



<https://www.biodiversitylibrary.org/>

**Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche
Medicin**

Berlin, G. Eichler, [1834-1876]

<https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/51384>

Jahrg. 1874: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/109143>

Article/Chapter Title: Erster Beitrag zur Analyse der Zuckungswelle

Author(s): Jendrassik Jen

Subject(s): fiziológus

Page(s): Page 513, Page 514, Page 515, Page 516, Page 517, Page 518, Page 519, Page 520, Page 521, Page 522, Page 523, Page 524, Page 525, Page 526, Page 527, Page 528, Page 529, Page 530, Page 531, Page 532, Page 533, Page 534, Page 535, Page 536, Page 537, Page 538, Page 539, Page 540, Page 541, Page 542, Page 543, Page 544, Page 545, Page 546, Page 547, Page 548, Page 549, Page 550, Page 551, Page 552, Page 553, Page 554, Page 555, Page 556, Page 557, Page 558, Page 559, Page 560, Page 561, Page 562, Page 563, Page 564, Page 565, Page 566, Page 567, Page 568, Page 569, Page 570, Page 571, Page 572, Page 573, Page 574, Page 575, Page 576, Page 577, Page 578, Page 579, Page 580, Page 581, Page 582, Page 583, Page 584, Page 585, Page 586, Page 587, Page 588, Page 589, Page 590, Page 591, Page 592, Page 593, Page 594, Page 595, Page 596, Page 597

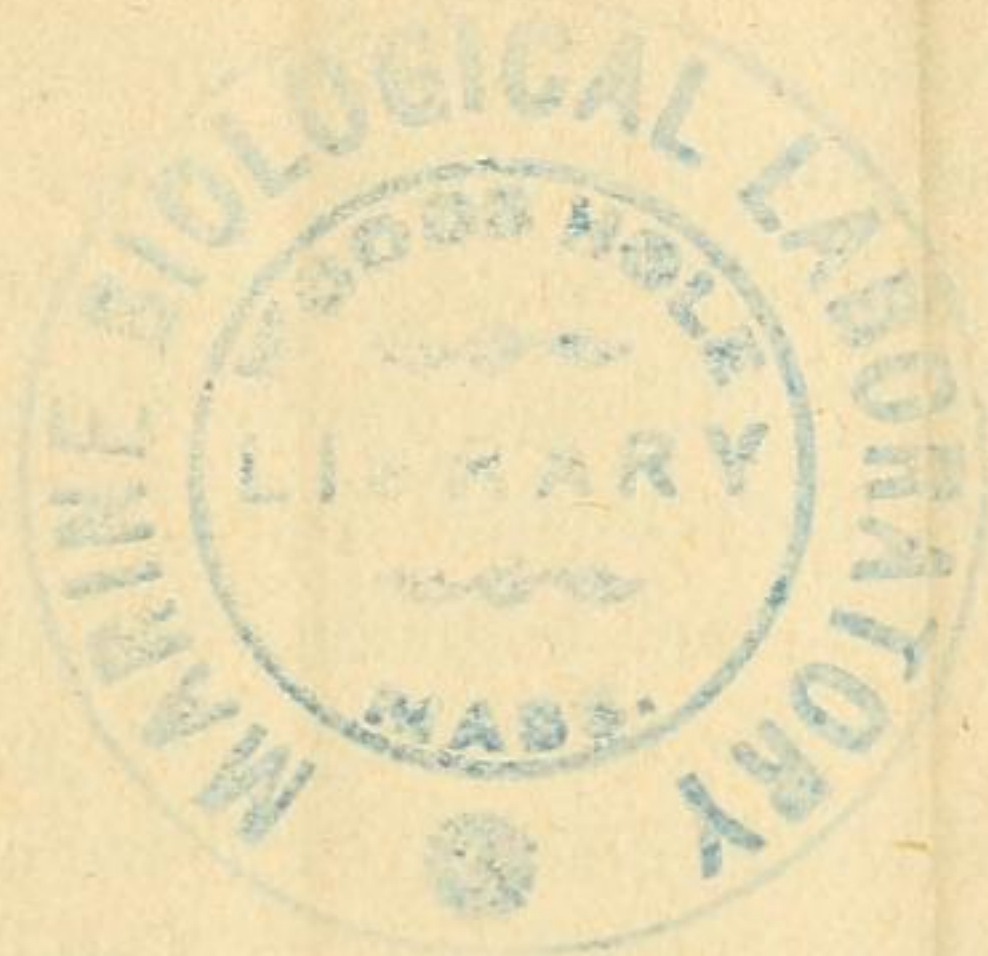
Holding Institution: MBLWHOI Library

Sponsored by: Boston Library Consortium Member Libraries

Generated 21 February 2025 1:00 AM

<https://www.biodiversitylibrary.org/pdf4/1779238i00109143.pdf>

This page intentionally left blank.



Erster Beitrag zur
Analyse der Zuckungswelle der quergestreiften
Muskelfaser.

Von
PROF. A. E. JENDRÁSSIK
in Budapest.

Einleitung.

Auch abgesehen von jenen unzureichenden Beobachtungen, welche den Deutungen der Muskelcontraction von Seiten einiger älterer Autoren (Baglivi, Haller, Dumas, Ficinus, Rudolphi) zu Grunde lagen, müsste schon die zuerst von W. Bowman¹⁾ gemachte Beobachtung jener wellenschlagartig vor- und rückschreitenden Schwankungen, die man an noch lebenden Insectenmuskeln unter dem Mikroskope sehen kann, sowie die später von I. M. Schiff²⁾ an eben getödteten Wirbelthieren wahrgenommenen Contractionswellen, eine solche Auffassung der Muskelzuckung veranlassen, wonach dieselbe ein Vorgang sei, der von bestimmten Punkten ausgehend, bei seinem Weiterschreiten entlang der Faser, immer neue und neue Schichten ergreift, während vorher ergriffen gewesene wieder ihre Ruhelage zurückgewinnen; dass also jede

1) On the minute structure and movements of voluntary muscle. Philosophical Transactions. For the year 1840.

2) Lehrbuch der Physiologie des Menschen. I. Bd. Lahr 1858.
Reichert's u. du Bois-Reymond's Archiv 1874.

Muskelzuckung ein wellenartig fortschreitender Bewegungsvorgang sei, wie er immer auch in seiner Gesamterscheinung mehr oder weniger zusammengesetzt sein mag, je nach der Zahl und Lage seiner Ausgangspunkte, und der Zeitfolge der ihn erweckenden Impulse.

Einen Angriffspunkt zur strengeren Prüfung der Richtigkeit dieser Ansicht bot zunächst die Untersuchung der Geschwindigkeit dar, mit welcher die Contraction von einer Stelle zur anderen in solchen Muskeln vorschreitet, die vorher mit Curare vergifteten Thieren entnommen waren, bei welchen die Annahme berechtigt erschien, dass nachdem durch das Gift die Nerven, wenigstens auf der extramusculären Strecke ihrer Leitungsfähigkeit beraubt waren, bei örtlich beschränkter Reizung des Muskels selbst, die sich danach einstellende Contraction nur durch die Vermittlung des Muskelfaserinhaltes allein fortgepflanzt werde.

Obgleich nun die Frage betreffs der Ausbreitung der Nervenfasern innerhalb des Sarkolemmaschlauches ihren endgültigen Abschluss in der Histologie bisher noch nicht gefunden hat, so ist doch die Berechtigung jener Annahme insofern eine begründete, als sich aus den bisherigen Untersuchungen ergab, dass der zeitliche Verlauf der Muskelcontraction bei directer und indirecter Reizung ein verschiedener ist; wie aber Bezold¹⁾ zeigte, eine Aenderung dieses Verlaufes bei vergifteten Muskeln nur nach indirectem, nicht aber nach directem Reize sich einstellt; indem nach einem Nervenreiz die Contraction in der ganzen Länge des Muskels an vielen Punkten gleichzeitig eintritt, bei direct auf den Muskel einwirkendem, örtlich beschränktem Reize aber der Ausgangspunkt der Contraction die unmittelbar gereizte Stelle allein ist, und zwar wie Aeb y²⁾ und auch Bernstein³⁾ fanden, übereinstimmend bei

1) A. v. Bezold: Untersuchungen über die elektrische Erregung der Nerven und Muskeln. Leipzig 1861.

2) Ch. Aeb y: Untersuchungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in der quergestreiften Muskelfaser. Braunschweig 1862.

3) I. Bernstein: Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Nerven- und Muskelsystem. Heidelberg 1871.

vergifteten, wie bei nicht vergifteten Muskeln; dass aber eine solche von einem localen Reize hervorgerufene Contraction auch dann, wenn sie sich über den ganzen Muskel ausbreitet, keine neuromusculäre im Sinne von Schiff, sondern eine durch den Muskelinhalt fortgepflanzte sei, dies zu bezweifeln liegt um so weniger ein Grund vor, als die von Schiff aufgestellte Lehre, wonach directe Reizung nur die örtlich beschränkte, idiomusculäre Contraction erzeuge, die allgemeine, neuromusculäre Contraction aber nur die Folge einer Nervenreizung sein könne, schon von Kühne¹⁾ als unhaltbar nachgewiesen wurde. Welche Wirkung also auch das Curare auf die letzten Nervenenden ausüben mag, so ist doch ein Mittel in ihm geboten, welches die Ausschaltung des Muskels aus dem Bereich des Nerveneinflusses sichert, so dass der Muskel bei directer örtlich beschränkter Reizung, ebenso der alleinige Leiter für seine Contraction ist, wie der Nerv für seine Erregung.

Hierdurch war die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle ermöglicht.

Diese Bestimmung wurde bisher nach Methoden in Angriff genommen, die so verschieden sie sich auch der Versuchsanordnung nach gestalteten, sich doch alle auf jene Methoden basiren, welche für die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenirregung bahnbrechend Helmholtz angewandt hat; denn alle suchen diese Geschwindigkeit aus der Differenz zu bestimmen, welche sich in der Zeit zwischen dem Reizungsmoment und dem Beginn der Contraction auf einer bestimmten Muskelstrecke entweder bei zwei Zuckungen zeigt, bei deren einer der Ort der Reizung derjenigen Stelle, welche ihre Contraction, sei es durch ihre Längeverkürzung (Bezold, Engelmann) oder durch ihr Dickerwerden (Aeby, Bernstein) anzeigt, näher liegt, bei deren anderer aber davon entfernter ist, oder aber bei einer einzigen Zuckung, aus der Zeitdifferenz, um welche nach erfolgter Reizung jener Contractionsvorgang — als Dickenzunahme — an der dem

1) W. Kühne: Myologische Untersuchungen 1860.

Reizorte näheren Stelle sich früher einstellt als an der davon entfernteren (Aeby).

Aeby¹⁾ hatte am horizontal ausgespannten *M. adductor magn.* des Frosches, dessen eines Ende eingeklemmt, das andere aber frei beweglich und entsprechend belastet war, an zwei in der Entfernung von 12 Mm. befindlichen Stellen, unterhalb welcher der Muskel mittels zwei Elfenbeinblättchen unterstützt war, zwei Fühlhebel angebracht, und liess durch diese auf dem, um seine verticale Axe rotirenden Cylinder des Myographions die Momente aufzeichnen, in welchen nach erfolgter Reizung des beweglichen Muskelendes mittels eines Schliessungsinductionsschlages, die Dickenzunahme an den von den Fühlhebeln berührten Stellen bei der Muskelzuckung begann. Die Entfernung der Anfänge der beiden Dickencurven von dem Punkte der Abscissenaxe, welcher dem Reizungsmomente entsprach, ergab, nach Abzug der Entfernung der Zeichenspitzen von einander, die Zeit, in welcher die Contraction von dem einen Hebel zum anderen fortgeschritten war.

Bezold²⁾ hatte bei zwei nach einander folgenden Zuckungen die Zeit der latenten Reizung am *M. sartorius* des Frosches in der Weise bestimmt, dass bei der einen Zuckung der an seinem oberen Abschnitte zwischen den Elektroden fixirte und durch einen Oeffnungsinductionsschlag gereizte Muskel mittels des unter den Elektroden frei herabhängenden Abschnittes den Zeichenhebel des Myographions nach der Reizung unmittelbar hob; während bei der zweiten Zuckung der Muskel bis zu einer um 6—6.5 Mm. tiefer unter der unteren Elektrode befindlichen Stelle so befestigt war, dass der zwischen den beiden eingeklemmten Stellen befindliche Abschnitt nur die Rolle des Leiters für die Erregung versah, die Hebung des Zeichenhebels aber erst dann erfolgen konnte, wenn sich die Erregung bis zum unteren freigelassenen Abschnitte fortgepflanzt und in diesem die Contraction eingeleitet hatte. Die Zeit für die Fortpflanzung der Erregung entlang der einge-

1) A. a. O.

2) A. a. O.

klemmten Muskelstrecke ergab sich also, mit Berücksichtigung der Länge jener Strecke, durch Subtraction der beiden bei zwei Zuckungen für die latente Reizperiode gefundenen Werthe.

Aehnlich dieser waren auch die sowohl von Bezold als auch von Engelmann¹⁾ zur Entscheidung der Frage angewandten Methoden, inwiefern bei Schliessung oder Oeffnung von constanten Strömen die Erregung von einem und von welchem der Pole ihren Ausgang nimmt. Indem auch hier der obere festgeklemmte Muskelabschnitt nur als Erregungsleiter diene, und der Zeichenhebel sich erst bei der Contraction des unteren beweglichen Abschnittes erhob, konnte sowohl wenn der Muskel in seiner ganzen Länge, als auch wenn er nur in seinem oberen festgeklemmten Abschnitte in auf- und absteigender Richtung nach einander vom Strom durchflossen war, nicht nur jene Frage gelöst werden, sondern sobald die Erregung nur von dem einem der Pole ihren Ausgang nahm, auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit derselben bestimmt werden.

Alle diese Untersuchungen ergaben für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle sehr nahe übereinstimmende Werthe; denn A e b y fand bei kräftigen Muskeln durchschnittlich einen Meter in der Secunde, Bezold 1.21 Meter, Engelmann 1.17 Meter.

Als nun aber später B e r n s t e i n²⁾ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der von ihm als Reizwelle bezeichneten negativen Schwankung des Muskelstromes einer eingehenden Untersuchung unterzog, fand er jene schwankend zwischen 3.663—2.202, im Mittel gleich 2.927 Meter in der Secunde.

Da dieser für die Geschwindigkeit der Reizwelle von Bernstein gefundene Werth fast dreimal grösser ist als der von den vorangehenden Beobachtern für die Geschwindigkeit der Contractionswelle gefundene, so würde folgen, dass die sich um die Zeit der latenten Reizung — (0.01—0.02 Secunden Helmholtz) — nach der Reizwelle einstellende Contractionswelle nicht nur jener erst nachfolgt, sondern hinter derselben

1) Jenaische Zeitschrift Bd. IV. Heft 2.

2) A. a. O.

auch noch mehr und mehr zurückbleibt. Weil nun aber die auf die Contractionswelle bezüglichen Versuche keinen Aufschluss darüber gaben, dass diese mit abnehmender Geschwindigkeit vorschreite, und andererseits die Verschiedenheit der für die Reiz- und Contractionswelle gefundenen Geschwindigkeit möglicherweise auch in den verschiedenen Versuchsbedingungen ihren Grund haben konnte, so fand sich Bernstein veranlasst über die Geschwindigkeit der Contractionswelle von Neuem Versuche anzustellen.

Bei diesen Versuchen lag das aus den beiden Adductoren vom Oberschenkel des Frosches bestehende Muskelpräparat im feuchten Raume auf einer Glastafel; quer auf den Muskel war ein Drahtbügel gesetzt, dessen unteres Ende eine leichte Rolle trug, über welche ein von einem Wirbel ausgehender Faden geleitet war, der am beweglichen Ende mit einem kleinen Gewichte versehen, in Verbindung stand mit dem Schreibhebel. Als solcher diente ein dünner elastischer Eisendraht, der an seinem 18 Mm. vom Angriffspunkte des Fadens entfernten Ende in einem Korkstück eingekittet war, am freien 8.5 Cm. von jenem fixirten Ende entfernten Schreibende aber die durch ein Tröpfchen Kitt befestigte Spitze einer feinen Nähnadel trug, welche auf dem rotirenden Cylinder die Curven der Dickenveränderung des Muskels an der Stelle des aufliegenden Bügels aufzeichnete. Der Muskel lag mit seiner nahe dem oberen Knochenende befindlichen Stelle, über welche der Bügel gelagert war, zwei auf die Glasplatte aufgekitteten, 3 Mm. von einander entfernten Elektroden auf, so dass er durch den Oeffnungsinductionschlag einmal direct an der zeichnenden Stelle gereizt werden konnte, das anderemal aber von den zwei andern Elektroden aus, die nahe dem unteren Knochenende um den Muskel gewickelt waren. Die Entfernung der betreffenden Stellen auf dem Muskel wurde nach beendigtem Versuche — bei einer Belastung des Muskels mit 30 Grm. — vorgenommen, wobei die Stelle des Bügels durch eine durch den Muskel gesenkte Nadel bezeichnet war. Die Entfernung der beiden Curven von einander wurde an den Wendepunkten ihrer aufsteigenden Abschnitte gemessen; da jedoch die Con-

tractionswelle bei ihrem Vorschreiten eine Abnahme ihrer Höhe zeigte, war es nöthig, damit die Höhe der Curven beide-male gleich bleibe, die vom Bügel entfernteren Stellen einer stärkeren Reizung auszusetzen, als die direct zeichnende Stelle des Muskels; falls aber dennoch die Höhen beider Curven kleine noch messbare Unterschiede zeigten, wurde bei der Berechnung eine Correction angebracht, indem annähernd berechnet wurde, wie gross die Entfernung der Curven von einander sein würde, wenn die Höhen beider Curven gleich wären.

Die nach dieser Methode von Bernstein für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle gefundenen Werthe schwankten zwischen 3.226 und 4.385 Meter in der Secunde, waren also im Mittel 3.9 Meter.

Wenn nun auch dieser Werth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle von dem Werthe von 2.9 M. für die Geschwindigkeit der Reizwelle weniger differirt, als von letzterem Werthe der von den früheren Beobachtern für die Geschwindigkeit der Contractionswelle gefundene Mittelwerth von 1 M.; so ist doch jenes Resultat deshalb nicht befriedigend, weil es darauf hinzuweisen scheint, dass die Contractionswelle bei ihrer grösseren Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Reizwelle überhole, was aber noch unwahrscheinlicher als das aus der älteren Annahme folgende umgekehrte Verhältniss erscheint. Da jedoch nach Bernstein die Werthe für die Geschwindigkeit der Reizwelle den Werth von 3 M. häufig übersteigen und umgekehrt die Werthe für die Geschwindigkeit der Contractionswelle häufig von 4 bis nahe auf 3 M. herabsinken, so hält Bernstein die Ansicht für berechtigt, dass die Geschwindigkeit der Reizwelle und der Contractionswelle von Froschmuskeln für jeden einzelnen Fall identisch sei, und nimmt dieselbe zu 3—4 M. in d. Sec. an.

Soweit reichen die Ergebnisse der bisher auf die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle gerichtet gewesenen Untersuchungen. Und wenn gleich die von Bernstein für diese Geschwindigkeit gefundenen Werthe mit den von ihm für die Geschwindigkeit der Reizwelle abgeleiteten Werthen besser harmoniren, als mit letzteren die

älteren Annahmen betreffend die Geschwindigkeit der Contractionswelle, so gewinnen diese wieder dadurch an Bedeutung, dass dieselben von verschiedenen Beobachtern nach verschiedenen Versuchsanordnungen abgeleitet, doch unter sich noch mehr übereinstimmen.

Die auffällige Differenz zwischen diesen beiderseitigen Untersuchungsergebnissen berechtigt darum um so mehr zu neuen Untersuchungen, wo möglich auch auf Grund neuer Methoden, als alle die weiteren Folgerungen, die man theils aus jenen Annahmen, theils aus weiter nach denselben Methoden fortgesetzten Untersuchungen, betreffs der, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle und in weiterer Folge die Gesamtleistung des Muskels unter verschiedenen Verhältnissen beeinflussenden Momente gemacht hat, so lange selbst auf schwankender Grundlage beruhen, bis nicht entschieden ist, inwieweit jene Differenzen nicht auf Versuchsfehlern oder auf Verschiedenheiten der Verhältnisse beruhen, unter welchen der Muskel bei der angewandten Methode stand.

Mit der Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit war aber erst die eine Seite der Contractionswelle in Angriff genommen. Um diese letztere ganz zu erkennen, war noch nöthig, auch die Dauer derselben d. h. die Zeit zu bestimmen, während welcher je ein elementarer Querschnitt des Muskels von der molecularen Veränderung des Contractionsvorganges ergriffen gehalten wird, während über ihn die Welle in ihrer ganzen Länge hinwegschreitet.

Diese, der Schwingungsdauer entsprechende Dauer der Contractionswelle wurde bisher erst von Bernstein¹⁾ einer Untersuchung unterzogen.

Das Mittel dazu gewährte ihm unmittelbar die Dickencurve, welche Aeb y bei seinen Untersuchungen nur in ihrem Anfangsabschnitten aufzeichnen liess, während sie bei Bernstein sich in ihrer ganzen Länge abzeichnete. Falls man von der geringen Breite die der über den Muskel gelegte

1) A. a. O.

Bügel hatte, also davon absieht, dass die vom Bügel gezeichnete Curve nicht streng einem elementaren Muskelquerschnitte, sondern einer gewissen Anzahl solcher entsprach, so konnte der dieser Dickencurvenlänge entsprechende Zeitwerth als die gesuchte Dauer der Contractionswelle angesehen werden.

Bernstein fand für dieselbe Werthe zwischen $0.0533''$ und $0.0984''$, woraus sich dann mit Berücksichtigung der von Bernstein gefundenen Werthe für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle, für diese eine Wellenlänge zwischen 198.5 Mm. und 380.0 Mm. ergibt. Letztere Werthe müssen jedoch schon darum für so lange als zweifelhafte angesehen werden, als die Zweifelhaftigkeit der in denselben als der eine Factor enthaltenen Werthe für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht vollständig behoben ist.

Eine Untersuchung über die Schwingungsweite der Muskelelemente in der Contractionswelle endlich ist bisher noch gar nicht vorgenommen worden.

So wenig aber auch unsere Kenntnisse über den Contractionsvorgang im Muskel heute schon abgeschlossen sind, so viel steht wohl doch bereits ausser jedem Zweifel, dass derselbe seiner Form und allen seinen wesentlichen Charakteren nach eine Bewegung wellenförmiger Natur sei. Aber eben darum können auch alle Leistungen, zu welchen der Muskel vermöge seiner Formveränderung während der Contraction befähigt ist, nur aus der Analyse der jene bedingenden Contractionswelle folgerichtig abgeleitet werden; ebendarum ist aber auch zur Begründung einer Mechanik der Muskelleistung vor Allem nothwendig, die Contractionswelle selbst in ihrer physikalischen und physiologischen Abhängigkeit einer gründlichen Prüfung zu unterziehen.

In dem folgenden Versuch einer Analyse stelle ich mir die Aufgabe, dieselbe als das Resultat einer im Muskel ablaufenden, einfachen Contractionswelle, aus der letzteren abzuleiten und als solche nachzuweisen; sodann mittels der auf dieser Grundlage abgeleiteten Methode die Bestimmung der Factoren der Contractionswelle, letztere hinsichtlich ihrer phy-

sikalischen Beziehungen eingehend zu prüfen; die Untersuchung ihrer Unabhängigkeit von physikalischen Momenten aber mir für einen späteren Beitrag vorbehaltend.

I. Abschnitt.

Theoretische Untersuchung der Zuckungscurve.

§ 1.

Mathematische Ableitung der Zuckungscurve.

Wenn auch der Verlauf der Muskelzuckung bereits wiederholt eingehenden Untersuchungen namentlich auch in der Absicht unterzogen war, die Gesetze ihres Verlaufs zu bestimmen, um auf Grundlage derselben die Natur dieses Vorganges zu erkennen, so liegt doch noch immer, so weit mir bekannt, kein Versuch vor, die Zuckungscurve auf Grundlage der Wellentheorie mathematisch abzuleiten. Ja selbst bei der wieder so lebhaft gewordenen Discussion über die Art der bei der Zuckung wirkenden Kräfte, scheint der Umstand ganz unberücksichtigt gelassen zu werden, dass doch bereits zuverlässige Beweise genug dafür vorliegen, dass die Muskelcontraction eine wellenartig verlaufende Bewegungsform sei, und daher auch nur die Wellengesetze uns das Wesen dieses Vorganges erschliessen können. Indem ich die Besprechung der Versuche, welche man gemacht hat, die Zuckungscurve in ihrem Zustandekommen und in den unter verschiedenen Einflüssen an ihr sich zeigenden Modificationen zu deuten, auf einen späteren Abschnitt verschiebe, gehe ich jetzt zur Untersuchung der Zuckungscurve auf der angedeuteten Grundlage der Wellentheorie über.

Bekanntlich schreibt ein parallelfaseriger Muskel z. B. der *M. sartorius* oder *M. adductor magnus* des Frosches, der einem mit Curare vorher vergifteten Thiere entnommen ist, wenn derselbe an dem oberen befestigten Ende durch einen einfachen Inductionsschlag gereizt wird, während sein unteres Ende bei entsprechender Belastung in Verbindung mit dem Zeichenhebel eines Trommel- oder Fall-Myographons steht, bei der einfachen Zuckung eine Curvenlinie auf der bewegten

Zeichenfläche auf, welche, so verschieden sie auch je nach den sonstigen Umständen in ihrer Höhe und Ausdehnung sein mag, doch immer eine Form von gleichem Character besitzt, indem sie stets zuerst concav nach oben beginnt, dann aber durch einen Wendepunkt hindurch nach unten gegen die Abscissenaxe zu concav werdend, ihren Höhepunkt erreicht, von dem sie wieder zuerst mit einer concaven Biegung nach unten, und abermals über einen Wendepunkt hinweg mit nach aufwärts gekehrter Concavität zur Abscissenaxe herabsinkt.

Die beiden Hälften dieser Curve sind wohl nie congruent, sondern stets ist die absteigende Hälfte derselben je nach Umständen um mehr oder weniger kürzer als die aufsteigende; auch setzt sich dieselbe, nachdem sie schon die Abscissenlinie erreicht hat, mit wellenförmigen Schlängelungen noch eine Strecke weiter fort; dass letztere nur durch elastische Nachschwingungen theils des Zeichenhebels, wenn dieser auf eine Hemmung auffällt, theils des gespannten Muskels selbst, wenn keine Hemmung angebracht ist, bedingt sei, liegt wohl ausser allem Zweifel.

Aber auch die Incongruenz der beiden Curvenhälften ist nicht durch den Zuckungsvorgang selbst bedingt, etwa durch eine rascher als die Zunahme ablaufende Abnahme der Energie des Muskels, sondern dadurch, dass, sobald der Höhepunkt erreicht ist und die am Muskel hängende Last herabsinken beginnt, nun nicht mehr jene im zuckenden Muskel gelegenen Momente allein von Wirkung sind, welche denselben zu seiner ursprünglichen Länge zurückführen, sondern ausserdem auch noch die, wenn auch nicht frei, so doch immerhin mit beschleunigter Geschwindigkeit von der erreichten Höhe herabsinkende Last mitwirkt. Dass die Ursache der Incongruenz wirklich in diesem Umstande gelegen sei, geht schon daraus hervor, dass wie ich hier nur vorläufig bemerken will, dieselbe um so grösser, resp. die absteigende Curvenhälfte gegenüber der aufsteigenden umsomehr verkürzt ist, je grösser die Hubhöhe bei je grösserer Belastung war.

Es kann daher nicht als unbegründet erscheinen, wenn ich der folgenden Ableitung eine Zuckungcurve zu Grunde

lege, die, so weit sie von dem Contractionsvorgang im Muskel allein abhängt, in ihren beiden Hälften vollkommen congruent ist, so dass der absteigende Theil derselben gleich dem aufsteigenden ist.

Wenn nun die Zuckungcurve der Ausdruck jener Längenveränderungen ist, die der Muskel erleidet, während eine einzige Contractionswelle von einem Ende zum andern über ihn hinwegschreitet: so muss diese Curve eine Function sein der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, der Schwingungsdauer der Muskelemente — also der Wellenlänge, sowie auch der Schwingungsweite jener Elemente; und wäre diese Function durch eine mathematische Formel definirbar, so müsste letztere auch die Länge, welche der Muskel zu irgend einem Zeitpunkte seiner Zuckung besitzt, demnach auch seine jedesmalige Hubhöhe als die Resultirende der Contraktionen ausdrücken, welche sämmtliche elementare Muskelquerschnitte, über welche in jenem Augenblicke die Zuckungswelle ganz oder mit irgend einem ihrer Abschnitte ausgebreitet ist, in verschiedenem Maasse, entsprechend eben ihrer augenblicklichen Lage in der Welle, erleiden. Und umgekehrt würde eine solche Formel erlauben, aus den Höhen, welche die Zuckungscurve in ihrem Verlaufe, bestimmten Zeitpunkten entsprechend, besitzt, auch jene unabhängigen Variabeln der Functionen, wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die Schwingungsdauer und die Schwingungsweite der Elemente, sowie endlich die Wellenlänge zu bestimmen.

Nun wäre die Definition der Form der Zuckungscurve auf Grund von Coordinatenbestimmungen wohl möglich, kaum wäre aber daraus die Ableitung einer Formel zu erhoffen, welche die Function jener Variabeln ausdrücken würde.

Ich bin darum auch bei dem Versuch zu einer solchen Formel zu gelangen, nicht von der Analyse der Zuckungscurve ausgegangen, sondern ich suchte dieselbe aus der Schwingung des Muskelementes im Wege der Synthese zu construiren.

Das Gesetz dieser Schwingung ist uns aber bis jetzt noch gänzlich unbekannt, und die Wahl zu treffen unter den

unzähligen möglichen Bewegungsweisen des Muskelements scheint umsomehr gewagt, als uns aus dem Bereiche der organischen Vorgänge bisher auch nichts vorliegt, was durch Analogie einen Anschluss bei dieser Wahl gewähren könnte.

Wir sind daher genöthigt, zu einer allgemeineren Betrachtung über die Verhältnisse zurückzugreifen, unter welchen sich die Muskelemente im Zustande der Ruhe und Bewegung befinden.

Im Ruhezustande des Muskels wird jedes seiner Elemente von Kräften in der Gleichgewichtslage erhalten, welche dasselbe, wenn es davon durch andere Kräfte, welche zur Zeit der Erregung auf dasselbe einwirken, entfernt war, wieder in dieselbe zurückführen. Betreffs der bei der Erregung wirkenden Kräfte, ist wohl die einfachste Annahme die, dass sie momentan einwirkend, das Element aus seiner Gleichgewichtslage plötzlich herausschleudern; betreffs der nach der Gleichgewichtslage gerichteten Kräfte aber können wir die allgemein physikalische Voraussetzung für elastische Körper gebrauchen, dass dieselben in jedem Augenblicke dem Abstände des Elements von der Gleichgewichtslage einfach proportional sind.

Bekanntlich leitet auf Grund solcher Voraussetzungen die analytische Mechanik das Gesetz eines schwingenden Punktes ab, und drückt das Verhältniss zwischen der Entfernung des Punktes von seiner Gleichgewichtslage und der Zeit, welche bis dahin vom Anfange einer Schwingung verflossen ist, aus in der Gleichung:

$$y = a \sin 2 \pi \frac{t}{T} \dots\dots\dots 1)$$

wo y den augenblicklichen Abstand des Punktes von der Gleichgewichtslage, a seine Bestimmungweite, T die zu einer ganzen Schwingung benöthigte Zeit, t endlich die Zeit bedeutet, welche verflossen ist, seit der Punkt seine Gleichgewichtslage am Anfang einer Schwingung verlassen hat. Hierbei wird eine ganze Schwingung als bestehend betrachtet aus dem Aus-treten des Punktes einmal nach der einen Seite der Gleichgewichtslage und der Rückkehr dahin und dann aus einem eben-

solchen Hin- und Hergang derselben auf der andern Seite der Gleichgewichtslage.

Auf Grund der gleichen Voraussetzungen, die wir mit Bezug auf die Muskelemente gemacht haben, wollen wir obige Gleichung auch für die Schwingung dieser letzteren versuchsweise gelten lassen.

Inwiefern die Muskelemente bei der Contraction einfache lineare Schwingungen ausführen, nach der Länge oder Querrichtung der Faser, oder etwaige Drehungen um einen Mittelpunkt herum, dies zu beurtheilen, besitzen wir wohl keine Anhaltsgründe; indem sich aber das Resultat dieser Schwingung als Längenverkürzung des Muskels äussert, können wir jedenfalls diesen, wie auch immer gearteten Schwingungen einfache lineare Schwingungen nach der Längenrichtung des Muskels substituiren, vermöge welcher die elementaren Querscheiben desselben sich zeitweise nähern und wieder von einander entfernen.¹⁾ Noch drängt sich aber auch eine zweite Frage auf; ob wir nämlich auch für die Schwingung der Muskelemente einen Hin- und Hergang auf beiden Seiten der Gleichgewichtslage annehmen sollen, oder bloss eine einmalige Entfernung nach der einen Richtung von der Gleichgewichtslage und wieder zu dieser zurück. Ich würde letzteres schon als einfacheres für wahrscheinlicher halten. In Anbetracht aber, dass durch das Ausweichen der Muskelemente aus ihrer Gleichgewichtslage zum zweitenmal überhaupt entweder nur eine abermalige Näherung oder aber entgegengesetzt eine Entfernung derselben von einander nach der Längenrichtung des Muskels, bedingt sein könnte; im ersten Falle nun die Näherung nichts anderes als eine Wiederholung der Wirkung der jenseitigen Schwingung zur Folge hätte, so

1) Die Annahme einer Näherung der Muskelquerscheiben an einander bei der Contraction ist wohl durch die Thatsache gerechtfertigt, dass sich bei diesem Vorgang die Querstreifen sichtbar einander nähern, um sich sodann wieder von einander zu entfernen. Wie dieser Vorgang mit der anderen Thatsache, dass das Volumen des Muskels bei der Contraction doch keine Veränderung erleidet, vereinbar sei, soll noch in der Folge näher besprochen werden.

dass nach Ablauf der ersten Zuckungswelle sogleich eine zweite sich wiederholen müsste, eine solche Wiederholung aber nach einmaliger momentaner Reizung thatsächlich nicht zur Beobachtung kommt, hier speciell aber auch nur von der Analyse der einfachen Zuckungswelle die Rede ist; und im anderen Falle, wenn bei der zweiten Hälfte der Schwingung die Muskelemente sich von einander entfernen sollten, dies nach Analogie der Schallwellen der Luft einer der vorangehenden Verdichtungs-, dort Verkürzungsperiode nachfolgenden Verdünnungs- dort Verlängerungsperiode entsprechen würde, bei welcher der Muskel zuerst sich über seine ursprüngliche Länge hinaus verlängern müsste, um diese am Schluss zum zweiten Mal zu erreichen, nachdem er schon einmal nach Beendigung der ersten Hälfte der Schwingung zu ihr zurückgekehrt war; eine solche Verlängerung des Muskels über sein ursprüngliches Maass hinaus aber ebenso wenig stattfindet; so halte ich die Annahme wohl für hinreichend begründet, dass die Schwingung der Muskelemente aus ihrer Gleichgewichtslage heraus und wieder zurück nur eine einseitige und keine doppelte sei.¹⁾

Dieser Annahme entsprechend aber muss für unseren speciellen Fall die Gleichung unter 1) abgeändert werden in:

$$S = a \sin \pi \frac{t}{T} \dots\dots 2).$$

1) Diese Annahme kann auch an dem Umstande keinen Anstoss finden, dass das von seiner Grenzstellung zurückschwingende Muskelement seine Gleichgewichtslage mit grösster Geschwindigkeit erreicht; denn es kehrt mit derselben dahin zurück beim Rückschwung von der ersten Grenzstellung her so gut wie es müsste bei dem Rückschwung von der anderen Seite; und kann es in der Gleichgewichtslage nicht zur Ruhe gelangen, wenn es jene zum erstenmal erreicht hat, warum soll es das können, wenn es in dieselbe zum zweitenmal eintritt, und warum nicht erst beim dritten oder noch späteren Eintritt. Die Frage also, was das Endresultat der lebendigen Kraft des in die Gleichgewichtslage zurückgekehrten Elementes sei, bleibt für alle Fälle aufrecht bestehen, und ohne dass dieselbe, hier schon weiter erörtert werden müsste, kann wohl auch obige Annahme aufrecht erhalten werden.

So wie nun die dieser Gleichung entsprechende Sinuscurve die geometrische Darstellung der Schwingung eines einzigen Punktes ist und die Lageveränderungen desselben im Verlaufe der Schwingung für die Schwingungsamplitude a darstellt; wenn der Bogen $a\pi$ gleich der Schwingungszeit genommen wird; ebenso stellt dieselbe Sinuscurve auch für eine Punktreihe die Stellungen dar, welche gleichzeitig jeder der auf einander folgenden, senkrecht auf die Richtung der Punktreihe schwingenden Punkte inne hat, bei einer Schwingungsweite gleich a , und wenn die Länge der Punktstriche wieder gleich $a\pi$ genommen wird; da ja dann diese Länge $a\pi$ auch jene Strecke bedeutet, bis auf welche die schwingende Bewegung innerhalb der Schwingungsperiode $a\pi$ sich fortgepflanzt hat. Indem aber diese Curve auch überhaupt für jeden einzelnen Punkt der Reihe, möge derselbe seine geradlinige Schwingung nach welcher Richtung immer hin, also auch in der Richtung der Punktreihe machen, die Strecke andeutet, um welche derselbe von seiner Gleichgewichtslage gleichzeitig mit den andern Punkten entfernt ist; so ermöglicht die Curve auch die Summe sämtlicher Wegstrecken zu bestimmen, welche die auf einer der Wellenlänge $a\pi$ gleich langen Reihe befindlichen Punkte, innerhalb dieser Wellenlänge von ihren Gleichgewichtslagen aus zurückgelegt haben. Und somit gestattet sie auch die Bestimmung der Distanz, um welche die an einem ihrer Enden als fixirt gedachte Punktreihe, mit ihrem anderen frei beweglichen Ende von dem Punkte, welchen letzteres Ende im Ruhezustande der ganzen Punktreihe inne hatte, abgewichen ist, nachdem die Welle sich vollständig entwickelt hatte, denn es braucht ja nur der zwischen der Sinuscurve und ihrer Abcissenlinie eingeschlossene Flächenraum bestimmt und dann senkrecht auf seine Grundlinie in Streifen von der Breite der Entfernung zwischen den Gleichgewichtsorten je zweier benachbarter Punkte zerlegt zu werden, so werden die an einander gefügten Streifen auch die gesuchte Länge ergeben. Dasselbe kann aber auch erreicht werden, wenn statt jenes Flächenraumes eine gleich grosse Quadratfläche genommen

und diese parallel der einen Seite in Streifen von der eben erwähnten Breite zerlegt wird.

Die Fläche einer solchen Sinuscurve lässt sich bekanntlich bestimmen aus der Gleichung:

$$y = a \sin x$$

durch die Quadratur der eingeschlossenen Fläche, nach:

$$z = \int y \, dx = \int a \sin x \, dx$$

$$z = -a \cos x + c$$

woraus sich das bestimmte Integral ergibt:

$$z = \int_{\frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{n}} y \, dx = a^{\square} \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right) \dots 3)$$

und speciell für die ganze von der Sinuscurve eingeschlossene Fläche:

$$z = \int_0^{\pi} y \, dx = a^{\square} (1 - \cos \pi) = 2 a^{\square}$$

Diese Fläche ist also gleich zwei Quadratflächen, deren Seitenlänge dem Werth von a entspricht. Dieser Werth von z erfordert jedoch noch eine Correction.

Wir haben nämlich bei der für eine der Wellenlänge gleiche, $a\pi$ lange Abscisse angepasste Sinuscurve angenommen, dass auch die Schwingungsweite gleich a sei. Nun kann aber in einem, wie hier in Rede stehenden Falle einer Verkürzungswelle, die Schwingungsweite der einzelnen Punkte nie die Länge der gegenseitigen Abstandsweite für die Ruhelage erreichen, noch weniger sie übertreffen, es kann also auch bei einer Reihe dicht aufeinander folgender Punkte die Schwingungsweite des einzelnen Punktes nicht gleich dem Radius a jenes Halbkreises $a\pi$ gesetzt werden, dessen Länge der Wellenlänge selbst gleich sein soll; und darum muss auch der Werth von

$$y = a \sin x$$

um so viel mal verkürzt werden, als die Schwingungsweite kleiner ist als der Radius a dieses Halbkreises.

Setzen wir daher die wahre Schwingungsweite gleich α , und $\frac{a}{\alpha} = n$, so geht obige Gleichung über in:

$$y = \frac{1}{n} a \sin x,$$

also auch die daraus abgeleitete Gleichung:

$$z = a^2 \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right)$$

über in:

$$z = \frac{1}{n} a^2 \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right) \dots\dots 4)$$

da aber auch:

$a \pi = l$. der Wellenlänge der Punktreihe, ist, also

$$a = \frac{l}{\pi} \text{ und wie oben } n = \frac{a}{\alpha},$$

so ist auch:

$$n = \frac{l}{\alpha \pi}.$$

Dieser Werth statt n in die Gleichung 4) eingesetzt ergibt:

$$z = \frac{\alpha \pi}{l} \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right).$$

Indem aber so die Quadratfläche $\left(\frac{l}{\pi} \right)^2$ nach einer mit der Längeneinheit für l übereinstimmenden Maasseinheit ausmessbar wird, kann die letzte Gleichung auch geschrieben werden:

$$z = \frac{\alpha \pi}{l} \left(\frac{l}{\pi} \right)^2 \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right)$$

und abgekürzt:

$$z = \alpha \frac{l}{\pi} \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right) \dots\dots 5)$$

Wenn nun noch dieser nach Flächenmaasseinheiten von z. B. 1 $\square$ Mm, bestimmte Werth der von der Sinuscurve begrenzten Fläche dividirt wird mit der Breitengrösse der Streifen, in welche die Fläche eingetheilt werden muss, also wie schon oben bemerkt wurde, mit der nach derselben Maasseinheit wie l bestimmten Distanz der Gleichgewichtsorte je zweier benachbarter Punkte, so gewinnen wir die Gesamtstrecke, um welche bei fixirtem oberem Ende das freibewegliche untere Ende der Punktreihe während irgend einer Phase der Welle von dem in der Ruhelage innegehabten Orte abgewichen ist.

Bezeichnen wir jene Grösse mit H , die gegenseitige Distanz der Gleichgewichtsorte mit δ , so geht aus Gleichung 5) hervor:

$$H = \frac{a}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(\cos \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{n} \right)$$

oder statt m , $\frac{T}{t_I}$, und statt n , $\frac{T}{t_{II}}$ eingesetzt, wo t_I und t_{II} die Zeiten bedeuten, welche verfließen sind, seit der am Ausgangsorte der Welle stehende Punkt der Reihe seine Gleichgewichtslage verlassen hat, erhalten wir die allgemeine Gleichung

$$H = \frac{a}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(\cos \pi \frac{t_I}{T} - \cos \pi \frac{t_{II}}{T} \right) \dots\dots 6)$$

welche so gut wie für eine einfache auch für eine mehrfache Reihe ursprünglich um δ weit von einander stehender Punkte, und somit auch auf eine Reihe nacheinander folgender Querscheiben angewendet werden kann, welche entweder ursprünglich um δ weit von einander entfernt stehen und sich bis auf α einander nähern; oder auch die eine ursprüngliche Dicke gleich δ haben und sich bis auf die Grösse α verdünnen.

Demnach scheint die letzte Gleichung auch auf die contractionsfähige Muskelfaser und somit auch auf einen parallel-faserigen Muskel selbst anwendbar, wenn wir (vorläufig) voraussetzen, dass auch in der Muskelfaser für alle elementaren Querscheiben in der ganzen Faserlänge die Werthe von δ und α gleich gross verbleiben, und wenn wir als elementare Querscheibe alle jene isotropen und anisotropen Schichten zu einem einheitlichen Element zusammenfassen, welche im geschichteten Baue der Muskelfaser als zu einem Absatze gehörig, entlang der Faser in regelmässiger Folge sich wiederholen¹⁾.

1) Bei den einander so sehr widersprechenden Ansichten, wie sie gegenwärtig unter den Histologen betreffs des Baues der quergestreiften Muskelfaser herrschen, deren Klärung, so wünschenswerth sie wäre, doch noch für lange nicht anzuhoffen sein dürfte, lässt sich auch der Begriff der elementaren Scheibe der Muskelfaser im physiologischen Sinne, nur in einer allgemeineren Weise histologisch definiren. Es scheint mir aber, dass bei jenen wohl meistens auf histologische Beobachtungen der abgestorbenen Faser gegründeten Ansichten, die physiologischen Postulate für ein zur mechanischen Kraftentwicklung vermöge seiner activen Formveränderung befähigtes Gebilde, bisher

Bei der Anwendung der letzten Gleichung auf einen Muskel mit lauter parallel verlaufenden Fasern, wird dann der Werth von H die Bedeutung der Hubhöhe haben, welche in der Gleichung als Function von allen jenen unabhängigen Variabeln dargestellt ist, die wir in der gesuchten Gleichung enthalten haben wollten.

Bevor jedoch diese Gleichung auf ihre Anwendbarkeit auf die Zuckungcurve einer Prüfung kann unterzogen werden, müssen vorher noch die drei Hauptfälle einzeln discutirt werden, welche bei der Muskelzuckung betreffs des Verhältnisses zwischen der Muskellänge μ und der Länge der Zuckungswelle l möglich sind, so fern

$$\begin{aligned} \mu &> l \text{ oder} \\ \mu &= l \text{ oder} \\ \mu &< l \end{aligned}$$

sein könnte.

§. 2.

Discussion der Gleichung der Zuckungcurve für die Fälle, dass $\mu > l$ oder $\mu = l$ ist.

Es ist wohl leicht einzusehen, dass im Falle $\mu > l$ wäre, der Ablauf der von dem einen fixirten Ende zu dem andern freien Ende des Muskels hinschreitenden einmaligen Contractions-welle der Art sich gestalten müsste, dass was immer auch die Schwingungsweite des elementaren Muskelabschnittes (Muskelscheibe) sein möge, das zur Zeit der vollständig entwickelten Welle sich einstellende Maximum der Muskelverkürzung, oder was dasselbe bedeutet, die Hubhöhe am Scheitel der Zuckungcurve nur so viel betragen könnte, als die Verkürzung einer der Wellenlänge gleichen Muskelstrecke überhaupt zur Zeit der vollständig entwickelten Welle; weil ja eine etwaige noch ausserhalb der Welle liegende Muskelstrecke, als in der Welle eben nicht inbegriffen, zu jenem Zeitpunkte auch zur Grösse

zu wenig oder auch gar nicht berücksichtigt wurden. Eine nähere Prüfung jener Ansichten vom physiologischen Standpunkte aus dürfte aber wohl vieles zu Läuterung derselben beitragen.

der Verkürzung nichts beitragen könnte. Weil aber, im Falle $\mu > l$, die Welle in ihrer ganzen Länge so lange vollständig entwickelt bliebe, als sie mit ihrem voranschreitenden Ende über das andere Muskelende nicht hinweggeschritten ist, so müsste auch der Muskel eben so lange auf dem Maximum seiner Verkürzung verharren, die Hubhöhe also unverändert bleiben. Die vom Muskel gezeichnete Zuckungcurve würde somit auf ihrem Höhepunkte angelangt eine Weile auf derselben Höhe verbleiben, und statt eines Scheitelpunktes würde dieselbe eine der Abscissenaxe parallel verlaufende Scheitellinie besitzen, deren Zeitwerth t_m gleich wäre:

$$t_m = \frac{\mu - l}{v},$$

wo v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Contractionswelle bedeutet.

Auch ist ferner leicht einzusehen, dass die der Schwingungszeit T gleiche Zeitdauer, welche die Welle bis zu ihrer vollständigen Entwicklung benöthigt, für diesen Fall jener Zeit gleich sein würde, nach welcher die Zuckungcurve ihre Höhe eben erreicht hat. Wenn also T_{m_1} den Zeitwerth der Abscissenlänge vom Anfange der Zuckungcurve bis zum eben erreichten Höhepunkt bedeutet, so ist zugleich:

$$T_{m_1} = T \dots\dots\dots 7)$$

Zu diesem Zeitpunkte befindet sich also das nachschreitende Ende der Welle an jenem Ende des Muskels, von dem aus die Welle ausgegangen war; das voranschreitende Ende der letzteren hat aber das andere Muskelende noch nicht erreicht, sondern steht noch von demselben um die Strecke $\mu - l$ entfernt. So wie jedoch jenes Wellenende auch das zweite Muskelende überschritten hat, muss auch die Höhe der Curve wieder abnehmen. Heisst also T_{m_2} der Zeitwerth der Abscisse vom Anfang der Zuckungcurve bis zu jener Stelle, wo letztere ihre grösste Höhe wieder verlässt, so entspricht derselbe der Zeitdauer, binnen welcher das voranschreitende Wellenende die ganze Muskellänge vom Ausgangspunkte bis zum Endpunkte durchlaufen hat, somit ist auch

$$T_{m_2} = \frac{\mu}{v},$$

woraus folgt:

$$v = \frac{\mu}{T_{m_2}} \dots\dots\dots 8)$$

Aus der Gleichung 7) und 8) und aus

$$l = v T$$

ergiebt sich endlich die Wellenlänge

$$l = \mu \frac{T_{m_1}}{T_{m_2}} \dots\dots\dots 9)$$

Wie man also sieht, lassen sich für den Fall $\mu > l$ bis herab auf $\mu = l$, die Factoren der Zuckungswelle ganz unabhängig von der Art der Schwingungsweise der elementaren Muskelscheiben, schon aus einer einzigen Zuckungcurve bestimmen. Sind dieselben aber für eine solche Curve bestimmt worden, so lässt sich auch entscheiden, ob die Schwingungsweise der elementaren Muskelscheiben eine solche ist, wie wir sie als Grundlage bei der Ableitung der allgemeinen Gleichung der Zuckungcurve angenommen haben. Denn gestalten wir jene Gleichung unter 6) passend um für eine Abscissenlänge, welche von der Zeitgrenze $t = 0$ bis zu einer beliebigen Zeitgrenze $t = x < T$ reichen mag, so wird:

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots 10)$$

da α als Schwingungsweite und δ als der Abstand der Ruheorte der Schwingungselemente nach gleicher Maasseinheit zu bemessende Grössen sind, so ist $\frac{\alpha}{\delta}$ nur eine Verhältnisszahl, und bedeutet nichts anderes als den Verkürzungscoëfficienten der elementaren Muskelscheibe, welcher bestimmbar wäre mittels der aus der Gleichung 10) für die Maximalhöhe der Curve, also für $t = T$ abgeleiteten Gleichung

$$H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \dots\dots\dots 10a)$$

aus welcher folgt:

$$\frac{\alpha}{\delta} = H_m \frac{\pi}{2l} \dots\dots\dots 10b)$$

Nach Substitution der, in der eben angegebenen Weise für l , T und $\frac{\alpha}{\delta}$ gefundenen Werthe in der Formel 10), müss-

ten dann die aus letzterer für die verschiedenen Werthe von t sich ergebenden Werthe von H übereinstimmen mit den unmittelbar an der Zuckungcurve für dieselben Werthe von t abgemessenen Ordinatenwerthen, wenn die Schwingungsweise der Muskelelemente der vorausgesetzten Weise wirklich entsprechen würde.

Eine solche Prüfung ist jedoch aus Gründen, die alsbald einleuchten werden, so lange nicht ausführbar, bis wir nicht über das wirkliche Verhältniss zwischen der Muskellänge und der Wellenlänge genau orientirt sind.

Wir wollen also zunächst die Eigenschaften einer Curve untersuchen, wie sie der für den Fall $\mu > l$ oder $\mu = l$ aufgestellten Gleichung 10) entspricht.

Indem wir in derselben zur Abkürzung M statt $\frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi}$ setzten, und weil ferner die von der Welle in der Zeit t zurückgelegte Strecke

$$\begin{aligned} x &= t v \text{ ist, und ebenso} \\ l &= T v \end{aligned}$$

so können wir auch statt $\frac{t}{T}$ setzen $\frac{x}{l}$, somit steht:

$$H = M \left(1 - \cos \pi \frac{x}{l} \right)$$

hieraus folgt:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dx} &= M \frac{\pi}{l} \sin \left(\pi \frac{x}{l} \right) \\ \frac{d^2 H}{dx^2} &= M \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) \end{aligned}$$

Aus

$$\frac{dH}{dx} = M \frac{\pi}{l} \sin \pi \frac{x}{l} = 0$$

ergiebt sich

$$\sin \left(\pi \frac{x}{l} \right) = 0 \text{ und}$$

$$\sin \left(\pi \frac{x}{l} \right) = \sin \pi$$

demnach

$$\begin{aligned} x &= 0 \text{ und} \\ x &= l \end{aligned}$$

welche Werthe statt x in die Gleichung des zweiten Differentialquotienten eingesetzt, ergeben

$$\frac{d^2 H}{d x^2} = + M \frac{\pi^2}{l^2}$$

und

$$\frac{d^2 H}{d x^2} = - M \frac{\pi^2}{l^2}$$

Demnach ist bei $x = 0$

$$H = 0, \text{ ein Minimum}$$

und bei $x = l$

$$H = 2 M, \text{ ein Maximum.}$$

Die halbe Zuckungshöhe

$$\frac{1}{2} H = M$$

wird aber erreicht, wenn

$$\cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) = 0 \text{ also}$$

$$\pi \frac{x}{l} = \frac{\pi}{2}$$

somit:

$$x = \frac{l}{2} \text{ ist.}$$

Wenn ferner T_h die Zeit heisst, welche bis zum Eintritt der halben Zuckungshöhe verstreicht, so steht auch, indem letzteres dann stattfindet, wenn sich die halbe Welle auf dem Muskel entwickelt hat:

$$T_h = \frac{1}{2} \frac{l}{v}$$

also auch nach Gleichung 7)

$$T_h = \frac{1}{2} T_{m1}$$

demnach auch

$$\frac{2 T_h}{T_{m1}} = 1 \dots\dots 11)$$

wo, wie oben, T_{m1} den Zeitwerth der Abcissenlänge vom Anfange der Zuckungcurve bis zum eben erreichten Höhepunkt bedeutet. Es ist also für $\mu > l$ oder $\mu = l$ die Zeit der halben Zuckungshöhe gleich der halben Zeit der maximalen Zuckungshöhe.

Derselbe Punkt der Zuckungcurve, wo diese den halben Höhenwerth ihres Maximums erreicht, ist aber auch ein Wendepunkt, denn

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = M \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) = 0$$

gesetzt, wird

$$\cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) = \cos \frac{\pi}{2}$$

Demnach:

$$x = \frac{l}{2} \dots\dots\dots 12)$$

und weil der zweite Differentialquotient so lange positiv bleibt, als

$$x < \frac{l}{2} \text{ also} \\ \pi \frac{x}{l} < \frac{\pi}{2} \text{ ist,}$$

und negativ wird, wenn

$$x > \frac{l}{2} \text{ also} \\ \pi \frac{x}{l} > \frac{\pi}{2} \text{ ist,}$$

so ergibt sich, dass die Zuckungscurve vor ihrem Wendepunkte convex, nach diesem Punkte aber concav gegen die Abscissenaxe verläuft.

Weil endlich, wie wir eben fanden, auch für den Wendepunkt

$$x = \frac{l}{2} \text{ ist}$$

so ist auch die Zeit T_w , nach welcher derselbe erreicht wird

$$T_w = \frac{1}{2} T_{m_1} \text{ oder } \frac{2 T_w}{T_{m_1}} = 1 \dots\dots 12a)$$

so wie auch

$$\frac{T_w}{T_h} = 1$$

d. h. also für den Fall $\mu > l$ oder $\mu = l$ ist auch die Zeit, nach welcher vom Anfange der Zuckung der Wendepunkt eintritt, gleich der halben Zeit des Zuckungsmaximums, und somit fällt auch der Moment des Wendepunktes in der Zuckungscurve mit dem Moment der halben Zuckungshöhe zusammen.

Eben darum wird auch die Zuckungshöhe H_w zur Zeit des

Wendepunktes dieselbe sein, wie zur halben Zeit des Zuckungsmaximums, also

$$H_w = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \dots\dots 11a)$$

Es ist wohl kaum nöthig zu bemerken, dass der Verlauf der Zuckungscurve, sobald dieselbe von ihrer Höhe gegen die Abscissenaxe wieder herabsteigt, vollkommen gleich ist dem eben auseinandergesetzten Verlauf ihres aufsteigenden Abschnittes, weshalb auch eine Wiederholung dieser Erörterung überflüssig erscheint.

Die bisher erörterten Verhältnisse in dem Verlaufe der Zuckung erleiden jedoch wesentliche Veränderungen, sobald die Länge des Muskels nicht mehr gleich ist der Wellenlänge oder letztere sogar übertrifft, sondern unter dem Werthe der letzteren steht. Wir müssen daher diese Verhältnisse auch für den Fall, dass $\mu < l$ ist, einer eingehenden Betrachtung unterziehen.

§. 3.

Discussion der Gleichung der Zuckungscurve für den Fall, dass $\mu < l$ ist.

Während in dem Falle, dass $\mu > l$ ist, zur Zeit der eben erreichten Maximalhöhe der Zuckung, das nachschreitende Ende der Welle eben an jenem Muskelende angelangt war, von dem aus die Welle ihren Ausgang genommen hatte, kann dies, wie leicht einzusehen ist, nicht mehr zutreffen, wenn $\mu < l$ ist; sondern es muss der Muskel in diesem Falle die Maximalhöhe seiner Zuckung schon erreicht haben, bevor noch das nachschreitende Wellenende am Wellenausgangsende des Muskels sich eingefunden hat, d. h. bevor sich noch die Contractionswelle um ihre ganze Länge über jenes Muskelende hinweggeschoben hat. Es muss also auch die Zeit T_m , welche vom Beginn der Zuckung bis zum Eintritt ihres Maximums vergeht, kleiner sein als die Schwingungszeit T des Elementes. Die Differenz

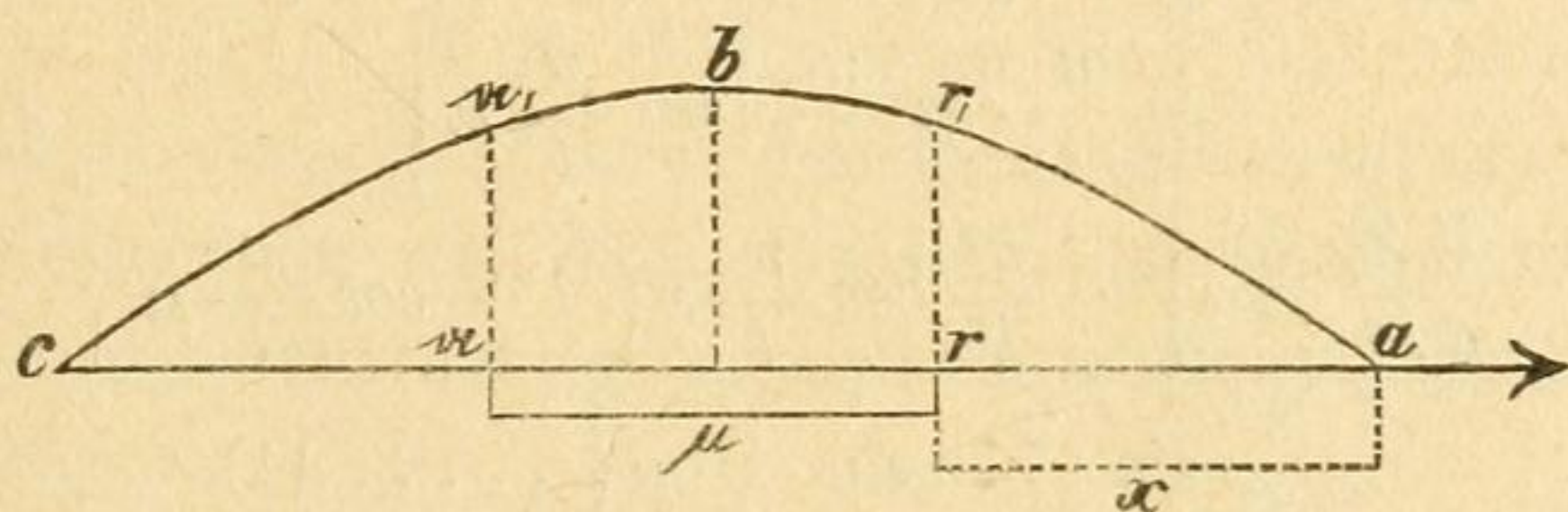
$$T - T_m$$

wird sich aber ergeben aus der Lage, welche der Muskel inner-

halb der Zuckungswelle im Momente des Zuckungsmaximums einnehmen muss.

Da in dem hier der Untersuchung unterzogenen Falle nur ein bestimmter der Muskellänge gleicher Wellenabschnitt auf einmal auf dem Muskel Platz gewinnen kann, so handelt es sich vor Allem darum, jenen Abschnitt der von der Sinuscurve begrenzten Fläche anzugeben, welcher bei einer bestimmten, der angenommenen Muskellänge gleichen Abscissenlänge die grösste Fläche besitzt. Diese Aufgabe wird aus Fig. 1 deutlicher

(Fig. 1.)



hervorleuchten. In dieser sei ac die Länge der Welle, deren einer Sinuscurve entsprechende Linie mit abc bezeichnet ist. Das Wellenausgangsende am Muskel μ sei bei a , das Wellenschlussende bei r ; die Welle schreitet also über den Muskel in der Richtung des Pfeiles vor. Der Abschnitt ar der von der Sinuscurve begrenzten Fläche hat zur Grundlinie den Muskel μ ; die Strecke x der Abscisse ist jene Länge, um welche die Welle mit ihrem Anfangsende a bereits über das Wellenschlussende des Muskels hinweggeschritten ist. Wir haben daher zur Lösung der gestellten Aufgabe die Gleichung der Sinusfläche zweimal einer Integration zwischen zwei Grenzen, je einer oberen $\mu + x$ und x , und je einer unteren 0 zu unterziehen.

Es steht also:

$$z_1 = \int_0^{\mu+x} y dx = a^2 \left\{ 1 - \cos \left(\pi \frac{\mu+x}{l} \right) \right\}$$

und

$$Z_{II} = \int_0^{\pi \frac{x}{l}} y dx = a \square \left[1 - \cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) \right]$$

demnach

$$z_I - z_{II} = Z = a \square \left(\cos \pi \frac{x}{l} - \cos \pi \frac{\mu + x}{l} \right)$$

oder

$$Z = a \square \left[\cos \pi \frac{x}{l} \left(1 - \cos \pi \frac{\mu}{l} \right) + \sin \pi \frac{x}{l} \sin \pi \frac{\mu}{l} \right]$$

Wird diese Gleichung nach x differenziert, so ergibt sich:

$$\frac{dZ}{dx} = a \left[-\frac{\pi}{l} \sin \frac{\pi}{l} x \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu \right) + \frac{\pi}{l} \cos \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \mu \right]$$

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = a \left[-\frac{\pi^2}{l^2} \cos \frac{\pi}{l} x \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu \right) - \frac{\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \mu \right] \dots \dots 14)$$

Aus $\frac{dZ}{dx} = 0$ folgt:

$$\cos \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \mu = \sin \frac{\pi}{l} x \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu \right)$$

oder

$$\frac{\sin \frac{\pi}{l} \mu}{1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu} = \frac{\sin \frac{\pi}{l} x}{\cos \frac{\pi}{l} x};$$

also auch:

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{2l} \mu} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{l} x$$

Und weil

$$1 - \operatorname{tg} \frac{\pi}{2l} \mu \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{l} x = 0 = \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2l} \mu + \frac{\pi}{l} x \right)}{\cos \frac{\pi}{2l} \mu \cdot \cos \frac{\pi}{l} x};$$

so ist:

$$\cos \left(\frac{\pi}{2l} \mu + \frac{\pi}{l} x \right) = 0 = \cos \frac{\pi}{2},$$

woraus folgt:

$$x = \frac{l - \mu}{2} \dots\dots 14a);$$

welcher Werth statt x in die Gleichung des zweiten Differentialquotienten eingesetzt, ergibt:

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = -a \frac{\pi^2}{l^2} \left[\cos \left\{ \frac{\pi}{l} \left(\frac{l - \mu}{2} \right) \right\} \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu \right) + \sin \left\{ \frac{\pi}{l} \left(\frac{l - \mu}{2} \right) \right\} \sin \frac{\pi}{l} \mu \right]$$

und nach einigen Umformungen

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = -2a \frac{\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi}{l} \frac{\mu}{2}$$

woraus hervorgeht, dass wenn

$$x = \frac{l - \mu}{2}$$

wird, der Werth von Z dann das Maximum erreicht.

Die Gleichung des Z für den Fall des Maximums, lautet daher nach Substitution des x durch den eben gefundenen Werth in der Gleichung 13)

$$Z_m = a^{\square} \left[\cos \left\{ \frac{\pi}{l} \left(\frac{l - \mu}{2} \right) \right\} - \cos \left\{ \frac{\pi}{l} \left(\frac{l - \mu}{2} + \mu \right) \right\} \right]$$

woraus nach einigen Abänderungen entsteht:

$$Z_m = 2a \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \dots\dots\dots 15)$$

und indem wir wie oben bei den Gleichungen 5) und 6) in den Gleichungen 13) und 15) $\frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi}$ statt $a^{\square}$ setzen, gelangen wir zur allgemeinen Gleichung:

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left[\cos \left(\pi \frac{x}{l} \right) - \cos \left(\pi \frac{\mu + x}{l} \right) \right] \dots\dots\dots 16a)$$

so wie zur Gleichung t des Maximums für die Hubhöhe am Scheitelpunkt der Zuckungcurve:

$$H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \dots\dots\dots 16b)$$

Woraus sich der Verkürzungscoefficient ergibt:

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{H_m}{2 \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}} \dots\dots\dots 16c)$$

Wir können die Gleichung (16a) noch in einer anderen Form schreiben, in welcher sie auch später ihre Anwendung finden wird.

Nennen wir die Zeit, in welcher die Zuckungswelle die Strecke x zurücklegt, t_x , so steht

$$x = t_x v \text{ und ebenso}$$

$$l = T v,$$

somit

$$\frac{x}{l} = \frac{t_x}{T};$$

es heisse ferner die Zeit, in welcher die Zuckungswelle die ganze Muskellänge μ zurücklegt, t_μ , so ist wieder

$$\mu = t_\mu v$$

$$l = T v$$

somit

$$\frac{\mu}{l} = \frac{t_\mu}{T}$$

wenn wir nun diese Werthe in der Gleichung 16a) gegen einander vertauschen, so geht dieselbe über in:

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left[\cos \pi \frac{t_x}{T} - \cos \pi \left(\frac{t_\mu + t_x}{T} \right) \right],$$

setzen wir weiter noch

$$t = t_x + t_\mu$$

also

$$t_x = t - t_\mu$$

so erhalten wir endlich:

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left[\cos \left(\pi \frac{t - t_\mu}{T} \right) - \cos \left(\pi \frac{t}{T} \right) \right] \dots\dots 16d)$$

in welcher Gleichung unter t die gesammte Zeit seit Beginn der Zuckung zu verstehen ist.

Aus dem für x gefundenen Werthe $\frac{l - \mu}{2}$ geht hervor, dass das Maximum der Zuckungshöhe mit dem Zeitmoment zusammenfällt, in welchem die Mitte der Welle über der Mitte des Muskels sich befindet, dass also, wie auch Fig. 1 andeutet, zu jenem Zeitmomente das vorangehende Wellenende a um eine eben so grosse Strecke über das Wellenschlussende r des Muskels hinaus gelangt sein muss, wie das nachfolgende Wellenende c noch entfernt ist vom Wellenausgangsende a des Muskels. Darum ist also auch die oben erwähnte Zeitdifferenz $T - T_m$ gleich jener Zeit, welche die Welle zur Zurücklegung einer Strecke x noch benöthigt. Weil nun

$$T - T_m = \frac{l}{v} - T_m = \frac{x}{v} = \frac{l - \mu}{2v} \text{ ist,}$$

steht auch:

$$T_m = \frac{l + \mu}{2v}$$

Da ab er diese, zwei unbekannte Grössen l und v enthaltende Gleichung zur Ermittlung derselben nicht genügt, ist es nöthig noch andere Hilfgleichungen zu gewinnen. Diese können nun abgeleitet werden sowohl mit Bezug auf den Zeitpunkt, in welchem die Zuckungscurve ihre halbe Höhe erreicht, als auch mit Bezug auf den Zeitpunkt des Wendepunktes dieser Curve.

§. 4.

Ermittlung des Zeitpunktes der halben Zuckungshöhe für den Fall $\mu < l$.

Bei der Bestimmung des Zeitpunktes der halben Zuckungshöhe sind bei dem hier angenommenen Verhältniss $\mu < l$ zwei weitere Fälle zu unterscheiden, nämlich einmal ob die Muskelänge hinreicht, dass die halbe Zuckungshöhe erreicht werden könne, wenn die Welle, von dem einen Ende des Muskels ausgehend, mit ihrem vorangehenden Ende eben bis zum andern Ende desselben angelangt ist, oder ob dieses vorangehende Wellenende auch über jenes Muskelende eine bestimmte Strecke schon hinweggeschritten sein muss, damit die halbe Zuckungshöhe eingetreten sein könne.

Es ergibt sich daher die Aufgabe, vor Allem den Grenzwert der für den ersteren Fall erforderlichen Muskellänge zu ermitteln. Derselbe kann aber bestimmt werden, wenn wir aus der Gleichung der zur Sinuscurve gehörigen Fläche jenes Stück der Abscisse vom vorangehenden Wellenende aus bestimmen, welchem eine Flächengrösse zugehört, die gleich ist der Hälfte jener, dem Zuckungsmaximum entsprechenden Fläche, von der wir bereits wissen, dass sie unterhalb des Scheiteltheiles der Sinuscurve gelegen, von der Abscisse der letzteren einen mittleren Abschnitt von der Ausdehnung der Muskellänge zur Grundlinie hat.

Nach Gleichung 15) ist die Grösse einer solchen Fläche

$$Z_m = 2A \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}$$

Der Hälfte dieser Grösse soll nun die Fläche gleich sein, welche einengleich langen, jedoch am vorangehenden Ende der Sinnscurve gelegenen Abschnitt der Abscissenaxe zur Grundlinie hat.

Aus der allgemeinen Gleichung 3) ergibt sich für die letztere Fläche

$$z = a \left(1 - \cos \pi \frac{\mu}{l} \right),$$

den letzten zwei Gleichungen zu Folge steht also:

$$\sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} = 1 - \cos \pi \frac{\mu}{l}$$

also auch

$$\sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} = 2 \sin^2 \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}$$

demnach

$$\sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} = \frac{1}{2} = \sin \frac{\pi}{6} \dots \dots 18)$$

woraus folgt:

$$\mu = \frac{1}{3} l \dots \dots 19)$$

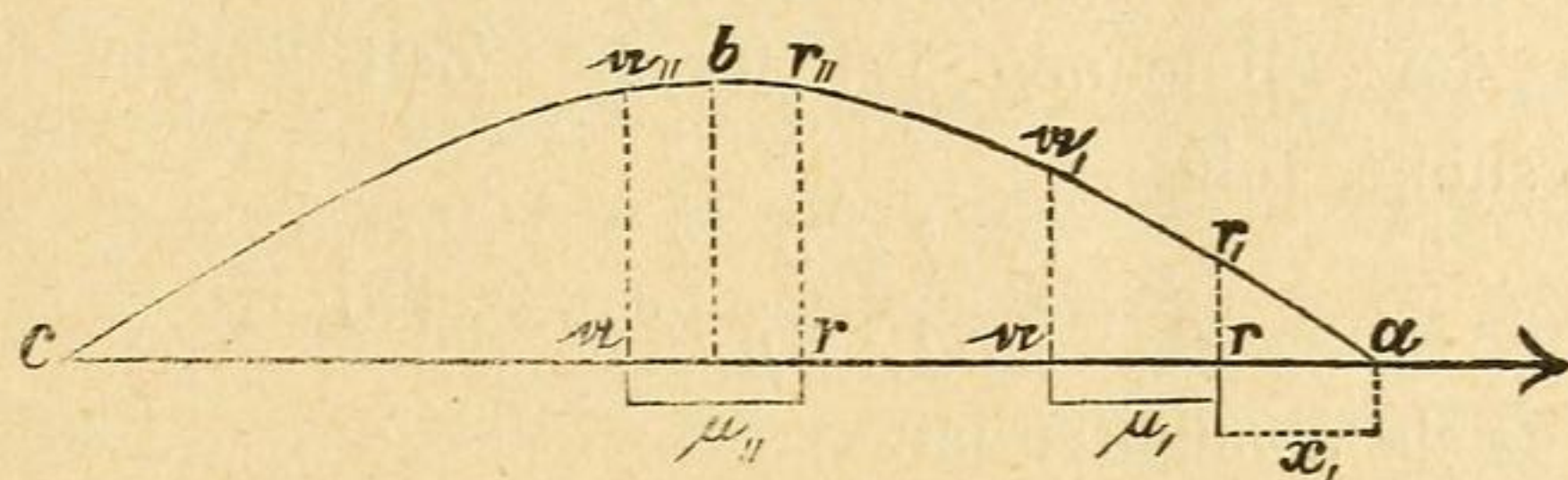
Die soeben für μ gefundene Grösse entspricht also dem gesuchten Grenzwert zwischen den zwei Fällen, welche bei $\mu < l$ behufs der Aufstellung der Gleichung für die Zeit der halben Zuckungshöhe getrennt zu behandeln sind.

§. 5.

a) Die Gleichung für die Zeit der halben Zuckungshöhe und die daraus abgeleiteten Gleichungen für den Fall $\mu < \frac{1}{3} l$.

Wir haben zunächst, wie es Fig. 2 andeutet, an der Abscisse ac der Sinuscurve, von ihrem vorangehenden Ende a aus, jene Länge x , zu bestimmen, um welche das vorangehende Wellenende auch schon über das Schlussende des Muskels, in der Stellung μ , bereits hinweggeschritten sein muss, wenn das Flächenstück $a a_1 r_1 r$ aus der zur Sinuscurve gehörigen Fläche, welches das der Muskellänge μ , gleich lange Stück der Abs-

(Fig. 2.)



scissenaxe zur Grundlinie hat, die halbe Grösse jenes Flächenstückes $a a_{II} r_{II} r$ erreicht, welchem bei der Lage μ_{II} des Muskels unter dem Scheiteltheil der Wellencurve das dem früheren gleichlange Stück $a r$ aus der Mitte der Abscissenlinie zur Grundlinie dient.

Wir haben also zufolge der Gleichung 3) und 15)

$$\frac{1}{2} Z_m = Z_h = A^{\square} \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} = A^{\square} \left[\cos \left(\frac{\pi}{l} x_1 \right) - \cos \left\{ \frac{\pi}{l} (x_1 + \mu) \right\} \right] ;$$

und nach vollständiger Entwicklung und einigen Umformungen des rechten Gliedes der Gleichung:

$$\sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} = \cos \frac{\pi}{l} x_1 \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} + \sin \frac{\pi}{2} x_1 \cos \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}$$

und demnach zufolge der Gleichung 18) auch

$$\sin \frac{\pi}{6} = \sin \left(\frac{\pi}{l} x_1 + \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right),$$

wonach also

$$x_1 = \frac{l - 3 \mu}{6} \dots \dots 20)$$

ist.

Da also bis zum Eintritt der halben Zuckungshöhe die Wegstrecke μ und x_1 von der Welle zurückgelegt sein muss, demnach die vom Beginn der Zuckung bis dahin verflossene Zeit

$$T_h = \frac{\mu + x_1}{v}$$

ist, so ist dieselbe auch nach Substitution des x_1 durch seinen obigen Werth

$$T_h = \frac{l + 3 \mu}{6 v} \dots \dots 21)$$

Aus dieser Gleichung der Zeit der halben Zuckungshöhe und aus der Gleichung 17) für die Zeit T_m der Maximal-Zuckungshöhe, folgt:

$$\frac{T_m}{T_h} = 3 \left(\frac{l + \mu}{l + 3\mu} \right) \dots\dots 22)$$

woraus leicht abzuleiten ist

$$l = \frac{3 \mu (T_m - T_h)}{3 T_h - T_m} \dots\dots 23)$$

Wird aber dieser Werth für l in die Gleichung 17) für T_m

$$T_m = \frac{l + \mu}{2v}$$

eingesetzt, so folgt daraus

$$v = \frac{\mu}{3 T_h - T_m} \dots\dots 24)$$

und aus der Gleichung 23) und 24) ergibt sich für

$$T = 3 (T_m - T_h) \dots\dots 25)$$

Die aus der Gleichung 22) sich ergebende Gleichung

$$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{2 (l + 3\mu)}{3 (l + \mu)} \dots\dots 26)$$

lässt erkennen, dass mit wachsender Länge μ des Muskels sich T_h dem $\frac{1}{2} T_m$ mehr und mehr nähert, und bei $\mu = l$ dasselbe erreicht, dass also bei diesem Grenzfalle die Zeit der halben Zuckungshöhe mit der halben Zeit der maximalen Zuckungshöhe übereinstimmt; unter jener Grenze aber T_h im Verhältniss zu $\frac{1}{2} T_m$ um so kleiner wird, also der Zeitpunkt der halben Zuckungshöhe noch vor der halben Zeit des Zuckungsmaximums und um so früher eintritt, je kleiner die Muskellänge μ im Verhältniss zur Wellenlänge l ist.

Wir haben nun die Gleichung für T_h auch noch für den zweiten der zu unterscheidenden Fälle zu bestimmen.

§. 6.

β) Die Gleichung für die Zeit der halben Zuckungshöhe und die daraus abgeleiteten Gleichungen für den Fall, dass μ wohl $< l$, jedoch grösser als $\frac{1}{3} l$ ist.

Aus den vorangehenden Erörterungen betreffs des Zeitpunktes der halben Zuckungshöhe für den Fall $\mu < l$ im All-

demnach:

$$x_{II} = \frac{l}{\pi} \arccos \left(1 - \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right) \dots\dots 27)$$

Die Zeit T_h bis zum Eintritt der halben Zuckungshöhe wird nun in diesem Falle sein:

$$T_h = \frac{x_{II}}{v}$$

für die Zeit des Eintrittes des Zuckungsmaximums gilt aber auch hier wie oben die Gleichung 17) im Allgemeinen für $\mu < l$

$$T_m = \frac{l + \mu}{2v}$$

demnach

$$\frac{T_m}{T_h} = \frac{l + \mu}{2x_{II}}$$

und zufolge dieser und der Gleichung 27) ist

$$x_{II} = \frac{T_h}{T_m} \left(\frac{l + \mu}{2} \right) = \frac{l}{\pi} \arccos \left(1 - \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right)$$

woraus endlich folgt:

$$1 = \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\mu}{l} \right) \right\} + \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_h}{T_m} \left(1 + \frac{\mu}{l} \right) \right\} \dots\dots 28)$$

In dieser Gleichung ist nun wohl l als Function von μ , T_m und T_h enthalten, leider aber in einer Form, welche die Bestimmung der Wellenlänge aus der Muskellänge und den Zeiten der maximal- und der halben Zuckungshöhe nur annäherungsweise gestattet.

Man kann jedoch auf Grundlage der letzten Gleichung 28) die den verschiedenen Werthen von $\frac{\mu}{l}$ zwischen $\mu = l$ und $\mu = \frac{1}{3} l$, entsprechenden Werthe von $\frac{T_h}{T_m}$ berechnen und dieselben in einer Tabelle zusammenstellen, mittelst welcher man dann betreffs des Werthes von $\frac{\mu}{l}$, der dem, in einem bestimmten Falle gefundenen Werthe von $\frac{T_h}{T_m}$ entspricht, sogleich so weit orientirt ist, dass man mit Hilfe der obigen Gleichung den wahren Werth von l schon nach wenigen Versuchen mit hinreichender Genauigkeit ermitteln kann.

Da nun, wie sich in der Folge ergeben wird, eben bei den,

zu experimentellen Untersuchungen geeigneten Froschmuskeln zwischen der Muskellänge und der Wellenlänge thatsächlich solche Verhältnisse obwalten, welche den Gebrauch einer derartigen Tabelle zur wesentlichen Erleichterung der Berechnung erheischen, so lege ich hier eine solche vor.

In derselben sind die Werthe von $\frac{T_h}{T_m}$ angegeben, wie sie dem Verhältniss $\frac{\mu}{l}$ entsprechen, wenn letzteres bei einer constanten Länge des l von 180 Theilen und bei einer um je 5 Theile abnehmenden Länge für μ , von $\mu = l$ an bis herab auf $\mu = 0$, sich ändert. Ausserdem sind noch in zwei Rubriken für dieselben Verhältnisse von $\frac{\mu}{l}$ die entsprechenden Verhältnisse zwischen der Zeit der halben Zuckungshöhe und der halben Zeit des Zuckungsmaximums $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$, sowie zwischen der Zeit des Wendepunktes auf dem aufsteigenden Theile der Zuckungcurve und der halben Zeit des Zuckungsmaximums $\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$ beigelegt.

Tabelle umstehend.

Das Verhältniss $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$ betreffend, zeigt diese Tabelle, wie sich dasselbe mit dem Verhältniss $\frac{\mu}{l}$ von $\mu = 0$ an, über $\mu = \frac{1}{3} l$ hinaus, bis zu $\mu = l$ der Art ändert, dass dessen Grösse bis zu $\frac{\mu}{l} = 0.638$ zunehmend, bei diesem Verhältniss mit 1.098 seinen grössten Werth erreicht; bei weiter wachsendem μ aber wieder abnimmt, so dass es bei $\mu = l$ wieder gleich 1 wird, wie es schon einmal bei $\mu = \frac{1}{3} l$ war. Ist also $\mu > l$ oder $\mu = l$, so ist auch $T_h = \frac{1}{2} T_m$, ebenso wenn $\mu = \frac{1}{3} l$ ist; der Zeitpunkt der halben Zuckungshöhe fällt also mit dem Zeitpunkte der halben Zeit des Zuckungsmaximums zusammen. Zwischen $\mu = l$ und $\mu = \frac{1}{3} l$ ist wohl stets $T_h > \frac{1}{2} T_m$, d. h. der Zeitpunkt der halben Zuckungshöhe folgt dem Zeitpunkte der halben Zeit der maximalen Zuckungshöhe erst nach, jedoch nimmt diese

I. Tabelle.

l	μ	$\frac{\mu}{l}$	$\frac{T_h}{T_m}$	$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$	$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$	l	μ	$\frac{\mu}{l}$	$\frac{T_h}{T_m}$	$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$	$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$
180	180	1.000	0.500	1.000	1.000	180	90	0.500	0.540	1.081	1.333
„	175	0.972	0.506	1.013	1.014	„	85	0.472	0.536	1.072	1.283
„	170	0.944	0.513	1.026	1.028	„	80	0.444	0.531	1.062	1.230
„	165	0.916	0.518	1.037	1.043	„	75	0.416	0.525	1.050	1.176
„	160	0.888	0.524	1.048	1.058	„	70	0.388	0.518	1.036	1.120
„	155	0.861	0.529	1.058	1.074	„	65	0.361	0.509	1.019	1.061
„	150	0.833	0.533	1.067	1.090	„	60	0.333	0.500	1.000	1.000
„	145	0.805	0.537	1.075	1.107	„	55	0.305	0.489	0.978	0.936
„	140	0.777	0.540	1.081	1.125	„	50	0.277	0.478	0.956	0.869
„	135	0.750	0.543	1.087	1.142	„	45	0.250	0.471	0.942	0.800
„	130	0.722	0.545	1.091	1.161	„	40	0.222	0.454	0.909	0.727
„	125	0.694	0.547	1.095	1.180	„	35	0.194	0.441	0.883	0.631
„	120	0.666	0.548	1.097	1.200	„	30	0.166	0.428	0.857	0.571
„	115	0.638	0.549	1.098	1.220	„	25	0.138	0.419	0.839	0.487
„	110	0.611	0.548	1.097	1.241	„	20	0.111	0.400	0.800	0.400
„	105	0.583	0.547	1.095	1.263	„	15	0.083	0.384	0.769	0.307
„	100	0.555	0.546	1.092	1.285	„	10	0.055	0.368	0.736	0.210
„	95	0.527	0.543	1.087	1.309	„	5	0.027	0.356	0.713	0.108
„	90	0.500	0.540	1.081	1.333	„	0	0.000	—	—	—

Verspätung von $\mu = l$ an bis $\frac{\mu}{l} = 0.638$ zu, wo sie mit 1.098 ihr Maximum erreicht, von da an bis $\mu = \frac{1}{3} l$ aber nimmt sie wieder ab, so dass im letzteren Falle beide Zeitmomente wieder zusammenfallen. Von da an, wenn $\mu < \frac{1}{3} l$, wird wie schon oben angeführt wurde, das Auseinanderfallen der beiden

Zeitmomente immer grösser, jedoch im umgekehrten Sinne; so dass von jenem Grenzfalle an der Zeitpunkt der halben Zuckungshöhe dem Momente der halben Zeit des Zuckungsmaximums vorangeht.

Ist aus dem Verhältniss $\frac{T_h}{T_m}$ und der Muskellänge μ mit Beihülfe der Tabelle aus der Gleichung 28) die Wellenlänge bestimmt, so kann nach Einsetzung dieses Werthes an die Stelle von l , in der aus Gl. 17) abgeleiteten Gleichung:

$$v = \frac{l + \mu}{2 T_m} \dots\dots 29)$$

die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, und nach $T = \frac{l}{v}$ auch die Schwingungsdauer bestimmt werden.

§. 7.

Ermittlung des Zeitmomentes des Wendepunktes der Zuckungscurve, und die daraus abgeleiteten Gleichungen, für den Fall $\mu < l$.

Nachdem wir in den letzten zwei §§. die Zeitpunkte der halben Zuckungshöhe für den Fall $\mu < l$ ermittelt und daraus mit Beihilfe der Gleichung des Zuckungsmaximums, die Gleichungen für l , v und T der Zuckungswelle abgeleitet haben, schreiten wir jetzt zur Ermittlung des Zeitmomentes des Wendepunktes auf der Zuckungscurve, um einerseits hieraus, abermals mit Berücksichtigung der Gleichung für die Zeit des Zuckungsmaximums, die Gleichungen für dieselben Factoren der Zuckungswelle abzuleiten, andererseits um den Charakter der Zuckungscurve auch für den Fall $\mu < l$ zu bestimmen.

Nun haben wir bereits bei der Discussion des Falles $\mu > l$ im §. 2 gefunden, dass für diesen Fall der Wendepunkt in der Zuckungscurve erst auftritt, nachdem sich die Zuckungswelle in ihrer halben Länge auf dem Muskel entwickelt hatte, bis zu welchem Punkte also die Zuckungscurve fortwährend convex gegen die Abscissenaxe gebogen verlief,

um über denselben hinaus weiter bis zur Scheitelhöhe gegen jene Axe concav zu verlaufen.

Hieraus folgt aber schon, dass auch in allen jenen Fällen, wo der Muskel länger als die halbe Welle ist, der Wendepunkt der Zuckungcurve sich zu demselben Zeitmomente einstellen wird, somit dass

$$T_w = \frac{l}{2v} \dots\dots 30)$$

und ebenso dass der Charakter der Curve vor und nach jenem Punkte, so wie er im Falle $\mu > l$ war, auch hier verbleiben wird.

Weil ferner nach Gleichung 17) für den Fall $\mu < l$ überhaupt

$$T_m = \frac{l + \mu}{2v}$$

ist, so folgt aus den letzten zwei Gleichungen

$$\frac{T}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{2l}{l + \mu} \dots\dots 31)$$

und indem $l > \mu$ ist, folgt auch dass:

$$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m} > 1$$

ist, somit dass der Wendungspunkt der Zuckungcurve erst nach der halben Zeit der maximalen Zuckungshöhe und, wie die vorangeschickte Tabelle in der sechsten Reihe zeigt, um so später eintritt, jemehr die Länge des Muskels abnehmend sich der halben Wellenlänge nähert. Auch ist aus jener Tabelle ersichtlich, dass dem Wendungspunkt auch der Moment der halben Zuckungshöhe, und zwar mit abnehmender Muskelänge bis zur Grenze von $\mu = \frac{1}{2} l$ mehr und mehr vorangeht.

Für den Fall aber, dass überhaupt $\mu < \frac{1}{2} l$ ist, so ist aus dem eben vorher Gesagten leicht einzusehen, dass sich der Charakter der Zuckungcurve nicht ändern kann, und dieselbe also ihre Convexität der Abscissenaxe zukehren muss, so lange als das voranschreitende Wellenende das Schlussende des Muskels nicht überschritten hat. Was sich auch aus dem zweiten Differentialquotienten der für diesen Fall angepassten Gleichung

$$Z = A^{\square} \left(1 - \cos \left\{ \frac{\pi}{2} (\mu - x) \right\} \right)$$

ergiebt, indem

$$\frac{d^2 Z}{d x^2} = A^{\square} \frac{\pi^2}{l^2} \cos \left\{ \frac{\pi}{l} (\mu - x) \right\}$$

für jeden (hier einzig möglichen positiven) Werth von x , von $x = \mu$ an bis $x = 0$, stets positiv verbleibt.

Dass aber in dem Momente, wo das voranschreitende Wellenende das Schlussende des Muskels erreicht, auch der Wendepunkt in der Zuckungcurve auftritt, geht daraus hervor, dass diese Curve sogleich concav gegen die Abscissenaxe wird, so wie jenes Muskelende von dem vorangehenden Wellenende überschritten ist. Denn es ist der, aus der Gleichung 13), welche einem solchen Falle entspricht, unter No. 14) abgeleitete zweite Differentialquotient,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Z}{d x^2} = a \left[- \frac{\pi^2}{l^2} \cos \frac{\pi}{l} x \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} \mu \right) \right. \\ \left. - \frac{\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \mu \right], \end{aligned}$$

der nach einigen Umwandlungen übergeht in:

$$\frac{d^2 Z}{d x^2} = - 2 a \frac{\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi}{l} \frac{\mu}{l} \sin \left(\frac{\pi}{l} x + \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right)$$

bei jedem (hier einzig möglichen) positiven Werthe von x stets negativ.

Es wird demnach für den Fall $\mu < \frac{1}{2} l$, die Zeit des Eintrittes des Wendepunktes

$$T_w = \frac{\mu}{v} \dots\dots\dots 32)$$

sein, und weil auch hier

$$T_m = \frac{l + \mu}{2 v},$$

so ist

$$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{4 \mu}{l + \mu} \dots\dots\dots 33)$$

Aus dieser Gleichung, so wie aus der Zusammenstellung der betreffenden Werthe in der sechsten Reihe der obigen Tabelle ist ersichtlich, dass mit abnehmendem μ auch der Werth

derselben der Art fort abnimmt, dass bis $\mu = \frac{1}{3} l$ die Zeit bis zum Eintritt des Wendepunktes länger ist als die halbe Zeit bis zum Eintritt des Zuckungsmaximums; bei $\mu = \frac{1}{3} l$ werden beide Zeiten gleich; nimmt endlich μ noch weiter ab, so geht trotz fortgesetzter Abnahme des Werthes jener Gleichung, der Zeitmoment des Wendepunktes dem Momente der halben Zuckungshöhe mehr und mehr voran. Und ebenso tritt bis auf — $\mu = \frac{1}{3} l$ herab der Moment der halben Zuckungshöhe — wohl in abnehmender Weise — noch vor dem Momente des Wendepunktes ein; bei $\mu = \frac{1}{3} l$ fallen auch diese zusammen; endlich bei noch weiter abnehmendem μ geht der Moment des Wendepunktes dem Momente der halben Zuckungshöhe voran.

Was die im Momente des Wendepunktes erreichte Zuckungshöhe H_w betrifft, so ergibt sich diese für die Fälle von $\mu = l$ bis $\mu = \frac{1}{2} l$, aus Gleichung 11a), weil ja im Momente des Wendepunktes die Hälfte jener Hubhöhe erreicht sein muss, welche sich ergeben würde, wenn diese Welle, wie im Falle $\mu > l$, sich vollständig entwickeln könnte; die gesuchte Zuckungshöhe ergibt sich aber auch aus Gl. 16a, wenn darin $x = 0$ und $\mu = \frac{1}{2} l$ gesetzt wird, mit:

$$H_w = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \dots\dots 34)$$

für die Fälle aber, in denen $\mu < \frac{1}{2} l$ ist, und in denen der Wendungspunkt mit dem Momente zusammenfällt, wo das vorangehende Wellenende eben das Schlussende des Muskels erreicht hat, kann die dem Wendepunkte entsprechende Zuckungshöhe nach der allgemeinen Gleichung 3) abgeleitet werden aus

$$\begin{aligned} Z_w &= A^{\square} \left(1 - \cos \pi \frac{\mu}{l} \right) \\ &= 2 a^{\square} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right) \end{aligned}$$

wonach die gesuchte Hubhöhe ist:

$$H_w = 2 \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{l}{\pi} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right) \dots\dots 35)$$

Ebenso müssen wir auch die Ableitung der Gleichungen

für die Factoren der Zuckungswelle, bei Benutzung der nun schon bekannten Gleichungen für die Zeit T_m des Zuckungsmaximums und für die Zeit des Eintrittes des Wendepunktes der Zuckungcurve, gesondert für die zwei Hauptfälle von $\mu \gtrless \frac{1}{2} l$ vornehmen.

Von $\mu = l$ bis herab zu $\mu = \frac{1}{2} l$ steht zu Folge der Gleichung 31)

$$\frac{T_w}{T_m} = \frac{l}{l + \mu}$$

demnach ist

$$l = \mu \frac{T_w}{T_m - T_w} \dots\dots 36)$$

und weil zu Folge der Gleichung 30) auch steht:

$$l = 2 v T_w,$$

so folgt:

$$v = \frac{\mu}{2 (T_m - T_w)}; \dots\dots 34)$$

wonach daraus

$$\frac{l}{v} = T$$

die Schwingungsdauer zu bestimmen ist.

Ist aber $\mu < \frac{1}{2} l$ dann steht zufolge Gleichung 33)

$$l = \mu \frac{2 T_m - T_w}{T_w} \dots\dots 38)$$

und zu Folge der Gleichung 32)

$$v = \frac{\mu}{T_w} \dots\dots 39)$$

Es ist leicht nachzuweisen, dass so wie in dem Falle, wenn $\mu > l$, ebenso auch im umgekehrten Falle, die Zuckungcurve, nach erreichter Maximalhöhe, gegen die Abscissenaxe niedersteigend ebenso verläuft, wie in ihrem aufsteigenden Theile, und dort so wie im letzteren Theile einen Wendepunkt hat, der mit jenem in dem aufsteigenden Theile symmetrisch zu beiden Seiten des Scheitelpunktes der Curve gelagert sein muss. Denn im Falle $\mu > l$, brauchen wir nur in der Gleichung 10) die Zeit t über den Werth T , den sie zur Zeit des erreichten Höhepunktes hatte, noch weiter wachsen zu lassen, so wird die Hubhöhe in derselben Weise wieder abnehmen, wie sie vorhin im aufsteigenden Abschnitt der Curve

mit wachsendem t zugenommen hatte. Dass aber auch im Falle $\mu < l$ das Fallen der Hubhöhen nach erreichtem Maximum in derselben Weise erfolge, wie vor demselben ihr Steigen erfolgte, geht schon aus dem hervor, dass zur Zeit des Maximums der Hubhöhe, der Muskel zu Folge der Gleichung 14a) sich gerade in der Mitte der Zuckungswelle befindet, und sein Heraustreten aus der Welle in derselben Weise erfolgen muss, in welcher er vorhin in dieselbe mehr und mehr hineingerathen war. In die weiteren Ableitungen der Abnahme der Zuckungshöhe brauchen wir uns aber um so weniger hier einzulassen, als sie für uns von keinem weiteren Interesse wären, da wir wissen, dass der Ablauf der Zuckungscurve in ihrer zweiten Hälfte, aus bereits oben besprochenen Gründen, im Versuche eine Störung erleidet.

§. 8.

Uebersicht der Resultate.

Indem wir von der Voraussetzung ausgingen, dass die einfache Schwingung eines Muskelelementes eine Sinusschwingung sei, und weiter noch annahmen, dass bei der einfachen Zuckung die Ausschwingung des Muskelelementes nur nach der einen Seite der Gleichgewichtslage und wieder dahin zurück, nicht aber über diese hinaus auch nach der andern Seite erfolge, konnten wir aus der dieser Schwingung entsprechenden Gleichung 2)

$$y = a \sin \pi \frac{t}{T}$$

eine allgemeine Gleichung für die Hubhöhe im Verlaufe der einfachen Muskelzuckung bis zu ihrem Höhepunkt hinan ableiten, welche uns die zu irgend einem Zeitmomente nach dem Beginn der Zuckung erreichte Hubhöhe, innerhalb der aufsteigenden Strecke angiebt.

Die unter N. 16 d) aufgestellte Gleichung

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left\{ \cos \left(\pi \frac{t - t_\mu}{T} \right) - \cos \left(\pi \frac{t}{T} \right) \right\}$$

entspricht allen Fällen, möge die Muskellänge $\mu \geq l$ sein. So lange aber, als das vorangehende Ende der Zuckungswelle das

zweite Muskelende nicht überschritten hat, nimmt jene Gleichung die Form

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{T} \right) \dots \text{Gl. 10)}$$

an.

Aus der Analyse dieser Gleichungen ergab sich, dass die denselben entsprechende Zuckungcurve in allen Fällen einen gleichen Charakter hat; derart dass sie anfangs convex, dann über einen Wendepunkt hinaus concav gegen die Abscissenaxe gebogen sich zu ihrem Höhepunkt erhebt.

Für die Hubhöhe an diesem Punkte erhielten wir für den Fall dass $\mu > l$ ist in d. Gl. (10a)

$$H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi}$$

für den Fall aber dass $\mu < l$ ist in d. Gl. (16b)

$$H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l};$$

aus welchen Gleichungen sich auch umgekehrt die Gleichungen für den Verkürzungscoefficienten $\frac{\alpha}{\delta}$ ergaben.

Wir fanden ferner, dass im Falle $\mu > l$ ist, die Zuckungcurve so lange ihre Maximalhöhe nicht verlässt, so lange das vorangehende Ende der Zuckungswelle das zweite Muskelende nicht überschreitet. Von diesem Momente an aber muss die Höhe der Zuckungcurve in derselben Weise wieder abnehmen, in welcher sie vorhin in ihrem aufsteigenden Abschnitte zugenommen hatte.

Und eben so ist der Verlauf der Abnahme der Höhe im absteigenden Theile der Zuckungcurve das verkehrte Spiegelbild der Zunahme derselben im aufsteigenden Theile der Curve auch im Falle dass $\mu < l$ ist. Daher senkt sich die Zuckungcurve von ihrem Höhepunkt aus zuerst concav, dann über einen mit dem vorigen symmetrisch zum Scheitelpunkte gelegenen Wendungspunkt hinaus, convex gegen die Abscissenaxe gebogen, zu dieser herab.

Das Verhältniss zwischen der Hubhöhe zur Zeit des Wendepunktes und der Maximalhubhöhe fanden wir wir ver-

änderlich mit dem Verhältniss $\frac{\mu}{l}$; so das im Falle $\mu < l$ ist, die Hubhöhe am Wendepunkte

$$H_w = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} = \frac{1}{2} H_m$$

gleich der halben Maximalhöhe ist; zwischen $\mu < l$ und $\mu > \frac{1}{2} l$, bleibt wohl

$$H_m = \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{l}{\pi} ,$$

da jedoch von $\mu' < l$ an die Maximalhubhöhe

$$H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \text{ ist.}$$

so sieht man, dass der halbe Werth der letzteren hinter der Hubhöhe H_w mit abnehmendem μ bis $\mu = \frac{1}{3} l$ mehr und mehr zurückbleibt. Von da an aber wird nach Gleichung 35)

$$H_w = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right) ;$$

während auch ferner noch H_m nach Gleichung 16b) unverändert bleibt; es nimmt daher mit weiterabnehmendem μ , H_w rascher ab als der halbe Werth vom H_m .

Für den Fall $\mu > l$ konnten wir die Factoren der Zuckungswelle, ohne Rücksicht auf das Schwingungsgesetz der Muskelelemente, unmittelbar aus der Zeit $T_{m/}$ wo die Zuckungcurve ihre Maximalhöhe eben erreicht, und aus der Zeit $T_{m//}$ bestimmen, wo sie — nachdem sie eine Strecke in derselben Höhe verlief, von derselben abzustiegen beginnt. Wir fanden

$$v = \frac{\mu}{T_{m//}} \dots \text{Gl. 8)}$$

$$l = \mu \frac{T_{m/}}{T_{m//}} \dots \text{Gl. 9)}$$

Sobald aber $\mu < l$ ist, können jene Factoren nur aus den Gleichungen der Hubhöhen mit Beihilfe der Zeiten des Eintrittes der Maximalhubhöhe einerseits und andererseits der Zeit T_w des Eintrittes des Wendepunktes auf der aufsteigenden Hälfte der Zuckungcurve, oder der Zeit T_h der halben Zuckungshöhe andererseits abgeleitet werden. Es muss jedoch auch dabei das

Verhältniss $\frac{\mu}{l}$ berücksichtigt werden, indem dieses Verhältniss auf die Zeit T_m des Eintrittes der Maximalzuckungshöhe wohl weiter ohne Einfluss ist, so dass in allen Fällen von $\mu < l$ auch

$$T_m = \frac{l + \mu}{2v}$$

verbleibt, die Zeiten T_w und T_h aber dadurch verschiedene Veränderungen erleiden.

Und zwar fanden wir von $\mu > l$ bis $\mu = \frac{1}{2} l$

$$T_w = \frac{l}{2v} \dots \text{Gl. 12a)}$$

von $\mu < \frac{1}{2} l$ an aber abwärts

$$T_w = \frac{\mu}{v} \dots \text{Gl. 32)}$$

und danach:

von $\mu = l$ bis $\mu = \frac{1}{2} l$

$$l = \mu \frac{T_w}{T_m - T_w} \dots \text{Gl. 36)}$$

für den Fall aber $\mu < \frac{1}{2} l$

$$l = \mu \frac{2 T_m - T_w}{T_w} \dots \text{Gl. 38)}$$

$$v = \frac{\mu}{T_w} \dots \text{Gl. 39)}$$

Für T_h , welches so lange $\mu > l$, gleich $\frac{l}{2v}$ ist, konnten wir von $\mu = l$ an bis $\mu = \frac{1}{3} l$ nur die Gleichung

$$1 = \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\mu}{l} \right) \right\} + \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{T_h}{T_m} \left(1 + \frac{\mu}{l} \right) \right\} \dots \text{Gl. 28)}$$

aufstellen, aus welcher die dem Verhältniss $\frac{\mu}{l}$ entsprechenden

Werthe von $\frac{T_h}{T_m}$ berechnet und in der Tabelle I. zusammengestellt wurden. Für $\mu < \frac{1}{3} l$ endlich ergab sich:

$$T_h = \frac{l + 3\mu}{6v} \dots \text{Gl. 21)}$$

demgemäss ist von $\mu = l$ bis $\mu = \frac{1}{3} l$ der Factor l nur aus jener Gleichung 28) und mit Beihilfe der I. Tab.) zu bestimmen;

wonach denn auch

$$v = \frac{l + \mu}{2 T_m} \dots \text{Gl. 17)}$$

gefunden werden kann. Für den Fall endlich, dass $\mu < \frac{1}{3} l$, ist:

$$l = \frac{3 \mu (T_m - T_h)}{T_h - T_m} \dots \text{Gl. 23)}$$

$$v = \frac{\mu}{3 T_h - T_m} \dots \text{Gl. 24)}$$

$$T = 3 (T_m - T_h) \dots \text{Gl. 25)}$$

Durch diese Gleichungen ist also die Möglichkeit geboten, bei jedem Verhältniss zwischen Muskellänge und Wellenlänge die Factoren der Welle zu bestimmen aus einer einzigen Zuckungcurve, die ein an einem Ende befestigter, am anderen herabhängenden Ende mit dem Zeichenhebel verbundener, parallelfaseriger Muskel beschreibt, wenn er an seinem oberen Ende durch einen momentanen Reiz erregt wird. Wobei an der Zuckungcurve die Zeiten T_m und T_w oder statt der letzteren die Zeit T_h und am Muskel die Länge seiner freibeweglichen Strecke bestimmt sein müssen. Welche der, dem verschiedenen Verhältniss von $\frac{\mu}{l}$ entsprechenden Formeln aber in einem speciellen Falle anzuwenden seien, ergibt sich aus dem Verhältniss von $\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$ oder $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$, welches selbst, wie wir wissen und auch aus der Tabelle I. ersehen können, mit dem Verhältniss von $\left(\frac{\mu}{l}\right) \frac{\mu}{l}$ sich derart ändert, dass so wohl $\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$, als auch $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$ nur bei $\mu = \frac{1}{3} l$ und dann von $\mu = l$ weiter nach $\mu > l$ gleich 1 ist, sonst aber immer einem bestimmten Bruchwerthe entspricht, der $\geq$ als 1 ist. Und falls auch einmal jener Werth sich gleich 1 erweisen sollte, so lässt sich selbst dann entscheiden, ob der Muskel eben gleich $\frac{1}{3} l$ oder grösser als l sei, denn im ersteren Falle müsste die Zuckungcurve einen Scheitelpunkt, im zweiten Falle eine mehr oder weniger ausgedehnte, der Abscissenaxe parallel laufende Scheitellinie zeigen.

Nach Bestimmung der Factoren der Contractionswelle

und der Maximalhubhöhe der Zuckungscurve, ist es endlich möglich aus den Gleichungen (10a) resp. (16b) auch den Verkürzungscoefficienten $\frac{\alpha}{\delta}$ zu bestimmen; ja es kann sogar auch die Schwingungsweite α des Muskelementes oder der elementaren Muskelquerscheibe, wenn auch nur annäherungsweise eruiert werden, sobald man wenigstens den Mittelwerth ihrer Länge, d. h. ihrer in der Längenrichtung gemessenen Dicke kennt.

Zur Erleichterung der Uebersicht und der Auffindung der bei solchen Bestimmungen zu benützenden Gleichungen, sind dieselben in der Tabelle II. zusammengestellt. In der ersten verticalen Reihe derselben sind nach einander folgend die Momente bezeichnet, auf welche sich die in der betreffenden horizontalen Reihe stehenden Gleichungen beziehen, welche selbst wieder in jeder dieser Reihen den Hauptverhältnissen zwischen Muskel- und Wellenlänge entsprechend geordnet sind.

Die Bedeutung der dort vorkommenden Buchstaben ist übersichtlich folgende:

μ == Muskellänge.

l == Wellenlänge.

v == Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Zuckungswelle.

T == Schwingungsdauer der Muskelemente.

α == die Schwingungsweite derselben.

δ == die Länge derselben, gleich der Dicke der elementaren Muskelquerschnitte.

$\frac{\alpha}{\delta}$ == der Verkürzungscoefficient der Elemente.

H == die Hubhöhe im Verlaufe der Zuckungscurve.

H_m == die Maximalhöhe am Scheitel der Zuckungscurve.

H_w == die Hubhöhe am Wendepunkte der Curve.

T_m == die Zeit vom Beginn der Zuckung bis zur Maximalhubhöhe.

$T_{m, I}$ == die Zeit vom Beginn der Zuckung bis zur eben erreichten Maximalhöhe im Falle $\mu > l$.

$T_{m, II}$ == die Zuckung vom Beginn der Zuckung bis zum Momente, wo die Zuckungscurve ihre Maximalhöhe zu verlassen beginnt, im Falle $\mu > l$.

- T_w == die Zeit vom Beginn der Zuckung bis zum Momente des Wendepunktes der Curve.
 T_h == die Zeit vom Beginn der Zuckung bis zum Momente der halben Höhe des Zuckungsmaximums.
 t_μ == die Zeit, in welcher das vorangehende Wellenende um eine der Muskellänge gleiche Strecke sich fortpflanzt.
 t == ein vom Beginn der Zuckung an gerechneter, beliebig langer Zeitabschnitt.

(Siehe Tabelle II. auf Seite 564 u. 565.)

Bevor jedoch die mit Hilfe der aufgestellten Gleichungen vorgenommenen Bestimmungen der Wellenfactoren einen Anspruch auf Geltung erheben können, muss vorhergehend durch Versuche die thatsächliche Berechtigung der Grundlage geprüft werden, auf welcher jene Gleichungen selbst abgeleitet wurden; es muss die Berechtigung der Annahme erst festgestellt werden, dass die Schwingungen der Muskelemente wirkliche Sinusschwingungen seien.

Diese Prüfung bildet den Gegenstand des folgenden Abschnittes.

II. Abschnitt.

Experimentelle Untersuchung der Zuckungscurve.

§. 1.

Aufgabe.

Die Aufgabe, mit welcher dieser Abschnitt sich beschäftigt, besteht zunächst in der Untersuchung, in wiefern die Zuckungscurve, welche ein frei herabhängender, parallelfaseriger Muskel mit dem Zeichenhebel an Myographion beschreibt, wenn derselbe am oberen, befestigten Ende durch einen momentanen elektrischen Reiz erregt wird, mit jener Curve übereinstimmt, welche aus der, unter (16d) im I. Abschnitt für den Verlauf der Zuckungscurve aufgestellten Gleichung sich ergibt, wenn in derselben jene Werthe eingetragen werden, welche theils — wie die Muskellänge — durch unmittelbare Messung, theils mittelbar mit Hilfe der betreffenden Gleichungen für die Fac-

toren der Contractionswelle und den Verkürzungscoefficienten mit Bezug auf eben dieselbe Zuckungcurve gefunden wurden. Denn indem letztere Gleichungen auf Grundlage derselben Annahme, dass nämlich die den Muskelementen eigenthümliche Schwingungsweise eine sog. Sinusschwingung in bereits früher begrenztem Sinne sei, abgeleitet wurden, wie die allgemeine Gleichung für den Verlauf der Zuckungcurve, so kann eine Ueberstimmung zwischen den vom Muskel wirklich beschriebenen und der aus jener Gleichung berechneten Zuckungcurve, nur dann erwartet werden, wenn die vorausgesetzte Schwingungsweise der thatsächlichen entspricht. Eine Uebereinstimmung zwischen den beiden Zuckungscurven würde dann aber nicht nur ein Beweis für die vorausgesetzte Schwingungsweise sein, sondern zugleich beweisen, dass auch die andern Gleichungen zur Bestimmung der Factoren der Zuckungswelle brauchbar und verlässlich sind.

Diese Prüfung setzt also unbedingt voraus, dass die am Myographion erhaltene Zuckungcurve wenigstens in ihrem aufsteigenden Abschnitte, ein treues, wenn auch in vergrößertem Maassstabe gezeichnetes, jedoch keineswegs, zufolge von Eigenthümlichkeiten in der Construction des Apparates, ein verzerrtes Abbild des natürlichen Ablaufes der Zuckung sei, oder aber von diesem nur in so weit abweichen dürfe, als verlässliche Anhaltspunkte sonst am Apparate gegeben sind, um durch entsprechende Correctionen die gezeichnete Zuckungcurve durch Rechnung berichtigen zu können.

An der solchen Erfordernissen genügenden Curve sind alsdann vor Allem, vom Anfange derselben an, in aufeinander folgenden kurzen Absätzen entlang der Zeitabszisse, die denselben coordinirten Ordinatenhöhen auf der aufsteigenden Curvenhälfte, bis zur letzten, der Maximalhubhöhe entsprechenden Ordinate, sammt der zu dieser gehörigen Zeitabszisse genau auszumessen. Ebenso muss die Zeitabszisse der halben Maximalhöhe bestimmt werden. Aus dem hierauf berechneten Verhältniss $\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$ oder $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$ erfährt man, welche der Gleichungen für die Bestimmung der Factoren der Correctionswelle man

II. Tabelle.

$\frac{\mu}{l}$	$\mu > l$	Von $\mu = l$ bis $\mu = \frac{1}{2} l$	Von $\mu = \frac{1}{2} l$ bis $\mu = \frac{1}{3} l$	$\mu < \frac{1}{3} l$
Die Hubhöhe H im Verlaufe der Zuckungcurve	(Gl. 10.) $H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{t}{T}\right) \right)$	(Gl. 16d.) $H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left\{ \cos\left(\pi \frac{t-t_\mu}{T}\right) \cos\left(\pi \frac{t}{T}\right) \right\}$	dieselbe	dieselbe
Die Maximalhubhöhe H_m	(Gl. 10a.) $H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{l}{\pi}$	(Gl. 16b.) $H_m = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}$	dieselbe	dieselbe
Der Verkürzung- coefficient $\left(\frac{\alpha}{\delta}\right)$	(Gl. 10b) $\frac{\alpha}{\delta} = \frac{H_m}{2 \frac{l}{\pi}}$	(Gl. 16c.) $\frac{\alpha}{\delta} = \frac{H_m}{2 \frac{l}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l}}$	dieselbe	dieselbe
Die Zeit T_m der Maximalhubhöhe	$T_{mI} = T \dots$ (Gl. 7.) $T_{mII} = \frac{\mu}{v}$ Die aus beiden abgeleiteten Factoren der Welle $v = \frac{\mu}{T_{mII}}$ (Gl. 8.) $l = \mu \frac{T_{mI}}{T_{mII}}$ (Gl. 9.)	$T_m = \frac{l + \mu}{2 v}$	dieselbe	dieselbe

Die Zeit T_w des Wendepunktes	$T_w = \frac{l}{2v} \dots$ (Gl. 12a.)	dieselbe nach (Gl. 30.)	$T_w = \frac{\mu}{v} \dots$ (Gl. 32.)	dieselbe
Die Hubhöhe H_w zur Zeit des Wendepunktes	(Gl. 11a.) $H_w = \frac{1}{2} H_m \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi}$	dieselbe nach (Gl. 34.)	(Gl. 35.) $H_w = 2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\mu}{l} \right)$	dieselbe
$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m}$	$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m} = 1$	$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{2l}{l + \mu} \dots$ (Gl. 31.)	$\frac{T_w}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{4\mu}{l + \mu} \dots$ (Gl. 33.)	dieselbe
Die Factoren der Zuckungswelle abgeleitet aus T_m und T_w	—	$l = \mu \frac{T_w}{T_m - T_w} \dots$ (Gl. 36.) $v = \frac{\mu}{2(T_m - T_w)} \dots$ (Gl. 37.)	$l = \mu \frac{2T_m - T_w}{T_w} \dots$ (Gl. 38.) $v = \frac{\mu}{T_w} \dots$ (Gl. 39.)	dieselbe
Die Zeit T_h der halben Zuckungshöhe	$T_h = \frac{l}{2v}$	(Gl. 28.) $1 = \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\mu}{l} \right) \right\} + \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{T_h}{T_m} \left(1 + \frac{\mu}{l} \right) \right\}$	dieselbe	$T_h = \frac{l + 3\mu}{6v} \dots$ (Gl. 21.)
$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$	$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 1$	Aus der vorigen Gl. 28) u. d. I. Tabelle	ebenso	$\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = \frac{2(l + 3\mu)}{3(l + \mu)} \dots$ (Gl. 26.)
Die Factoren der Zuckungswelle abgeleitet aus T_m und T_h	—	l aus Gl. 28 u. Tab. I $v = \frac{l + \mu}{2T_m} \dots$ (Gl. 17.) $T = \frac{l}{v}$	ebenso	$l = \frac{3\mu(T_m - T_h)}{3T_h - T_m} \dots$ (Gl. 23.) $v = \frac{\mu}{3T_h - T_m} \dots$ (Gl. 24.) $T = 3(T_m - T_h) \dots$ (Gl. 25.)

anzuwenden hat; wobei man vorher noch die frei contrahirbare Muskelstrecke ausgemessen haben muss. Sind dann jene Factoren bestimmt worden, so hat man endlich noch den Verkürzungscoëfficienten $\frac{\alpha}{\delta}$ aus der gefundenen Maximalhubhöhe und Wellenlänge, nach der Formel der Gleichung (16b) resp. d. Gl. (16c), so wie die Zeit, in welcher das vorangehende Wellenende bei der gefundenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit die gemessene Länge der freien Muskelstrecke durchläuft, nach der Formel $t_u = \frac{\mu}{v}$ zu berechnen.

Indem man dann diese, nöthigen Falles durch angebrachte Correctionen berichtigten Werthe in die Gleichung der Zuckungscurve einstellt, und für die Zeit t darin die gleichen steigenden Werthe einsetzt, welche den, zu den ausgemessenen Ordinatenhöhen gehörigen Zeitabschissen entsprechen, erlangt man die durch Rechnung zu bestimmende Zuckungscurve. Bei dieser Berechnung ist, so lange $t < t_u$ ist, die Formel der Gleichung 10)

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{T} \right)$$

zu gebrauchen, und erst nachdem $t > t_u$ geworden ist, kommt die Formel der Gleichung 16d)

$$H = \frac{\alpha}{\delta} \frac{l}{\pi} \left[\cos \left(\pi \frac{t - t_u}{T} \right) - \cos \left(\pi \frac{t}{T} \right) \right]$$

zur Anwendung. Um die zu dieser Berechnung erforderlichen Data in richtiger Weise zu erhalten, wurde folgende Versuchsmethode angewendet.

§. 2.

Versuchsmethode.

Die Versuchsmethode ist vor allem auf einen Apparat angewiesen, der jenem unbedingten Erfordernisse vollkommen zu genügen im Stande ist, dass die von ihm gelieferte Zuckungscurve entweder ein ganz getreues, wenn auch nach vergrößerstem Maassstabe gezeichnetes Abbild des natürlichen Verlaufes der Zuckung sei, oder falls sie davon abweichend wäre, doch

solche sicher und leicht zu berücksichtigende Anhaltspunkte gegeben seien, mit Hülfe deren man durch angebrachte Correctionen in der Berechnung der Curvencoordinaten letztere richtig stellen könne.

Diesem Erfordernisse kann aber unter allen den Apparaten von verschiedener Constructionsweise, welche seit der in der Nerven- und Muskelphysiologie Epoche machenden Erfindung des ersten Myographions durch Helmholtz, bisher in Anwendung gezogen wurden, für jetzt wenigstens wohl am besten ein Fall-Myographion entsprechen. Ich wage diesen Ausspruch um so zuversichtlicher, als ich mich auf ein Urtheil von vielwiegender Bedeutung berufen kann. Hr. du Bois-Reymond ist es, der in der Beschreibung seines Federmyographions¹⁾ neben dem durch höhere mechanische Vollkommenheit bevorzugten Pendelmyographion das Fall-Myographion vermöge seiner fast unverzerrten Bilder zu jener Classe von Myographien zählt, welchen die Zukunft gehört. Weil, während diese eine grosse Anzahl von Versuchen in kurzer Frist anzustellen erlauben, sie andererseits von jenen Uebelständen frei sind, welche den rotirenden Myographien als principielle Fehler anhaften, wie: dass bei diesen der Stift erst kurz von der Zuckung der Zeichenfläche angelegt werden dürfe, was verwickelte Vorkehrungen fordert; dass zwischen je zwei Versuchen zu viel Zeit vergeht; dass es zu schwer ist, sowohl den Zeitpunkt zu erkennen, wo die gewünschte Geschwindigkeit zu bestimmen, die im Augenblicke des Versuches wirklich herrschte; endlich, dass sich die Myogramme bei grösseren Geschwindigkeiten, wo sie mehr als einen Cylinderumfang einnehmen, in einer Art verwirren, die störend bei Demonstrationen und lästig auch bei Untersuchungen ist.

Wenn aber andererseits jenen ersterwähnten Myographien der Vorwurf gemacht wird, dass sie durch dass gestattete Pro-

1) Fortgesetzte Beschreibung neuer Vorrichtungen zu Zwecken der allgemeinen Nerven- und Muskelphysik. In Poggendorff's Annalen d. Physik u. Chemie. Jubelband. S. 598.

jiciren der Original-Myogramme mittelst der magischen Laterne noch keinen Ersatz dafür gewähren, dass ihre berusste Zeichenfläche nicht zugleich gestattet, die Myogramme abzuklatschen; so kann dies, denke ich, nur so lange als ein Uebelstand angesehen werden, als jene Zeichenfläche aus dem Apparat nicht mit Leichtigkeit herausnehmbar ist und ihrer Form und zu grossen Dimensionen wegen in einen entsprechend construirten Messrahmen nicht eingesetzt werden kann, wo die Ausmessung der Zuckungscurve unter einem Mikroskop unmittelbar ausführbar wäre. Nichts hindert jedoch wenigstens bei den Fall-myographien Platten solcher Form und Grösse anzuwenden, welche leicht auslösbar sind und die gestatten, die auf ihrer berusteten Fläche gezeichneten Curven unter dem Mikroskop, dessen Beleuchtungsspiegel mittels durchfallenden Lichtes die Zeichnung aufs schärfste erhellt, einer um so genaueren Messung zu unterziehen, als bei einem solchen Vorgehen die Unregelmässigkeit der Ränder und der Breite der in der Russchichte gezeichneten Striche die Genauigkeit der Messung nicht mehr stören können; denn falls man nur einen mit feiner Spitze versehenen Zeichenstift aus Stahl angewendet hat, wird man immer dessen Spur als fein und scharf ausgeprägte Linie innerhalb des breiten Streifens des weggefegten Russes verfolgen können.

Dass man aber Platten von so unbequemer Länge beim Fall-Myographion gebrauchen müsse, wie sie erforderlich wären, wenn der Zeichenstift die Platte fortwährend auch dann berühren müsste, während sie zur Gewinnung der erforderlichen Geschwindigkeit den nöthigen Fallraum durchheilt, liegt um so weniger ein zwingender Grund vor, als man bei guter Construction des Apparates ohne das geringste Wagniss die heranrollende Platte mit ihrem abgeschrägten Rande den Stift treffen lassen kann, der in einer sicheren Führung am Hebelende, durch eine Feder stets bis zu der ihm gewährten Grenze vorgeschoben erhalten wird. Nicht nur leidet die Spitze des Stiftes darunter nicht im Geringsten, sondern sie erleidet bei richtiger Handhabung des Apparates auch keine störende Lageänderung; denn wiederholt konnte ich mich an dem von mir

gebrauchten Fallmyographion überzeugen, dass wenn ich mehrmals nacheinander die Zeichenplatte vor dem ruhenden Stifte emporrollen liess, die gezeichneten geraden Linien so genau auf einander fielen, dass mit freiem Auge keine Abweichung, und unter dem Mikroskop kaum eine unbedeutende, aber selbst diese nicht immer wahrnehmbar war.

Dass endlich auf einer Strecke von mehr als 120 Mm., welche die gewöhnliche Länge der Zuckungscurve bei der von mir in den folgenden Versuchen angewandten Geschwindigkeit von 0.664 Meter in der Secunde nicht erreicht, die Geschwindigkeit der Platte unverändert bleibt, konnte ich mich durch Prüfung mittels Koenig'scher Stimmgabeln in zuverlässiger Weise überzeugen.

Auch ist die eben erwähnte Geschwindigkeit keineswegs die äusserste Grenze der erreichbaren; sie kann leicht durch grösseres Uebergewicht auf 0.9 bis 1.0 Meter in der Secunde und sie könnte durch Verlängerung der Fallhöhe und noch weitere Vergrösserung des Uebergewichtes auch höher gesteigert werden, und es wäre auch die Erschütterung am Ende der Bahn durch passend angebrachte Stossfedern noch immer zu vermeiden. Aber es liegt kein Grund vor auch nur über jene sehr mässige Geschwindigkeit hinauszugehen, da, wie Hr. du Bois-Reymond¹⁾ überzeugend nachgewiesen hat, bei der jetzigen Einrichtung (der Zeichenvorrichtungen) schon eine Geschwindigkeit von etwa 500 Mm. genügt, und durch eine weitere Steigerung kein Vorthail erreicht wird.

Nach alledem also ist es vielleicht zulässig, neben dem Vorzug fast unverzerrter Bilder, welchen Hr. du Bois-Reymond in anerkennender Weise dem Fallmyographion einräumt, demselben auch noch die Fähigkeit zuzusprechen, dass es, mit Verständniss und Geschick ausgeführt, selbst die höhere mechanische Vollkommenheit des Pendelmyographions erreichen könne.

Wie immer aber auch aus der Natur der Sache folgend, die Bedingungen einer Vollkommenheit des Mechanismus bei

1) A. a. O. S. 604.

dem Fallmyographion schwieriger zu erfüllen sein mögen als beim Pendelmyographion, so ist doch so viel sicher, dass eine vollkommen hinreichende Ganggenauigkeit auch bei jenem erreichbar ist; die Treue der Bilder aber, die es unter dieser Bedingung liefert, und die nur insofern etwas verzerrt sind, als dies die Uebertragungsweise der Bewegung vom Muskel auf den Zeichenhebel, keineswegs aber ein störendes Vorwärtsschreiten der Zeichenfläche mit sich bringt, macht das Fallmyographion wenigstens zu Untersuchungen, wie die hier vorliegenden, vor allen andern geeignet. Denn während bei diesem Apparate die allenfalls nöthigen Correctionen an den Curvencoordinaten, sobald man die Verhältnisse kennt, unter welchen der Muskel seine Bewegung auf den Zeichenhebel überträgt, leicht ausführbar sind, werden dieselben viel complicirter beim Pendelmyographion, weil bei diesem auf die Gestaltung der Curve ausser der Zeichenvorrichtung wesentlich noch die im Verlaufe der Schwingung sich fortändernde Geschwindigkeit der Zeichenfläche einfließt. Rotirende Myographien aber eignen sich, auch abgesehen von den bereits von maassgebender Seite hervorgehobenen Uebelständen, desshalb nicht, weil ein noch so gelungener Abklatsch eines Myogrammes jene bequeme, sichere und leichte Ausführung der Coordinatenmessung nicht zulässt, wie eine in einen passenden Messrahmen einschiebbare Glasplatte, auf welcher das Myogramm bei Beleuchtung mit durchfallendem Lichte unter dem Mikroskop der Messung unmittelbar kann unterzogen werden.

Auch das Myographion von Hrn. Marey ist, sofern es als Schreibfläche eine rotirende Trommel benützt, mit den allgemeinen Uebelständen der rotirenden Myographien behaftet, und seine, wegen zu kleiner Geschwindigkeit der Rotation, zu wenig entwickelten Myogramme erlauben an ihrem Abklatsch um so schwieriger eine zureichend genaue Bestimmung der Curvencoordinaten, je schwieriger es bei diesem Apparate ist, die Abscissenlinie der Curve genau in der Fortsetzung der, dem Curvenbeginn unmittelbar vorhergehenden, geraden Strecke vor oder nach dem Myogramm zu führen.

Sofern aber diesem Myographion in dem Baue seines

Zeichenhebels der Vorzug vor andern Apparaten nachgerühmt wird, dass weil der Hebel zu Folge seiner sehr geringen Masse auch nur ein verschwindend kleines Trägheitsmoment besitzt, derselbe selbst bei grösserer Geschwindigkeit nur wenig lebendige Kraft erlangen kann, die rasch schon durch kleine Widerstände überwunden, den Hebel zu keiner selbstständigen Bewegung befähigt; so kommt wohl dem gegenüber zu bedenken, dass die Leichtigkeit des Hebels an und für sich denselben vor einer Schleuderung noch nicht verwahren kann. Denn die lebendige Kraft, welche der Hebel erlangt, muss stets der ihm mitgetheilten gleich sein, welcher entsprechend aber die Geschwindigkeit, welche demzufolge der Hebel erreicht, um so grösser sein wird, je geringer seine Masse ist; auch wird schon eine kleine lebendige Kraft, welche einem schweren Hebel gegenüber noch nicht vermögend genug gewesen wäre, genügen, dem leichteren Hebel eine grosse Geschwindigkeit zu ertheilen, bei welcher seine lebendige Kraft ebenso wie sonst die eines schweren Hebels auch nicht so leicht und rasch würde aufgezehrt werden. Es kommt darum bei beiderlei Hebeln überhaupt vorzüglich darauf an, wie die dem Hebel ertheilten Kraftimpulse beschaffen sind und wie demselben ein gewisser Theil der ihm ertheilten lebendigen Kraft wieder rasch genug entzogen wird. Gemäss der dem Myographionhebel gestellten Aufgabe, den jeweiligen Standpunkt des mit ihm in Verbindung stehenden Muskelendes im Verlaufe der Zuckung stets getreu anzuzeigen, soll derselbe an seinem Angriffspunkte mit gleicher Geschwindigkeit wie das Muskelende emporsteigen, also in gleichen Zeiten ebenso lange Wegstrecken zurücklegen, wie jenes Ende selbst. Demgemäss benöthigt der Hebel einen Theil der ihm ertheilten lebendigen Kraft zu seiner eigenen Erhebung, während welcher er jenen Theil der Kraft in Spannkraft umsetzt, und es braucht also nur noch derjenige Rest von lebendiger Kraft dem Hebel entzogen zu werden, der aus der im nächstvorangehenden Zeitmomente ihm ertheilten gesammten lebendigen Kraft ihm noch allenfalls verblieben ist, nachdem er schon die vom Muskelende erreichte Höhe selbst erstiegen hat, und der ihm noch eine Geschwindigkeit übrig lässt, mit

welcher er über den erreichten Punkt hinaus selbständig noch weiter würde gefördert werden. Die Grösse des dem Hebel in jedem einzelnen Zeitmomente übrig bleibenden Kraftrestes hängt aber, wie leicht begreiflich, ebenso gut von der Grösse der ihm in dem vorangehenden Momente ertheilten Gesamtkraft ab, wie auch von der Grösse der Wegstrecke, welche in dem betreffenden Momente das Muskelende zurückgelegt hat, und die der Hebel in derselben Zeitfrist mit Verwendung der übernommenen Kraft zurückzulegen hat. Von der Grösse dieser zwei Momente hängt es also auch überhaupt ab, ob dem Hebel in irgend einem Zeitmomente noch ein Kraftrest verblieben ist, oder ob nicht schon die ganze Kraft aufgezehrt ist, ehe er noch die erforderliche Wegstrecke zurückgelegt hat. Im ersteren Falle würde er dem Muskel voran eilen, im letzteren aber würde er als Widerstand die Geschwindigkeit des letzteren abermals verkleinern.

Da wir die Gesetze, nach welchen im Verlaufe der Zuckung einerseits die Geschwindigkeit sich ändert, mit welcher das bewegliche Muskelende sich erhebt, andererseits die lebendige Kraft, welche der Muskel nach aussen entwickelt, erst im weiteren Verlaufe werden kennen lernen; so können wir uns hier in die Erörterung, inwiefern die Bewegung des Muskels in Folge der etwaigen selbständigen Bewegung des Hebels im Verlaufe der Zuckung eine Störung erleidet und die Bewegung beider Körper zeitweise von einander abweicht, nicht näher einlassen; können jedoch schon jetzt bemerken, dass obwohl die Bewegungsgesetze des zuckenden Muskels und die für die Bewegung des Hebels geltenden Fallgesetze nicht mit einander übereinstimmen, dennoch eine namhafte Störung im Gange des Hebels hieraus aus dem Grunde nicht erwachsen kann, weil ja die lebendige Kraft von Seiten des Muskels nicht in einzelnen Stössen oder in auf gewisse Zeitmomente beschränkten und entsprechend verstärkten Kraftantheilen, sondern allmählig und ununterbrochen im Verlaufe (einer gewissen Periode) der Zuckung auf den Hebel übertragen wird, und weil letzterer aus diesem Antheile zu seiner eigenen Beförderung einen um so namhafteren Betrag verbraucht, denselben in Spannkraft umsetzend,

je grösser seine eigene Masse ist. Eben darum aber ist auch im Allgemeinen eine Ungenauigkeit der Bewegung bei einem leichteren Hebel noch in einem auffälligeren Grade zu gewärtigen, als bei einem schwereren; wie dies auch jene secundären Schwankungen an den Zuckungscurven beweisen, welche mittels nach Art der Marey'schen gebauter, sehr leichter Hebel gezeichnet worden waren.

So weit es aber immerhin doch für zweckmässig erscheinen sollte, dafür besonders zu sorgen, dass dem Hebel der ihm möglicherweise verbliebene, überflüssige Rest von lebendiger Kraft — der, sofern der Muskel belastet ist, jedenfalls nur gering sein kann — stets bei Zeiten entzogen werde, so dürfte dies, statt des Marey'schen Verfahrens, durch eine an dem entgegengesetzten Hebelarme angebrachte Gegenfeder zu bewerkstelligen, deren Widerstand sich im Verlaufe der Zuckung in unberechenbarer Weise fortwährend ändert, zweckmässiger entweder in der Weise erreicht werden können, dass man wie Hr. Fick¹⁾ den Faden, an welchem die Last hängt, um die Axe des Hebels herumwickelt und diese dadurch, dass sie an ihr Lager fester angedrückt wird, mit mehr Reibung beweglich sein lässt, oder aber indem man die Axe des Hebels noch mit einer kleinen Scheibe versehen würde, auf deren Fläche man durch eine elastische Feder einen regulirbaren, während der Zuckung aber doch mehr constant bleibenden Druck ausüben liesse.

Was endlich das Federmyographion anbelangt, so kann dasselbe trotz seiner vorzüglichen Eignung für die Sphäre von Versuchen, welche ihm von seinem genialen Erfinder selbst angewiesen wurde, schon wegen seiner inconstanten Geschwindigkeit, die ja nach der Stärke der angewandten Feder im Verhältniss von 1:0.87 bis 1:0.58 und tiefer noch von dem Maximum herabsinkt, bei Untersuchungen nicht angewendet werden, die vor Allem auf eine unverzerrte Zuckungscurve an-

1) Ueber die Aenderung der Elasticität des Muskels während der Zuckung. Pflüger's Archiv f. d. g. Physiologie. IV. Jahrgang. 6—7. Heft.

gewiesen sind, die aber selbst wieder nur bei möglichst constant verbleibender Geschwindigkeit der Zeichenfläche erhalten werden kann.

Das von mir bei diesen Versuchen gebrauchte Fallmyographion ist nach demselben Princip der Atwood'schen Fallmaschine ausgeführt, wie das zuerst von E. Harless construirte¹⁾. Da ich von meinem Apparat bereits eine ausführliche Beschreibung veröffentlicht habe²⁾, auf welche ich mit dem Wunsche hinweise, es möchte der billige Fachmann beurtheilen, inwiefern ein wieder hervorgesuchter Apparat auch ein brauchbarer geworden ist, beschränke ich mich hier blos auf eine gedrängte Skizze der wesentlichen Einrichtung meines Apparates.

Als Schreibfläche dienen Platten von 24 Cm. Länge und 5 Cm. Breite, aus circa 3·5 Mm. starkem Spiegelglas, deren beide Endränder schräg abgeschliffen sind. Jede Platte ist genau abgewogen und numerirt. Zu jeder gehört ein mit feinem Schrot entsprechend gefülltes Glasröhrchen, welches das Gewicht der betreffenden Glastafel zu dem Allen gemeinsamen Normalgewicht ergänzt. So können diese Platten mit dem zugehörigen Röhrchen gegen einander vertauscht werden, indem sie sich auf leichte Weise in einem Gestell vertical befestigen lassen, welches auf der breiten, vertical aufgestellten, einzigen Führungsschiene des Apparates mit vier Rollen läuft. Ich hatte die Axenlager dieser Rollen möglichst genau einstellbar gemacht, so dass das Rollengestell ohne störende Reibung auf den Kanten der Führungsschiene beweglich war. Selbst bei dem geringen Spielraum jedoch, der zwischen den Rollen und den Schienenkanten gelassen werden musste, behielten die, bei ruhendem Zeichenstift, nach einander in derselben Einstellung gezogenen Abscissenlinien, nicht so vollkommen dieselbe Spur inne, dass daraus bei der sonst möglichen scharfen Beobachtungsweise nicht Schwierigkeiten in der Erkennung des An-

1) Abhandlungen d. k. Bayrischen Akademie der Wissenschaften. II. Cl. Bd. IX. Abth. II. München 1862. S. 361.

2) Carl's Repertorium für Experimental-Physik und physikalische Technik. Bd. IX. Heft V. S. 313 mit Tafel XXIII—XXV.

fanges der Zuckungscurve in manchen Fällen erwachsen wären. Ich habe deshalb seit der ersten Veröffentlichung meines Apparates am Rollengestell folgende Abänderung getroffen. Durch Anbringen eines Laufgewichtes an der einen Seite des Rollengestells verlegte ich den Schwerpunkt desselben aus seiner Mittellinie näher der einen Seite, an welcher die Rollen, bei in entsprechender Lage fest eingestellt bleibenden Axenlagern, stets ohne Spielraum in Berührung mit den Schienenkanten zu verbleiben haben. Die Lager der Rollenaxen auf der anderen Seite des Gestells machte ich dagegen derart beweglich, dass unter einem auf sie von Federn ausgeübten, sehr mässigen Drucke die Rollen auch auf dieser Seite ohne Spielraum in steter Berührung mit den Kanten verbleiben, ohne dass dadurch die Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit des Rollengestelles innerhalb der zur Verwendung kommenden Wegstrecke, wie ich mich in Versuchen mit K ö n i g'scher Stimmgabel überzeugt habe, auch nur im Geringsten leiden würde. Nun behalten auch die, von dem in unveränderter Einstellung verbleibenden Zeichenstift nach einander gezeichneten Abscissenlinien so gut dieselbe Spur unverändert bei, dass nur selten eine unbedeutende Abweichung unter dem Mikroskop erkennbar ist.

Vom Rollengestell ist eine Schnur über die am Kopfe des Apparates befindliche Rolle zu dem cylinderförmigen Gegengewicht geleitet; als Uebergewicht dient eine ebenfalls cylindrische Schale von gleichem Durchmesser mit dem Gegengewicht. In der Mitte der Höhlung jenes Uebergewichtes ist ein kurzes an beiden Enden offenes Rohr angebracht, durch welches die Schnur ohne Berührung zum Gegengewichte gelangt. Dieses kann durch Oeffnung eines am Stative des Apparates in passender Höhe angebrachten, starken, messingenen Ringes frei hindurchpassiren, während das Uebergewicht vermöge seines vom oberen Rande hervortretenden Saumes daran zurückgehalten wird. Durch Bleiringe, die in die Uebergewichtsschale gelegt werden, kann die Geschwindigkeit des Rollengestells gesteigert werden.

Das auf den Auffangring auffallende Uebergewicht löst in

demselben Moment auch eine Hebelvorrichtung aus, die dazu dient, entweder einen bis dahin bestandenen Strom durch Contactunterbrechung plötzlich zu öffnen, oder einen Strom zu schliessen. Ich hatte ursprünglich diese Vorrichtung derjenigen am Harless'schen Myographion nachgebildet, fand aber nachträglich, dass dieselbe mit einem principiellen Fehler behaftet ist, in sofern als federnde Contactarme angewendet waren, mit deren wechselnder Spannung auch der Moment der Stromunterbrechung wechseln musste. Ich habe sie darum durch nicht federnde Arme ersetzt, dagegen jenen kurzen Hebelarm federnd gemacht, der gemeinschaftlich mit den Contactarmen von derselben drehbaren Messingwalze ausgehend, mit dem freien Ende an einen zweiten Kniehebel angestemmt werden kann, durch welchen beim Auffallen des Uebergewichtes die Auslösung der ganzen Vorrichtung vermittelt wird. Bei Oeffnungsinductionsschlägen, wie ich sie bei den vorzuführenden Untersuchungen durchgehends angewendet habe, findet daher die Unterbrechung des primären Stromes stets im gleichen Intervall nach dem Auffallen des Uebergewichtes statt.

Das bis an das untere Ende der Führungsschiene herabgezogene Rollengestell wird daselbst durch einen Arretirungshebel festgehalten. Durch auf diesen ausgeübten Druck wird jenes frei, steigt mit zunehmender Geschwindigkeit bis zu der Stelle, wo das Uebergewicht an dem Auffangring zurückbleibt, von da an aber mit gleichförmig verbleibender nach aufwärts, und indem das Gestell kurz vor dem oberen Ende seiner Bahn mit einem, gegen die Führungsschiene hervorragenden Zahn sich zwischen zwei an der letzteren angebrachte Federbacken hineindrängt, bösst es rasch und ohne Erschütterung seine Geschwindigkeit ein, während zu gleicher Zeit das herabgesunkene Gegengewicht von einem inwendig gepolsterten Kelch aufgefangen wird.

Die Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit innerhalb der Bahnstrecke, auf welcher die Zuckungcurve sich abzeichnet, wurde wiederholt mittels genauer Stimmgabeln geprüft. Bei den gegenwärtigen Untersuchungen hatte ich, wie schon vorhin

bemerkt wurde, eine Geschwindigkeit von 0.6648 Meter in der Sekunde angewendet.

Betreffs der Schreibvorrichtung muss ich hervorheben, dass die Uebertragung der Bewegung vom Muskel auf den Zeichenhebel bei meinem Apparat von der gewöhnlich üblichen Weise abweicht. Das Stativ dieser Vorrichtung erlaubt die Axe des Zeichenhebels genau vertical auf die Zeichenfläche einzustellen. Der, so weit es die sichere Ausschliessung einer Federung gestattet, leicht in der Ruhelage vertical stehende Zeichenhebel besteht unterhalb der Axe aus einem runden Stab, auf welchen, falls es nöthig wäre, als Gegengewicht gegen den oberen Hebelarm ein Laufgewicht aufgeschoben werden kann. Der letztere, durch eine gefensterte Platte gebildete Arm hat an seinem oberen Ende eine horizontale Bohrung, in welcher ein genau passender, mit feiner Spitze versehener Zeichenstift, unter dem schwachen Gegendrucke einer am Hebelrücken angebrachten Feder, leicht verschiebbar ist. Auf derselben Axe mit dem Hebel befindet sich auch eine ebenfalls gefensterte Rolle befestigt, welche mit Schnurlauf versehen, in der Strecke eines Quadranten den mit Einschaltung eines Zwischenstäbchens vom Muskel ausgehenden, nicht dehnsamen Faden aufnimmt. An dem Punkte der Hohlkehle, welcher in der Ruhelage am tiefsten steht, ist der Faden an die Rolle festgeklemmt; sodann horizontal zu einer kleinen Rolle geleitet, trägt er am herabhängenden Ende die für die Belastungsgewichte bestimmte Schale. Wird somit das Muskelende des Fadens bis auf eine gewisse Höhe gehoben, so rollt sich der Faden in der Hohlkehle der grösseren Rolle der Art ab, dass letztere um eine jener Höhe gleiche Bogenlänge sich um ihre Axe dreht, während zugleich mit ihr der Schreibhebel eine Drehung von gleichem Bogenwinkel ausführt. Es lässt sich daher auch, sobald die Radiuslängen des Schreibhebels und der Rolle (von denen im vorliegenden Falle jene 45 Mm., diese 25 Mm. beträgt), bekannt sind, die irgend einer Ordinate der Zuckungscurve entsprechende wahre Hubhöhe nach der Formel

$$H = r. \text{ arc. sin } \left[\frac{D}{R} \right]$$

berechnen, in welcher R die Radiuslänge des Schreibhebels, r diejenige der Rolle, D die Ordinatenhöhe bedeutet, wobei der Bogen des $\sin \left[\frac{D}{R} \right]$ nicht in Graden, sondern nach Längenmaass in Theilen des Radius auszudrücken ist.

Zur genauen Bestimmung der Ordinaten der Zuckungscurve ist aber ausserdem noch nöthig, dass die Richtung des Zeichenhebels in seiner Ruhelage mit der Abscissenaxe selbst zusammenfalle, dass somit in die letztere Linie der Zeichenstift und der Drehpunkt des Hebels falle; zu welchem Zwecke eine der beiden am Stativ der Zeichenvorrichtung angebrachten Stützschrauben dient, die den einen Hebelarm von der, zur Richtung seines bevorstehenden Ausschlages entgegengesetzten Seite stützend, nicht nur die genaue Einstellung des Hebels, sondern auch noch eine Ueberlastung des in Zuckung zu versetzenden Muskels gestattet.

Endlich erfordert die genaue Bestimmung der zu den einzelnen Ordinaten der Zuckungscurve gehörigen Abscissen auch noch eine Correction; indem der im Bogen sich bewegende Schreibstift sich zugleich in entgegengesetzter Richtung als die Schreibfläche bewegt, so lange jener Drehungswinkel zunimmt, dagegen mit ihr in gleicher Richtung vorschreitet, wenn der Drehungswinkel wieder abnimmt und zwar in beiden Fällen entsprechend dem jedesmaligen Sinus versus des vom Zeichenhebel beschriebenen Bogens. Es muss somit dieser Sinus versus bei steigenden Ordinaten von der zugehörigen Abscissenlänge abgezogen, bei fallenden Ordinaten aber derselben hinzugerechnet werden. Dieser Werth t lässt sich am einfachsten nach der Formel:

$$t = R (1 - \cos \phi)$$

aus dem $\angle \phi$, welchen der Hebel beschreibt, und aus der Radiuslänge R dieses letzteren bestimmen. Der $\angle \phi$ ist aber aus $\frac{D}{R} = \sin \phi$, wo D die Ordinatenhöhe bedeutet, bekannt.

In die Beschreibung des zu diesem Myographion gehörigen Muskelhalters lasse ich mich hier auch nur so weit ein, als es zur Beleuchtung der angewandten Versuchsmethoden nöthig erscheint.

Der Muskelhalter ist gemeinschaftlich mit der Schreibvorrichtung auf einem, am Myographion befestigten Stative so angebracht, dass beide zugleich in horizontaler Ebene sowohl parallel der Schreibfläche, als auch vertical auf letztere mittels Prismen und Mikrometerschrauben verschoben werden können. Die Verschiebbarkeit in der ersteren Richtung gestattet auf derselben Schreibplatte mehrere Zuckungen nacheinander aufzuzeichnen; die Verschiebbarkeit nach der zweiten Richtung aber erlaubt den Zeichenstift so einzustellen, dass derselbe die in seine Höhe gelangte Schreibfläche sicher berührt, ohne dass hierbei die den Stift vordrängende Feder eine bedeutende Spannung erleiden müsste.

Die Tragsäule des Muskelhalters endigt oben zunächst in einem messingenen Würfelstück, auf welchem die aus Hartkautschuck bereitete Bodenplatte der hinreichend geräumigen Feuchtkammer ruht; letztere wird durch einen auf die Platte aufgesetzten, aus Glasplatten zusammengefügtten Deckel gebildet. In entsprechenden Ausschnitten der Bodenplatte und des Messingwürfels kann mittelst einer unterhalb der Feuchtkammer befindlichen Mikrometerschraube ein vertical gestelltes Prisma auf- und abgeschoben werden, dessen eine Seite mit einer Millimeterskala versehen ist, welche sich weiter auf den runden Stab fortsetzt, der von jenem Prisma weiter aufwärts reicht, und als Säule zur Befestigung der Muskelklemmen dient. Zur Seite des Prismas befindet sich an der Bodenplatte der Nonius.

Vermöge der Verschiebbarkeit dieser Säule ist es möglich dem an ihr herabhängenden Muskel eine solche Stellung zu geben, dass der von ihm mit Zwischenschaltung eines mit Haken versehenen Stäbchens zur Rolle der Zeichenvorrichtung geleitete Faden eben gehörig angespannt wird, ohne dass dadurch der Zeichenhebel aus seiner verticalen Lage abgelenkt sein würde. Weiter aber kann auch bei beliebiger Anspannung des Muskels die Strecke gemessen werden, welche zwischen einer oberen fixirten und der vom Haken des Zwischenstäbchens zunächst dem unteren Sehnenende durchbohrten Stelle sich befindet. An beiden Muskelenden bleiben der besseren Be-

festigung wegen, die knöchernen Ansätze belassen. Das eben erwähnte Zwischenstäbchen trägt nun unterhalb seines Einhängehakens ein Glimmerplättchen, durch welches es verhindert wird, im nicht eingehängten Zustande durch die Oeffnung in der Bodenplatte der Feuchtkammer herauszufallen; unter diesem Plättchen umgiebt das Stäbchen ein kurzer Elfenbeincyliner mit einer ringsherum laufenden, feinen schwarzen Linie als Marke, deren Entfernung vom Hakenende des Stäbchens ein für allemal zu bestimmen ist. Endlich befindet sich seitlich von dem Zwischenstäbchen ein vertical durch die Bodenplatte geleiteter, um sich selbst herum drehbarer kurzer Stift, mit nach abwärts gerichtetem Kopfe, während sein in der Feuchtkammer befindliches oberes Ende von einer horizontalen Nadel durchbohrt ist, deren Spitze im Niveau einer bekannten Theilstelle des Nonius steht. Will man also am Muskel eine Längenmessung ausführen, so hat man nur mittelst der Mikrometerschraube den Muskel so einzustellen, dass die Marke des im Muskel eingehängten Zwischenstäbchens genau in der Höhe der Spitze der horizontalen Nadel einsteht. Indem man den Theilpunkt am Nonius aus vorhergegangenen Bestimmungen kennt, welchem jene Niveauhöhe entspricht, und ebenso schon in vornhinein bestimmt hat, welchem Punkte der Skala der untere Rand jener Klemme entspricht, welche eine bestimmte Stelle des Muskels fixirt, so braucht man bei der jedesmaligen Messung nur die Stellung der Skala am Nonius abzulesen, und man besitzt alle Data, aus welchen man die Länge der betreffenden Muskelstrecke berechnen kann.

Es versteht sich wohl, dass die Längenmessung der mit Bezug auf den Zwischenhebel erforderlichen Einstellung des Muskels vorhergehen muss.

Von den Klemmen erwähne ich hier nur die für myologische Untersuchungen bestimmten.

Es sind deren zwei, die mit Rollringen auf der verticalen Säule befestigt werden.

Die eine der aus Elfenbein gebildeten Backen der oberen Klemme hat an ihrer nach vorne gekehrten verticalen Seitenfläche einen mit abgeschrägten Kanten versehenen mittleren

Abschnitt von 12 Mm. horizontaler Länge und 4 Mm. verticaler Höhe, entlang welcher parallel übereinander, in einer Entfernung von 2 Mm. zwei horizontale Platindraht-Elektroden ausgespannt sind, deren zugehörige Klemmschrauben sich an der Rückseite des Plättchens befinden. Das die zweite Backe bildende Plättchen ist auf seiner, der ersteren Backenseite zugekehrten Fläche, ebenfalls mit einem als Elektrode dienenden Platindraht und einer zugehörigen Klemmschraube versehen und kann mittels zweier Stellschrauben, für welche es an beiden Enden passende Ausschnitte hat, an die andere Backe angedrückt werden. Zwischen beiden Backen kann so dass obere Muskelende entweder behufs vollständiger Fixirung festgeklemmt werden, oder aber man kann mittels einer oberhalb dieser Elektroden-Klemme auf die Säule aufgeschobenen Zangenklemme, den am Muskel zurückgelassenen Knochenansatz befestigen, und drückt die Backen der Elektroden-Klemme nur so weit an den Muskel an, dass derselbe sich an dieser eingeklemmten Stelle nicht verschieben und eine Contraction der oberhalb dieser Klemme befindlichen Muskelstrecke die unterhalb befindliche Strecke nicht nach sich ziehen kann. Vermöge der angeführten Anordnung der Elektrodendrähte ist es ermöglicht je nach der Benutzung entweder der an derselben Backe oder der an den getrennten Backen befindlichen Elektroden den Strom entweder mehr parallel oder quer zur Faserrichtung durch den Muskel zu leiten.

Damit die Contractionswelle nach Belieben auch auf eine kürzere Muskelstrecke beschränkt werden könne, dient eine zweite, unter der vorigen aufstellbare Klemme, mittels welcher der Muskel an einer tieferen Stelle dann eingeklemmt und allenfalls auch von dieser Stelle aus gereizt werden kann. Dieselbe hat ebenfalls aus Elfenbein angefertigte und mit Platindraht-Elektroden und Klemmschrauben versehene Backen, die an einer kleinen aus zwei sich kreuzenden, doppelgliedrigen Armen bestehenden Hebelvorrichtung so angebracht sind, dass sie mittelst eines durch die Bodenplatte der Feuchtkammer hindurchgeleiteten und feststellbaren Hakens gegen einander angezogen und so fixirt werden können, während, wenn sie der

Gegenwirkung einer Feder überlassen sind, sie sich vom Muskel, den sie freigeben, entfernen.

Entlang dem einen kürzeren Rand der Bodenplatte sind sechs Doppelklemmschrauben für die innerhalb und ausserhalb der Feuchtkammer befindlichen Leitungsdrähte aufgestellt.

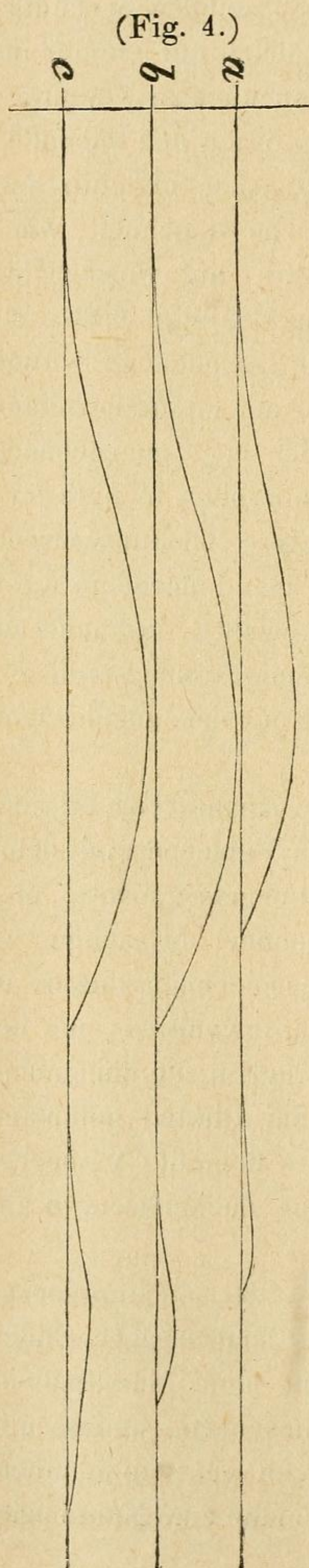
Das beschriebene Myographion erlaubt also eine genaue Messung der zuckenden Muskelstrecke, bei verschiedener Belastung unmittelbar vor oder nach der Zuckung vorzunehmen, es erlaubt die Länge dieser, in das Gebiet der Contractionswelle einziehbaren Strecke im Verlaufe einer an demselben Muskel ausgeführten Untersuchungsreihe wiederholt zu ändern, es erlaubt ferner den Reiz unmittelbar an dem einen Ende der frei beweglichen Muskelstrecke oder entfernter von ihr einwirken zu lassen, so dass im letzteren Falle, die hervorgerufene Contractionswelle erst von einer weiter unten liegenden Stelle aus sich am Apparat äussern kann, und endlich erlaubt der Apparat den Muskel einer einfachen Belastung oder einer Ueberlastung zu unterwerfen, und im ersteren Falle so einzustellen, dass sobald die Contractionswelle die freie Muskelstrecke betritt, auch der Zeichenhebel seine Ruhelage zu verlassen genöthigt ist. Dabei ist es möglich, im Verein mit dem Muskelhalter, die Zeichenvorrichtung an die noch an ihrem oberen Bahnende befindliche Schreibfläche eben nur so weit vorzuschieben, dass unter dem leisen Drucke einer Feder der Zeichenstift in sicheren Contact mit jener Fläche gelangt. Indem man dann das Rollengestell der Schreibplatte aus freier Hand mit Vorsicht entlang der Führungsschiene bis zur untern Arretirung herabzieht, hat man zu gleicher Zeit auf der Schreibfläche die Abscissenlinie aufgezeichnet. Hierauf wird die Auslösvorrichtung für den inducirenden Strom eingestellt, die Triebgewichte des Fallapparates vollkommen beruhigt und ohne dass man irgend welche weitere Handgriffe vorzunehmen oder sonstige Momente abzulauschen hätte, genügt ein Druck auf den Arretirungshebel des Rollengestells, um dasselbe loszumachen, und wenn das obere Ende der Schreibfläche über den Zeichenstift eine kurze Strecke hinaus gelangt ist, löst auch schon das auf den Hemmring auffallende Uebergewicht

die stromunterbrechende Vorrichtung aus, so dass der auf den Muskel einwirkende Oeffnungsinductionsschlag stets auf einer unveränderlich verbleibenden Höhe der Schreibfläche erfolgt; darum kann auch der Moment desselben gleich auf einmal für alle auf derselben Platte aufgezeichneten Zuckungscurven durch einen Strich bezeichnet werden, den man durch den ruhenden Zeichenstift ziehen lässt, indem man die Zeichenvorrichtung in horizontaler Ebene parallel der Zeichenfläche verschiebt, während letztere auf der Höhe erhalten wird, auf welcher die Unterbrechung des primären Stromes bewerkstelligt wird. Indem man nach der ersten Zuckung die Zeichenvorrichtung sammt Muskelhalter hinreichend weit von der erstgezeichneten Curve seitlich verschiebt, kann man in der eben angegebenen Weise die erforderlichen wenigen Manipulationen in kürzester Zeit ausführen und so nacheinander mehrere Zuckungscurven auf derselben Platte aufzeichnen lassen. Und nachdem diese für keine weiteren Curven mehr Platz gewährt, löst man sie sammt ihrem Ergänzungsröhrchen aus dem Rollengestell aus und setzt an ihre Stelle eine andere Platte mit dem zugehörigen Röhrchen ein.

So ist es möglich bei einer grösseren Anzahl von Platten, (ich habe deren 19) eine grose Anzahl von Versuchen mit demselben Muskel anzustellen, ohne dass man bemüssigt wäre, dieselben wegen an den Curven vorzunehmender Messungen zu unterbrechen. Denn man kann die beschriebenen Platten in einem passend eingerichteten Kistchen aufbewahren, um bei gegebener Musse die Messungen nachträglich vorzunehmen. Die mit Berücksichtigung der Nummer der Platten geführten Versuchsprotokolle geben dann Aufschluss über die Versuchsverhältnisse, unter welchen die betreffende Zuckungscurve gezeichnet wurde.

Die Messung der Coordinaten der Zuckungscurve wird in der Art ausgeführt, dass die Platte an ihren zwei Enden in einem Rahmen befestigt wird, der mit einer Maassschiene versehen ist, auf welcher der dieselbe hülsenartig umfassende Nonius verschiebbar ist. Vom letzteren geht unter einem rechten Winkel zur Maassschiene ein, gegen die eine Kante pris-

matisch zugeschärfter und ebenfalls mit einer Skala versehener Arm aus. Indem man unter der Beihülfe dieses, oberhalb der



Schreibplatte ohne Beschädigung der Zeichnung, entlang der aufgezeichneten Abscissenlinie, frei verschiebbaren Armes die Platte so befestigt hat, dass die Abscissenlinie parallel der Maassschiene entsteht, kann man unter Beihilfe eines schwach vergrössernden Mikroskopes, dessen Spiegel die auf der berussten Platte gezogenen Linien mit durchfallendem Lichte beleuchtet, den verschiebbaren Arm mit seiner Kante genau auf die zu bestimmenden Punkte der Zeichnung einstellen, und liest dann die zugehörigen Abscissenlängen an dem Stande des Nonius auf 0.1 mm. genau ab, während die betreffenden Ordinaten an der Scala des verschiebbaren Armes mittels Ocularmikrometer mit noch grösserer Genauigkeit bestimmbar sind.

Dass diese Methode der Messung an Bequemlichkeit der Ausführung und ebenso an Genauigkeit, besonders wenn die Platte nur mit einer dünnen Russchicht überzogen ward, keiner andern nachsteht, dürfte wohl kaum bezweifelt werden. Aber dieselbe Platte gestattet nicht nur ausserdem eine Projection des Myogrammes mittels der magischen Laterne, sondern sie kann auch noch als Matrize verwendet werden, um das Myogramm photographisch auf Papier zu übertragen. Und so sind auch die beispielsweise in Fig. 4 beigelegten Zuckungscurven - Platten entnommen, die bereits einer Messung unterworfen waren.

Als Untersuchungsobject diente nur der *M. adductor magnus* vom Frosche, den ich stets mit Curare vergifteten Thieren in einem Stadium entnommen habe, in welchem sie weder willkürliche noch Reflexbewegungen zeigten.

Leider waren die meisten Thiere durch die lange Wintergefangenschaft mehr oder weniger herabgekommen, was sich auch an den alsbald anzuführenden Untersuchungsergebnissen zu erkennen gab, ohne aber dass deshalb der Charakter dieser Resultate eine wesentliche Alteration erlitten hätte. Nur einige vor kürzerer Zeit im Vorfrühling eingefangene Frösche von einer ausgezeichnet grossen Sorte aus dem Platten-See, zeichneten sich durch grosse und sehr lang andauernde Leistungsfähigkeit aus.

Der Muskel war so herauspräparirt, dass derselbe an beiden Enden mit kurzen Knochenansätzen versehen blieb. Er wurde dann entweder an einem dieser Ansätze in der Zangenklemme des Myographions fixirt, und unterhalb der letzteren am muskeligen Ende mit der Elektrodenklemme nur so weit gefasst, als es zum sicheren Contact und zur Ausschliessung der Verschiebung des Muskels zwischen den Backen der Klemme erforderlich war, oder es wurde ohne Anwendung der Zangenklemme die Fixirung des Muskels bloss mittelst der dann etwas fester angezogenen Elektrodenklemme bewerkstelligt, wobei man gegen die Verschiebung des Muskels noch dadurch gesichert war, dass dessen knöcherner Ansatz an den oberen Ständern der Klemmbacken aufruhte. Das erstere Verfahren erwies sich darum für vortheilhafter, weil dabei der mehr geschont verbleibende Muskel seine Leistungsfähigkeit viel besser und länger behielt. Wenn im Verlaufe der Versuche der Muskel noch an einer tieferen Stelle mittels der zweiten Elektrodenklemme gefasst wurde, so diente entweder diese zugleich als stromzuführende Klemme oder es wurde als solche auch in diesem Falle die obere Elektrodenklemme verwendet.

Als Reiz habe ich stets den Oeffnungsinductionsschlag unter Benutzung eines du Bois'schen Schlittenapparates angewendet, in dessen primäre Rolle ich nur ausnahmsweise

Drahtstäbe einschaltete. Den primären Strom lieferten 2—4 Daniell'sche oder auch Smee'sche Elemente, in dessen Leitung, falls ich mich betreffs der gleichbleibenden Stromstärke vergewissern wollte, ein du Bois'scher Rheochord und eine Tangentenbussole als Nebenschliessung eingeschaltet war.

Durch den Muskel hindurch war der Inductionsstrom in einem Theile der Versuche den Fasern parallel, in einem andern Theile quer durch dieselbe geleitet, ohne dass ein Unterschied im Resultate erkennbar gewesen wäre.

Der Muskel hatte ausser der Ueberwindung des kleinen Widerstandes des Schreibhebels, — von dem das zur Aequilibrirung des zweiten Armes dienende Laufgewicht meistens entfernt war, da ja ohne sie der Schwerpunkt des Hebels durch den, an der Rolle des Hebels vorüber geführten und an ihr eingeklemmten Faden unterhalb der Drehaxe verlegt war — auch noch die Belastung des Fadens von 5 bis 25 grm. zu heben. Vor jeder Zuckung wurde die Länge der frei contrahirten Muskelstrecke gemessen, insbesondere dann, wenn eine Veränderung in der Lage der Klemmen oder in der Belastung stattgefunden hatte. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Schreibfläche während der Zuckung sich fortbewegte, entsprach bei allen Versuchen 0·6648 Met. in d. Sec., so dass 1 Mm. Abscissenlänge den Zeitwerth von 0·0015 Sec. hatte. Die nach dieser Methode ausgeführten Versuche ergaben nun folgende Resultate.

§. 3.

Versuchsergebnisse.

Um zu prüfen in wiefern eine bestimmte Zuckungscurve, die von einem Muskel beschrieben wurde, während er an dem einen Ende seiner frei contrahirbaren Strecke momentan gereizt ward, mit jener Curve übereinstimmt, welche mit Bezug auf dieselbe Zuckung aus den theoretisch abgeleiteten Gleichungen sich ergibt, wurden an den, der Untersuchung unterworfenen Zuckungscurven, entsprechend den im §. 1 dieses Abschnittes aufgezählten Forderungen, vom Anfangspunkte der

Curve aus, entlang der Abscissenlinie, in Intervallen von je 5 Mm. $\equiv 0.001$ Secunden bis zum Abscissenpunkte der Maximalhubhöhe vorschreitend, die den so wachsenden Abscissen zugehörigen Ordinatenhöhen der Curve gemessen; ebenso auch die Abscissenlänge jenes Curvenpunktes bestimmt, an welchem die halbe Maximalhubhöhe erreicht war. An den unmittelbar gefundenen Werthen beiderlei Coordinaten wurden die in §. 2 dieses Abschnittes erwähnten Correctionen angebracht. Aus den so eruirten Werthen für die Zeit T_m der Maximalhubhöhe und die Zeit T_h der halben Hubhöhe, konnte das Verhältniss $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$ berechnet werden, aus welchem mit Beihilfe der Tabelle I.

sogleich annähernd auch das Verhältniss $\left(\frac{\mu}{l}\right)$ zwischen der noch vor der Zuckung gemessenen Länge der frei contrahirbaren Muskelstrecke und der Wellenlänge bekannt wurde. Hierdurch war aber auch die Orientirung gewonnen, welche von den in der Tabelle II. zusammengestellten Gleichungen zu gebrauchen waren, um die Factoren der Contractionswelle, als Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Schwingungsdauer und Wellenlänge zu berechnen.

Mit Hilfe dieser so bestimmten Werthe von l und T , sowie der für μ und für die Maximalhöhe H_m gefundenen, konnte dann nach der Formel der Gleichung 16c) der Verkürzungscoëfficient $\frac{\alpha}{\delta}$ bestimmt werden. Wonach endlich mittels der Formel der Gleichung 10), respective der Gleichung 16d) der Verlauf der Zuckungcurve selbst zu berechnen war, indem man für t in den eben angeführten Formen in Intervallen von 5×0.0015 Secunden, entsprechend dem Zeitwerth von 5 Mm. Abscissenlänge — steigende Werthe einstellte; wobei so lange als $t < \frac{\mu}{v} \equiv t_n$ d. h. kleiner war, als die zu Fortpflanzung der Contractionswelle entlang einer, der Muskelstrecke gleichen Wegstrecke nöthigen Zeit, die Formel der Gleichung 10), bei der weiteren Vergrößerung von t aber die Gleichung 10d) in Anwendung kam.

Der theoretischen Untersuchung zufolge, hätte zur Bestimmung der Factoren der Contractionswelle wohl auch die Zeit T_w , in welcher die Zuckungcurve ihren Wendepunkt erreicht, benützt werden können. Bei der Aufsuchung dieses Punktes der Curve zeigten sich jedoch fast unüberwindliche Schwierigkeiten, insofern bei der nur allmäligen Steigung der verhältnissmässig stark in die Länge gezogenen Curve, jener Punkt unmittelbar durchaus nicht mit jener Präcision erkennbar ist, wie sie hier erforderlich wäre, ja selbst dann eine solche nur äusserst schwer und nur unter Beihilfe eines sehr fein eingetheilten Ocularmikrometers zu erlangen ist, wenn man auf dem betreffenden Abschnitte der Curve die Zunahme der Ordinatenhöhe in sehr kleinen Intervallen vorschreitend prüft. Der grosse Aufwand an Zeit und Mühe, der hiezu erforderlich gewesen wäre, hat mich nach einigen Versuchen um so mehr bemüssigt, davon abzustehen, als das anzuhoffende Resultat bei Weitem nicht jene Verlässigkeit würde besessen haben, welche bei der Bestimmung des Zeitpunktes der halben Zuckungshöhe leicht und sicherer zu erreichen war.

Immerhin sind aber auch bei der Bestimmung der übrigen erforderlichen Werthe, der Genauigkeit Grenzen gesetzt, neben welchen die aus der Construction der Zeichenvorrichtung des Myographions sich ergebenden Correctionen fast unberücksichtigt bleiben können.

Vor Allem ist es oft sehr schwierig den Ausgangspunkt der Zuckungcurve genau zu erkennen, sobald die, ihrer Erhebung von der Abscissenlinie vorangehende, gerade Strecke nicht vollkommen in die, vor der Zuckung, bei noch ruhendem Zeichenstift gezogene Abscissenlinie fällt. Jedes Abweichen dieser Linien von einander ist bei der eindringlichen Weise der Ablesung nur um so auffälliger; ein solches Abweichen können aber theils Erschütterungen, die weniger den Apparat, als den herabhängenden Muskel momentan treffen, verursachen, theils konnte es Folge des Umstandes sein, dass bei der ersten Construction des die Schreibfläche führenden Rollengestells, zwischen den Rollen und den Kanten der Führungsschiene ein gewisser Spielraum musste gelassen werden. Dieser Uebel-

stand ist wohl, wie bereits oben erwähnt wurde, seitdem behoben, leider waren aber die zunächst vorzuführenden Curven noch vor dieser Abänderung gewonnen worden; auch war der Apparat, bei der höchst ungünstigen Lage des Untersuchungslokals, in einer von Wagen äusserst stark frequentirten Strasse, vielfach Erschütterungen ausgesetzt.

Aber auch das Erkennen des Scheitelpunktes der Zuckungscurve kann in vielen Fällen so schwierig werden, der Verlauf der Curve ist gerade auf der Scheitelhöhe ein so wenig veränderlicher, dass man einen Scheitelpunkt eher ganz vermisst und vermeint, die Curve behalte eine gewisse Strecke hindurch eine unveränderte Höhe bei. Ich selbst war zu Anfang meiner Untersuchungen durch diesen Umstand irre geführt und zu der Annahme verleitet, dass wie die Theorie für einen solchen Fall ergiebt, die Länge der Contractionswelle diejenige des Muskels übertreffe. Erst als die weiter fortgesetzte theoretische Untersuchung der Zuckungscurve das von dem Verhältniss $\frac{\mu}{l}$ ab-

hängige Verhältniss $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m}$ näher aufklärte und ich für letzteres Verhältniss bei der Untersuchung auch solcher Zuckungscurven, die scheinbar einen Scheitelpunkt nicht erkennen liessen, Werthe fand, aus welchen nothwendiger Weise folgte, dass $\mu < l$ und zwar $\frac{\mu}{l}$ bald etwas grösser, bald etwas kleiner als $\frac{1}{3}$ sein müsse, konnte ich nicht mehr zweifeln, dass auch bei solchen Zuckungscurven, wo ein Scheitelpunkt scheinbar vermisst wird, derselbe wohl nicht fehle, sondern nur durch den sehr gestreckten Verlauf der Krümmung verdeckt sei.

Um daher auch in solchen Fällen, in welchen der Scheitelpunkt nicht deutlich erkennbar ist, für die Bestimmung der Zeit T_m einen Anhaltspunkt betreffs des Scheitelpunktes zu gewinnen, habe ich als solchen denjenigen Punkt angesehen, welcher der halben Distanz zwischen jenen zwei Punkten der Curve entsprach, diesseits und jenseits welcher Punkte die Curve eben eine deutliche Abnahme ihrer Ordinatenhöhe erkennen liess.

Trotz den Mängeln, welche der eben erwähnten Umstände

wegen den Untersuchungsergebnissen nothwendigerweise mehr oder weniger anhaften, sind die an sieben Zuckungscurven gewonnenen Resultate, welche in der folgenden Tabelle III. zusammengestellt sind, wie ich glaube, doch derart, dass sie im Ablauf der Zuckung einen Vorgang deutlich erkennen lassen, dessen Verlauf mit der entwickelten Wellentheorie der einfachen Muskelzuckung augenfällig übereinstimmt.

(Siehe Tabelle III. auf Seite 591—594.)

Die in der vorstehenden Tabelle mitgetheilten Curven sind, aus einer grossen Reihe von Zuckungscurven auf's Gerathewohl ausgewählt, die einzigen, welche ich einer solchen eingehenden Untersuchung unterzogen habe. Bei dem grossen Zeitaufwand, welchen die Berechnungen erfordern, würden noch weitere Wiederholungen kaum die Mühe gelohnt haben, so fern auf Grund der schon gewonnenen Resultate zu erwarten stand, dass die Abweichungen zwischen den gefundenen und den berechneten Werthen auch bei andern Zuckungscurven nur innerhalb derselben Grenzen sich wiederholt haben würden, innerhalb welcher sie sich bei den untersuchten bewegen, ohne dass dadurch die wesentliche Uebereinstimmung der gefundenen und der berechneten Curve zweifelhaft werden könnte. Denn in der That sind die Unterschiede zwischen beiderlei Werthen, mit Ausnahme der allerersten Curvenstellen, so geringfügig, dass sie selbst bei rein physikalisch unorganischen Vorgängen, als innerhalb der Fehlergrenzen der Messung liegend, wohl ausser Betracht bleiben dürften; dies um so mehr also bei Leistungen eines, dem fortwährend wechselnden Einflusse von vielfach zusammenwirkenden Ursachen unterliegenden organischen Gebildes. Auch dürfen wir nicht vergessen, dass der als Versuchsobject dienende Muskel eine nur sehr unvollkommen parallele Faserung besitzt.

Deutlich lassen beide Werthe die Gleichheit des Charakters bei der wirklichen, wie bei der berechneten Zuckungscurve erkennen. Beide besitzen einen Wendepunkt, an welchem die Biegung der Curve bei beiden in gleichem Sinne sich ändert. Auch fallen bei beiden diese Wendungspunkte — mit der ein-

Tabelle III.

Zuckungcurve No. 1.

1. Zuckung des Muskels. Länge der contrahirten Muskelstrecke: 32.7 Mm. Reizstärke: 2 Daniell'sche Elemente. Die secundäre Rolle bis an das Ende der primären zurückgeschoben.		Reizstelle: die fixirte Stelle. Belastung: 2 Grm. Ueberlastung: 5 „ $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 0.942$		Verkürzungscoefficient: 0.1242. Schwingungsdauer: 0.13129 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 0.958 M. Wellenlänge: 0.1258 M.								
Zeiten in Sec. seit dem Beginn der Zuckung.		0.007498	0.014991	0.022465	0.029908	0.037312	0.044686	0.052039	0.059389	0.066772	0.074185	0.082704
Hubhöhen { gefunden		0.152	0.391	0.783	1.296	1.854*	2.400	2.909	3.352	3.660	5.873	3.950
in Mm. { berechnet		0.080	0.316	0.701	1.223	1.839*	2.424	2.934	3.350	3.665	3.867	3.950

Zuckungscurve No. 2.

Die 6. Zuckung des vorigen Muskels. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 33·4 Mm. Reizstärke: 2 Daniell'sche Elemente. Die secundäre Rolle bis an's Ende der primären zurückgeschoben.	Reizstelle: die fixirte Stelle. Belastung: 2 Grm. Ueberlastung: 5 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 1.002$	Verkürzungscoefficient: 0.051. Schwingungsdauer: 0.10880 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 0.913 M. Wellenlänge: 0.0993 M.
---	---	---

Zeiten in Sec. seit dem Beginn der Zuckung.	0.006448	0.013947	0.021441	0.028930	0.036412	0.043887	0.051366	0.058834	0.066313	0.072306
Hubhöhe in Mm. { gefunden berechnet	0.105 0.028	0.200 0.129	0.372 0.299	0.592 0.538	0.821 0.800	1.069* 1.094*	1.241 1.326	1.452 1.496	1.589 1.597	1.624 1.624

Zuckungscurve No. 3.

Die 7. Zuckung des vorigen Muskels, welcher 15.7 Mm. unterhalb der ersten Klemme von einer zweiten gefasst wurde. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 17.5 Mm. Reizstärke: 2 Daniell'sche Elemente. Die secund. Rolle um $\frac{1}{4}$ ihrer Länge über die pri- märe vorgeschoben.	Reizstelle 15.7 Mm. oberhalb der fixirten Stelle Belastung: 2.0 Grm. Ueberlastung: 5 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 1.018$	Verkürzungscoefficient: 0.1268. Schwingungsdauer: 0.09303 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 0.524 M. Wellenlänge: 0.0487 M.
---	---	--

Zeiten in Sec. v. Beginn d. Zuckung an.	0.007948	0.015444	0.022930	0.030396	0.037842	0.045286	0.052737	0.063208		
Hubhöhe in Mm. { gefunden berechnet	0.133 0.072	0.296 0.261	0.592 0.560	0.984 0.948	1.402* 1.377*	1.729 1.734	1.978 1.973	2.103 2.103		

Zuckungscurve No. 4.

Erste Zuckung des Muskels. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 29.8 Mm. Reizstärke: 4 Smeë'sche Elemente. Die secundäre Rolle bis auf $\frac{3}{4}$ ihrer Länge an die primäre vorgeschoben.			Reizstelle: die fixirte Muskelstelle. Belastung: 3 Grm. Ueberlastung: 5 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 0.902$			Verkürzungscoefficient: 0.1462. Schwingungsdauer: 9.11817 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 1.1537 M. Wellenlänge: 0.1363 M.		
Zeiten in Sec.								
v. Beginn der Zuckung	0.007400	0.014985	0.022425	0.029820	0.037155	0.044475	0.051780	0.059145
an.								
Hubhöhen	gefunden	0.613	1.206	1.878*	2.542	3.148	3.661	4.223
in Mm.	berechnet	0.125	1.094	1.855*	2.565	3.177	3.668	4.224
		0.497						4.272

Zuckungscurve No. 5.

Die 2. Zuckung des vorigen Muskels. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 29.8 Mm. Reizstärke; 4 Smeë'sche Elemente. Die secund. Rolle bis auf $\frac{3}{4}$ ihrer Länge an die primäre vorgeschoben.			Reizstelle: die fixirte Muskelstelle. Belastung: 3 Grm. Ueberlastung: 5 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 0.916$			Verkürzungscoefficient: 0.1425. Schwingungsdauer: 0.11625 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 1.1123 M. Wellenlänge: 0.1293 M.		
Zeiten in Sec.								
v. Beginn der Zuckung	0.007500	0.014985	0.022425	0.029820	0.037170	0.044490	0.051810	0.059175
an.								
Hubhöhen	gefunden	0.613	1.206	1.830	2.493*	3.091	3.621	4.116
in Mm.	berechnet	0.119	1.044	1.783*	2.488	3.093	3.578	4.117
		0.474						4.155

Zuckungscurve No. 6.

Die erste Zuckung des Muskels. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 33.7 Mm. Reizstärke: 4 Smeë'sche Elemente. Die secund. Rolle bis an's Ende der primären zurückgeschoben.	Reizstelle: die fixirte Stelle des Muskels, dessen oberer knöcherner Ansatz oberhalb der Elektroden-Klemme in einer Zangenklemme be- festigt war. Belastung: 5 Grm. Ueberlastung: 5 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 1.006$									
	Verkürzungscoefficient: 0.2156. Schwingungsdauer: 0.13276 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 0.7424 M. Wellenlänge: 0.0985 M.									

Zeiten in Sec.													
v. Beginn der Zuckung													
	0.007500	0.015000	0.021470	0.029880	0.037200	0.044400	0.051495	0.058575	0.065670	0.072795	0.080100	0.087435	0.089085
an.													
Hubhöhen	0.114	0.354	0.804	1.533	2.416	3.361	4.330*	5.160	5.856	6.409	6.706	6.915	6.925
in Mm													
berechnet	0.106	0.421	0.933	1.621	2.455	3.402	4.360*	5.195	5.886	6.414	6.766	6.916	6.925

Zuckungscurve No. 7.

Die 2. Zuckung des vorigen Muskels. Länge der contrahirbaren Muskelstrecke: 33.7 Mm. Reizstärke: 4 Smeë'sche Elemente. Die secund. Rolle bis an's Ende der primären zurückgeschoben.	Reizstelle: die fixirte Stelle des in voriger Weise befestigten Muskels. Belastung: 5 Grm. Ueberlastung: 20 Grm. $\frac{T_h}{\frac{1}{2} T_m} = 1.058$									
	Verkürzungscoefficient: 0.1019. Schwingungsdauer: 0.09566 Sec. Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 0.8109 M. Wellenlänge: 0.0775 M.									

Zeiten in Sec.										
v. Beginn der Zuckung	0.007500	0.015000	0.022485	0.029940	0.037350	0.044730	0.052110	0.059505	0.066960	0.068610
an. {										
Hubhöhen	0.095	0.278	0.574	1.111	1.667	2.243*	2.724	3.033	3.168	3.177
in Mm. {										
berechnet	0.075	0.299	0.655	1.121	1.666	2.246*	2.720	3.032	3.168	3.177

zigen Ausnahme der fünften Zuckungscurve — auf derselben Zeitstufe zusammen. Nur in den Werthen der allerersten Stellen zeigt sich ein auffälliger Unterschied zwischen den zwei Curvenarten. Dass dieser Unterschied kein zufälliger, durch Fehler in der Messung bedingter sei, geht schon aus dem hervor, weil derselbe bei allen Zuckungscurven stets in dem gleichen Sinne sich so wiederholt, dass die gefundenen Werthe grösser als die berechneten sind. Nun erleidet aber der dehnbare Muskel, sobald die Contractionswelle sich einstellt, eine Dehnung, nicht nur weil derselbe ausser der Belastung nun auch noch die Ueberlastung — welche behufs genauerer Führung der Abscissenlinie angewendet wurde — zu tragen hat, sondern auch, weil zu der durch die gesammte Last bedingten Spannung nun auch noch jene Spannung hinzutritt, welche durch die Contraction des bereits von der Zuckungswelle ergriffenen Abschnittes bedingt ist; in Folge dieser beiden, nach entgegengesetzten Richtungen hin wirkenden Spannungen muss also die, von der Welle noch nicht ergriffene Muskelstrecke eine Dehnung erleiden. Endlich trägt zur Vermehrung der letzteren auch die, gleich einer Ueberlastung wirkende, wenn auch geringe Reibung bei, die der Zeichenstift auf der Glasplatte erleidet.

In Anbetracht dieser, durch die erwähnten Momente verursachten Dehnung wäre nun, so scheint es, eher zu erwarten gewesen, dass der Muskel eine Einbusse in seinen Hubhöhen, besonders am Anfange der Zuckung erleiden werde, so lange noch der schon entwickelte Theil der Contractionswelle ein kurzer und demnach die hieraus dem Muskel erwachsende Hubfähigkeit auch relativ zum Gesamtwiderstand eine noch schwache ist; dass dem zufolge also die gefundenen Werthe für die Ordinatenhöhen kleiner ausfallen werden, als sie sonst wären und als die berechneten Werthe sind. Die aufgedene entgegengesetzte Thatsache widerlegt jedoch die obigen Folgerungen noch keineswegs, sie weist vielmehr nur auf die Unvollständigkeit derselben hin. Denn es ist leicht einzusehen, dass die durch jene Widerstandsmomente verursachte Dehnung des Muskels anfangs seine Hubhöhe nicht nur vermindern,

sondern so lange auch gänzlich wird unterdrücken können, als nicht in Folge der noch weiter entwickelten Contractionswelle, die Hubfähigkeit des Muskels so stark angewachsen ist, dass die erlittene Dehnung nicht mehr genügt, die auf der Strecke der bereits anwesenden Contractionswelle stattfindende Verkürzung auszugleichen. So kann also in der Wirklichkeit die Zuckungcurve erst später, als die Contractionswelle im Muskel sich eingestellt hat, ihren Anfang nehmen. Die auf der letzteren beruhende und in ihrem weiteren Verlaufe durch den hervorgehobenen Umstand weniger gestörte, wahre Zuckungcurve ist auf diese Weise derjenigen Zuckungcurve gegenüber, welche auf Grund gewisser, der thatsächlich gezeichneten Zuckungcurve entnommener Werthe berechnet ward, welche in Folge jener Strömungen wohl selbst, jedoch in geringerem Maasse mit Fehlern behaftet sind, in der Art verschoben, dass ihr wahrer Anfang auf einen früheren Zeitmoment fällt, als derjenige der berechneten Curve, deren Abscissenlinie bei gemeinschaftlichem Fusspunkte für die Ordinate der maximalen Zuckungshöhe, um die Länge eben jener Verschiebung verkürzt sein muss. Demnach entsprechen die Ordinaten am Anfange der gezeichneten Zuckungcurve in Wahrheit nicht jenen Zeitstufen, für welche sie berechnet wurden und auf welche sich die berechneten Ordinatenwerthe beziehen, sondern relativ zum wahren Anfang der Zuckungcurve vorgerückteren Zeitstufen; sie müssen desshalb auch grösser ausfallen, als die berechneten Werthe, welche letztere aber in weiterer Folge, durch rascher vorschreitende Zunahme, die gefundenen Ordinatenwerthe noch vor dem Wendepunkte einholen.

Durch die vorangehenden Versuchsergebnisse glaube ich daher schon einen belangreichen Nachweis geliefert zu haben, dass der auf Grundlage der Wellentheorie abgeleitete Verlauf des Zuckungsvorganges im Muskel mit dem wirklichen Verlauf desselben im Wesentlichen übereinstimmt. Woraus dann folgt, dass auch die, mit Bezug auf die Factoren der Contractionswelle auf der gleichen Grundlage abgeleiteten Gleichungen, gleichfalls

geeignet und innerhalb noch weiter zu besprechender Grenzen auch verlässlich zur Bestimmung der Werthe jener Factoren sind.

Bevor ich jedoch an die Mittheilung dieser aus einer grossen Reihe von Versuchen gewonnenen Werthe schreite und dabei die Uebereinstimmung der jeweiligen Maximalhubhöhe mit der Gesammtheit jener Factoren darstelle, welche in der für die Maximalhubhöhe aufgestellten Gleichung enthalten sind, woraus dann auch eine Grundlage wird gewonnen werden zur Beurtheilung, in wiefern sich dieselben bei gleichbleibender Grösse der Hubhöhe gegenseitig compensiren können, und somit auch eine bessere Einsicht wird erlangt werden in den Mechanismus der Muskelarbeit; zu welchem Zwecke wir auch das Gesetz werden zu entwickeln haben, nach welchem im Muskel während der Zuckung die Entwicklung und Umwandlung der Kräfte vor sich geht; wollen wir vorher noch und zunächst jene Resultate einer eingehenden Betrachtung unterziehen, zu welchen andere Beobachter bei ihren, über den Verlauf der Muskelzuckung angestellten Versuchen gelangt waren, einerseits um dadurch, dass wir von jenen Resultaten begründete und zureichende Rechenschaft von unserem Standpunkte aus ablegen, auch neue, directe Belege für die Richtigkeit dieses Standpunktes zu gewinnen; andererseits um durch Berichtigung derjenigen Erklärungsweisen, welche man für jene Resultate auf anderen Grundlagen zu finden geglaubt hat, auch den indirecten Beweis, durch Ausschliessung der Zulässigkeit anderweitiger Annahme, für unsere Theorie zu liefern. Eben darum werden wir auch in die bisher nicht nur noch nicht abgeschlossene, sondern im Gegentheil wieder lebhafter gepflogene Discussion über die Natur der im Muskel bei der Zuckung wirkenden Molecularkräfte eintreten müssen, mit welcher Aufgabe wir uns in dem folgenden Abschnitte beschäftigen wollen.
