

Steuerbare künstliche Muskeln

Schriftliche Langfassung im Auftrag von
Jugendforscht

Verfasser

Adrian Boos

Phuong Thanh Nguyen

Hoang Son Luu

2011

Danksagung

Nachdem wir uns mit all den Fakten auseinandergesetzt haben, die wir im Folgenden auflisten und schildern, wollen wir keine Mühe scheuen eine Danksagung an allen Professoren, Lehrern, Instituten und Schulen zu schreiben.

Zuallererst wollen wir uns bei Frau Scholz bedanken. All unsere Inspirationen und Kreativität wären niemals mit ihrer Motivation so stark erweitert worden, dass wir unseren größten Teil der Freizeit in unseren Jugendforschprojekt investiert hätten. Ohne sie hätten wir vermutlich das Handtuch geworfen und den Kopf nicht hängen zu lassen, auch wenn das ein oder andere Experiment nicht geklappt hat. Ihre für uns wertvollen Kontakte zu Institutionen und zu Universitäten wollen wir nicht außen vor lassen und ihr auch in dieser Hinsicht einen herzlichen Dank ausrichten.

Daher ist es uns eine Ehre Frau Scholz als unsere Betreuungslehrerin zu haben.

Dann wollen wir uns für das Engagement und die Bemühungen von Herrn Bünger bedanken. Ohne ihn hätten wir keinen Zugang zu diversen Maschinenanlagen und Technologien, die das Experimentieren möglich gemacht haben.

Anschließend wollen wir noch einen herzlichen Dank an den Tutor von Phuong Thanh Nguyen Herr Böker der Friedensburg Oberschule richten. Wegen seines Ehrgeizes und seinen Engagement haben wir es geschafft durchzuhalten.

Weiterhin wollen wir noch einen herzlichen Dank an das Heinrich-Hertz-Gymnasium richten. Dort haben wir immer die Möglichkeit gehabt die Experimentierräume für unsere Versuche zu nutzen. Neben den ganzen Theorien, die wir aus diversen Schulbüchern herausgearbeitet haben, hatten wir auch Frau d'Heureuse (Tutorin von Hoang Son Luu) , die wir hierbei auch nicht außen vor lassen und ihr für ihre Hilfe einen herzlichen Dank ausrichten wollen.

Zum Schluss wollen wir uns bei Prof. Francisco Garcia-Moreno für seine Hilfe bedanken und das wir ihm Löcher in den Bauch fragen durften. Dank ihm wurden wir in die Welt der Metallschäume eingeweiht.

Kurzfassung

Bei unserem Projekt geht es darum mögliche Bauweisen für künstliche Muskeln zu suchen, die in der Praxis verwendbaren herauszufiltern und diese dann in ein bionisches System zu integrieren. In unserem Falle ist das bionische System der Oberarm-Unterarm-Komplex (also der Arm ohne die Hand). Dies ist die Aufgabe von Adrian Boos. Hierbei gibt es die Möglichkeit dielektrische Elastomer-Aktoren (sog. DEA) zu verwenden. Sie sind im Grunde Kondensatoren mit elastischen Dielektrika. Durch Coulomb-Kräfte ziehen diese sich zusammen. Stapelt man diese DEA oder rollt sie, so entsteht eine Elongation bzw. Kontraktion. Es gibt noch weitere Bauweisen für künstliche Muskeln, wie z.B. Krümmungsaktoren auf Basis von Bimetallstreifen. Jedoch haben wir uns bei der Arbeit eher auf die DEA konzentriert.

Zur Integrierung von Muskeln benötigt man ein anatomisches Vorwissen, damit man versteht, welcher Muskel wo ansetzt und wieviel Kraft dieser maximal aufwenden muss. Außerdem bietet dies auch noch die Chance, das gewollte Modell auf die jeweils genutzten Muskelbauweisen abzustimmen. Das ist die Aufgabe von Phuong Thanh Nguyen.

Wenn man Muskeln hat und weiß wie sie verlaufen benötigt man natürlich noch Knochen. Das macht Hoang Son Luu. Er hat dabei Metallschaum als mögliches Material gefunden. Metallschaum hat, wie der Name schon sagt, das Aussehen eines Schwamms aus Metall. Es funktioniert ähnlich wie ein Brot das sich aufgrund von Hefe bei Wärme ausdehnt, nur das dabei nicht Hefe genutzt wird die in einem Teig ist, sondern Titanhydrid in Aluminium. Diese Mischung nennt sich dann Halbzeug. Gibt man dieses in eine Form und erwärmt man diese, so schäumt es durch die Zersetzung des Titanhydrids auf. Man erhält einen Metallschaum mit einer bestimmten äußeren Form. Diese Möglichkeit fällt für uns jedoch leider aus, da das Herstellungsverfahren zwar im Grundeprinzip einfach, bei komplexeren Formen aber fast unmöglich wird. Daher hat Son einen weiteren Stoff untersucht: Bauschaum. Mit ihm wäre es möglich eine leichte, feste und geschlossoporige Struktur zu erzeugen, die dem inneren Knochen ähnelt. Weiterhin kann man auch eine Knochenhaut mit Epoxydharz simulieren.

Einleitung

Seit seinen Anfängen kopiert der Mensch seine Umwelt. Dabei ist einiges unter Beachtung der äußeren Struktur zu Stande gekommen, wie z.B. Flugzeuge, die in Vögeln ihr Vorbild fanden. Jedoch wurde nur selten die Innenstruktur der Lebewesen um uns herum genauer betrachtet und nachgebaut. Und wenn dies geschah war es meist so, dass der Mensch sie nur oberflächlich kopierte. So zum Beispiel auch bei Muskeln. Seit einiger Zeit existieren zwar Muskeln auf Basis von Öldruck, aber diese sind weder direkt ansteuerbar noch so kompakt wie die natürlichen Muskeln. Deswegen beschäftigen wir uns bei unserem Projekt mit künstlichen Muskeln, die sowohl kompakt, direkt ansteuerbar, als auch ähnlich kräftig wie ihre Vorbilder sind. Dabei wird aber auch betrachtet, wie sie sich in ein funktionierendes bionisches System integrieren lassen können. Wir führen dies beispielhaft am menschlichen Oberarm/Unterarm-Komplex durch.

Gliederung

1. Anatomische Vorbetrachtung	Seite 2
1.1 Bewegungsapparat	Seite 2
1.2 Gelenke	Seite 2
2. Die Anatomie des Oberarm-/Unterarm-Komplexes	Seite 3
2.1 Muskeln des Oberarm-/Unterarm-Komplex	Seite 3
2.2 Übersicht der Muskelfunktion bei Bewegung	Seite 3
2.3 Tabelle – Aufgabenbereiche der Muskeln bei Bewegungen	Seite 4
3. Die mathematischen und physikalischen Hintergründe	Seite 4
3.1 Skizze	Seite 4
3.2 Herleitung	Seite 5
4. Die Muskeln im menschlichen Oberarm	Seite 6
5. Künstliche Muskeln	Seite 7
5.1 Mögliche Modelle	Seite 7
5.2 Muskeln auf Basis von Kondensatoren mit elastischen Dielektrika (DEA)	Seite 7
5.2.1. Theoretische Betrachtungen	Seite 8
5.2.2. Mögliche Modelle	Seite 9
5.3 Krümmungsaktoren	Seite 10
5.3.1. Wirkprinzip	Seite 10
5.3.2. Bimetallstreifen	Seite 10
5.3.2.1. Funktionsweise	Seite 10
5.3.2.2. Mathematische Betrachtung	Seite 11
6. Knochen	Seite 12
6.1 Aufbau des Knochengerüsts	Seite 12
6.2 Knochen aus Metallschaum	Seite 12
6.2.1 Herstellung	Seite 12
6.2.2 Knochen aus Metallschaum	Seite 13
6.2.3 Spezifizierung	Seite 13
6.2.4 Probleme	Seite 13
6.3 Knochen aus Bauschaum	Seite 15
7. Quellen	Seite 17

Anatomische Vorbetrachtung

Für die Integrierung der Muskeln des Ober- und Unterarms in ein technisches System bedarf es eines fundierten Vorwissens in Anatomie. Daher betrachte ich zuerst den Bewegungsapparat des Oberarm/Unterarm-Komplexes und gehe danach näher auf die physikalischen sowie mathematischen Hintergründe ein.

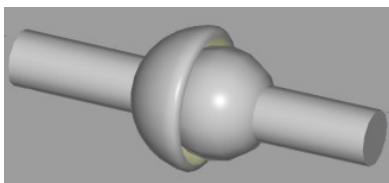
Bewegungsapparat

Der Bewegungsapparat besteht aus dem äußeren Knochenbausystem sowie dessen zugehörigen Unterstützungsorganellen (Muskelfasern, Sehnen u.a.), die beim Zusammenwirken motorische Arbeit verrichten.

Gelenke

Der menschliche Körper besitzt verschiedene Verbindungsmöglichkeiten für Knochen (Gelenke), die es uns ermöglichen uns zu bewegen und mit Muskelkraft andere Körper oder Objekte in Gang zu bringen, zu verändern oder zu berühren. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Knochengelenke anhand von Beispielen erläutert. Gegebenfalls wird eine Illustration zur Veranschaulichung dargestellt.

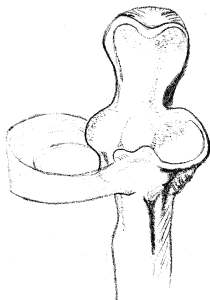
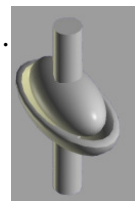
Die meisten Gelenkformen tragen ihren Namen aufgrund ihrer markant gestalteten Knochenenden, die meist wie geometrische Körper oder ähnlich aussehen. Dazu gehören auch ihre passgenauen Gegenstücke. Durch bestimmte Verzahnungen der Knochenenden und Einschränkungen in ihrer Beweglichkeit werden spezifische Bewegungsrichtungen festgelegt.



Ein Beispiel für **Kugelgelenke** befindet sich in der Schulter. Es ermöglicht uns unseren Oberarm hinsichtlich der drei Raumachsen anzuheben und abzusetzen, aus - und anzuspreizen oder nach innen bzw. nach außen zu rollen. Ein weiteres Kugelgelenk ist das Oberarm-Speichen-Gelenk. Jedoch verhindert das Bindegewebe

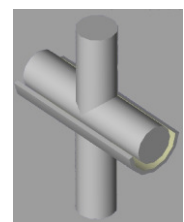
„Membrana interossea antebrachii“ (Zwischenknochenmembran des Unterarms), das die Elle und die Speiche verbindet, eine Abduktion (Abspreizung) und Adduktion (Anspreizung) dieser beiden Unterarmknochen.

Das **Eigelenk** ist in der Lage einen Knochen in vier Richtungen zu bewegen. So kann z.B. die Hand an der proximalen Stelle (zum Rumpf hin) Vor- oder Rückbewegungen, wie auch Flexionen (Beugungen) und Extensionen (Streckungen), ausführen. Zudem ist es möglich die Hand in radialer (Daumenseite), aber auch zur in ulnarer Richtung (Kleinfingerseite) zu bewegen.



Ein Vertreter der **Rad- oder Zapfgelenke** ist das Oberarm-ElLEN-Gelenk, welches links dargestellt ist. Ein ringförmiges Band, in diesem Falle das „Ligamentum anulare radii“ (Ringband der Speiche), das an der Elle entspringt, umfasst die Speiche. Dieses Band kann eine Innen- sowie Außenrotation des Unterarm-Komplexes realisieren, ohne dass der Oberarm sich dabei bewegt.

Das **Scharniergelenk** verbindet den Oberarm mit der Elle. Der Mechanismus des Scharniergelenks ist nur in der Lage eine Flexion (Beugung) oder eine Extension (Streckung) des Unterarm-Komplexes in Gang zu setzen.



Wegen seines **Sattelgelenkes** kann der Daumen in vier Hauptbewegungsrichtungen bewegt werden, und zwar Flexion (Beugung), Extension (Streckung), Adduktion (Anspreizung), sowie Abduktion (Abspreizung).



Die Anatomie des Oberarm-/Unterarm-Komplexes

Die Funktion aller Muskeln, Bändern sowie Sehnen sind in sofern wichtig, als dass sie unterstützende Aufgaben innehaben.

Sehnen sind immer Teile von Muskeln und verbinden diese gleichzeitig mit den Knochen. Zugsehnen ziehen Muskeln in ihre Hauptrichtung. Drucksehnen sind Sehnen, die den Knochen umschmiegen. Lange Sehnen sind lang und schmal. Darüber hinaus gibt es noch die flachen oder auch platten Sehnen (genannt Aponeurosen). Kurze Sehnen sind kaum zu erkennen, deshalb sieht man nur den fleischigen Ursprung bzw. Ansatz von Muskeln. Als Ursprünge bezeichnet man jene Stellen, an denen Sehnen an einer proximalen Lage eines Knochen positioniert sind. Ansätze sind jene Befestigungspunkte der Sehne, die zur distalen Seite (zum Ende des Rumpfes hin) eines Knochens hinführen.

Muskeln des Ober-/Unterarm-Komplexes

Meine Herausforderung bestand darin, die Anatomie des menschlichen Oberarm- / Unterarm-Komplexes zu studieren. Dies ist eine Zusammenfassung aller Muskeln sowie ihrer Sehnen, die eine bedeutende Rolle für die Konstruktion eines künstlichen Armes spielen.

Die uns bekanntesten Muskeln eines Oberarms sind sowohl der Bizeps als auch der Trizeps. Da im Arm mehr als acht Muskeln existieren, beschränke ich mich auf eine beispielhafte Beschreibung von zwei Akteuren. In der Fachsprache der Anatomie werden diese M. biceps brachii und M. triceps brachii (Armstrecker bzw. dreiköpfiger Oberarmmuskel) genannt. Die Abkürzung M. steht für den lateinischen Begriff Musculus. Der M. biceps brachii besteht aus zwei (einem langen und kurzen) „Kopf“, weshalb er auch als zweiköpfiger Oberarmmuskel bezeichnet wird. Der laterale (seitlich, von der Medianebene weg) Teil des Bizeps trägt den Namen Caput longum, der mit einer langen Zugsehne beginnt. Das Caput breve, die zur Medianseite gerichtete Muskelpartie des Bizeps, ist ebenfalls mit einer Zugsehne am Ursprungspunkt verbunden (siehe Grafik: Die Muskeln im menschlichen Oberarm, Seite 6). Caput longum und breve münden in einer flachen Drucksehne, der Aponeurosis musculi bicipitis (veraltet auch Lacertus fibrosus - lat. sehniger Muskelursprung), welche über den M. pronator teres (Runder Einwärtsdreher) und weitere Muskeln, wie dem M. flexor carpi radialis (Speichenseitiger Handbeuger), ein Flexor der Hand, verläuft.

Der M. triceps brachii ist der dreiköpfiger Oberarmmuskel, welcher in Caput mediale, laterale, sowie longum unterteilt werden. Auf Druckwiderstand bei einer Extension agieren Caput longum und laterale. Zusätzlich entspringt ein Knorrenmuskel (M. aconeus) am Caput mediale. Dies ist ein einzelner Synergist der bei jeder Extension mitwirkt. Dieser Muskel unterstützt die Pronation des Unterarm-Komplexes, da er die Elle und die Speiche bei einer Einwärtsdrehung mitzieht. Außerdem schützt er die Gelenkkapsel des Ellbogens.

Übersicht der Muskelfunktionen bei Bewegung

Bei jeder Veränderung der Position des Ober- wie Unterarmes kontrahieren oder dehnen sich bestimmte Muskelpartien. Hier werden einige Fachbegriffe der Anatomie erklärt: Agonisten (Spieler) sind kontrahierende Muskeln, Antagonisten (Gegenspieler) hingegen sind gedehnte Muskeln. Synergisten (Mitspieler) gehören zu einer Muskelgruppe, die im Allgemeinen Agonisten in ihren Funktionen unterstützen bzw. die kinematische Funktionen erst ermöglichen. Extensoren sind für die Extension (Streckung) verantwortlich. Pronatoren vollführen eine Pronation, z.B. eine Einwärtsdrehung des Armes. Die Supinatoren hingegen sind in der Lage, den Arm in die entgegengesetzte Richtung zu drehen.

Bewegungen aller Arten haben festgelegte Agonisten, Synergisten und Antagonisten. Allerdings können die Spieler und Gegenspieler bei jeder Bewegung wechseln. Kein Bewegungsablauf kann ohne einen Agonisten sowie Antagonisten ausgeführt werden. Die Agonisten und die Synergisten werden bei der jeweiligen Gegenbewegung zu Antagonisten, während sich Antagonisten in Agonisten und Synergisten aufspalten.

Tabelle – Aufgabenbereiche der Muskeln bei Bewegungen

Dargestellt ist eine schematische Übersicht über die Aufgabenbereiche verschiedener Muskeln bei unterschiedlichen Bewegungen.

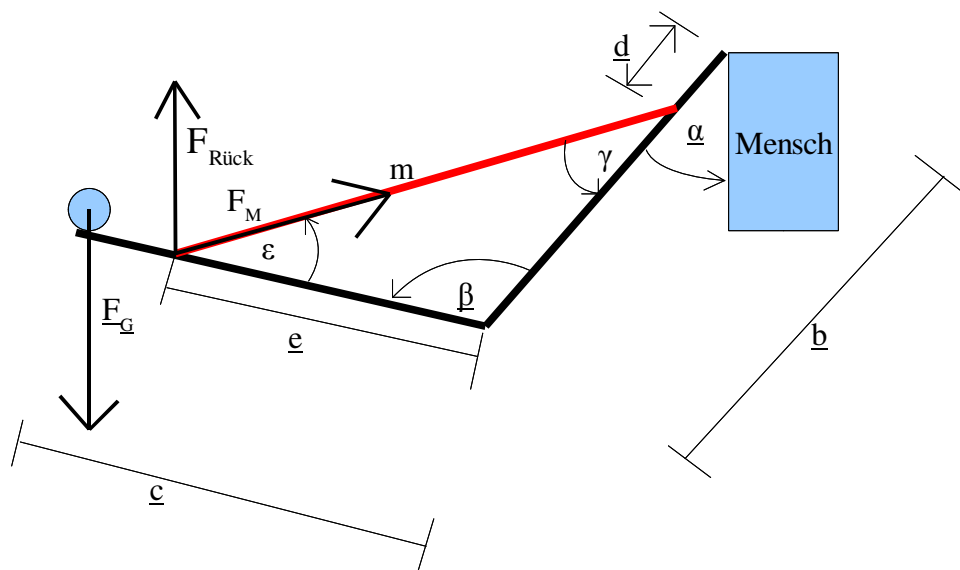
Bewegung	Agonist(en)	Synergist(en)	Antagonist(en)
Flexion	M. biceps brachii (zweiköpfiger Oberarmmuskel)	M. brachialis (Armbeuger)	M. Triceps brachii (Armstrecker bzw. dreiköpfiger Oberarmmuskel)
Extension	M. triceps brachii (hauptsächlich der Coput mediale)	M. aconeus	M. biceps brachii
Pronation	M. pronator teres (Runder Einwärtsdreher)	M. pronator quadratus (viereckiger Einwärtsdreher)	M. biceps brachii
Supination	M. biceps brachii	M. supinator (Auswärtsdreher)	M. brachioradialis

Die mathematischen und physikalischen Hintergründe

Nun soll untersucht werden, wie viel Kraft ein Aktor beim Heben eines Objektes tatsächlich benötigt.

Skizze:

Die Abbildung stellt einen Ober-/Unterarm-Komplex schematisch dar.



Herleitung:

gegeben: $b; c; d; e; \alpha; \beta; F_G$

gesucht: F_M

$$\varepsilon = 180^\circ - \beta - \gamma$$

nach Kosinussatz gilt:

$$m = \sqrt{(b-d)^2 + e^2 - 2 \cdot (b-d) \cdot e \cdot \cos \beta}$$

Nach Sinussatz gilt:

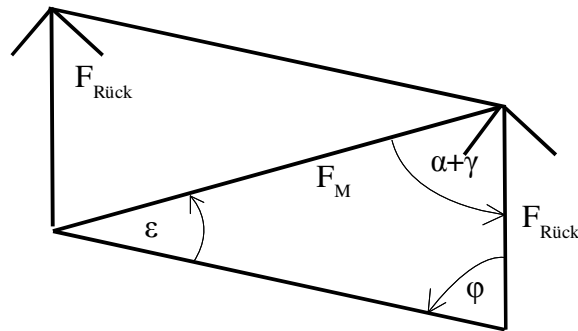
$$\frac{\sin \varepsilon}{(b-d)} = \frac{\sin \beta}{m} \Leftrightarrow \varepsilon = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \beta \cdot (b-d)}{m} \right)$$

$$\frac{\sin \gamma}{e} = \frac{\sin \beta}{m} \Leftrightarrow \gamma = \sin^{-1} \left(\frac{e \cdot \sin \beta}{m} \right)$$

Nach Hebelgesetz gilt:

$$F_G \cdot c = F_{\text{Rück}} \cdot e \Leftrightarrow F_{\text{Rück}} = \frac{F_G \cdot c}{e}$$

$$\varphi = 180^\circ - \alpha - \gamma - \varepsilon$$



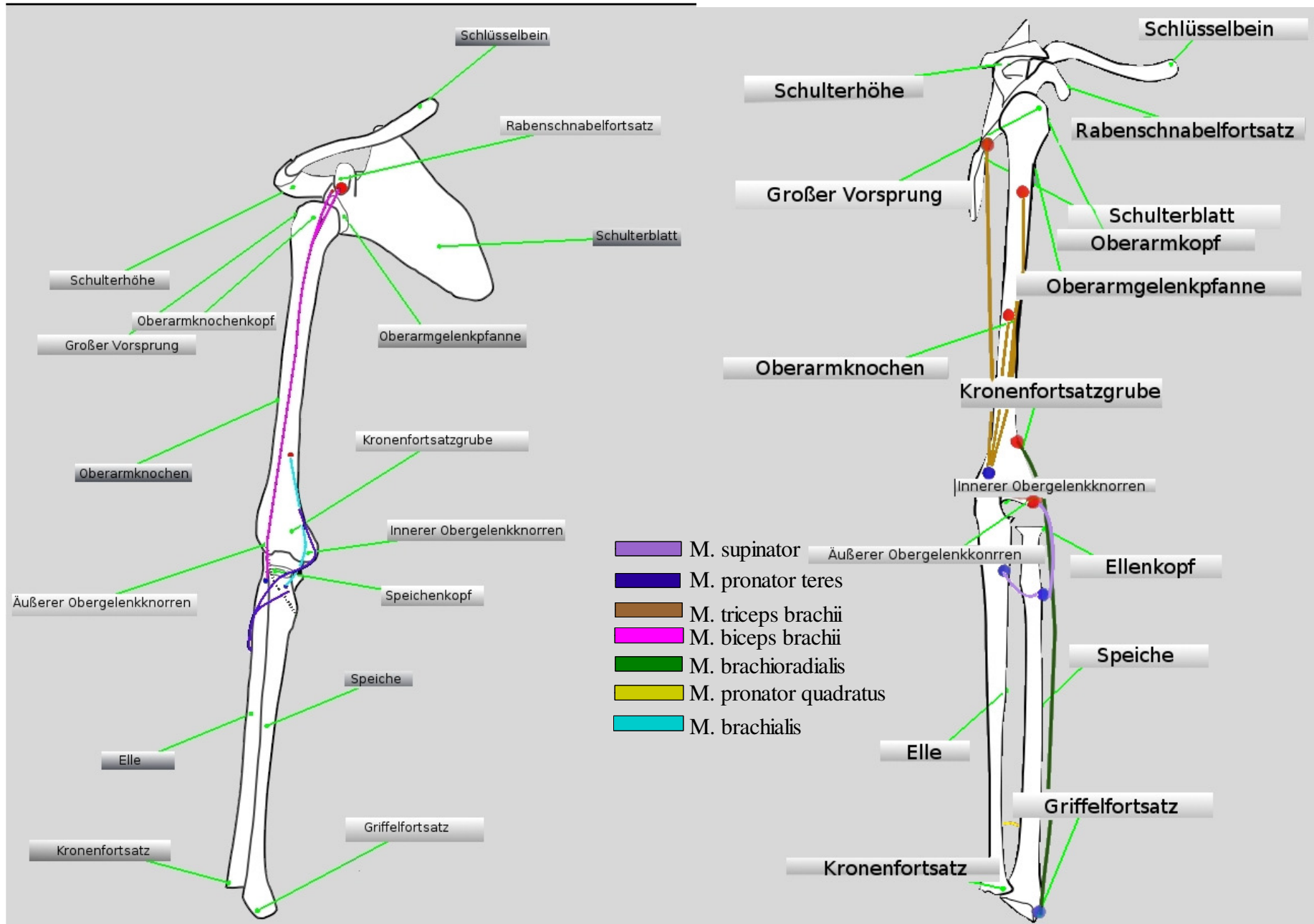
Es gilt im Vektorparallelogramm:

$$\varphi = 180^\circ - \alpha - \gamma - (180^\circ - \beta - \gamma) \Leftrightarrow \varphi = \beta - \alpha$$

Nach Sinussatz gilt im Vektorparallelogramm

$$\frac{F_{\text{Rück}}}{\sin(\varepsilon)} = \frac{F_M}{\sin(\varphi)} \Leftrightarrow F_M = \frac{\sin(\varphi) \cdot F_{\text{Rück}}}{\sin(\varepsilon)} \Rightarrow F_M = \frac{m \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot F_G \cdot c}{e \cdot (b-d) \cdot \sin(\beta)}$$

$$\Leftrightarrow F_M = \frac{(\sqrt{(b-d)^2 + e^2 - 2 \cdot (b-d) \cdot e \cdot \cos \beta}) \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot F_G \cdot c}{e \cdot (b-d) \cdot \sin(\beta)}$$



Die Muskeln im menschlichen Oberarm

Künstliche Muskeln

Es gibt mehrere Möglichkeiten Maschinenteile herzustellen, die sich entlang einer bestimmten Richtung ausdehnen bzw. zusammenziehen können. Doch die meisten sind nicht kompakt genug, d.h. sie benötigen zusätzliche große Apparaturteile um Elongationen überhaupt zustande kommen zu lassen. Oder sie sind nicht direkt ansteuerbar bzw. einfach zu fehlerbehaftet. Daher besteht die Hauptaufgabe bei der Suche nach künstlichen Muskeln erst einmal darin eine Apparatur zu finden die den Anforderungen nach Kompaktizität, direkter Ansteuerbarkeit und Fehlerresistenz und maximalem Kraftaufwand genügt.

Mögliche Modelle

Es gibt ein paar Möglichkeiten für künstliche Muskeln. Da wären zuerst einmal die sogenannten dielektrischen Elastomer-Aktoren (DEA). Sie sind sehr kompakt und beschränken sich quasi nur auf Kabel, die zu einem DEA-Zylinder, der sich zusammenzieht, hinführen. Man braucht hierfür nur eine Spannungsquelle, und pro Muskel bzw. pro Agonist-Antagonisten-Paar minimal einen Regler. Die Muskeln sind direkt ansteuerbar, sehr kompakt und relativ fehlerresistent (bei starken Temperaturänderungen ist die Kontraktion allerdings nur schwer kalkulierbar). Außerdem kann der DEA für seine Größe verhältnismäßig hohe Arbeit verrichten. Ein Nachteil dieses Muskeltyps ist, dass er schnell warm wird und sich durch Spannungsüberschlag sehr schnell selbst zerstört. Auch ist die Herstellung in Handarbeit nahezu unmöglich oder zumindest sehr schwer.

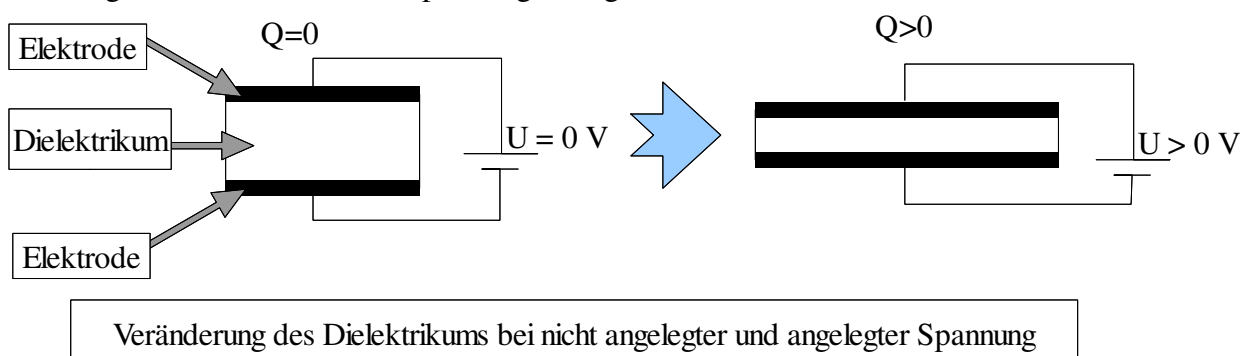
Eine weitere Möglichkeit bilden Bimetall-Muskeln. Sie sind sehr nah am menschlichen Sarkomer, also der eigentlichen Bewegungseinheit des Muskels orientiert. Sie sind ebenfalls, wie schon der DEA, kompakt und direkt ansteuerbar. Sie können große Lasten bewältigen. Man kann, wenn man die richtigen Mittel für Mikromechanik besitzt, den Muskel auch sehr klein und effektiv bauen. Das eigentliche Problem beim Bimetall-Muskel ist die Temperatur. Er funktioniert zwar auf Basis von Temperaturänderung, jedoch ist die Kontrolle der Temperatur nur um so schwieriger, wenn man schnelle Kontraktionen des Muskels wünscht. Damit ergibt sich das Problem der Einstellzeit. Will man die Temperaturfehler in einem kalkulierbaren Maße halten, so muss man längere Einstellzeiten in Kauf nehmen.

Unsere Hauptschwerpunkt bei der Forschung nach Muskeln lag insgesamt aber bei den DEA und nicht so sehr bei den Bimetall-Muskeln.

Muskeln auf Basis von Kondensatoren mit elastischen Dielektrika (DEA)

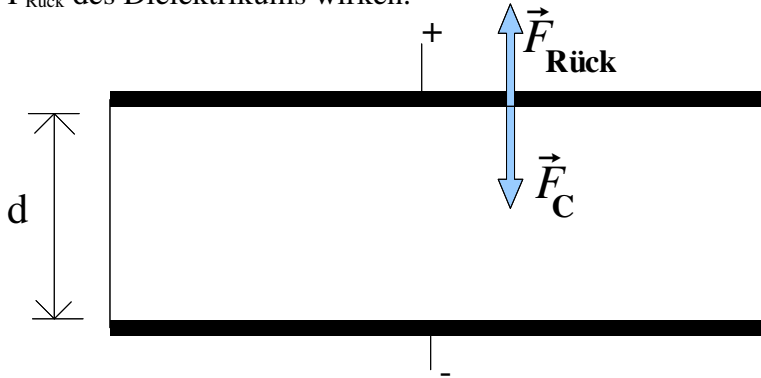
Die Idee ist einfach: Es ist bekannt, dass sich zwei Kondensatorplatten bei angelegter Spannung gegenseitig anziehen bzw. bei Gleichpolung abstoßen. Hat man Luft zwischen den locker aufgehängten Platten, würden sie sich anziehen, bis sie nahe genug aneinander sind sodass ein Entladungsblitz entstehen kann.

Nimmt man ein elastisches Dielektrikum, welches man zwischen zwei Kondensatorplatten legt, so bewegen sich die Platten nicht so schnell aufeinander zu, da hier die rücktreibende Federkraft des Dielektrikums der Plattenanziehung entgegenwirkt. Dadurch wird der Punkt für einen Entladungsblitz auf eine höhere Spannung verlegt.



Theoretische Betrachtungen

Betrachten wir das Grundwirkprinzip eines jeden dielektrischen Elastomer-Aktors (DEA). Dazu betrachtet man nur eine Folie, die auf beiden Seiten mit entgegengesetzt gepolten Elektroden beschichtet sind. Die Elektroden sind dehnbar. Der Aktor ist unbeladen. Es wirken bei angelegter Spannung Coulomb-Kräfte auf die Elektroden. Diese wird im Folgenden mit F_C bezeichnet. Damit die Elektroden nicht einfach bis zur Berührung zusammenschnellen, muss eine rücktreibende Federkraft $F_{\text{Rück}}$ des Dielektrikums wirken.



Es gilt also: $\vec{F}_C = -\vec{F}_{\text{Rück}}$

Für die Coulomb-Kraft \vec{F}_C gilt:
$$\vec{F}_C = \frac{Q^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

Q: Ladung

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante

ϵ_r : Dielektrizitätszahl des Dielektrikums

A: Plattengröße

d: Plattenabstand

Da es sich hierbei um einen Plattenkondensator handelt, wissen wir auch noch, dass für die Kapazität C gilt:

$$C = \frac{Q}{U} \Leftrightarrow Q = C \cdot U$$

Wir wissen außerdem:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Daraus folgt:

$$Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A \cdot U}{d}$$

Setzt man dies nun ein, erhält man für die Coulomb-Kraft:

$$F_C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 \cdot d^2}$$

Der Plattenabstand verkleinert sich beim Zusammenziehen um Δd . Daher schreiben wir statt d $d - \Delta d$. Damit lautet die Formel jetzt so:

$$F_C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 \cdot (d - \Delta d)^2}$$

Für die rücktreibende Kraft $F_{\text{Rück}}$ gilt nach Hook'schem Gesetz (mit Δd als Längen- bzw. Dickenänderung):

$F_{\text{Rück}} = \frac{E \cdot \Delta d \cdot A}{d}$, wobei E der Elastizitätsmodul des Dielektrikums ist
 Zusammenfassend gilt also für Coulomb–Kraft und rücktreibende Kraft:

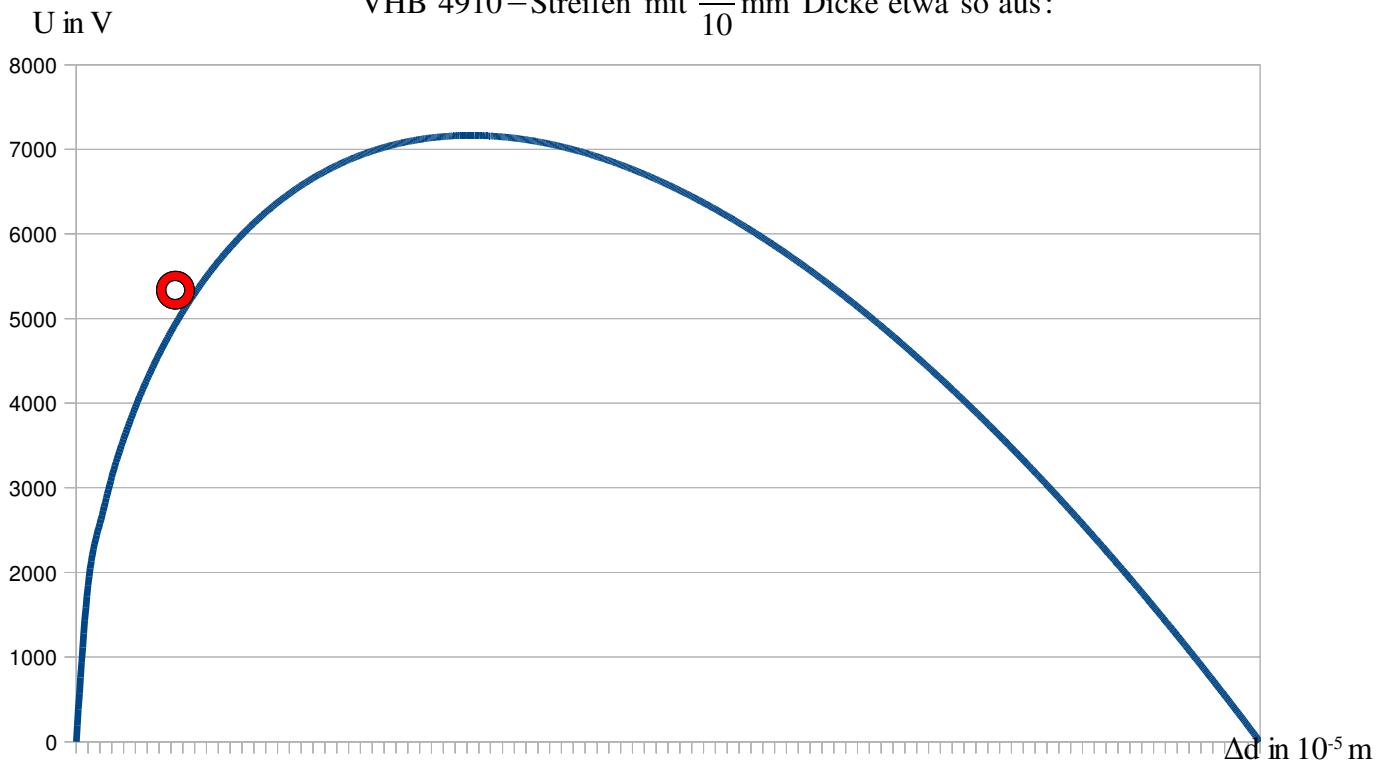
$$\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot U^2}{2 \cdot (d - \Delta d)^2} = \frac{E \cdot \Delta d \cdot A}{d}$$

$$\Leftrightarrow U = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \Delta d \cdot (d - \Delta d)^2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot d}}$$

Einheitenüberprüfung mit SI–Einheiten:

$$[U] = \left[\sqrt{\frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^2}{\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \cdot \text{m}}} \right] = \left[\sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{V} \cdot \text{m}}{\text{C}}} \right] = \left[\sqrt{\frac{\text{V}^2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{m}}} \right] = [\text{V}]$$

Damit stimmt schon mal die Einheit. Die zugehörige Funktion sieht z.B. für einen VHB 4910–Streifen mit $\frac{1}{10}$ mm Dicke etwa so aus:

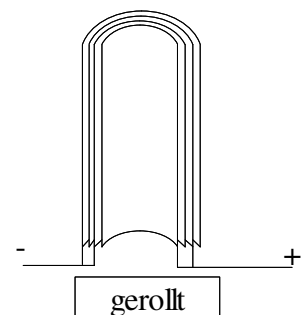
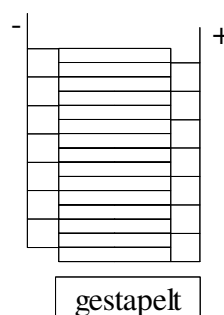


Die Durchschlagfestigkeit für VHB 4910 beträgt ca. 56,25 kV/mm. Damit ergibt sich, dass Δd nur maximal $9,13 \cdot 10^{-3}$ mm werden darf, da es sonst einen Entladungsblitz gibt, der den Muskel zerstören würde. D.h. maximal 5,1 kV bei einem Muskel dieser Dicke anlegen.

Mögliche Modelle

Es gibt mehrere Möglichkeiten diese Elongation bzw. Kontraktion zu nutzen. Zwei davon sind das sogenannte „stacked“ (gestapelte) Modell und das „rolled“ (zusammengerollte) Modell.

Der gestapelte Muskel ist im theoretischen Prinzip einfach, in der Praxis jedoch fast nicht ohne spezielle Maschinen herstellbar. Er funktioniert so, dass man, wie der Name schon sagt, viele



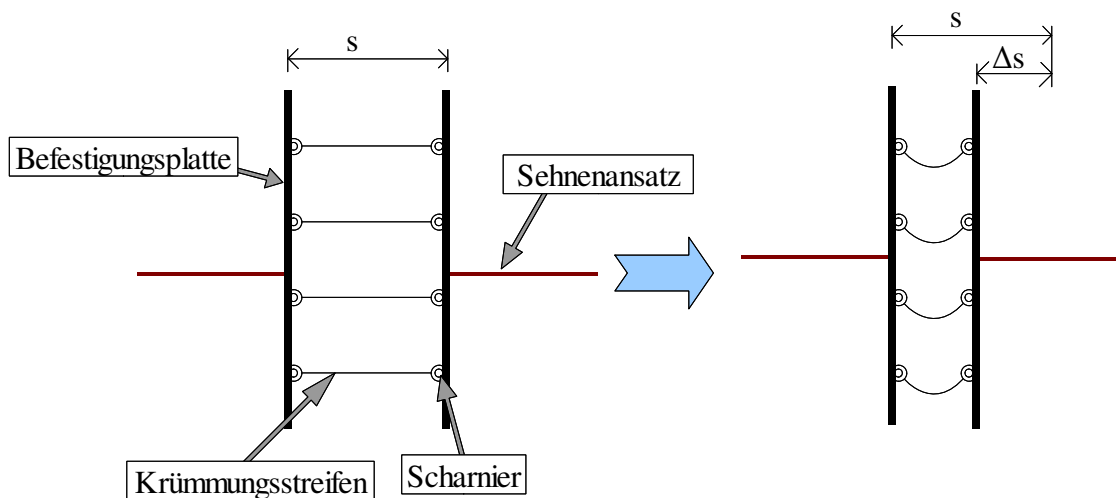
Einschicht-Aktoren übereinanderstapelt und dabei von Schicht zu Schicht immer die Elektrodenpolung wechselt. Der gerollte Aktor ist zwar in der theoretischen Beschreibung etwas komplexer, jedoch einfacher zu bauen.

Krümmungsaktoren

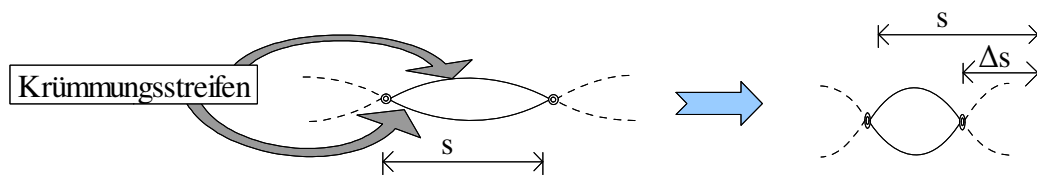
Wir haben uns neben den Aktoren, deren Komponenten sich entlang der Bewegungsrichtung des Gesamtktors ausdehnen bzw. zusammenziehen noch zwei weitere Möglichkeit zur Erstellung künstlicher Muskeln überlegt. Diese sind jedoch nicht Hauptschwerpunkt unserer Arbeit.

Wirkprinzip

Man nehme einen Streifen, der sich krümmen kann, und hänge ihn zwischen zwei Platten an beiden Enden mit Scharniergeelenken auf. So erhält man einen Einschichten-Aktor. Koppelt man diesen Aktor mit weiteren dieser Art entsteht ein Muskel mit beliebig herstellbarer Kraft.



Eine andere Möglichkeiten zur Ausnutzung der Krümmung eines Streifens liegt darin, dass man immer zwei Streifen an beiden Enden über Scharniere aneinander befestigt, sodass sich die beiden Streifen aufeinander zu krümmen.

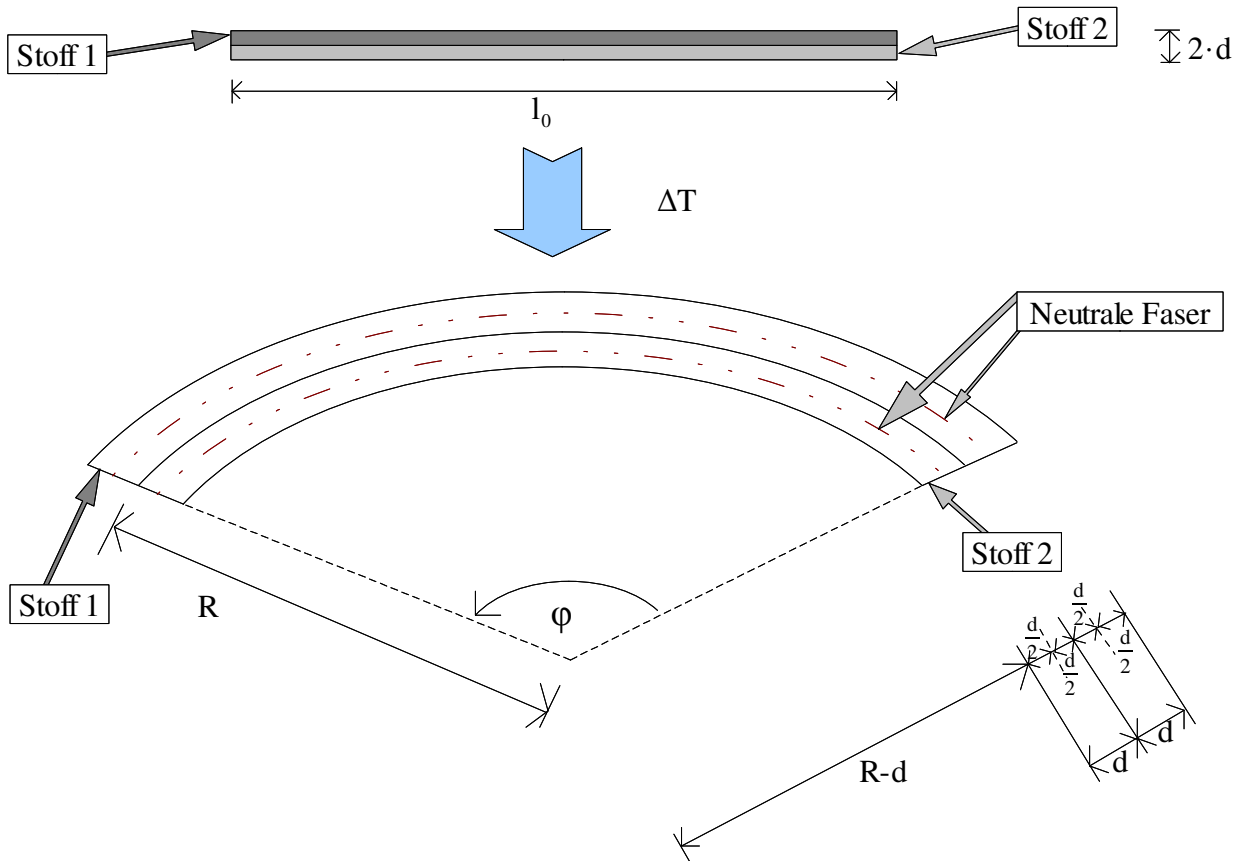


Natürlich können auch die beiden zuvor genannten Modelle miteinander kombiniert werden. Im folgenden wird die Möglichkeit der Nutzung von Bimetallen als Streifen näher beschrieben. Für Krümmungsstreifen können auch andere Stoffe verwendet werden, wie z.B. Polypyrrol-Gold-Streifen. Diese sind aber meistens nur sehr schwer zu realisieren und sind so teuer, dass sich damit kaum günstig Muskeln herstellen lassen.

Bimetallstreifen

Funktionsweise:

Aufgrund verschiedener Längenausdehnungskoeffizienten biegen sich zwei miteinander verbundene Stoffe bei Temperaturänderung in eine bestimmte Richtung. Generell gilt die Faustregel: Je stärker der Unterschied im Längenausdehnungskoeffizienten ist, desto stärker krümmt sich der Streifen. Doch wie genau lautet die Mathematik dahinter?



l_1 : Länge der neutralen Faser von Stoff 1 nach der Temperaturänderung um ΔT
 l_2 : Länge der neutralen Faser von Stoff 2 nach der Temperaturänderung um ΔT
 neutrale Faser: die neutrale Faser liegt bei beiden Stoffen immer auf der Hälfte ihrer Dicke

Mathematische Betrachtung:

Es gilt für relativ kleine Dicken d (unter der Annahme, dass die Platten sich in Dickenrichtung nur vernachlässigbar gering ausdehnen):

$$\begin{aligned}
 \varphi \cdot \left(R + \frac{d}{2}\right) &= l_1 \quad \text{und} \quad \varphi \cdot \left(R - \frac{d}{2}\right) = l_2 \Rightarrow \frac{l_1}{R + \frac{d}{2}} = \frac{l_2}{R - \frac{d}{2}} \Leftrightarrow (l_1 - l_2) \cdot R = \frac{(l_1 + l_2) \cdot d}{2} \\
 &\Leftrightarrow R = \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot l_2}{l_1 - l_2}\right)
 \end{aligned}$$

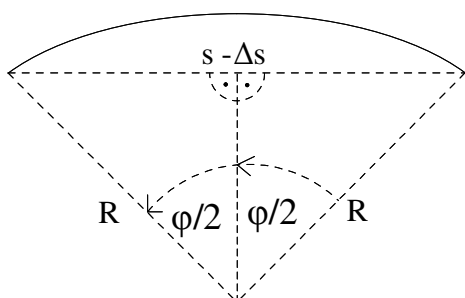
nach den Gesetzen der Thermodynamik gilt nun mit α als der jeweilige Längenausdehnungskoeffizient:

$$l_1 = l_0 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad l_2 = l_0 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T$$

Einsetzen:

$$R = \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot l_0 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T}{l_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}\right) \Leftrightarrow R = \frac{d}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}\right)$$

Zur Berechnung von Δs (siehe Zeichnung vorherige Seite) mit $s = l_0$:



$$s - \Delta s = l_0 - \Delta s = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \Leftrightarrow \Delta s = l_0 - 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

$$\text{mit } \varphi \cdot \left(R + \frac{d}{2}\right) = l_1:$$

$$\Leftrightarrow \Delta s = l_0 - \sin\left(2 \cdot \Delta T \cdot \frac{l_0 \cdot \alpha_1 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{d \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)}\right) \cdot d \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}\right)$$

Knochen

Aufbau des Knochengerüsts

Zur Simulation eines menschlichen Arms werden nicht nur Muskeln gebraucht, sondern auch Knochen.

Im menschlichen Oberarm-Unterarm-Bereich sind das vor allem der Oberarmknochen (Humerus), Elle und Speiche. Wenn wir Knochen herstellen ist das Ziel diese möglichst nah am menschlichen Vorbild zu orientieren.

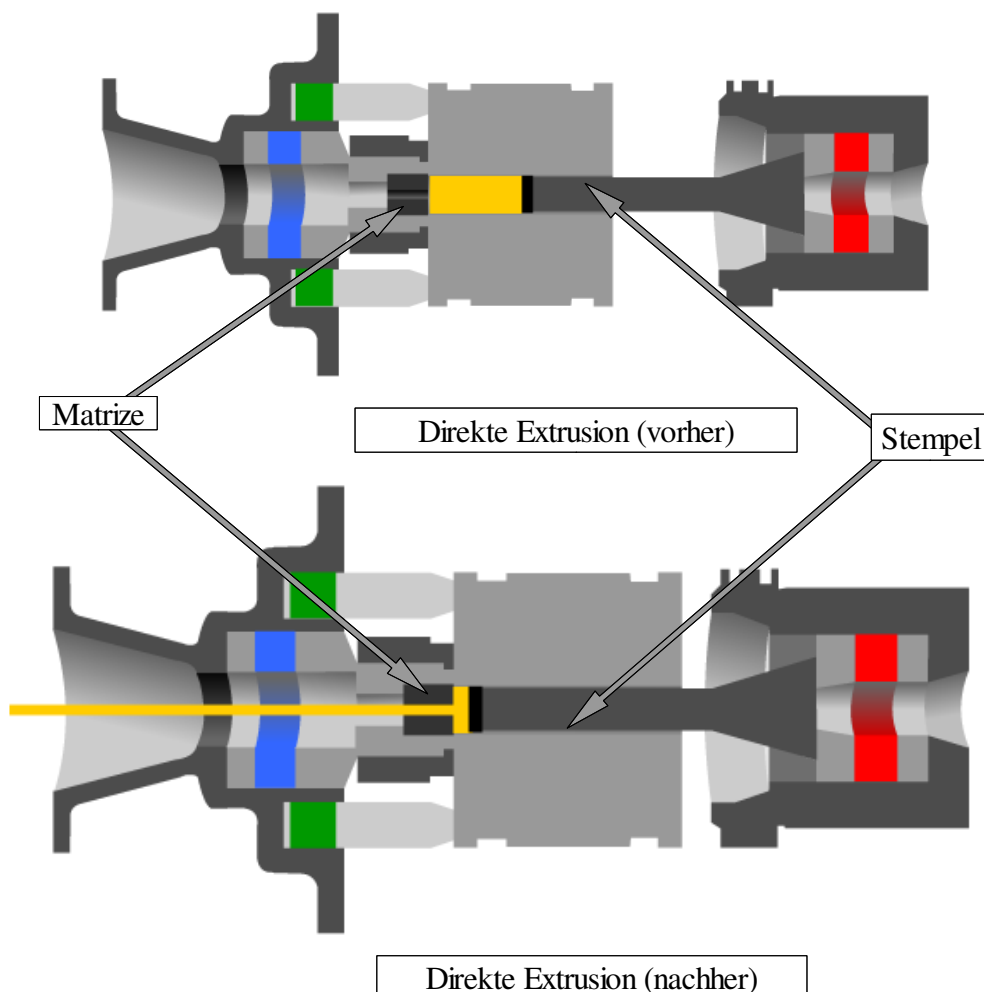
Für die Herstellung haben wir uns mehrere Verfahren überlegt. Dazu im Folgenden mehr.

Knochen aus Metallschaum

Bei Metallschaum handelt es sich um flüssiges Metall, dass aufgeschäumt wird. Aufgrund des niedrigen Gewichtes und der gleichzeitigen hohen Festigkeit, ist Metallschaum besonders für die Simulation von Knochen geeignet. Es ist wegen seiner inneren Porosität und glatten Außenhaut besonders nahe am menschlichen Knochen orientiert.

Herstellung

Für die Herstellung von Metallschaum muss man bei Temperaturen von 600°C bis 700°C arbeiten. Die Voraussetzung für die Produktion von Metallschaum ist die Herstellung eines Halbzeugs. Solch ein Halbzeug setzt sich zusammen aus den notwendigen Pulvern, die über ein Verfahren zu einem Feststoff komprimiert werden. Dieses Verfahren nennt sich direkte Extrusion (Abb.: Direkte Extrusion (vorher) ^[1]) und (Abb.: Direkte Extrusion (nachher) ^[1]).



Allgemeine Beschreibung:

In der Abbildung „Direkte Extrusion (vorher)“ sieht man ein gelbes Rechteck, welches die beiden Komponenten des Halbzeugs darstellen soll. Die Pulvermischung wird von allen Seiten eingeschlossen. Oberhalb und unterhalb ist das Halbzeug von einem Aufnehmer umgeben, welcher hier grau dargestellt wird. Die rot, grün und blau eingezeichneten Bestandteile sollen für die Stabilität und den nötigen Druck beim Extrusionsvorgang sorgen.

Bevor es zum Extrusionsvorgang kommt, muss das Pulvergemisch erhitzt werden. Es ist zu beachten, dass der angestrebte Wert kurz unterhalb der Schmelztemperatur liegt, diese jedoch nicht überschreitet. Ist dies erreicht, kann das Halbzeug mit dem Stempel durch die Matrize gedrückt werden.

In der Abbildung „Direkte Extrusion (nachher)“ ist das durch den Stempel zusammengepresste Halbzeug zu sehen. Durch Sintern und hohen Druck wurde die Verfestigung des Halbzeugs erreicht.

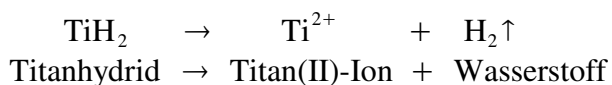
Spezifizierung:

Ursprünglich beabsichtigen wir, Aluminiumpulver zu verwenden und Titanhydrid als Aufschäummittel zu nutzen. Beide Pulver wollten wir zu einem Halbzeug komprimieren.

Erhitzt man dieses Halbzeug auf die erforderliche Temperatur, führt eine chemische Reaktion zum Aufschäumen, wodurch der gewünschte Metallschaum entsteht.

Das im Halbzeug enthaltene Titanhydrid hat seine Zersetzungstemperatur bei 600°C. Wird diese Temperatur erreicht, wird Wasserstoff freigesetzt.

Die Zersetzung von Titanhydrid kann durch folgende chemische Reaktion dargestellt werden:



Die Schmelztemperatur von Aluminium beträgt 660°C. Dabei verändert sich der Aggregatzustand von fest auf flüssig. Man bringt das Halbzeug zuerst auf die Zersetzungstemperatur von Titanhydrid. Dort spaltet sich das Titanhydrid, wie oben beschrieben in Titan(II)-Ionen und Wasserstoff auf. Der Wasserstoff kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht entweichen, da das Aluminium noch im Festzustand ist.

Erhitzt man nun weiter auf die Schmelztemperatur von Aluminium, so kann sich der Wasserstoff fast ungehindert ausdehnen. Es entsteht, wie bei einem Luftballon den man aufbäst, eine Metallblase. Jetzt sind aber durch die Komprimierung und vorherige Durchmischung des Aluminiums und Titanhydrids überall kleine Metallbläschen im Halbzeug. Es entsteht ein Metallschaum. Nun muss die Temperatur schnell wieder heruntergeregelt werden, damit das aufgeschäumte Halbzeug nicht in sich zusammenfällt. Man erhält eine geschlossenenporige Struktur.

Probleme

Um dieses Herstellungsverfahren für die Herstellung von Knochen nutzen zu können, müsste man Negative der Knochen herstellen. Das Material sollte dabei Ton sein, weil ausgehärteter Ton bei solchen Temperaturen weiterhin beständig bleibt. Für jeden Knochen hätte man dann zwei Negativhälften, die zusammengelegt das gesamte Negativ des Knochens ergeben.

Für den Ort für die Herstellung Metallschaum haben wir das Helmholtz Zentrum kontaktiert und sie um Rat gefragt, ob unsere Idee zu verwirklichen sei. Über einer langen Zeit haben wir per E-Mails Kontakt mit Professor Garcia-Moreno aufgenommen. Er war bereit uns zu helfen, jedoch hatte er einige Probleme geschildert, die die Verwirklichung unserer Metallschaumknochen zu großen Schwierigkeiten führt.

Nachdem er sich mit seinen Kollegen über unsere Idee abgesprochen hat, hat er festgestellt, dass die Herstellung solcher Formen mit hohem Aufwand betrieben werden müsste. Metallschäume ließen sich nicht einfach modellieren oder in einer Form herstellen. Bei unseren Überlegungen hätten wir die Reaktivität von Aluminium vernachlässigt.

Mögliche Folgen könnten sein:

Betrachtet man nicht, welche Temperatur in der Umgebung herrscht, wirkt Aluminium als sehr gutes Reduktionsmittel, sogar bei Raumtemperatur. Aluminium oxidiert sehr gerne und ist im Stande viele Moleküle zu reduzieren.

Ist die Schmelztemperatur von Aluminium erreicht, würde das Aluminium als Schmelze in der Form vorliegen. Als Schmelze wäre das Aluminium im Stande eine chemische Reaktion mit Stahl einzugehen. Das Eisen würde sich in Aluminium lösen und beim Erstarren käme es zu einer Ausbildung von Nadeln.

Wie schon oben erwähnt, soll das Material unserer Form aus Ton bestehen. Im Ton ist Quarz enthalten. Aluminium in Form einer Schmelze wäre auch im Stande Silikate auszubilden bzw. Alumosilicate. Alumosilicate entstehen, wenn es zu einem Austausch von Silizium(IV)-Ionen (Si^{4+}) aus dem Quarz mit den Aluminium(III)-Ionen (Al^{3+}) kommt. Alumosilicate sind chemisch gesehen substituierte Silicate, in denen der Austausch von Ionen stattgefunden hat. Demzufolge würde sich die Stoffmenge in der Aluminiumschmelze verringern und die Schmelze würde sich bildlich gesehen verdünnen. Die Silizium (IV)-Ionen würden sich zwar durch die freigewordenen Elektronen aus dem Aluminiumatom reduzieren, welches den Platz vom Siliziumatom im Quarz eingenommen hat, aber das Silizium würde sich sofort verfestigen. Dies würde zur Folge haben, dass der entstandene Schaum Silizium als Störelemente in sich tragen würde und sich das Gesamtgewicht sich deutlich unnötig für den Muskel erhöhen würde.

Anschließend ist noch zu sagen, dass Aluminiumschaum beim Erstarren sehr schrumpfen kann. Dies kann zur Folge haben, dass Oberflächenrisse sich ausbilden können, falls die Schmelze eine chemische Reaktion mit der Form eingegangen ist. Eine weitere Folge ist natürlich, dass es zu Abweichungen der gewünschten Formen kommen kann.

Als Schlussfolgerung müsste man die Temperatur im richtigen Moment herabsetzen, solange der Aluminiumschaum noch wächst, damit man den Schrumpfeffekt kompensieren kann.

Aus den möglichen entstehenden Folgen, die gerade aufgelistet wurden, haben wir uns überlegt, welche Form am Besten passen muss, damit man überhaupt ordentlichen Metallschaum herstellen kann.

Zuallererst muss die Form sehr stabil sein und hohen Temperatur aushalten können. Weiterhin muss sie auch bei höheren Temperaturen formstabil sein.

Als Materialien kann man alles verwenden, dessen Schmelztemperatur möglichst mit einem weiten Abstand höher ist als die des Aluminiums.

Als Beispiel kann man eine Stahlform verwenden, die mehrere Millimeter dick ist. Zur erweiterten Stabilisierung bei höheren Temperaturen sollten Verstrebungen eingebaut werden, die zum Beispiel aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) aufgebaut sind. Als weiteren positiven Vorteil sollte man erwähnen, dass die Materialien den Überdrücken beim Aufschäumen standhalten können. Oben haben wir erwähnt, dass die Aluminiumschmelze im Stande ist Alumosilicate auszubilden. Das kann man unterbinden, indem man in die Form eine Trennschicht sprüht. Dies kann mithilfe von einem Bornitrit-Sprays getan werden.

Weiterhin muss noch die Temperaturabhängigkeit vom Treibmittel, hier Titanhydrid berücksichtigt werden. Die Form muss also so gestaltet werden, dass die Temperatur homogen bleibt. Demzufolge ist eine Abänderung der Form notwendig, um die Homogenität der Form beizubehalten. Diese Art von Veränderung gleicht einer Prototypenherstellung, welches mit viel Aufwand und Kosten verbunden ist, weil jedes Mal die abgeänderte Form getestet werden muss, ob die Temperatur nun homogen bleibt.

Daher hat er uns abgeraten die Knochen aus Metallschaum herzustellen. Die Veränderung der Form würde dafür sorgen, dass der entstandene Knochen nicht mehr dem menschlichen Knochen ähnele und demzufolge wir uns nicht richtig am menschlichen Knochen orientieren könnten.

Knochen aus Bauschaum

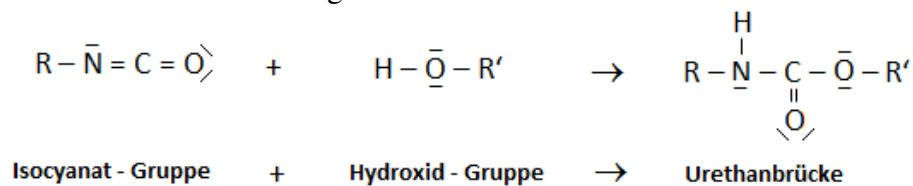
Nachdem Professor Garcia-Moreno uns erläutert hat, warum wir nicht Metallschaum als Material für unsere Knochen sollten, hat er uns empfohlen einen Polymerschaum zu verwenden, welchen wir in jeden Baumarkt bekommen können.

Dieser Bauschaum basiert wie alle anderen Bauschäume auch auf Polyurethan.

Allgemein müssen für die Synthese von Polyurethanen Ausgangsstoffe verwendet werden, die auf bi- oder trifunktionelle Isocyanate und auf mehrwertigen Alkoholen basieren.

In den Isocyanaten sind mindestens zwei Isocyanat-Gruppen (-N=C=O) enthalten. Im mehrwertigen Alkohol sind mindestens zwei Hydroxyl-Gruppen (-OH) enthalten. Aufgrund der beiden funktionellen Gruppen ist es möglich ein Makromolekül herzustellen, welches hier das Polyurethan ist.

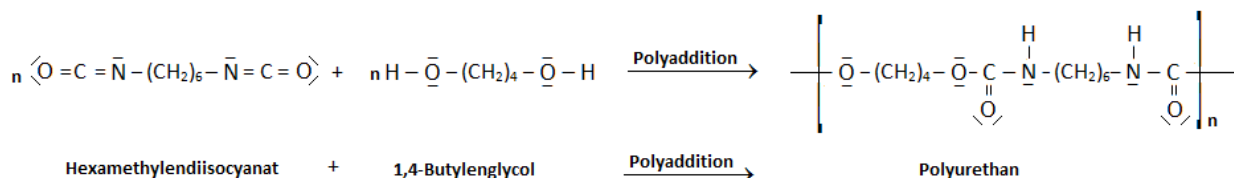
Charakteristisch für das Polyurethan ist die Ausbildung von Urethanbrücken (-NH-CO-O-), die sich durch die Addition von den oben genannten funktionellen Gruppen ergeben. Diese Addition kann durch folgende chemische Reaktion ausgedrückt werden:



Ausbildung einer Urethanbrücke

Mit der Reaktion wird gezeigt, auf welche Weise die Monomere sich verbinden. Da jedes Monomer mindestens zwei der entsprechenden Monomere enthält, ist es möglich ein Makromolekül zu bilden. Die Bildung des Makromoleküls geschieht über eine Polyaddition.

Als Beispielreaktion für eine Polyaddition zur Bildung von Polyurethan wird in der folgenden Abbildung dargestellt:



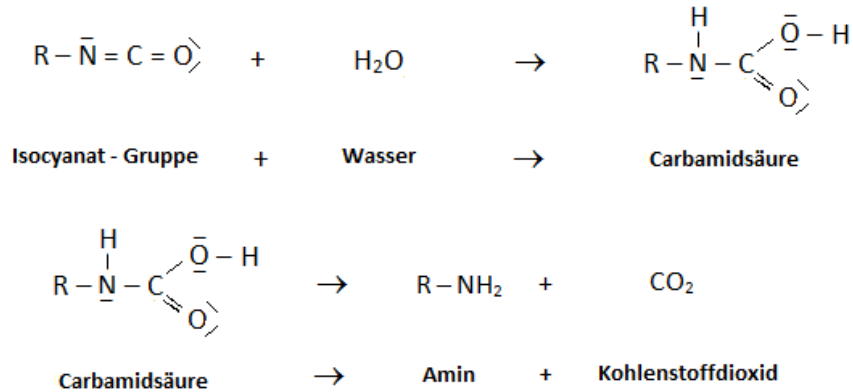
Bildung von Polyurethan durch Polyaddition (Beispiel)

Je nachdem, welches Isocyanat verwendet wird, kann man weiche, harte oder hochelastische Schäume erzeugen. Wir haben vor harte Schäume zu verwenden. Daraufhin haben wir uns für einen Montageschaum entschieden, der Polymethylenpolyphenylisocyanat enthält. Dieses Isocyanat soll nach Aussage eines Mitarbeiters im Baumarkt „toom“ dafür sorgen, dass das daraus entstehende Polyurethan hart wird.

Diese Eigenschaft machen wir uns zunutze und verwenden den Montageschaum, um die Monomere, also das Isocyanat und den mehrwertigen Alkohol, in die Tonform zu gießen. Bevor wir das tun, bespritzen wir die Forminnenseite mit ein wenig Wasser.

Damit wollen wir erreichen, dass der Aufschäumprozess sich beschleunigt. Ohne das Wasser hätten wir zu viel an Montageschaum verschwendet und hätten nicht abschätzen können, ob der ganze Innenraum sich mit dem Montageschaum gefüllt hat. Der Grund, warum der Aufschäumprozess mit Zugabe von Wasser beschleunigt wird, ist die chemische Reaktion, die zwischen dem Wasser und dem Isocyanat abläuft.

Diese chemische Reaktion wird in der folgenden Abbildung dargestellt



Bildung von Kohlenstoffdioxid mithilfe von Wasser

In der Abbildung sind zwei chemische Reaktionen zu erkennen. Die erste Reaktion zeigt eine Additionsreaktion Isocyanat – Gruppe mit Wasser. Als chemisches Reaktionsprodukt entsteht Carbaminsäure. Unter Normalbedingungen ist Carbaminsäure chemisch instabil. Deswegen tritt sofort die zweite Reaktion ein, indem die Carbaminsäuren zu den Aminen unter Abgabe von Kohlenstoffdioxid zerfällt. Mit dem Bauschaum haben wir die Möglichkeit die naturgetreue Form der Knochen beizubehalten und dadurch die Fixpunkte der entsprechenden Muskeln deutlich zu markieren.

Außerdem können wir eine Knochenhaut simulieren, indem wir den Bauschaumknochen noch mit Epoxydharz ummanteln.

Quellen

- Sensors and Actuators A 155 (2009) 299-307; „Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission“; G. Kovacs, L.Düring, S. Michel, G.Terrasi
- Zhang, Rui: „Development of Dielectric Elastomer Actuators and their Implementation in a Force Feedback Interface“; 2007
- http://de.wikipedia.org/wiki/Dielektrische_Elastomere ; 22.09.2010 ; 20:15 Uhr
- http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/72289/--/l=1 ;22.09.2010; 20:28 Uhr
- <http://www.youtube.com/user/EmpaChannel#p/c/4D4B5163BC5C98E3/8/wXS7AxEAecQ> 15.1.2011; 15:12 Uhr;
- <http://www.youtube.com/user/EmpaChannel#p/c/4D4B5163BC5C98E3/18/pL5bIFY102c> ; 15.1.2011; 15: 30 Uhr;
- <http://www.youtube.com/watch?v=jOnp2M5qibs&feature=related> ; NASA Robonaut Humanoid Space Robot ; 10.1.11 ; 16:40 Uhr
- ^[1] <http://www.fzs.tu-berlin.de/> ; 22.1.2011, 15:30 Uhr, Direktes Strangpressen (Animation)
- <http://www.ifam.fraunhofer.de/index.php?seite=/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/eigenschaften/> ; 22.1.2011, 15:30 Uhr, Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle
- http://www.seilnacht.com/Lexikon/k_polyur.html ; 22.1.2011, 15:30 Uhr, Polyurethane (PUR)
- http://www.verlagsgemeinschaft.com/cms/servic/QuenzerNepper_FunktGymn_Leseprobe.pdf ; 31.12.2011, 14:25 Uhr, Biomechanische Aspekte
- <http://flexikon.doccheck.com/> ; 30. 1.2011, 15:00 Uhr, M. aconeus
- <http://130.60.57.9/bewegungsapparat/>; 22.1.2011,15:30 Uhr, Universität Zürich, Funktionelle Anatomie
- "BoneLab Version 1.0.3.3, copyright 2009 Next Dimension Imaging“
- "Anim8or Version 0.95 02-Dec-06, copyright 1999-2006 R.Steven Glanville"
- http://www.wolframalpha.com/input/?i=plot+300*25*%28sin%28y-x%29%29*+%28sqrt%28500-400*%28cos%28y%29%29%29%29%29%2F%28200*sin%28y%29%29+%2C+x%3D0...pi%2C+y%3D0...pi; 31.1.2011, 15:00 Uhr, Plot,
- Prof. Dr. Adolf Faller, Prof. Dr. Dr. Michael Schünke, unter Mitarbeit von Gabriele Schünke, Der Körper des Menschen; Einführung in Bau und Funktion; 15. Auflage, 2004, Stuttgart
- Prof. Dr. med. Dr. phil. Herbert Lippert, "Anatomie" Text und Atlas, Urban & Schwarzenberg, 6. Auflage, 1995, München