—	117,626	—	—
—	160,5	39,4	—	—	1,5	0,03	—	—	—	—	—	—	117,656	—	—
—	157,5	29,8	—	—	3,	0,06	—	—	—	—	—	—	117,716	—	—
—	149	21,2	—	$11^{h}22'$	6,5	0,07	—	—	—	—	—	—	117.786	—	—
»	»	»	»	»	»	»	0,16	»	»	»	0,19	0,006	—	2	0.03
75	136	19,8	28	$12^{h}5'$	—	—	—	—	—	—	—	—	122,056	—	—
—	135	—	—	- 7′	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	145	30	—	—	—	—	—	—	10	0,16	—	—	121,806	—	—
—	156	40	—	—	—	—	—	—	11	0,175	—	—	121,721	—	—
—	167	50	—	—	—	—	—	—	11	0,175	—	—	121,546	—	—
—	151	40	—	—	16	0,26	—	—	—	—	—	—	121,806	—	—
—	140	30	—	—	11	0,175	—	—	—	—	—	—	121,281	—	—
—	130	23	—	- 12′	10	6,16	—	—	—	—	—	—	122,141	—	—
,,	»	»	—	»	»	»	0,595	—	—	—	0,51	0,02	—	5	0,085

Dieser Versuch zeigt also

1) Dass das Röhrchen unter Belastungen niedriger als 178 Gramm bei Einwirkung höherer Temperaturen länger wird, und zwar desto mehr, je kleiner die Belastung ist; so ist bei 30 Gr. die Verlängerung für 1° gleich 0,012, während sie bei 130 Gr. nur 0,007 gleich ist; bei Belastungen aber höher als 178 Gr. wird es bei Einwirkung höherer Temperatur kürzer, und zwar ist die Verkürzung desto grösser, je grösser die Belastung ist, so ist die Verkürzung bei 230 Gr. für 1° = 0,006, während für 280 sie 0,02 ist. Die Verlängerungen, wie die Verkürzungen sind desto grösser, je höher die gebrauchten Temperaturen sind.

2) Dass bei 178 Gramm Belastung die Länge des Röhrchens für alle Temperaturen dieselbe ist. Die Zahlen liessen sich sehr gut versinnlichen in der graphischen Darstellung (Taf. I., zu welcher die Zahlen ohne Klammern gehören), wo ich nur die Verlängerungen und Verkürzungen bei Einwirkung höherer Temperaturen und die Verlängerungen bei Belastungen dargestellt, die Länge aber des Röhrchens selbst nicht mit begriffen habe.

Noch einige Bemerkungen zu diesem Versuche müssen hinzugefügt werden:

a) Den rückgängigen Process bei der Abkühlung des Kautschuks habe ich hier angebracht um zu zeigen, dass es nie vollkommen die frühere Länge erreicht, wenn es zur Temperatur zurückgekehrt, von welcher aus der Versuch begonnen war. Die Ursache dieses Erscheinens ist die elastische Nachwirkung.

b) Die elastische Nachwirkung scheint nämlich einen neuen Stoss zu bekommen mit der Erhöhung der Temperatur, so dass, wenn man sie auch so sorgfältig abgewartet hatte, wie ich es in meinen Versuchen that, sie dennoch zum Erscheinen kommt; natürlich ist sie desto grösser, je grösser die Last und je schneller nach der Belastung man den Versuch anfängt.

c) Die Verschiedenheit der Länge bei denselben Temperaturen und Belastungen, wie bei dem Versuche mit 132 Gr. bei 27°, oder bei dem Versuche mit 280 Gr. bei den Temperaturen 30 und 40, sowie das Fortdauern des Processes im Sinne der Erhöhung der Temperatur, während das Thermometer schon sinkt — will nur andeuten, dass die Erwärmung wie die Abkühlung im Kautschuk langsamer statt finden, als im Quecksilber des Thermometers.

d) Die Temperatur wurde nie höher, als bis 50° gesteigert, weil das Kautschuk in einer Temperatur über 50° bleibende Veränderung (und zwar Dehnung) erleidet.

Das untere Ende des Röhrchens wurde befestigt am Boden des Gefässes mittelst eines Hackens, welcher zwischen zwei runde Klötzchen, die gerade in die Oeffnung des Röhrchens passten, eingebunden war. In das obere Ende wurde ein Glasröhrchen von etwas kleinerem Durchmesser so eingebunden, dass es aus dem Gefässe hervorragte und mit der freien Luft communicirte. Diese Massregel wurde mir von Hrn. Prof. Fick empfohlen, dass sich nicht ein abgeschlossener Raum voll Luft bilde, deren Spannungsänderung bei der Erwärmung schon an und für sich die Länge des Röhrchens modificiren könnte. Um dieses Glasröhrchen wurde ein Hacken von dünnem Draht umgebunden, mittelst welchem das obere Ende im Hacken des Hebels angehängt wurde.

Da das untersuchte Röhrchen 103^{mm} lang war und die Last, bei welcher es dieselbe Länge für alle Temperaturen hat, es um 10,02^{mm} dehnt, so ergiebt sich, wenn wir die Länge bei der Spannung, 2 Gr., als natürliche annehmen (von der Nothwendigkeit als natürliche Länge diejenige anzunehmen, welche wir unter einer gewissen minimen Spannung bekommen, haben sich schon alle Forscher, welche über Elasticität gearbeitet, überzeugt), als Grenzspannung diejenige, bei welcher Temperaturänderungen die Länge des Prismas nicht ändern, welche den Körper auf 0,097 seiner Länge dehnt. Um zu sehen, ob diese Zahl eine allgemeine Gültigkeit hat, habe ich Versuche angestellt mit Kautschuk verschiedener Art und Gestaltungen, Streifen, Stränge und Röhrchen. So habe ich bei einem runden Strang von 82,5^{mm} Länge und 7^{mm} Durchmesser als Grenzspannung — welche hier 300 Gr. war — diejenige gefunden, welche den Strang auf 0,102 seiner Länge gedehnt.

Etwas grösser ist die Zahl ausgefallen bei einem Streifen; diesen Versuch will ich hier genauer mittheilen, weil ich bei diesem Streifen auch den Einfluss der Dehnung auf die Höhe der Grenzspannung beobachtet habe:

II. Versuch mit einem Streifen von 103mm Länge und 9mm Breite.

Scalen.		Temperatur.	Last in Grammen auf der Schale.	Zeit.	Verlängerung			
Kleine.	Grosse.				in Scalentheilen.	wirkliche.	totale.	auf 1°
40	130	6	0,2	3h,5′	—	—	—	—
—	129	—	—	3h,10′	—	—	—	—
—	127	10	—	—	2	0,035	—	—
—	124	20	—	—	3	0,05	—	—
—	123,25	21	—	—	—	—	—	—
—	121	30	—	- 13′	—	—	—	—
—	120	30	—	- 14′	4	0,07	—	—
—	117,5	40	—	- 16′	—		—	—
—	117	—	—	- 18′	3	0,05	—	—
—	115,5	50		—	—	—	—	—
—	115	—	—	3h,19′	2	0,035	—	—
—	—	—	—	—	—	—	0,24	0,0055
43	153	6,2	1,2	- 23′	—	—	—	—
—	152	10	—	—	1	0,017	—	—
—	148	20,5	—	—	4	0,017	—	—
—	144,5	30	—	—	3,5	0,063	—	—
—	140,5	40	—	- 28′	4	0,07	0,16	0,0047
51	147	6,6	3,2	- 35′	—	—	—	—
—	146,75	—	—	- 37′	—	—	—	—
—	146	—	—	- 39′	—	—	—	—
—	145	12	—	—	1	0,0175	—	—
—	144	20	—	—	1	0,0175	—	—
—	143	30	—	—	1	0,0175	—	—
—	142	40	—	- 45′	1	0,0175	—	—
»	»	»	»	»	»	»	0,70	0,0021
54	171	4,6	4	4h,35′	—	—	—	—
—	170	12	—	—	—	—	—	—
—	169	21	—	—	—	—	—	—

Scalen.		Temperatur.	Last in Grammen auf der Schale.	Zeit.	Verkürzung			
Kleine.	Grosse.				in Scalentheilen.	wirkliche.	totale.	auf 1°
—	169	30,4	—	—	—	—	—	—
—	169	40	—	—	—	—	—	—
—	169	50	—	4,h38′	—	—	0	—
54	88	6,2	4,2	4,h47′	—	—	—	—
—	87,5	—	—	- 40′	—	—	—	—
—	87	12	—	- 51′	—	—	—	—
—	88	20	—	—	1	0,015	—	—
—	90	30	—	—	2	0,03	—	—
—	92	40	—	—	2	0,03	—	—
—	94	50	—	- 55′	2	0,003	—	—
—	»	»	»	-	—	—	0,105	0,0024
64	130	6	6,2	5,h20′	—	—	—	—
—	131,5	6	—	22′	—	—	—	—
—	135	12	—	—	3,5	0,065	—	—
—	137	13	—	—	2	0,035	—	—
—	145	20	—	—	8	0,14	—	—
—	136	30	—	—	18	0,315	—	—
—	176	40	—	- 30′	13	0,24	—	—
»	»	»	»	»	»	»	0,795	0,023

Aus diesem Versuche ist also zu sehen, dass für den untersuchten Streifen als Grenzspannung — die hier gleich 40 Gramm war, und den Streifen auf 13,306^{mm} dehnte — diejenige Last zu betrachten ist, welche den Streifen auf 0,129 seiner Länge dehnt, was mit den Zahlen für den Strang und das Röhrchen um 0,027 bis 0,03 differirte. Der grösste Theil dieser Differenz wird aber wahrscheinlich in der verschiedenen Beschaffenheit des Kautschuks seinen Grund haben. Von entschiedenem Einfluss auf die Höhe der

Grenzspannung ist die Dehnung, unter welcher das Kautschuk vor dem Versuche sich befand. So habe ich nach Beendigung des letzten Versuches die 62 Gramm 2 Tage lang hängen lassen, und dann habe ich folgendes bekommen:

III. Versuch mit dem Streifen von Versuch II nach 2-tägiger Belastung mit 62 Gramm.

Scalen.		Temperatur.	Last in Grammen auf der Schale.	Zeit.	Verlängerung		
Kleine.	Grosse.				in scalen-theilen.	wirkliche.	totale.
65	163	16,2	6,2	10h 25′	—	—	—
—	163	—	—	- 35′	—	—	—
—	160	27,6	—	—	3	0,05	—
—	158,5	38	—	—	1,5	0,025	—
—	157	48	—	40′	1,5	0,025	0,1
66	145	17,4	6,5	11h 25′	—	—	—
—	145	27	—	—	—	—	—
—	145	37	—	—	—	—	—
—	144,5	47	—	—	—	0	—

Hier ist also bei derselben Spannung, bei welcher wir im normalen Zustande des Kautschuks schon eine Zusammenziehung von 0,795^{mm} hatten — im gedehnten Zustande noch eine Dehnung von 0,1^{mm} haben; die Grenzspannung liegt also hier viel höher, als im normalen Zustande. Als ich nach 2 Tagen einen Versuch mit demselben Streifen, der diese Zeit unter keiner Spannung war, machte, habe ich dieselben Zahlen, wie in Versuch II bekommen.

Von Einfluss ist auch die Feuchtigkeit des Kautschuks auf die Höhe seiner Grenzspannung, aber in entgegengesetztem Sinne wie das Dehnen. Nach langem Verbleiben im Wasser liegt die Grenzspannung niedriger als im normalen Zustande, und je trockner das Kautschuk desto höher liegt sie.

Herr Prof. Fick erklärt dieses verschiedene Verhalten des Kautschuks zur Wärme bei verschiedenen Spannungen dadurch, dass er die Wirkung der höheren Temperatur als ein Resultat ihrer Wirkung, erstens auf die natürliche Länge des Kautschuks, und zweitens auf die Grösse der Elasticität, betrachtet.

Wenn wir in der That die Länge eines gegebenen Kautschukstreifens bei Einwirkung höherer Temperaturen als eine Funktion zweier Grössen betrachten, deren eine die Länge in Folge der Einwirkung auf die natürliche Länge des Streifens, die andere die Länge in Folge der vergrösserten oder verkleinerten Elasticität, so können folgende Fälle aufgestellt werden:

1) Die natürliche Länge und die Elasticität werden beide kleiner.

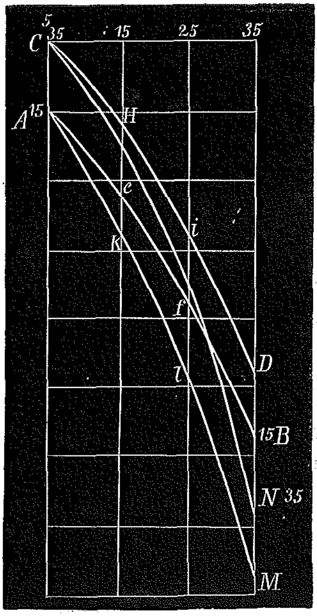
2) Die Elasticität wird grösser und die natürliche Länge wird kleiner.

3) Die Elasticität wird kleiner und die natürliche Länge wird grösser.

4) Die Elasticität und die natürliche Länge werden beide grösser.

In dem ersten Falle, wo die natürliche Länge und die Elasticität beide kleiner werden in Folge der höheren Temperatur, hätten wir, wenn wir die Längen als Ordinaten auf die Spannungen als Abscissen auftragen für 15° z. B. die Curve *AB* (dass die Curve diese Form haben wird, werde ich später beweisen)*). Wenn wir nun eine höhere Temperatur einwirken lassen, so wäre, wenn nun die natürliche Länge kleiner würde und die Elasticität bliebe dieselbe, die Länge des Streifens bei 5 Gr. etwa um *Ae* kleiner, bei 15 um *eH*, bei 25 um *Fi* und so weiter, so dass die zweite Curve *CD* nahezu parallel zur ersten wäre; wenn weiter nur die Elasticität kleiner würde, bei gleichbleibender natürlicher Länge, so wäre die Länge des Streifens bei 5 dieselbe, bei 15 etwa um *eK*, bei 25 um *fl* grösser, und so fort, so dass die Curve *AM* steiler als *AB* wäre und ebenfalls von *A* ausginge.

Fig. 2.

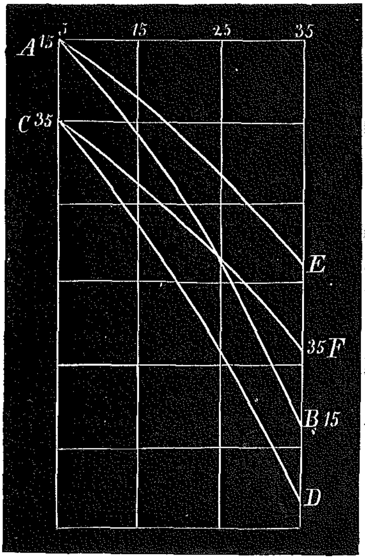


Wenn aber nach unserer Annahme beides zusammen stattfindet, so wird die wirkliche Curve eine mittlere der beiden Curven *CD* und *AM* sein. Diese Curve *CN* wird offenbar die Curve *AB* (welche für 15° gilt) schneiden können, und das bedeutet, dass der Streifen bei Einwirkung höherer Temperatur bei niederen Spannungen kürzer, bei höheren dagegen länger wird, was den Ergebnissen obiger Versuche widerspricht. Dieser Fall muss also angeschlossen werden.

*) Auch in dieser Darstellung wird 1) die Länge des Kaoutschuks nicht einbegriffen und 2) die Länge unter der Spannung 5 Gr. als die natürliche angenommen.

Auf ähnliche Weise könnte ich auch nachweisen, dass der 2. und 3. Fall, wo eine der Grössen kleiner und die andere grösser wird, auch nicht zur Erklärung der obigen Thatsachen genügen. Es bleibt also noch ein möglicher die obigen Versuche auf das Vollkommenste erklärender Fall, nämlich derjenige: Dass bei Einwirkung höherer Temperaturen die natürliche Länge und die Elasticität beide grösser werden. Wenn wir für 15° z. B. die normale Curve *AB* haben, so wird die Curve für die vergrösserte natürliche Länge ungefähr *CD* sein; die Curve für die vergrösserte Elasticität wollen wir als *AE* annehmen;

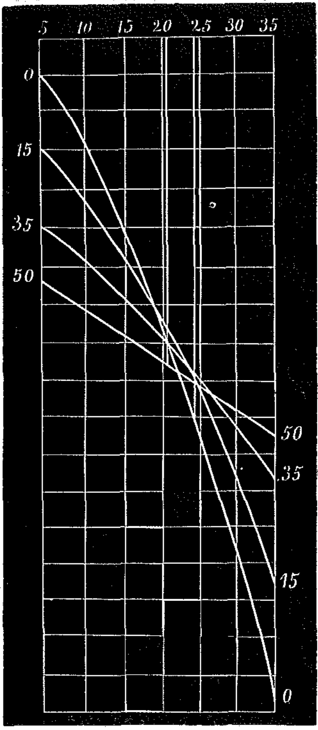
Fig. 3.



die algebraische Summe der Grössen dieser beiden Curven wird *CF* geben, welche offenbar *AB* schneidet; und das bedeutet, dass der Streifen bei Einwirkung höherer Temperatur bei niederen Belastungen länger, bei hohen Belastungen dagegen kürzer wird, was auch das richtige ist.

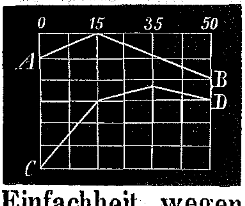
Jetzt liegt nahe die Frage: Wie wird sich der Streifen, der bei 15° bei den angezeigten Belastungen die Curve *AB* (Fig. 3), bei 35 *CF* gibt, bei den übrigen Temperaturen (wollen wir annehmen, bei 0° und 50°) verhalten? Es könnten zwei Möglichkeiten vorkommen:

Fig. 4.



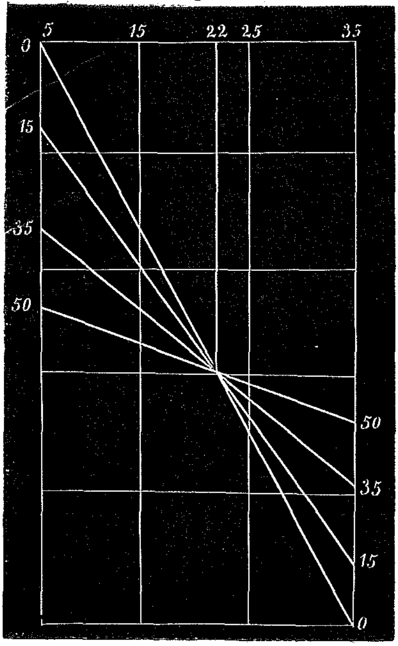
1) Die Curven für die verschiedenen Temperaturen schneiden sich in verschiedenen Punkten, wie es in der beistehenden Figur 4 dargestellt ist. Wenn wir uns die Länge eines Streifens, bei verschiedenen Temperaturen für irgend eine Last, die zwischen dem ersten und letzten Kreuzungspunkte liegt, graphisch darstellen wollen, indem wir die Längen als Ordinaten auf die Temperaturen als Abscissen auftragen, so werden wir eine krumme Linie erhalten, deren höchster Punkt irgendwo im Verlaufe der Linie sich befindet, das heisst der Streifen wird am kürzesten sein bei einer mittleren Temperatur. So hätten wir für 21° (wie es aus der Fig. 5 leicht einzusehen ist) die Curve *AB*, für 24° die Curve *CD*.

Fig. 5.



2) Die Dehnungscurven für alle Temperaturen schneiden sich in ein und demselben Punkte, wie es auf der Figur 6 ganz willkürlich dargestellt ist, wobei die Dehnungscurven der Einfachheit wegen als gerade Linien angenommen sind. In diesem Falle müssten wir für jede beliebige

Fig. 6.



Last — ausser der Grenzspannung — für alle Temperaturen eine beständig auf- oder absteigende krumme Linie erhalten, das hätte also bedeutet, dass der Streifen am kürzesten wäre bei 0° oder bei 50°. Die graphische Darstellung des ersten Versuchs zeigt, dass die zweite Möglichkeit die richtige ist. Ich habe dieses Schneiden der Curven für alle Temperaturen in einem Punkte, nach den Zahlen des ersten Versuches graphisch darzustellen gesucht, aber es war schwer zu erreichen: Die Vergrösserung müsste enorm sein, damit die Curven nicht eine Strecke weit um den Durchschnittspunkt herum in eine Linie zusammenfallen.

Zur Unterstützung der Meinung, dass die Elasticität bei Erhöhung der Temperatur im Kautschuk wirklich grösser wird, kann noch folgendes Raisonnement dienen:

Aus dem Umstande, dass Metalle und Holz bei kleineren Belastungen eine kleinere Dehnung für 1° Wärme (resp. Zusammenziehung für 1° Kälte) geben als bei grösseren Belastungen, hat Joule den Schluss gezogen, dass die Elasticität bei höheren Temperaturen verkleinert wird. Er hat auch die Richtigkeit dieses Schlusses durch direkte Versuche bewiesen. Wenn also Metalle und Holz, bei deren mechanischen Dehnung Wärme verschwindet, bei höherer Temperatur weniger elastisch werden, so ist mit Wahrscheinlichkeit zu behaupten, dass Kautschuk, bei dessen Dehnung Wärme erzeugt wird, bei höherer Temperatur eine grössere Elasticität bekommt. Um durch direkte Versuche diesen Satz zu beweisen, ist das Kautschuk ein zu unbeständiges Material. Ich habe bei zwei hintereinander folgenden Versuchen bei derselben Temperatur grössere Differenzen gefunden, als bei eben solchen 2 Versuchen bei verschiedenen Temperaturen.

Ich will hier noch eine merkwürdige Eigenthümlichkeit des Kautschuks mittheilen, vermöge welcher sich der Kautschuk und der Muskel hinsichtlich der Verlängerungen bei Dehnungen entgegengesetzt verhalten. Es ist nämlich durch die Versuche von Weber *) und Wertheim **) festgestellt worden, dass, wenn die Verlängerungen als Ordinaten auf die Lasten als Abscissen aufgetragen sind, man für das Muskelgewebe eine Curve von der Formel

$$y^2 = ax^2 + bx$$

erhält, welche der einer Hyperbel, deren Spitze im Anfang eder Coordinaten liegt, sehr ähnlich ist. Für das Kautschuk verhält sich diese Curve entgegengesetzt, so dass, wenn wir für den Muskel die Curve als eine gegen die Abscissenaxe concave Hyperbel betrachten

*) Poggendorf's Annalen. Tome LIV. Seite 1.

**) Annales de Chimie et Physique. 3e Serie. Tome 21. Seite 385.

sie für den Kautschuk eine gegen die Abscissenaxe convexe Hyperbel wird, vorausgesetzt, dass wir auf derselben Seite der Coordinaten bleiben. In anderen Worten: **Bei dem Kautschouk wachsen die Verlängerungen rascher als die Belastungen**, und zwar scheinen hier die Verlängerungen sich noch in grösserem Maasse zu vergrössern mit den steigenden Gewichten, als sie sich beim Muskel verkleinern. Die punktirte Curve auf der Tafel, zu welcher die Zahlen in Klammern gehören, ist construirt auf Grund zweier Versuche bei derselben Temperatur (19°). Diesen mittleren Versuch will ich hier mittheilen.

Länge vor der Belastung.	Scalen.		Last in Grammen	Temperatur.	Verlängerung		Länge nach der Belastung.
	Kleine	Grosse			für jede 10 Gramm	Totale	
103	39	133	5	19,5	—	—	—
»	41	131	15	»	2,04	—	105,04
»	44	142	25	»	2,81	4,85	107,85
»	47	134	35	»	3,14	7,99	110,99
»	51	142	45	»	3,86	11,85	114,85
»	55	103	55	»	4,66	16,51	119,51
»	60	93	65	»	5,16	21,67	124,67

Dass dieses rasche Steigen der Verlängerung im Verhältniss zu der Belastung nicht etwa nur dadurch zum Erscheinen kommt, dass der Querschnitt abnimmt, der Streifen dünner wird, kann nächstfolgende Tabelle beweisen. Ich habe dort nämlich die Verlängerung auf eine Längeneinheit, das Wertheim'sche δ für die mittlere Grösse zwischen je 2 Versuchen bestimmt, dann habe ich mittelst Proportionen aus den Wertheim'schen Tabellen die zu diesen δ

passenden β, das heisst die Zahlen, welche die Verminderung der Dicke und Breite bedeuten, aufgesucht, wobei ich mich natürlich der möglichst nahe liegenden Zahlen bediente. Die jetzt also bekannten β gaben die Möglichkeit, die Dehnbarkeit für alle mittleren Grössen, auf die Querschnittseinheit reducirt, auszurechnen, wobei ich Q als eine constante Grösse für den natürlichen Querschnitt in allen Ausdrücken behielt.

L	Last in Grammen.	Dehnung für jede 10 Gramm.	δ	β	D	L'
103	5	—	0,0099	0,0065	Q. 0,0187	—
»	15	2,04				105,04
»	25	2,81	—	—	—	107,85
»	35	3,14	0,0963	0,03	Q. 0,028	110,99
»	45	3,86				114,85
»	55	4,66	0,185	0,65	Q. 0,034	119,51
»	65	5,16				124,67

L bedeutet in der Tabelle die Länge vor der Belastung, L' nach der Belastung, D die Dehnbarkeit für die mittleren Grössen zwischen 2 L', neben welchen sie gestellt ist. Obwohl diese Rechnung nicht streng richtig ist, da wir hier voraussetzen, dass die Dehnungen den Gewichten proportional sind, können wir doch auf Grund ihrer Resultate behaupten, dass die Verlängerungen wirklich rascher wachsen als die Belastungen, unabhängig von dem Querschnitt, denn sonst müssten alle Zahlen unter D gleich sein.

Schliesslich halte ich es für meine angenehme Pflicht hier dem Herrn Prof. Fick, der mir immer mit Rath und That bei dieser Arbeit beigestanden war, meinen innigsten Dank auszusprechen.