

Modell zum Vergleich der Leistung unterschiedlicher Muskel-Fasertypen bei maximalen explosiv-ballistischen Krafteinsätzen

Wissenschaftliche Mitarbeit: Daniela Gertz

Ziel des Projektes

Befunde aus Untersuchungen mit maximalen **explosiv-isometrischen** Krafteinsätzen der ischiokruralen Muskeln (TIDOW / WIEMANN 1993) lassen vermuten, dass die einzelnen Muskel-Fasertypen bei explosiv-isometrischen Kontraktionen des gesamten Muskels nicht in der von HENNEMAN vorgeschlagenen Rekrutierungsfolge (HENNEMAN 1981) mit der Kontraktion beginnen, sondern derart innerviert werden, dass ihr Kontraktionsbeginn zeitlich zusammenfällt. Dadurch können schon zu Beginn der Kontraktion die Typ-II-B-Fasern mit Ihrer kurzen Kontraktionszeit den Kraftstoß wesentlich mit beeinflussen. Berücksichtigt man darüber hinaus die unterschiedlichen Verkürzungsgeschwindigkeiten der Fasertypen, lässt sich vermuten, dass auch bei **explosiv-ballistischen** Krafteinsätzen die Typ-II-B-Fasern die Leistung des Muskels determinieren, während die langsameren Fasertypen nur einen unbedeutenden Beschleunigungsbeitrag zu leisten im Stande sind.

Um diese Annahme zu stützen, wurde mit Hilfe des Kalkulationsprogramms EXCEL 97 das **Modell** eines einfach konstruierten Gelenksystems entwickelt, mit dessen Hilfe die hypothetischen Leistungen der verschiedenen Fasertypen bei der Aufgabe, ein **Wurfobjekt** in vorgegebenen Grenzen maximal zu beschleunigen, kalkuliert werden können.

Darstellung des „Wurfmodells“

Das Wurfmodell (Abb. 1) stellt ein in vertikaler Bewegungsebene funktionierendes Eingelenksystem dar – mit den Dimensionen eines vereinfachten Ellenbogengelenkes. Die zugrunde gelegten geometrischen und mechanischen Daten sind aus Tabelle I zu entnehmen.

Die Festlegung der leistungsbestimmenden Charakteristiken der Muskelfasertypen erfolgte bzgl. der Kontraktionszeiten nach DESMEDT (1981) und bzgl. der Verkürzungsgeschwindigkeit nach LARSSON / MOSS (1993). Die Daten sind in Tab. II zusammengestellt.

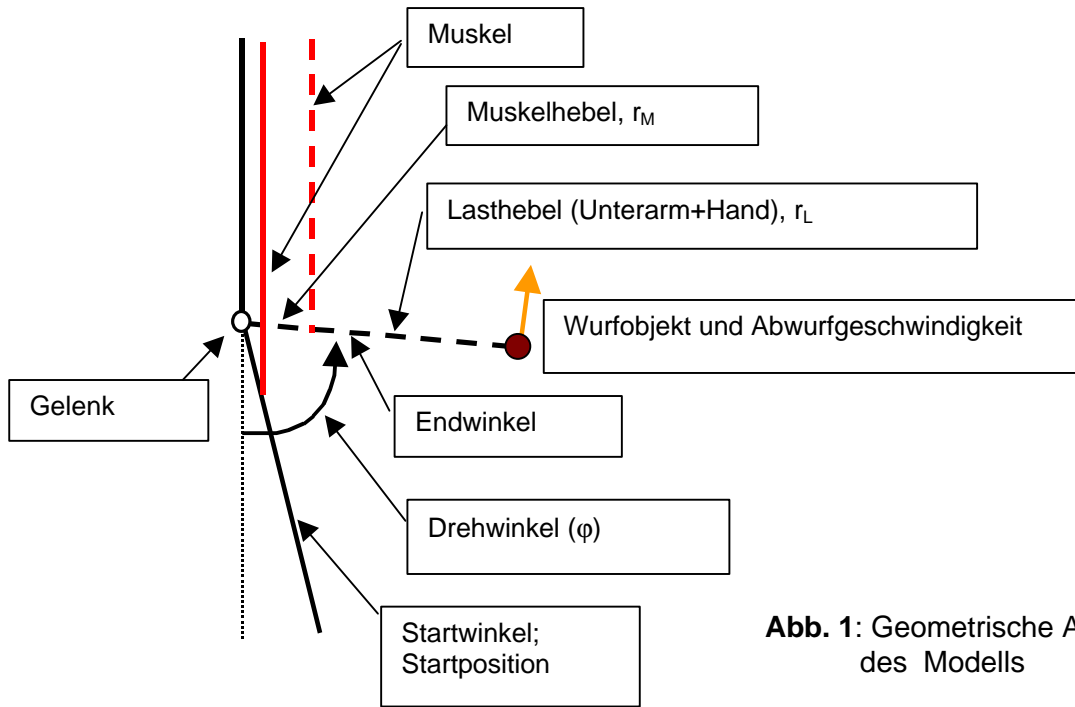


Abb. 1: Geometrische Anordnung des Modells

Tab. I: Konstante Größen für das Wurfmodell (berechnet für eine 1,80 m große und 80 kg schwere Person):

Länge Unterarm bis Handmitte: Lasthebel: $r_L =$	0,35 m
Muskelhebel: $r_M =$	0,06 m
Masse von Unterarm+Hand: $m_{uah} =$	2,4 kg
Schwerpunktradius Unterarm+Hand: $r_{SP-uah} =$	0,15 m
Gelenkwinkel in Startposition:	5°
Gelenkwinkel zum Ende der Wurfbewegung:	max. 85°
Maximalkraft des Muskels =	1440 N
Länge der Muskelfasern =	0,1 m
Muskelfaser-Dehnungsgrad in Startposition =	140%
Muskelfaser-Dehnungsgrad in Endposition =	86%

Tab. II: Fasertypcharakteristische Kontraktionszeiten und Verkürzungsgeschwindigkeiten

	Typ I	Typ IIA	Typ IIB
Kontraktionszeit [s]	0,14	0,1	0,06
Verkürzungsgeschwindigkeit [m/s]	0,1	0,3	0,9

Das Modell berechnet in Zeitintervallen von 0,005 s:

die Entwicklung der maximalen Kontraktionskraft unter Berücksichtigung des Dehnungsgrades (Kraft-Längen-Beziehung nach HERZOG u.a. 1990 und WALKER / SCHRODT 1973) und der HILLSchen Beziehung (linearer Ansatz) → Drehmoment → Drehimpuls → Winkelgeschwindigkeit → Muskelverkürzungsgeschwindigkeit → Muskelverkürzungsweg → Drehwinkel → Bahngeschwindigkeit des Wurfobjektes → Abwurfgeschwindigkeit → Abwurfwinkel.

Als Abwurfwinkel wird derjenige Gelenkwinkel festgelegt, in dem die maximale Bahngeschwindigkeit des Wurfobjektes (= distales Ende des drehbaren Segmentes = „Unterarm+Handmitte“) oder der 85°-Winkel erreicht wird.

Das Modell wird in zwei Variationsformen verwendet:

- **Form A** in der Weise, als wenn der gesamte Muskel jeweils nur aus Fasern eines Fasertyps bestehen würde.
- **Form B** berechnet und vergleicht die Wurfleistung eines aus drei Fasertypen in unterschiedlicher Fasertyp-Kraftrelation zusammengesetzten Muskels bei unterschiedlichen Rekrutierungsfolgen.

Ergebnisse Modellform A:

Das Modell sieht ein frei wählbares Wurfgewicht vor. In den folgenden Beispielen werden die Wurfleistungen der Fasertypen bei den Wurfgewichten 0,33 kg, 1 kg und 3 kg verglichen. Die grafische Darstellung der Wurfbahn dient der Veranschaulichung der Leistung.

Aus Abb. 2 wird deutlich, dass die unterschiedlichen Fasertypen – wie erwartet – unterschiedliche Abwurfgeschwindigkeiten gemäß den unterschiedlichen fasertyp-spezifischen Verkürzungsgeschwindigkeiten entwickeln. Die maximale Verkürzungsgeschwindigkeit wird jedoch auf Grund der Abhängigkeit von Verkürzungsgeschwindigkeit und Last (HILLSche Beziehung) nur beim Wurfgewicht 0,33 kg näherungsweise erreicht (Tab. III).

Startet die Wurfaktion einheitlich bei einem Gelenkwinkel von 5°, erreichen die einzelnen Fasertypen ihre maximale Verkürzungsgeschwindigkeit in unterschiedlichen Gelenkwinkelstellungen, die in Abb. 2 durch den Abwurfwinkel wiedergegeben werden. Obwohl sich die Typ-IIB-Fasern durch die kürzeste Kontraktionszeit und die höchste Verkürzungsgeschwindigkeit auszeichnen (Tab. II), benötigen sie für die Erzeugung der Abwurfgeschwindigkeit des 0,33 kg-Wurfgewichtes von 5,54 m/s mit 0,23 s eine längere Zeit als die beiden anderen Fasertypen mit entsprechend geringeren Abwurfgeschwindigkeiten (1,46 m/s bei 0,21 s bzw. 2,76 m/s bei 0,22 s; s. Tab. III), legen dabei aber einen längeren Verkürzungsweg (erkennbar an dem

größeren überstrichenen Gelenkwinkel, Abb. 2 und Tab. III) zurück. Die Ursache dazu muss auch hier darin gesehen werden, dass bei steigender Verkürzungsgeschwindigkeit die abgegebene Kontraktionskraft sinkt und somit die Zeit wächst, die benötigt wird, die Endgeschwindigkeit zu erreichen.

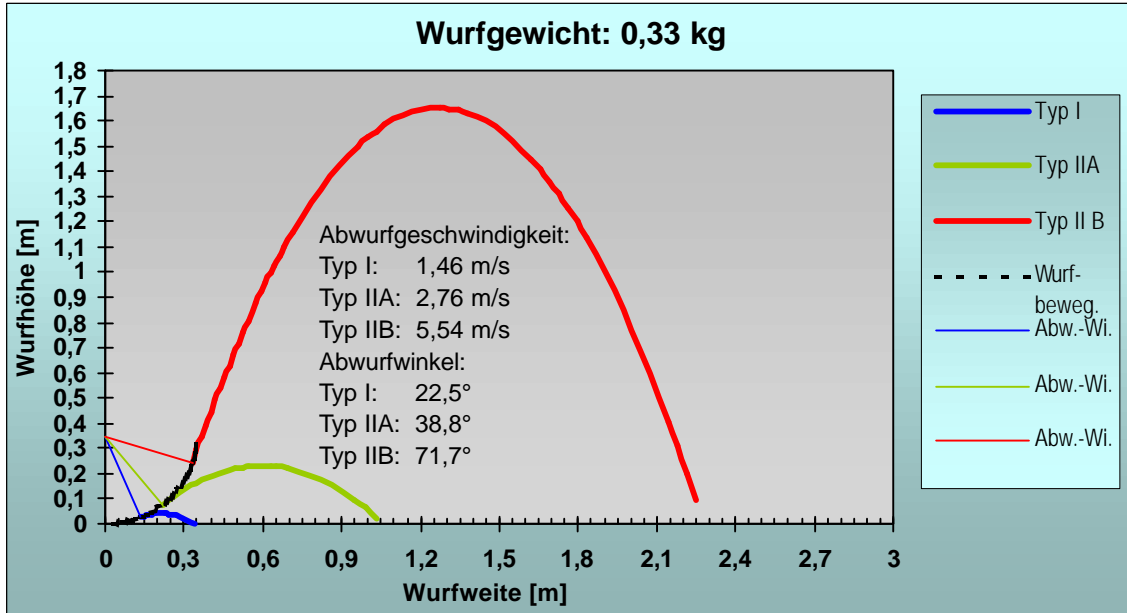


Abb. 2: Wurffleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion der Fasertypen. *Wurfbeweg.:* Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkels von 85°. *Abw.-Wi.:* tatsächlicher Abwurfwinkel.

Tab. III: Leistungsdaten maximaler explosiv-ballistischer Kontraktionen unterschiedlicher Fasertypen bei unterschiedlichen Wurfgewichten.

Wurfgewicht [kg]	0,33			1,00			3,00		
Fasertyp	Typ I	Typ IIA	Typ IIB	Typ I	Typ IIA	Typ IIB	Typ I	Typ IIA	Typ IIB
Abwurfgeschwindigkeit [m/s]	1,46	2,76	5,54	1,19	2,30	4,84	0,82	1,73	3,64
erreichte Verkürzungsgeschwindigkeit [m/s]	0,091	0,282	0,876	0,084	0,273	0,824	0,070	0,246	0,620
Zeit bis zum Erreichen der Abwurfgeschw. [s]	0,210	0,220	0,230	0,285	0,310	0,330	0,500	0,550	0,545
erreichter Gelenkwinkel [°]	22,51	38,79	71,67	25,09	45,79	85,00	30,67	57,41	85,00
erreichter (Ent-)Dehnungsgrad [%]	136	124	99	135	122	86	132	113	86

Beim Wurfgewicht von 1,0 kg (und mehr) reicht der vom Modell vorgesehene Bewegungswinkel für die Typ-IIB-Fasern nicht mehr aus, die höchstmögliche Abwurfgeschwindigkeit zu erzeugen, so dass als Endleistung die im 85°-Winkel erreichte Abwurfgeschwindigkeit gelten muss.

Die Abhängigkeit der Muskel-Verkürzungsgeschwindigkeit von der Last wird auch dadurch deutlich, dass die Fasertypen nur bei der geringsten Wurflast (0,33 kg) annähernd ihre maximale fasertyp-spezifische Verkürzungsgeschwindigkeit erreichen, wobei die Typ-IIB-Fasern mit 97% gegenüber den Typ-IIA-Fasern (94%) und den Typ-I-Fasern (91%) die höchste relative fasertyp-spezifische Verkürzungsgeschwindigkeit erzeugen. Je größer die zu beschleunigende Last wird, desto größer werden die relativen Leistungsunterschiede (verdeutlicht durch die erzeugte Abwurfgeschwindigkeit; Tab. IV), bezogen auf die Leistung der Typ-IIB-Fasern.

Tab. IV: Leistungsdifferenzen und prozentuale Leistung

Wurfgewicht [kg]	0,33			1			3		
	Typ I	Typ IIA	Typ IIB	Typ I	Typ IIA	Typ IIB	Typ I	Typ IIA	Typ IIB
Abwurfgeschw. [m/s]	1,46	2,76	5,54	1,19	2,30	4,84	0,82	1,73	3,64
Differenz [m/s]		1,30	2,78		1,11	2,54		0,91	1,91
% Typ IIB	26,4	49,8	100,0	21,5	100,0	87,4	14,8	31,2	100,0

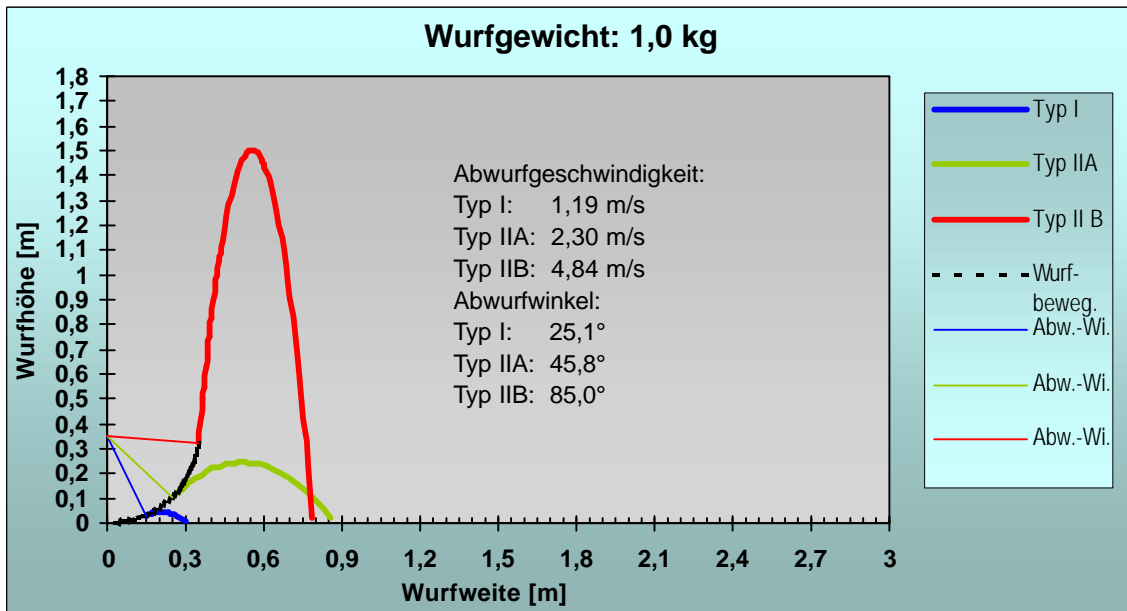


Abb. 3: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion der Fasertypen bei einem Wurfgewicht von 1 kg. *Wurfbeweg.*: Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkel von 85°. *Abw.-Wi.*: tatsächlicher Abwurfwinkel.

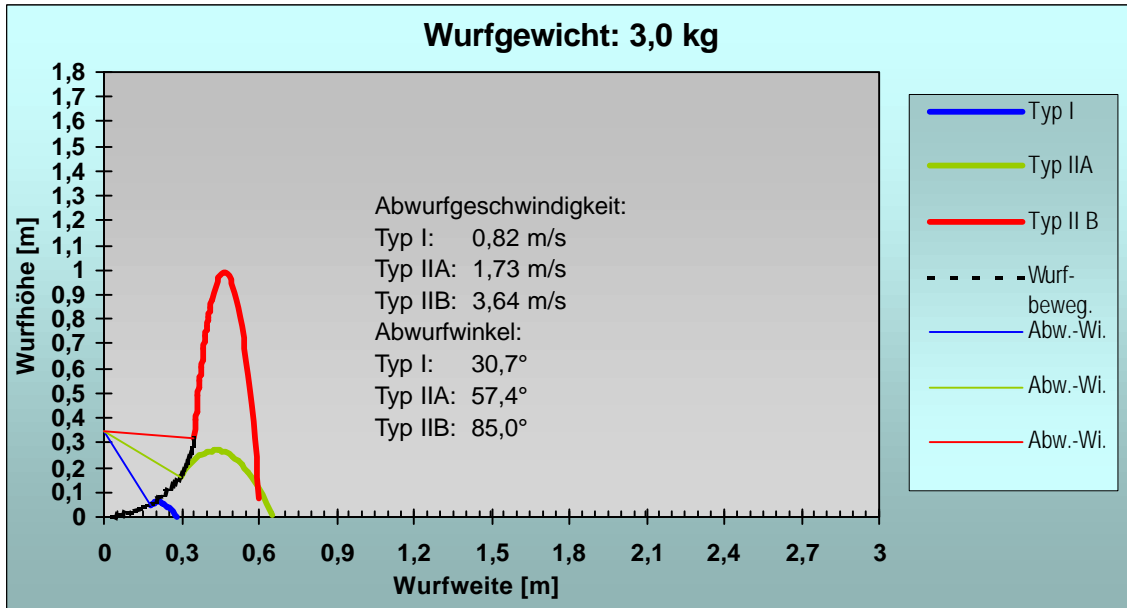


Abb. 4: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion der Fasertypen bei einem Wurfgewicht von 3 kg. *Wurfbeweg.*: Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkels von 85°. *Abw.-Wi.*: tatsächlicher Abwurfwinkel.

Um einen visuellen Eindruck der Leistungsunterschiede der Fasertypen bei höheren Wurfgewichten zu vermitteln, werden in Abb. 3 und Abb. 4 die Flugbahnen der Wurfobjekte mit höheren Gewichten (1 kg und 3 kg) bei identischer Skalierung der Diagramm-Achsen wie in Abb. 2 dargestellt.

Da aufgrund des unterschiedlichen Abwurfwinkels in Abb. 2 bis Abb. 4 die Wurfleistungen visuell nicht optimal vergleichbar sind, wird in Abb. 5 die Leistung auf einen gleichen Abwurfwinkel (45°) normiert, dies beispielhaft jedoch nur mit dem Wurfgewicht 0,33 kg.

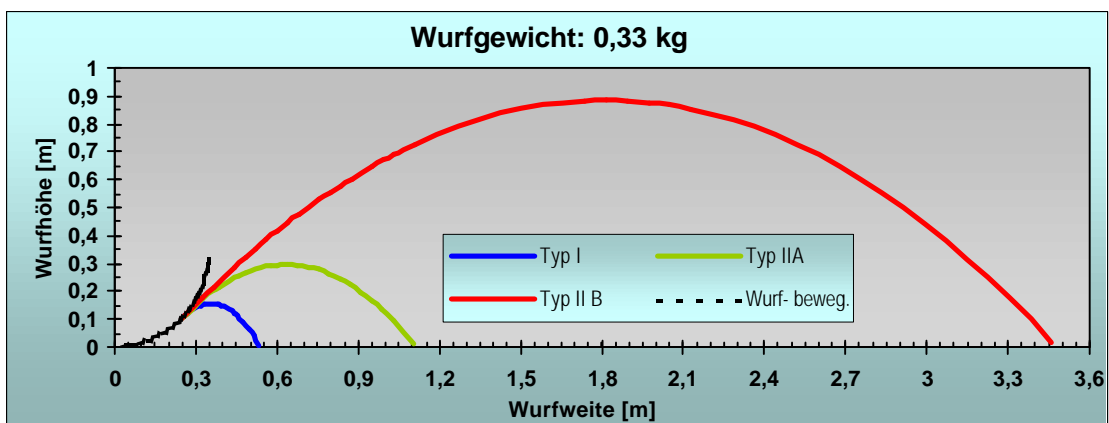


Abb. 5: Abwurfwinkel-normierte (45°) Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion der Fasertypen

Um die Wurfleistungen innerhalb der Fasertyp-Gruppen bei unterschiedlicher Wurflast ergänzend zu Tab. III visuell besser vergleichen zu können, sind in Abb. 6 bis Abb. 8 die Wurfleistungen in Form der Flugbahnen des Wurfobjektes bei unterschiedlichen Wurfgewichten nach Fasertypen getrennt dargestellt. Generell gilt: mit steigendem Wurfgewicht steigen die Dauer der Wurfaktion und der Abwurfwinkel und sinkt die Muskelverkürzungsgeschwindigkeit (und somit die Abwurfgeschwindigkeit).

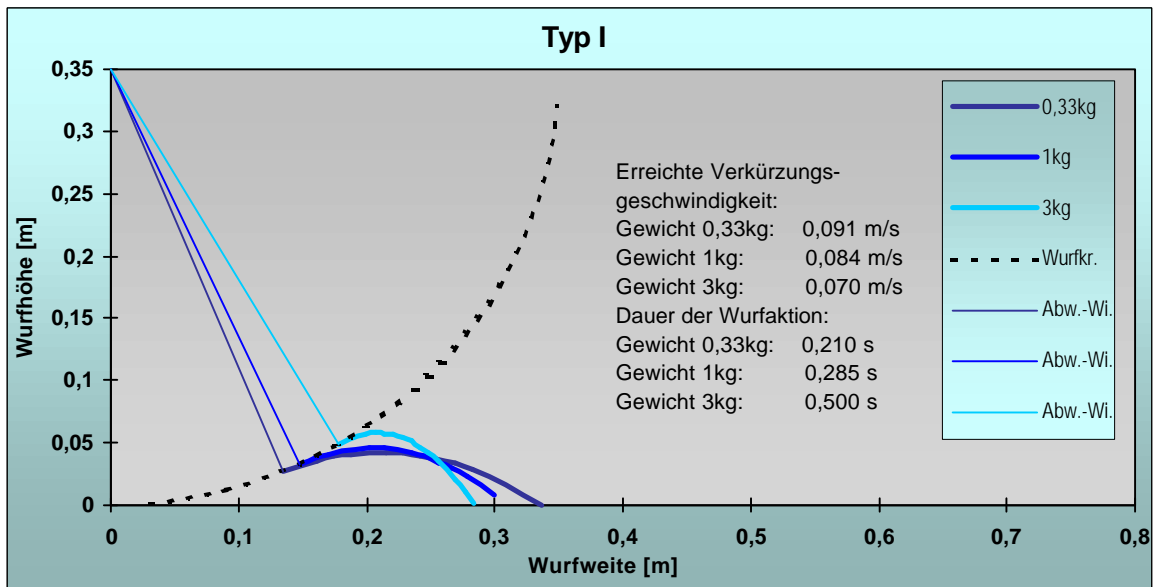


Abb. 6: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion eines Muskels nur aus Typ-I-Fasern bei unterschiedlichen Wurfgewichten. *Wurfkr.*: Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkels von 85°. *Abw.-Wi.*: tatsächlicher Abwurfwinkel.

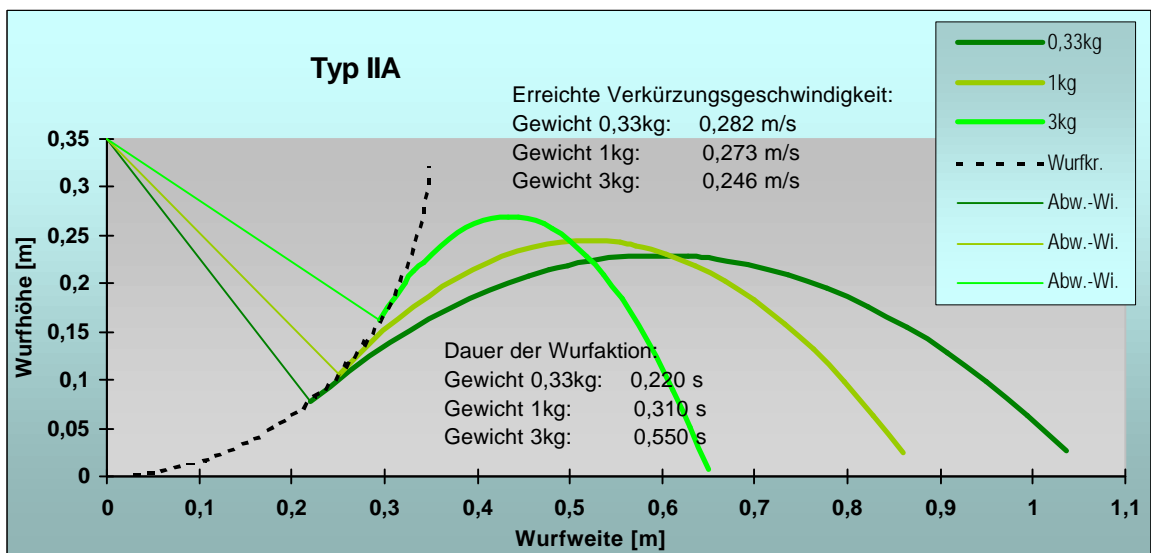


Abb. 7: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion eines Muskels nur aus Typ-IIA-Fasern bei unterschiedlichen Wurfgewichten. *Wurfkr.*: Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkels von 85°. *Abw.-Wi.*: tatsächlicher Abwurfwinkel.

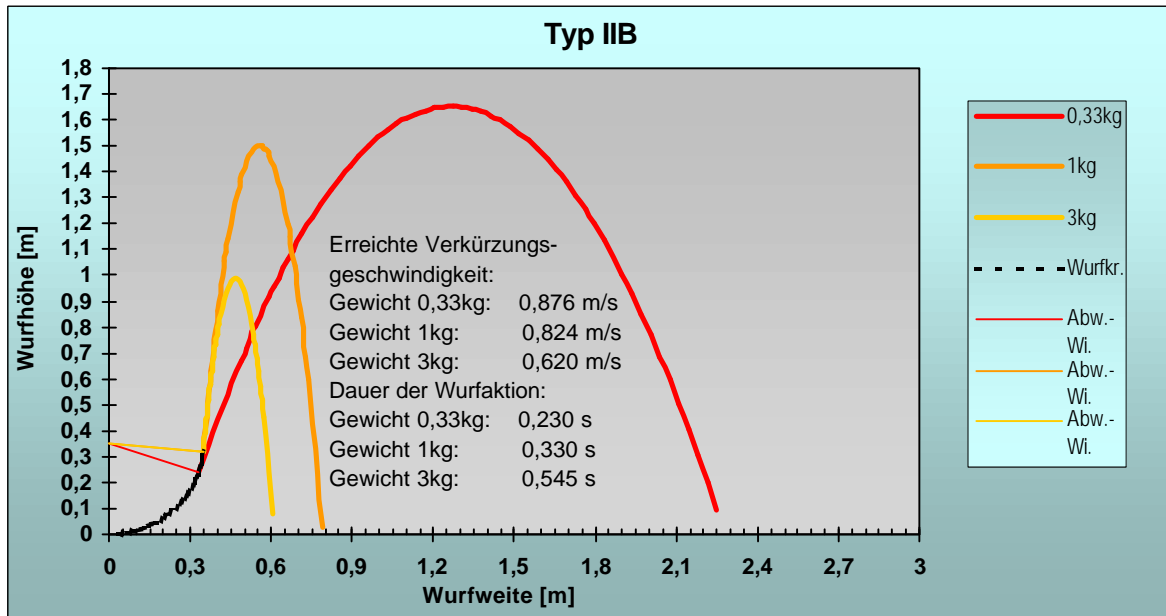


Abb. 8: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion eines Muskels nur aus Typ-IIB-Fasern bei unterschiedlichen Wurfgewichten. *Wurfkr.:* Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkel von 85°. *Abw.-Wi.:* tatsächlicher Abwurfwinkel.

Abb. 8 verdeutlicht die oben schon erwähnte Beobachtung, dass im Modellfall eines Muskels nur aus Typ-IIB-Fasern die Wurfleistung bei höheren Gewichten zusätzlich durch die Einschränkung des Modells auf einen maximalen Abwurfwinkel von 85° begrenzt wird.

Ergebnisse Modellform B

Im Gegensatz von Modellform A, bei dem der Modellmuskel komplett aus einem der drei Fasertypen bestehend angenommen wird, enthält der Modellmuskel der Modellform B alle drei Fasertypen, wobei sich die in Tab. I ausgewiesene Gesamtkraft des Muskels auf die Fasertypen durch die **Fasertyp-Kraftrelation** verteilt. Zuerst wird eine **Fasertyp-Kraftrelation** von 1 / 1 / 1 (Typ-I / Typ-IIA / Typ-IIB) untersucht. Dabei werden drei verschiedene Formen des Kontraktionsbeginns (= Rekrutierung) der Fasertypen geprüft:

add: Alle Fasertypen beginnen zum gleichen Zeitpunkt mit der Kontraktion

kziso: Der Kontraktionsbeginn der Fasertypen verschiebt sich in der Weise, dass die Kontraktionszeit aller Fasertypen zum gleichen Zeitpunkt abgelaufen ist. Das bedeutet, dass die Typ-I-Fasern mit der Kontraktion beginnen, nach 0,04 s die Typ-IIA-Fasern und nach weiteren 0,04 s die Typ-IIB-Fasern mit der Kontraktion einsetzen.

kzend: Die Typ-I-Fasern beginnen mit der Kontraktion. Die weiteren Fasertyp-Gruppen setzen dann mit der Kontraktion ein, wenn die Kontraktionszeit der jeweils

langsameren Gruppe abgelaufen ist, also die Typ-II-Fasern 0,14 s nach den Typ-I-Fasern und die Typ-IIB-Fasern noch einmal 0,1 s später.

Die Leistungsmerkmale bei den unterschiedlichen Rekrutierungsfolgen (bei Wurfgewichten von 0,33 kg und 3 kg) sind in Tab. V zusammengefasst und den Leistungsmerkmalen eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Modellmuskels gegenüber gestellt.

Tab. V: Leistungsmerkmale eines zusammengesetzten Muskels und eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Muskels bei zwei unterschiedlichen Wurfgewichten und unterschiedlicher Rekrutierung (Erläuterung der Rekrutierungsfolge im Text)

	Wurfgewicht [kg]	add	kziso	kzend	Typ IIB
Abwurfgeschwindigkeit [m/s]	0,33	4,1922	4,1923	4,178	5,543
	3,0	2,112	2,113	2,114	3,637
Abwurfwinkel [°]	0,33	85	85	85	71,67
	3,0	85	85	85	85
Dauer der Aktion [s]	0,33	0,305	0,345	0,430	0,230
	3,0	0,650	0,690	0,815	0,545

Abb. 9 zeigt zur visuellen Verdeutlichung der Leistungsunterschiede die Flugkurven bei einem Wurfgewicht von 0,33 kg.

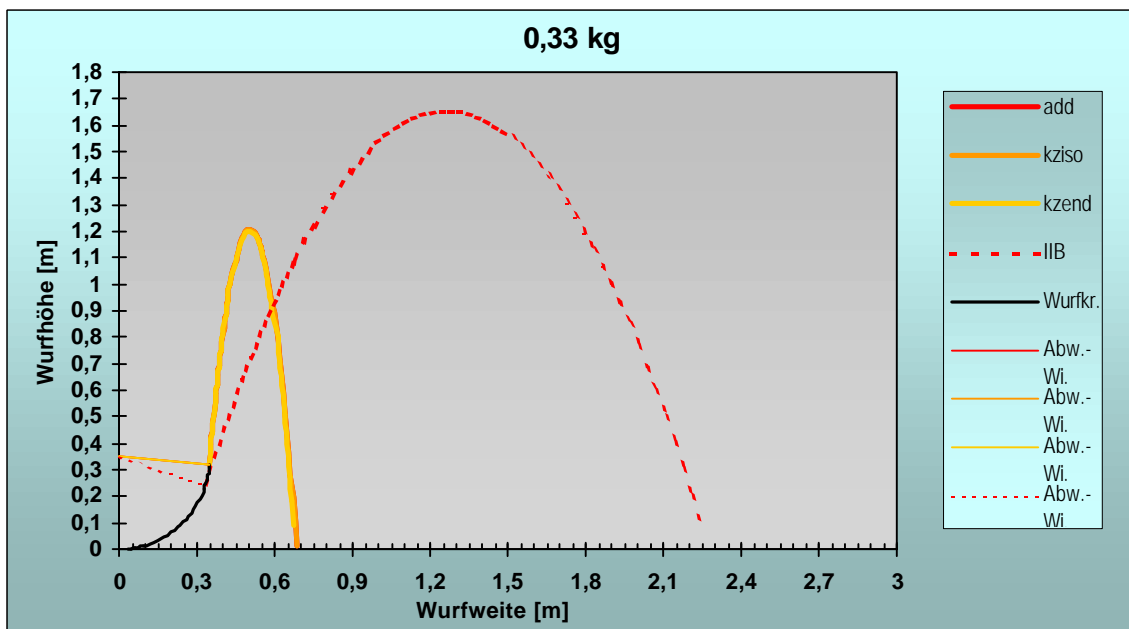


Abb. 9: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion eines aus drei Fasertypen zusammengesetzten Muskels bei unterschiedlicher Rekrutierung der Fasertypen (add, kziso, kzend) und eines Muskels nur aus Typ-IIB-Fasern. *Wurfkr.:* Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkels von 85°. *Abw.-Wi.:* tatsächlicher Abwurfwinkel.

Tab. V und Abb. 9 machen deutlich, dass der aus den verschiedenen Fasertypen zusammengesetzte Muskel unter den im Modell herrschenden Einschränkungen geringere Abwurfgeschwindigkeiten erzeugt als ein nur aus Typ-IIB-Fasern bestehender Modellmuskel. Dazu benötigt ersterer wesentlich mehr Zeit und den gesamten zur Verfügung stehenden Gelenkwinkel. Zusätzlich zeigt sich, dass die Rekrutierungsfolge der Fasertypen des zusammengesetzten Muskels unter den Modellbedingungen so gut wie keinen Einfluss auf Abwurfgeschwindigkeit ausübt. Lediglich die Dauer der Abwurfaktion vom Start der Aktivität bis zum Auftreten der (maximalen) Abwurfgeschwindigkeit wächst mit Zunahme der Verschiebung des Aktivitätsbeginns der Fasertypen (Tab. V). Beide Befunde gelten sowohl für das leichte (0,33 kg) als auch für das schwere (3,00 kg) Wurfgewicht (Tab. V).

Nun könnte man vermuten, dass die geringen Leistungsunterschiede bei unterschiedlicher Rekrutierungsfolge durch die Einschränkung des Gelenkwinkels hervorgerufen wird, die die Modellmuskeln daran hindert, ihr Vermögen bzgl. der Verkürzungsgeschwindigkeit auszuschöpfen. Um dies zu überprüfen, wurden die Faserlänge halbiert und die Leistungsdaten bei einem Wurfgewicht von 0,33 kg ermittelt. Das Ergebnis ist in Tab. VI dargestellt.

Tab. VI: Leistungsmerkmale eines zusammengesetzten Muskels und eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Muskels bei einem Wurfgewicht von 0,33 kg und unterschiedlicher Rekrutierung. Im Gegensatz zu Tab. V liegt nur eine **Faserlänge von 0,05 m** zugrunde. (Erläuterung der Rekrutierungsfolge im Text)

Rekrutierungsfolge	add	kziso	kzend	Typ IIB
Abwurfgeschwindigkeit [m/s]	2,7924	2,7929	2,7681	3,7675
Abwurfwinkel [°] ¹⁾	54,93	54,24	56,28	44,61
Dauer der Aktion [s]	0,270	0,310	0,400	0,200

Obwohl bei kürzerer Muskelfaser die im Modell zur Verfügung gestellte Gelenkamplitude nicht ausgeschöpft wird, unterscheiden sich die Leistungsmerkmale mit Ausnahme der Aktionsdauer nur minimal, vergleichbar mit den Daten bei größerer Faserlänge (Tab. V) . Daraus kann gefolgert werden, dass bei maximalen explosiv-ballistischen Kontraktionen eine Veränderung der Rekrutierungsfolge in dem hier zugrunde gelegten Rahmen nur einen Einfluss auf die Aktionsdauer ausübt.

Unter dem Aspekt, dass bei explosiv-**isometrischen** Kontraktionen ein zeitgleicher Kontraktionsbeginn der Fasertypen den höchsten Kraftstoß liefert (TIDOW / WIEMANN 1993), ist auch bei explosiv-**ballistischen** Kontraktionen die Entwicklung des Muskelkraftmomentes von besonderem Interesse. Abb. 10 zeigt sowohl das Gesamtmoment des Muskels (I+IIA+IIB), als auch zur Orientierung über den

Aktivitätsbeginn den Kraftstoß der Typ-I-Faser, sowie die Addition des aus Typ-I und Typ-IIA gelieferten Momentanteiles (I+IIA) im Laufe einer explosiv-ballistischen Kontraktion (Wurfgewicht 0,33 kg).

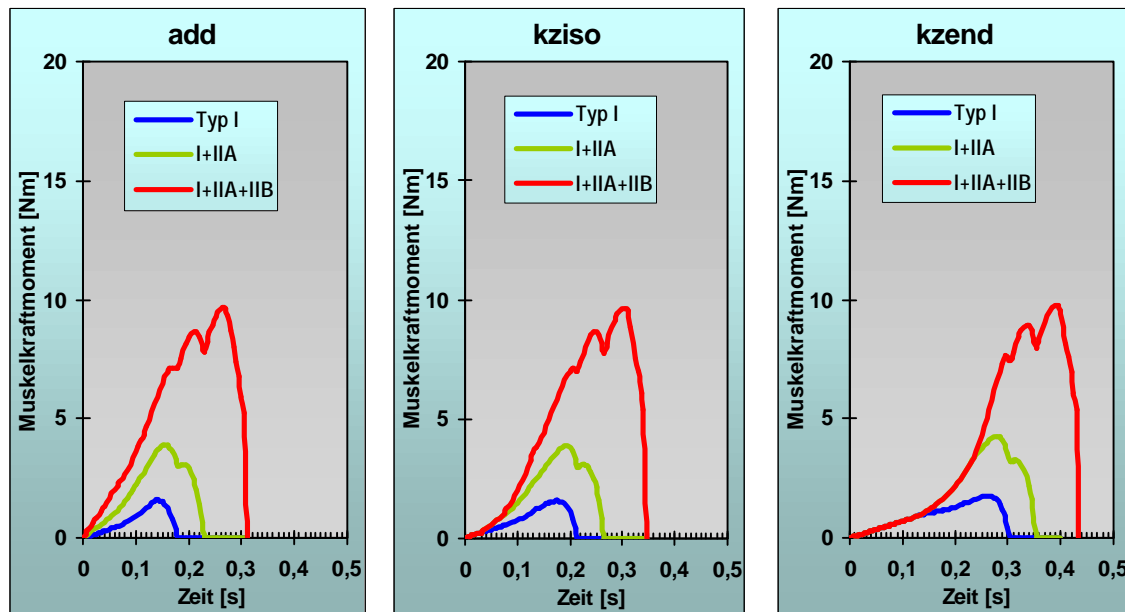


Abb. 10: Muskelkraftmomente bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion eines aus drei Fasertypen zusammengesetzten Muskels bei unterschiedlicher Rekrutierung der Fasertypen (add, kziso, kzend). Wurfgewicht 0,33 kg). rot: Gesamtmoment des Muskles

Abb. 10 untermauert die aus Tab. V und Abb. 9 gewonnenen Erkenntnisse. Somit scheint bei explosiv-ballistischen Kontraktionen ein gleichzeitiger Aktivitätsbeginn der Fasertypen eines Muskels nur unter Zeitmangel einen besonderen Vorteil zu bieten. Dies ist in sofern bemerkenswert, als der Anteil, den die langsameren Fasern zum Gesamtkraftstoß beisteuern, mit zunehmender Verschiebung des Aktivitätsbeginns wächst. Dies mag darin begründet sein, dass bei größerer Verschiebung des Aktivitätsbeginns die erzeugte Verkürzungsgeschwindigkeit erst allmählich wächst und somit die langsameren Fasern durch die HILLSche Beziehung erst allmählich an Einfluss verlieren.

Zum Vergleich werden in Abb. 11 einerseits das Muskelkraftmoment eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Modellmuskels im Laufe einer explosiv-**ballistischer** Kontraktion (Wurfgewicht 0,33 kg), sowie das Muskelkraftmoment eines aus drei Fasertypen zusammengesetzten Muskels im Lauf einer explosiv-**isometrischen** Aktion angeboten.

Beim Vergleich von Abb. 11 mit Abb. 10 ist zu beachten, dass

1. die Skalierungen der Größenachsen nicht identisch sind und
2. der Kontraktionsbeginn jeweils in einem Dehnungsgrad von 140% (Tab. I)

festgelegt wurde, so dass bei der isometrischen Kontraktion (Abb. 11, rechts) die Muskelfasern nicht mit der bei einem Dehnungsgrad von 100% möglichen Maximalkraft agieren können.

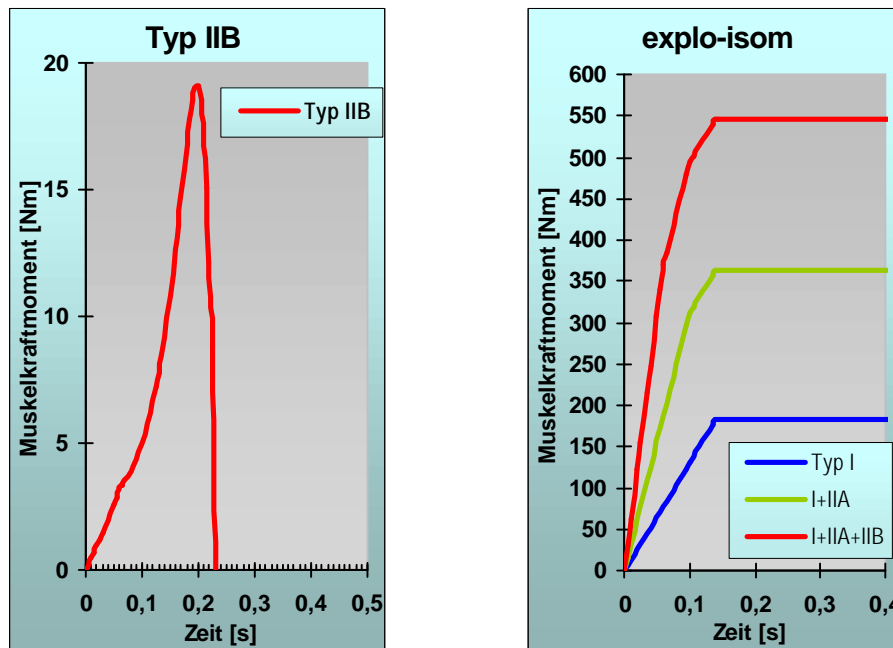


Abb. 11: Muskelkraftmoment bei maximaler explosiv-**ballistischer** Kontraktion eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Modellmuskels (links) und Muskelkraftmoment bei explosiv-**isometrischer** Kontraktion eines aus drei Fasertypen zusammengesetzten Muskels (rechts) . rot: Gesamtmoment des Muskles. (Weitere Erläuterungen im Text)

Die Unterschiede in den Spitzenwerten von Abb. 10 und Abb. 11 sind erstaunlich. Die Ursachen der geringen Muskelkraftmomente bei den explosiv-ballistischen Kontraktionen müssen den relativ hohen Verkürzungsgeschwindigkeiten zugeschrieben werden; denn bei einem Wurfgewicht von 0,33 kg (Tab. III) reichen diese fast an die fasertypspezifischen maximalen Verkürzungsgeschwindigkeiten heran. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass im vorliegenden Modell aus rechnerischen Gründen die HILLsche Beziehung als linear angenommen werden musste. Bei Berücksichtigung eines (korrekten) hyperbel-artigen Verlaufes der HILLschen Beziehung wären noch größere Differenzen zwischen den Muskelkraftmomenten bei ballistischer bzw. isometrischer Kontraktion zu erwarten.

Als letzte Frage interessiert der Unterschied in den Leistungen maximaler explosiv-ballistischer Kontraktionen zwischen sogenannten „schnellen“ Muskeln mit einem hohen Anteil von Typ-II-Fasern und „langsamen“ Muskeln mit einem entsprechend hohen Anteil von Typ-I-Fasern. Dazu wurden zusätzlich zum bisher besprochenen zusammengesetzten Modellmuskels mit der Fasertyp-Kraftrelation von 1/1/1 zwei weitere Muskeln modelliert, wobei dem langsamen Muskel die Fasertyp-Kraftrelation von 3/1/1 (Typ I/Typ IIA/Typ IIB) und dem schnellen Muskel die Relation 1/1/3 zugewiesen wurden. Diese Relationen entsprechen in etwa den bei JOHNSON u.a.

(1973) angegebenen Fasertyprelationen des M. soleus bzw. M. trizeps brachii.

Tab. VII: Leistungsmerkmale zusammengesetzter Muskeln mit unterschiedlicher Fasertyp-Kraftrelation und eines nur aus Typ-IIB-Fasern bestehenden Muskels (Erläuterung der Rekrutierungsfolge im Text)

Fasertyp-Kraftrelation	3/ 1/ 1	1/ 1/ 1	1/ 1/ 3	Typ IIB
Abwurfgeschwindigkeit [m/s]	3,368	4,192	4,928	5,5432
Abwurfwinkel [°]	85,0	85,0	79,0	71,7
Dauer der Aktion [s]	0,340	0,305	0,265	0,220
erreichte Verkürzungsgeschw. [m/s]	0,573	0,716	0,816	0,876

Bei der Berechnung der Leistungsdaten wurde ein Wurfgewicht von 0,33 kg zugrunde gelegt. Als Rekrutierungsform ist nur eine gleichzeitige Rekrutierung aller Fasertypen berücksichtigt.

Wie zu erwarten war, unterscheiden sich alle Leistungen der drei Modellmuskeln deutlich (Tab. VII und Abb. 12). Das muss auch für den Abwurfwinkel gelten; denn es ist anzunehmen, dass die fehlenden Unterschiede bei den beiden „langsameren“ Muskeln (3/1/1 und 1/1/1) durch die Modelleinschränkung verdeckt werden. Daraus wird einleuchtend, dass bei explosiv-ballistischen Krafteinsätzen der Anteil der Typ-IIB-Fasern von entscheidender leistungsbestimmender Bedeutung ist. Diese Einflussgröße erscheint als wesentlich bedeutsamer – zumindest im Hinblick auf die im Modell erhobenen gelenkmechanischen Einschränkungen – als die Rekrutierungsfolge (Tab. V und Abb. 9).

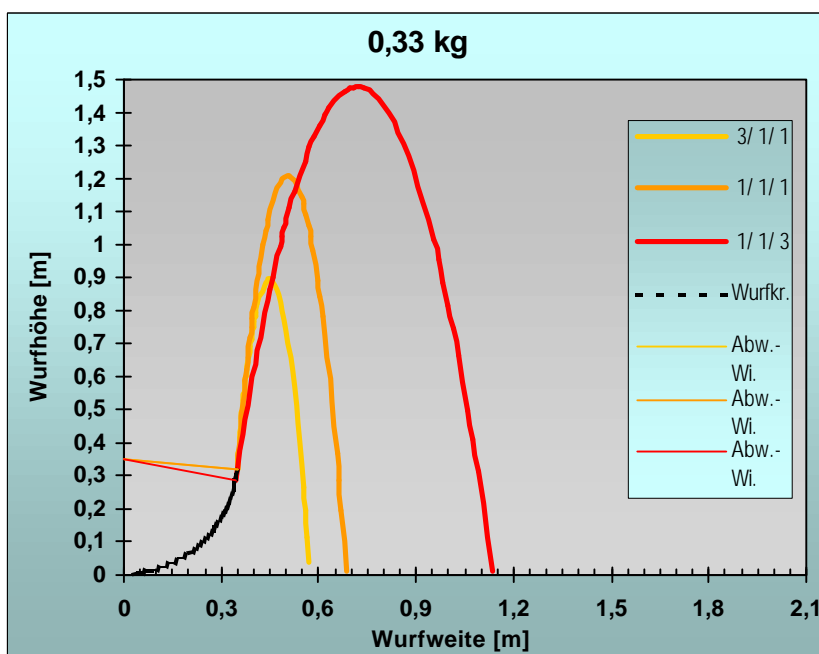


Abb. 12: Wurfleistung bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion zusammengesetzter Muskeln mit unterschiedlicher Fasertyp-Kraftrelation. *Wurfkr.:* Bewegungsbahn des Wurfgewichtes von der Startposition von 5° bis zum maximal möglichen Abwurfwinkel von 85°. *Abw.-Wi.:* tatsächlicher Abwurfwinkel.

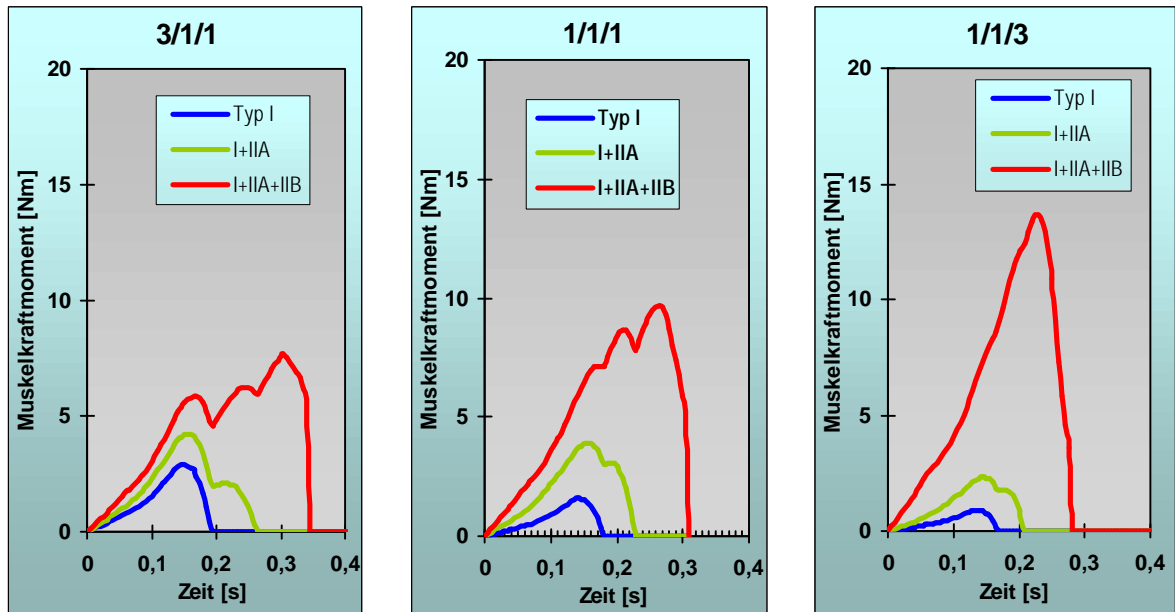


Abb. 13: Muskelkraftmomente bei maximaler explosiv-ballistischer Kontraktion von aus drei Fasertypen zusammengesetzten Muskeln mit unterschiedlicher Fasertyp-Kraftrelation. (Wurfgewicht 0,33 kg). rot: Gesamtmoment des Muskels

Abb. 13 verdeutlicht die Entwicklung der Muskelkraftmomente der unterschiedlich zusammengesetzten Muskeln im Lauf einer explosiv-ballistischen Kontraktion bei simultaner Rekrutierung. Aufgrund der hohen Verkürzungsgeschwindigkeit der Typ-IIB-Fasern steigt der Kraftstoß mit dem Kraftanteil der schnellen Fasern. Gleichzeitig wird deutlich, dass mit steigendem Anteil der Typ-IIB-Fasern die Zeitspanne, in der die langsameren Fasertypen der Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels folgen und somit einen Beschleunigungsbeitrag leisten können, abnimmt.

Literatur

- DESMEDT, J.E.: The size principle of motoneuron recruitment in ballistic or ramp voluntary contractions in man. In: DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. Progress in Clinical Neurophysiology, Bd. 9, Basel 1981: 97-136.
- HENNEMAN, E.: Recruitment of Motoneurons: the size principle. DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. Progress in Clinical Neurophysiology, 9, 1981: 26-60.
- HERZOG, W., ABRAHAMSE, S.K., TER KEURS, H.E.D.J.: Theoretical determination of force-length relation of intact human muscles using the cross-bridge model. Pflügers Arch. 416 (1990): 113-119.
- JONHSON, M.a., POLGAR, J. et al.: Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. Journal of Neurological Science, 18, 1973: 111-129.

- LARSSON / MOSS: Maximum velocity of shortening in relation to myosin isoform composition in single fibres from human skeletal muscles. *J. Physiol.* 472, 1993: 595-614.
- TIDOW. G./ WIEMANN, K.: Zur Interpretation und Veränderbarkeit von Kraft-Zeit-Kurven bei explosiv-ballistischen Krafteinsätzen. Teil I: Physiologische Grundlagen. In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 44, 1993, 3: 92-103.
- TIDOW. G./ WIEMANN, K.: Zur Interpretation und Veränderbarkeit von Kraft-Zeit-Kurven bei explosiv-ballistischen Krafteinsätzen. Teil II: In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 44, 1993, 4: 136-150.
- WALKER, S.M., SCHRODT, G.R.: I-segment lengths and thin filament periods in skeletal muscle fibres of the rhesus monkey and the human. *Anatomical Record*, 178 (1973): 63-82.