

Übung und Seitendominanz der menschlichen Willkürmotorik

Zur Programmierung der Stoss- und Wurfbewegung im Rechts-Links-Vergleich

RICHARD JUNG* und VOLKER DIETZ

Neurologische Universitätsklinik mit Abteilung für Neurophysiologie,
Hansastraße 9, D-7800 Freiburg i. Br., Bundesrepublik Deutschland

Eingegangen am 8. Mai 1976

TRAINING AND DOMINANCE IN HUMAN VOLUNTARY MOVEMENTS

Right-Left-Comparisons of Putting and Throwing Programs

SUMMARY. 1. Muscle action potentials and efficiency were measured during shot putting and ball throwing in right and left handed normals. The dominant and the nondominant side were compared in trained and untrained persons in order to investigate motor learning effects.

2. Trained shot putters show a coordinated sequence of activation of trunk, leg and arm muscles of both sides which precedes the final arm extension. After turning the body from an initially inclined and twisted position the final arm extension transfers the force of the accelerated body mass to the shot.

3. When shot putting or throwing is performed by the nondominant arm in subjects trained for the dominant arm the coordination of the contralateral dominant arm is lacking, in contrast to the performance by the trained arm.

4. In untrained persons the shot putting is effected mainly by arm extension on either side. The preceding trunk and leg action is very incomplete and without coordination of the contralateral arm, whereas the shot putting arm shows stronger triceps brachii innervation. The distances achieved by untrained shot putters reach only one-fifth or one-third of those of highly trained persons.

5. In ball throwing the throwing arm shows final coactivation of the biceps and triceps muscles coordinated with trunk and contralateral arm movements. The distances reached by throwing with the untrained arm are about half of those of the trained dominant arm.

* Herrn Kollegen Gerd Peters zum 70. Geburtstag gewidmet.

6. Trained sportsmen put the shot with the untrained nondominant arm to 73% of the distance achieved by the trained arm. Untrained persons, however, show an approximately equal, smaller range of shot with the dominant and nondominant arm (8% side difference).

7. A biomechanical factor causing different performances of trained and untrained persons in shot putting is the different force of the energy transferring mass: the untrained person thrusts mainly with the arm which has barely 1/20 of the mass of the whole body, used by the trained shot putter.

8. That bilateral training and not hemispheric dominance is the decisive factor producing the improved efficiency is demonstrated by three observations: a) the maximal efficiency and bilateral coordination of shot putting in trained persons, b) the lack of contralateral activation of the dominant arm in shot putting and throwing by the nondominant arm, and c) the minimal left and right side differences in performance of untrained persons.

KEY WORDS: Voluntary Movement - Motor Learning - Dominance - Shot-Putting - Throwing - Training Effects - Man.

ZUSAMMENFASSUNG. 1. Telemetrische Elektromyographie-Registrierungen und Leistungsmessungen beim Kugelstossen und Ballwerfen gesunder Rechts- und Linkshänder werden beschrieben. Vergleiche der dominanten (geübten) und nicht-dominanten (ungeübten) Seite bei Trainierten und Nichttrainierten ermöglichen eine Differenzierung des motorischen Lernens und der Seitendominanz.

2. Beim trainierten Kugelstoß findet sich eine geregelte Innervationsfolge der gesamten Körpermuskulatur, die der finalen Extension des stossenden Armes vorausgeht. Beim Abstoßen überträgt der gestreckte Arm die Schubkraft des ganzen Körpers auf die Kugel nach koordinierter Aktivierung von Rumpf-, Arm-, und Beinmuskeln beider Seiten mit Rumpfdrehung und Streckung. Daher ist die Tricepsaktivierung der letzten Armextension nicht stärker als die Innervation der übrigen Muskeln.

3. Bei Stoß und Wurf mit dem nicht-trainierten Arm fehlt die Koordination des kontralateralen dominanten Armes, obwohl dieser für Stossen und Werfen trainiert ist.

4. Beim Untrainierten wird der Kugelstoß vorwiegend durch Armextension durchgeführt, aber die Mitinnervation des kontralateralen Armes fehlt beim Rechtsstoß und Linksstoß. Die vorbereitende Stützaktion und Bewegungsabfolge des Rumpfes ist unvollkommener, die Tricepsaktivierung des stossenden Armes dagegen stärker und länger als beim Trainierten. Die Stoßweite erreicht bei Ungeübten nur 1/5 bis 1/3 des Hochtrainierten.

5. Beim Ballwurf finden sich ähnliche Muskelkoordinationen vom Arm, Rumpf und Bein und beim Abwurf eine Koaktivierung von Biceps und Triceps brachii. Rechtshänder erreichen beim Linkswurf mit geringer Mitarbeit des rechten Armes und des übrigen Körpers nur die halbe Wurfweite des geübten Rechtswurfes und schlechtere Zielleistungen als rechts.

6. Bei trainierten Sportlern ist die Kugelstossweite mit dem geübten rechten Arm etwa 27% größer als mit dem ungeübten linken Arm. Dagegen sind die Rechts-Links-Unterschiede der Kugelstossweite bei Ungeübten mit 8% sehr gering.

7. Biomechanisch ist die Leistungssteigerung der Kugelstossweite bei Trainierten gegenüber Ungeübten zum Teil durch verschiedene Schubkraft der energieübertragenden Masse zu erklären: Der Trainierte stösst mit der ganzen Körpermasse, der Ungeübte mehr mit dem Arm, der weniger als 5% der Körpermasse hat.

8. Daß nicht die Hemisphärendominanz als solche, sondern bilaterale Übung entscheidend für Bewegungsprogramm und Mehrleistung ist, folgt aus 3 konstanten Ergebnissen: a) optimale Kugelstossweiten und Ballwurfweiten mit bilateralem Innervationsmuster bei Trainierten, b) minimale Rechts-Links-Differenzen bei Untrainierten und c) fehlende Mitarbeit des rechten (dominanten) Armes beim Linksstoss und Linkswurf Rechtstrainierter.

SCHLÜSSELWÖRTER: Willkürbewegung - Motorisches Lernen - Seitendominanz - Kugelstossen - Werfen - Trainingseffekte - Mensch.

Erlernte Bewegungsfolgen sind für alle motorischen Leistungen von großer Bedeutung. Auch bei neurologischen Erkrankungen mit Bewegungsstörungen, bei ihrer Therapie und Kompensation sind motorische Lernprozesse beteiligt. Doch wissen wir noch sehr wenig über die Physiologie der trainierten Bewegungskoordination und über das, was man in Analogie mit dem Computern lernen physiologische "Bewegungsprogrammierung" nennt.

Beim Menschen bilden erlernte Handlungsprogramme die Grundlagen der Geschicklichkeit in Handwerk, Sport und Musik. Gute motorische Leistungen werden durch Training erreicht und sind am besten beim Sport zu messen. Neuere Methoden der Telemetrie ermöglichen gute Registrierungen der Muskelkoordination bei Sportleistungen des bewegten Menschen.

Stoss- und Wurfbewegungen sind für solche Studien besonders geeignet. Sie werden mit dem dominanten Arm ausgeführt und geübt, beim Rechtshänder rechts, beim Linkshänder links. So bietet sich der Vergleich der dominanten und nicht -dominanten Seite als Maß für Übung und Geschicklichkeit an. Wir haben daher beim Kugelstossen und Werfen mit mehrfachen telemetrischen Registrierungen die rechte und linke Seite verglichen und konnten damit charakteristische Unterschiede der geübten und ungeübten Bewegung objektiv erfassen. In dieser Arbeit werden nach einer Kurzmitteilung [17] einige Ergebnisse motorischer Programmierung von Stoss- und Wurfbewegungen im Rechts-Links-Vergleich mit typischen Bildern beschrieben. Die Befunde sollen zur Unterscheidung von Übungseffekten und Seitendominanz beitragen und damit Vorfragen des motorischen Lernens und sportlichen Trainings klären.

Im Folgenden werden die wesentlichen Befunde der Bewegungskoordination und Muskeltelemetrie beschrieben und illustriert. Sie sollen weitere systematische physiologische Studien der menschlichen Willkürbewegung ermöglichen.

METHODIK

Das Elektromyogramm (EMG) wurde telemetrisch von 4-8 Paaren von Oberflächenelektroden aufgenommen, die auf der Haut in 5 cm Abstand über dem mittleren bis unteren Muskelbauch typischer Flexor- und Extensormuskeln von Arm, Schulter und Bein befestigt waren. Die Übertragung erfolgte durch eine 4-Kanal-Telemetrie der Firma Schwarzer München (Senderfrequenz 151,1 MHz). Die Muskelpotentiale wurden während der Bewegung über Vorverstärker (Zeitkonstante 0,2 sec) mit dem am Rücken befestigten Sender (Abb. 2a) drahtlos über Distanzen von 5-20 m auf ein elektronisches Tonbandgerät übertragen und weitgehend artefaktfrei aufgezeichnet. Die Registrierung erfolgte durch Düsenschreiber (Mingograph) hoher Frequenzeigenschaften (etwa linear bis 1600 Hz) oder Kathodenstrahloszillographen entweder gleichzeitig oder später von den gespeicherten Tonbandaufnahmen.

Da zunächst nur eine vierfache drahtlose Übertragung vorhanden war, wurden die Bewegungen bei der gleichen Versuchsperson mehrfach mit Ableitungen verschiedener Muskelkombinationen wiederholt. Die ersten EMG-Registrierungen wurden jeweils von Kugelstoss und Ballwurf mit dem dominanten geübten Arm durchgeführt, danach wurde bei Stoss und Wurf des nicht-dominanten ungeübten Armes registriert. Die abgebildeten Muskelpotentiale wurden bei den einzelnen Versuchspersonen verschieden kombiniert. Am Arm wurden immer die Flexoren und Extensoren des dominanten und nicht-dominanten Armes beim rechtsseitigen und beim linksseitigen Stoss und Wurf verglichen (Abb. 3, 4, 7, 8).

Die Armbewegung wurde mit einem Beschleunigungsaufnehmer am Unterarm ebenfalls drahtlos übertragen (2 dimensionaler Beschleunigungsmesser Fa. Burchard, Freiburg, Sendefrequenz 37,1 MHz). Die Bewegungsabfolge wurde photographisch in verschiedenen Bewegungsstadien (Abb. 1, 2, 5) oder durch Filmaufnahmen registriert und mit den EMG-Kurven (Abb. 3, 4, 7) verglichen, der Kugelstoss und Ballwurf durch den Beschleunigungsmesser markiert.

Bei allen Versuchspersonen (Vp) wurde die Stoss- und Wurfleistung des dominanten (mehr oder weniger geübten) Armes mit der des nicht-dominanten (nicht-geübten) Armes verglichen, jeweils in Gruppen von 10 Vp mit ähnlichem vorangehenden Sporttraining oder ohne Übung. Die telemetrische EMG-Ableitung wurde nur bei 8 ausgewählten Personen durchgeführt: bei 1 Spitzensportler, 6 sportlich geübten Männern und einer ungeübten Frau, die noch nie eine Kugel gestossen hatte.

Die Leistung wurde beim Kugelstossen durch die Stossweite der Kugel, beim Ballwerfen durch Weite und Zielabweichung des Balles gemessen. Das Gewicht der Kugel betrug für alle Vp 7,26 kg, auch beim Kugelstoss der Frauen, obwohl sie beim Sport mit leichteren Kugeln stossen.

Der Ballwurf mit einem 70 g schweren Schlagball wurde durch Weitwerfen und Zielwerfen für den rechten und linken Arm untersucht. Die Zielgenauigkeit wurde beim Wurf auf eine in 10 m Abstand postierte Zielscheibe mit Kreisen von 1 und 2 m Durchmesser und Fehlern außerhalb der Zielscheibe gemessen (Tabelle 4).

ERGEBNISSE

I. Kugelstoss

A. Stossleistungen

Stossweiten rechts und links bei mäßig trainierten Rechtshändern.

Bei 10 gesunden männlichen rechtshändigen Sportstudenten im Alter von 20 bis 23 Jahren, die neben allen anderen Sportarten auch Kugelstossen trainiert hatten, wurden die Bestleistungen der drei ersten Stösse des trainierten rechten Armes mit dem bisher ungeübten Stossen des linken Armes verglichen. Es wurde keine große Zahl von Stößen für statistische Auswertungen durchgeführt, um Übungseffekte der nicht-trainierten Seite zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 1 mit konstanter Minderleistung des nicht-trainierten Linksstosses von etwa 3/4 Weite des trainierten Rechtsstosses.

Tabelle 1. Kugelstossweiten bei 10 rechts-trainierten gesunden Rechtshändern (Sportstudenten). Maximalwerte von je 3 Stößen rechts und links (Kugelgewicht 7,26 kg)

Nr.	Name	Alter	Maximalwerte m		
			rechts	links	Differenz (% li von re.)
1	Fr	21	9,65	7,51	77,8
2	Gr	20	8,80	5,88	66,8
3	Ka	22	8,60	6,70	77,9
4	Hu	23	7,70	5,85	76,0
5	Kl	22	7,80	5,25	67,3
6	Hu	22	9,30	6,10	65,6
7	Sc	20	10,30	7,85	76,2
8	Qu	20	8,25	5,54	67,0
9	Kr	20	9,90	6,50	65,6
10	Sr	21	8,05	6,98	86,7

Durchschnittswerte rechts: 8,83 m (+ 0,91)

Durchschnittswerte links : 6,41 m (+ 0,85)

durchschnittliche Minderleistung links: 72,7% von rechts.

Stossweiten rechts und links bei völlig Ungeübten. Da alle Männer zumindest im Schulturnen Kugelstossübung hatten, fanden wir nur Frauen als im Kugelstossen total ungeübte Vp. Ihre wenig effektive Bewegungskoordination (Abb. 6) wird mit den telemetrischen Befunden genauer beschrieben. Um die Stossweiten mit den anderen Vp vergleichen zu können, verwendeten wir die gleiche Kugel von 7,26 kg, obwohl Frauen im Sport sonst mit leichteren Kugeln stossen. Alle ungeübten Frauen hatten Stosswerte unter 5 m. Der Leistungsvergleich von rechts und links ergab annähernd gleiche niedere Werte mit den ungeübten beiden Armen (Tabelle 2).

Tabelle 2. Ungeübtes Kugelstossen (10 junge Frauen, Rechtshänder). Alle hatten niemals Kugel gestossen, nur Vp 2, 7 und 9 waren früher in anderen Sportarten (Tennis und Ballwerfen) rechts geübt, aber nicht im Kugelstoss. Die Durchschnittsleistungen der Stossweite sind rechts und links ähnlich mit nur 30 cm Minderleistung (-7, 7%) links.

		mittlere Stossweite in m (n=3)		
		Alter	rechts	links
1	B. G.	20	3,5	3,3
2	L. L.	22	3,9	3,5
3	U. W.	24	3,4	3,3
4	S. Sch.	25	3,7	3,6
5	I. G.	31	3,1	2,9
6	B. F.	31	4,6	4,2
7	M. J.	32	4,7	4,1
8	R. U.	36	4,3	3,9
9	W. B.	36	4,6	3,7
10	E. O. -S.	37	3,3	3,3

Durchschnitt 3,88 m 3,58 m
(N=10) ($\pm 0,60$) ($\pm 0,40$)

Die durchschnittliche Stossweite beträgt also links 92, 3% von rechts.

Eine elfte weibliche Versuchsperson, die vor 15 Jahren rechts im Speerwerfen sehr gut trainiert war und Tennis spielte, erreichte beim rechtsseitigen Kugelstossen etwa 30% größere Weiten als beim Linksstoss (4,3 m rechts, 3,2 m links). Die gleichen größeren Weiten des Rechtsstosses zeigte eine zwölfte Frau, die früher rechts Handball und Basketball gespielt hatte. Diese dem trainierten Rechtsstoss der Tabelle 1 ähnlichen höheren Rechtsleistungen und die größeren Rechts-Links-Differenzen der Vp 2, 7 und 9 sprechen dafür, daß längeres Training von ähnlichen Sportarten die untrainierte Kugelstossleistung mit dem für andere Wurfarten geübten dominanten Arm verbessern kann.

B. Telemetrische Befunde beim Kugelstoss

a) Muskelkoordination beim trainierten Stoss. Außer einem Linkshänder wurden die Elektromyogramme (EMG) der vorwiegend beteiligten Muskeln beider Arme und des linken Beines von Rechtshändern registriert. Trainierte Rechtshänder zeigten während der in Abbildung 1 dargestellten typischen Bewegungsfolge des Kugelstosses rechts die in Abbildung 3, 4A und 5A telemetrisch-gewonnenen EMG-Kurven von 4 und 6 Muskeln. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die wichtigsten beim Rechtsstoss aktivierten Muskeln im rechten Arm und linken Bein. Es ist ein zeitlich geregeltes Aktivierungsmuster mit tonischen und phasischen Komponenten. Die letzte Stossphase in den Extensoren und Flexoren der Arme entspricht meistens einer alternierenden reziproken Innervation. Im Folgenden werden die EMG-Befunde zum besseren Verständnis zusammen mit der Bewegung und Biomechanik beschrieben.

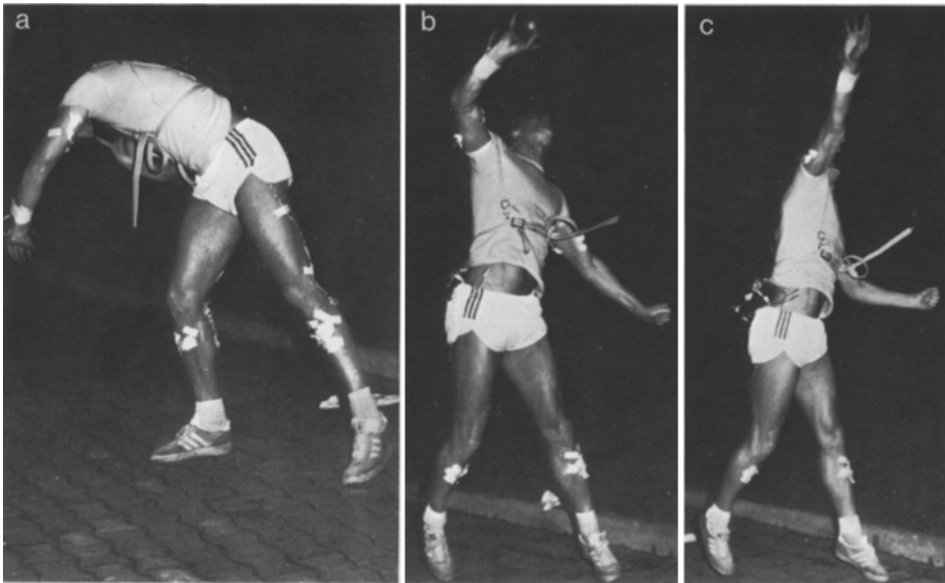


Abb. 1 a-c. Bewegungsabfolge beim Kugelstossen eines Hochtrainierten (Spitzensportler im Zehnkampf D. T. 20 Jahre, 20. XI 1975). Die kinetische Energie wird zuerst aus der Masse des Rumpfes (a,b) und zuletzt aus dem rechten Arm (c) auf die Kugel übertragen.

(a) Bewegungsvorbereitung: Ausgangsstellung ist eine nach rechts hinten gedrehte und gebückte Stützhaltung mit rückgebeugtem rechten Arm. So kann beim Abstoß die gesamte Körpermuskulatur mit rotierender Streckung des Rumpfes, Beinextension und Mitbewegung des linken Armes aktiviert werden (vgl. Abb. 3). (b) Rumpf-, Bein- und Armkoordination: Vor Abstoßen der Kugel mit Linksdrehung des Körpers und Beinextension wird der Rumpf gestreckt und nach vorn geworfen. Der linke Arm bleibt noch extendiert, bevor die rechte Armstreckung durch Tricepsinnervation die Kugel in c abstößt. (c) Letzte Abstoßphase: Erst nach der Rumpfdrehung und Streckung erfolgt die terminale Armextension rechts, während der linke Arm gebeugt wird. Das lose Gürtelband zeigt die Richtung der Schubkraft mit Fortleitung der Rumpfbeschleunigung nach vorn und oben

In der Vorbereitungsphase (entsprechend Abb. 1a und b) sieht man vorwiegend tonische Haltungsinervationen der Bein-, Rumpf- und Schultermuskeln (infraspinatus, Abb. 3), der Biceps brachii (Abb. 3 und 4) und der Unterarmflexoren (Abb. 5 A).

Dies entspricht dem Halten der Kugel im rechten Arm und der rechtsgedrehten und gebeugten Ausgangsstellung des Rumpfes. Kurz vor und in der letzten Stosphase (Abb. 1c) zeigen die Arm- und Beinmuskeln eine stärkere phasische Innervation mit Aktivierungsgruppen von 200-300 msec. Dauer.

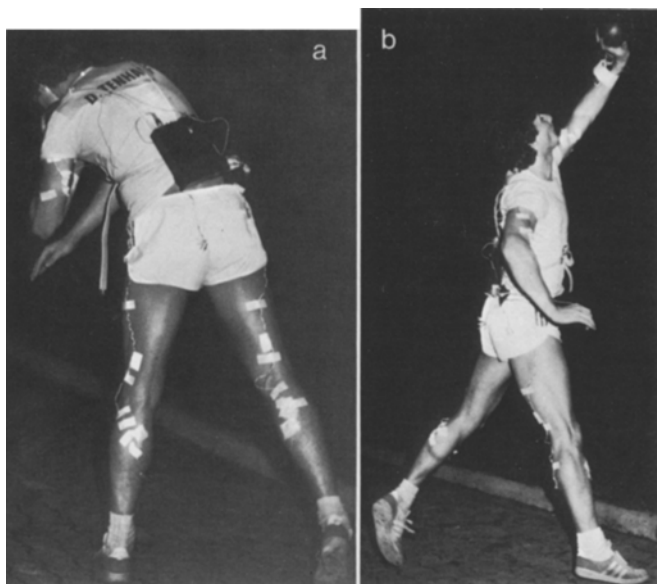


Abb. 2 a und b. Bewegungsfolge beim Kugelstossen mit dem ungeübten linken Arm. Gleicher Spitzensportler wie Abb. 1, der als Rechtshänder für den Stoss rechts trainiert ist und auf dem Rücken den Telemetriesender trägt. (a) Bewegungsvorbereitung: Die Ausgangsstellung ähnelt dem rechtsseitigen Stoss der Abb. 1 a, ist aber weniger gebeugt und gedreht und daher in der Schubkraft des Körpers geringer. (b) Abstossphase durch Armstreckung: Die Energieübertragung aus der Körperdrehung ist kleiner als in Abb. 1 b, c. Das Gürtelband wird nicht wie in Abb. 1 c nach vorne geworfen und der Linksstoss erfolgt mehr durch Armextensoren als der Rechtsstoss in Abb. 1. Die Stossweite links beträgt nur etwa $\frac{2}{3}$ des trainierten Rechtsstosses

Die Stossphase beginnt in den Streckmuskeln der Beine, besonders deutlich im linken Quadriceps, der vor dem Kugelabwurf mit der Beinstreckung entsprechend Abb. 1b und c kontrahiert wird. In den Schultermuskeln wird die haltende Dauerkontraktion im Infraspinatus erst beim Kugelabstoss vermindert, während der rechte Pectoralismuskel mit dem Vorwerfen des Armes eine kurzdauernde phasische Aktivierung zeigt, die der kräftigen Endaktivierung des Triceps des stossenden Armes rechts etwa 30 msec vorangeht. Die Antagonisten dieser Muskeln werden meistens reziprok gehemmt mit entsprechenden Phasen von Entladungsruhe im EMG.

Die Armmuskeln, die schon in der Vorbereitungsphase des Kugelhaltens eine vorwiegende Daueraktivierung der Flexoren hatten, zeigen in der Stossphase phasisch-reziproke Aktivierung und Hemmung: Reziprok zur Tricepsaktivierung wird der Biceps brachii entspannt und zeigt 30-50 msec nach Abstossen der Kugel wieder eine kurze Innervationsphase.

Die Innervation der Unterarmmuskeln beim trainierten Kugelstoss zeigt Abbildung 5 A. In der Vorbereitungsphase des Kugelhaltens werden die Hand- und Fingerextensoren zunehmend innerviert, während die Kugel auf der etwa waagerechten Handfläche am 2. und 3. Fingergrundgelenk aufliegt. Dieses Aufliegen ermöglicht eine Versteifung mit geringerer Hand- und Finger-Flexoreninnervation als bei Festhalten der Kugel durch Hand- und Fingerbeuger. Vor Abstoss wird zunächst die Handextensoreninnervation vermindert, dann besorgen die Handflexoren mit dem Triceps brachii durch eine phasische Aktivierung das letzte Abstossen der Kugel mit der Schubkraft des ganzen Körpers. Durch Handversteifung mit Nachaktivierung der Extensoren wird der Rückstoss der Kugel aufgefangen. Die später Handextensoraktivierung folgt daher meistens der abstossenden Tricepsaktivierung am Oberarm und entspricht der Bicepsaktivierung nach Kugelstoss in Abbildung 4 A.

b) Bewegungskoordination bei Hochtrainierten. Bei zwei für den Kugelstoss im Zehnkampf sehr gut trainierten Sportlern wurden die Muskelaktionspotentiale der Arm- und Beinmuskeln vor, während und nach der Stossaktion telemetrisch registriert und mit Photos der Bewegungsfolge des Körpers beim Stossen verglichen. Abbildung 1 zeigt bei einem Hochleistungssportler die koordinierte Aktion von Rumpf und Extremitäten beim Stoss mit dem trainierten rechten Arm und Abbildung 2 die weniger effektive Bewegungskoordination beim untrainierten Linksstoss.

Die telemetrischen EMG-Ableitungen der Abbildung 3 geben ein gutes Bild der während der Bewegungsfolge 1 a-c ablaufenden komplexen Aktivierung der wichtigsten Muskeln im vorwiegend beteiligten rechten Arm und linken Bein. Vor dem Kugelstoss durch Armstreckung und Tricepsaktivierung beginnt eine Beinextension mit Quadriceps- und Gastrocnemiusaktivierung und verminderter Aktivität im Tibialis anterior. Nach Kugelabstoss sieht man eine kräftige Aktivierung vorwiegend in den Antagonisten der beim letzten Abstoss tätigen Muskeln, offenbar zur Kompensation der Rückstossenergie und Ausgleich der Körperbalance.

Die Bewegungsanalysen und EMG-Ableitungen zeigen, daß beim Trainierten die Schubkraft der Kugel durch Muskelkoordination und Massenbeschleunigung des ganzen Körpers gewonnen wird, die nach erlernter Stosstechnik eine komplexe Innervationsfolge fast aller Muskeln des Rumpfes und der Extremitäten benötigt. Die Extension des rechten Armes ist nur die Endphase der Aktion (Abb. 1c) und die Aktivierung des M. triceps brachii ist im EMG als letzte Entladungsgruppe der Dreh- und Streckaktion nicht stärker als die Innervation der anderen Muskeln (Abb. 3). Das Abstossen und Loslassen der Kugel in der Hand wird zeitlich genau mit einem Anhalten von Körperdrehung und Streckung von Rumpf und Arm synchronisiert und der Rückstoss wird damit aufgefangen. Die optimale Stossleistung benötigt eine im Training erlernte sehr differenzierte und zeitlich exakt definierte Sequenz der Muskelkoordination.

Die erlernte Kugelstosstechnik ist zwar mit der Rumpf- und Beinkoordination im Prinzip einheitlich, doch zeigen verschiedene Sportler individuelle Variationen, bei denen man vielleicht zwei Typen unterscheiden kann: Eine Stosstechnik beginnt mit ein oder zwei kurzen Schritten als Anlauf (sogenanntes "Angleiten" im Ring von 2,13 m Durchmesser) mit starker Rumpfbeugung und leichter Rumpfdrehung und verwendet beim Abstoss außer

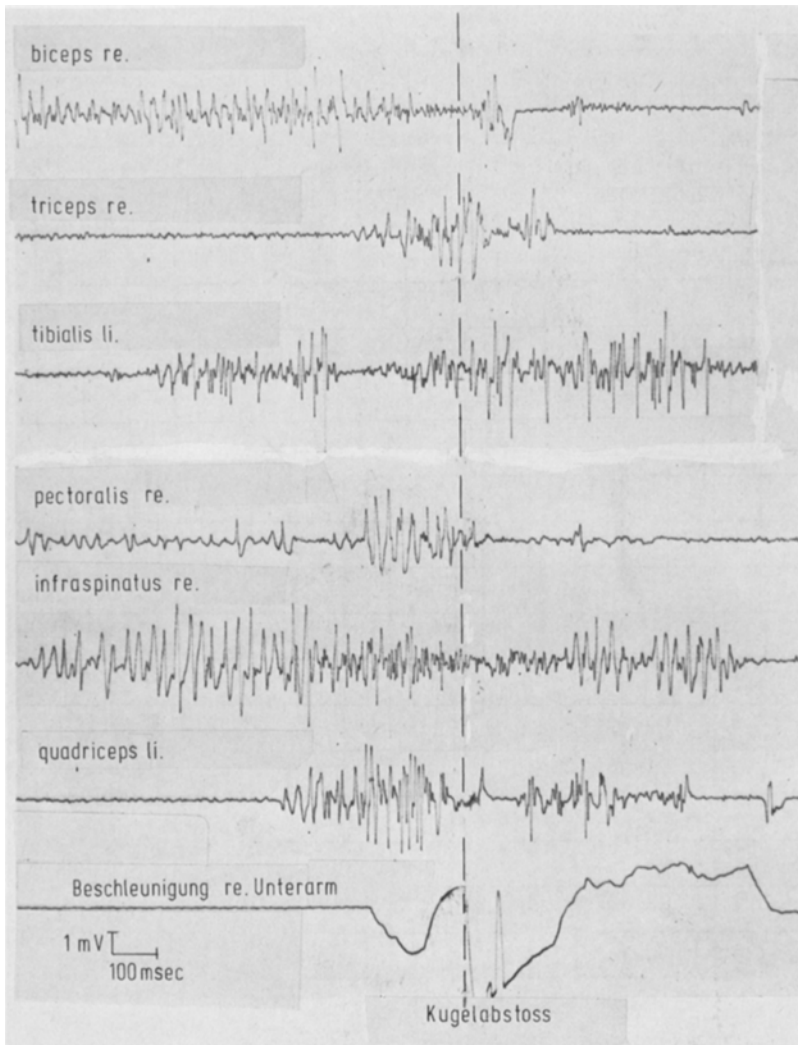


Abb. 3. Typische Muskelkoordination eines Hochtrainierten beim Kugelstossen rechts. Telemetrische EMG-Ableitungen von 6 vorwiegend beteiligten Muskeln des rechten Armes und linken Beines. Gleicher Spitzensportler (D. T. am 20. XI 1975) wie in Abbildung 1 und 2. Der Bewegungsabfolge von Abbildung 1a-c vor, während und nach Kugelstoss entspricht eine geordnete Innervationssequenz der Arm-, Rumpf- und Beinmuskulatur mit der finalen Tricepsaktivierung beim Abstoss. In der Vorbereitungsphase, etwa 1 sec vor Kugelabstoss rechts, beginnt eine kräftige Oberarm- und Schulterinnervation (Biceps und Infraspinatus rechts), während die Kugel im rückgebeugten rechten Arm gehalten wird (Abb. 1a). Beim folgenden "Angleiten" zunächst Aktivierung des Tibialis anterior, dann Quadriceps im linken vorgestellten Bein (Abb. 1b). In der Abstossphase entsteht nach drehender Körperstreckung mit Beinextension (Abb. 1c) eine Aktivierung des Pectoralis mit Vorwerfen des Armes und erst zuletzt beim

dem vorgestellten linken Bein auch den rechten Fuß für die finale Kraftübertragung auf die Kugel (Abb. 1 c). Die andere Technik beginnt mit stärkerer Rumpfdrehung und benützt beim folgenden Abstoss allein das kontralaterale vorne stehende Bein. Auch Ungeübte verwenden meist nur das gegenseitige Bein für den Abstoss (Abb. 6c).

Der untrainierte Linksstoss. Beim Rechtshänder ohne linksseitiges Training blieb der ungeübte Linksstoss jeweils dem trainierten Rechtsstoss unterlegen, wie die geringeren Stossweiten links in der Tabelle 1 zeigen. Die weniger gute Stosstechnik links sieht man auch beim Vergleich von Abbildung 1 und 2 auf einen Blick. Auf der ungeübten linken Seite variierte die Stossweite meistens stärker als auf der trainierten rechten und bei mehrfacher Wiederholung des Linksstosses verbesserte sich die Leistung. Der Hochleistungssportler von Abbildung 1-3 erreichte im Training bei je 5 Stössen Durchschnittsweiten von rechts 13,9 m ($\pm 0,37$) und links 11,1 m ($\pm 1,0$). Die untrainierte, nicht-dominante Seite lernt offenbar schon bei wenigen Stössen rascher die richtige Stosstechnik als die dominante Seite bei total Untrainierten. Zunächst versucht der Trainierte die Stosstechnik der rechten Seite beim Linksstoss bewußt zu kopieren. Dabei erreicht er aber noch nicht die optimale Seitenkoordination, die wahrscheinlich ein unbewußter indirekter Trainingseffekt der nicht-dominanten Seite ist. Ein längeres Training des Linksstosses bei Rechtshändern haben wir nur geplant, aber noch nicht durchgeführt.

Wenn man den Stoss der dominanten und der nicht-dominanten Seite beim Trainierten vergleicht, so findet man zwei konstante Befunde beim ungeübten Linksstoss des Rechtshänders: 1. Die Mitinnervation des kontralateralen Armes fehlt. 2. Die finale Aktivierung des stossenden Armes im Triceps und Flexor carpi ist stärker als beim trainierten Stoss.

Bei jedem ungeübten Stoss fehlt die für den Trainierten charakteristische Gegenbewegung des kontralateralen Armes mit ihren starken antagonistischen Innervationen der Oberarmmuskeln (Abb. 4 A und B). Ähnlich wie beim trainierten Stoss ist beim ungeübten nur die vorangehende tonische Handbeuger- und Bicepsinnervierung beim Halten der Kugel, während sich die Abstossbewegung des Armes auf die Extension beschränkt und die Mitarbeit der Rumpf- und Beinbewegungen unvollkommen bleibt.

Die Tricepsaktivierung der Armextension in der Enphase ist auf der nicht-geübten Seite stärker und um etwa 100 msec längerdauernd als beim trainierten Stoss. Sie setzt vorzeitig ein und überdauert das Abstossen der Kugel länger (vgl. Abb. 4 A und B). Durchschnittswerte der

Kugelstoss mit terminaler Armextension rechts eine Aktivierung des rechten Triceps und reziproke Bicepshemmung. Ein Beschleunigungsmesser am rechten Unterarm registriert dessen Bewegungen und den Kugelstoss. Nach Kugelstoss folgt der Tricepsaktivität im stossenden Arm eine reziproke Bicepsaktivierung, offenbar zur Kompensation des Rückstosses mit folgender kurzen Tricepsaktivierung. Dann wird vor allem die Beinmuskulatur und der Infraspinatus für 1/2 sec zum Rückstoss auffangen und Ausgleich der Körperbalance aktiviert.

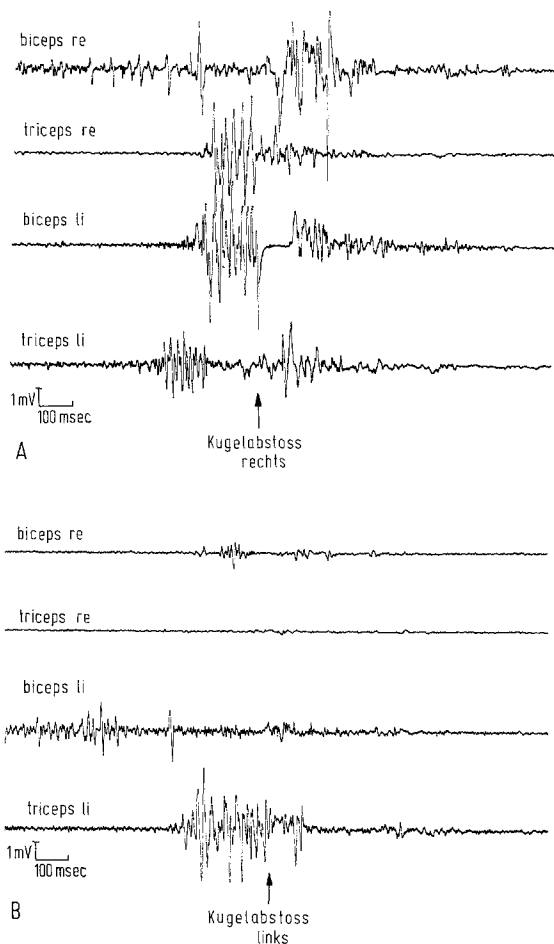


Abb. 4. Typisches Innervationsmuster beider Oberarmmuskeln beim trainierten Kugelstoß rechts (A) und ungeübten Stoß links (B). Telemetrische Hautableitungen von Biceps und Triceps beidseits (8. X. 75, A.F. 25 jähr. Rechtshänder mit Sportausbildung. (A) Trainierter Rechtsstoß mit Koordination des contralateralen Armes links: Beim Halten der Kugel werden zunächst die Armbeuger und beim Abstoß die Armstrecker rechts und Armbeuger links aktiviert. Doch sieht man vor Kugelabstoß keine stärkere Tricepsaktivierung rechts als in anderen Muskeln, da die Schubkraft mehr durch Rumpf- und Beinbewegung als durch Armextension rechts entsteht. Nach Kugelabstoß erfolgt rechts eine bremsende reziproke Bicepsaktivierung und eine kontralaterale Armmitarbeit links (Körperbalancierung und Rückstoßkompensation). (B) Ungeübter Linksstoß ohne kontralaterale Armkoordination. Der Stoß mit der nicht-dominanten Seite beschränkt sich auf eine starke und längere finale Tricepsaktivierung links. Im Gegensatz zum Rechtsstoß (A) fehlt die reziproke Bicepsaktivierung nach Kugelstoß und die Mitarbeit des kontralateralen dominanten (rechten) Armes. Die Kugel wird vorwiegend durch Armextension links gestossen und die Stoßweite ist entsprechend geringer (Tabelle 1)

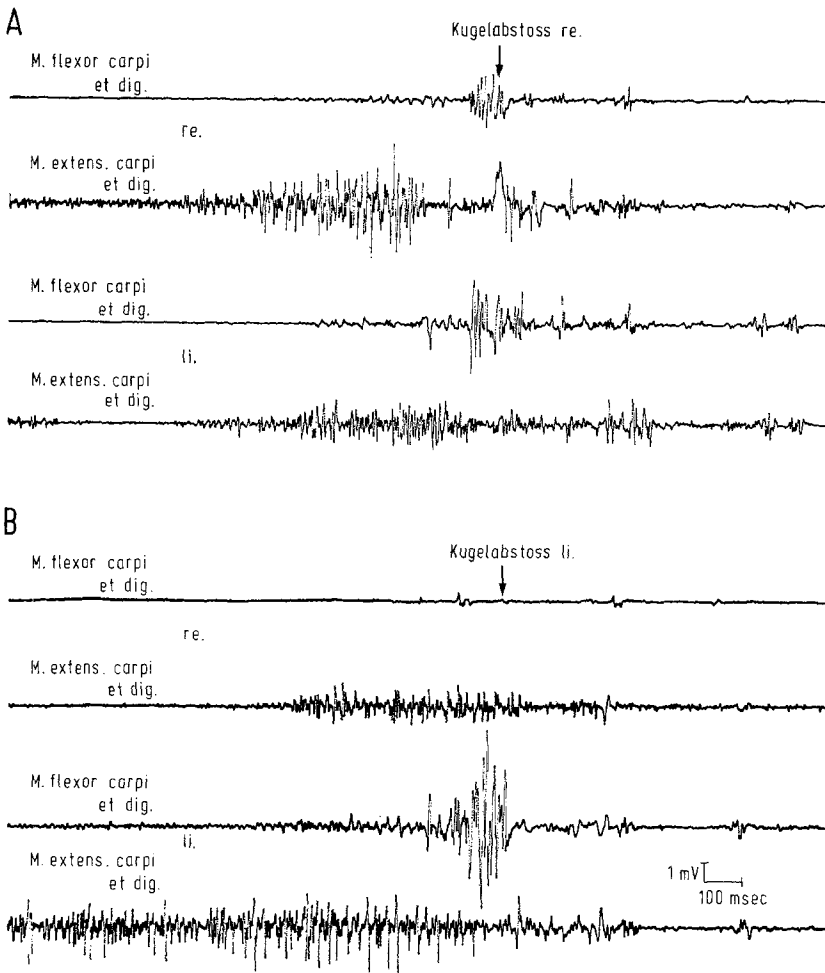


Abb. 5 A und B. Innervationsmuster der Unterarmmuskeln beim Kugelstoss rechts und links eines trainierten Rechtshänders. Telemetrische EMG-Registrierungen (D. Sch., 24 Jahre, Sportassistent). (A) Geübter Rechtsstoss: Als Vorbereitung werden rechts die Hand- und Fingerextensoren beim Halten der Kugel in der hyperextendierten Hand zunehmend tonisch innerviert, während die Dauerinnervation der Handflexoren schwächer ist. Erst 200 msec vor Abstoss erscheinen rechts stärkere phasisch-reziproke Innervationen, zuerst Hemmung der Handextensoren, dann kräftige Flexorenaktivierung von 100 msec Dauer beim Abstoss. Nach Kugelabstoss erneute Aktivierungsphase der Handextensoren rechts. Die koordinierte Mitarbeit des kontralateralen Armes zeigt ebenso starke Innervationen mit längerer Handextensoraktivierung. (B) Ungeübter Linksstoss: Nach stärkerer tonischer Handextensoraktivierung im stossenden linken Arm ist die phasische Flexoraktivierung vor Abstoss stärker und länger als beim geübten Rechtsstoss. Im Gegensatz zum Rechtsstoss fehlt links die initiale Extensorhemmung, die rechts der abstossenden Flexoraktivierung vorangeht. Auch die Extensorkompensation nach Kugelabstoss ist geringer als beim Rechtsstoss. Die Koordination des kontralateralen rechten Unterarmes ist wesentlich schwächer als die des linken Arms beim trainierten Rechtsstoss (A). Dies entspricht der verminderten kontralateralen Oberarmmitarbeit beim Linksstoss (Abb. 4 B)

Tricepsinnervationsdauer vor und beim Abstoss betrugen beim Rechtsstoss 160 msec und beim Linksstoss 270 msec, gemessen von dem ersten größeren Aktionspotential bis zur Hemmungsphase nach dem Abstoss mit Einsetzen der Bicepsaktivierung. Eine ähnliche stärkere und längere finale Aktivierung zeigen auch die Handflexoren beim ungeübten Linksstoss (Abb. 5 B).

Muskelkoordination beim Kugelstoss völlig Ungeübter. Wir haben nur 10 Frauen gefunden, die nie in ihrem Leben eine Kugel gestossen hatten: sie machten ihren ersten Kugelstoss sowohl auf der rechten wie auf der linken Seite vorwiegend mit dem Arm. Die Bein- und Rumpfkoordination beschränkte sich auf den Ausgangsstand beim Halten der Kugel, einen Schritt und leichte Schulterdrehung mit Vorneigen des Rumpfes und Anheben des homolateralen Beines (rechts beim Rechtsstoss, (Abb. 6). Diese geringe Körperkoordination war beim Rechtsstoss ähnlich wie beim Linksstoss und war beiderseits noch geringer als bei Trainierten, die mit der ungeübten nicht-dominanten Seite stossen. Die Mitinnervation des kontralateralen

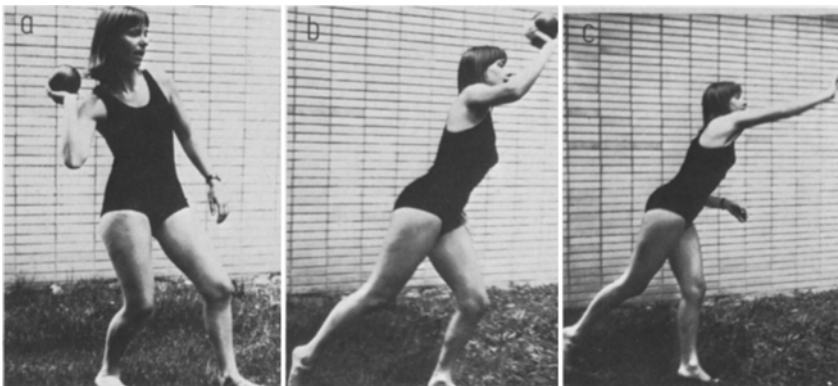


Abb. 6 a-c. Kugelstoss einer untrainierten Frau (25 Jahre, S. Sch., Rechtshänderin). Bei geringer Mitarbeit des Rumpfes und kontralateralen Armes erfolgt der ungeübte Stoss vorwiegend durch Extension des rechten Armes, im Gegensatz zum Trainierten der Abb. 1. (a) Der bisher nicht geübte Stoss mit dem rechten Arm beginnt in der Vorbereitungsphase nur mit leichter Kniebeugung und geringer Rumpfrückdrehung, während die rotierende Rumpfkoordination des Trainierten (Abb. 1a) fehlt. (b) Vor Abstoss geringe Rechtswendung mit Vorbeugen des Oberkörpers auf das linke Bein und beginnende Armstreckung. (c) Kugelabstoss durch Armextension rechts. Der linke Arm wird wenig mitinnerviert (vgl. Abb. 7A) und nur gering gebeugt. Die Beinarbeit beschränkt sich auf leichte Kniestreckung mit Abheben des rückgestellten rechten Beines. Die durchschnittliche Wurffleistung war rechts 3,7 m, links 3,6 m; also nur etwa $\frac{1}{3}$ des trainierten Kugelstosses (vgl. Tabellen 1 u. 2)

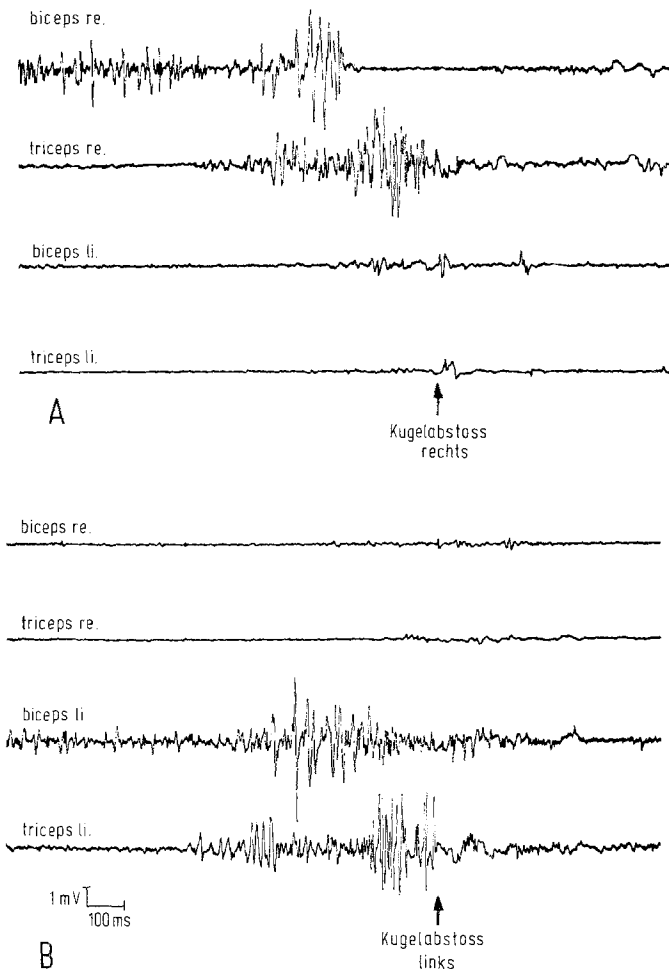


Abb. 7 A und B. Innervationsmuster beim ungeübten Kugelstoss rechts und links einer untrainierten Rechtshänderin (gleiche Vp S. Sch., wie Abb. 6). Der Stoss erfolgt vorwiegend durch Armextension: Langdauernde Tricepsaktivierung des stossenden Armes und fehlende Mitinnervation des kontralateralen Oberarmes beim untrainierten Stoss mit der dominanten rechten und der nicht-dominanten linken Seite. Auch die Nachaktivierung nach Abstoss fehlt im Gegensatz zum trainierten Stoss (Abb. 4 A). (A) Der Rechtsstoss beginnt mit leichter tonischer Bicepsinnervation und die früh einsetzende und langdauernde periodische Tricepsaktivierung endet mit dem Kugelabstoss ohne folgende rückstosskompensierende Biceps-Tricepsaktivität. (B) Der Linksstoss zeigt ähnliche Innervationsmuster mit etwas stärkerer Bicepsaktivierung während der periodischen langen Tricepsaktivierung (500 msec Dauer) vor Kugelabstoss. Nach Abstoss fehlende Rückstosskompensation

Armes fehlte völlig, wie Photos (Abb. 6) und EMG-Registrierungen (Abb. 7) zeigen. Die Kugelstossweiten betrugen nur etwa 1/3 der trainierten Männer mit sehr geringen Unterschieden zur nicht-dominanten Seite, die Tabelle 2 zeigt.

Telemetrische EMG-Ableitungen wurden nur von einer untrainierten Frau aufgenommen, die im übrigen krankengymnastische, aber keine leichtathletische Ausbildung hatte. Die EMGs von beiden Armen entsprachen der fehlenden Mitinnervation des kontralateralen Armes und zeigten fast keine Unterschiede beim Stoss mit dem dominanten und nicht-dominanten Arm. Daher sehen telemetrische Ableitungen von Untrainierten beim Rechts- und Linksstoss fast spiegelbildlich gleich aus (Abb. 7 A und B). Die stärkere und längerdauernde finale Tricepsaktivierung ist beiderseits ähnlich wie beim ungeübten Linksstoss des Rechtstrainierten: Dauer 210-250 msec, im Mittel etwa 220 msec.

Trainierte Linkshänder. Bei 3 sportlich trainierten Linkshändern, die mit dem linken Arm Kugelstossen geübt hatten, entsprach die bessere Leistung des trainierten Linksstosses etwa der des trainierten Rechtsstosses bei Rechtshändern. Die Bewegungsabfolge des Linksstosses war etwa spiegelbildlich zum Rechtsstoss des Rechtshänders: initiale Linksrückdrehung mit folgender Flexion, Rotation und Extension des Rumpfes und bessere Bein-Rumpf- und Arm-Seitenkoordination beim Linksstoss als beim Rechtsstoss.

Ein 32-jähriger Arzt (T. B.), der früher auf den Linksstoss trainiert war, verwendete den linken Arm vorwiegend für Kraftleistungen, den rechten dagegen für Geschicklichkeitsarbeiten und zum Schreiben, so daß er auch als Ambidexter klassifiziert werden kann. Die Kugelstossweiten rechts waren auch hier konstant niedriger als auf der trainierten linken Seite: Durchschnittswerte links 9,3 m, rechts 6,9 m. Die telemetrischen EMG-Ableitungen beim Linksstoss entsprachen etwa denen beim trainierten Rechtshänder. Die Mitarbeit des kontralateralen Arms beim Rechtsstoss dieses ambidexten Linkshänders war besser als beim Linksstoss trainierter Rechtshänder.

Ein weniger trainierter 23-jähriger Linkshänder (R. G.), der nur vor 4 Jahren Kugelstossen geübt hatte, rechts schrieb und links zeichnete, hatte Stossweiten von links 6,6 m und rechts 5,6 m.

Ein jetzt 57-jähriger Sportlehrer (J. A.) hatte über 2 Jahrzehnte das Kugelstossen links geübt und gelegentlich "zum Ausgleich" auch rechts gestossen, ohne diese Seite zu trainieren. Die größten Stossweiten betrugen mit 40 Jahren links etwa 13 m und rechts 8,5 m. Nach 2 Jahren fehlender sportlicher Übung wegen Kreislaufstörungen erreichte er jetzt viel geringere Kugelstossweiten: links 8 m, rechts 5,9 m im Durchschnitt von 3 Stößen. Die Seitendifferenz hat also mit fehlendem Training abgenommen und die Leistung sank nach 2-jähriger Trainingsunterbrechung und Herzerkrankung auf der dominanten Seite fast bis zur Hälfte.

Zwei andere Linkshänder hatten nur wenig Kugelstossübung: Ein 32-jähriger Linkshänder erreichte nur Durchschnittswerte von links 5,1 m und rechts 4,0 m. Eine 31-jährige linkshändige, rechts schreibende Frau mit sportlichem Training ohne Kugelstossen hatte links 4,6 m, rechts 3,4 m Stossweiten.

II. Ballwerfen

A. Wurfleistungen

a) Kraftleistung. Bei 10 Rechtshändern wurde die Wurfweite eines Schlagballes bei je 3 Würfen mit dem rechten und linken Arm verglichen. Es ergab sich bei 10 sechzehnjährigen Schülern, die häufig rechts und nie links geworfen hatten, eine noch deutlichere Überlegenheit der geübten dominanten Seite als beim Kugelstossen mit einem Durchschnitt von 3 Würfen rechts (geübt) 41,3 m und links (ungeübt) 20,5 m ($n = 10$).

Die eindrucksvolle Leistungsdifferenz mit doppelten Wurfweiten der geübten rechten Seite gegenüber der niemals geübten linken zeigt Tabelle 3. Ein gleichaltriger Linkshänder (F. W.) zeigte zwar auch bessere Leistungen des linken, für ihn dominanten Armes, aber einen geringeren Seitenunterschied von nur 1/4 Mehrleistung des dominanten Armes (50 m links, 39 m rechts), was bei Rechtshändern nur einmal vorkam.

b) Zielleistung. Ein Schlagball, der gezielt auf eine 10 m entfernte Zielscheibe (2,5 m großes Quadrat) geworfen wird, trifft auch bei relativ geübten Ballwerfern die Zielmitte nur selten im schwarzen Zentrum von 30 cm Durchmesser. Daher wurde ein Mittelfeld von 1 m Durchmesser auf der Zielscheibe als Treffer (Kategorie 1), 1-2 m Excentrizität als Fehler-Kategorie 2 und außerhalb als Fehler-Kategorie 3 gewertet. Die Fehler 2 und 3 sind beim Wurf mit dem geübten dominanten Arm seltener als mit dem anderen Arm, der nie zum Werfen verwendet wurde. Bei Rechtshändern wurden zunächst 5 Würfe mit der rechten, dann 5 Würfe mit der linken Hand verglichen und die Fehler gemessen; bei Linkshändern zunächst 5 Linkswürfe, dann 5 Rechtswürfe.

Tabelle 3. Ballwurfweiten bei 10 Rechtshändern. 16-jährige männliche Schüler, die Ballwerfen rechts geübt hatten. Abgerundete Durchschnittswerte der ersten 3 Würfe rechts und links.

Durchschnittliche Wurfweite in m		
	rechts	links
1) P. R.	49	19
2) S. J.	43	19
3) M. R.	43	31
4) H. H.	38	21
5) S. R.	35	19
6) S. H.	37	13
7) T. R.	59	19
8) W. M.	25	13
9) M. H.	34	12
10) W. F.	50	39
	41,3 \pm 9,7 m	20,5 \pm 8,6 m

Die Unterschiede in der Zielgenauigkeit des gezielten Ballwurfes mit dem dominanten (geübten) und nicht-dominanten (ungeübten) sind quantitativ weniger eindrucksvoll darstellbar als die Kraftleistungsdifferenzen beim Weitwurf. Doch zeigte der Ballwurf mit dem dominanten Arm bei allen Vp geringere Zielfehler als der Wurf mit dem nicht-geübten Arm, sowohl bei Rechtshändern wie bei Linkshändern. Da der Zielwurf kompliziertere visuell-motorische Koordinationen voraussetzt als der Weitwurf, und keine der geübten Versuchspersonen speziell für Ballwerfen auf ein Ziel trainiert war, sondern nur im Ballspiel, sind die Trainingseffekte weniger klar als bei der Wurfweite. Eine Übersicht über die Fehlergrößen in 3 gestuften Kategorien gibt Tabelle 4.

Solche Versuchspersonen, die mit der dominanten Hand größere mittlere Fehler als 1,5 machten, hatten weniger Ballwurfübung als die mit kleineren Fehlerzahlen. Eine Rechtshänderin ohne Ballwurfübung seit der Kindheit machte viel größere Zielfehler, die auch mit der dominanten Hand außerhalb der Zielweite mäßig Geübter lagen: Durchschnittliche Fehlerzahlen von 2,4 rechts und 2,6 links.

Tabelle 4. Gezielte Ballwürfe auf eine Zielscheibe aus 10 m Abstand im Rechts-Linksvergleich. Die Zielgenauigkeit wurde als Mittelwert von je 5 Würfen in drei Kategorien gemessen: 1. Treffen des innersten Kreises (1 m Durchmesser), 2. des äußeren Kreises (2 m Durchmesser) und 3. grobe Fehler außerhalb der Scheibe. Niedere Meßwertzahlen zeigen die bessere Zielgenauigkeit der Würfe mit der geübten dominanten Hand gegenüber den Würfen mit der ungeübten Hand (links beim Rechtshänder, rechts beim Linkshänder).

Mittelwerte von 5 Würfeln			
Rechtshänder	Alter	rechts	links
Th. H.	21	1,0	2,0
V. D.	32	1,4	2,2
H. -J. W.	29	1,4	2,2
G. v. R.	33	1,6	2,6
R. B.	30	1,6	2,4
B. M.	34	1,2	2,4
U. L.	27	1,4	2,0
B. F.	31	1,4	2,4
W. B.	36	1,8	2,2
K. S.	22	1,8	2,6
		<hr/>	
Mittelfehler:		1,46 \pm 0,25 ; 2,30 \pm 0,22	
<hr/>			
Linkshänder			
V. D.	30	2,0	1,2
Th. H.	14	2,6	1,2
D. G.	24	2,6	1,4

B. Telemetrische Befunde beim Ballwerfen

Ballwurf mit dem dominanten geübten Arm. Im Gegensatz zum Kugelstossen registriert man beim Ballwurf eine fast simultane Innervation der Armstreck- und -beuger, die im Triceps und Biceps etwa 200 msec dauert, und jeweils 100 msec vor und nach Abwurf des Balles erkennbar ist (Abb. 8 A). Die phasisch-reziproke Biceps-Triceps-Innervation des Kugelstossens fehlt. Eine längere Nachkontraktion des Biceps und Triceps nach der Simultaninnervation beim Ballabwurf ist nicht erkennbar, offenbar weil der Rückstoss des leichten Balles kaum wirksam wird. Dagegen sieht man eine lange Nachkontraktion der Beinmuskulatur von über 1/2 Sekunde, die wahrscheinlich als Körperbalancereaktion zu deuten ist. Die Triceps-innervationsphase beim Ballwurf des Geübten dauert um 200 msec und die simultane Innervation von Biceps und Triceps ist auf der geübten Seite in beiden Muskeln fast gleich an Intensität und Dauer (Abb. 8 A). Der Ballwurf wird vor allem durch frühe Aktivierung der proximalen Schultermuskeln eingeleitet, die wir im EMG noch nicht genauer untersucht haben. Der Abwurf des Balles geschieht dann nach Vorschleudern des gestreckten Armes durch Öffnen der Hand und plötzliche Armversteifung durch die simultane Biceps-Triceps-Aktivierung.

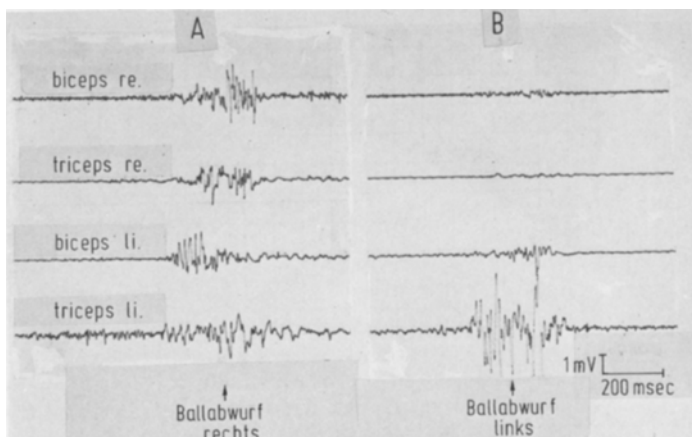


Abb. 8 A und B. Oberarminnervation beim gezielten Ballwurf mit dem geübten rechten (A) und dem ungeübten linken Arm (B). P. R., 16-jähriger gesunder Rechtshänder. (A) Ballwerfen der trainierten rechten Hand erfolgt mit kontralateraler Armkoordination. Das Zielen beginnt links mit Triceps- und Bicepsaktivierung. Beim Abwurf rechts werden später mit Armextension Triceps und Biceps für 200 msec coaktiviert. Dies gibt dem durch Armvorwerfen und Handflexion beschleunigten Ball seinen letzten Impuls, während die Handöffnung den Ball losläßt. (B) Ballwerfen mit der ungeübten linken Hand ohne kontralaterale Armkoordination. Beim Abwurf vorwiegend linksseitige Armextension mit starker über 350 msec dauernder Tricepsaktivierung. Es fehlt die in A deutliche simultane Coaktivierung von Biceps und Triceps des werfenden Armes und die Mitinnervation des kontralen dominanten Armes. Der Ball verfehlt das Ziel

Ähnlich wie beim Kugelstossen hat der geübte Ballwerfer eine kräftige Mitinnervation des kontralateralen Armes. Der Rechtshänder zeigt beim Ausholen des werfenden rechten Armes nach hinten während der Rumpfbeugung nach rechts zwei Typen der Armmitbewegung links: a) gestrecktes Vorhalten in Richtung des Zieles und Beugung beim Abwurf oder b) gebeugte Gegenstellung des Armes in der Vorbereitungsphase mit Anhebung der Hand an Brust und rechte Schulter und Rücknahme des gebeugten linken Armes beim Abwurf. Im EMG erscheint linksseitige Armbeugung zuerst im linken Biceps etwa 80 msec oder früher vor der rechtsseitigen Armversteifung mit simultaner Endkontraktion des Biceps und Triceps des werfenden rechten Armes. Die linksseitige Tricepsaktivierung folgt nach leichter Vorinnervation später etwa gleichzeitig mit der rechtsseitigen Triceps-Biceps-Aktivierung beim Abwurf (Abb. 8 A).

Die phasischen und tonischen Innervationen der Muskeln des Rumpfes sind bei der Bewegungsvorbereitung des Ballwurfes weniger stark, aber die Mitinnervationen des kontralateralen Armes fast ebenso deutlich wie beim Kugelstoss. Ferner werden die Muskeln im vorgestellten linken Bein auch beim Ballabwurf stark innerviert. Der linke Gastrocnemius zeigt eine langdauernde kräftige Aktivierung zu der schon 50 msec vor dem Abwerfen (in manchen Fällen auch früher) eine Kontraktion des Tibialis anterior hinzukommt. Diese überdauert immer die kräftige Endinnervation des Triceps und Biceps brachii beim Abwurf. Das Ballwerfen geschieht mehr als das Kugelstossen aus der Schultermuskulatur und weniger durch die Schubkraft des ganzen Körpers.

Ballwurf mit dem nicht-dominanten ungeübten Arm. Das Ballwerfen des Rechtshänders mit der linken Hand, ist nicht nur weniger effektiv, in Weite und Zielgenauigkeit, sondern auch schlechter koordiniert. Die linke Hand war bisher nur gemeinsam mit der rechten zum Ballfangen, aber nicht zum Werfen verwendet worden. Schon bei einfacher Beobachtung wirkt der Linkswurf ungeschickter: Man sieht ein weniger effektvolles Ausholen, schwächere Schultermitarbeit und Oberarmbeschleunigung, geringere Mitarbeit des rechten Armes, der Beine und des Rumpfes.

Die Telemetrie ergibt, ähnlich wie beim ungeübten Kugelstoss, ein objektives Korrelat dieser mangelnden Körper- und Extremitätenkoordination beim Linkswurf. Der Vergleich von Abbildung 8 A und B zeigt diese Unterschiede mit einem Blick: Mit dem ungeübten Arm wird der Ball vorwiegend durch Armextension links geworfen mit kräftiger, aber einseitiger Tricepsaktivierung und geringer oder fehlender Mitaktivierung des Biceps und anderer Muskeln. In Abbildung 8 B ist die linksseitige Tricepsinnervation größer und länger (350-400 msec) als am ungeübten rechten Arm (etwa 200 msec in A). Im Gegensatz zur kräftigen Mitinnervation des kontralateralen Arms die beim geübten Rechtswurf der Abbildung 8 A fast gleich stark ist wie im werfenden Arm fehlt beim Linkswurf die frühe reziproke phasische Innervation des kontralateralen rechten Armes. Die Mitinnervation der Beinmuskeln bleibt dagegen beim Linkswurf im Gastrocnemius und Tibialis des vorgestellten rechten Beines erhalten. Im Gegensatz zum geübten rechten Ballwerfen, wo die Beininnervation links kontinuierlicher und tonischer ist, sieht man beim Abwurf links eine Hemmungsphase im rechten Quadriceps und Gastrocnemius mit später Aktivierung, die wahrscheinlich Folge einer weniger gut regulierten Balancestörung des Körpers bei der ungewohnten Werfbewegung links ist. Die

Innervationsmuster der Schulter- und Unterarmmuskeln beim Ballwurf wurden noch nicht genau studiert und sollen später beschrieben werden.

Die mangelhafte Muskelkoordination beim ungeübten Ballwurf durch vorwiegende Armextension und fehlende Armversteifung mit schwacher Mitbewegung des übrigen Körpers kann die geringeren und fehlerhafteren Wurflleistungen auf der nicht-dominanten Seite (Tabelle 3 und 4) erklären.

III. Innervationprogramme beim trainierten und ungeübten Stoss und Wurf

Trotz der großen Gewichtsdivergenz der abgestossenen Masse (Kugel 7260 g, Ball 70 g) bei Stoss- und Wurfbewegungen bestehen auch Gemeinsamkeiten der bilateralen Muskelkoordination und ähnliche Unterschiede der geübten und ungeübten Bewegung bei Stoss und Wurf, wie Abbildungen 4 und 8 zeigen. Die Verschiedenheiten der finalen Armmuskelinnervation beim Abstoss und Abwurf sind demgegenüber gering: beim Kugelstoss überwiegt die Armextension mit vorwiegender Tricepsaktivierung, beim Ballwurf die Armversteifung mit simultaner Biceps-Triceps-Aktivierung und Handöffnung.

Wie oben beschrieben, zeigt die gesamte Körpermuskulatur beim trainierten Stossen und Werfen eine zeitlich geordnete Innervationsfolge. Die Wurfbewegung des leichten Balles erfolgt zwar rascher und mehr mit einer Schleuderbewegung der Schulter und der Hand als der kräftigere Stoss der über 100-fach schwereren Kugel, doch wird bei beiden kinetische Energie aus der ganzen Körpermasse übertragen und Innervationssequenz und Mitbewegungen sind ähnlich: Sowohl beim Stoss wie beim Wurf erfolgt beim Trainierten eine Rumpf-, Bein und Schulterkoordination mit finaler Armextension und kräftiger Mitbewegung des kontralateralen Armes. Der Untrainierte stösst und wirft dagegen vorwiegend mit dem Arm (Abb. 7) wie es auch der Trainierte bei Stoss und Wurf mit dem nicht-dominanten Arm tut (Abb. 4 B und 8 B). Die kontralaterale Mitbewegung fehlt ohne Training jeweils auch im dominanten Arm, sowohl beim Rechtshänder als auch beim Linkshänder. Das trainierte Innervationsprogramm von Stoss und Wurf erfolgt daher bilateral unabhängig von der Seiten- und Hemisphärendominanz.

Die eindrucksvollen Unterschiede des geübten und ungeübten Stosses und Wurfes zeigen, daß der Trainierte über ein erlerntes bilaterales Bewegungsprogramm verfügt. Dieses Programm ist nicht nur Vorbedingung der optimalen Kraftleistung, sondern dient offenbar auch zur Rückstosskompensation und Gleichgewichtserhaltung nach Veränderungen der Körperstatik beim Stoss und Wurf. Vielleicht sind diese kontralateralen erlernten Mitbewegungen im Prinzip ähnlich den alternierenden Armmitbewegungen beim normalen Gang, die das Körpergleichgewicht bei der Schreitbewegung kompensieren.

IV. Körpermasse und Armmasse

Unsere Ergebnisse zeigen, daß Stoss- und Wurflleistungen bei Trainierten vorwiegend durch die Schubkraft des ganzen Körpers erfolgen, während Ungeübte mehr mit dem Arm stossen und werfen. Da Kraftleistungen nach der physikalischen Formel Kraft gleich Masse mal Beschleunigung von der eingesetzten Masse abhängig sind, war es notwendig, Daten von der Massenrelation von Körper und Arm zu gewinnen.

Tabelle 5. Massenverhältnisse von Körper und Arm in kg bei 8 Versuchspersonen (4 Männer und 4 Frauen)

	Jahre	Körpergewicht	Armgewicht
T. B.	32	95	4, 3
P. H.	26	74	3, 7
B. F.	34	70	3, 2
R. J.	64	62	2, 6
K. V.	32	70	2, 5
M. J.	33	60	2, 7
K. Sch.	23	60	2, 4
S. Sch.	25	58	2, 3
	Durchschnitt	68, 5 kg	2, 96 kg

Für den Massenvergleich von Körper und Arm wurde das Körpergewicht gewogen und das Armgewicht indirekt durch das Volumen des Armes bestimmt: Bei 10 Versuchspersonen wurde die Wasserverdrängung des Armes nach dem Prinzip des Archimedes als Volumenäquivalent des Armgewichtes gemessen, weil Abwiegen des Armes auf einer Waage viel unsicherer ist. Man kann dann Volumen in Liter und Gewicht in kg annähernd gleichsetzen, da sich das größere spezifische Gewicht der Knochen mit dem kleineren des Fettgewebes etwas ausgleichen. Bei fast allen Versuchspersonen, meistens athletischer oder asthenischer Konstitution, betrug das Armgewicht unter $1/20$ des Körpergewichtes. Stark adipöse Pykniker waren nicht unter den Versuchspersonen. Die Meßwerte zeigt Tabelle 5.

DISKUSSION

Unsere Untersuchungen beim Kugelstossen und Ballwerfen ermöglichen eine Differenzierung von Seitendominanz und Übung. Neben praktischen Anwendungen für das sportliche Training ergeben sich auch einige theoretische Aspekte für die Bewegungsphysiologie. Das motorische Lernen, das heute in Parallele zu Rechenmaschinen oft "Programmierung der Motorik" genannt wird, muß noch in seinen physiologischen Mechanismen geklärt werden. Die beschriebenen Befunde beim Stoss und Wurf geben einige Hinweise für die Bewegungsprogrammierung der menschlichen Willkürmotorik und für sensomotorische Lerneffekte beim Training.

Bewegungstraining und Seitendominanz

Trainingseffekte bei Stoss und Wurf. Übung und Lernen sind Vorbedingungen für jede motorische Geschicklichkeit und präzise Leistung. Erst längeres Training führt zu hochwirksamen Kraftleistungen und optimalen Bewegungs-

ablaufen durch ökonomisierte Muskelaktion. Erlernt wird dabei sowohl ein koordiniertes Muskelinnervationsmuster (Abb. 3) als auch eine Verminderung unnötigen Kraftaufwandes: Wenn der Einsatz großer Körpermassen notwendig ist, werden diese maximal aktiviert, andererseits werden unzweckmäßige Massenbewegungen auf ein Minimum reduziert. Beim trainierten Wurf und Stoss ist die finale Armstreckung durch Tricepsaktivierung geringer als beim Untrainierten (Abb. 4 und 7), da der werfende Arm nur noch ein letztes Glied einer vorangehenden Bewegungsfolge ist, in der Stützmotorik und Zielhandlung zusammenarbeiten. Mit dem Training wird die rechtsseitige Armextension beim Kugelstossen oder Ballwurf durch erlernte Mitinnervationen der übrigen Körpermuskulatur zu einer präzisen bilateralen Bewegungsfolge integriert, so daß Arm und Hand zu Überträgern der Schubkraft des ganzen Körpers werden.

Die Beobachtung hochtrainierter Sportler zeigt, daß beim Kugelstossen Höchstleistungen nur durch die Koordination der gesamten Körpermuskulatur erreicht werden. Beim Training werden vor der Aktivierung spinaler Motoneuronpopulationen offenbar zahlreiche sensomotorische Mechanismen des Gehirns adäquat koordiniert. Beim Menschen können wir bisher nur die neuronale Endstrecke der motorischen Einheiten im Muskel registrieren. Welche vorgeschalteten Hirnstrukturen das motorische Lernen regulieren, ist noch nicht bekannt. Die viel diskutierte Rolle des Kleinhirns und der Koordination mit den Großhirnhemisphären muß noch im Einzelnen bewiesen werden. Wir können bisher nur sagen, daß spezifisches Bewegungstraining wichtiger ist als Seitendominanz.

Der für den Rechts-Links-Vergleich naheliegende Einwand, die bessere Leistung des Wurfes und Stosses mit dem dominanten Arm beim Rechts- und Linkshänder sei nur Folge der bekannten Überlegenheit der jeweils dominanten Großhirnhemisphäre, ist durch drei Ergebnisse zu widerlegen. Gegen eine übungsunabhängige einseitige Innervationsdominanz sprechen die folgenden Befunde:

1. Die optimale Leistung der bilateralen Muskelkoordination der Trainierten ist nicht mit vermehrter Streckinnervation des dominanten Armes gekoppelt und die Tricepsaktivierung des dominanten stossenden Armes bleibt geringer als beim Untrainierten.
2. Im Kugelstossen Ungeübte haben trotz rechtsseitiger Dominanz bei anderen Bewegungen nur geringe Unterschiede der Stossweite zwischen rechts und links, während Trainierte eindeutig größere Stossweiten mit dem geübten dominanten Arm erreichen.
3. Die fehlende Mitarbeit des dominanten Armes beim untrainierten Stoss und die besseren Koordinationen des nicht-dominanten Armes beim Trainierten entsprechen nicht einer Hemisphärenpräferenz. Vielmehr ist beim linksseitigen Kugelstoss des Rechtshänders der kontralaterale rechte, also vom dominanten Motorcortex aktivierte Arm viel weniger an der Muskelkoordination beteiligt, als der linke (nicht-dominante) Arm beim rechtsseitigen Stoss (Abb. 4 A, B). Dasselbe findet sich beim Rechts-Links-Vergleich des Ballwurfes (Abb. 8).

Weitere Untersuchungen über ein Training der nicht-dominanten Seiten werden zeigen, ob Bewegungsübungen unabhängig von der Hemisphärendominanz ebenso gute kontralaterale Wurf- und Stossleistungen erreichen können und wie rasch die optimale beidseitige Koordination durch Lernen erworben

wird. Für ein solches "Umlernen" von rechts nach links gibt es praktische Beispiele bei Kindern und bei Erwachsenen nach Amputation oder nach Läsion der dominanten Hemisphäre und bei Künstlern nach Rechtsseitenparese.

Charakteristika des untrainierten Kugelstossens. Der Ungeübte aktiviert mehr den stossenden Arm, aber weniger den übrigen Körper und den kontralateralen Arm und erreicht viel geringere Stossweiten als der Trainierte. Charakteristischer telemetrischer EMG-Befund vorwiegender Armextension bei jedem ungeübten Kugelstoss ist die stärkere und längerdauernde Innervation des M. triceps des stossenden Armes (Abb. 4 B und 7 A, B). Bei Untrainierten zeigt Abbildung 6 die mangelhafte Rumpfmitarbeit und Abbildung 7 die fehlende Koordination des gegenseitigen Armes sowohl beim Rechtsstoss (Abb. 7 A) wie beim Linksstoss (Abb. 7 B). Die fehlende kontralaterale Armmitarbeit beim Stoss des dominanten rechten Arms von Untrainierten ähnelt zwar dem ungeübten nicht-dominanten Linksstoss des Rechtstrainierten (Abb. 4 B), doch ist die Stossleistung links bei Rechtstrainierten besser als der Rechtsstoss total Ungeübter.

Trotz stärkerer Armextension bleibt die Stossweite des Ungeübten sehr gering: Völlig Untrainierte erreichen rechts und links nur etwa ein Drittel der Stossweite trainierter Rechtshänder, ein Viertel der Stossweite von Spitzensportlern und etwa die Hälfte des ungeübten Linksstosses bei Rechtstrainierten.

Leistungsvergleich Trainierter mit Untrainierten: "Mitlernen" der Gegenseite? Konstante Ergebnisse waren die besseren Kugelstossweiten auf der dominanten trainierten Seite als auf der ungeübten und die geringen Seitendifferenzen bei völlig Ungeübten. Daraus ist aber nicht zu schließen, daß der ungeübte Linksstoss vom rechtsseitigen Training ganz unbeeinflusst bleibt. Vielmehr zeigten alle Trainierten neben größeren Stossweiten des dominanten Armes auch bessere Leistungen beim Stoss des nicht-dominanten Armes als völlig Untrainierte beim Rechts- und Linksstoss: mittlere Maximalwerte von 8,8 m rechts und 6,4 m links bei trainierten Rechtshändern, aber 3,9 m rechts und 3,6 m links bei total ungeübten rechtshändigen Frauen (vgl. Tabelle 1 und 2). Ein trainierter Linkshänder stiess links bis 9,5 m, rechts bis 7, m. Hochtrainierte erreichten rechts 15 m, links 12 m. Zwar betragen die Stossweiten des nicht-dominanten Armes nur $\frac{2}{3}$ - $\frac{3}{4}$ der trainierten Seite, doch ist die Stosstechnik des Trainierten schon beim ersten nie geübten Linksstoss relativ gut (Abb. 2). Dem entsprechen fast doppelt größere Stossweiten links bei Rechtstrainierten gegenüber total Ungeübten, obgleich die Leistung bei Männer und Frauen nur bedingt vergleichbar ist. Die durch Training des dominanten Armes erworbene Stosstechnik scheint daher auch den ungeübten Stoss des nicht-dominanten Armes zu beeinflussen, obwohl die kontralaterale Armkoordination beim ungeübten Linksstoss fast fehlt (Abb. 4). Vergleiche der Körperkoordination beim ungeübten Linksstoss des trainierten Zehnkämpfers (Abb. 2) mit dem ungeübten Rechtsstoss der total Untrainierten (Abb. 6) zeigen die bessere Koordination des Sportlers auch auf der nicht-dominanten Seite. Alle Ergebnisse sprechen für ein latentes "Mitlernen" der anderen Seite beim Training, das unabhängig von der Hemisphärendominanz ist.

Auch bei Linkshändern ist ein "Mitlernen" rechts erkennbar: Ein für den Linksstoss trainierter Linkshänder zeigte beim "untrainierten" Rechtsstoss bessere Leistungen und koordiniertere Mitarbeit des kontralateralen (linken)

Armes als bei völlig ungeübten Rechtshändern und beim Linksstoss trainierter Rechtshänder. Da er seine rechte Hand zum Schreiben und für andere Geschicklichkeitshandlungen benutzte, ist auch ein rechtsseitiger Übungseffekt durch beidhändige Erfahrung wahrscheinlich. Danach ist offenbar beim Rechtshänder und Linkshänder Übung für die Leistung wichtiger als Seitendominanz.

Bewegungskoordination

Telemetrische Koordinationsanalyse. Die telemetrische Elektromyographie (EMG) ergibt artefaktfreie Registrierungen am frei beweglichen Menschen. Die EMG-Kurven der Abbildungen 3-5 und 7, 8 zeigen klar und anschaulich die geordneten Innervationsmuster der verschiedenen am Stoss und Wurf beteiligten Muskeln. Nachdem sich die EMG-Analyse bisher meistens auf direkte Ableitungen kleiner Bewegungen oder isometrischer Muskelkontraktionen beschränkte, eröffnet unsere telemetrische Methodik ein neues Untersuchungsfeld für elektrophysiologische Studien der motorischen Sportleistung. Damit werden die komplizierten Abfolgen von Erregung und Hemmung der Motoneuron-Koordination auch zeitlich exakter dargestellt, als es die Verhaltensbeobachtung oder Filmanalyse vermag.

In der Physiologie ist nach Mareys frühen photographischen Bewegungsanalysen 1870-1880 [18] die genauere Untersuchung der Bewegungskoordination seit fast 100 Jahren zugunsten von Einzelstudien vernachlässigt worden. Nur die Neurologie beachtete die motorische Koordination und ihre Störungen. Doch sind neurologische Studien zu wenig durch objektive Registrierungen ergänzt worden, die jetzt mit der telemetrischen Elektromyographie und Beschleunigungsmessung zur Verfügung stehen. Seit Wacholder [22] vor über 50 Jahren die elektromyographische Analyse der Motorik beim Menschen mit systematischen Studien der Agonist-Antagonist-Innervation begründet hat, sind vorwiegend einfache Arm- und Beinbewegungen mit dem EMG untersucht worden. Da Sportphysiologen die Telemetrie fast nur zur Leistungsanalyse von Kreislauf und Atmung verwenden [7], fehlen telemetrische Bewegungsuntersuchungen, bis auf eine neuere Arbeit von Asang und Mitarbeitern [1] und eine telemetrische Ganganalyse [2]. Asang registrierte die EMGs von 4 Beinmuskeln mit Dynamogrammen bei Skiläufern für praktische Fragen des Verletzungsschutzes, aber verzichtete auf Koordinationsstudien, obwohl seine telemetrischen EMG-Kurven etwa unseren Ableitungen beim Laufen [8] entsprechen. Andere EMG-Untersuchungen der Sportphysiologie beschränken sich auf einzelne Muskelableitungen beim Aufsprung und Hüpfen [20] und auf Studien von Ermüdung und Ausdauer [23]. Systematische telemetrische Untersuchungen der Lokomotion gibt es sonst nur bei laufenden Katzen [9, 12], deren Beziehungen zu Laufbewegungen beim Menschen einer von uns (V. D.) in EMG-Studien über den Sprinterstart besprechen wird.

Innervationssequenz, Kraftleistung und Motoneuronrekrutierung. Unsere telemetrischen Ableitungen zeigen anschaulich die klare zeitliche Ordnung und Innervationssequenz verschiedener Muskeln, die durch Training und Koordination beider Körperseiten erworben wird. Abbildung 3 und Abbildungen 5-8 geben eine Übersicht über die wichtigsten EMG-Befunde, die noch quantitativ auszuarbeiten sind. Sie entsprechen der komplexen Hand-

lungsabfolge mit Vorbereitung, Stützhaltung und Zielbewegung, die in den Bewegungsphotos erkennbar ist (Abb. 1 a-c).

EMG-Hautableitungen erlauben noch keine Schlüsse auf Entladungs- frequenz und Integration der Motoneurone einzelner Muskeln mit ihrem Rekrutierungsverhalten beim Stossen und Werfen. Parallele Untersuchungen mit Nadelableitungen bei isometrischen Kraftleistungen von Freund und Mitarbeitern [5, 11] beim Menschen sprechen dafür, daß die Motoneurone zumindest in der tonischen Vorbereitungsphase nach dem Henneman'schen Größenprinzip [13] rekrutiert werden: zunächst werden kleine Motoneurone niedriger Leitungsgeschwindigkeit und erst später bei stärkerem Kraftaufwand größere Motoneurone des gleichen Muskels aktiviert.

Die telemetrische Ableitungen bei Sportleistungen sind ein neues Feld. Unsere descriptiven Studien der trainierten und untrainierten Bewegungs- koordinierung müssen noch für die neurophysiologischen Mechanismen mit quantitativen Methoden ausgearbeitet werden. Genauere telemetrische Studien an freibeweglichen Katzen beschränkten sich auf Laufbewegungen und spinale Mechanismen [9, 12]. Quantifizierte Untersuchungen über EMG und Kraftleistung beim Menschen von Bigland, Marsden und Mitarbeitern [3, 4, 19] zeigen den Weg, wie solche Studien des sportlichen Trainings mit exakten Kraftmessungen und EMG-Integrierung weiterzuführen sind.

Die Kraftleistung des Stosses entsteht durch Koordination von über 100 Skelettmuskeln, von denen wir nur einige repräsentative Agonisten und Antagonisten telemetrisch registriert haben. Muskelspannung und Kontraktions- geschwindigkeit werden auch durch Pyramidenbahnimpulse gesteuert [10] und stehen bei Stütz- und Zielmotorik in komplizierter isometrisch-isotoner Wechselwirkung. Folgerungen aus der Amplitudengröße einzelner Muskel- potentiale auf die Größe der Kraftwirkung sind daher auch bei automatischer EMG-Integration nur bedingt möglich. Deshalb haben wir zunächst nur die effektive Kraftleistung durch die Stossweite und Wurfweite gemessen (Tabellen 1-3).

Die Muskelkraft steigt mit der Entladungsfrequenz und Zahl der akti- vierten Motoneurone. Die Zahl wird physiologisch durch Rekrutierung ge- regelt. Nach isometrischen Kontraktionen verschiedener Kraftleistung [5, 11, 19] übersteigt die Entladungsrate der Motoneurone nur bei rascher initialer Kraftentwicklung 30 pro sec, so daß hohe Kraftleistungen vor- wiegend durch Rekrutierung vieler Motoneurone, bei Höchstleistungen sogar aller Neurone des Muskels, erreicht werden. Seit den Tierexperi- menten Sherringtons und seiner Schule [6] ist die Motoneuronrekrutierung als wichtigste Regelung der Kraftleistung bekannt. Bigland und Lippold haben die Rekrutierung beim Menschen mit exakten Messungen von Muskel- spannung, Geschwindigkeit und EMG (Haut- und Nadelelektroden) studiert [3, 4] und die Korrelation dieser Parameter nachgewiesen. Sie fanden einen linearen Anstieg des integrierten EMG für zunehmende isometrische Muskel- spannung und für zunehmende Kontraktionsgeschwindigkeit auch bei isotonen Bewegungsleistungen. Beide Faktoren, Kraft und Geschwin- digkeit, sind zusammen mit der bewegten Masse für die Leistung des Kugelstossens und Werfens entscheidend. Daher sind die physiologisch- biomechanischen Grundlagen dieser Sportleistungen nicht nur durch EMG- Registrierungen und Bewegungsanalysen zu erfassen.

Reflexe und Programmierung. Alle unsere telemetrischen Ableitungen beim Stossen, Werfen und Laufen ergaben einen überraschend geringen

Anteil von Eigenreflexen bei der Bewegungsregelung. Kurze biphasische Entladungen mit silent period, die Eigenreflexen entsprechen, fehlen oder sind sehr selten in der Innervationsruhe eines Muskels (Abb. 5 A extensor carpi rechts) zu sehen. Trotz P. Hoffmann's [15] Lehre, daß die Eigenreflexe in alle Willkürbewegungen eingebaut werden, erscheint ihre Rolle bei Sportleistungen gering zu sein. Übung und Programmierung koordinieren vorwiegend polysynaptische Reflexe und Lokomotionsrhythmen [9, 12]. Monosynaptische Eigenreflexe werden nur bei plötzlichen, unvorhergesehenen Widerständen ausgelöst, die bei trainierten standardisierten Sportleistungen kaum vorkommen. Auch beim Springen fanden Melville-Jones und Watt [19] keine Eigenreflexe, sondern schon vor Berührung des Bodens eine vorprogrammierte Gastrocnemiusaktivierung, die wir als konstantes Innervationsmuster beim Laufen registriert haben [8]. Diese Kurzzeitbereitschaftsaktion [16] ist auch bei Stoss- und Wurfbewegungen beteiligt, aber noch wichtiger für die Lokomotion.

Biomechanik des trainierten und untrainierten Stosses

Schubkraft der Masse. Allein nach physikalischen Gesetzen ist ein Leistungsunterschied zwischen trainierten und ungeübtem Kugelstoss durch die verschiedene Größe der auslösenden Massenbewegung prinzipiell erklärbar: Der Trainierte stösst die Kugel durch eine koordinierte Aktion des Rumpfes mit beiden Beinen und Armen (Abb. 1) der Untrainierte benutzt zunächst vorwiegend den stossenden Arm mit nur geringer Unterstützung von Bein und Rumpf (Abb. 6). Da Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist ($k = m \times b$), würde schon der größere Masseneinsatz der geübten Bewegung bei gleicher Beschleunigung eine mehrfach stärkere Schubkraft erzeugen, die in Kilopond meßbar ist. Die Körpermasse, die der Trainierte durch Rumpfdrehung, Beinbewegung und Armstreckung einsetzt, ist etwa 60 kg; die Masse eines Armes nur etwa 3 kg, die Kugelmasse 7 kg. Da auch der Untrainierte die Körpermasse mitbenutzt, aber nur weniger effektiv einsetzt, ist die Leistungsminderung nicht eine Massenrelation, sondern beträgt etwa 1/5 bis 1/3 des hochtrainierten Stosses. Eine quantitative Entsprechung der Leistung des ungeübten Armstosses und des trainierten Körper-Bein-Armstosses mit der nur 1/20 des Körpers betragenden Armmasse ist nicht zu erwarten. Die Massenrelation ist nur ein Faktor von vielen, aber prinzipiell interessant. Sie kann auch erklären, warum der untrainierte Armstoss bei geringerer Leistung doch zu stärkerer Armmuskelkontraktion der Extensoren führt als der trainierte Körper-Armstoss, wie es die EMG-Ableitungen des M. triceps brachii zeigen (vgl. A mit B in Abb. 4 und 7).

Physikalisch sind die biomechanischen Verhältnisse natürlich viel komplexer als es eine einfache Masse-mal-Beschleunigungsformel ausdrücken kann. Komplizierend ist vor allem das Drehmoment von Rumpf und Beinen bei der Körperrotation, die beim Trainierten stärker ist als beim Ungeübten, der vorwiegend das kontralaterale Bein zur Unterstützung beim Abstoß verwendet, wie Abbildung 6c zeigt. Beim Hochtrainierten bringt außer Bein-, Rumpf- und Armextension die Rumpfdrehung eine zusätzliche Schubkraft für die Kugelbeschleunigung (Abb. 1).

Rückstosswirkung. Eine weitere Muskelkoordination nach Kugelabstoss ist entsprechend der mechanischen Gleichung von actio und reactio noch das Auffangen des Rückstosses. Für die Körperstatik muß, da Kraft = Gegenkraft ist, der Rückstoss der Kugel durch Gegenwirkung der Muskulatur in der 10-fach größeren Körpermasse kompensiert werden (vgl. Hess, 1965 [14]). Dies geschieht durch koordinierte Innervation vieler Muskelgruppen. Beim Trainierten sieht man nach dem Kugelabstoss verstärkte Innervationen der Schulter- und Beinmuskeln und periphere Extensor- und Flexoraktivierung beider Arme (Abb. 3 und 4 A), die beim ungeübten Kugelstoss fehlt (Abb. 4 B und 7 A, B), und daher auch ein Übungseffekt sein muß.

Auf die komplizierteren physikalisch-physiologischen Wechselwirkungen von Stoss und Wurf beim Loslassen der Kugel und den statischen Regulationen bei Auffangen des Rückstosses können wir hier nicht eingehen. Einiges hat Hess 1965 [14] dazu gesagt: Er demonstriert die Rückstosswirkung beim Abwurf der Kugel durch Rückbewegung einer rollenden Unterlage unter dem Stossenden. Die verschiedenen Beschleunigungskräfte des Rumpfes beim Stoss rechts und links mit plötzlichem Stop zur Übertragung der kinetischen Energie zeigt der Vergleich von Abbildung 1 und 2: Das stärkere Vorwerfen des losen Gürtelbandes am Rumpf beim optimalen Stoss des Rechtshänders 1 b,c gegenüber dem Linksstoss 2 b, entspricht auch einer größeren Weite des Kugelstosses rechts.

Biomechanik und Innervation. Die Biomechanik kann physiologisch nur durch zeitlich gesteuerte und integrierte Muskelkoordination effektiv werden. Die physiologische Bewegungsregulation ist zwar eine zweckmäßige Verwendung physikalischer Gesetze für erlernte Bewegungen, aber die leistungsbezogene Übung arbeitet ohne Kenntnis dieser Gesetze mit ihren neuronalen Mechanismen: Die Massenbeschleunigung des Körpers, die den Stoss und Wurf ermöglicht, und die zeitliche Koordination mit der finalen Armextension und Handflexion der Abwerfbewegung entsteht durch geordneten Einsatz zahlreicher Muskelkräfte mit einem zweckangepaßten, erlernten Innervationsmuster, das durch Aktivierung und Hemmung der Motoneurone zentral integriert wird. So entwickelt der Trainierte im Sinne von Hess [14] zielgerichtet und leistungsbezogen die zeitlich-räumlich geordneten Bewegungsfolgen von Abbildung 4 und die integrierten Muster der Muskelinnervationssequenz von Abbildung 3.

Die vorangehende Darstellung ist noch vorwiegend descriptiv. Unsere telemetrischen Analysen bilden nur einen Anfang für genauere Studien des motorischen Lernens und sportlichen Trainings. Quantitative Bewegungsanalysen, EMG-Integration und Computerauswertungen sind zu ergänzen. Zunächst sollte der einfache Rechts-Links-Vergleich zeigen, daß es sich lohnt, solche Studien von Übung und Training mit neurophysiologischer Fragestellung und telemetrischer Methodik weiterzuführen. Neurologische Anwendungen bei cerebralen motorischen Störungen können vielleicht auch für die Krankengymnastik und Übungstherapie brauchbare Ergebnisse bringen. Es ist zu hoffen, daß solche Untersuchungen bei neurologisch Kranken auch Hinweise dafür geben, welche cerebralen Systeme an einzelnen Mechanismen des motorischen Lernens beteiligt sind.

Dem leitenden Ingenieur Hermann Kapp und Herrn Ing. Gerhard Brenneisen gilt unser besonderer Dank für methodische Entwicklung und wertvolle Mitarbeit bei den telemetrischen Ableitungen und ihrer elektronischen Überwachung. Für Beratung und Vermittlung der Untersuchungen von Sportleistungen danken wir Prof. J. Keul, Direktor der Abt. Sport- und Leistungsmedizin, Prof. M. Bührle und Herrn Schmidbleicher vom Sportzentrum der Universität Freiburg, sowie den Probanden und Sportlern für ihre Hilfe und Mitarbeit, besonders bei der zeitraubenden Telemetrieuntersuchung.

Die Untersuchungen wurden teilweise durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft über den Sonderforschungsbereich Hirnforschung und Sinnesphysiologie (SFB 70) unterstützt.

LITERATUR

1. Asang, E., Grimm, C., Krexa, H.: Telemetrische Elektromyographie und Elektrodynamographie beim alpinen Skilauf. Z. EEG-EMG 6, 1-10 (1975)
2. Baumann, J.K., Baumgartner, R.: Optical and EMG gait analysis with radiotelemetry. P.A. Neukom (Hrsg.) Biotelemetry III. 2. Intern. Symp. Davos 1973, pp. 94-96 Basel: Karger 1974
3. Bigland, B., Lippold, O.C.J.: The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles. J. Physiol. 123, 214-224 (1954)
4. Bigland, B., Lippold, O.C.J.: Motor unit activity in the voluntary contraction of human muscle. J. Physiol. 125, 322-335 (1954)
5. Büdingen, H.J., Freund, H.-J.: The relationship between the rate of rise of isometric tension and motor unit recruitment in a human forearm muscle. Pflügers Arch. 362, 61-67 (1976)
6. Creed, R.S., Denny-Brown, D., Eccles, J., Liddell, E.G.T., Sherrington, C.S.: Reflex activity of the spinal cord. Oxford: Clarendon Press, 1932
7. Demling, L., Bachmann, K. (Hrsg.): Biotelemetrie. Stuttgart: Georg Thieme 1970
8. Dietz, V., Jung, R., Kapp, H., Brenneisen, G.: Initiation and coordination of locomotion studied in start patterns of sprinters. Pflügers Arch. ges. Physiol. 362, Suppl. R 36, 142 (1976)
9. Engberg, I., Lundberg, A.: An electromyographic analysis of muscular activity in the hindlimb of the cat during unrestrained locomotion. Acta physiol. scand. 75, 614-630 (1969)
10. Evarts, E.V.: Relation of pyramidal tract activity to force exerted during voluntary movements. J. Neurophysiol. 31, 14-27 (1968)
11. Freund, H.-J., Büdingen, H.J., Dietz, V.: Activity of single motor units from human forearm muscles during voluntary isometric contractions. J. Neurophysiol. 38, 933-946 (1975)
12. Grillner, S.: Locomotion in vertebrates - central mechanisms and reflex interaction. Physiol. Rev. 55, 247-304 (1975)
13. Henneman, E., Somjen, G., Carpenter, D.O.: Excitability and inhibibility of motoneurons of different sizes. J. Neurophysiol. 28, 599-620 (1965)

14. Hess, W. R. : Cerebrale Organisation somatomotorischer Leistungen:
I. Physikalische Vorbemerkungen und Analyse konkreter Beispiele.
Arch. Psychiat. Nervenkr. 207, 33-44 (1965)
15. Hoffmann, P. ; Die Beziehungen des Willens und der einfachsten
Reflexformen zueinander. Arch. Psychiat. Nervenkr. 185, 736-742
(1950)
16. Jung, R. : Einführung in die Bewegungsphysiologie. In: Gauer,
Kramer, Jung (Hrsg.): Physiologie des Menschen, Bd. 14, Sensomoto-
rik. S. 1-97. München, Berlin, Wien: Urban & Schwarzenberg 1976
17. Jung, R., Dietz, V., Kapp, H. : Supporting muscle activity and learning
effects in voluntary aimed action studied in shot putting (Kugelstoßen).
Pflügers Arch. ges. Physiol. 362, Suppl. R. 36, 143 (1976)
18. Marey, E. -J. : Le mouvement. Paris: Masson 1894
19. Marsden, C. D., Meadows, J. C., Merton, P. A. : Isolated single motor
units in human muscle and their rate of discharge during maximal
voluntary effort. J. Physiol. (London) 217, 12P - 13P (1971)
20. Melvill Jones, G., Watt, D. G. D. : Observations on the control of
stepping and hopping movements in man. J. Physiol. 219, 709-727
(1971)
21. Shik, M. L. : The controlled locomotion of the mesencephalic cat.
Proc. Intern. Un. Physiol. Sci. 8, 104-105 (1971)
22. Wachholder, K. : Willkürliche Haltung und Bewegung. Ergebn. Physiol.
26, 568-775 (1928)
23. Wittekopf, G., Schaaf, E., Taubenheim, H. : Elektromyographische
Untersuchungen zur Objektivierung lokaler Muskelermüdung nach einer
Kraftausdauer-Belastung. Wiss. Z. Dtsch. Hochsch. Körperkultur,
16, 169-176 (1975)