

Aktuelle Forschung in der Biomechanik



Martin Mössner

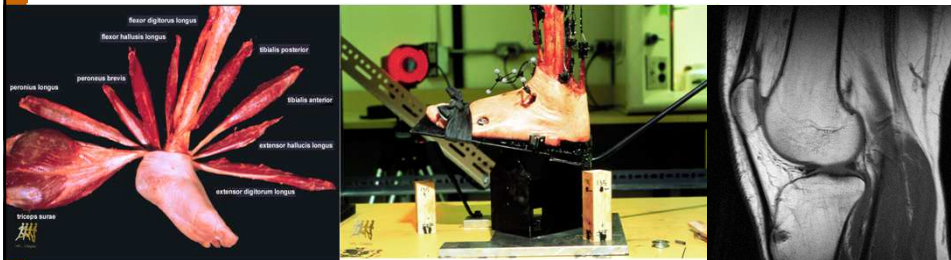
martin.moessner@uibk.ac.at
2. Mai 2024



Muskeln

Bestimmung von Muskelparametern

Untersuchungen an Leichen
 Geometrieigenschaften: Röntgen, MRT, CT, Ultraschall, ...
 Isometrische Kraftmessungen
 Tierversuche, zum Teil an lebenden Objekten
 Identifizierung von Muskeldaten durch Simulation



Nigg et al, Calgary

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

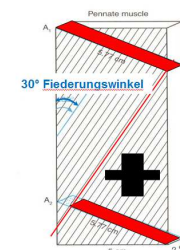
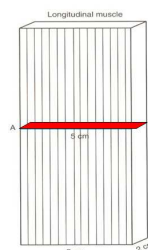
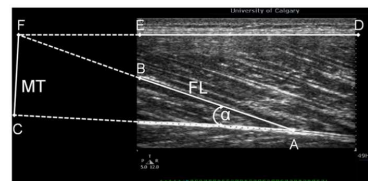
176

Muskel: physiologischer Querschnitt

$$F_{\text{iso,max}} = 30\text{-}100 \text{ N/cm}^2 \cdot \text{PCSA}$$

PCSA physiologischer Querschnitt

Steigt der physiologische Querschnitt,
 so steigt die Muskelkraft und es
 verkürzt sich die Kontraktion entlang
 der Ausdehnung des Muskels



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

177

Muskel: Fiederung (pennation)

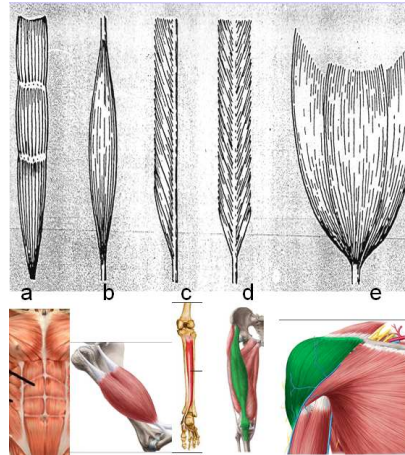
a) parallele Fasern
m. rectus abdominis

b) spindelförmig
m. biceps brachii

c) einfach gefiedert
m. tibialis posterior

d) doppelt gefiedert
m. rectus femoris

e) komplex gefiedert
m. deltoideus



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

178

Beispiel: physiologischer Querschnitt

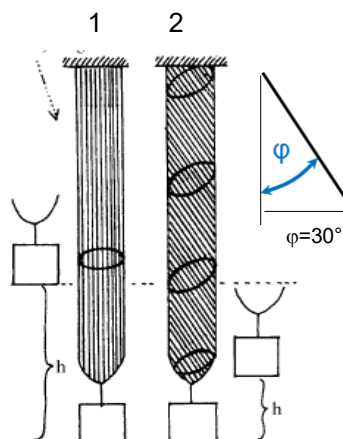
$$F_{\text{iso,max}} = 30\text{-}100 \text{ N/cm}^2 \cdot \text{PCSA}$$

In Situation 2 hat man 3.5-mal so viele Muskelfasern wie in 1
(ergibt sich aus Muskellänge und -breite)

$$h_2 = \frac{h_1}{3.5} \cdot \cos 30^\circ = 0.25 \cdot h_1$$

$$F_1 = k \cdot \text{PCSA}$$

$$F_2 = k \cdot \text{PCSA} \cdot 3.5 \cdot \cos 30^\circ = 3 \cdot F_1$$

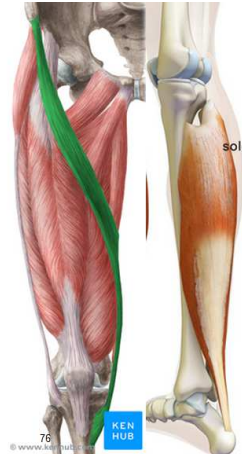


Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

179

Muskel: Daten

Muskel	Masse (g)	Faserlänge (cm)	PCSA (cm ²)	Fiederungswinkel (Grad)
Sartorius	75	38	2	0
Biceps femoris	150	9	16	0
Semitendinosus	75	16	4	0
Soleus	215	3	58	30
Gastrocnemius	158	5	30	15
Tibialis posterior	55	2	21	15
Tibialis anterior	70	7	94	5
Rectus femoris	90	7	12	5
Vastus lateralis	210	7	30	5
Vastus medialis	200	7	26	5
Vastus intermedius	180	7	25	5



3 Leichen (Wickiewicz et al., 1983)

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

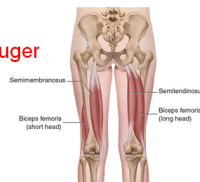
180

Physiologischer Querschnitt in %

Sprunggelenk		Kniegelenk		Hüftgelenk	
Muskel	%PMQ	Muskel	%PMQ	Muskel	%PMQ
Soleus	41	Gastrocnemius	19	Iliopsoas	9
Gastrocnemius	22	Biceps Femoris (small)	3	Sartorius	1
Flexor Hallucis Longus	6	Biceps Femoris (long)	7	Pectineus	1
Flexor Digitorum Longus	3	Semitendinosus	3	Rectus Femoris	7
Tibialis Posterior	10	Semimembranosus	10	Gluteus Maximus	16
Peroneus Brevis	9	Vastus Lateralis	20	Gluteus Medius	12
Tibialis Anterior	5	Vastus Medialis	15	Gluteus Minimus	6
Extensor Digitorum Longus	3	Vastus Intermedius	13	Adductor Magnus	11
Extensor Hallucis Longus	1	Rectus Femoris	8	Adductor Longus	3
		Sartorius	1	Adductor Brevis	3
		Gracilis	1	Tensor Fasciae Latae	1
				Biceps Femoris (long)	6
				Semitendinosus	3
				Semimembranosus	8
				Piriformis	2
				Lateral Rotators	13

stärkste Strecker stärkste Beuger
Strecker >> Beuger

(Wickiewicz et al., 1983)



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

181

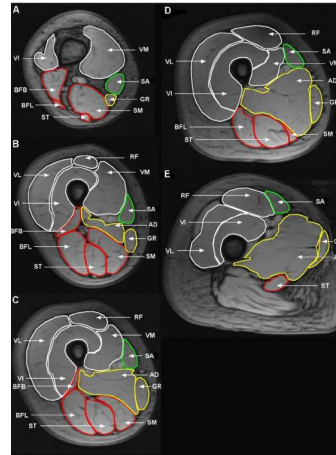
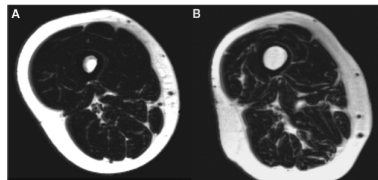
Beispiel: physiologischer Querschnitt

Hogrel et al. (2015)

Querschnitt des Oberschenkels
bei 20,40,50,60,80% der Länge
des Femurs

Veränderung im Alter

A) 28 Jahre B) 80 Jahre



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

182

Max. Verkürzungsgeschwindigkeit

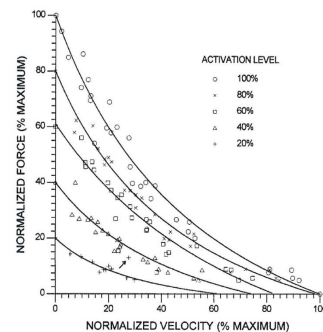
Bei voller Aktivierung: $V_{MAX} = 10 \cdot L_{Kopt}$

nicht voll stimulierte Muskel haben eine kleinere max.
Verkürzungsgeschwindigkeit

Chow & Darling (1999)

The maximum shortening Velocity of
Muscle should be scaled with activation

$$V_{MAX}(a) = V_{MAX}(1) \cdot (1 - 0.44 \cdot (1 - a))$$



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

183

In Vivo Messungen

Austin et al. (2010) In Vivo Operational Fascicle Length of Vastus Lateralis During Sub-Maximal and Maximal Cycling

In Vivo Messung

Muskelfaserlänge VL gegen Kraft des Quadrizeps
Messprinzipien: Dynamometer und Ultraschall

15 Männer, 20.9 Jahre, 67 kg
Radfahren bei 50 und 80 U/min

Quadrizepskraft

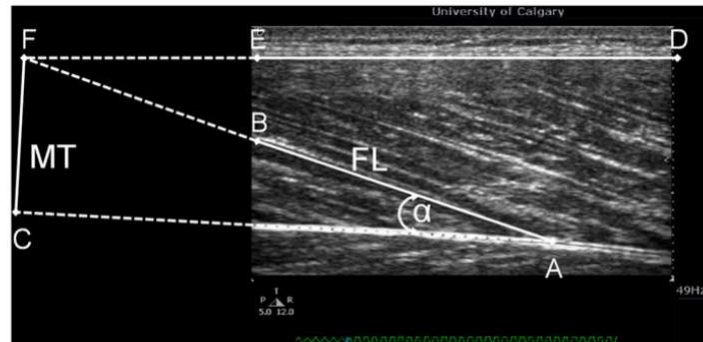
Mittels Dynamometer wird das maximale Drehmoment durch den Quadrizeps bestimmt (isometrische Messung)

Momentarm im Knie
Herzog & Read (1993)

Quadrizepskraft = $\text{Moment} / \text{Momentarm}$



Muskelfaserlänge



Mittels Ultraschall wird unter Belastung die Faserlänge, der Fiederungswinkel und die Dicke des Muskels bestimmt

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

186

In Vivo Messungen: $L_{K,VL} - F_Q$

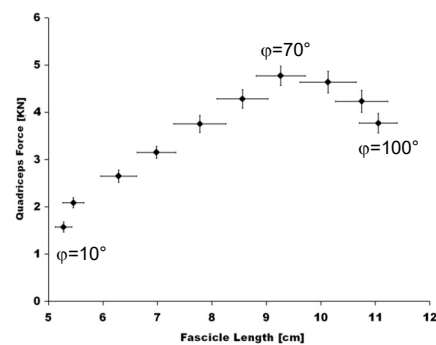
Muskelfaserlänge des Vastus Lateralis gegen gesamte Quadrizepskraft

$$F_{MAX,Q} = 4780 \text{ N}$$

$$F_{MAX,VL} = 1725 \text{ N}$$

$$L_{Kopt} = 9.3 \text{ cm}$$

$$\varphi_{opt} = 70^\circ$$



Flanken deutlich flacher als im Modell von F_{ISO} (Folie 42)

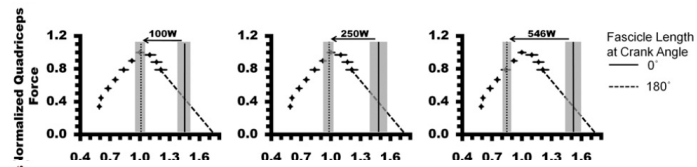
vgl. McLean: $F_{MAX,Q}=5180 \text{ N}$, $F_{MAX,VL}=1870 \text{ N}$, $L_{Kopt}=8.7 \text{ cm}$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

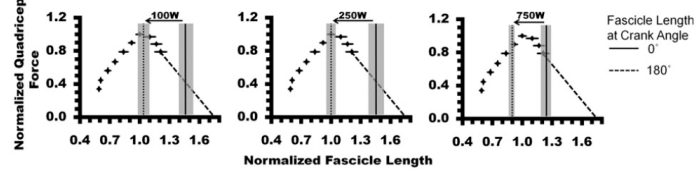
187

In Vivo Messungen: Anwendung

50 rpm



80 rpm



Bei hohen Wattzahlen arbeitet Muskel im optimalen Bereich
Längenänderung der Muskelfaser sinkt mit steigender Umdrehungszahl

Anpassung von Muskeldaten

Anpassung von Muskelparametern

Skalierung von Muskelparametern durch
Größe (Körper/Segment) und Masse
(Regressionsgleichungen, Tabellen)
siehe: de Leva (Folie 149-152)

Körpergröße

- Segmentlänge, Segmentumfang
- optimale Muskellänge, Sehnenlänge, Slack-Länge

Anpassung von Muskelparametern

Segmentumfang

- Segmentradius
- Segmentfläche
- physiologischer
Querschnitt
eines Muskels
- isometrische
Maximalkraft

PQ in % aller Muskeln über Sprung-, Knie- und Hüftgelenk

Sprunggelenk		Kniegelenk		Hüftgelenk	
Muskel	%PQ	Muskel	%PQ	Muskel	%PQ
Soleus	41	Gastrocnemius	19	Iliopsoas	9
Gastrocnemius	22	Biceps Femoris (small)	3	Sartorius	1
Flexor Hallucis Longus	6	Biceps Femoris (long)	7	Pectineus	1
Flexor Digitorum Longus	3	Semitendinosus	3	Rectus Femoris	7
Tibialis Posterior	10	Semimembranosus	10	Gluteus Maximus	16
Peroneus Brevis	9	Vastus Lateralis	20	Gluteus Medius	12
Tibialis Anterior	5	Vastus Medialis	15	Gluteus Minimus	6
Extensor Digitorum Longus	3	Vastus Intermedius	13	Adductor Magnus	11
Extensor Hallucis Longus	1	Rectus Femoris	8	Adductor Longus	3
		Sartorius	1	Adductor Brevis	3
		Gracilis	1	Tensor Fasciae Latae	1
stärksten Beuger				Biceps Femoris (long)	6
stärksten Strecker	Strecker >> Beuger			Semitendinosus	3
3 Leichen				Semimembranosus	8
				Piriformis	2
				Lateral Rotators	13

(Wickiewicz et al., 1983)

Anpassung von Muskelparametern

Isometrische Kraft ist proportional Querschnitt des Muskels

$$F_{\text{MAX}} = 25\text{-}40 \text{ N/cm}^2 \cdot \text{PCSA}$$

PCSA physiologischer Muskelquerschnitt in cm^2

Anwendung: Skifahrer mit kräftigem OS ($U = 2r\pi, A = r^2\pi$):

$$U_{\text{OS}} = 70 \text{ cm} \rightarrow R_{\text{OS}} = 11.1 \text{ cm}, A_{\text{OS}} = 390 \text{ cm}^2$$

$$\text{VL } 20\% \text{ des OS} \rightarrow A_{\text{VL}} = 78 \text{ cm}^2, F_{\text{MAX}} = 30 \cdot 78 = 2.3 \text{ kN}$$

Vergleich (McLean): $F_{\text{MAX}} = 1.8 \text{ kN}$

$$\text{Quadrizeps (VL+VM+VI+RF) } 56\% \text{ des OS: } F_{\text{MAX}} = 30 \cdot 218 = 6.5 \text{ kN}$$