Zur Theorie des Mechanismus des künstlichen Gelenks.

Von

Dipl.-Ing. W. v. Schütz,

Betriebsleiter an der Prüfstelle für Ersatzglieder, Berlin-Charlottenburg.

Mit 3 Abbildungen im Text.

(Eingegangen am 21. September 1919.)

In seinem Aufsatz zur „Theorie des Mechanismus des künstlichen Gelenks“ in Band 17, Heft 1 dieses Archivs will Wildermuth einen neuen Weg angeben, wie die Frage der Normalisierung der künstlichen Glieder zu lösen ist. Es ist dazu folgendes zu bemerken:

Das Bestreben, im Ersatzgliederbau zu normalisieren, ist so alt und älter (Hoeftmann, Rohr-Hilden) wie die Prüfstellen. Die Charlottenburger Prüfstelle ist am 1. Februar 1916 gegründet, und im Mai 1916 ist bereits das Merkblatt Nr. 2 mit den Normalien der Schraubengewinde und der Befestigungszapfen der Ansatzstücke herausgegeben worden. Die Darstellung Wildermuths, es sei die Notwendigkeit der Normalisierung erst jetzt erkannt — von den verschiedenen Prüfstellen wird immer mehr die Notwendigkeit betont, beim Ersatzgliederbau auf eine gewisse Vereinheitlichung der Grundelemente zu achten —, ist demnach unzutreffend.

Daß sich 1. im allgemeinen Normalien ohne Zwangsmittel schwer einführen lassen, liegt an dem Widerstand einzelner Firmen, die durch Umstellung ihrer Fabrikation große Unkosten haben.

Daß 2. weitere Normalien nicht herausgegeben wurden, liegt an folgenden Gründen:

Die Normalisierung eines Bauelementes ist gleichzeitig der Abschluß seiner Entwicklung für eine längere Zeit oder für immer. Es ist daher nicht geraten, zu normalisieren, ehe genügend Erfahrungen vorliegen und die Entwicklung bis zu einem gewissen Grade abgeschlossen ist. Die von Wildermuth erwähnte Normalisierung der Bein-Einzelteile ist sehr erwünscht; der Zeitpunkt ist unbedingt gekommen, jedoch aus anderen Gründen.

Die Amputierten stellen mit Recht die Forderung:

1. leicht auswechselbare normalisierte Teile an ihren Kunstbeinen zu haben, die sie bei jedem Bandagisten erhalten können,
2. die Instandhaltung ihres Kunstbeines möglichst einfach und bequem selbst vornehmen zu können, auch bei verschiedenen Beinsystemen.

Im übrigen ist der Staat an der durch die Normalisierung zu erreichenden Verbilligung der künstlichen Beine lebhaft interessiert.

Wenn richtig normalisiert wird, dann stellt der normalisierte Teil gleichzeitig die Summe aller praktischen Erfahrungen dar. Wie durch die Untersuchungen Wildermuths die Normalisierung gefördert wird, ist ohne weiteres nicht ersichtlich. Wildermuth geht auch später in dem bisher erschienenen Teil seines Aufsatzes über das Ellbogengelenk (der doch wohl bezüglich des letzteren als abgeschlossenes Ganze anzusehen ist) darauf nicht mehr ein.

Unabhängig von der Frage der Normalisierung scheint Wildermuth in der Hauptsache mechanische Gesetze aufstellen zu wollen, die gleichzeitig auf das mechanische wie auf das künstliche Gelenk anwendbar sind. Es wird also versucht, Muskelmechanik, die ein Teil der speziellen Muskel-Physiologie ist, mit der Mechanik künstlicher Gelenke zu vermengen. Leider führt der Versuch nicht zu dem gewünschten Ziel, da die mechanischen Bedingungen für natürliche und künstliche Gelenke nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar sind.

Im einzelnen sei auf folgende Mängel hingewiesen:

Der Begriff der Kinematik wird gleich im Anfang verstümmelt, indem Wildermuth schreibt, daß er unter Kinematik nicht nur die Lehre von den Bewegungsvorgängen, sondern auch die diese Bewegung bewirkenden Kräfte versteht. Aus den folgenden Ausführungen Wildermuths geht hervor, daß für „Kinematik“ besser „Mechanik“ zu setzen ist. Die Begriffe im einzelnen zu erläutern, ist hier nicht der Platz. Es finden sich derartige sehr klare Begriffsbestimmungen z. B. in du Bois-Reymond: Spezielle Muskel-Physiologie oder Bewegungslehre.

Reuleaux spricht auch nicht von zwangsmäßigen Bewegungen, sondern von Zwangslauf. Zwangslauf ist am menschlichen Körper nach dem Begriff der Kinematik nicht vorhanden. Man könnte hier höchstens von Kraftschluß sprechen, denn sämtliche Gelenkteile werden durch die Kraft, die den Gelenkbändern und Muskeln innewohnt, zu einem Ganzen zusammengehalten. Ein Knochenskelett fällt auseinander, wenn man nicht durch Drähte für Verbindung der Knochen untereinander sorgt. Man kann z. B. vom Rastengelenk-Arm sagen, die einzelnen Teile sind zwangsläufig miteinander verbunden; beim Reibungsgelenk z. B. ist auch nur Kraftschluß vorhanden, da die Reibungskräfte an der Übertragung von Kräften einen wesentlichen Anteil haben.

Die Betrachtungsweise der natürlichen Gelenke nach dem Freiheitsgrad der Bewegung ist nicht neu und bereits von du Bois-Reymond in seinem oben erwähnten Buche (Seite 94) angewandt worden. Die Betrachtungsweise gehört auch nicht in das Gebiet der Mathematik, wie Wildermuth angibt, sondern ist ein Teil der Geometrie der Bewegungen (siehe Schell, Theorie der Bewegung und der Kräfte, Leipzig 1870 und Study: Geometrie der Dynamen, Leipzig 1903). Diese Betrachtungsweise ist also durchaus Gemeingut der Technik und jedem Ingenieur geläufig. Es erscheint angebracht, darauf hinzuweisen, wie systematisch der Ingenieur vorgeht, um mit seinen technischen Begriffen das natürliche Gelenk zu erfassen und aus dem natürlichen Gelenk die Bewegungsbedingungen für das künstliche Gelenk abzuleiten. (Siehe Handbuch der Prüfstelle Charlottenburg: „Ersatzglieder und Arbeitshilfen für Kriegs-

beschädigte und Unfallverletzte“, Schlesinger: „Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder“, Seite 374). Die natürlichen Armgelenke und ihr mechanischer Ersatz werden nebeneinander gestellt, ohne den Umweg über alle schwierigen Begriffsbestimmungen zu nehmen. Wir müssen ja doch die Gelenke aus unserem Erfahrungsgebiet nehmen. Für den praktischen Ersatzgliederbau kann es also höchstens interessant sein zu wissen, daß irgend ein Gelenk dem 1.—6. Freiheitsgrad angehört. Eine unmittelbare Förderung des Baues künstlicher Gelenke ist aber hieraus nicht zu erhoffen.

Neu ist der Begriff „Laufwiderstand“, doch trage ich gegen seine allgemeine Einführung schwere Bedenken, da mit dem Begriff:

1. sowohl für das natürliche wie für das künstliche Gelenk keine klare mechanische Vorstellung verbunden ist,
2. für das künstliche Gelenk der Begriff „Reibungswiderstand“ besteht und ein Ersatz hierfür wenigstens zunächst nicht notwendig erscheint.

Den Kraftwirkungen bei den von Wildermuth gewählten Beispielen des natürlichen Ellbogengelenkes und des Reibungsgelenkes als Ellbogengelenk liegen ganz verschiedene mechanische Vorstellungen zugrunde. Der Unterschied geht aus den folgenden Beispielen hervor:

A. Das natürliche Gelenk.

Sehen wir bei dem natürlichen Gelenk von der Pro- und Supinationsbewegung ab, dann wirkt eine Muskelgruppe als Beuger, die zweite als Strecker.

In Abb. 1 seien Ober- und Unterarm durch starre, zunächst gewichtslose Stäbe O und U dargestellt. O sei bei K fest eingespannt gedacht.

Es sei:

P_b die Kraft, die die Beugergruppe auf den Unterarm ausübt,

b der Hebelarm der Kraft P_b ,

P_s die Kraft, die die Streckergruppe ausübt,

c der Hebelarm der Kraft P_s ,

Q die am distalen Ende des Unterarmes etwa in der Handfläche wirkende Last,

a der Hebelarm der Last Q .

Es besteht die Momentengleichung:

$$Q \cdot a + P_s \cdot c = P_b \cdot b,$$

wenn das System im Gleichgewicht sein soll. Bei Berücksichtigung des Unterarmgewichtes G , wirkend im Schwerpunktsabstand s , würde die Gleichung folgende Form annehmen:

$$Q \cdot a + P_s \cdot c + G \cdot s = P_b \cdot b.$$

Die Kraft der Beugergruppe, wirkend am Hebelarm b , ergibt ein Drehmoment, das den übrigen auftretenden Drehmomenten entgegenwirkt; von der Gelenkreibung wird hier, wie es auch Wildermuth tut, absichtlich abgesehen.

Abb. 1.

B. Das künstliche Gelenk.

Beim künstlichen Gelenk (im vorigen Falle Reibungsgelenk) ergibt die mechanische Vorstellung ein ganz anderes Bild. Da es sich nur um prinzipielle Richtigstellung handelt, sei es gestattet, die Anschauungsweise der Mechanik nur an einem Beispiel zu besprechen.

Ich benutze die Gelenkkonstruktion Wildermuths (siehe Seite 86 dieses Archivs, Band 17, Heft 1, Abb. 1—3) und betrachte auch hier wie in dem vorigen Beispiel nur die Beugebewegung.

Abb. 2.

Abb. 3.

Für diesen Fall läßt sich die Konstruktion Wildermuths durch folgendes Schema (Abb. 2 und 3) ersetzen.

Zwischen den Oberarmschienen O befinden sich auf der Ellbogenachse zwei kegelstumpfförmige Körper, die durch Schraube S in konische Ausdrehungen der Kugelteile A gepreßt werden. Kugelteile A seien mit den Unterarmschienen U für diese Betrachtung fest verbunden¹⁾. Die an den Kegelstumpfoberflächen beim Anziehen der Schraube S entstehende Reibung erzeugt ein Drehmoment, das dem durch die Last Q erzeugten Drehmoment entgegenwirkt.

Es sei:

M das durch die Reibung erzeugte Drehmoment,

Q wiederum die in der Handfläche wirkende Last,

a der Hebelarm der Last Q.

Dann ist nach dem obigen

$$M = Q \cdot a.$$

Dieses Moment M läßt sich auf folgende Weise bestimmen:

Zunächst wird auf jeden der beiden Kegelstümpfe in Richtung der Schraubenachse die durch den Anzug der Schraube erzeugte Kraft P ausgeübt. Das gesamte Drehmoment der Reibung M zerfällt dementsprechend in zwei gleiche Reibungsmomente M' , also $M = 2 M'$.

Es sei:

d F ein unendlich kleines Flächenteilchen einer Kegelstumpfoberfläche,

p der Druck auf die Flächeneinheit.

Dann ist $p \cdot d F$ die auf ein Flächenteilchen d F ausgeübte Druckkraft.

¹⁾ Bei der Konstruktion W.'s sind die Unterarmschienen auf dem Kugelteil A drehbar, um die Sichelbewegung zu ermöglichen. Für obige prinzipielle Betrachtung wurde von der Sichelbewegung abgesehen.

Ferner sei:

f der Reibungsfaktor,

q der jeweilige Hebelarm von p . dF ; dann ist

$$M' = \int f . q \cdot p . dF.$$

Ferner sei:

R der Radius des größeren Berührungskreises des Kegelstumpfs,

r der Radius des kleinen Berührungskreises des Kegelstumpfs,

α der Kegelwinkel des Kegelstumpfs, so wird nach Keck: Mechanik 1, Hannover 1900:

$$M' = \frac{2}{3} P \cdot \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2},$$

und

$$M = Q \cdot a = \frac{4}{3} \cdot P \cdot \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}.$$

Bei Berücksichtigung des Unterarmgewichts

$$Q \cdot a = \frac{4}{3} \cdot P \cdot \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} - G \cdot s.$$

Wir finden also für das natürliche Gelenk:

$$Q \cdot a = P_b \cdot b - P_s \cdot c - G \cdot s, \quad 1)$$

für das künstliche Gelenk:

$$Q \cdot a = \frac{4}{3} P \cdot \frac{f}{\sin \alpha} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} - G \cdot s. \quad 2)$$

Wildermuth schreibt: „Unter Laufwiderstand verstehe ich die Kraft, die einer Bewegung der Gelenkteile entgegenwirkt usw. . . . Da es sich sowohl beim tierischen wie beim mechanischen Gelenk um gleitende Reibung handelt, so läßt sich der Laufwiderstand durch die Formel:

$$L = f \cdot P$$

wiedergeben, wobei L den in irgend einem Punkte des Gelenkes angreifenden Gesamt-Widerstand, f der Reibungszahl und P dem auf dem Gelenk lastenden Druck entspricht. Das tierische Gelenk ist praktisch reibungsfrei.“

Von der Reibung im tierischen Gelenk wurde bei der Entwicklung der Formel 1 ausdrücklich abgesehen. Der Vergleich der Formeln 1 und 2 zeigt aber schon den grundsätzlichen Unterschied der mechanischen Verhältnisse beim künstlichen und natürlichen Gelenk, so daß für beide eine gemeinsame Definition durch die Formel:

$$L = f \cdot P$$

eine Unmöglichkeit ist. Den Faktor f bezeichnet Wildermuth einmal richtig als den Reibungsfaktor, nämlich eine Zahl, die je nach Art der Oberfläche, Material, Rauigkeit, Schmierung verschieden ist. Später wird f als die Reibung gemeinhin bezeichnet, nämlich — „Die Reibung (S. 81, Band 17, Heft 1 dieses Archivs), d. h. der Faktor f in der Formel $L = f \cdot P$ tritt hier (beim

natürlichen Gelenk) also ganz zurück,“ -- eine Bezeichnung, die nur aus der ohnehin oberflächlichen Formulierung $L = f \cdot P$ zu erklären ist.

Welche Vorstellung verbindet sich mit der Erklärung von L als dem in irgend einem Punkte des Gelenkes angreifenden Gesamtwiderstand?

Wahrscheinlich gar keine, denn beim natürlichen Gelenk sind es Muskelkräfte, die an Hebelarmen wirken, beim künstlichen Gelenk sind es die Reibungsmomente, die auf den Kegelstumpfoberflächen entstehen, wenn die Schraube S angezogen wird.

P ist bei Wildermuth der auf dem Gelenk lastende Druck. Für das natürliche Gelenk ist eine Anwendung von P , da die Reibung unberücksichtigt bleiben soll, nicht möglich; für das künstliche Gelenk haben wir weiter oben den Begriff $p \cdot dF$ einführen müssen als den Druck pro Flächenteilchen dF .

Eine gemeinsame Erklärung der mechanischen Vorgänge beim künstlichen und natürlichen Gelenk durch $L = f \cdot P$ ist somit ebensowenig möglich wie die gemeinsame Bezeichnung „Laufwiderstand“. Die Gründe hierfür sind oben schon vorweg genommen und durch die Beispiele erwiesen.