

Aktuelle Forschung in der Biomechanik

Martin Mössner

martin.moessner@uibk.ac.at
7. März 2024

Aktuelle Forschung in der Biomechanik

Vorlesung 2 h mit 4 ECTS Punkten

Arbeitsaufwand: 4 ECTS = 100 h ... 6.5 h pro Woche, davon 1.5 h VL

Inhalte:

- Modellierung von Muskeln/Sehnen in der Biomechanik
- Verwendung in Simulationsprogrammen
- (Material-) Eigenschaften von Muskeln
- Ausgewählte Forschungsergebnisse

Aktuelle Forschung in der Biomechanik

Vorlesungsunterlagen:

https://sport1.uibk.ac.at/lehre/moessner/aktuelle_forschung_biomechanik/

Prüfung:

schriftliche Klausur

50% für positive Beurteilung

Ein langes Rechenbeispiel zur Bestimmung der Muskelkräfte
(Formelsammlung im Netz)

Mehrere Theoriefragen

Klausurbeispiel ab Mitte des Semesters im Netz

Muskelbewegung in der Biomechanik

**Ziel: Behandlung von Muskelkräften so, dass sie in
Simulationsprogramm verwendet werden können**

McLean et al (2003)

**Development and Validation of a 3D Model to Predict
Knee Joint Loading During Dynamic Movement**

Transactions of the ASME, 125 864-874 (2003)

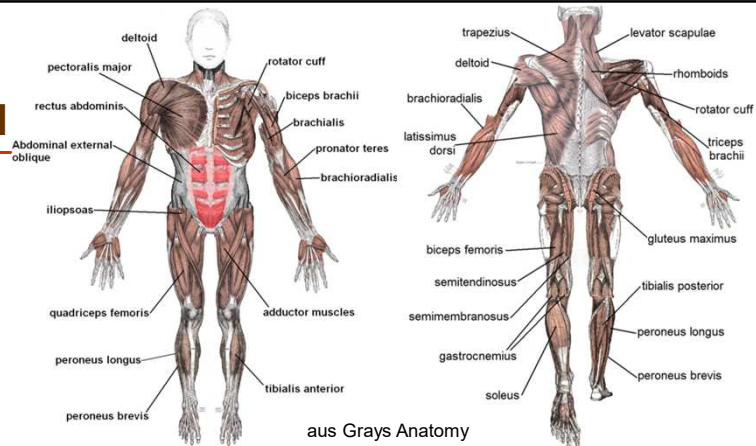
Einleitung

Simulation von Muskelbewegung

Makroskopische Eigenschaften
Muskel kurz für Muskel-Sehnen-Komplex
Mechanische Eigenschaften

Modellkomponenten
Segmentmodell des Menschen: Hanavan, Skelett
Geometrie und Materialeigenschaften des Muskels:
Ansatzpunkte, Muskel/Sehnen-Länge, Maximalkraft, ...
Kraftentwicklung des Muskels auf Grund von
Länge, Dehngeschwindigkeit und Aktivierung

Muskel



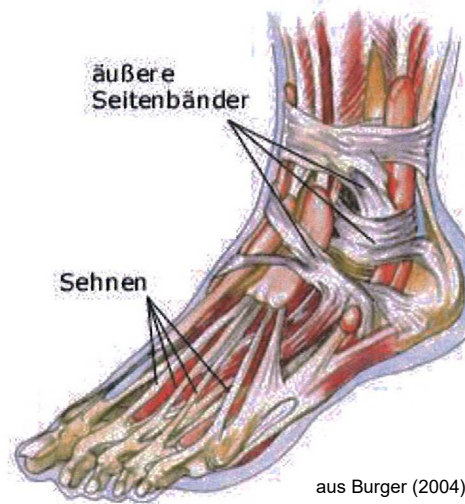
In Simulation

- Starke Vereinfachungen
- Zusammenfassen von Muskeln zu Muskelgruppen
- Nur beteiligte Muskel werden modelliert

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

7

Sehnen



aus Burger (2004)

In Simulation

- Starke Vereinfachungen
- Ein Muskel hat mehrere Sehnen
- Umlenkung durch Bänder und Knochen

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

8

Segmente



In Simulation

- Starke Vereinfachungen
- Skelett gibt Segmentstruktur des Menschen
- Geometrie, Masse und Trägheitsmoment
- Gelenke: Position und Freiheitsgrade

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

9

2D Skifahrer mit Muskel im Bein

Erstes Skifahrer-Modell:

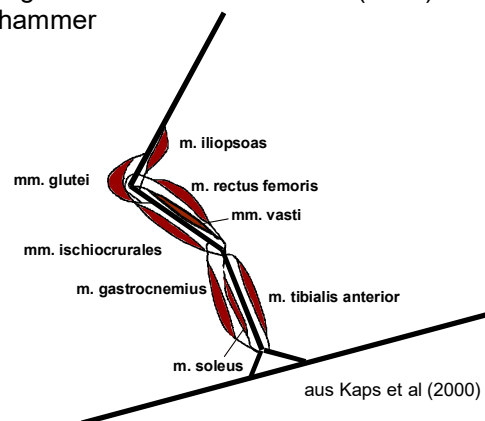
Zusammenarbeit Ton van den Bogert und Werner Nachbauer (1996)
Messung bei Olympiade in Lillehammer

Skifahrermodell:

4 Segmente

8 Muskelgruppen

Ziel: Belastung im ACL
bei der Landung nach weiten
Sprüngen bestimmen



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

10

Muskel: Teilmodelle

Aktivierung (kurz)

a mit $0 \leq a \leq 1$

0 keine Aktivierung, 1 maximale Aktivierung

Stimulierung durch Nervenimpulse

Ca-Transport

Muskelkraft (ausführlich)

siehe folgende Folien

Ermüdung (nicht behandelt)

Abfall der Aktivierung bei andauernder Stimulierung

Aktivierung

Schnell/langsam zuckende Muskelfasern Fast/slow twitch fibers

Jeder Muskel hat schnell und langsam zuckende Muskelfasern

Schnell zuckende Fasern bis zu 7.5 ms schnell
Langsam zuckende Fasern bis 100 ms langsam

Die Verteilung schnell/langsam zuckender Fasern ist genetisch bestimmt.

Schnelle Fasern können in langsame Fasern umgewandelt werden.

Personen mit vielen schnell bzw. langsam zuckenden Fasern sind Sprint- bzw. Ausdauerarten.

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

13

Aufbau einer Muskelkontraktion

Ein einzelner elektrischer Impuls der Nervenzelle erzeugt eine Mikrokontraktion einer einzelnen Muskelfaser.

Kommt vor der Relaxation ein weiterer elektrischer Impuls an, so werden die zwei Kontraktionen überlagert.

Ab einer Anregungsfrequenz von ca. 50 Hz kommt es zu einer Kontraktion des ganzen Muskels.



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

14

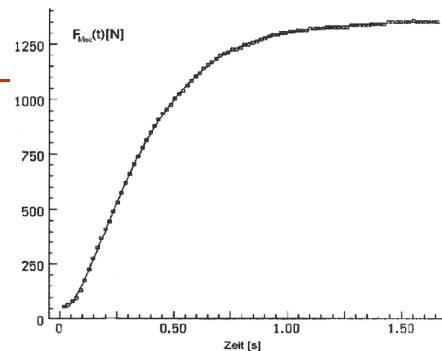
Muskel: Aktivierung

zeitlicher Verlauf einer isometrischen Kontraktion

1 s für den Anstieg bis zur maximalen Aktivierung
dann konstante Aktivierung

dauert länger als viele sportliche Bewegungen

Vorwegnahme von Bewegungen
Anspannen der Muskeln bereits vor der Belastung



aus: Burger (2004)

Muskel: Aktivierung - Modell

- a Aktivierung des Muskels = Vermögen Kraft zu erzeugen
- u Stimulierung des Muskels = elektrischer Input durch Nerven
- u = 0 keine Stimulierung, u = 1 volle Stimulierung

$\frac{da}{dt}$ Änderung der Aktivierung ist proportional zu:

$u - a$ Unterschied Stimulierung zu herrschender Aktivierung
falls Stimulierung stärker Anstieg sonst Abfall

u/T_{rise} Anstieg proportional aktueller Stimulierung und
Zeitkonstante $1/T_{rise}$

$(1 - u)/T_{fall}$ Abfall proportional zum Abstand zu maximaler
Stimulierung und Zeitkonstante $1/T_{fall}$

Muskel: Aktivierung - Modell

Zusammen ergibt das die Differentialgleichung:

$$\frac{da}{dt} = (u - a)(u / T_{rise} + (1 - u) / T_{fall})$$

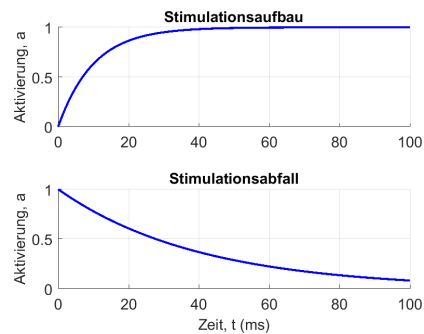
OpenSim:

$$T_{rise} = 10 \text{ ms}, T_{fall} = 40 \text{ ms}$$

van den Bogert:

$$T_{rise} = 50 \text{ ms}, T_{fall} = 60 \text{ ms}$$

Anstieg, Abfall exponentiell!!



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

17

Lösen der Differentialgleichung:

Beispiel: 80% Stimulierung, d.h. $u=0.8$

$$a' = (0.8 - a) \cdot (0.8 / 0.01 + (1 - 0.8) / 0.04) = (0.8 - a) \cdot 85$$

ersetze Ableitungen durch Differenzenquotient

$$a' \rightarrow (a_1 - a_0) / \Delta t$$

ergibt:

$$(a_1 - a_0) / \Delta t = (0.8 - a_0) \cdot 85$$

bzw.

$$t_1 = t_0 + \Delta t$$

$$a_1 = a_0 + \Delta t \cdot (0.8 - a_0) \cdot 85$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

18

Lösen der Differentialgleichung:

Startwert: $a_0 = 0$, Zeitschritt: $\Delta t = 1$ ms

$$t_0 = 0, a_0 = 0$$

$$t_1 = t_0 + \Delta t = 0.001 \text{ s}$$

$$a_1 = a_0 + \Delta t \cdot (0.8 - a_0) \cdot 85 = 0 + 0.001 \cdot (0.8 - 0) \cdot 85 = 0.068$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 0.002 \text{ s}$$

$$a_2 = a_1 + \Delta t \cdot (0.8 - a_1) \cdot 85 = 0.068 + 0.001 \cdot (0.8 - 0.068) \cdot 85 = 0.1302$$

$$t_3 = t_2 + \Delta t = 0.003 \text{ s}$$

$$a_3 = a_2 + \Delta t \cdot (0.8 - a_2) \cdot 85 = 0.1302 + 0.001 \cdot (0.8 - 0.1302) \cdot 85 = 0.1871$$

...

Besser: Verwende Matlab, Excel, ...

Lösen der Differentialgleichung: Excel

