(Aus der Medizinischen Universitätsklinik [Direktor: Prof. G. v. Bergmann]
und dem Institut für animalische Physiologie in Frankfurt a. M.
[Direktor: Geh.-Rat A. Bethe].)

Untersuchungen über die Muskelhärte.

Über Beziehungen zwischen Spannungsänderung und Änderung der Härte (der elastischen Eigenschaften) beim lebenden menschlichen Skelettmuskel.

Von

Dr. Friedrich Kauffmann,

Assistenzarzt der Klinik.

Mit 5 Textabbildungen.

(Eingegangen am 15. Juni 1922.)

Es ist eine alltägliche Erfahrung, auf die sich schon bei *Johannes Müller*¹⁾ ein Hinweis findet, daß unsere Muskeln bei manchen Formen ihrer Tätigkeit *härter* werden. *Eduard Weber*²⁾ hat bereits die Härte der Muskeln und ihre Beziehungen zu anderen Muskelzuständen näher analysiert. Den Untersuchungen von *J. v. Uexküll*³⁾ verdanken wir die Kenntnis, daß die Härte bei gleicher Last unabhängig ist von der jeweiligen Länge des Muskels, daß sie stets vielmehr der Größe der Last entspricht, welche an dem Muskel zieht. Allerdings gilt für diese Abhängigkeit die Voraussetzung, daß der Muskel nicht stärker innerviert wird, als zum Halten der Last gerade erforderlich ist. Beim Heben eines leichten Gewichtes wird der Biceps nicht so hart wie beim Halten einer schweren Last.

Klinische Untersuchungen, welche über die Härte der Muskeln und ihre Veränderlichkeit unter dem Einfluß der Belastung begonnen wurden, haben nicht nur zu dem Ergebnis geführt, daß die *Größe des Härtezuwachses* unter gleicher Belastung bei Individuen mit schlaffer Muskulatur beträchtlicher ist, als bei solchen mit straffen Muskeln, wie dies auch schon aus den Untersuchungen von *Noyons* und *v. Uexküll*⁴⁾ sowie *Sprin-*

¹⁾ *Joh. Müller*, Handbuch der Physiologie des Menschen **2**, 39. 1840. Auch *W. Harvey* spricht bereits von der „Härte“ der Muskeln. Die Bewegung des Herzens und des Blutes 1628. Klassiker der Medizin, Bd. I, S. 29.

²⁾ *Ed. Weber*, Muskelbewegung. Wagners Handb. der Physiologie. Braunschweig 1846. Bd. **3**. II. Abt. S. 54.

³⁾ *J. v. Uexküll*, Die Verdichtung der Muskeln. Zentralbl. f. Physiologie **22**, 33. 1909.

⁴⁾ *A. Noyons* und *J. v. Uexküll*, Die Härte der Muskeln. Zeitschr. f. Biol. **56**, 139. 1911.

ger¹⁾ hervorgeht, sondern es hat sich bei meinen Untersuchungen weiter ergeben, daß hinsichtlich der *Geschwindigkeit*, mit welcher die Änderung der Härte im Anschluß an die Belastung oder Entlastung eintritt, bei verschiedenen Individuen trotz gleicher äußerer Versuchsbedingungen große Differenzen bestehen. Von besonderem Interesse scheint dabei die Beobachtung zu sein, daß es gesunde Individuen gibt, bei denen die während der Belastung festgestellte Härte nach der Entlastung noch längere Zeit fast unverändert fortbesteht und daß viele Minuten (es wurden bis zu 10 Minuten und mehr beobachtet) vergehen können, bis nach der Entlastung die vor der Belastung gefundene Härte im Ruhezustand wieder erreicht worden ist. *Die Muskeln solcher Individuen scheinen im Anschluß an die physiologische Funktion des bewegungslosen Haltens in einem aktionslosen Zustand vermehrter Härte verharren zu können, der nicht zur Verkürzung führt*, in einem Zustand also, welcher demjenigen ähnlich sein dürfte, wie wir ihn unter pathologischen Verhältnissen in dem Krankheitsbilde der Katatonie oder bei manchen Formen des Parkinsonschen Symptomenkomplexes z. B. auch als Spätfolge der Encephalitis beobachten können. Man könnte geneigt sein, in dem geschilderten Verhalten der Muskeln den Ausdruck einer gewissen *Neigung zur Verhärtung oder Erstarrung* zu sehen und in diesem Sinne von einer *Verhärtungsbereitschaft* menschlicher Skelettmuskeln zu sprechen, die als um so größer zu bezeichnen sein wird, je längere Zeit vergeht, bis die Härte, welche dem Ruhezustand des Muskels entspricht, wieder erreicht ist. Ob diese Verhärtungsbereitschaft im Einzelfalle in gewissen Eigentümlichkeiten des reagierenden Muskelgewebes oder in besonderen Verhältnissen des nervösen Zentralorgans begründet ist, wird nur durch darauf gerichtete Untersuchungen entschieden werden können.

Wenn sich auch weiterhin bei meinen Versuchen ergeben hat, daß sowohl durch gewisse *äußere Einflüsse* (Kälteapplikation auf die Haut) als auch durch *innere Faktoren* (unzureichende Ernährung, Hunger) die Erschlaffung verzögert, die Verhärtungsbereitschaft gesteigert werden kann auch bei Individuen, welche normalerweise keine „Neigung zur Verhärtung“ in obigem Sinne zeigen, so dürften die Untersuchungen über die individuell verschiedene Reaktionsweise der Muskeln doch erst dann von allgemeinerem *klinischem* Interesse sein, wenn es gelungen sein wird, die bei der Bestimmung der Härte und ihrer Veränderlichkeit gewonnenen Resultate mit anderen Befunden oder mit anderen das betreffende Individuum charakterisierenden Reaktionen in Beziehung zu setzen. Daher möchte ich mich im folgenden auf die Erörterung einer Frage beschränken, die zunächst mehr *physiologisches* Interesse hat und zu welcher man bei physikalischer Betrachtungsweise der mir vorliegen-

¹⁾ R. Springer, Untersuchung über die Resistenz (die sog. Härte) menschlicher Muskeln. Zeitschr. f. Biol. 63, 201. 1914.

den Versuchsergebnisse im Anschluß an die kürzlich von *v. Kries*¹⁾ erschienenen „Bemerkungen zur Theorie der Muskeltätigkeit“ geführt werden dürfte. Es handelt sich dabei um die Frage nach den *Beziehungen zwischen zwei physikalisch faßbaren Zustandsänderungen der Muskeln*, der *Spannungsänderung* einerseits und der *Änderung der elastischen Eigenschaften* andererseits.

Zunächst seien einige *Versuche* als Beispiele mitgeteilt.

I. Untersuchungsmethode.

Die Härte des *M. biceps* wurde mit dem *ballistischen Elastometer* nach den Angaben von *M. Gildemeister*²⁾ bestimmt, wobei aus der sog. Stoßzeit auf die Eindrückbarkeit bzw. Härte oder Resistenz des Muskels geschlossen wird. Die Versuchsanordnung war die gleiche, wie sie bei *Gildemeister* und *Springer*³⁾ angegeben ist, so daß ich auf diese Arbeiten verweisen kann. Als Galvanometer wurde ein Drehspulspiegel-Galvanometer verwandt mit einer halben Schwingungsdauer von $\frac{1}{4}$ Minute.

Die Spannung des Akkumulators im Galvanometerstromkreis betrug stets 2,04 Volt.

Der Patient sitzt an einem Tisch, auf welchen er den im Ellbogengelenk rechtwinklig gebeugten Arm möglichst bequem und horizontal hinlegen kann. Von besonderer Wichtigkeit ist, daß der Pat. während des Versuches keine Bewegung im Ellbogengelenk ausführt, damit keine Veränderung der Länge des *M. biceps* eintritt. Da diese Bedingung bei den hier mitgeteilten Versuchen erfüllt wurde, handelt es sich also um eine *isometrische Beanspruchung* des Muskels. Das Handgelenk wird durch eine an einem Stativ angebrachte Tuschschlinge gestützt. In einer Entfernung von 22 cm vom Ellbogengelenk wird eine Schlinge um den Unterarm gelegt, von welcher eine Schnur horizontal über eine an der anderen Seite des Tisches befestigte Rolle verläuft. An dieser Schnur werden unterhalb der Rolle die als Belastung dienenden Gewichte angebracht.

Schon bei den ersten Messungen ergab sich die Notwendigkeit, daß die Spitze des Metallplättchens, welches auf dem Biceps am Oberarm befestigt wird, stets an gleicher Stelle und in gleicher Entfernung dem Hammer gegenübersteht. Schon eine geringe Verschiebung hat eine Änderung der Werte zur Folge. Um die gleiche Lage garantieren und stets kontrollieren zu können, brachte ich auf der Unterlage des Oberarmes eine einfache *Visiervorrichtung* an, indem ich senkrecht zur Fallrichtung des Hammers zwei dünne weiße Fäden über zwei senkrecht eingeschlagene Metallstäbe aufspannte. Die Spitze des konisch geschliffenen Metallplättchens mußte sich stets in der vertikalen Ebene befinden, welche durch die Fäden gegeben ist.

Die im Abstände von 22 cm vom Ellbogen am Unterarm angebrachte Last betrug in allen Fällen 1 kg. Bei allen untersuchten Patienten wurde anschließend der gleiche Versuch mit 2 kg angestellt. Da die individuellen Differenzen in der Reaktionsweise hauptsächlich bei den Versuchen mit 1 kg zum Ausdruck kommen, kann auf Wiedergabe der Versuche mit der stärkeren Belastung im allgemeinen

¹⁾ *v. Kries*, Bemerkungen zur Theorie der Muskeltätigkeit. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **190**, 66. 1921.

²⁾ *M. Gildemeister*, Über die sog. Härte tierischer Gewebe und ihre Messung. Zeitschr. f. Biol. **63**, 183. 1914.

³⁾ l. c.

verzichtet werden. Nur die Verzögerung der Erschlaffung trat nach der Belastung mit 2 kg in manchen Fällen deutlicher zutage.

Die an der Galvanometerskala abgelesenen Werte wurden unmittelbar in ein rechtwinkliges Koordinatensystem eingetragen, in welchem als Ordinaten die Skalenteile, als Abszissen die Zeiten verzeichnet wurden. Von einer Berechnung der absoluten Elastizitätswerte, wie dies nach den *Gildemeisterschen* Angaben möglich ist, wurde Abstand genommen, da es bei den Versuchen nur auf die Feststellung ankommt, ob und in welcher Weise die Härte des Muskels sich ändert. *Je höher die an der Skala abgelesenen Werte, um so länger die „Stoßzeit“, um so weicher der Muskel.*

Bei jedem Versuch wurde zunächst während mindestens 5 Minuten die Ruhehärtigkeit bestimmt, dann erfolgte die Belastung, welche bei einem Gewicht von 1 kg 10 Minuten, von 2 kg 5 Minuten dauerte; schließlich wiederum Bestimmung der Härte nach der Entlastung. Zwischen je zwei Messungen wurde immer die gleiche Pause von einer Minute eingeschaltet, die Belastung und Entlastung erfolgte stets in der Mitte zwischen zwei Ablesungen.

Es muß noch erwähnt werden, daß alle Versuche bei annähernd gleicher Zimmertemperatur angestellt worden sind. Der Raum war stets gut geheizt. Sie fanden ferner immer zur gleichen Tageszeit statt, und zwar in den Nachmittagsstunden zwischen 2 und 5 Uhr. Die untersuchten Individuen wurden auf die gleiche Weise mit der ausreichenden Krankenhauskost ernährt.

Gegenüber den Resultaten *Springers* erscheint es wichtig, hervorzuheben, daß alle Patienten in gut ausgeruhtem Zustand untersucht wurden, und daß sie ohne Ausnahme angaben, die Last von 1 kg ohne jede Mühe und Anstrengung während der Versuchsdauer von 10 Minuten gehalten zu haben. Auch wurde nach dem Versuch niemals über Müdigkeitsgefühl in dem rechten Arm geklagt.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die Belastung mit 1 kg in der Nähe des Handgelenks keineswegs einer Belastung des Biceps mit diesem Gewicht entspricht, vielmehr muß man den Hebelarm des Unterarms in Rechnung ziehen. Die am Biceps selbst angreifende Last läßt sich aber leicht berechnen: Nach den Angaben von *W. Braune* und *O. Fischer*¹⁾ beträgt der prozentuale Anteil des M. biceps an der Gesamtbeugekraft der Oberarmbeugemuskulatur bei rechtwinkliger Stellung des Ellbogengelenkes 30,7%; praktisch wird also von dem Biceps nur ein Drittel der Gesamtlast gehalten. Die Größe der auf den Biceps wirkenden Last läßt sich bei einem Angriffspunkt der Last in der Nähe des Handgelenks und einer Entfernung von 22 cm vom Ellbogengelenk dann nach den Angaben von *Parnas*²⁾ errechnen: sie betrug bei den Versuchen mit 1 kg 1,62 kg, mit 2 kg 3,24 kg.

II. Versuchsergebnisse.

Zunächst sei kurz erwähnt, daß in Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen von *Noyons* und *Uexküll*, *Gildemeister* und *Springer* festgestellt werden konnte, daß die *Ruhehärtigkeit* des Muskels *entscheidend* ist für die *Größe des Härtezuwachses*; ein schlaffer Muskel erfährt unter dem

¹⁾ *W. Braune* und *O. Fischer*, Die Rotationsmomente der Beugemuskeln im Ellbogengelenk des Menschen. Abhandl. d. math.-physik. Klasse d. Kgl. Sächs. Akad. der Wissensch. **15**, 245. 1890.

²⁾ *J. Parnas*, Energetik glatter Muskeln. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **134**, 441. 1910; s. auch *Fr. Franke*, Die Kraftkurve menschlicher Muskeln bei willkürlicher Innervation und die Frage der absoluten Muskelkraft. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **184**, 300. 1920.

Einfluß der gleichen Belastung eine größere Härtezunahme als ein vor der Belastung härterer, straffer Muskel. Diese Tatsache geht auch aus den folgenden, als Beispiele angeführten Kurven ohne weiteres hervor (s. Abb. 1—5). Ferner konnte bei Versuchen mit verschiedener Belastung des gleichen Muskels die ebenfalls bereits bekannte Tatsache bestätigt werden, daß zwischen dem von dem Muskel gehaltenen *Gewicht* und der dadurch hervorgerufenen *Muskelverhärtung keine einfachen Beziehungen* bestehen, insofern als doppelte Belastung keineswegs doppelte Härtezunahme zur Folge hat.

Im wesentlichen kommt es mir darauf an, die *Unterschiede* darzustellen, welche hinsichtlich der *Geschwindigkeit* der Härteänderung unter dem Einfluß der Belastung und Entlastung bei den Muskeln verschiedener Individuen zu bestehen scheinen.

Die bei den verschiedenen Individuen gewonnenen Kurven lassen sich nämlich in dieser Beziehung unmittelbar miteinander vergleichen, da alle Messungen im gleichen Zeitintervall erfolgten. Ich will aber nicht alle meine Versuche im einzelnen hier aufführen, darf mich vielmehr beschränken auf die Wiedergabe einzelner Versuchsergebnisse, welche geeignet erscheinen, die Unterschiede in der Reaktionsweise klar erkennen zu lassen, und nur Beispiele aus der großen Zahl der gewonnenen Kurven geben, welche gewissermaßen die beobachteten Extreme demonstrieren sollen. Dabei sei aber ausdrücklich betont, daß die erhaltenen Resultate *nicht etwa als einmalige Zufallsbefunde* der betreffenden Individuen gedeutet werden dürfen; denn da das Verhalten der Härte bei allen untersuchten Patienten mehrfach, d. h. mindestens an zwei verschiedenen Tagen unter den gleichen äußeren Versuchsbedingungen bestimmt wurde und sich weitgehende Übereinstimmung der Kurven hierbei ergab, scheint die Annahme gerechtfertigt zu sein, daß die *gefundene Reaktionsweise* als *für das betreffende Individuum charakteristisch* angesehen werden darf und daß daher die Unterschiede im zeitlichen Ablauf der Kurve auf *endogene Differenzen* zu beziehen sind.

Die Bezeichnung bestimmter Reaktionsformen als typisch für einzelne Individuen macht es erforderlich, darauf hinzuweisen, daß dies nur unter gewissen *Voraussetzungen* gestattet sein kann. Denn die Faktoren sind sehr zahlreich, welche nicht nur auf den jeweiligen Härtegrad der Skelettmuskeln, sondern auch auf die Geschwindigkeit der Härteänderung von Einfluß sind. Man muß auf *gleiche Temperatur des Untersuchungsraumes* achten, und ferner dürften ganz allgemein alle die Momente, welche den *physiologischen „Tonus“* der Muskeln regulieren, hier zu berücksichtigen sein. Da aber stets im warmen, abgedunkelten und ruhig gelegenen Zimmer gearbeitet und jede Reizeinwirkung auf den Patienten von außen her vermieden wurde, darf wohl angenommen werden, daß die Impulse von den Regulatoren des Tonus — Kleinhirn, Basalganglien, Vestibularapparat, vegetatives Nervensystem, Haut, Psyche — während der Dauer der Versuche sich nicht wesentlich änderten und daß daher die *festgestellte Änderung der Härte einzig und allein auf den Einfluß der Belastung bzw. Entlastung* zu beziehen ist. Es wurde auch

darauf geachtet, daß die *Körperhaltung* und besonders die *Kopfstellung* des untersuchten Individuums während der Versuchsdauer die gleiche blieb, da auch von den Halsmuskeln aus tonisierende Einflüsse zu den übrigen Körpermuskeln zu verlaufen scheinen [*Magnus und de Klein, Weiland*¹⁾].

Bei der Darstellung der Ergebnisse wollen wir den Einfluß der *Belastung*, welche den Versuchsbedingungen entsprechend primär eine *Spannungszunahme* des Muskels bedingt, und den Einfluß der *Entlastung*, an welche sich die *Erschlaffung* anschließt, auf die Härte der Muskeln gesondert besprechen. Dieses Vorgehen erscheint auch erlaubt im Hinblick auf die heutigen Anschauungen von dem Wesen der Muskel-tätigkeit, indem angenommen wird, daß die Erschlaffung nicht nur einen passiven Vorgang darstellt, sondern daß sie mit einem bestimmten, chemisch wohl charakterisierten Prozeß im Muskel verknüpft ist, den manche Autoren sogar als von besonderen nervösen Einflüssen abhängig denken.

Da die hier mitgeteilten Versuche ursprünglich ihren Ausgangspunkt nahmen von dem Studium gewisser *funktioneller Beziehungen zwischen Herzmuskel und Skelettmuskel*, so sei es gestattet, bei jedem Beispiel kurz auch einige Befunde des Kreislaufes anzuführen. Ich will mich hier auf die Mitteilung beschränken, daß bei *gesunden* Individuen schlaffe Skelettmuskulatur mit schlaffem Herzen²⁾ und niedrigem Blutdruck, straffe Skelettmuskeln mit straffem Herzen und einem Blutdruck an der oberen Grenze der Norm kombiniert zu sein scheint. Unter *pathologischen* Verhältnissen, z. B. nach längerer Krankheit, ist dieser Parallelismus nicht festzustellen, und es hat den Anschein, als ob der Herzmuskel seine Straffheit länger zu bewahren vermag als die Körpermuskulatur. Diese durch zahlreiche Beobachtungen gestützte Anschauung erinnert an die bekannte Tatsache, daß der Herzmuskel bei längerer Krankheit oder Unterernährung des Organismus sein Gewicht länger zu halten vermag als die Skelettmuskulatur.

A. Einfluß der Belastung.

Bei der großen *Mehrzahl* der untersuchten Individuen — die Versuche wurden ausschließlich an gesunden Männern und solchen, welche leichte Erkrankungen überstanden hatten, angestellt — hat der Muskel *bereits bei der ersten Messung, d. h. also $\frac{1}{2}$ Minute nach der Belastung, den endgültigen Härtegrad*, d. h. denjenigen, welcher der Last entspricht, erreicht und behält diesen während der ganzen Dauer der Belastung von 10 Minuten mit großer Konstanz bei. Ein Beispiel dieser Art ist in Abb. 1 wiedergegeben.

¹⁾ *Weiland*, Hals- und Labyrinthreflexe beim Kaninchen. Ihr Einfluß auf den Muskeltonus usw. Pflüg. Arch. f. d. ges. Physiol. **147**, 1. 1912.

²⁾ „Schlaffes Herz“ ist ein aus der Beobachtung der Formänderung der Herzsilhouette bei verschiedenem Zwerchfellstand vor dem Röntgenschirm abgeleiteter Begriff, welcher von *Pongs* und *Zehbe* in die Klinik eingeführt wurde. Ob aber tatsächlich die „Schlaffheit“ oder „Straffheit“ eines Herzens nur eine Funktion des Herzmuskels darstellt, dürfte noch nicht entschieden sein. (Vgl. auch *Dietlen*, Zentralbl. f. Herzkrankh. 1921, S. 315.)

Die Kurve stammt von einem 23jährigen gesunden Wachtmeister. Körpergröße 1,69 m, Körpergewicht 60,9 kg. Kräftige straffe Muskulatur. Umfang des rechten Oberarmes bei Streckung im Ellbogengelenk 25 cm, bei Beugung 29,5 cm; die als Kontraktionsverdickung der Oberarmmuskeln zu bezeichnende Differenz beträgt also 4,5 cm. Das Herz ist straff, die Pulsfrequenz in der Ruhe 60 Schläge, nach 12 Kniebeugen 96, 1 Minute später 72, 2 Minuten später 68 Schläge. Starke respiratorische Arrhythmie. Blutdruck 125/80 mm Quecksilber.

Abb. 1. Als Ordinate: Skalenteile des Galvanometers. Bei „1 kg“ Belastung, bei „E“ Entlastung. Die Änderung der Muskelhärte erfolgt prompt.

Abb. 2. Überschießen der Härte bei erstmaliger Untersuchung. Geringer „Härterückstand“ nach der Entlastung.

Abb. 2 zeigt eine ähnliche Reaktionsweise des Muskels. Die Härte des unbelasteten Muskels ist eine *geringere*, wie aus den höheren an der Galvanometerskala abgelesenen Werten hervorgeht, und daher hat die Belastung mit dem gleichen Gewicht von 1 kg einen größeren Härtezuwachs zur Folge als in dem vorigen Fall. Im übrigen sind in dieser Abb. 2 Kurven wiedergegeben, die an zwei verschiedenen Tagen bei dem gleichen Individuum gewonnen worden sind. Man erkennt die im allgemeinen gute Übereinstimmung der Werte; nur an einer Stelle ist eine wesentliche Differenz im Verlauf der Kurven wahrzunehmen: in der ausgezogenen Kurve ist nämlich bei der ersten Messung nach der Belastung die Härte erheblich *größer* als bei den folgenden Ablesungen. Dieses Überschießen der Härte habe ich nur bei der erstmaligen Untersuchung mancher Individuen beobachtet. Bei wiederholter Untersuchung wurde diese Erscheinung regelmäßig vermißt. So verhält es sich auch hier bei dem als Beispiel angeführten Versuch: die ausgezogene Kurve entspricht der erstmaligen Untersuchung, die gestrichelte ist 2 Tage später gewonnen worden.

Die Kurven in Abbildung 2 stammen von einem 26jährigen Schmied. Körpergewicht 62 kg bei einer Körpergröße von 1,68 m. Die Muskulatur ist kräftig ent-

wickelt, aber ziemlich schlaff. Der Umfang des rechten Oberarmes beträgt bei Streckung im rechten Ellbogengelenk 25,5 cm, bei Beugung desselben 31,2 cm, die Kontraktionsverdickung entspricht der Differenz von 7,5 cm. Das Herz ist schlaff. Die Pulsfrequenz beträgt 68, nach fünf Kniebeugen 92, 1 Minute später 64 Schläge. Der Blutdruck beträgt 100/50 mm Quecksilber.

Abb. 3. Verzögerte Zunahme der Muskelhärte nach der Belastung.

Das *Wesentliche* der bisher angeführten Beispiele ist darin gegeben, daß die *Änderung der Härte unter dem Einfluß der Belastung*

Abb. 4. Verzögerte Zunahme der Muskelhärte nach der Belastung sowie beträchtliche Verzögerung der Erschlaffung.

sehr rasch erfolgt, so daß schon bei der ersten Messung nach der Belastung die der Last entsprechende Härte, in einzelnen Fällen sogar eine größere Härte erreicht ist.

Bei einer *geringeren* Anzahl von Individuen wurde aber ein anderes Verhalten festgestellt, wie z. B. Abb. 3 zeigt. Bei diesem Individuum nimmt die *Härte des Muskels ganz allmählich* zu; erst bei der vierten Messung nach dem Anhängen des Gewichtes ist der endgültige Härtegrad erreicht. Gleiche Verhältnisse zeigen sich bei einem erheblich muskelstrafferen Individuum, dessen Kurve in Abb. 4 wiedergegeben wird: erst 2½ Minute nach der Belastung hat der Muskel die endgültige Härte erreicht, die er dann in den folgenden 7½ Minuten bis zur Entlastung beibehält. Das Charakteristische dieser Gruppe ist in folgendem zu sehen: *Obwohl der Muskel das Gewicht ohne Änderung seiner Länge hält, ändert sich die Härte des Muskels nur ganz allmählich*, und es vergehen mehrere Minuten, bis derjenige Härtegrad erreicht ist, welcher der Last entspricht.

Die beiden Kurven 3 und 4 stammen von hinsichtlich ihres *Körperbaues* sehr *differenten*, aber gesunden Individuen. Kurve 3 wurde bei einem 46jährigen Kellner gewonnen, dessen Körpergröße 1,60 m, dessen Körpergewicht 45,7 kg betrug. *Asthenischer Habitus Stillers*; sehr schlaffe Skelettmuskulatur, die nur schwach entwickelt ist. Umfang des Oberarmes bei Streckung im Ellbogen 21,5 cm, bei Beugung 24 cm. Die Kontraktionsverdickung beträgt also nur 2,5 cm. Das Herz ist klein und schlaff, die Pulsfrequenz 72, nach 12 Kniebeugen 96, nach 1 Minute 68, nach 2 Minuten 64 Schläge. Der Blutdruck beträgt 88/60 mm Quecksilber.

Demgegenüber ist der 46jährige Packer (Kurve 4) mit einer Körpergröße von 1,67 m und einem Körpergewicht von 66,1 kg als ein *sehr kräftiger Mann* zu bezeichnen. Sehr kräftig entwickelte Muskulatur mit einer Kontraktionsverdickung von 7 cm. Der Oberarmumfang beträgt bei Streckung im Ellbogengelenk 27,5 cm, bei Beugung 34,5 cm. Das Herz ist straff, die Pulsfrequenz beträgt 60, nach 12 Kniebeugen 92, 1 Minute später 84, 2 Minuten später ebenfalls 84 Schläge in der Minute. Blutdruck: 120/75 mm Quecksilber.

Wenn wir auf die *Geschwindigkeit* achten, mit welcher bei verschiedenen Individuen unter dem Einfluß gleicher *Belastung* die Verhärtung des Muskels eintritt, so sehen wir, daß *beträchtliche Unterschiede* bestehen. Bei der *Mehrzahl der untersuchten Patienten* wird die *endgültige Härte sehr rasch erreicht, in anderen, weniger zahlreichen Fällen* vergehen bis zu diesem Zeitpunkt *mehrere Minuten*.

B. Einfluß der Entlastung.

Hinsichtlich der *Geschwindigkeit*, mit welcher die *Änderung der Härte nach der Entlastung* erfolgt, bestehen ebenfalls große individuelle Unterschiede.

Bei der *Mehrzahl* der untersuchten Individuen wurde nach der Entlastung die vor der Belastung festgestellte Ruhehärte *sehr bald* wieder erreicht (vgl. Abb. 1, 2 und 3). Allerdings ist darauf hinzuweisen, daß häufig bei der ersten und zweiten Bestimmung nach der Entlastung noch ein wenig höhere Werte, als der Ruhehärte entsprechen, festgestellt wurden, wie dies z. B. in Abb. 2 der Fall ist. Diese geringe Vermehrung der Härte, welche vor der Rückkehr zum normalen Zustande in vielen Fällen gefunden wurde und die bereits von *Springer* beobachtet worden ist, mag als „*Härterückstand*“ bezeichnet werden.

In anderen Fällen zeigte sich der Muskel unmittelbar *nach der Entlastung weicher* als er vor der Belastung gefunden worden war; die Differenz betrug mehrfach 5 oder 6 Galvanometerteilstriche und mehr.

Gemeinsam ist diesen Reaktionsformen jedoch, daß die *Abnahme der Härte nach der Entlastung sehr rasch erfolgt*. Von einem kleinen Härterückstand abgesehen wurde bei der Mehrzahl der Individuen nach der Entlastung die Ruhehärte sehr rasch erreicht, häufig erwies sich der Muskel sogar weicher als zu Beginn des Versuches.

Ich bin geneigt, diese letztere Erscheinung nicht auf Ermüdung zurückzuführen, wie dies *Springer* nach Belastung mit erheblich schwereren Gewichten annimmt. Zwar konnte ich in anderen Versuchen nach stärkerer Anstrengung des

Muskels ebenfalls eine erhebliche Verminderung der Härte feststellen; bei diesen Versuchen aber dürfte die Last so gering sein, daß von einer Anstrengung des Muskels bei der Haltearbeit nicht die Rede sein kann. Ich glaube vielmehr, diese Erscheinung anders deuten zu müssen: Wenn man vielfach Bestimmungen der Muskelhärte an verschiedenen Individuen ausgeführt hat, so lernt man nach einiger Zeit vor dem Versuch durch Palpation die Härte der Muskeln abzuschätzen und anzugeben, welche Galvanometerwerte annähernd zu erwarten sind. Manchmal ist man dann jedoch erstaunt, eine beträchtlich größere Härte als die erwartete zu finden. In solchen Fällen sinkt dann aber die Muskelhärte nach der Entlastung auf niedrigere Werte ab, und es ergibt sich eine Härte, welche der erwarteten näher kommt. Diese Beobachtung scheint den Schluß zu gestatten, daß zum Mindesten bei einem Teil der Fälle die vor der Belastung gefundenen Werte *nicht der wirk-*

Abb. 5. Hochgradige Verzögerung der Erschlaffung.

lichen Ruhehärte entsprochen haben. Es erscheint vielmehr wahrscheinlicher, daß das Individuum unter dem Eindruck der ungewohnten Untersuchungsmethode zunächst den Muskel unwillkürlich angespannt hat. Dem Arzt am Krankenbett ist dieses unwillkürliche „Anspannen der Muskeln“ ja eine alltägliche Beobachtung.

Im Gegensatz dazu wurde eine Anzahl von Individuen untersucht, bei welchen die Rückkehr zur Ruhehärte nach der Entlastung nur *sehr langsam* stattfindet (Abb. 4 und 5).

In Abb. 4 wird z. B. erst bei der dritten Messung nach der Entlastung die Ruhehärte annähernd wieder erreicht. In Abb. 5 vergehen nach dem Halten von 1 kg $4\frac{1}{2}$, nach dem Halten von 2 kg $8\frac{1}{2}$ Minuten, bis das Galvanometer die gleichen Ausschläge zeigt wie vor der Belastung. Dieser langdauernde Zustand *vermehrter Härte*, welcher ohne den Willen des Patienten und ohne daß er dem Patienten zum Bewußtsein kommt, fortbesteht und sehr viel höhere Grade erreicht als die oben als „Härterückstand“ bezeichnete Erscheinung, findet sich also noch zu einer Zeit, wo die Last nicht mehr an dem Muskel zieht und dauert an, ohne daß er eine Änderung der Muskellänge zur Folge hätte.

Ich habe bisher auch 3 Individuen beobachtet, bei denen die Erschlaffung des M. biceps noch langsamer stattfand, als etwa durch Abb. 5 veranschaulicht wird. Bei diesen Patienten konnte festgestellt werden, daß der Zustand vermehrter Härte sofort beendet werden kann, wenn der Unterarm ein wenig auf der Unterlage im Sinne einer leichten Beugung oder Streckung im Ellbogengelenk bewegt wird. Diese Beobachtung erinnert an eine Angabe *Bethes*¹⁾: Wenn man belastete Muschel-muskeln bei geringer Öffnung der Schalen durch vorsichtiges Hochheben des Gewichtes entlastet, ohne daß eine Erschütterung der Muschel eintritt, so schließt sich die Schale häufig nur ganz langsam im Laufe einiger Minuten oder überhaupt nicht spontan, sondern erst auf einen äußeren Reiz; in diesem Falle sehr schnell und wohl mit Hilfe des quergestreiften Muskels. Ich kann nun freilich nicht behaupten, daß bei den von mir beobachteten Fällen von starker Verzögerung der Erschlaffung die Entlastung in anderer, etwa zögernderer Weise als sonst erfolgt wäre.

Auch hinsichtlich der *Geschwindigkeit*, mit welcher die *Erschlaffung* des M. biceps nach der Entlastung erfolgt, lassen sich also große Unterschiede bei verschiedenen Individuen feststellen: *Bei der Mehrzahl* kehrt der Muskel *sehr rasch* zum normalen Zustand zurück, in *seelteneren Fällen* bleibt ein nicht zu Verkürzung führender Zustand vermehrter Härte nach der Entlastung für längere Zeit bestehen. Es kann viele Minuten währen, bis die vor der Belastung für die Härte des Muskels ermittelten Werte wieder an der Galvanometerskala angezeigt werden. In diesen Fällen könnte man von einer gewissen „*Neigung zur Verhärtung*“ bzw. „*Verhärtungsbereitschaft*“ reden, da die Muskeln nach dem gleichen Reiz sehr viel länger im Zustand vermehrter Härte verharren als bei anderen Individuen.

III. Diskussion der Versuchsergebnisse bei physikalischer Betrachtungsweise.

Wenn wir der Besprechung der mitgeteilten Versuche eine *physikalische Betrachtungsweise* zugrunde legen, so werden wir davon auszugehen haben, daß entsprechend der Versuchsanordnung zwei physikalisch faßbare Veränderungen des Muskels unter dem Einfluß der Belastung eintreten: wir haben einerseits eine *Änderung der Spannung* und andererseits eine *Änderung der Härte* des Muskels festzustellen.

Schon hier scheint es zweckmäßig zu sein, darauf hinzuweisen, daß es sich bei *Spannung und Härte* um zwei verschiedene Erscheinungen der Muskeltätigkeit handelt, die allerdings, wie schon *Eduard Weber*²⁾ festgestellt hat, vielfach miteinander verwechselt worden sind. In dem kleinen Kapitel, welches er der Härte der Muskeln gewidmet hat, hat *Weber* auch bereits den Zusammenhang der Härte mit anderen Zuständen der Muskeln genauer analysiert und sagt z. B. von den Be-

¹⁾ A. Bethe, Die Dauerverkürzung der Muskeln. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **142**, 308. 1911.

²⁾ A. a. O. S. 54.

ziehungen derselben zur Spannung: „Man hat vielfach Härte und Spannung der Muskeln verwechselt, welche in ihrer Erscheinung manche Ähnlichkeit haben. *Härte* und *Weichheit* sind *innere Eigenschaften* der Körper, die *Spannung* dagegen hängt von der Einwirkung *äußerer Kräfte* ab. Die Spannung ist stets nur dem Widerstand gleich, welche die Verkürzung der Muskeln zu verhindern strebt.“ Es erscheint wichtig, festzustellen, daß also schon bei *Eduard Weber* die Anschauung gegeben ist, daß *Härte und Spannung der Muskeln nichts unmittelbar miteinander zu tun haben*. Wie *Weber* sich den Zusammenhang im einzelnen vorstellt, geht aus seinen Ausführungen nicht eindeutig hervor.

Nun handelt es sich aber, wenn wir *Gildemeister* und physikalischem Sprachgebrauch folgen, bei derjenigen Beschaffenheit der Muskeln, welche wir schlechthin als *Härte* zu bezeichnen pflegen, in Wahrheit um *elastische Eigenschaften*. Wir messen in der Härte den elastischen Widerstand, welchen die Muskeln einer Deformation entgegensetzen. Wenn daher in den mitgeteilten Versuchen die Härte des *M. biceps* unter verschiedenen Bedingungen bestimmt wurde, so sagen die Resultate etwas aus über die Veränderungen, welche die Elastizität des Muskels unter dem Einfluß der veränderten Bedingungen, d. h. im wesentlichen Spannungsänderungen, erfahren hat.

Da nun die Bestimmung der Härte, d. h. also des elastischen Zustandes vor und im Anschluß an die Belastung und Entlastung des Muskels in gleichmäßigen, bekannten Zeitabständen erfolgte, so dürften die Resultate Aufschluß geben können, nicht nur über den *Grad der Elastizitätsänderung*, sondern auch über die *Geschwindigkeit*, mit welcher dieselbe im einzelnen Falle eingetreten ist. Daher wird es auf Grund der vorliegenden Untersuchungen möglich sein, auf die *zeitlichen Beziehungen* einzugehen, welche *zwischen Spannungsänderung und Änderung der elastischen Eigenschaften beim lebenden, den physiologischen Impulsen des nervösen Zentralorgans und physiologischen Arbeitsbedingungen unterworfenen menschlichen Skelettmuskel* anzunehmen sind.

Damit berühren wir eine Frage der Muskelphysiologie, die heute keineswegs als geklärt anzusehen ist. Die Physiologen haben — mit anderen Methoden — ihre messenden Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften des Skelettmuskels fast ausschließlich an *isolierten* Muskeln, d. h. solchen, die nicht mehr in Verbindung mit dem nervösen Zentralorgan stehen, angestellt und ihren Schlußfolgerungen Beobachtungen über die Dehnbarkeit des belasteten Muskels und über die Verkürzung nach stattgefundener Entlastung zugrunde gelegt. Wie weit man ihre auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse auf die im Organismus tätigen Muskeln übertragen darf, muß fraglich erscheinen; denn gegenüber ihrer Versuchsanordnung dürfte ein Einwand zu Recht bestehen, der sich aus Vorstellungen ableiten läßt, die am klarsten *J. von*

*Uexküll*¹⁾ zum Ausdruck gebracht hat, daß nämlich „*der Muskel allein kein selbständiges Organ des Körpers ist; immer gehört zu ihm mindestens ein zentrifugaler Nerv und ein nervöses Zentrum, welches die Muskelfasern im Zentralnervensystem vertritt*“. Soweit andererseits Untersuchungen über physikalische Zustandsänderungen, speziell die Änderung der elastischen Eigenschaften, welche unsere Muskeln bei ihrer Tätigkeit im Organismus erleiden, vorhanden sind, liegen diesen keine genaueren Messungen zugrunde, und daher konnten sie zur Beantwortung der oben aufgeworfenen Frage nicht geeignet sein. Nachdem aber in der *Gildemeisterschen* Methode ein Verfahren gegeben ist, die Elastizität des lebenden Muskels in jedem Augenblick seiner physiologischen Tätigkeit zu bestimmen und bei diesen Bestimmungen die zeitlichen Verhältnisse berücksichtigt werden können, dürften uns Untersuchungen wie die vorliegenden in Stand setzen, zu dem aufgeworfenen Problem Stellung zu nehmen.

Die elastischen Funktionen spielen im Rahmen der Gesamtmuskelleistung bei verschiedenen Muskeln eine sehr verschiedene Rolle: die Dauerspannung der *glatten Schließmuskeln* mancher Muscheln, welche, wie *v. Uexküll* gezeigt hat, ohne jede Dauererregung oder andere Einwirkung von seiten des Zentralnervensystems andauernd fortbesteht, kann überhaupt nur *rein elastischer Natur* sein. Bei diesen Muschelmuskeln, die man auch als „*Tonusmuskeln*“ bezeichnet hat, steht der aktionslose Zustand der elastischen Verkürzung bzw. Spannung so sehr im Vordergrund ihrer Tätigkeit, daß *Schmiedeberg*²⁾ für sie geradezu die Bezeichnung „*elastische Muskeln*“ vorgeschlagen hat. Die elastische Verkürzung, bzw. der elastische Spannungszustand scheint bei diesen Muskeln ohne gesteigerten Sauerstoffverbrauch, ohne Wärmebildung und ohne Aktionsstrom zu bestehen, und es kommt nicht zur Ermüdung. *Bethe*³⁾ charakterisiert die Eigenschaften der Schließmuskeln unter ausdrücklicher Betonung, daß dies nicht etwa für alle glatten Muskeln in gleicher Weise Gültigkeit hat, indem er sagt: „Im Vergleich zum quergestreiften Muskel erscheint der *glatte Tonusmuskel* tatsächlich nicht viel anders, als ein *toter elastischer Strang* oder als ein Bündel von Bindegewebe, nur daß er die Fähigkeit besitzt, seine Länge zu ändern.“

Bei dem *quergestreiften Muskel* ist die Bedeutung der elastischen Funktion nicht in so eindeutiger Weise erkennbar. *Fick* hatte bereits die Möglichkeit erwogen, ob nicht auch diese gegen größere Kräfte ver-

¹⁾ *J. v. Uexküll*, Umwelt und Innenwelt der Tiere. J. Springer, Berlin 1921. S. 48.

²⁾ *O. Schmiedeberg*, Über elastische Verkürzung und aktive Erschlaffung lebender Muskeln. Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmakol. **82**, 159. 1918.

³⁾ *A. Bethe*, Die Dauerverkürzung der Muskeln. Pflüg. Arch. f. d. ges. Physiol. **142**, 291.

kürzt bleiben könnten, ohne in höherem Maße „Arbeit“ zu leisten; doch hat *Fick* diese Hypothese wieder aufgegeben. Später hat *Bethe* im Anschluß an seine Untersuchungen an glatten Muskeln die ursprüngliche Vermutung von *Fick* wieder aufgegriffen, indem er die Möglichkeit erwägt, ob nicht wenigstens unter gewissen Bedingungen auch der quergestreifte Muskel ohne zu ermüden d. h. also rein dank seiner elastischen Eigenschaften gegen erhebliche Kräfte in verkürztem Zustand verharren könne. Indem ich absehe von den zahlreichen Untersuchungen, welche später mit verschiedenen Methoden funktionelle Ähnlichkeiten zwischen quergestreiften und gewissen glatten Muskeln nachzuweisen suchten, will ich nur auf die Experimente *Sherringtons*¹⁾ am Vastocruureus der Katze hinweisen; denn aus diesen Versuchen geht hervor, daß *beim quergestreiften Skelettmuskel* tatsächlich unter Umständen ein Zustand bestehen kann, welcher durch eine *völlige Änderung der elastischen Eigenschaften* ausgezeichnet ist. Nach Abtrennung des Vorderhirns vom Hirnstamm beobachten wir nämlich eine ausgesprochene Steifigkeit und Starre der Skelettmuskulatur. Untersucht man einen solchen Muskel genauer, so ergibt sich folgendes: wird der Muskel passiv gedehnt, so verharrt er in der erreichten Länge; werden umgekehrt die Insertionspunkte passiv einander genähert, so bleibt auch dieser Verkürzungszustand unverändert bestehen. Aus solchem Verhalten geht hervor, daß es sich bei der sog. Enthirnungsstarre der quergestreiften Muskeln um einen Zustand handelt, welcher nicht zu Verkürzung führt, sondern nur eine Änderung der elastischen Eigenschaften darstellt. Der Muskel besitzt, wie dies für die glatten Muskeln als charakteristisch gilt, keine bestimmte Ruhelänge, und an eine Verkürzung schließt sich nicht unmittelbar und zwangsläufig die Rückkehr zur alten Länge an. Vom *physikalischen Standpunkt* aus würden wir einem solchen Muskel eine *hohe, aber unvollkommene Elastizität* zuschreiben müssen.

Nun geht freilich der Zustand der Enthirnungsstarre mit oscillatorischen Aktionsströmen einher (*Einthoven*). Wir vermissen also jene Ruhe der Saite, welche bisher fast allgemein für die zur Rede stehenden Zustände postuliert worden ist. Im Hinblick auf neuere Arbeiten anderer Autoren wird man sich aber fragen müssen, ob das Verhalten der Aktionsströme überhaupt als ein Kriterium bestimmter Zustände bei quergestreiften Muskeln gelten kann, zumal die Frage nicht unberechtigt erscheint, ob die übliche Auffassung vom Wesen der Muskelaktionsströme den Verhältnissen der Wirklichkeit genügend entspricht. Untersuchungen über den Sauerstoffverbrauch scheinen in unserem Zusammenhang vorläufig wichtiger zu sein und es mag daher auf

¹⁾ Zit. nach *Noyons* und *v. Uexküll* l. c., S. 154.

Untersuchungen Roafs¹⁾ verwiesen werden, welcher zeigen konnte, daß der Zustand der *Enthirnungsstarre* (wie die Dauerverkürzung der „elastischen Muskeln“) *ohne Steigerung des Stoffwechsels* besteht.

Es ist das Verdienst *E. Franks*, darauf aufmerksam gemacht zu haben, daß ähnliche Muskelzustände uns *bei manchen Krankheitsbildern* entgegentreten. Bei den eingangs bereits erwähnten Krankheitszuständen besteht nämlich ebenfalls eine ausgesprochene Rigidität der Muskeln, die Extremitäten setzen jeder Stellungsänderung einen auffallend starken Widerstand entgegen. Andererseits verharren die Glieder in jeder Lage, die man ihnen passiv erteilt. Wir haben die *gleichen physikalischen Verhältnisse hoher, aber unvollkommener Elastizität* der Muskeln vor uns. Und auch bei solchen Kranken mit gleichmäßig wächsernem Widerstand, hochgradigster Starre und Spasmen der Muskulatur konnte *Grafe*²⁾ keine Steigerung des Stoffwechsels im Respirationsversuch feststellen.

Die Bilder der Enthirnungsstarre und der erwähnten Krankheitszustände sind es, welche darauf hinweisen, daß wir wenigstens für *pathologische* Verhältnisse eine Veränderung der quergestreiften Muskeln anzunehmen haben, die zunächst keineswegs die Contractilität in Mitleidenenschaft zieht, die vielmehr im wesentlichen in einer Änderung der elastischen Eigenschaften besteht. Mag es daher berechtigt sein, unter solchen krankhaften Bedingungen streng zwischen jenen beiden Zustandsänderungen, der Verkürzung, bzw. Spannungsänderung und der Änderung der elastischen Eigenschaften zu unterscheiden, so ist damit a priori nichts ausgesagt darüber, wie weit etwa analoge Verhältnisse auch für den *gesunden* Skelettmuskel anzunehmen sind.

Freilich gibt es Autoren, welche sich vorstellen (z. B. *E. Frank*), daß ganz allgemein der quergestreifte Muskel im innervierten Zustand nicht nur die Fähigkeit der Verkürzung bzw. Spannungsänderung besitzt, sondern daß er auch ein sog. *plastisches Gebilde* (*Sherrington*) darstellt, eine festweiche, etwa dem Ton oder Wachs vergleichbare Masse, die auseinandergezogen oder zusammengepreßt werden kann. Bei der Analyse gewisser Muskelzustände aber hat *Frank*, worauf auch *v. Kries* hinweist, besonders in früheren Arbeiten diese beiden Zustandsänderungen nicht so scharf auseinandergehalten, wie es den von ihm entwickelten Anschauungen entsprochen hätte, indem nämlich „Steifigkeit und Starre“ als die höheren Grade einer „Neigung zu anhaltender Verkürzung“ hingestellt werden³⁾. Eine strengere Trennung von Contractilität und

¹⁾ Journ. of exp. Phys. 5, 31. 1912.

²⁾ *E. Grafe*, Zur Kenntnis des Muskeltonus. Dtsch. Arch. f. klin. Med. 139, 155. 1922.

³⁾ *E. Frank*, Die parasymphatische Innervation der quergestreiften Muskulatur und ihre klinische Bedeutung. Berl. klin. Wochenschr. 1920, Nr. 31, S. 725.

Elastizität auch für den quergestreiften Muskel findet sich dagegen bei *Schmiedeberg*¹⁾ durchgeführt, welcher sich auf die pharmakologischen Untersuchungen von *E. Meyer* und *Weiler*²⁾ am tetanusstarren Muskel, sowie die Versuche *Weilers*³⁾ am Herzmuskel und seine Beeinflussung durch Cocain und Digitalin bezieht. *Weiler selbst* charakterisiert die Wirkungsweise des Cocains, indem er hervorhebt, daß dieses Gift *ausschließlich den elastischen Zustand* des Herzmuskels herabsetzt, während *Erregbarkeit* und *Contractilität* jedenfalls zunächst *nicht beeinflußt* werden.

Wenn es auch nach den heutigen Vorstellungen von dem Wesen pathologischer Zustände nicht unberechtigt erscheinen dürfte, die am pathologischen Objekt gewonnenen Vorstellungen zu verallgemeinern, da dieses niemals etwas prinzipiell Neues, vielfach aber gleichsam die Übertreibung physiologischer Verhältnisse darstellt, so wird es doch immer wünschenswert bleiben, die Gültigkeit dieser Vorstellungen für physiologische Bedingungen *nachzuweisen*. Untersuchungen mit physikalischen Methoden darüber, ob etwa auch für den gesunden, im Organismus tätigen Skelettmuskel eine strenge *Trennung von Contractilität und Elastizität* *berechtigt und erforderlich* ist und vor allem, ob überhaupt beim menschlichen, den physiologischen Impulsen des Zentralnervensystems unterworfenen Skelettmuskel eine isolierte Änderung der elastischen Eigenschaften beobachtet werden kann, sowie über die *Bedingungen*, unter welchen eine solche Zustandsänderung eintreten könnte, liegen bisher so gut wie gar nicht vor.

Von Untersuchungen am lebenden Menschen scheinen diejenigen von *Rieger*⁴⁾ aus dem Jahre 1906 am bedeutsamsten zu sein. *Rieger* schloß auf die elastischen Eigenschaften der Muskeln aus der Verlängerung und Verkürzung, welche die Oberschenkelstrecker unter dem Einfluß verschiedener, am Unterschenkel angebrachter Belastung erfahren, und verglich die Bewegungen des Unterschenkels nach Verstärkung und Verminderung der Last mit den Ausschlägen eines skellettierten Beines, bei welchem die Oberschenkelstreckmuskulatur durch ein Gummiband nachgeahmt wurde. Es zeigte sich, daß, wenn bei beiden Objekten die gleiche Änderung der Belastung an den Unterschenkeln vorgenommen wurde, das Gummiband z. B. auf die erste Gewichtszunahme am stärksten nachgab, um dann immer weniger nachgiebig zu werden. Die lebenden Muskeln aber verhalten sich gerade umgekehrt; sie werden nämlich z. B. durch die erste Belastung viel weniger gedehnt als durch die folgenden. Diese Eigenschaft der lebenden Muskeln wird als *Bremmung* bezeichnet; sie macht sich immer dann geltend, wenn man ein Glied, das man bisher in einer Richtung bewegt hatte, durch Umkehr der Belastungsrichtung in der

¹⁾ *O. Schmiedeberg*, Über elastische Verkürzung und aktive Erschlaffung lebender Muskeln. Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmacol. **82**, 159. 1918.

²⁾ *E. Meyer* und *L. Weiler*, Über Muskelstarre und Koordinationsstörung bei Tetanus. Münch. med. Wochenschr. 1916, Nr. 43, S. 1525.

³⁾ *L. Weiler*, Untersuchung über den Einfluß des Cocains auf den Herzmuskel des Frosches und auf eine besondere Art von Muskelstarre nach Wundtetanus. Arch. f. exp. Pathol. u. Pharmacol. **80**, 131. 1916.

⁴⁾ *K. Rieger*, Untersuchungen über Muskelzustände. Begrüßungsschrift zum 2. Kongreß f. exp. Psychol. Jena 1906.

anderen Richtung dreht. Bei den ausgedehnten Untersuchungen *Riegers* ergab sich nun, daß es eine Minorität von Individuen gibt, deren Muskeln sich durch besonders gute Bremsfähigkeit, also hohe Elastizität, auszeichneten. Es ist interessant, daß *Rieger* bereits auf die möglicherweise bestehende Analogie zwischen dem Verhalten der Muskeln bei den sog. „guten Bremsern“ und den Muskeln der Katatoniker hinweist. „Haben diese extremen Bremsen andere Muskeln?“ oder „gehen aus ihren Nerven andere Wirkungen als bei der Majorität der Menschen hervor?“ das sind die Fragen, die sich auch *Rieger* bereits vorgelegt hat. Wenn er auch zu einer endgültigen Entscheidung nicht gelangt ist, so scheint doch aus seinen Ausführungen hervorzugehen, daß er an einen *nervösen Ursprung der Bremsung* glaubt.

Die Fragen, welche sich demnach bei physikalischer Betrachtungsweise in diesem Zusammenhang erheben, hat *v. Kries* kürzlich in seinen Bemerkungen zur Theorie der Muskeltätigkeit folgendermaßen zusammengefaßt: Haben wir dem Skelettmuskel neben der uns geläufigen Tätigkeitsform der Verkürzungs- und Spannungsänderung noch die Fähigkeit zu einer anderen, grundsätzlich von dieser verschiedenen, etwa als „*Versteifung*“ zu bezeichnenden Zustandsänderung zuzuschreiben, deren Wesen in einer Änderung der elastischen Eigenschaften gegeben ist? Und weiter: Welchen Zusammenhang bzw. welche *Beziehungen* werden wir zwischen Spannungsänderung und Änderung der elastischen Eigenschaften anzunehmen haben?

Wenn wir unsere Ergebnisse darauf prüfen, wie weit sie etwa geeignet sind, zu dieser Frage einen Beitrag zu liefern, so werden wir davon ausgehen können, daß es sich entsprechend der Versuchsanordnung um eine *isometrische* Beanspruchung des *M. biceps* handelt. Die Beugung im Ellbogengelenk und somit die Länge des Muskels war stets während der ganzen Dauer des Versuches die gleiche. Da wir nun annehmen dürfen, daß die Belastung praktisch momentan in ganzer Stärke auf den Muskel einwirkt, so dürfte die Spannungszunahme mit ähnlicher Geschwindigkeit erfolgen wie bei der isometrischen Zuckung des ausgeschnittenen Skelettmuskels. *Fick* zeigte, daß der Muskel bei gleichbleibender Länge das Maximum der Spannung früher erreicht als etwa bei gleichbleibender Spannung das Maximum der Verkürzung erzielt wird. Dabei handelt es sich bis zum Eintritt der maximalen Spannung um Bruchteile einer Sekunde. Von den Verhältnissen der isometrischen Zuckung unterscheidet sich unsere Versuchsanordnung nur insofern, als sich an die Spannungszunahme nicht unmittelbar die Erschlaffung anschließt; vielmehr kommt es zu einer *Dauerspannung* oder *statischen Kontraktion*. Wir werden annehmen dürfen, daß auch bei den mitgeteilten Versuchen die für das betreffende Gewicht maximale, d. h. die zur Erhaltung des Gleichgewichts mit der Last erforderliche aktive *Spannung des Muskels* praktisch *unmittelbar nach der Belastung* erreicht ist.

Beim Halten einer Last am gebeugten Unterarm sind freilich alle 5 Beugemuskeln beteiligt, und der Anteil des *Biceps* beträgt daher nur einen Bruchteil

der Gesamtleistung [bei rechtwinkliger Stellung des Ellbogengelenkes nach W. Braune und O. Fische.¹⁾ im Durchschnitt 30,7%]. Von vornherein muß daher mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß bei einzelnen Individuen der Biceps verhältnismäßig mehr oder weniger beansprucht wird als diesen Verhältnissen entspricht. Da aber wohl angenommen werden darf, daß die Verteilung der Last auf die einzelnen Muskeln unmittelbar nach der Belastung erfolgt und während der Dauer des Haltens der Last keine Änderung erfährt, so dürfte der jeweilige Anteil des Biceps an der Gesamtleistung in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung sein, wofern nur die Voraussetzung zu Recht besteht, daß, wie bei jedem der einzelnen Muskeln, so auch beim Biceps das Maximum der seinem Anteil am Halten der Last entsprechenden aktiven Spannung unmittelbar nach der Belastung erreicht worden ist.

Anders steht es mit den elastischen Eigenschaften, wie sie in der jeweiligen Härte des Muskels zum Ausdruck kommen. Schon die bloße Betrachtung der Kurven zeigt ohne weiteres, daß die Änderung der elastischen Eigenschaften mit sehr verschiedener Geschwindigkeit eintritt und in manchen Versuchen nur sehr langsam vonstatten geht, so daß also *Spannungsänderungen und Änderung der Elastizität keineswegs immer parallel gehen dürften*.

Im einzelnen ergibt sich aus den Versuchen folgendes: Bei der *Mehrzahl der Individuen ändert sich der elastische Zustand sehr rasch* sowohl unter dem Einfluß der Belastung als auch unter dem der Entlastung, so daß schon bei der ersten Messung nach der Belastung die entsprechende Elastizitätsänderung stattgefunden hat und sich an die Entlastung ebenso prompt die Rückkehr zur früheren Elastizität anschließt. Dabei scheint es hier von untergeordneter Bedeutung zu sein, daß in vielen Fällen nach der Entlastung ein etwa als *Härterückstand* zu bezeichnender Zustand *wenig* erhöhter Elastizität (Abb. 2) zurückzubleiben pflegt, der nie so hohe Grade erreicht wie die für andere Muskeln als charakteristisch beschriebene *hochgradige* Verzögerung der Erschlaffung (Abb. 4 und 5). Auch die Beobachtung, daß in einzelnen Fällen die Elastizität des Muskels unmittelbar nach der Belastung höher gefunden wurde als bei den folgenden Messungen sowie die Tatsache, daß in anderen Fällen die Elastizität nach der Entlastung auf niedrigere Werte absinken kann als vor der Belastung verzeichnet wurden, dürfte in diesem Zusammenhang von geringerem Interesse sein. Hier kommt es nur auf die im Rahmen unserer Versuchsanordnung gültige Feststellung an, daß es eine Mehrzahl von Individuen gibt, bei welchen die Beobachtung, daß die Änderung der Elastizität sehr prompt der veränderten Spannung folgt, auf *enge Beziehungen dieser beiden Zustandsänderungen* hinweisen könnte.

Im Gegensatz dazu zeigen Beobachtungen an einer *Minorität der Individuen*, daß von *so engen Beziehungen nicht immer die Rede sein*

¹⁾ A. a. O.

kann. Wir sehen, daß es Muskeln gibt, deren elastischer Zustand unter sonst gleichen Bedingungen sich nur sehr langsam ändert. Mehrere Minuten können vergehen, bis der endgültige Elastizitätszustand nach der Belastung erreicht ist, und bei der Erschlaffung konnten analoge Verhältnisse beobachtet werden, indem manche Muskeln nach der Entlastung nur sehr langsam ihre frühere Elastizität wieder erlangen. Dabei muß man sich vergegenwärtigen, daß der Zustand erhöhter Elastizität bestehen bleibt, *obwohl die Last nicht mehr an dem Muskel zieht* und somit eine aktive Spannung nicht mehr vorhanden ist. Würde eine Spannung, welche einer geringeren Muskellänge entspricht, bestehen, so wäre zu erwarten, daß eine Verkürzung des Muskels und somit eine Beugung im Ellbogengelenk eintreten würde. Dies ist aber keineswegs der Fall.

Ein Parallelismus zwischen verzögerter Elastizitätszunahme und verlangsamter Elastizitätsabnahme bei dem gleichen Muskel besteht nicht. Denn diejenigen Individuen, deren Muskel nur langsam hart wird, zeigen durchaus nicht in allen Fällen eine Verzögerung der Erschlaffung oder umgekehrt.

Die Beobachtungen an dieser Minorität der Individuen dürften es sein, von denen wir lernen können: Es konnte festgestellt werden, daß Spannungsänderung ohne entsprechende Änderung der Härte und Härteänderung ohne Änderung der aktiven Spannung eintreten kann. Daher erscheint die Schlußfolgerung berechtigt, daß ein *unmittelbarer fester Zusammenhang* zwischen Spannungsänderung und Änderung der elastischen Eigenschaften für den menschlichen Skelettmuskel, welcher dem physiologischen Einfluß des nervösen Zentralorgans und physiologischen Arbeitsbedingungen unterworfen ist, *nicht angenommen werden kann*. Vielmehr scheint es erforderlich zu sein, die *beiden Zustandsänderungen prinzipiell voneinander zu trennen* und sie als den Ausdruck zweier, in ihrem Wesen *verschiedener Fähigkeiten der Skelettmuskeln* hinzustellen. Auch bei dem gesunden, physiologischen Bedingungen unterworfenen Skelettmuskel kann unter gewissen Umständen, die bei den vorliegenden Untersuchungen vornehmlich in individuellen Eigentümlichkeiten gegeben zu sein scheinen, als *Nachwirkung einer länger dauernden Belastung ein Zustand vermehrter Härte oder inaktiver, d. h. nicht zu Verkürzung führender Spannung beobachtet werden, dessen Wesen in einer Änderung der elastischen Eigenschaften besteht*. Für die Annahme eines *Dualismus der Funktion des quergestreiften Skelettmuskels* spricht von den mitgeteilten Ergebnissen vor allem die Beobachtung, daß der Zustand hoher Elastizität des belasteten Muskels auch nach der Entlastung, d. h. nach Ausschaltung der aktiven Spannung desselben, längere Zeit fort dauern und nur langsam absinken kann. Dieses Verhalten erinnert sehr an die Eigentümlichkeit *glatter Muskeln*, bei welchen der langsame Ablauf der Erschlaffungsvorgänge eine charakteristische Eigenschaft darstellt.

Wollen wir die Beziehungen zwischen Elastizitäts- und Spannungsänderung der Muskeln auf Grund der vorliegenden, an verschiedenen Individuen erhobenen Befunde kurz charakterisieren, so könnte man geneigt sein, bei der *Mehrzahl der Individuen* von einer gewissen *zeitlichen Koordination* der beiden in Rede stehenden Zustandsänderungen zu sprechen und dieser eine *Dissoziation* bei einer *Minorität* der Individuen gegenüberzustellen, indem mit diesen Bezeichnungen nur *graduelle, nicht wesentliche Differenzen* zum Ausdruck gebracht werden sollen. Wir werden uns allerdings, wenn wir von Koordination reden, der Tatsache bewußt zu bleiben haben, daß die erste Messung erst $\frac{1}{2}$ Minute nach der Belastung bzw. Entlastung stattgefunden hat. Es ist sehr wahrscheinlich, daß auch unter diesen Muskeln Differenzen aufgedeckt werden könnten, wenn die Messung frühzeitiger nach der Spannungsänderung stattfinden würde. Nachdem wir aber gesehen haben, daß trotz der großen Intervalle zwischen den einzelnen Bestimmungen der Elastizität beträchtliche individuelle Unterschiede nachgewiesen werden können, werden wir aus dieser Tatsache eine Berechtigung zu den hier vorgeschlagenen Bezeichnungen ableiten dürfen, da sie zur *Charakterisierung individueller Reaktionsweise* geeignet erscheinen.

So dürfte man auf Grund der vorliegenden Beobachtungen die Vorstellung gewinnen, daß es sich bei derjenigen Zustandsänderung der Skelettmuskeln, welche in der jeweiligen *Härte* ihren Ausdruck findet, um einen *sekundären*, durch den primären Vorgang der Spannungsänderung ausgelösten, der *Anpassung des Muskels dienenden Prozeß* handelt. Die *äußere* Maßnahme der Belastung (und Entlastung) wirkt gleichsam als Reiz, welcher *im Organismus* weitere Wirkungen entfaltet und nach bestimmten, dem letzteren eigenen Gesetzen umgesetzt wird¹⁾. *Direkte* (Spannungsänderung) und *Reaktionswirkungen* (Härteänderung) *vermischen* sich vielfach; in diesem Sinne sprachen wir von *Koordination*. Wir sprachen von *Dissoziation*, wenn direkte und Reaktionswirkung *getrennt* erfaßt werden konnten.

Weitere Untersuchungen werden darüber zu entscheiden haben, ob sich nicht für manche Krankheitszustände, bei welchen die zwangsmäßige Kuppelung von Zusammenziehung und Erschlaffung bestimmter Muskeln gestört zu sein scheint, z. B. bei gewissen pathologischen Atmungsformen, durch den Nachweis der Verzögerung der Erschlaffungsvorgänge der Muskulatur ein besseres Verständnis gewinnen ließe. — Die hier aufgestellten Typen wird man aber auch kennen müssen, ehe man z. B. Untersuchungen über die pharmakologische Beeinflußbarkeit der Muskelhärte beginnen kann.

Über die *Ursachen* der festgestellten Differenzen sagen die vorliegenden Untersuchungen nichts aus, vielmehr können nur *Vermutungen* geäußert werden. Die Feststellung, daß häufig nur die Erschlaffungsvorgänge, in anderen Fällen nur die Verhärtung verzögert ablief, dürfte

¹⁾ Vgl. A. Goldscheider, Grundlagen und Bedeutung der physikalischen Therapie für die innere Medizin. Klin. Wochenschr. 1922, Nr. 14, S. 665.

schon darauf hinweisen, daß für die beiden Erscheinungen keineswegs gleiche Ursachen anzunehmen sind.

Ich habe festzustellen versucht, ob die Muskeln derjenigen Individuen, bei welchen die Verzögerung der Erschlaffung beobachtet wurde, gleichzeitig andere „rückständige Erscheinungen“ erkennen lassen. So habe ich zwar bei 3 von den 10 hierher gehörigen Fällen einen länger dauernden idiomuskulären Wulst am Pectoralis und Biceps beobachten können, welcher nach den heutigen Anschauungen der sog. *Tigelschen Contractur*, bzw. dem Verkürzungsrückstand *Hermanns* entspricht. Bei den übrigen untersuchten 46 Individuen, bei welchen die Erschlaffung prompt erfolgte, fand ich jedoch das gleiche Phänomen annähernd ebenso häufig, nämlich 9 mal.

Man könnte zur Erklärung des verschiedenen Verhaltens zunächst an eine *verschiedenartige Beschaffenheit des reagierenden Muskelgewebes* denken, welches seinerseits unter dem Einfluß der *Tätigkeit* wiederum eine Änderung erfährt. Hier muß man mit der Möglichkeit rechnen, daß jeder einzelne der bei dem komplexen Vorgang der Muskeleirregung ablaufenden Prozesse bei verschiedenen Individuen verschieden sein kann: Unterschiede in der Bildung und Beseitigung der Kontraktionssubstanz, verschiedenes Quellungsvermögen der Plasmakolloide, unterschiedliches Verhalten der Grenzmembranen, an welchen die ersten Veränderungen bei Reizung des Muskels einzutreten pflegen, könnten in Betracht kommen.

Die Gültigkeit des „Alles oder nichts Gesetzes“ für die einzelne Muskelfaser vorausgesetzt, könnte man ferner annehmen, daß die *Anzahl der gereizten Fasern* zu verschiedenen Zeiten verschieden ist. Wir hätten uns in Analogie zu der Ansicht von *Keith-Lucas*, die auch von *Gildemeister*¹⁾ geteilt wird, zu denken, daß jede einzelne beanspruchte Faser stets einen unveränderlichen Beitrag zur Entstehung der Verhärtung des Muskels liefert. Die allmähliche Härtezunahme (z. B. in Kurve 3 und 4) würde dadurch zustande kommen, daß während der Belastung, die bei den vorliegenden Versuchen nie eine maximale sein dürfte, eine fortschreitende Vermehrung der beanspruchten Fasern stattfindet.

Auch muß mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß Unterschiede in der *Durchblutung* des Muskels bei verschiedenen Individuen bestehen. Da wir nämlich wissen, daß die Blutfülle des tätigen Organs größer ist als die des ruhenden, könnte z. B. die verzögerte Erschlaffung auf länger dauerndem vermehrtem Blutgehalt des Muskels beruhen. Es wäre wünschenswert gewesen, wenn gerade diese Frage nach der Abhängigkeit der Muskelhärte von der Blutfülle des Muskels genauer untersucht worden wäre, doch mußte dies bisher wegen technischer Schwierigkeiten unterbleiben. Versucht man nämlich durch Abbindung eine venöse Stauung im Arm hervorzurufen, so wirkt die Anlegung der Staubinde bereits an sich als Reiz, welcher den Muskel härter macht.

Schließlich aber muß erwogen werden, ob das unterschiedliche Verhalten des Erfolgsorganes nicht auf *Differenzen in der vom nervösen Zentralorgan aus stattfindenden Erregung des Muskels* zurückzuführen ist. Es erscheint sehr wohl möglich, daß unter gewissen Bedingungen (isometrische Beanspruchung) die jeweilige Härte ein Ausdruck ist für die Größe und den zeitlichen Ablauf eines nervösen Erregungsvorganges im Muskel.

Zusammenfassung.

Nach dem von *Gildemeister* angegebenen Verfahren (ballistisches Elastometer) wurde die Härte, d. h. die Elastizität des *M. biceps* und ihre Veränderlichkeit unter dem Einfluß der Belastung (1 und 2 kg)

¹⁾ *M. Gildemeister*, Über die sog. Härte tierischer Gewebe und ihre Messung. Zeitschr. f. Biol. 63, 199. 1914.

und Entlastung unter Festhalten der Zeitverhältnisse bei verschiedenen Individuen und bei isometrischer Beanspruchung des Muskels bestimmt. Es ergab sich, daß nicht nur hinsichtlich der *Größe* der Härteänderung, sondern auch bzgl. der *Geschwindigkeit*, mit welcher die Änderung der Härte im Anschluß an die Belastung und Entlastung, d. h. also bei Spannungsänderung des Muskels eintritt, große individuelle Unterschiede bestehen:

1. Bei der *Mehrzahl* der Individuen ändert sich der elastische Zustand des Muskels sowohl unter dem Einfluß der Belastung als unter dem der Entlastung sehr rasch. Schon eine halbe Minute nach der Belastung, d. h. bei der ersten darauffolgenden Messung, ist die der Last entsprechende endgültige Härte erreicht. Ebenso schließt sich an die Entlastung die Rückkehr zur früheren Elastizität unmittelbar an. In vielen Fällen bleibt ein als „Härterückstand“ zu bezeichnender Zustand wenig erhöhter Elastizität zurück (*Koordination* der beiden Zustandsänderungen).

2. Bei einer *Minorität* der Individuen ändert sich der elastische Zustand des Muskels unter gleichen Bedingungen sehr langsam. Mehrere Minuten können vergehen, bis der endgültige Elastizitätszustand nach der Belastung vom Galvanometer wieder angezeigt wird, und ebenso wird nach der Entlastung nur sehr langsam die dem Ruhezustand des Muskels entsprechende Elastizität wieder erreicht. Bei dieser Gruppe gehen also Änderung der aktiven Spannung und Änderung der elastischen Eigenschaften des Muskels keineswegs parallel (*Dissoziation* der beiden Zustandsänderungen).

3. Aus diesen Feststellungen wird im Anschluß an die Ausführungen von v. Kries in seinen „Bemerkungen zur Theorie der Muskeltätigkeit“ die Schlußfolgerung gezogen, daß ein unmittelbarer, fester Zusammenhang zwischen Spannungsänderung und Änderung der elastischen Eigenschaften für den menschlichen, dem Einfluß des nervösen Zentralorgans und physiologischen Arbeitsbedingungen unterworfenen Skelettmuskel nicht angenommen werden kann. Die beiden Zustandsänderungen dürften daher auch für den gesunden Skelettmuskel prinzipiell voneinander zu trennen und als der Ausdruck zweier, in ihrem Wesen verschiedener Fähigkeiten des quergestreiften Muskels anzusehen sein.

4. Da bei dem gleichen Individuum unter gleichen äußeren Versuchsbedingungen an verschiedenen Tagen sich eine weitgehende Übereinstimmung der gewonnenen Kurven ergeben hat, scheint die Annahme gerechtfertigt zu sein, daß die im Einzelfall gefundene Reaktionsweise (Geschwindigkeit der Härteänderung nach gleicher Belastung und Entlastung) als für das betreffende Individuum charakteristisch angesehen werden darf.