(Aus dem physiologischen Institute der Universität Graz.)

Über die Form der Arbeit am Mosso'schen Ergographen.

Von

O. Zoth.

(Mit 5 Textfiguren.)

Die Form der Arbeit eines Muskels oder einer Muskelgruppe ist durch den zeitlichen Verlauf der Verkürzung und der Spannungsänderung bestimmt. Isotonische, isometrische, auxotonische usw. Kontraktion sind solche einfache, für Untersuchungen an Muskeln oft ausgewählte Arbeitsformen, die zum Teil Extreme darstellen, wie sie bei der natürlichen Muskelarbeit selten oder nur annähernd verwirklicht erscheinen. Denn bei dieser kommen infolge der mehr oder weniger komplizierten Verhältnisse der Hebelwerke, an denen die Muskeln wirken, vielfach besondere Arbeitsformen zur Erscheinung, die, so leicht sie sich, grob betrachtet, als untereinander verschieden erkennen lassen, doch der genaueren experimentellen oder mathematischen Analyse Schwierigkeiten bereiten können, bzw. eine solche Analyse nur unter gewissen vereinfachenden Versuchsbedingungen oder Annahmen zulassen. Auf Grund solcher vereinfachender Annahmen, die für manche weniger komplizierte Fälle gar nicht besonders weit zu gehen brauchen, gelingt dann nicht nur die genauere Ermittlung einer besonderen Arbeitsform, sondern auch die exakte mathematische Analyse des ganzen Mechanismus ebener oder selbst räumlicher Gelenksysteme, wie sie von O. Fischer in seinen grundlegenden Arbeiten zur Muskelmechanik durchgeführt worden ist.

Für die Betrachtung der Arbeitsform am Ergographen liegen die Bedingungen anscheinend verhältnismässig einfach. Indem bei fixiertem Metacarpus die erste und die zweite Phalange durch die Wirkung der Fingerbeuger nahezu genau in einer zu beiden Drehungs-

achsen senkrechten Ebene bewegt werden, liegt im wesentlichen der Fall eines dreigliedrigen ebenen, bedingt beweglichen Gelenksystemes vor, für welches von Fischer die genaue Analyse längst durchgeführt und die Bewegungsgleichungen abgeleitet worden sind¹⁾.

Allein diese von Hause aus einfachen Verhältnisse werden auf der einen Seite durch den Hinzutritt der Belastung am Ergographen, deren Drehmoment in Bezug auf die beiden in Betracht kommenden Gelenke fortwährenden Veränderungen während des Hubes unterliegt, und deren Trägheit und Beschleunigung in ihrer Abhängigkeit von der tatsächlichen Hubgeschwindigkeit in jedem Zeitpunkte des Verlaufes des Hubes in Betracht zu ziehen wäre, auf der anderen Seite durch die Einscheidung der Fingerbeugersehnen in ihren Leitkanälen und durch das unbekannte Verhältnis der Anteile der beiden Fingerbeuger an der ausgeführten Bewegung so kompliziert, dass die Anwendung der Fischer'schen Formeln und Gleichungen für diesen besonderen Fall der Bewegung auf Schwierigkeiten stossen müsste, die wieder nur durch besondere, von den natürlichen Verhältnissen mehr oder weniger weit abweichende vereinfachende Annahmen gelöst werden könnten.

Es bleibt daher kaum etwas anderes übrig, als in diesem Falle den direkten Versuch am Präparate unter möglichster Nachahmung der Verhältnisse bei der üblichen Art der Arbeit am Ergographen anzustellen, um zu Aufschlüssen über die in Frage stehenden Punkte zu gelangen. Indem wir unsere Aufgabe auf die zunächst für die Form der Arbeit in Betracht kommenden Faktoren beschränken, wird von vornherein schon eine bedeutende Vereinfachung des Verfahrens ermöglicht. Die Fragestellung beschränkt sich dabei nach unserer eingangs angenommenen Definition der Arbeitsform auf folgende zwei Punkte:

1. Welchem zeitlichen Verlaufe der Verkürzung der am Ergographen wirksamen Muskeln entspricht der zeitliche Verlauf einer ergographischen Hubkurve?

2. Welcher zeitliche Verlauf der Spannungsänderung der wirksamen Muskeln entspricht den einzelnen Graden der Verkürzung derselben?

1) O. Fischer, Die Arbeit der Muskeln und die lebendige Kraft des menschlichen Körpers. Abhandl. d. math.-phys. Klasse d. kgl. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. Bd. 20 Nr. 1. 1893, und: Über die Drehungsmomente ein- und mehrgelenkiger Muskeln. Arch. f. Anat. und Entwicklungsgesch. Jahrg. 1894 S. 105.

Um die erste Frage zu beantworten, ist es zunächst erforderlich, den zeitlichen Verlauf der ergographischen Hubkurve genauer zu bestimmen. Dies geschieht einfach durch Ausmessung von gewöhnlichen, nur auf rascher bewegter Schreibfläche angeschriebenen solchen Kurven. In der nachstehenden Fig. 1 ist eine Kurve wiedergegeben, welche einen unter gewöhnlichen Verhältnissen gewonnenen ergographischen Einzelhub mit 5 kg Belastung und eine Sekunde lang gehaltenem Tetanus darstellt. Die Geschwindigkeit der Schreibfläche betrug 46,2 mm, so dass also 1 mm der Abszisse 0,021645 Sekunden entspricht. Die zur Ausmessung dienliche Hilfsvertikale, die im Anfangspunkte der Kurve errichtet ist, wurde mit

Fig. 1.

dem Schreibhebel des Ergographenläufers bei unverrückter Trommel angeschrieben. Die bloße Betrachtung solcher, auch bei raschem Trommelgange einander (unter gleichen Versuchsbedingungen) überraschend gleichenden Kurven lässt erkennen, dass der Hub in der Mittelstrecke mit annähernd gleichförmiger Geschwindigkeit erfolgt; der mittlere Teil der Hubkurve (von 9 bis 37 mm = 28 mm Hubhöhe) verläuft annähernd in der Geraden ab , während das Anfangsstück (von 0 bis 9 mm) und das Endstück (von 37 bis 45,5 mm) naturgemäss entsprechend dem Anstiege und Abfalle der Geschwindigkeit von und auf Null am Anfange und am Ende des Hubes die allgemeine Form einer Kurve beschleunigter und verzögerter Bewegung aufweisen.

Die Ausmessung des für unsere Zwecke in Betracht kommenden aufsteigenden Teiles der Kurve ergibt einen Gesamthub von 45,5 mm

in rund 0,23 Sekunden. Die auf Zehntel, höchstens halbe Zehntel abgerundeten Werte der Absissenausmessung und die daraus gerechneten Zeiten und Hubgeschwindigkeiten sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle I.

Zeitlicher Verlauf des ergographischen Hubes, nach Ordinaten der Hubkurve.

Ordinaten (Hubhöhen) mm	Abszissen mm	Zeit von Beginn	Zeit für 5 mm	Zeit für 1 mm = t	mm Hub für 0,001 Sek. = $\frac{1}{t}$
		(Tausendstel-Sekunden)			
1	1,4	30,30	—	30,30	0,033
2	1,75	37,88	—	7,58	0,132
3	2,1	45,45	—	7,57	0,132
4	2,4	51,95	—	6,50	0,154
5	2,6	56,28	56,28	4,33	0,231
10	3,6	77,92	21,64	4,33	0,231
15	4,3	93,07	15,15	3,03	0,330
20	4,9	106,06	12,99	2,60	0,385
25	5,55	120,13	14,07	2,81	0,356
30	6,2	134,20	14,07	2,81	0,356
35	6,9	149,35	15,15	3,03	0,330
40	7,9	171,20	21,85	4,37	0,229
41	8,2	177,49	—	6,29	0,159
42	8,5	183,98	—	6,49	0,154
43	8,8	190,48	—	6,50	0,154
44	9,1	196,97	—	6,49	0,154
45	9,6	207,79	36,59	10,82	0,092
45,5	10,6	229,44	(58,24) ¹⁾	43,30	0,023

Die Zahlen der Tabelle sind teilweise mit den Fehlern der ungenauen Messung behaftet, die jedoch für unsere Zwecke nicht wesentlich ins Gewicht fallen. Es ergibt sich aus der Zusammenstellung zunächst, dass die grösste Hubgeschwindigkeit [0,385 mm für 1 T.-S.²⁾ = ca. $\frac{3}{8}$ m Sekundengeschwindigkeit] um 20 mm des Hubes erreicht ist; von da an nimmt die Hubgeschwindigkeit erst langsam, dann rascher wieder ab. Zwischen 10 und 35 mm weichen jedoch die Hubgeschwindigkeiten von einem Mittel (0,351 mm in 1 T.-S.) nicht stark (0,005 bis 0,034 mm) ab. Im ganzen stellt sich die Hubbewegung als bis zur Erreichung des Geschwindigkeitsmaximums ungleichförmig beschleunigt, von da weiter in ähnlicher Weise ungleichförmig verzögert dar. Aber auch noch im Bereiche der Geschwindigkeitszunahme während der ersten und der Ge-

1) Für die letzten 5,5 mm.

2) T.-S. = Tausendstel-Sekunden.

schwindigkeitsabnahme während der letzten 5 mm des Hubes lässt sich je eine kurze Strecke von mittlerer Geschwindigkeit erkennen, innerhalb welcher keine wesentliche Geschwindigkeitsänderung eintritt (in der Tabelle sind die Strecken annähernd gleichbleibender Geschwindigkeit mit Klammern bezeichnet). Danach lässt sich die Hubkurve übersichtlich in sieben Strecken zerlegen, wie folgt:

1. 0 — 1 mm: Erste Geschwindigkeitszunahme von 0 auf ca. 140 mm¹⁾).
2. 1—4 mm: Geschwindigkeit ca. 140 mm.
3. 4—10 mm: Zweite Geschwindigkeitszunahme von 140 auf 350 mm.
4. 10—35 mm: Geschwindigkeit ca. 350 mm. (Maximum von 385 mm um 20 mm.)
5. 35—41 mm: Erste Geschwindigkeitsabnahme von 350 auf 155 mm.
6. 41—44 mm: Geschwindigkeit ca. 155 mm.
7. 44—45,5 mm: Zweite Geschwindigkeitsabnahme von 155 auf 0 mm.

Für unsere späteren Betrachtungen empfiehlt es sich, den Verlauf des ergographischen Hubes anstatt nach den Ordinaten nach der Zeit geordnet zu betrachten, wie dies in der nachstehenden Tabelle II geschehen ist. Die abgerundeten Zahlenwerte derselben ergeben sich aus Tabelle I teils unmittelbar, teils durch Interpolation; der Wert I wurde gemessen.

Tabelle II.

Hubgrößen in aufeinanderfolgenden Zeiten von 20 T.-S.

Zeiteil	Bis T.-S. nach Beginn	Gesamthub rund mm	Hub in dem Zeiteile mm
I	20	0,75	0,75
II	40	2,3	1,55
III	60	6,0	3,7
IV	80	10,7	4,7
V	100	17,7	7,0
VI	120	25,0	7,3
VII	140	31,8	6,8
VIII	160	37,5	5,7
IX	180	41,5	4,0
X	200	44,3	2,8
XI	220	45,3	1,0
XII	229,44	45,5	0,2

1) Stark abgerundete Zahlen; Sekundengeschwindigkeiten.

Die in der vorstehenden Tabelle verzeichneten, in aufeinanderfolgenden Zeiten von je 20 T.-S. erzielten Hubgrößen sind in der Kurve Fig. 1 durch Punkte markiert; die Zeiteile IV bis VIII sind mit den entsprechenden römischen Ziffern bezeichnet.

Nach Lösung dieser Voraufgabe konnte nun daran gegangen werden, die Beziehungen zwischen dem Verlaufe der Verkürzung und der Spannungsänderung der am Ergographen arbeitenden Muskeln zu dem nun bestimmten zeitlichen Verlaufe der ergographischen Hubkurve durch den Versuch festzustellen. Die Aufgabe wurde gelöst, indem ermittelt wurde, welche Verkürzungen und Spannungen der in Betracht kommenden Muskeln den in Tabelle II zusammengestellten aufeinanderfolgenden Hubgrößen entsprechen. Solche Ermittlungen hat in Bezug auf die Verkürzung des Muskels schon Mosso bei den ersten Eichungen des Ergographen vorgenommen¹⁾ und feststellen können, dass die Verkürzungen der Muskeln zur Hubhöhe des Gewichtes in folgenden Verhältnissen standen:

Verkürzung	Hub (Flexor subl.)	Hub (Flexor prof.)
10 mm	8,5 mm	7 mm
20 "	27,5 "	17 "
30 "	45,5 "	31 "

Es blieb demnach für den Flexor sublimis die Hubhöhe anfangs hinter der Muskelverkürzung zurück, um weiterhin infolge der Hebelwirkung der Finger über sie hinauszugehen, bis zum schliesslichen Verhältnisse von 3:2 des Gesamthubes zur Gesamtverkürzung; die Hubhöhen des Flexor profundus blieben länger hinter den Verkürzungen zurück und erreichten diese gerade bei 30 mm.

Wir haben für unsere Bestimmungen einen kleinen Apparat verwendet, der als Fingerwage bezeichnet werden kann. Er ist mit dem aufmontierten Fingergelenkspräparate in Fig. 2 in etwa $\frac{1}{3}$ der natürlichen Grösse dargestellt.

Auf zwei Säulen, die in einem Grundbrette befestigt sind, ruht die Metallschiene SS_1 , die an einem Ende einen vertikalen Arm VV_1 mit einem Schlitz trägt, in welchem sich der Träger einer Rolle R_1 auf und ab bewegen lässt. Am anderen Ende der Schiene sind die drei Rollen R_2 , R_3 , R_4 angebracht. Über die vier Rollen laufen Bindfäden, die mit Wagschälchen $W_1 - W_4$ von je 20 g Gewicht be-

1) A. Mosso, Über die Gesetze der Ermüdung. Arch. f. (Anat. u.) Physiologie Jahrg. 1890 S. 99.

lastet sind. Bei *A* und *B* ist mittels gut passender Schrauben der Metacarpus eines Fingergelenks- und Sehnenpräparates unbeweglich an der Schiene *SS*₁ befestigt. An der zweiten Phalanx dieses Präparates greift bei *H* an einem in den Knochen eingeschraubten Ringlein der Faden der Wagschale *W*₁ an. Von *H* aus läuft dann noch ein feiner 40 cm langer¹⁾ Faden in der Richtung gegen *L* zu einem auf einem besonderen Stativ angebrachten (in der Figur nicht gezeichneten) Läufer, welcher, an einer Halbmillimeterskala spielend, die Hubhöhen abzulesen gestattet. Der Faden der Wagschale *W*₂

Fig. 2.

ist an der Sehne des *M. flexor dig. sublimis*, der der Wagschale *W*₃ an der Sehne des *Flexor profundus* angebracht. Der Faden der Wagschale *W*₄ kann (für andere Zwecke) an der Sehne des *M. extensor dig. communis* befestigt werden. An diesen drei Fäden sind kleine Drahtzeiger *z* angebracht, welche die Verschiebungen der Sehnen an einem doppelten Halbmillimetermassstabe *M* abzulesen gestatten. Über dem Metacarpus ist bei *r* ein kleines Röllchen angebracht, um die Zugrichtung der hier freipräparierten Sehnen zu sichern.

Die Bestimmungen wurden an zwei Gelenkpräparaten vorgenommen, deren eines (Präparat A) in seinen Dimensionen mit den

1) Zur praktischen Ausschaltung des durch die wechselnde Zugrichtung bedingten Fehlers, wie beim Ergographen.

Dimensionen meines Mittelfingers übereinstimmte, während das andere (Präparat B) um rund 10 % kleiner war. Die beiden Präparate wurden mit den vom Metacarpo-Phalangeal-Gelenke an erhaltenen Leitkanälen der Sehnen hergestellt; am Metacarpus waren die Sehnen freipräpariert. 12—20 Stunden vor dem Versuche wurde das zu verwendende Präparat aus dem 50 %igen Alkohol, in dem es aufbewahrt war, in Wasser eingelegt, um die Sehnen und Gelenkkapseln geschmeidiger zu machen, was zweckmässig auch noch durch einige ausgiebige Bewegungen der Gelenke vor der Aufmontierung unterstützt wurde.

Bei der Verwendung des Apparates wurde die Rolle R_1 für jede Fingerstellung in der Höhe immer so eingestellt, dass die Zugrichtung der Last HL horizontal wurde. Die den zwölf Gesamthuben der Tab. III entsprechenden Verschiebungen der Sehnen des Flexor sublimis und profundus wurden jede für sich bestimmt, indem an der ersteren Sehne das Wagschälchen W_2 , an der letzteren das Schälchen W_3 angehängt und für die einzelnen Fingerstellungen ausbalanciert wurde. Die jeweilig unbenützte Sehne wurde unbelastet gelassen. Die Ausgangslage ergibt sich, ähnlich wie am Ergographen, leicht von selbst bei gesenkter Rolle R_1 und Belastung von W_1 unter voller Streckung des Metacarpo-Phalangeal-Gelenkes und leichter Beugstellung des ersten Interphalangealgelenkes (vgl. S. 332). Für diese Stellung wurde der Läufer L an seiner Skale auf Null eingestellt; er war mit einem kleinen Gegengewichte von $\frac{1}{2}$ g belastet, das genügte, ihn in die Ruhelage zurückzuführen. Durch Zug oder Belastung von W_2 und W_3 wurde nun der Finger allmählich gebeugt und dadurch der Läufer nacheinander auf die Strecken 0,75, 2,3, 6,0, 10,7 mm usw. (s. Tab. II) eingestellt; die Verschiebung der Sehnen wurde an der Skale M abgelesen. Die nicht unbedeutenden Reibungswiderstände des Präparates ermöglichen es leicht, durch entsprechende Belastungen der Wagschalen den Finger in den einzelnen Stellungen zu erhalten. Auf solche Art wurden in übereinstimmenden Versuchen die Werte der nachstehenden Tab. III (S. 319) gewonnen.

Zur statischen Ermittlung der den einzelnen so gefundenen Verschiebungen der Sehnen entsprechenden Spannungen wurde in ähnlicher Weise vorgegangen. Der Läufer war jetzt entbehrlich, da die den Zeitteilen I—XII entsprechenden Sehnenverschiebungen (Muskelverkürzungen) schon ermittelt waren. Für jede dieser Stellungen

Tabelle III.

Verkürzungen (in Millimetern) des *M. flexor dig. sublimis* und *profundus* entsprechend den Zeiteilen I—XII der Tabelle II. Präparat A und B.

Zeitteil	Gesamt- hub	Gesamtverkürzung				Hub im Zeitteile	Verkürzung im Zeiteile			
		Fl. subl.		Fl. prof.			Fl. subl.		Fl. prof.	
	mm	A	B	A	B	mm	A	B	A	B
I	0,75	1,8	2,5	2,5	4	0,75	1,8	2,5	2,5	4
II	2,3	4	5	5,3	6,5	1,55	2,2	2,5	2,8	2,5
III	6,0	6	7	9,5	10,5	3,7	2	2	4,2	4
IV	10,7	8	9	12,3	14	4,7	2	2	2,8	3,5
V	17,7	10	11,5	17	18	7,0	2	2,5	5,4	4
VI	25,0	12,5	13,5	19,5	21	7,3	2,5	2	2,5	3
VII	31,8	14,5	15	21,5	23,5	6,8	2	1,5	2	2,5
VIII	37,5	16,5	17	22,5	25,5	5,7	2	2	1	2
IX	41,5	18	18	23,5	26,5	4,0	1,5	1	1	1
X	44,3	18,5	19	24	27,5	2,8	0,5	1	0,5	1
XI	45,3	18,9	19,3	24,4	27,8	1,0	0,4	0,3	0,4	0,3
XII	45,5	19	19,5	24,5	28	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

nun wurde, wieder getrennt für beide Sehnen, durch Belastung von W_1 und W_2 oder W_1 und W_3 das Fingerpräparat ausbalanciert, wobei wieder die Zugrichtung HL durch Verschieben des Trägers der Rolle R_1 in VV_1 immer horizontal eingestellt wurde. Infolge der schon oben erwähnten Reibungswiderstände im Präparate¹⁾ lässt sich nun die Gleichgewichtsbelastung für jede Fingerstellung nicht ohne weiteres ermitteln; es musste vielmehr so vorgegangen werden, dass für jede Stellung diejenigen Belastungen der beiden Wagschalen ermittelt wurden, bei welchen eben noch Beugung, und diejenigen, bei welchen eben noch Streckung des Fingers erfolgte²⁾. Als Index wurde dabei die Verschiebung des Zeigers z um etwa $\frac{1}{2}$ mm im Sinne des betreffenden Übergewichtes angenommen. Die Genauigkeit geht dabei für die meisten Fingerstellungen nicht unter 10 g, für einzelne jedoch bis unter 5 g (Phalangenbelastung) herab. Als Gleichgewichtswert wurde schliesslich der Mittelwert aus den beiden Grenzbelastungen für Beugung und Streckung (das Gewicht der Wagschalen mit eingerechnet) angenommen. Aus praktischen Gründen, um an den Sehnen keine zu grossen Belastungen wirken lassen zu

1) An einem frischen Präparate sind dieselben natürlich viel geringer.

2) Vor jeder solchen Bestimmung empfahl es sich, wieder ein paar ausgiebigere Gelenksexkursionen vorzunehmen: die Empfindlichkeit der Einstellung wird dadurch merklich verbessert.

müssen, wurde bei diesen Versuchen womöglich mit konstanter Sehnenbelastung (220 g) gearbeitet und die Phalangenbelastung variiert; nur für die Zeiteile I—III musste die Sehnenbelastung teilweise verringert werden¹⁾.

In der nachstehenden Tab. IV sind die in gut übereinstimmenden Versuchen solcherart gewonnenen Werte zusammengestellt. Die Zahlen entsprechen den für die Belastung 1 der Phalange umgerechneten Gleichgewichts-Mittelwerten des Zuges an den Sehnen der beiden Muskeln.

Tabelle IV.

Spannungen (in Dekagramm) des M. flexor dig. sublimis und profundus, entsprechend den Zeiteilen I—XII für die Phalangenbelastung 1 (Dekagramm). Präparate A und B.

Zeiteil	Flexor sublimis		Flexor profundus	
	A	B	A	B
I	1,5	0,7	0,7	0,5
II	2,2	1,3	1,1	0,6
III	3,1	2,3	1,2	0,9
IV	4,0	3,1	1,5	2,3
V	4,0	4,4	2,8	4,0
VI	4,4	5,5	3,7	4,6
VII	4,4	5,5	4,0	5,0
VIII	4,4	4,9	4,0	5,2
IX	4,4	4,9	4,0	5,5
X	4,4	4,9	4,0	5,5
XI	5,2	4,9	4,2	5,5
XII	5,2	4,9	4,6	5,5

Aus den Tabellen III und IV ergibt sich nun in Bezug auf Verkürzung und Spannungsänderung der beiden Fingerbeuger während eines im ergographischen Tempo (der Tab. II) ausgeführten Hubes im allgemeinen für die beiden Präparate folgender Verlauf:

1. Die Verkürzung beider Muskeln ist anfangs grösser, später kleiner als der Hub des Gewichtes. Hub und Verkürzung werden für den Flexor sublimis im Zeiteile III—IV, für den Flexor profundus am Ende des Zeiteiles V einander gleich. Erst von da an bleibt die Verkürzung hinter dem Hube zurück, und zwar immer mehr und mehr. Am Ende des Hubes stellt sich das Verhältnis der Verkürzung zur Hubhöhe für den Flexor sublimis an beiden Prä-

1) Für diese Zeiteile sind auch die für die „Streckung“ gefundenen Werte weniger verlässlich, da dabei (namentlich bei Präparat A) merkliche Zerrung des Metacarpo-Phalangeal-Gelenkes auftrat.

paraten auf etwa 3:7, für den Flexor profundus auf 7 (Präparat A) bis 8 (Präparat B): 13.

2. Die Verkürzung des Fl. subl. ist im Durchschnitte für den gleichen Hub um etwa $\frac{1}{4}$ (Präparat A) bis $\frac{1}{3}$ (Präparat B) kleiner als die entsprechende Verkürzung des Fl. prof.

3. Die Geschwindigkeit der Verkürzung (Verkürzung im Zeitteile) ist für den Fl. prof. in der ersten Hälfte der Hubzeit grösser als für den Fl. subl.; im letzten Teile des Hubes werden beide annähernd gleich gross. Bei Präparat A wird die Geschwindigkeit der Verkürzung des Fl. subl. vorübergehend (Zeitteil VIII—IX) sogar ein wenig grösser als die des Fl. prof.

4. Der Spannungsverlauf der zwei Muskeln zeigt bei den beiden Präparaten einige Verschiedenheiten. Die Spannung des Fl. subl. nimmt anfangs mit der Hubzeit zu und erreicht im Zeitteile VI bis VII (bei Präparat A mit einer kleinen Stufe) ein erstes Maximum, auf welchem sie bei Präp. A durch vier Zeitteile verharret, um am Ende des Hubes noch etwas anzusteigen. Bei Präparat B fällt die Spannung von dem erreichten Maximum wieder ab und bleibt auf dieser etwas niedrigeren Höhe bis zum Ende des Hubes bestehen. Die Spannung liegt bei Präparat A im ersten Drittel der Hubzeit über, weiterhin unter der des Präparates B; am Schlusse des Hubes steigt sie wieder etwas darüber an.

5. Die Spannung des Fl. prof. zeigt bei beiden Präparaten in ihrem Verlaufe eine deutliche Stufe im ersten Drittel des Hubes: also erst raschere, dann langsame, dann wieder raschere Zunahme. Im Zeitteile VIII—IX wird ein Maximum der Spannung erreicht, das nur bei Präparat A ganz am Ende des Hubes noch etwas überschritten wird.

6. Die Spannung des Fl. subl. ist bei Präparat A für den gleichen Hub durchwegs über der Spannung des Fl. prof. gelegen, bei Präparat B nur in der ersten Hälfte der Hubzeit; vom Zeitteile VIII an sinkt sie hier unter die letztere ab.

Alle diese Verhältnisse lassen sich aus den Kurven der nachstehenden Figuren 3 und 4 übersichtlicher und genauer ersehen als aus den Zahlen der Tabellen. Die Zeitteile I—XII sind als Abszissen, die entsprechenden Hubgrössen, Verkürzungen und Spannungen als Ordinaten eingetragen. Die punktierte Kurve A stellt als Hubkurve nichts anderes als den auf die grössere Abszisse I—XII gedehnten aufsteigenden Teil der ergographischen Kurve der Fig. 1 dar. Die

dünn ausgezogene Kurve *B* gibt den Verlauf der entsprechenden Verkürzung des Fl. subl., die dünn gestrichelte Kurve *C* die Verkürzung des Fl. prof. wieder. Die dick ausgezogene Kurve *D* zeigt den Spannungsverlauf für den Fl. subl., die dick gestrichelte Kurve *E* den Spannungsverlauf für den Fl. prof. an.

Die Figuren 3 und 4 enthalten alle für die Form der Arbeit des *M. flex. dig. subl.* und *prof.* am Ergographen in Betracht kommenden Einzelheiten für unsere beiden Präparate, die Hub- und Verkürzungswerte in natürlicher Grösse. Aus den Figuren sind ohne

Fig. 3.

weiteres die zusammengehörigen Werte von Hub, Verkürzung und Spannung für jeden Zeitpunkt des Hubes zu entnehmen. Besonders deutlich kommt das Zurückbleiben des Hubes hinter der Muskelverkürzung im ersten (Kurven *A*, *B* und *C*) und der Wechsel des Spannungsverhältnisses der beiden Muskeln (Kurven *D* und *E*) im letzten Drittel des Hubes beim Präparate B zum Ausdruck. Auch die Ungleichförmigkeit des Spannungsverhältnisses in den ersten zwei Dritteln des Hubes wird durch den Verlauf der Kurven *D* und *E* recht deutlich gemacht.

Es lässt sich nun leicht auch ableiten, welche Verhältnisse eintreten, wenn beide Muskeln in verschiedener Beanspruchung zusammenwirken, ohne dass es notwendig wäre, weitere besondere Bestimmungen

an der Fingerwage vorzunehmen. Wenn beide Muskeln zur Hebung einer an der Phalange wirkenden Last zusammenwirken sollen, so muss natürlich die Verkürzung für jeden Zeitpunkt des Hubes dieselbe sein, wie wenn ein Muskel allein wirksam wäre. An den Kurven *A*, *B* und *C* ist daher auch für das Zusammenwirken der beiden Muskeln in irgendeinem Arbeitsverhältnisse nichts zu ändern. Anders verhält es sich mit den Spannungen. Soll die Last auf die beiden Muskeln im Verhältnisse von $\frac{m}{n}$ verteilt werden, wobei

Fig. 4.

$m + n = 1$ gesetzt wird, so ergeben sich für die Einheit der Belastung die erforderlichen Spannungen der beiden Muskeln mT_s und nT_p , worin T_s und T_p die Spannungen für die Belastung 1 in dem betreffenden Zeiteile bedeuten.

Beispiel: Präparat B, Zeiteil IV. $T_s = 3,14$; $T_p = 2,32$. Verteilung der Belastung im angenommenen Verhältnisse von $\frac{1}{3} : \frac{2}{3}$. Resultierende Spannungen: $mT_s = 1,05$, $nT_p = 1,55$.

Ebenso kann ermittelt werden, welche Spannung für die Einheit der Belastung (und danach für jede beliebige) bei gegebener Spannung des einen Muskels der andere erhalten muss. Ist $T'_1 = mT_1$ die Spannung des einen Muskels, so ist die des anderen wegen $m + n = 1$:

$$T'_2 = (1 - m) T_2;$$

worin wieder T_1 und T_2 die zusammengehörigen, dem gleichen Zeitabschnitte des Hubes entsprechenden Spannungen der beiden Muskeln für die Belastung 1 (s. Tab. IV) bedeuten.

Beispiel: Präparat B, Zeitteil V. $T_s = 4,4$; $T_p = 4,0$. Angenommene Spannung des Fl. prof. 3 ($= \frac{3}{4} \cdot 4$). Gesuchte Spannung des Fl. subl. $T'_s = (1 - \frac{3}{4}) \cdot 4,4 = 1,1$.

Für gleiche Spannungen beider Muskeln verhalten sich weiter die Belastungen der Phalange umgekehrt wie die Spannungen bei gleicher Belastung:

$$\frac{B_s}{B_p} = \frac{T_p}{T_s}.$$

Endlich findet auch die Frage ihre einfache Lösung, in welcher Art der Hub in jedem Zeitteile mit dem geringsten Spannungsaufwande ausgeführt werden kann. Schon eine einfache Überlegung ergibt, dass dazu der jeweilig weniger gespannte Muskel beansprucht werden muss. Die Summe der Spannungen beider Muskeln für eine Verteilung der Last im Verhältnisse von $m:n$ auf dieselben beträgt nach der obigen Ableitung (für die Belastung 1)

$$\Sigma T = m T_s + n T_p.$$

Da nun $m + n = 1$ gesetzt wurde, so ergibt sich

$$\Sigma T = T_p + m (T_s - T_p).$$

Diese Summe erreicht ihr Minimum bei $m = 0$, solange $T_s > T_p$, bei $m = 1$, sobald $T_p > T_s$ wird; das heisst: um das Minimum der Gesamtspannung zu erzielen, muss der Hub von dem Muskel geleitet werden, dessen Spannung jeweilig die geringere ist.

Welchen Anteil die beiden Muskeln bei der Ausführung des ergographischen Hubes in Wirklichkeit haben, lässt sich nicht bestimmen. Jedoch kann unter Zugrundelegung des „Prinzipes der geringsten Muskelanstrengung“ die Vermutung ausgesprochen werden, dass der ergographische Hub mehr oder weniger angenähert dem bezeichneten Minimum des Spannungsaufwandes entsprechend zwischen dem Flexor sublimis und profundus verteilt ablaufen, also gewöhnlich vom Flexor profundus (Präparat A) geleitet werden dürfte. Dabei darf aber nicht ausser Acht gelassen werden, dass andererseits bei fortgesetzter Arbeit die Verteilung derselben auf die grössere Muskelmasse beider Muskeln wesentliche Vorteile bietet, sowie dass die Einflüsse der Ermüdung und der Erholung einen Wechsel der Verteilung der Hubarbeit zwischen den beiden Muskeln im Verlaufe einer Versuchsreihe möglich erscheinen lassen. Vielleicht stehen die

Erscheinungen der Treppe und der Anfangszacke, die ich in Reihen-Erholungsversuchen gefunden habe¹⁾, in Beziehung hierzu. —

Indem wir die Gleichgewichtsverhältnisse zwischen der Belastung der Phalange und der Spannung der beiden Fingerbeuger in der beschriebenen Weise ermittelt haben, ist die gestellte Aufgabe, die Beziehung zwischen zeitlichem Verlaufe der Spannungsänderung und der Verkürzung festzustellen, statisch gelöst worden. Die Trägheitsverhältnisse der bewegten Massen sind dabei unberücksichtigt geblieben. Es fragt sich nun, inwieweit die Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse durch diese Vereinfachung des Verfahrens beeinträchtigt wird. Dabei ist folgendes zu erwägen: Die Masse, um die es sich beim ergographischen Hube vornehmlich handelt, ist die Masse des gehobenen Gewichtes, das als Belastung am Ergographen angebracht ist; gegen diese ist die Masse des bewegten Körperteiles (und auch des Läufers am Apparate) leicht zu vernachlässigen. Die Masse des gehobenen Gewichtes (und des Läufers) erhält auch durchschnittlich beim Hube die grösste Geschwindigkeit von allen Teilen des bewegten Systems (abgesehen vom ersten Anfange des Hubes und von dem jenseits des Angriffspunktes der Last gelegenen Endstücke des Fingers). Aber immer wird man sich die Trägheit aller bewegten Teile in der Betrachtung durch die Trägheit der Masse einer entsprechenden Vergrösserung der Belastung ersetzt denken können, wenn es sich darum handelt, einen Grenzwert für die Beeinflussung unserer statisch gewonnenen Ergebnisse durch die Bewegung zu ermitteln. Die Frage erhält somit in der Hauptsache folgende Form: In welcher Weise wird die im Verlaufe des Hubes erforderliche Zugkraft durch die Aufwärtsbewegung des Gewichtes mit den in den einzelnen Zeiteilen des Hubes festgestellten Geschwindigkeiten beeinflusst?

Sei Z die Zugkraft und P die Belastung in irgendeinem Zeitpunkte des Hubes, so ist die resultierende Kraft R , welche dem Gewichte in diesem Zeitpunkte die Beschleunigung g' erteilt,

$$R = Z - P.$$

Sei weiter m die Masse, welche dem Gewichte P entspricht, und g die Beschleunigung der Schwerkraft, so ergibt sich

$$Z = P + R = m(g + g'),$$

g' erhält man in angenäherten Mittelwerten aus den Differenzen der

1) S. Bd. 111 S. 441 dieses Archives. 1906.

Hube in den aufeinanderfolgenden Zeitteilen I—XII (Tabelle II); auf die Zeit- und Längeneinheit berechnet (Millimeter und T.-S. = Meter und Sekunden) sind diese Werte in der nachstehenden Tabelle V verzeichnet. Im dritten Stabe der Tabelle sind die daraus abgeleiteten Werte für Z , im vierten die Werte für $R = Z - P$ eingesetzt. Der letzte Stab enthält die Werte von R in Prozenten von P . Als Belastung wurde die vielfach übliche und verwendete von 5 kg angenommen.

Tabelle V.

Einfluss der Trägheit auf die Grösse der erforderlichen Zugkraft in den Zeitteilen I—XII. Belastung 5 kg.

Zeitteil (s. Tab. II S. 315)	Beschleunigung g' in m pro Sek. (= mm pro T.-S.)	Zugkraft $Z = m(g + g')$ kg	Resultierende $R = Z - P$	
			in kg	in % von P
I	0,038	5,02	0,02	0,4
II	0,040	5,02	0,02	0,4
III	0,108	5,06	0,06	1,2
IV	0,050	5,03	0,03	0,6
V	0,115	5,06	0,06	1,2
VI	0,015	5,01	0,01	0,2
VII	— 0,025 ²⁾	4,99	— 0,01	0,2
VIII	— 0,055	4,98	— 0,02	0,4
IX	— 0,085	4,96	— 0,04	0,8
X	— 0,060	4,97	— 0,03	0,6
XI	— 0,090	4,96	— 0,04	0,8
XII	— 0,040	4,96	— 0,02	0,4

Es zeigt sich in der vorstehenden Tabelle in angenäherten Zahlenwerten, was übrigens nach der kurzen Zeitdauer des ganzen Vorganges (rund $\frac{1}{4}$ Sekunde, vgl. S. 314) und der Kleinheit der Beschleunigungen von meist unter oder nur wenig über 10 cm pro Sekunde (gegen 9,81 m der Schwere) von vornherein zu erwarten gewesen war, dass beim ergographischen Hube die jeweilig erforderliche Zugkraft durch die Aufwärtsbewegung eines Gewichtes von 5 kg nur unwesentlich beeinflusst wird. Diese Zugkraft liegt in der ersten Hälfte des Hubes etwas über, in der zweiten etwas unter der Grösse des zu hebenden Gewichtes; die maximale Differenz beträgt 1,2 % der Belastung. Die der Beschleunigung des Gewichtes in den einzelnen Zeitteilen entsprechende Resultierende beträgt im Maximum 6 dkg und wirkt in der ersten Hubhälfte beschleunigend,

1) $m = \frac{5}{9,81} = 0,51$. Auf Dekagramm abgerundete Werte für Z .

2) Von hier an verzögerte Aufwärtsbewegung.

in der zweiten verzögernd. Diese Kleinheit der Resultierenden R bedeutet aber nichts anderes, als dass die Bewegung beim ergographischen Hube mit grösseren Gewichten in ziemlich vollkommener Weise gedämpft erfolgt¹⁾.

Die durch die statische Betrachtung für die Form der Arbeit am Ergographen gewonnenen Ergebnisse würden durch die Einführung der dynamischen Elemente in keiner Weise wesentlich verändert werden. —

Da es nicht gut ausführbar erscheint, die Sehnenverschiebungen (Verkürzungen) und die Austarierung für die einzelnen Phasen des Hubes an demselben lebenden Fingerapparate vorzunehmen, mittels dessen der zeitliche Verlauf des Hubes ermittelt worden ist, kommt endlich noch die Frage in Betracht, ob es erlaubt ist, diesen selben zeitlichen Verlauf des Hubes für die verwendeten anatomischen Präparate vorauszusetzen. Es scheint fürs erste naheliegend, dass dies für unser Präparat A, das die gleichen Dimensionen wie der verwendete Mittelfinger aufweist, ohne weiteres geschehen kann, während es für das Präparat B, dessen Dimensionen um etwa 10 % kleiner waren, abgewiesen werden müsste. Allein bei näherer Betrachtung ergibt sich, dass unsere Ergebnisse für beide Präparate eben nur unter der Annahme eines zeitlichen Verlaufes Geltung haben, der unserem ergographisch gefundenen annähernd gleichkommt. Diese Annahme hat für das gleichdimensionierte Präparat A viel, für das Präparat B weniger Wahrscheinlichkeit für sich. Sie muss für Präparat A nicht, und sie kann für Präparat B zutreffen. Kleine räumliche Verschiedenheiten in den Gelenkformen, den Sehnenansätzen und dem Angriffspunkte der Last können dabei offenbar von Einfluss sein. Vergleicht man jedoch die in den Tabellen III und IV und besonders in der noch später zu besprechenden Tabelle VII (S. 332) nebeneinandergestellten Werte für die Präparate A und B, so gelangt man zu dem Schlusse, dass beträchtlichere Verschiedenheiten verschiedener Fingerapparate zwar das Ausmass und die Verhältniszahlen der daran wirkenden Kräfte, aber nicht wesentlich die allgemeine Form der Arbeit beeinflussen können.

Fassen wir von diesem Standpunkte aus allgemein zusammen,

1) Bei kleineren Gewichten könnte sich wegen der grösseren Hubgeschwindigkeit das Verhältnis etwas ungünstiger stellen. Es liegen mir darüber keine Kurvenausmessungen vor.

was die vorliegende Untersuchung über die Form der Arbeit am Ergographen von Mosso ergeben hat, so lässt sich aus den schon S. 320—321 abgeleiteten Sätzen folgendes erschliessen:

Der allgemeine Typus der Muskelarbeit am Ergographen ist der der Verkürzung unter Spannungszunahme. Dabei ist die Muskelverkürzung im ersten Drittel des Hubes grösser als der Hub des Gewichtes und wird dann allmählich kleiner als dieser, um am Schlusse etwa die Hälfte desselben zu betragen. Die Geschwindigkeit der Verkürzung ist in der ersten Hubhälfte (vom Anfangsteile abgesehen) ziemlich gleichförmig und sinkt in der zweiten Hubhälfte allmählich bis auf Null ab.

Die Spannung der beiden Muskeln nimmt in der ersten Hubhälfte rasch bis auf das Vier- bis Fünffache der Phalangenbelastung zu und erhält sich dann in der zweiten Hubhälfte ungefähr auf dieser Höhe.

Der Flexor sublimis leistet im allgemeinen dieselbe äussere Arbeit mit grösserem Spannungsaufwande als der Flexor profundus¹⁾. Die besonderen Einzelheiten der Spannungsänderung beider Muskeln sind schon S. 321 besprochen worden.

Die Form der Arbeit am Ergographen entspricht also im grossen ganzen derjenigen verbreiteten Form natürlicher Muskelarbeit, die als Auxotonie bezeichnet wird. Im besonderen freilich finden sich im Verlaufe der Spannungskurven auch längere Strecken voller Isotonie (*ii* Fig. 3 u. 4), so namentlich in der zweiten Hubhälfte, während Isometrie nur einmal angenähert (und vielleicht zweifelhaft) in ganz kurzer Dauer (Fig. 3 bei *h*) festzustellen war. Präparat B zeigt endlich noch (Fig. 4 bei *ge*) den besonderen Fall einer (vorübergehenden) Spannungsabnahme bei zunehmender Verkürzung. Immerhin aber steht jedenfalls die Verkürzung unter Spannungszunahme im Vordergrund; auch die Isotonie in der zweiten Hubhälfte tritt dagegen zurück, und zwar hauptsächlich deswegen, weil die Zunahme der Verkürzung hier nur mehr sehr gering ist.

Unsere Ergebnisse bestätigen also im wesentlichen die Äusserung, welche ich in einer früheren Mitteilung²⁾ über das Mosso'sche Verfahren getan habe: „Die mit glücklichem Erfindergriß ausgewählte

1) Eine Ausnahme bildet das Endstadium bei Präparat B.

2) O. Zoth, Ergographische Versuche über die Erholung des Muskels. Pflüger's Arch. Bd. 111 S. 403. 1906.

Form der Arbeit am Ergographen von Mosso stellt nun freilich keinen der einfachsten realisierbaren, aber gewiss einen Haupttypus natürlicher Muskulararbeit dar, nämlich den Typus der Verkürzung unter Zunahme des Widerstandes.“

Für individuelle Verschiedenheiten in der Arbeitsform, wie sie mir nach derselben angeführten Mitteilung¹⁾ schon vor langem wahrscheinlich erschienen sind, lässt sich auf Grund der Analyse des ergographischen Hubes eine ganze Anzahl von Momenten als beeinflussend in Betracht ziehen. Verschiedene Dimensionen des Fingerhebelwerkes, vielleicht auch Verschiedenheiten in den Formen der Gelenkflächen, Unterschiede in der Lage der Sehneninsertionen und selbst Verschiedenheiten in der Anbringung der Lederschleife des Ergographen an der Phalange²⁾ sind rein mechanische solche Momente. Hierzu kommen die physiologischen Momente verschiedener Beanspruchung der beiden Fingerbeuger für den Hub, die vielleicht sogar innerhalb einer Versuchsreihe Änderungen unterworfen sein kann, und die etwaige verschiedene Beanspruchung in diesen Muskeln vorhandener flinker und träger Anteile³⁾. Verschiedenartiges Zusammenwirken auch nur einiger dieser Momente lässt die mannigfachsten Variationen in der Form des ergographischen Hubes möglich erscheinen: in Wirklichkeit werden solche ja im allgemeinen vermutlich nur innerhalb gewisser enger Grenzen stattfinden, so dass die allgemeine Form der Arbeit nicht wesentlich verändert wird⁴⁾.

Ich möchte die Betrachtung der Form der Arbeit am Ergographen nicht abschliessen, ohne auch noch kurz des absteigenden Teiles der ergographischen Hubkurve gedacht zu haben. Für die äussere Arbeit des Einzelhubes kommt dieser Teil des Hubes zwar nicht in Betracht, wohl aber muss dessen Verlauf von Einfluss auf die Ermüdung in einer längeren Reihe von Huben sein. Denn es kann für die tetanische Ermüdung des arbeitenden Muskels nicht gleichgültig sein, ob das Fallenlassen des Gewichtes nach jedem vollendeten Hube unter grösserem oder kleinerem Widerstande des

1) l. c. S. 400.

2) Vgl. S. 327.

3) Vgl. S. 324 und l. c. S. 448.

4) Vgl. S. 327.

Muskels erfolgt; dass es im allgemeinen (bei grösseren Gewichten) verzögert stattfindet, habe ich schon früher hervorgehoben¹⁾.

Im absteigenden Teile der Hubkurve Fig. 1 (S 313) sind die sieben aufeinanderfolgenden Zeiträumen von je 0,0433 Sek. entsprechenden „ergographischen Fallstrecken“ abgemessen und auf die Ordinate *de* projiziert. Diese ergographischen sowie die denselben Zeiträumen entsprechenden freien Fallstrecken sind in der nachstehenden Tabelle VI zusammengestellt.

Tabelle VI.

Ergographische und freie Fallräume für Zeiteile von 0,0433 Sek.

Zeiteil	Gesamtfall in Millim.		Fall im Zeiteil in Millim.	
	Ergogr.	Frei (rund)	Ergogr.	Frei (rund)
I	0,4	9,2	0,4	9,19
II	1,4	36,75	1,0	27,56
III	4,2	82,68	2,8	45,93
IV	9,2	146,99	5,0	64,31
V	18,45	229,67	9,25	82,68
VI	31,35	330,73	12,9	101,06
VII	43,65	450,16	12,3	119,43

Der Abfall der ergographischen Kurve dauert, an einigen meiner vorliegenden Kurven bestimmt, 0,20—0,33 Sek., in unserer Kurve (Fig. 1) 0,314 Sek. bei einer totalen Fallhöhe von 46 mm. In derselben Zeit wäre das Gewicht frei bereits die zehnfache Höhe, nämlich 483 mm, gefallen. Der „ergographische Fall“ ist also gegen den freien Fall sehr bedeutend, und zwar für die angegebenen Zeitgrenzen etwa um das 5—10fache verzögert. Die mittlere Beschleunigung würde sich für jenen zu 0,885 m berechnen.

Die Bewegung beim ergographischen Falle ist jedoch, wie ein Blick auf Tabelle VI und die Ordinatenkonstruktion der Fig. 1 zeigt, eine ungleichförmig beschleunigte, gegen das Ende eine nahezu gleichförmige. Die Geschwindigkeit der Bewegung wächst bis zum Zeiteile V zunehmend, dann rasch abnehmend, so dass im Zeiteile VII sogar eine kleine Verzögerung des Falles eintritt. Es könnten nun aus den in den einzelnen Zeiteilen verbleibenden Beschleunigungen die jeweilig noch vorhandenen Zugkräfte berechnet und nach diesen unter Benützung der Fingerwage die entsprechenden

1) l. c. S. 400.

Spannungen der Muskeln auch für den absteigenden Teil der Hubkurve ermittelt werden. Für unseren Gegenstand hat dies jedoch kein besonderes Interesse mehr. Ich begnüge mich mit dem Hinweis auf die starke Verzögerung des Abstieges der Hubkurve gegenüber dem freien Falle und auf die leicht festzustellenden grossen Verschiedenheiten in der Zeitdauer dieses Abstieges selbst in kurz aufeinanderfolgenden Huben derselben Versuchspersonen. Diese Verschiedenheiten werden in Ermüdungs- und Erholungs-Reihenversuchen mit (mindestens) eine Sekunde „gehaltenem“ Tetanus gegenüber der 3—5fachen Länge dieses Abschnittes weniger ins Gewicht fallen als in Versuchen ohne gehaltenen Tetanus. Vielleicht ist die grössere Regelmässigkeit in Versuchsreihen der ersten Art zum grossen Teile hierauf zurückzuführen.

Anhang.

Über die Drehmomente der Last und der Kräfte bei der Arbeit am Ergographen von Mosso.

Gelegentlich der in der vorstehenden Untersuchung vorgenommenen Ermittlungen an der Fingerwage wurden für die beiden benützten Gelenkpräparate A und B auch die den einzelnen Zeitteilen I—XII¹⁾ entsprechenden Winkelstellungen zwischen Metacarpus und erster Phalange (Winkel α) und zwischen erster und zweiter Phalange (Winkel β) bestimmt. Dabei dienten mit Farbstift den Drehungsachsen der Gelenke entsprechend an den Präparaten angebrachte Punkte als Marken, unter deren Benützung die Winkel mittels eines kleinen Schrägmasses abgenommen und auf dem Transporteur ausgemessen wurden. Unter Vermittlung derselben Marken wurden auch die Längenausmessungen der Präparate vorgenommen und mit den Ausmessungen meines Mittelfingers verglichen²⁾. Dabei wurden folgende Werte erhalten:

	Mein Finger	Präparat A	Präparat B
	mm	mm	mm
Totale Länge	108	108	95
Phalanx I	53	53	48
Phalanx II bis zur Mitte ³⁾	—	22	18

1) Vgl. Tabelle II S. 315.

2) Vgl. auch S. 327.

3) Entsprechend dem Angriffspunkt der Last an der Streckseite der Phalange.

Anstatt der Achsenstrecke der zweiten Phalange empfiehlt es sich für die weitere Betrachtung die senkrechte Verbindungslinie von der Drehungsachse derselben zum Angriffspunkte der Last als Hebelarm einzuführen. Diese Strecke beträgt für Präparat A rund 23 mm, für Präparat B rund 19 mm. Der Winkel δ zwischen diesem Arme und der Achse der zweiten Phalange beträgt bei beiden Präparaten rund 18°. In der nachstehenden Tabelle VII sind nun die Winkel α und $\beta + \delta$ für die dreizehn verschiedenen Fingerstellungen während des ergographischen Hubes in den Zeitteilen 0 (I) bis XII für die Präparate A und B zusammengestellt.

Tabelle VII.

Winkel (in Graden) der Hebelarme an den Fingerpräparaten A und B, entsprechend den Zeitteilen 0—XII (d. Tab. II).

Zeitteil	Flexor sublimis				Flexor profundus			
	$\angle \alpha$		$\angle \beta + \delta$		$\angle \alpha$		$\angle \beta + \delta$	
	A	B	A	B	A	B	A	B
0	182	180	161	171	182	180	160	171
I	178	177	161	168	180	179	153	156
II	174	173	153	161	176	177	148	151
III	165	168	150	159	175	170	138	143
IV	159	160	148	154	165	165	133	130
V	152	150	141	146	163	163	118	108
VI	145	140	138	139	153	157	109	108
VII	139	138	133	128	144	155	106	107
VIII	135	135	123	122	140	140	106	106
IX	133	133	120	118	137	139	106	105
X	131	131	114	116	134	135	105	104
XI	130	130	113	115	132	133	104	103
XII	130	129	113	114	132	132	104	103

Die Unterschiede zwischen den Werten für die beiden Präparate sind weniger bedeutend, als man wohl hätte erwarten können. Sie liegen vielfach innerhalb der Fehlergrenzen der doch verhältnismässig rohen Messmethode. Die namentlich für die Anfangslagen teilweise grösseren Unterschiede gleichen sich bei der weiteren Beugung bald aus. Für den Flexor profundus sind die Unterschiede durchschnittlich grösser als für den Flexor sublimis.

Mit Hilfe der Angaben der Tabelle VII ist es nun leicht, das bei der Arbeit am Mosso'schen Ergographen variable Drehmoment der Last (Phalangenbelastung) für die den Zeiträumen I—XII entsprechenden einzelnen Fingerstellungen in Bezug auf die beiden in

Betracht kommenden Gelenke, das Metacarpo-Phalangeal-Gelenk und das erste Interphalangealgelenk zu berechnen.

Sei in der nachstehenden Fig. 5 $a = RS$ der Abstand der Drehungsachsen der ersten und zweiten Phalange (konstruktive Länge der ersten Phalange), $b = TS$ der oben ermittelte Abstand des Angriffspunktes T der Phalangenbelastung von der Drehungsachse S des ersten Interphalangealgelenkes, α der irgendeiner Fingerstellung entsprechende Winkel zwischen Metacarpus und erster Phalange (s. Tab. VII) und $\gamma =$ dem in der Tabelle verzeichneten Winkel $(\beta + \delta)$ zwischen b und a , so ist für die Einheit der Belastung die Grösse der Drehmomente dargestellt

für Gelenk S durch die Strecke B ,

für Gelenk R durch die Strecke $A = B + C$.

Fig. 5.

Für die Bestimmung der Werte A , B und C ergeben sich nach vorstehender Konstruktion die Gleichungen:

$$C = a \cdot \sin (180 - \alpha) = a \cdot \sin \alpha,$$

$$B = b \cdot \cos (\alpha + \gamma - 270) = -b \cdot \sin (\alpha + \gamma),$$

$$A = C + B = a \cdot \sin \alpha - b \cdot \sin (\alpha + \gamma).$$

In der nachstehenden Tabelle VIII ist diese Berechnung für das Präparat A¹⁾, und zwar für die Bewegung unter dem Einflusse des Flexor sublimis und des Flexor profundus gesondert, durchgeführt.

Aus der Tabelle ist die Zunahme des Momentes der Last in Bezug auf die beiden Gelenke R und S bei der ergographischen Fingerbeugung gut ersichtlich. Diese Zunahme erfolgt für das Metacarpo-Phalangeal-Gelenk von der Lage I bis zur Lage XII etwa im Verhältnisse von 1 : 6, für das erste Interphalangealgelenk etwa im Verhältnisse von 1 : 2. Dabei verläuft die — bei dem Gleichbleiben der Belastung allein durch das Wachsen seines Armes bedingte —

1) $a = 53$, $b = 23$ mm (vgl. S. 331).

Grössenzunahme des Momentes der Last in der ersten Hälfte des Hubes sehr rasch, weiterhin immer langsamer. Das Moment S des Interphalangealgelenkes erreicht schon ungefähr in der Mitte des Hubes sein Maximum und nimmt von da an wieder ein wenig ab. Das Verhältniß der Drehmomente in Bezug auf die beiden Gelenke im Verlaufe des Hubes ist aus der untenstehenden Tab. IX zu ersehen.

Tabelle VIII.

Drehmomente der Last für Präparat A. Belastung 1¹⁾.

Zeitteil	Flexor sublimis		Flexor profundus	
	Mom. R	Mom. S	Mom. R	Mom. S
0	4,87	6,72	5,26	7,11
I	10,09	8,24	10,44	10,44
II	18,05	12,53	17,22	13,52
III	29,98	16,26	21,44	16,82
IV	37,36	18,37	34,03	20,31
V	46,05	21,17	38,07	22,58
VI	52,81	22,41	46,84	22,78
VII	57,76	22,99	52,77	21,61
VIII	59,97	22,50	55,08	21,01
IX	60,76	22,00	56,64	20,49
X	60,84	20,85	57,84	19,71
XI	61,09	20,49	58,45	19,07
XII	61,09	20,49	58,45	19,07

Tabelle IX.

Verhältniß $\frac{\text{Mom. } R}{\text{Mom. } S}$ für die Stellungen 0—XII. Präparat A.

Stellung (Zeitteil)	Mom. R : Mom. S	
	Fl. sublimis	Fl. profundus
0	0,72	0,74
I	1,22	1,00
II	1,44	1,27
III	1,84	1,27
IV	2,03	1,67
V	2,18	1,68
VI	2,35	2,05
VII	2,51	2,44
VIII	2,66	2,62
IX	2,76	2,76
X	2,91	2,93
XI	2,98	3,06
XII	2,98	3,06

1) Die Zahlen der Tabelle geben somit zugleich die Länge des „Armes der Last“ (in Millimetern) oder der Strecken A und B der Fig. 5 für die einzelnen Fingerstellungen an.

Für die Ausgangsstellung [mit voller Streckung der ersten und leichter Beugstellung der zweiten Phalange¹⁾] ist Moment S sogar etwas grösser als Moment R , alsbald aber wächst dieses bei zunehmender Fingerbeugung rascher als jenes, in nicht ganz gleichem Tempo unter dem Einflusse des einen oder des anderen Muskels; in der Hälfte des Hubes beträgt das Moment für das Metacarpo-Phalangeal-Gelenk R bereits etwa das Doppelte, am Ende des Hubes das Dreifache des Momentes für das Interphalangealgelenk S . Im ganzen unterscheiden sich die Momente für die Bewegung unter dem Einflusse beider Muskeln in jeder einzelnen Stellung nur wenig von einander: für die Bewegung unter dem Einflusse des Flexor profundus liegen beide etwas niedriger als für den Flexor sublimis.

Bezeichnen wir mit Q die den einzelnen Fingerstellungen I—XII beim ergographischen Hube entsprechenden Spannungen der Sehnen für die Phalangenbelastung 1, wie sie mittels der Fingerwage ermittelt worden und in Tab. IV (S. 320) zusammengestellt sind, so ist die Bedingung des Gleichgewichtes für jede einzelne Fingerstellung durch die Gleichheit der Momente von Kraft und Last ausgedrückt, also

$$\text{Mom. } R = Q \cdot x$$

$$\text{Mom. } S = Q \cdot y,$$

worin x und y den „Arm der Kraft“ für die Phalangenbelastung 1 und die jeweilige entsprechende Sehnenspannung Q bedeuten. Es ergibt sich somit aus den in Tab. IV und VIII verzeichneten Werten in Millimetern

$$x = \frac{\text{Mom. } R}{Q}$$

$$y = \frac{\text{Mom. } S}{Q}$$

Diese Werte sind für die Fingerstellungen I bis XII in der nachstehenden Tab. X zusammengestellt.

Wenn man sich erinnert, in welcher Weise die Werte von Q an einem Alkoholpräparate des Mittelfingers gewonnen worden sind²⁾, ferner die verhältnismässig rohen Messungsmethoden sowohl für die Winkelstellungen als auch für die konstruktiven Längen der Fingerhebelarme in Betracht zieht, wird man diesen Zahlen von vornherein wohl keinen anderen als einen beiläufigen und hauptsächlich

1) Vgl. die Winkel Tab. VII, Zeitteil 0.

2) Vgl. S. 319.

Tabelle X.

Arm der Kraft für die Stellungen I—XII. Präparat A.

Stellung (Zeitteil)	Flexor sublimis		Flexor profundus	
	Gelenk R	Gelenk S	Gelenk R	Gelenk S
I	6,7	5,5	14,9	14,9
II	8,2	5,7	15,6	12,3
III	9,6	5,2	17,9	14,0
IV	9,3	4,6	22,7(?)	13,5
V	11,5	5,3	13,6	8,1
VI	12,0	5,1	12,6	6,1
VII	13,1	5,2	13,2	5,4
VIII—X	13,7	5,0	14,1	5,1
XI	11,7	4,0	13,9	4,5
XII	11,7	4,0	12,7	4,1

relativen Wert zumessen können. In den resultierenden Werten für x und y des kleinen Hebelarmes der Kraft werden auch verhältnismässig kleine Fehler der vorausgegangenen Bestimmungen sehr merklich zum Ausdrucke kommen müssen. Unter dieser Einschränkung ergeben sich aus der vorstehenden Tabelle nur vier allgemeine Schlüsse in Bezug auf das Verhalten des „Armes der Kraft“ bei der Beugung des Fingers im ergographischen Hube:

A. Metacarpo-Phalangeal-Gelenk.

1. Beugung durch den Flexor sublimis: Zunahme des „Armes der Kraft“ im Verhältnisse von etwa 1 : 2.
2. Beugung durch den Flexor profundus: Vorübergehende Zunahme im ersten Drittel des Hubes (2 : 3?)¹⁾, sonst annähernd gleichbleibend.

B. Erstes Interphalangealgelenk.

3. Beugung durch den Flexor sublimis: Sehr angenähertes Gleichbleiben.
4. Beugung durch den Flexor profundus: Abnahme des „Armes der Kraft“, anfangs langsamer, später rascher bis auf etwa $\frac{1}{2}$ in der Hälfte, $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ am Ende des Hubes.

Von diesen Ergebnissen ist insbesondere das dritte insofern wertvoll, als es mit den genauen Bestimmungen von Treves²⁾ in guter

1) Der in Tabelle X mit (?) bezeichnete Wert ist auffällig hoch.

2) Z. Treves, Sur le moment de rotation du muscle fléchisseur superficiel du doigt médium relativement à l'articulation interphalangienne. Arch. Ital. de Biol. t. 38 p. 369. 1902.

Übereinstimmung steht. Treves führte seine Ermittlungen über das Drehmoment des Flexor sublimis in Bezug auf das erste Interphalangealgelenk unter Benutzung des Fick'schen Satzes aus, nach welchem die Geschwindigkeit der Verkürzung eines Muskels bei gleichförmiger Drehung des einen Knochens gegen den anderen direkt das Mass für die Grösse des von dem Muskel ausgeübten Drehungsmomentes abgibt¹⁾.

Treves hat in der angeführten Arbeit auch die anatomische Begründung für das Gleichbleiben des „Armes der Kraft“ des Flexor sublimis für das erste Interphalangealgelenk erbracht²⁾. Ähnliche Verhältnisse wie an diesem Gelenke und bezüglich des Verlaufes der Sehne des M. flexor sublimis bestehen aber allem Anscheine nach für beide Gelenke und für beide Muskelsehnen, die beim ergographischen Hube in Betracht kommen. Die Einscheidung der Sehnen in den Leitkanälen, die Straffheit der umgebenden Gewebe und die Wirkung des Luftdruckes, die schon Treves (unter Anführung Fusari's) hervorhebt, werden im Leben eine grössere Dislokation der Sehne in Bezug auf ihren senkrechten Abstand von der Drehungsachse des Gelenkes (Arm der Kraft) sehr erschweren oder ganz verhindern, insofern nicht durch die Form der Gelenkflächen und die Bewegung im Gelenke eine Verlagerung der Drehungsachse oder Verschiebung der Sehne gegen dieselbe erfolgt.

Am schlaffen Alkoholpräparate des enthäuteten Fingers freilich ist eine Dislokation der Sehnen viel leichter möglich; ja sie lässt sich beim Versuche an der Fingerwage sehr leicht ohne weiteres erkennen, namentlich gut bei stärkerer Beugung. Bei Wiederholung solcher Versuche dürfte sich daher wohl die Verwendung frischer, nicht enthäuteter Fingerpräparate empfehlen, um genauere Werte zu erhalten.

Für den einfachen Grenzfall des vollständigen Gleichbleibens des „Armes der Kraft“ während des ganzen ergographischen Hubes würde sich zwischen Belastung und Muskelspannung aus der Gleichheit der Momente für die einzelnen Fingerstellungen die einfache Beziehung ergeben: Die Muskelspannung wächst in demselben Masse wie der „Arm der Last“. Die grössere Veränderlichkeit des „Armes

1) Vgl. O Fischer, Über die Drehungsmomente ein- und mehrgelenkiger Muskeln. Arch. f. Anat. u. Entwicklungsgesch. Jahrg. 1894 S. 119 f.

2) l. c. S. 376 f.

der Kraft“, die sich in den Fällen 1, 2 und 4 (S. 336) ergeben hat, lässt es jedoch ziemlich zweifelhaft erscheinen, ob diese einfache Beziehung auch am lebenden Finger vollkommen hergestellt sein wird; viel wahrscheinlicher ist es, dass dieses Verhältnis nur mehr oder weniger angenähert bestehen wird. Dass es aber selbst in unseren am Alkoholpräparate gewonnenen Werten in mitbestimmender Weise enthalten ist, dafür spricht die unverkennbare allgemeine Ähnlichkeit des Verlaufes von auf Grund der Tabelle VIII (S. 334) entworfenen Kurven des Momentes der Last mit den Spannungskurven der Fig. 3 und 4 (S. 322 und 323). Gewisse Einzelheiten der letzteren fehlen freilich in jenen: wir haben diesen Einzelheiten von Anfang an weniger Wert beigemessen, da sie zum Teile durch die Ungenauigkeiten der Methode bedingt sein konnten.