(Aus der Universitätsklinik für orthopädische Chirurgie Frankfurt a. M.
[Direktor: Prof. Dr. K. Ludloff.])

Physiologische Gesichtspunkte bei der Sehnen- transplantation.

Von

Privatdozent Dr. Otto Beck.

Assistent der Klinik.

Mit 2 Kurven im Text.

(Eingegangen am 2. Juli 1921.)

Der geniale Gedanke Nicoladonis, zum Ersatz eines gelähmten Muskels einen funktionstüchtigen Muskel durch Sehnentransplantation zu überpflanzen, hat besonders durch die umfassenden Arbeiten von Lange und Vulpus, in letzter Zeit auch durch wertvolle Anregungen von Biesalski und Stoffel nach der technischen Seite der Operation hin einen bestimmten Abschluß gefunden. Dabei wurde aber mehr Gewicht gelegt auf die Art der Operation, ob periostal oder peritendinös verpflanzt werden soll, während maßgebende Faktoren, die in der Physiologie des Muskels begründet sind, nicht die volle und notwendige Berücksichtigung gefunden haben und vor allem aber nicht experimentell begründet wurden.

Biesalski und Stoffel haben auf dem Orthopäden-Kongreß 1913/14 verschiedene Fragen aus der Muskelphysiologie, die bei der Überpflanzung zu berücksichtigen sind, in den Vordergrund des Interesses gerückt. Biesalski hat in seiner Sehnenscheidenauswechselung eine zweckmäßige Methode angegeben, um die Richtung der Kraft des Kraftspenders gleich der des gelähmten Muskels zu machen. Mit Stoffel hat Biesalski auf die Wichtigkeit einer richtigen Anheftung der Sehne und damit auf die Notwendigkeit einer zweckmäßigen Wahl der Länge des Muskels hingewiesen. Stoffel hat betont, daß bei der Sehnentransplantation mehr wie bisher der anatomische Bau des einzelnen Muskels als Ganzes in Betracht gezogen werden müsse.

Bei der Wirkung, die ein Muskel bei seiner Kontraktion hervorbringt, sind 2 Größen zu unterscheiden:

1. Die Länge, um die sich der Muskel bei der Gelenkbewegung verkürzt.
2. Die Kraft, die er bei der Tätigkeit entwickelt und deren Abhängigkeit von bestimmten Bedingungen (Muskeldehnung bzw. Anfangsspannung, Richtung

und Hebelarm). Die Muskeln haben im tierischen Organismus zwei Funktionen zu erfüllen, von denen die eine so wichtig wie die andere ist. Besonders für den Warmblüter ist die Erhaltung einer zweckmäßigen Körpertemperatur für den Ablauf der chemischen Reaktionen, für den Ablauf der gesamten Lebensprozesse von einer überragenden Bedeutung. Durch die experimentellen Untersuchungen von Helmholtz, von Fick, Blix, A. Hill ist die Wichtigkeit und der Umfang der thermodynamischen Prozesse des Muskels einwandfrei festgestellt. Nicht nur in der Ruhe, vor allem bei der Tätigkeit wird im Muskel Wärme gebildet, die prozentual den größeren Teil der gesamten Energie des Muskels ausmacht, während im günstigsten Fall der mechanische Wirkungsgrad höchstens 40% der gesamten Energieumwandlung im Muskel beträgt. Die Hauptquelle für die tierische Wärme bilden die Muskeln in ihrer Tätigkeit. Findet durch äußere Faktoren, z. B. Kälte eine vermehrte Abgabe von Wärme von seiten des tierischen Körpers statt, dann sucht der Organismus den Ausfall der Wärme durch Muskel-tätigkeit auszugleichen, es tritt Zittern auf, instinktiv werden körperliche Bewegungen gemacht neben dem Bestreben, durch Verkleinerung der körperlichen Oberfläche durch Zusammenkauern und Zusammenrollen den Wärmeverlust herabzumindern. Eine teleologische Betrachtung der Zweckmäßigkeit der Muskulatur allein vom Gesichtspunkte der mechanischen Wirkung der Muskeln ist viel zu einseitig und verfehlt. An sich ist eine teleologische Bewertung von Lebensvorgänge immer eine recht heikle Sache, da bei der immerhin noch recht naiven Kenntnis, die wir von den Lebensprozessen besitzen, das, was heute als recht zweckmäßig erscheint, bei nachfolgendem tieferen Eindringen in die Erkenntnis der Vorgänge recht bald als ganz unzweckmäßig erscheinen kann. Beispiele ließen sich hierfür zahlreich beibringen. Zu einer Verwirrung muß vollends die Teleologie führen, die Organsysteme, wie z. B. die Muskeln nur von der einen Seite ihrer Wirkung betrachtet, bei den Muskeln nur die mechanische Wirkung berücksichtigt.

Die Muskeln bringen neben ihrer thermodynamischen Wichtigkeit für den Organismus Bewegungen des Körpers hervor dadurch, daß sie an Hebelsystemen, an den Knochen angreifen und bei ihrer Kontraktion Kraft entfalten, die sie mit Hilfe der Sehnen auf fernegelegene Punkte übertragen und so die Glieder in den Gelenken bewegen.

Wenn Mayer in dem Buche von Biesalski ausführt, daß der Muskel die Fähigkeit besitzen muß, sein Volumen zu ändern im Gegensatz zur Sehne, so kann ich mich in diesem Punkte seinen Anschauungen nicht anschließen. Nicht um eine Volumänderung handelt es sich bei der Kontraktion, sondern um Änderung der Form. Volumänderung und Formänderung sind physikalisch zwei recht verschiedene Begriffe. Ermann hat allerdings nachgewiesen, daß bei der Muskelkontraktion eine kleine Volumänderung stattfindet, eine Angabe, die mit verbesserter experimenteller Technik und Ausschaltung einiger Fehlerquellen in Frage gestellt ist. Genau so wenig, wie sich das Volumen eines Liter Wassers verändert, wenn ich den Inhalt eines hohen l-Glases in ein kleines weites auch 1 Liter fassendes Gefäß gieße, genau so wenig ist die Vergrößerung des Muskelquerschnittes auf Kosten der Faserlänge eine Volumänderung.

Die Sehnen sind, mechanisch betrachtet, wenig dehnbare Gebilde, die den breiten Querschnitt des Muskels auf einen kleinen reduzieren, wodurch es

möglich ist, die Angriffsorte und die Kraft sehr großer Muskeln auf eng begrenzte Stellen zu konzentrieren (C. Ludwig).

Die Kraft oder die Spannung, die der Muskel hervorbringt, hängt, wenn wir verschiedene Muskeln vergleichen, einzig und allein ab vom Querschnitt des einzelnen Muskels. In jeder Faser entsteht bei der Kontraktion Kraft, je mehr Fasern auf dem Querschnitt vereinigt sind, desto größer ist die resultierende Kraft oder Spannung. Bei parallelfaserigen Muskeln genügt die Bestimmung des geometrischen Querschnitts, wenn wir einzelne Muskeln auf ihre Krafterleistung vergleichen wollen; da aber in den meisten Muskeln die Fasern in Fiederung und in mehr oder minder spitzem Winkel gegen die mittlere Zugrichtung ansetzen, ist für eine exakte Berechnung der physiologische Querschnitt, d. i. die Summe der Querschnitte der einzelnen Fasern, notwendig. Daß für eine Bestimmung der Muskelkraft der physiologische Querschnitt ausschlaggebend ist und der anatomische nur Annäherungswerte ergibt, das hat nicht Stoffel zuerst ausgesprochen, wie Biesalski anzunehmen scheint, sondern ist seit E. Weber eine in der Physiologie allgemein bekannte Sache. Nur darin liegt die große Schwierigkeit, daß bis heute noch keine Methode gefunden ist, die auf nicht zu schwierige und nicht zu langdauernde Art eine Feststellung des physiologischen Querschnitts ermöglicht. Bei den Sehnentransplantationen muß man sich mit den anatomischen Querschnitten begnügen, wie sie unter anderen R. Fick, Strasser und O. Fischer festgestellt haben.

Wenn Stoffel sagt, man könnte durch das Gewichtsverhältnis die Muskeln hinsichtlich ihrer Krafterleistung vergleichen, so kann ich ihm hierin nicht zustimmen. Ein Muskel von doppelter Länge und $\frac{1}{2}$ Querschnitt wiegt ebensoviel wie ein Muskel von der Länge 1 und dem Querschnitt 1. Dieser Vorschlag oder vielmehr seine Ausführung wurde bereits vor nahezu 80 Jahren von dem Physiologen Valentin gemacht, von E. Weber dann seine Unrichtigkeit kritisch beleuchtet. Wenn man Muskeln durch Wägung auf ihre Kraft vergleichen will, dann müßte ihre Länge und ihre Faserichtung entweder dieselbe sein, oder es müssen durch Umrechnung die Muskeln auf die gleiche Länge und denselben Querschnitt gebracht werden.

Auch der Vorschlag Stoffels, durch Zählung der Nervenfasern, die in einen Muskel eintreten, zu einem Vergleich der „Spannkraft“ verschiedener Muskeln zu gelangen, ist abzulehnen. Nebenbei möchte ich nur erwähnen, daß man physiologisch und physikalisch unter „Spannkraft“ die chemische oder potentielle Energie versteht, die sich bei der Muskeltätigkeit verändert und in Wärme oder in Wärme und Arbeit umwandelt. Man wird daher besser von Kraft oder Spannung des Muskels sprechen, wenn man die Spannung meint, die der Muskel bei der Kontraktion entwickelt und die zur mechanischen Arbeit verwendet wird. Aus den Untersuchungen von Krause, Rosenthal, Stilling läßt sich mit Sicherheit erschließen, daß eine Zählung der Nervenfasern, die in einen Muskel eintreten, keine bestimmten und sicheren Werte für eine Kraftvergleiche einzelner Muskeln geben können. Von diesem Gesichtspunkte aus ist also eine Zählung der Nervenfasern, so interessante Befunde sie vielleicht sonst auch aufzudecken vermöchte, nicht notwendig. Nach den Untersuchungen der erwähnten Forscher gehen zu den Muskeln des Auges

weit mehr Fasern als zu den Muskeln des Rumpfes und der Gliedmaßen. Die Zahl der Nervenfasern steht nicht in so einfachem Verhältnis zum Querschnitt des Muskels wie Stoffel glaubt, sondern hängt auch ab von der Muskellänge, dann vor allem auch von der Präzision und dem Schnelligkeitsablauf der Bewegungen in den einzelnen Muskeln. Kühne hat nachgewiesen, daß kurze Muskelfasern in der Regel nur eine, lange zwei oder mehr Endplatten besitzen.

Eine besondere Bedeutung hat in der Physiologie der Begriff der „absoluten Muskelkraft“ erlangt, ein Begriff, den E. Weber eingeführt hat. E. Weber verstand darunter die größte Kraft, die der Muskel im Verlauf seiner Kontraktion zu entfalten vermag und verlegte diese größte Kraft in die natürliche Länge des Muskels. Die natürliche Form und die natürliche Länge besitzt eine Muskelfaser im deformationslosen Zustand, d. i., wenn sie zur Ruhe gelangt, also nicht erregt und dann nicht durch äußere Kräfte gedehnt ist. Abgesehen davon, daß es E. Weber mit seinem Verfahren gar nicht möglich war, die natürliche Länge genau zu ungrenzen, ist es immerhin sehr fraglich, ob der Muskel gerade dann seine größte Kraft ausübt, wenn er von seiner natürlichen Länge aus gereizt wird. Von vornherein ist das nicht sehr wahrscheinlich, da der Muskel bei seiner natürlichen Länge oft keine dynamische Arbeit nach außen hin mehr leistet, sondern nur sog. statische oder innere Arbeit, indem er in tetanischer Zusammenziehung das Glied in der extremen, seiner Funktion entsprechenden Stellung fixiert hält. Versuche von Fick, Blix und mir sprechen entschieden dagegen. O. Frank hat vorgeschlagen, für die Bestimmung der absoluten Kraft (für Einheit des Querschnitts 1 qcm berechnet) das absolute Maximum einer isometrischen Kurvenschaar zu nehmen. Gegen physiologische und physikalische Begriffe verstößt es, unter absoluter Muskelkraft das Arbeitsvermögen des Muskels zu verstehen, eine Annahme, die Biesalski in seinem Buche: „Die physiologische Sehnentransplantation“ macht, wenn er dem Handbuch von R. Fick eine Tabelle entnimmt, in der die Arbeitsleistung verschiedener, auf das obere Sprunggelenk wirkender, Muskeln in Meterkilogramm dargestellt ist und sagt, daß in dieser Zusammenstellung am anschaulichsten die Kraft der Muskeln dargestellt werde und weiter bemerkt, der *Musculus gastrocnemius* besitze das 10fache an absoluter Muskelkraft als der *Flexor hallucis*. Unter absoluter Muskelkraft versteht man die größte mögliche Kraft eines Muskels, die er bei günstigster Länge im Verlaufe seiner Tätigkeit ausübt, bezogen auf den Quadratzentimeter. Kraft und Arbeit sind ganz verschiedene Begriffe, Arbeit ist bekanntlich = Kraft mal Weg, wird im Maßsystem des Meterkilogramm ausgedrückt, während das Maß der Kraft das Kilogramm ist. Es ist wahrscheinlich, daß die absolute Kraft der einzelnen Muskeln, welche ja verschiedenen Gehalt an weißen und roten Muskelfasern, an Bindegewebe und elastischen Fasern besitzen, nicht ganz gleich ist, daß sie also keine absolut konstante Größe darstellt; auch für den einzelnen Muskel selbst kommt es bei Bestimmung der absoluten Kraft auf den Zeitpunkt an. Ermüdung, allgemeine Schwäche, Übung und das, was der Muskel vorher mechanisch durchgemacht hat, wird die Kraft wesentlich beeinflussen. Unter gleichen Bedingungen berechnet gibt die absolute Kraft ein Maß, um die einzelnen Muskeln vergleichen zu können. Leider sind die Bestimmungen am Menschen mit großen methodischen Schwierigkeiten verbunden und haben bisher, da man bei der Berechnung

der absoluten Kraft bald die rechtwinklige, bald eine andere Stellung zugrunde legte, bei der man oft ganz willkürlich dem Muskel natürliche Länge zuldachte, zu abweichenden Resultaten geführt.

Für die Sehnentransplantation genügt die Kenntnis des Querschnitts des gelähmten und des Querschnitts des zu überpflanzenden Muskels. Wir müssen uns mit dem anatomischen Querschnitt begnügen, der auch für unsere Zwecke ausreicht, wenn nicht die Faserrichtung der beiden Muskeln einen wesentlichen Unterschied darstellt.

Wenn der neue Kraftspender einen vollwertigen Ersatz für den gelähmten Muskel liefern soll, so muß er den gleichen physiologischen Querschnitt wie der gelähmte haben, da im allgemeinen bei der Sehnentransplantation der Hebelarm des gelähmten Muskels nicht verändert wird.

Wenn Biesalski glaubt, daß der Flexor hallucis longus, trotzdem er nach seiner Ansicht nur $\frac{1}{10}$ absoluter Muskelkraft hat, nach der Überpflanzung auf den Ansatz der gelähmten Wadenmuskulatur am Calcaneus durch Änderung des Hebelarmes, mit dem er auf das obere Sprunggelenk wirkt, und der vom Ansatz der Achillessehne bis zum Drehpunkt im Fußgelenk doppelt so groß wird wie der frühere Hebelarm, mit dem der Flexor hallucis longus in seinem natürlichen Verlauf auf das Fußgelenk einwirkt, die Wadenmuskulatur zu ersetzen vermag, so kann ich diese Folgerung nicht als richtig anerkennen. Nur ein Muskel von gleichem Querschnitt und derselben Faserlänge kann die Funktion der Wadenmuskulatur voll übernehmen, gleichen Hebelarm vorausgesetzt. Ich gebe zu, daß ein Muskel durch Tätigkeit hypertrophiert, aber die Hypertrophie erfolgt langsam mit periodisch zunehmenden Ansprüchen; wenn wir sofort einen zu schwachen Muskel überlasten, dann versagt er und wird nicht hypertrophisch, sondern geschädigt. Ein klassisches Beispiel bietet in dieser Hinsicht das Herz. Ein Muskel übt das Maximum seiner Leistung nur bei einer bestimmten Größe der Belastung aus, mutet man ihm eine größere Last zu, so leistet er weniger, und dasselbe findet auch bei einer geringeren Last statt. Wenn es auch gelingt, daß der überpflanzte Flexor hallucis den freischwebenden Fuß plantar flektieren kann, so wird er bei seinem weit kleineren Querschnitt als dem der Wadenmuskulatur nicht fähig sein, den Körper in den Zehenstand zu erheben. Bei allen Transplantationen am Fuß, insbesondere aber beim Ersatz des Gastrocnemius, können wir von einer gelungenen Transplantation nur dann sprechen, wenn der überpflanzte Muskel auch wirklich die Arbeit des gelähmten leisten kann. Bewegungen des freischwebenden Fußes durch überpflanzte Sehnen beweisen gar nichts, genau so wenig, wie man am freischwebenden Fuß, am Bänderpräparat und an den erhaltenen Sehnenstümpfen die wirklich im Leben beim Gehen und Belasten vorhandene Muskelfunktion und den genauen Gelenkmechanismus hierbei erforschen kann. Der Fuß ist zum Belasten und zum Tragen des Körpergewichts da, und nur, wenn der neue Kraftspender die Funktion des ausgefallenen Muskels beim Gehen und Stehen übernehmen kann, ist die Operation von wesentlichem Wert. Ich habe gegenwärtig Gelegenheit aus der Privatpraxis meines hochverehrten Lehrers Herrn Prof. Ludloff einen 50jährigen Patienten zu beobachten, der sich durch Ausgleiten und Überstreckung des Fußes eine Ruptur der Achillessehne an dem linken Fuß zuzog. Der Fall gibt einen klassischen Beweis für meine Ausführungen.

Den freischwebenden dorsalflektierten Fuß kann der Patient durch die über das obere Sprunggelenk ziehenden Muskeln — Peronaei, Flexor hallucis, Flexor digitorum — plantarflektieren. Dagegen ist eine Erhebung in den Zehenstand ganz unmöglich. Es ist leider richtig, daß wir bei der Auswahl der zu überpflanzenden Muskeln meistens sehr beschränkt sind, daß wir wohl immer einen schwächeren Muskel mit der Aufgabe eines stärkeren betrauen müssen. Ich glaube aber doch, daß wir bei der Sehnentransplantation nicht wahllos weit dünnere Muskeln nehmen dürfen in der trügerischen Hoffnung, daß die Natur sich dann selber mit Hypertrophie helfen wird, sondern daran festhalten müssen, daß wir möglichst den Querschnitt des gelähmten Muskels ersetzen sollen; ich möchte die Forderung aufstellen, daß, wenn wir auf eine richtige Funktion rechnen wollen, der überpflanzte Muskel als das Minimum den halben Querschnitt des gelähmten besitzen muß.

Wesentlich anders als bei den Sehnentransplantationen der unteren Extremität liegen die Verhältnisse an der oberen Extremität, besonders an der Hand. Als Beispiel eine Radialislähmung. Wenn es uns darauf ankommt, die Dorsalflexion der Hand wieder herzustellen, so genügt es nach den bisherigen Erfahrungen, einen etwas schwächeren Muskel als den gelähmten zu nehmen, wenn kein vollwertiger Ersatz möglich ist, den wir eigentlich immer anzustreben haben. Denn wenn auch die Hand nicht so lange und so kräftig wie normal dorsalflektiert werden kann, wie es für den Schwerarbeiter oder für eine vollkommen ungehinderte Gebrauchsfähigkeit der Hand notwendig ist, so erreichen wir doch durch eine, wenn auch nicht vollkräftige, Dorsalflexion, daß der Faustschluß der Finger ermöglicht und die Hand dadurch wieder in vieler Beziehung zum Greifen und Fassen befähigt wird.

A. Fick hat das Gesetz gefunden, daß in einer isometrischen Zuckung schon für eine sehr kleine Länge des Muskels, welche die natürliche Länge nicht viel übertrifft, ein verhältnismäßig hohes, jedenfalls wesentlich höheres Spannungsmaximum erreicht wird, als wenn der Muskel bei natürlicher Länge isometrisch zuckt. Wird der Muskel noch weiter verlängert, die Dehnung oder anders ausgedrückt die Anfangsspannung noch weiter vermehrt, so wird ein absolutes Kraft- oder Spannungsmaximum erreicht, das bei weiterem Wachsen der Anfangsspannung wieder abnimmt. Dasselbe Gesetz hat O. Frank für den Herzmuskel bestätigt, Blix in seinen Untersuchungen über Länge und Spannung des Muskels den Befund von Fick bestätigt. Die Versuche Ficks und von Blix wurden am ausgeschnittenen Froschmuskel angestellt. Das wichtigste Ergebnis ist also, daß der Muskel bei einer etwas größeren Länge als der natürlichen ein weit höheres Kraftmaximum erreicht, das eine absolute Höhe besitzt und dann bei Vermehrung der Länge wieder absinkt.

Diese Tatsachen, auf die Sehnentransplantation übertragen, fordern, daß die zu überpflanzende Sehne unter einer bestimmten elastischen Dehnung befestigt wird, unter einer Anfangsspannung, bei der der Muskel in der betreffenden Gelenkstellung das Optimum der Kraftleistung erreicht. Stoffel hat das Verdienst, zuerst auf den wichtigen Punkt hingewiesen zu haben, daß bei der Sehnentransplantation auf diese Anfangsspannung der größte Wert zu legen ist. Er fordert, daß die Sehne bei der Grenzstellung des Gelenks, die dem tätigen

Zustand des Muskels entspricht, ohne Spannung angenähert werden muß. Zu dieser Anschauung gelangte Stoffel auf Grund eines Experimentes, das er am Tibialis anterior beim narkotisierten Individuum anstellte. Er zog mit einer Pinzette, nachdem er das übersprungene Gelenk vorher in die der Muskelfunktion entsprechende Grenzstellung gebracht hatte, den Muskel zur Seite; der Muskel setzte der Pinzette keinen Widerstand entgegen und kehrte, nachdem der Zug der Pinzette aufgehört hatte, in seine ursprüngliche Lage nicht zurück, sondern blieb als Schlinge liegen. Daraus schließt Stoffel, daß der Muskel in der Grenzstellung keine elastische Spannung aufweist. Den Schluß halte ich für berechtigt, ich habe bei diesem etwas grobem Versuchsverfahren nur das eine Bedenken, daß der Muskel in dieser Grenzstellung bereits unter die natürliche Länge entspannt ist. Bei der natürlichen Länge hat der Muskel gerade keine Spannung, wenn ich aber den Muskel dann zur Seite ziehe, dann muß er, wenn er gerade ohne Spannung ist, elastische Spannung bekommen, wenn er aus der Gleichgewichtslage herausgebracht wird. Ich habe den Versuch Stoffels wiederholt, glaubte auch, wenn der Fuß in die dem Tibialis anterior entsprechende Grenzstellung gebracht war, keine Spannung zu fühlen, wenn ich ihn aber zur Seite hob, blieb er nicht liegen, sondern ging etwas zurück; damit ist nur bewiesen, daß ich den Muskel, als ich ihn aus seiner spannungslosen Lage herausbrachte, etwas elastisch spannte; nach Aufhören dieser deformierenden Kraft ging der Muskel in seine deformationslose Lage zurück. E. Weber hat festgestellt, daß die Muskeln im tierischen Körper über ihre natürliche Länge gedehnt sind, so daß sich ihre Sehnen bei der Durchschneidung proximal zurückziehen. Diese Angabe von E. Weber wird viel zitiert und vielfach unrichtig wiedergegeben. Es wird dieser eine Satz gewöhnlich aus dem Zusammenhang herausgegriffen, und nur auf diese Weise ist es gekommen, daß sich von verschiedener Seite Beweise, von anderer entschiedener Widerspruch geltend macht. E. Weber gibt eine Reihe von Versuchen an, die er ausgeführt hat und gibt immer wieder ausdrücklich die Stellung an, in der sich das Gelenk bei der Durchschneidung befand.

E. Weber sagt: „Die Muskeln im lebenden Körper befinden sich auch während ihrer Untätigkeit (wenn von den Nerven aus keine Einflüsse auf sie ausgeübt werden) nicht in ihrer natürlichen Form, sondern sind ausgedehnt und üben daher gleich ausgedehnten Saiten elastische Kräfte aus, durch welche sie wie diese in ihre kürzere natürliche Form zurückzukehren streben. Daß die Muskeln in dieser ausgedehnten Lage verharren und nicht durch Bewegung des Gliedes in ihre natürliche Form zurückkehren, hat darin seine Ursache, daß verschiedene Muskeln (Antagonisten) die Glieder in entgegengesetzte Richtung zu bewegen streben und sich das Gleichgewicht halten. Diese Lage der Glieder, in welcher dieses Gleichgewicht stattfindet, ist, wenn die Muskeln untätig sind, die halbgebogene Lage der Glieder, diese ist uns auch besonders bequem und für die Erholung der Muskeln am günstigsten.“

Die Muskeln sind nicht bloß in derjenigen Lage der Glieder, wo ihre Befestigungspunkte am meisten voneinander entfernt sind, sondern in allen Lagen der Glieder ausgedehnt und folglich sind die Flexoren und Extensoren gleichzeitig gespannt. Bei einem eingelenkigen Muskel tritt eine vollkommene Entspannung ein, wenn das Gelenk in die dem Muskel zugehörige Stellung maximal geführt wird; bei einem zweigelenkigen Muskel ist die natürliche Lage abhängig von der Stellung der beiden übersprungenen Gelenke. Wenn ich bei einem Frosch bei maximaler Spitzfußstellung und bei durchtrenntem Ischiadicus, um jeden Einfluß seitens des Nervensystems auszuschließen, die Achillessehne tenotomiere, so zieht sich der Muskel mit dem proximalen Sehnenstumpf etwas zurück ($1\frac{1}{2}$ mm), wird

das Kniegelenk langsam von 10 zu 10° gleichzeitig gebeugt, so vermindert sich bei der Tenotomie die Distanzänderung, bei maximaler Spitzfußstellung und einer Beugestellung des Kniegelenks von ca. 145° tritt keine Retraktion der Sehne mehr ein, in dieser Stellung hat der Gastrocnemius seine natürliche Länge. Wird das Kniegelenk noch weiter gebeugt, so tritt nicht nur nicht eine Retraktion ein, die Muskelfasern krümmen und fälteln sich etwas.

Der Webersche Satz bezieht sich, so wie Weber ihn ausgesprochen hat, auf die halbgebogene Lage der Glieder. Man muß sich eigentlich wundern, daß die Ausführungen dieses berühmten Forschers über die Semiflexion der Glieder, in der die Muskelgruppen gleiche und relativ geringe elastische Spannung besitzen und sich das Gleichgewicht halten, solange von klinischer Seite nicht gewürdigt wurden, so daß erst Zuppinger die Bedeutung der Semiflexion für die Behandlung der Frakturen nachdrücklich hervorheben mußte. Diese Ruhelage der Glieder spielt auch bei der Entstehung der paralytischen und arthrogenen Kontrakturen eine bedeutsame Rolle, die mir auch nicht genügend in den Arbeiten über den Entstehungsmechanismus der Kontrakturen hervorgehoben erscheint.

Ich möchte hier gleich einige Bemerkungen über die Elastizität des Muskels einflechten, da sich in der angeführten Arbeit von Stoffel einige von den Anschauungen der Physiker und Physiologen abweichende Erörterungen finden.

Der Muskel setzt den dehnenden Gewichten einen geringen Widerstand entgegen, der allerdings mit fortschreitender Dehnung immer größer wird. Die Elastizität des Muskels ist daher gering, nicht, wie Stoffel behauptet, sehr groß. Die wissenschaftliche und physikalische Begriffsbestimmung weicht ja allerdings von dem gewöhnlichen Sprachgebrauch ab, indem der Laie einen Körper dann als sehr elastisch bezeichnet, wenn er leicht deformierbar ist. „Man hält deshalb auch Kautschuk elastischer als z. B. Glas, während es im wissenschaftlichen Sinn umgekehrt ist, da Glas eine weit geringere elastische Nachwirkung aufweist wie Kautschuk“ (Planck). Der Muskel ist wie jedes organische Gebilde unvollkommen elastisch, da er durch angehängte Gewichte nicht sofort auf die endgültige Länge gedehnt wird und andererseits nach dem Aufhören der deformierenden Kraft nicht sofort wieder in seine ursprüngliche Ruhelage zurückkehrt, eine Erscheinung, die als elastische Hysteresis, als elastische Nachdehnung bezeichnet wird. Zur Bedingung der vollkommenen Elastizität gehört es, daß ein Körper, der eine Zeitlang beliebigen deformierenden Kräften ausgesetzt wurde, nach Aufhören dieser Kräfte keinen anderen Gleichgewichtszustand annimmt als den, den er vor Anbringung der Kräfte besessen hat. „Dem Drucke Null muß eindeutig die Deformation Null entsprechen“ (Planck).

Stoffel unterscheidet beim Muskel zwischen elastischen und kontraktilem Elementen und glaubt, bei der Ausdehnung des Muskels werden nur die elastischen Elemente beansprucht; ich vermag auch hier mich nicht seiner Ansicht anzuschließen, die kontraktilem Elemente selbst sind elastisch dehnbar.

Recklinghausen behauptet neuerdings, daß bei der Durchschneidung der Sehne reflektorisch ein Reiz gesetzt würde, der eine Kontraktion des Muskels auslöse. Er wendet sich gegen die Versuchsergebnisse von Lydie de Besser,

die bei narkotisierten Tieren die Achillessehne durchschnitten und beobachtet hat, daß sich das zentrale Ende zurückzog. Wie bei durchschnittenem Nerven ein Reflex zustande kommen soll, wie H. v. Recklinghausen annimmt, ist mir nicht recht klar geworden. Und wenn Recklinghausen glauben sollte, daß durch direkten Reiz, der bei der Durchschneidung die Sehne trifft, auch der Muskel erregt werden soll, so daß er sich kontrahiert, so halte ich diese Annahme für nicht richtig. Einmal müßte sich der Muskel nach einiger Zeit, wenn er ermüdet, wieder ausdehnen, der Muskel muß erschlaffen. Und dann muß sich der Muskel, wenn die Sehne zum zweitenmal etwas höher oben am zentralen Ende tenotomiert wird, wieder zusammenziehen; das macht er nun nicht, wie ich mich dutzendmale am Gastrocnemius des Frosches überzeugen konnte. Und dann, warum gibt es keine Retraktion der Sehne, wenn ich die Achillessehne des Froschgastrocnemius durchschneide bei Spitzfußstellung und maximal gebeugtem Knie? Hier trifft doch derselbe Reiz die Sehne und nach Recklinghausen auch den Muskel. Im Gegenteil, es erfolgt nicht nur nicht eine Retraktion, die Muskelfasern krümmen und fälteln sich, die Sehnenstümpfe legen sich oft sogar übereinander. Daß selbst, wenn wir die Sehne bei der natürlichen Länge, wo sie gerade ohne elastische Spannung ist, durchschneiden, noch ein geringes, wenn auch zeitlich etwas langsamer eintretendes Zurückziehen eintritt, davon kann man sich am Froschgastrocnemius jederzeit überzeugen. Es ist auch von vornherein nicht anders zu erwarten. Der aus dem Körper ausgeschnittene Muskel verkürzt sich noch weiter, hat noch eine geringere Länge, als wenn er sich im Körper befindet und seine Sehne durchtrennt ist. Diese Verkürzung beträgt etwa 15—20%. Die einzelnen Muskelbündel suchen Kugelgestalt anzunehmen, von einer gefaserten Substanz, wie es der Muskel ist, müssen wir aber verlangen, daß sie gerade gestreckt ist. Ich glaube daher, daß O. Frank im Recht ist, wenn er annimmt, daß selbst bei der Spannung 0 der elastische Widerstand bei gefaserten Substanzen niemals 0 werden kann.

Ich habe am Gastrocnemius des Frosches im Körper des Tieres den Kraftablauf des Muskels im isometrischen Tetanus bei verschiedenen Gelenkstellungen bestimmt, um die funktionelle Beziehung zwischen Länge bzw. Anfangsspannung und der Spannung bei der Kontraktion festzustellen, dann, nachdem ich den Kraftablauf bei der physiologischen Gelenkexkursion verfolgt hatte, die Achillessehne tenotomiert, um zu sehen, wie die Spannung bei der isometrischen Kontraktion, wo der Muskel die Länge vor dem Tetanus beibehält und nur Spannungsänderungen durchläuft, bei größerer Länge als sie physiologisch innerhalb der Gelenke vorkommt, sich weiter verhält, wo das Maximum der entwickelten Kraft liegt. In zweiter Linie wollte ich auch verfolgen, wie sich die Spannung bei der Tätigkeit verhält, wenn die Länge des Muskels vor dem Tetanus immer mehr und mehr unter die natürliche Länge vermindert wurde. Auf die Methodik und die Versuchsergebnisse verweise ich auf meine Abhandlung die in „Pflügers Arch.“ erscheint. Ich will hier die erhaltenen Kurven eines Versuches bringen, da sie einen wichtigen Aufschluß über die Anfangsspannung, die Gesamtspannung und den Spannungszuwachs innerhalb des physiologischen Bewegungsablaufes bringen und eine experimentelle Grundlage geben, in welcher Spannung die Sehne des Kraftspenders bei der Sehnentransplantation angenäht werden muß.

In Abb. A ist in der Richtung der Abszisse die Längenänderung des Muskels jeweils vor dem isometrischen Tetanus in Millimeter, in der Richtung der Ordinate in den unteren Kurven die Anfangsspannung in Gramm, in den oberen Kurven die Gesamtspannung des Muskels bei der Kontraktion eingetragen.

1—3 entspricht den physiologischen Gelenkstellungen, 1 der Spitzfußstellung (Spf.), wo der Muskel seine natürliche Länge hat, 2 der rechtwinkligen Stellung (R.), 3 der extremen Dorsalflexion (DFI.). Nach dem isometrischen

Abb. A.

Tetanus bei 3 wird die Sehne des Muskels durchschnitten, nach der Durchschneidung hat sich die Länge des Muskels durch Nachdehnung vergrößert, so daß die Anfangsspannung geringer wurde. Von 4 ab wird dann die Länge des Muskels sukzessive jeweils vor der Reizung vermehrt, es wird bis zu einer Dehnung des Muskels gegangen, bei der eben noch keine Schädigung der Muskelfasern eintrat (bis 9 der Kurve), von hier ab wird der Muskel wieder schrittweise entlastet, die Länge vermindert bis 22, dann wird die Länge des Muskels wieder fortschreitend vermehrt und schließlich bis zum äußersten gedehnt (31—34).

Die unteren Kurven geben den Verlauf der Anfangsspannung, die der Dehnungskurve des Muskels, der Längenlastkurve, wie sie O. Frank bezeichnet, und der Entlastungskurve entspricht, sofern man die ganze Figur im Sinne des Uhrzeigers um 90° dreht, so daß die Lasten (Dehnungen) in Gramm in der Richtung der Abszisse, die Längenänderungen in der Richtung der Ordinate erscheinen. Diese Dehnungskurve beginnt von der natürlichen Länge des

Muskels. steigt verhältnismäßig flach an bis 3, wo sie ca. 50 g beträgt und der Dehnung des *Musculus gastrocnemius* bei extremer Dorsalflexion der Froschpfote entspricht; bei 4 hat sich nach der Durchschneidung der Sehne die Anfangsspannung vermindert (ca. 40 g), die Länge des Muskels also vergrößert. Von da ab verläuft die Kurve noch eine geringe Strecke flach, um dann von einem Wendepunkt (bei 6) an steil anzusteigen. Innerhalb der physiologischen Gelenkexkursion ist also der Muskel sehr leicht, schon mit verhältnismäßig geringen Lasten dehnbar, zeigt keine Nachdehnung, von da ab werden immer größere Lasten nötig, um den Muskel um die gleiche Länge auszudehnen, d. h. der Muskel wird elastischer, weniger dehnbar. Die Entlastungskurve des Muskels (9—17 der unteren Kurve) liegt unterhalb der Dehnungskurve (1—9), der Muskel hat bei den starken Dehnungen nach der Durchschneidung der Sehne seine Länge verändert, er ist länger geworden. Die natürliche Länge hat sich damit verschoben, wird in der rückläufigen Kurve an Punkt 4 der Abszissenachse, also bereits früher erreicht als ursprünglich, wo sie bei 1, bei der Spitzfußstellung, lag.

Die oberen Kurven entsprechen der Gesamtspannung (= elastischen Spannung + Spannungszuwachs) bei der Kontraktion; diese Kurven wurden von A. Fick als Dehnungskurven des tätigen Muskels bezeichnet.

Die Gesamtspannungskurve bei der physiologischen Gelenkstellung (1—3) steigt in ziemlich gerader Linie an, erreicht das Maximum bei der größten Länge des Muskels, bei der Dorsalflexion. Nach der Durchschneidung der Sehne hält sich trotz der etwas geringer werdenden Anfangsspannung das Maximum gleich hoch wie bei der Dorsalflexion, bei weiterem Wachsen der Länge bzw. Anfangsspannung nimmt die Gesamtspannung noch etwas zu, bis ein absolutes Maximum (bei 6) erreicht wird, von dem ab dann die Gesamtspannung bei weiterer Vermehrung der Länge bzw. Anfangsspannung wieder abnimmt (bis 9). In der rückläufigen Kurve (9—22), wo der Muskel immer mehr entlastet wurde, liegt das absolute Maximum der Gesamtspannung etwas tiefer, sonst hat die Kurve einen ähnlichen Verlauf wie Kurve 1 — nur wird hier bis zu einer Länge des Muskels gegangen, die weit geringer ist als die natürliche Länge, wo also der Muskel nicht mehr gerade ohne Spannung gestreckt, sondern gekrümmt und gefältet erscheint.

In Abb. B ist als Abszisse aufgetragen die Anfangsspannung in Gramm, in der Ordinatenrichtung der Spannungszuwachs, d. i. die im Muskel bei der Kontraktion entwickelte Spannung in Gramm. 0 entspricht der natürlichen Länge des Muskels, wo er eben keine elastische Dehnung hat, 1 in der Ordinate dem dabei bei der Kontraktion auftretenden Spannungszuwachs, der von der Spitzfußstellung, wo er ca. 600 g beträgt, steil ansteigt zur rechtwinkligen (780 g) und zur Dorsalreflexion 1030 g. Nach der Tenotomie wird bei einer geringen Vermehrung der Anfangsspannung über die bei der Dorsalflexion ein absolutes Maximum erreicht (bei 6), von wo dann der Spannungszuwachs bei fortwährendem Wachsen der Dehnung bzw. Anfangsspannung steil abfällt und bei extremer Dehnung, bei der der Muskel in seinen Fasern geschädigt wird, bis fast auf 0 heruntergeht (in Kurve 0 — — — 0 — — — 0 24—34).

Aus den Versuchen ergibt sich, daß die größte Kraft des Muskels bei der Dorsalflexion erhalten wird, wo innerhalb der Gelenkexkursion **physiologisch** auch die Dehnung am größten ist, die allerdings an sich nicht besonders hohe

Werte besitzt. Wird die Sehne dann durchtrennt, dann wird bei einer etwas größeren Dehnung, als sie innerhalb des Gelenks stattfindet, sowohl das absolute Maximum (bei 6) der Gesamtspannung und des Spannungszuwachses (bei 5 in B) erhalten.

Wenn wir die unvermeidliche Nachdehnung des Muskels nach dem isometrischen Tetanus berücksichtigen, so ergibt sich, daß das physiologische Maximum von Gesamtspannung und Spannungszuwachs entweder mit dem absoluten, überhaupt erreichbaren Maximum zusammenfällt oder an dasselbe ganz nahe heran zu liegen kommt, daß der Muskel also bei der Dorsalflexion die größte Kraft bei der Kontraktion entwickelt. Wird der Muskel bei der Dorsalflexion

Abb. B.

über das physiologische Maß hinaus noch weiter gedehnt, so fällt ziemlich steil die entwickelte Kraft ab, während die elastische Kraft von einer sehr starken Dehnung des Muskels ab sehr steil ansteigt (30—34). Im tierischen Körper wird der Muskel in seiner möglichen Kraftleistung nur auf eine verhältnismäßig kurze Strecke ausgenutzt, er vermag sowohl bei einer größeren Länge als er sie bei der Dorsalflexion besitzt und bei einer geringeren als der natürlichen Länge bei der Spitzfußstellung noch Kraft zu entwickeln, die aber im natürlichen Geschehen innerhalb des Körpers nicht zur mechanischen Arbeit verwendet werden kann, weil es einmal der Gelenkmechanismus verhindert, andererseits die Kraft schließlich bei größerer Dehnung zu gering wird, um die Antagonisten über das physiologische Maß hinaus zu dehnen.

Aus den Versuchen folgt für die Sehnentransplantation: In der der Funktion des gelähmten Muskels entsprechenden Gelenkstellung darf der neue Kraftspender mit seiner Sehne nur eben ohne

Anfangsspannung angenähert werden, oder in der Ruhelage, der Semiflexion, mit einer geringen Anfangsspannung.

Wird der Muskel in dieser Stellung, wie von mancher Seite, unter stärkster Spannung angenähert, so erfordert einmal die Dehnung des Muskels bis zur antagonistischen Gelenkstellung von seiten der Antagonisten eine weit größere Kraftleistung als zur physiologischen Dehnung nötig ist. Weiter nimmt aber, wenn der Muskel bereits in der Grenzstellung mit stärkster Anfangsspannung befestigt wird, die Kraftleistung von der antagonistischen Gelenkstellung aus ganz erheblich ab, abgesehen davon, daß der Muskel dadurch überdehnt und geschädigt wird. Eine Verminderung der Kraftleistung und eine Schädigung des neuen Kraftspenders müssen wir schon aus dem Grunde unter allen Umständen zu vermeiden suchen, weil wir fast immer keinen vollwertigen Ersatz für den gelähmten Muskel zu geben imstande sind und uns mit einem Muskel von geringem Querschnitt begnügen müssen. Die von Stoffel und nach ihm von Biesalski aufgestellte gleiche Forderung hat durch meine Untersuchungen eine feste experimentelle Begründung erfahren. Ich selbst ziehe es vor, den Muskel in der Ruhestellung unter einer mäßigen Anfangsspannung zu befestigen, da ich es nicht für gerade leicht halte, in der der Muskelfunktion entsprechenden Gelenkstellung den Muskel eben ohne Anfangsspannung zu fixieren. Ich glaube aber, daß das eine wie das andere Verfahren gleich gut ist, es kommt nur auf die geübte Technik an.

Die zweite Größe, welche für die Wirkung eines Muskels von maßgebender Bedeutung ist, ist der Weg (der 2. Faktor des Produktes Arbeit), um den sich ein Muskel bei der physiologischen Gelenkbewegung verkürzt, seine Verkürzungsgröße. Wenn wir von der Verkürzungsgröße des Muskels sprechen, müssen wir nach E. Weber die Größe, um die ein Muskel sich wirklich verkürzt, von derjenigen unterscheiden, um welche er sich ohne äußeren Widerstand verkürzen würde. „Die Verkürzungsgröße des Muskels ohne äußeren Widerstand hängt außer der qualitativen Beschaffenheit des Muskels nur von der Länge seiner Fasern, nicht von einer anderen Dimension des Muskels ab, hat jedenfalls mit dem Querschnitt des Muskels nichts zu tun“ (E. Weber).

Im lebenden Körper kann sich der Muskel aktiv nicht ohne äußeren Widerstand verkürzen. Ist die Kraft des Muskels zu gering, so kann er sich vor allem, wenn der äußere Widerstand einen größeren Betrag erreicht, trotz der für die volle Gelenkexkursion ausreichenden Länge nicht vollkommen verkürzen, die Gelenkexkursion kann nicht ganz ausgenutzt werden. Die Folge wird dann sein, daß die Gelenkbewegung sich durch Schrumpfung der Kapsel und Bänder allmählich einschränkt bis zu der Grenze, die durch den überpflanzten Muskel ausgenutzt werden kann. Aus meinen experimentellen Untersuchungen ergibt sich, daß die physiologische Dehnung = Anfangsspannung der Muskeln im Körper verhältnismäßig geringe Kraft seitens der Antagonisten erfordert, daß das Optimum der Kraftleistung in der Nähe oder bei der physiologischen Dehnung in der antagonistischen Gelenkstellung liegt. Ist der überpflanzte Muskel in seinen Fasern kürzer, so muß er mit weit stärkerer Kraft über seine Länge ausgedehnt werden, woraus sich zwei Nachteile ergeben. Wie wir bereits oben auseinandergesetzt haben, ist der Muskel nicht vollkommen elastisch, er zeigt

elastische Nachwirkung und Nachdehnung. Innerhalb der physiologischen Dehnung, wie sie der Muskel im tierischen Körper erfährt, ist die Nachdehnung so verschwindend klein, daß sie keinerlei Nachteil auf die Bewegung ausüben kann. Wird aber der überpflanzte Muskel, weil seine Fasern kürzer sind als die des gelähmten, weiter gedehnt, dann macht sich Nachdehnung und schließlich, wenn die Dehnung zu stark ist, eine Schädigung des Muskels geltend, er wird überdehnt. Aus diesem Grunde ist es ganz unphysiologisch, worauf Stoffel mit Recht nachdrücklichst aufmerksam macht, den neuen Kraftspender in der seiner Funktion zugehörigen Gelenkstellung mit stärkster Anfangsspannung anzunähen, wie das bisher mancherorts geübt wurde. Und ebenso widerspricht es den physiologischen Tatsachen, zu glauben, man könnte einem Muskel 2 Aufgaben zumessen, man könnte ihn einmal als Kraftquelle für die Bewegung und dann zugleich als elastisches Halteband benutzen. Entweder das eine oder das andere. Als Halteband taugt der Muskel in der Ruhe, wenn er untätig ist, recht schlecht, er ist sehr wenig elastisch, dehnt sich sehr stark aus und zeigt große Nachdehnung, wenn er zu stark gespannt wird. Nur dann ist der Muskel, allerdings auch nicht für zu lange Zeit, ein ausgezeichnetes Versteifungs- und Halteband, wenn er tetanisch zusammengezogen ist. Der tetanische Zustand muß aber nach kurzer Zeit mit Ruhe wechseln, da sich die Kraft des Muskels erschöpft. Beim Halten von Gegenständen, beim Stehen usw. spielen die tetanisch zusammengezogenen Muskeln die Rolle von elastischen Bändern.

Der zweite Nachteil, den der über die physiologische Anfangsspannung weiter stark überdehnte Muskel aufweist, ist, wie sich aus unseren Versuchen ergibt, die Abnahme der Kraft, wenn der Muskel immer stärker gedehnt wird.

Diese beiden erwähnten nachteiligen Punkte fallen bei der Sehnenverpflanzung um so mehr ins Gewicht, als wir von vornherein nahezu fast immer schwächere Muskeln als die gelähmten zum Ersatz haben.

Jedenfalls muß gefordert werden, daß die Faserlängen des überpflanzten Muskels nicht kürzer sein dürfen wie die des gelähmten, daß eine etwas größere Länge nur von Vorteil sein kann. Sind die Fasern weit länger, wie die des gelähmten, so schadet das nichts, vorausgesetzt natürlich, daß sie unter der richtigen Anfangsspannung angenäht werden. Über die Faserlänge der einzelnen Muskeln finden wir für die Sehnenverpflanzung hinreichend genaue Werte in den Handbüchern der Muskel- und Gelenkmechanik von R. Fick und Strasser.

Die Wirkung einer Kraft hängt dann ferner ab von ihrer Richtung, d. h. wenn mehrere Muskeln im gleichen Sinne auf das Gelenk wirken, von der Richtung der Resultierenden der einzelnen Kräfte. Für die Sehnen transplantation muß daraus die Forderung gezogen werden, daß die Krafrichtung des überpflanzten Muskels mit der des gelähmten zusammenfällt, da sich im entgegengesetzten Fall ein ganz anderes Drehungsmoment des Muskels ergeben müßte, als der Operateur es wünscht.

Nach den Untersuchungen von O. Fischer kommt als sog. maßgebende Strecke der Krafrichtung, wenn der Muskel durch Knochenvorsprünge an seinem gradlinigen Verlauf zwischen Ursprung und Ansatz gehindert wird, dann nur das gradlinig ausgespannte Stück zwischen Ansatz und Knochenvorsprung

in Betracht, sind im Verlauf des Muskels mehr Knochensinken und Vorsprünge zwischen Ursprung und Ansatz vorhanden, die ihn von dem gradlinigen Verlauf ableiten, so kann der Muskel durch jeden dieser Vorsprünge in 2 Muskeln zerlegt werden, aus deren einzelner Kraftrichtung man dann die resultierende ableiten kann.

Zur Lösung des Problems der Kraftrichtung hilft sich Lange damit, daß er unter der Haut in dem Unterhautfettgewebe einen entsprechenden Kanal für die richtige Führung der Sehne des neuen Kraftspenders bohrt.

Die beste Methode, die Kraftrichtung des überpflanzten Muskels mit der des gelähmten in Kongruenz zu bringen, ist das Verfahren der Sehnenscheidenauswechslung von Biesalski; in einzelnen geeigneten Fällen wäre auch daran zu denken, die Sehne über Knochenvorsprünge zu führen, wie es in der Natur ja vielfach verwirklicht wird, um die geeignete Richtung zu gewinnen.

Von Wichtigkeit für die Leistung eines Muskels ist das Querschnittsheelprodukt, das Drehmoment des Muskels. Da bei der Sehnenscheidenüberpflanzung der neue Kraftspender an demselben Hebel angreift wie der gelähmte Muskel, so kommt also der Hebel nicht in Betracht, es genügt allein die Bestimmung der Querschnitte. Nur dann, wenn wir den neuen Muskel so überpflanzen würden, was wohl nicht geschehen wird, da hierfür kein zwingender Grund vorliegt, daß wir ihm einen anderen Hebelarm geben als ihn der gelähmte besitzt, müßten auch die Größen der Hebel in Rechnung gezogen werden.

Was den Ersatz eines gelähmten Muskels durch einen antagonistisch wirkenden Muskel betrifft, so ist durch die praktische Erfahrung der Beweis erbracht, daß die Möglichkeit, z. B. einen Strecker des Kniegelenks durch einen oder zwei Beuger zu ersetzen, besteht. Wenn es natürlich gelingt, für den gelähmten Muskel einen zu finden, der dieselbe Funktion besitzt und vor allem auch vom gleichen Nerven innerviert wird, so ist dieser Muskel vorzuziehen. Namentlich im jugendlichen Alter findet eine Umbahnung im Nervensystem und eine staunenswerte Anpassung an veränderte Funktion statt.

Die von Vulpius und anderen geübte Methode der Sehnenscheidenabspaltung halte ich nicht für empfehlenswert. Abgesehen davon, daß es bis jetzt noch nicht einwandfrei erwiesen ist, daß der abgespaltene Teil für sich isoliert innerviert werden kann, was a priori nicht ganz unmöglich wäre, da ja im natürlichen Geschehen jeder Finger einzeln bewegt werden kann, obwohl die Finger einen gemeinsamen Muskelbauch besitzen, ja sogar in einem Muskelfasersystem Muskeln vereinigt sind, die bei isolierter Kontraktion antagonistische Wirkung ausüben, scheint mir die Abtrennung einzelner Muskelteile deswegen nicht als ein zweckmäßiges Verfahren, weil man gewöhnlich damit, selbst wenn eine isolierte Funktion eintreten sollte, keinen Teil von gleichem Querschnitt wie den gelähmten zur Verfügung hat, und die Wahl der Kraftrichtung auf Schwierigkeiten stößt.

Den Anschauungen Stoffels über den Wert der Sehnenscheidenverkürzung und Sehnenscheidenraffung gelähmter Muskeln schließe ich mich ganz an. Ich bin mit Versuchen über die Elastizität gelähmter degenerierter Muskeln und Sehnen beschäftigt, aus denen sich bis jetzt aus den erhaltenen Kurven ersehen läßt, daß sich die Elastizität des gelähmten Muskels wesentlich geändert hat. Der Muskel hat an Elastizität sehr abgenommen, ist bis zu einer nicht zu starken Dehnung

sehr leicht auszudehnen, bei starker Anfangsspannung treten aber weitgehende Zerreißen in den mit Fett durchsetzten, noch spärlich vorhandenen Fasern ein. Dazu kommt noch die Abnahme der Elastizität und der Festigkeit der Sehne selbst, die bei einem gesunden Muskel selbst für Dehnungen, die über das physiologische Maß hinausreichen, so gut wie undehnbar sind. Werden die Sehnen der gelähmten Muskeln durch Raffung wirklich so weit verkürzt, daß sie dann als Haltebänder mit ihren zugehörigen Muskeln dienen könnten, so wird der Muskel noch mehr wie der gesunde in der kürzesten Zeit ausgedehnt und verlängert, so daß die ganze Sehnenverkürzung damit illusorisch wird.

Das Verfahren, durch Faszientransplantation überdehnte Bänder zu ersetzen, bildet hier die beste Methode. Nur muß man aus physikalischen Erwägungen heraus bestrebt sein, eine möglichst dicke Faszie zu nehmen und sie, soweit das technisch geschehen kann, sehr kurz abmessen, da ja durch dasselbe Gewicht einzelne, verschieden lange Faszienstücke um den gleichen Bruchteil ihrer Länge gedehnt werden. So wird, um nur ein Beispiel zu gebrauchen, ein Gummischlauch von bestimmter Wanddicke durch 100 g Belastung bei 10 cm Länge um 1 cm, bei 100 cm Länge aber um 10 cm gedehnt.

Zusammenfassung.

Maßgebend für die Wirkung eines Muskels ist die Kraft und die Verkürzungsgröße. Die Kraft hängt einzig und allein ab vom Querschnitt. Sie ändert sich bei demselben Muskel mit der Länge vor der Kontraktion, sie nimmt bis zu einem Maximum zu bei Längenvermehrung über die ungespannte natürliche Länge, fällt dann stark ab bei einer übermäßigen Dehnung, die größer ist als die physiologische Dehnung (Anfangsspannung), die der Muskel innerhalb des Körpers bei der antagonistischen Gelenkstellung erfährt.

Daraus folgt für die Sehnentransplantation, daß, wenn wir auf einen vollen Ersatz des gelähmten Muskels rechnen wollen, der überpflanzte den gleichen physiologischen Querschnitt haben muß wie der gelähmte, da bei der Überpflanzung der Hebelarm des gelähmten Muskels genommen wird. Ich glaube, daß die Forderung physiologisch berechtigt ist, daß der überpflanzte Muskel bei gleicher oder etwas größerer Faserlänge und physiologischer Anfangsspannung zum mindesten den halben Querschnitt wie der gelähmte haben muß, sofern wir mit einem Erfolg rechnen wollen. Der überpflanzte Muskel muß zum mindesten dieselbe Faserlänge haben wie der gelähmte, da sonst, um den Muskel bis zur antagonistischen Gelenkstellung zu dehnen, die Antagonisten zu viel Kraft aufwenden müssen, um diese Anfangsspannung hervorzubringen, andererseits der überpflanzte Muskel bei zu starker Anfangsspannung erheblich an Kontraktionskraft verliert.

Der überpflanzte Muskel darf in der seiner Funktion zugehörigen Grenzstellung des Gelenkes nur gerade ohne Spannung angeheftet werden, bei der Ruhelage des Gelenks unter einer mäßigen Anfangsspannung.

Das Gewicht der einzelnen Muskel läßt sich zur Vergleichung der Kraftleistung von Muskeln auch nicht annähernd gebrauchen. Auch die Zählung der Nervenfasern, die in einzelnen Muskeln eintreten, kann kaum brauchbare Resultate liefern.

Der neue Kraftspender muß dieselbe Kraftrichtung wie der gelähmte erhalten. Die vorzüglichste Methode hierfür ist Biesalskis Sehnen-scheiden-auswechslung.

Der Muskel kann nicht zugleich als Kraftquelle für Bewegung und als elastisches Halteband benutzt werden, wie das 1914 bereits Stoffel eingehend betont hat.

Literatur.

1. de Besser Lydie. Thèse, Lausanne 1899. — 2. Biesalski, Verhandl. d. dtsh. orthop. Ges. 1914. — 3. Biesalski und L. Mayer, Die physiologische Sehnenverpflanzung. Berlin 1916. — 4. M. Blix, Die Länge und die Spannung des Muskels. Skandin. Arch. f. Physiol. Bd. 3, 4, 5, 1892—1895. — 5. A. Fick, Mechanische Arbeit und Wärmeentwicklung bei der Muskeltätigkeit. Leipzig 1882. S. 132. — 6. R. Fick, Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke, 2. Bd., Jena 1910. — 7. O. Frank, Zur Dynamik des Herzmuskels. Zeitschr. f. Biol. Bd. 32, 1895, S. 370. — 8. Derselbe, Die Elastizität der Blutgefäße. Zeitschr. f. Biol. Bd. 71, 1921, S. 255. — 9. Krause, zit. nach Vierordts Tabellen. S. 109. Jena 1893. — 10. Kühne, Über die peripheren Endorgane der motorischen Nerven. Leipzig 1862. Zeitschr. f. Biol. Bd. 20, 1884, S. 531. — 11. Lange, Ergebn. d. Chirurg. u. Orthop. Bd. 2. (Zusammenfassendes Literaturverzeichnis.) — 12. M. Planck, Einführung in die Mechanik deformierbarer Körper. Leipzig 1919. — 13. H. v. Recklinghausen, Gliedermechanik und Lähmungsprothesen, 1. Bd., Berlin 1920. — 14. Stilling, zit. nach M. v. Frey, Nagels Handb. d. Physiol. Bd. 4, 1909, S. 431. — 15. Stoffel, Verhandl. d. dtsh. orthop. Ges. 1913 u. 1914. — 16. Derselbe, Muskel- und Sehnenoperationen nach Kriegsverletzungen in Deutsche Orthopädie, Bd. 4, 1921. — 17. H. Strasser, Lehrbuch der Muskel- und Gelenkmechanik, 2. u. 3. Bd. Berlin 1913—1917. — 18. Valentin, Lehrbuch der Physiologie. — 19. O. Vulpius, Orthopädische Operationslehre. 2. Aufl., 1921. — 20. E. Weber, Muskelbewegung in R. Wagners Handbuch der Physiologie. Bd. 3, Abt. 2, 1846.