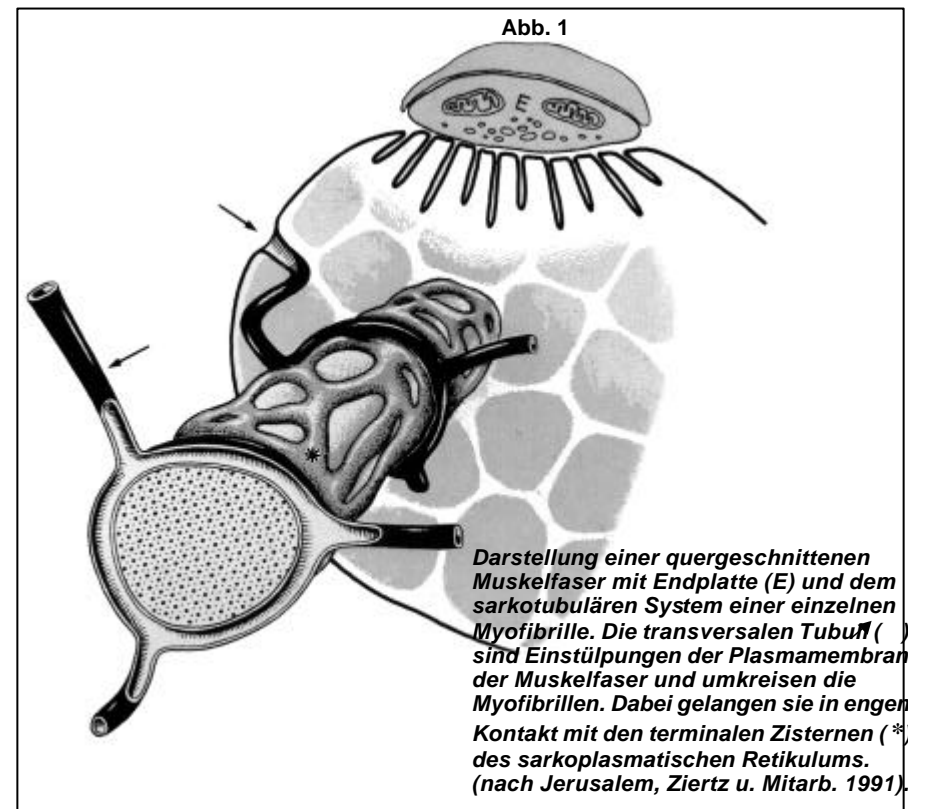


Die Bremsarbeit des Muskels

*Negative Muskelarbeit,
das ABS - System des Muskels ?*



Peter Posner

SONDERDRUCK

aus
PHYSIKALISCHE THERAPIE
IN THEORIE UND PRAXIS
 Nr. 9/1995, S. 652 - 659

Überarbeitet 1998/99
 Peter Posner

Die Bremsarbeit des Muskels.

Vorbemerkung.

P. Posner, 1998/99

Muskeln sind komplizierte Maschinen, die chemische Energie in mechanische Kraft umwandeln können. Aber wie diese molekularen Motoren arbeiten, ist bis heute noch recht unverständlich.

Diese Arbeit befaßt sich mit dem möglichen „Zwiespalt“ der kontraktilen Maschine Muskel zwischen seinen hemmenden Mechanismen und der Bremsarbeit. Daneben ist auch die Frage nach der Konvergenz der verschiedenen Sensoren des Muskels selbst und jene in seinen umgebenden Strukturen zu beachten.

Ist gezieltes, exzentrisches Muskeltraining in der Lage Verletzungen im Sport vorzubeugen?

Kann die sog. „Negative Muskelarbeit“ als das „Kontraktile ABS – System“ des Muskels interpretiert werden?

Besondere Bedeutung gewinnt das exzentrische Training bei instabilen bzw. hypermobilen Gelenken.

Schlüsselwörter.

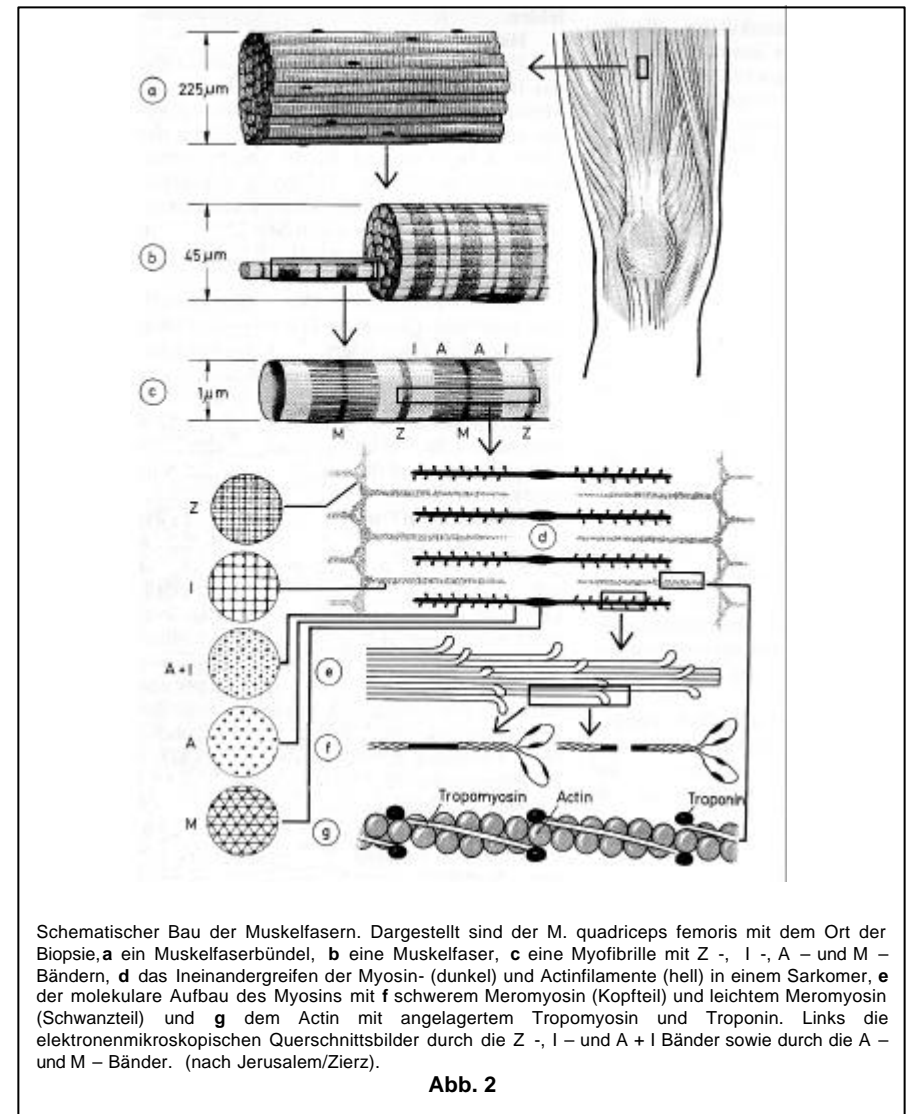
- Exzentrisches Training • Bremsarbeit • Plyometrie •
- Konvergenz • Somatische Intelligenz •
- Evozierte Potentiale • Bereitschaftspotential •
- Kontraktiler ABS-System •

Einleitung.

Die Skelettmuskulatur des Menschen ist im täglichen Leben recht vielfältigen Belastungen ausgesetzt, damit sie sich den stetig wechselnden Bedingungen unserer Umwelt anpassen kann. Bedingt durch die Schwerkraft stehen hier zunächst die statischen Belastungen im Vordergrund. Unter dem Begriff statische Belastung eines Muskels ist die sog. Haltearbeit zu verstehen. Unsere rumpfnahen Muskeln z.B. halten unseren Körper, weitgehend ökonomisch, durch Haltearbeit aufrecht (Stützmotorik). Eine weitere Art der statischen Haltearbeit ist das Festhalten eines Gegenstandes. Bei dieser Belastung arbeiten unsere Muskeln bei weitem nicht so ökonomisch wie bei der Aufrechthaltung unseres Körpers. Andere Leistungen, die ein Muskel täglich zu bewältigen hat, sind die dynamischen Belastungen. Man könnte diese im weitesten Sinne „Positive Muskelarbeit“ nennen. Unter positiver Muskelarbeit ist z.B. das Anheben einer Last zu verstehen oder das Bewegen einer Sache, wie auch handwerkliche Tätigkeiten oder Laufen, Schwimmen, Sport usw. (Zielmotorik). Nun ist ein Muskel aber auch in der Lage, sog. „Negative Arbeit“ zu verrichten. Unter negativer Arbeit ist z.B. das Abbremsen einer Bewegung zu verstehen, man könnte sagen der Muskel leistet Bremsarbeit (exzentrische Belastung). Dies ist der Fall, wenn z.B. die Körperlast nach einem Sprung abzufangen ist. Hierbei muß man zwischen den hemmenden Mechanismen und der eigentlichen Bremsarbeit des Muskels unterscheiden. Bei Belastungen ist nicht eindeutig abzugrenzen, wann die Bremsarbeit des Muskels beginnt, bzw. inwieweit die antagonistische Hemmung der eigentlichen Bremsarbeit vorgeschaltet ist. Bei einem PKW z. B. wird entweder durch das Zurückschalten eines Ganges die Motorbremsung (Hemmung) aktiviert oder das Pedal (Bremse) betätigt um die Geschwindigkeit zu verringern. Wenn ein Muskel diese Tätigkeit des antagonistischen Bremsverhaltens einer Bewegung nicht erfüllen könnte, wäre ein koordinierter Bewegungsablauf unseres Körpers wie auch unserer Gliedmaßen nicht möglich. Unsere Bewegungen wären denen einer Marionette gleich. Beinahe sämtliche Belastungen unseres Bewegungsapparates nehmen wir bewußt wahr, es sei denn es stehen automatisierte Bewegungsabläufe im Vordergrund. Die hemmenden Mechanismen, die allen aktiven Bewegungen innewohnen, nehmen wir nicht bewußt wahr. Bewußt wird uns diese eminent wichtige Funktion der Muskeln erst dann, wenn eine Standardbewegung, z.B. das Schreiben oder das Gehen, nicht ohne Mängel funktioniert. Schon ganz simple Verletzungen eines Muskels, z.B. Zerrung, Kontusion, Muskelkater usw., lassen eine einwandfreie, koordinierte Bewegung nicht mehr zu. Denn ein solches Trauma führt dazu, daß jetzt der betroffene Körperteil höchst vorsichtig, langsam, bewußt bewegt wird, um unnötige Schmerzen zu vermeiden. Durch ein solches Trauma ist nun ein Mechanismus teilweise

außer Kraft gesetzt worden, der sonst in unserem Unterbewußtsein abläuft, man könnte dies auch als Servomechanismus bezeichnen. Dies ist eine ständige unterbewußte, korrigierende Bewegungskontrolle, die darauf ausgerichtet ist, stets Bewegungsharmonie zu garantieren. Neben diesen Servomechanismen der Muskelsteuerung darf man die sehr wichtige Muskelrelaxation keinesfalls übersehen. Im relaxierten Zustand kann man den Muskel im sog. „Leerlauf“, den es bei einem Motor ja auch gibt, ganz speziell behandeln (*Anhang). Nun gibt es bei verschiedenen sportlichen Aktivitäten, wie auch im täglichen Leben, viele Bewegungsabläufe, die man durchaus als disharmonisch bezeichnen könnte. Auch ist dies der Fall, wenn das Kräfteverhältnis zwischen Agonist und Antagonist¹ starke Unterschiede aufweist. Ebenso entsteht eine disharmonische Bewegung, wenn ein Bewegungsablauf durch ein plötzliches, externes Ereignis beeinflusst wird, wenn also eine äußere Kraft einen harmonischen Bewegungsablauf stört. Die wohl unangenehmste Belastung für einen Muskel tritt auf, wenn der bremsende oder hemmende Antagonist bei statischer Haltearbeit des Agonisten, plötzlich aktive agonistische Arbeit leisten muß. Einfach erklärt heißt dies: Beim Festhalten eines Tennisschlägers z. B. arbeiten die Beugemuskel am Unterarm (Fingerflexoren) als Agonisten und die Streckmuskeln als bremsende bzw. hemmende Antagonisten. Wird nun beim Tennisspielen ein Rückhandschlag ausgeführt, müssen die in der Bremsarbeit befindlichen Streckmuskeln plötzlich Arbeit entgegen ihrer Bremsspannung leisten und zwar als Agonisten. Besonders disharmonisch wird dies, wenn dem Tennisball bei diesem Schlag noch ein Drall mitgegeben wird. Bei dieser unphysiologischen Belastung kommt es sehr häufig zu Mikrotraumatisierungen im Muskel und auch zu Zerrungen im Muskelansatzbereich (Insertion). Sehr unangenehm sind auch die Dreh-Druckbelastungen, wie z.B. das Eindrehen von Schrauben mit einem normalen Schraubenzieher. Auch der Stoffwechszustand eines Muskels (Ermüdung, starker Kalium/ Magnesiumverlust) kann schon zu disharmonischen Bewegungsabläufen führen. Welche Muskeln sind es nun, die eine Bremsfunktion verrichten? Grundsätzlich sind alle Skelettmuskeln in der Lage Bremsarbeit zu leisten. Bei schnellen Standardbewegungen sind es überwiegend die Antagonisten, die diese Funktion wahrnehmen. Je besser ein Muskel trainiert ist, desto besser leistet er auch Bremsarbeit. Da diese Tätigkeit der Bremsarbeit bei den normalen, sportlichen Aktivitäten nicht speziell trainiert wird, ist die Anfälligkeit für Muskelverletzungen wie auch für Gelenkverletzungen nicht unerheblich. Das sog. Stretching, das Vordehnen der Muskulatur, kann die Gefahr einer Muskelzerrung zwar mindern aber nicht verhindern. Ob Stretching in der Wettkampfvorbereitung leistungsfördernd wirkt, wird derzeit noch recht kontrovers diskutiert; denn das Vordehnen der Muskulatur hat einen muskelentspannenden Charakter und kann - intensiv betrieben - besonders bei Schnellkraftleistungen möglicherweise leistungsmindernd wirken (Ahonen et al. 1994).

¹ Agonist, der Aktive, die Bewegung führende Muskel. Antagonist, der Gegenspieler, der bremsende bzw. hemmende Muskel. Synergisten sind entfernt gelegene, die Bewegung unterstützende Muskeln.



In diesem Zusammenhang muß man wissen, daß es verschiedene Arten von Stretching gibt, bzw. gab. Es begann zunächst mit dem „Ballistischen Stretching“, es wurden schwingvolle Dehnungen mit dem bekannten Nachwippen durchgeführt. Diese Art des Stretching provozierte nicht selten leichte Zerrungen des Muskels und Gelenkprobleme. Diese Zerrungen sind vermutlich darauf zurückzuführen, daß bei diesen schnellen, leichten

ballistischen Bewegungen, bei minimaler Querbrückenkinetik der Myosinfilamente, das Zytoskelett (Sarkolemm und/oder sarkoplasmatisches Retikulum²) selbst zu stark gedehnt wird. So geläutert, veränderte man diese Art der Muskeldehnung in das sog. „Statische Stretching“, hierbei wird die Muskulatur nur langsam gedehnt, wobei der Dehnungsvorgang ca. 20 bis 60 Sekunden gehalten wird. Es wurde davon ausgegangen, daß die Muskulatur sich in dieses vorgegebene Muster fügt, da keine schnellen, disharmonischen Bewegungen stattfinden und die Dehnung langsam erfolgt. Neuere wissenschaftliche Untersuchungen in den USA, die sich mit dem statischen Stretching beschäftigten, kamen zu einer überraschenden Erkenntnis: Statisches Stretching produziert im Vergleich zum altmodischen ballistischen Stretching mehr CK = Kreatinkinase, ein Enzym, das mit Verletzungen von Muskelfasern in enger Verbindung steht. Nun, erhöhte Werte dieses Enzyms wird auch häufig bei gesunder Muskulatur, nach größeren körperlichen Belastungen gefunden, somit sollte dies nicht überbewertet werden. Die Physiotherapeuten J. u. P. Warton praktizieren eine neue Art des Stretching, das sog. AI- Stretching (Aktives isoliertes Stretching). Diese Art der Muskeldehnung soll eine konsequente Weiterentwicklung aus den Fehlern der Vergangenheit sein. Sie gehen davon aus, daß unsere Muskeln einen sog. eingebauten Stretchreflex (Dehnungsreflex) besitzen, der nach einer schnellen oder kräftigen Bewegung, oder auch nach ca. 2 Sekunden (?³) in gedehnter Position einsetzt. Dieser Stretchreflex führt dazu, daß sich der Muskel langsam zusammenzieht. Wird der Muskel in dieser Phase weiterhin gedehnt, obwohl er sich zusammenziehen will, kommt es zu einer Art Tauziehen, was dem Muskel möglicherweise schaden kann.

Anmerkung:

Da unsere Muskeln sehr häufig nach dem Tauziehprinzip belastet werden, besteht eine Verletzungsgefahr überwiegend dann, wenn ein Muskel in kaltem Zustand intensiven Belastungen ausgesetzt ist oder schnell gedehnt wird. Beim AI- Stretching wird der Dehnvorgang nur für 2 Sekunden gehalten, danach geht es in die Ausgangsstellung zurück und nach nochmals 2 Sekunden der Entspannungspause wird die Dehnung wiederholt. Ein weiteres Merkmal dieses AI-Stretching ist, daß während des Dehnvorganges die Antagonisten angespannt werden (Unterdrückung der hemmenden Systeme). Wenn also der M. biceps femoris gedehnt wird, soll der M. quadriceps femoris angespannt werden. Hier nähert man sich sehr stark der PNF-Technik (Proprioceptive - Neuromuskuläre - Fazilitation) an. Man muß abwarten, inwieweit diese Art des Stretching sich in der Praxis bewähren wird. Denn auch hier wird der zu dehnende Muskel im entspannten Zustand gedehnt. Aus der Muskelphysiologie ist bekannt, daß unsere Muskeln einen Dehnungsreflex besitzen, dieser setzt aber nicht erst nach 2 Sekunden ein sondern wesentlich früher. Der

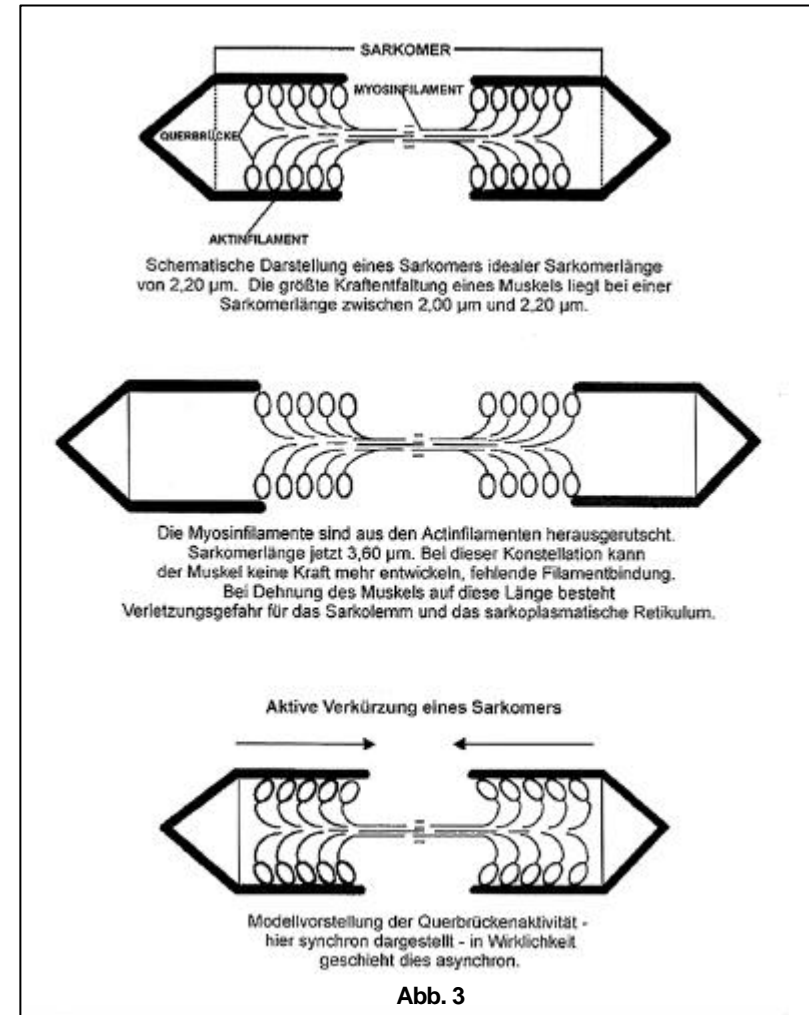
² Das sarkoplasmatische Retikulum ist der wesentliche Calciumspeicher der Muskelfaser, es umgibt die Myofibrillen als tubuläres Zisternennetz und hat engen Kontakt zu dem transversalen tubulären System.

Beide Strukturen zusammen bezeichnet man auch als sarkotubuläres System.

³ Bei der glatten Muskulatur, nicht bei der quergestreiften Skelettmuskulatur ist dies bekannt.

tiefere Sinn dieser Muskeldehnungsreflexe - phasische und tonische - die bei der motorischen Kontrolle von großer Bedeutung sind, ist noch nicht voll verstanden. Möglicherweise ist der Dehnungsreflex auch ein CHECK des Muskels, der ständig der Anpassung der Körperhaltung entgegen der Schwerkraft dient (*Sherrington 1947*). Es ist aber auch zu erwägen, daß die Muskeldehnungsreflexe darauf ausgerichtet sind, die Myofibrillen ständig auf die ideale Sarkomerlänge einzustellen (ca.2,2µm) Abb. 3.

Bekannt ist, daß es bei einer kräftigen Kontraktion eines Muskels, zu einer Entlastung der Dehnungssensoren (Muskelspindeln bzw. intrafusalen Muskel-



fasern) kommt. Muskelspindeln⁴ sind Sensoren, die die Länge des Muskels messen. Daneben gibt es die Golgi- Sehnenorgane, die für die Spannungsmessung des Muskels zuständig sind. Die extrafusalen Muskelfasern sind die eigentlichen Arbeitsmuskeln. Auch ist bekannt, daß nach einer passiven Dehnung eines Muskels die ja einen Muskeldehnungsreflex auslöst, die Ca^{2+} - Ionen sehr schnell in die intrazellulären Speicher (terminale Zisternen) zurückgepumpt werden. Hierbei spielt die Ca^{2+} - Mg^{2+} -ATPase eine entscheidende Rolle. Für jede einzelne Muskelkontraktion werden Ca^{2+} -Ionen freigesetzt und müssen wieder in die Speicher zurückgepumpt werden, damit das einmal aktivierte System nicht unkontrolliert weiterläuft (Greger, 1994).

Diskussion.

Wenn sich die äußere Last, die auf einen Muskel einwirkt, ändert, ist es physikalisch nicht möglich, sowohl die Muskellänge als auch die Muskelspannung konstant zu halten. Nimmt die Last zu, wird der Muskel entweder länger oder er muß seine Spannung erhöhen, um seine Länge konstant zu halten. Bei diesen Belastungen arbeiten also Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane scheinbar gegen- und nicht miteinander. Man könnte hierbei durchaus von einem „Kampf der Systeme“ sprechen; denn ein solches Verhalten könnte darauf hindeuten, daß hier ein Zwiespalt zwischen den hemmenden Mechanismen und der Bremsarbeit des Muskels besteht. Auch ist häufig zu erkennen, daß der Muskel hierbei zum Zittern neigt, weil scheinbar die Koordination fehlt. Die Auflösung dieses Zielkonfliktes sieht (Houk, 1979) darin, daß möglicherweise weder Muskellänge noch die Muskelspannung als individuelle Variablen konstant gehalten werden, sondern die Muskelsteifheit, definiert als das Verhältnis von Spannungsänderung zu Längenänderung.

Ob dieses von der Spiralfederelastizität abgeleitete Prinzip auch auf das kontraktile System des Muskels anzuwenden ist, wird noch diskutiert.

Dem entgegen steht die Auffassung das elastische Verhalten des Muskels mit dem Elastizitätsmodul zu erklären. Demnach verhält sich der Elastizitätsmodul reziprok zur Dehnbarkeit und ist definiert als die für die Dehnung benötigte Kraftänderung, bezogen auf die relative Längenänderung. Bei diesem Konflikt scheint entweder die schnelle Nachlieferung von Ca^{2+} - Ionen in das Sarkoplasma eine wichtige Rolle zu spielen oder die Nachrekrutierung weiterer motorischer Einheiten (spät zugängliche Einheiten, Isoformen - spezialisierte Muskelfasern - ?).

Bremsarbeit, motorisch erlernbar?

In der Tat kann ein gezieltes Training der Bremsarbeit am angespannten Muskel scheinbar stabilisierend, koordinierend und kräftigend wirken und damit

⁴ Es gibt zwei Typen von Muskelspindeln und zwar die Kernkettenfasern (statische Wirkung) und die Kernsackfasern (dynamische Wirkung).

Verletzungsrisiken noch weitgehender minimieren. Entscheidend ist, daß alle gelenkbewegenden Muskeln diesem Training ausgesetzt sind. Es ist ja bekannt, daß eine Bewegung sich aus mehreren Sequenzen bzw. Teilabschnitten zusammensetzt. Das heißt, daß ähnlich wie bei einem Staffellauf z. B. Sequenz für Sequenz von einem anderen Muskel harmonisch übernommen wird. Besondere Bedeutung gewinnt diese Art des Trainings bei Gelenkinstabilitäten wenn z.B. ein Überstrecken des Kniegelenkes oder des Ellenbogengelenkes möglich ist, (Hypermobilität der Gelenke). Bei diesen unphysiologischen Phänomenen ist es erforderlich, die Beuger zu kräftigen, um Gelenkschädigungen zu verhindern. Hierbei ist gezielte Bremsarbeit, die über kräftigende Elemente verfügt, unverzichtbar. Es ist bekannt, daß bei häufig trainierten Bewegungsabläufen, z.B. dem Geräteturnen, dem Menschen, auch bis ins hohe Alter dieses Bewegungsgefühl erhalten bleibt. In speziellen Zentren unseres Gehirns wird dies gespeichert. Nehmen wir als Beispiel einen Turner, der in jungen Jahren einen Salto erlernt hat. Selbst im hohen Alter bleibt ihm das Feeling hierfür erhalten, nur wird er nicht in der Lage sein, diesen Salto noch zu praktizieren, denn es fehlen ihm die Muskelkraft und die Schnelligkeit dazu.

Sicherlich ist auch davon auszugehen, daß durch ein gezieltes Training der Bremsarbeit diese verbesserte Bremsarbeit gespeichert bleibt (Engramm⁵). Die motorischen Lernprozesse an denen synaptische Mechanismen beteiligt sind, sog. Bahnungen, sind noch weitgehend ungeklärt. Es wird angenommen, daß Serien von Aktionspotentialen mittelfristige Lernprozesse einleiten und die synaptische Bahnung ein möglicher Mechanismus für das Kurzzeitgedächtnis ist (Dudel, 1990). Inwieweit die Vordepolarisierung, die zur Aufhebung einer Blockierung spezieller Ionenkanäle durch Mg^{2+} führt, an diesen Lernprozessen beteiligt ist, liegt noch im Dunkeln.

Die Bremsarbeit ist im Grunde auch ein Reiz, der in die Tiefensensibilität der Muskeltätigkeit eingreift. Dieser Reiz der muskulären Bremsarbeit hat scheinbar etwas „Bewahrendes“. Und zwar Bewahrendes im Sinne von Vertrauen auf einen Schutzmechanismus, der Muskeln und Gelenke vor Fehllexursionen schützen kann. Vertrauen in einen Bewegungsablauf kann man nur durch Training und perfekte Beherrschung erlangen.

- Kann man der Bremsarbeit einen therapeutischen Aspekt einräumen?
- Einen vorbeugenden Wert hat sie allemal.
- Auch stellt sich die Frage welcher Chemismus bei dieser Muskeltätigkeit entsteht (Isoenzyme?).

⁵ Als Engramm bezeichnet man eine konsolidierte Gedächtnisspur. Das heißt, daß möglicherweise auch eine häufig trainierte Bewegung (motorisches Lernen) in unserem Langzeitgedächtnis (tertiäres Gedächtnis) gespeichert bleibt.

Schon *Kohlrausch* konstatierte im Jahre 1958 anlässlich eines Internationalen Kongresses für Physikalische Therapie in Hamburg: „Die Bewegung ist in der Lage, die endokrinen Drüsen in spezifischer Weise anzuregen und zu beeinflussen. Für das Gesamtwachstum ist das beim Kinde gut bekannt. Weniger bekannt dagegen ist der Einfluß spezifischer Muskelwirkstoffe auf deren Funktion. Wir wissen z.B., daß das Dickenwachstum des Muskels, das ja letzten Endes wie jedes Wachstum auch hormonal geregelt sein muß, nur durch die kraftvolle Spannungserhöhung der Muskelfaser erreicht wird. Also müssen bei dieser Muskelwirkstoffe entstehen, die entweder direkt - oder was wahrscheinlicher ist - im Zusammenwirken mit Hormonen bestimmter endokriner Drüsen das Dickenwachstum bewirken. Damit entsteht die These, daß bei der Zusammenziehung des Muskels chemisch sehr verschiedene Produkte gebildet werden - je nach Art und Tempo, wie die Zusammenziehung erfolgt.“ Zitat Ende.

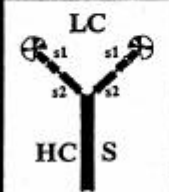
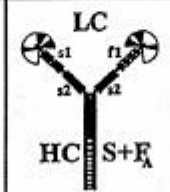
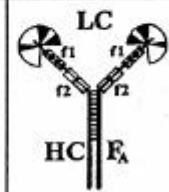
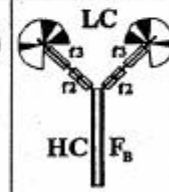
Diese These, obwohl knapp 40 Jahre alt, hat nichts von ihrem Reiz verloren. Es ist heute noch weitgehend unklar, welche chemischen Substanzen den verschiedenen Muskelbelastungen zuzuordnen sind. Bekannt ist, daß aufgrund einer Schädigung der Skelettmuskulatur, die durch Überlastungen und/oder Trauma entstehen, verschiedene zelluläre Stoffe ins Blut gelangen: Myoglobin, Kreatinkinase, Aldorase, Kreatin, Kalium, Phosphat, Aminosäuren und auch Harnsäure. Gleichzeitig treten Wasser, Natrium und Calciumionen in die Muskelzelle ein. In der Akutphase zeigt die Muskulatur dies durch einen Hartspann, Hemmung der $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ - Pumpe. Unter ungünstigen Voraussetzungen kann der erhöhte Gewebedruck durch Kompression von Nerven und Gefäßen zu sekundären Schädigungen dieser Gewebestrukturen führen (Nekrosen).

Physiologisches.

Von regenerierenden Muskelfasern ist bekannt, daß hier ein Enzym aktiviert wird, das als N-CAM (Neural cell adhesion molecule) für die Entwicklung des Muskel und Nervensystems, bei der Etablierung von Zell-Zell-Kontakten beteiligt ist (*Rutishauser, 1987*). In der Muskelentwicklung ist N-CAM wahrscheinlich obligatorisch für das Zustandekommen von Nerv-Muskel-Verbindungen (*Rutishauser und Mitarbeiter 1983*). In der normalen Muskelfaser ist N-CAM nicht zu identifizieren. Nach einer Denervation aber (*Walsh und Moore, 1986*) erscheint es an der motorischen Endplatte und innerhalb regenerierender Muskelfasern (*Moore und Walsh, 1985*).

Unter bestimmten Umständen kommt es aber auch im gesunden Muskel vor (*Kontusion, Training*).

Es gibt mehrere Typen von Muskelfasern und zwar die roten Typ IFasern für langsame Bewegungen und statische Belastungen ^{*)*} und die weißen Typ II-Fasern, die der Schnellkraft dienen. Aufgrund unterschiedlicher Enzymreaktionen lassen sich die Typ II-Fasern weiterhin in II-a, II-b und II-c Fasern unterscheiden (*Dubowitz/Brooke*).

Fasertyp	I	IIc	IIA	IIb
Kontraktilität	gering	intermediär		hoch
Myosin	SLOW (S, s)		FAST (F, f)	
Innervations-Frequenz	~ 10/s	~ 25/s	~ 40/s	> 55/s
schwere Ketten (heavy chains: ,HC')	S	S + F _A	F _A	F _B
leichte Ketten (light chains: ,LC')	s1 + s2 (f1) (f1 + f2) (f1 + f2 + f3)	s1 + s2 f1 + f2 + f3	f1 + f2 + f3	f1 + f2 + f3
Modelle von Myosin-Molekülen (eine Variante pro Fasertyp) ^{*)*}				

Faserspektrum der Skelettmuskulatur mit von links nach rechts ansteigender Kontraktilität. Der Schaft der Myosinmoleküle wird aus unterschiedlichen (typ-determinierenden) schweren Ketten gebildet, der Kopf aus doppelpaarigen (langsamen/schnellen) leichten Ketten und globulären Regionen mit typ-variabler Myosin-LC-Kinase bzw. ATPase-Aktivität (nach Tidow, 1995) **Abb. 4**

^{*)*} Nach neuesten Informationen ist es einer Arbeitsgruppe um *Stefan Galler* von der Universität Salzburg – in Zusammenarbeit mit Forschern der Universität Konstanz – gelungen, bei dem **Muskelfaser –Typ I** einen Untertypen - „*Isoform*“ - zu identifizieren. Nachgewiesen wurde dieser Typ im Beinmuskel eines Kaninchens. Dieser *Isoform-Typ* hat die Eigenschaft besonders langsame, feinabgestimmte Bewegungen zu bewirken. Auch tritt dieser Fasertyp immer zusammen mit den normalen Typ-I Fasern auf.

Es zeigt sich also, daß Arbeitsteilung - so wie bei den "schnellen" - auch bei den Leistungen langsamer Muskeln eine wichtige Rolle spielt.

Die Verteilung verschiedener Aufgaben auf spezialisierte Muskelfasertypen ermöglicht eine optimale Verwertung der vom Körper aufgenommenen Nahrungsenergie. Wie *Galler* betont, kann die Bewegungs- und Sportphysiologie von der neuen Entdeckung profitieren. Die Zusammensetzung der Muskeln aus unterschiedlichen Fasertypen läßt sich nämlich durch Training beeinflussen und die bessere Kenntnis der Vielfalt der Muskelfasertypen erlaubt es, den Trainingszustand von Muskeln sehr viel genauer zu bestimmen.

Durch einen sog. Kreuzinnervationsversuch hat sich gezeigt, daß ein weißer Muskel (Typ II) nach Denervation motorischer Nervenfasern seinen Phänotyp ändert, wenn er von motorischen Nervenfasern des roten Typ I innerviert wird.

In einem solchen Fall wandeln sich die histochemischen und physiologischen Eigenschaften der ursprünglichen Typ II-Fasern zu solchen der Typ I-Fasern. Auch die Trophik der Muskelfasern ist abhängig von der Innervation und wird möglicherweise auf elektrische, chemische (z.B. Acetylcholin) und auch mechanische Komponenten zurückgeführt. Durch Dehnungsreize wird z.B. auch die Proteinsynthese des Muskels stimuliert. Es kommt zu einer positiven trophischen Wirkung mit Hypertrophie und ein Längenwachstum der Fasern durch Erhöhung der Anzahl der Sarkomere (Jerusalem und Zierz, 1991).

Seit Längerem ist ein Muskelfasertyp bekannt, der sog „Intermediäre“, der ein Subtyp der Typ-II Fasern sein soll. Er ist anscheinend ziemlich resistent gegen frühzeitige Ermüdung. Dies resultiert aus seinen physiologischen Eigenschaften und zwar oxidativen sowie glykolytischen.

Durch persönliche Erfahrung bei der Behandlung verschiedener Krankheitsbilder mit Beteiligung der Muskulatur führt das Training der Bremsarbeit eines Muskels häufig zu einer signifikanten Schmerzherabsetzung, teilweise bis hin zur Schmerzfreiheit. Ob hierbei „nur“ die Reizschwelle der Nozizeptoren herabgesetzt wird oder „Endorphine“ freigesetzt werden, bleibt abzuklären. Scheinbar hat das Training dieses Belastungsmusters auch therapeutischen Wert. Ich möchte diese Art des Beübens der Muskulatur nicht nur als Bewegungsmuster charakterisieren, sondern auch als Struktureiz definieren; denn bei dieser Beübung wird der angespannte Muskel durch den Therapeuten exzentrisch zur Bremsarbeit veranlaßt und dabei entsteht ein intensiver, dehnender Reiz verschiedener Strukturen.

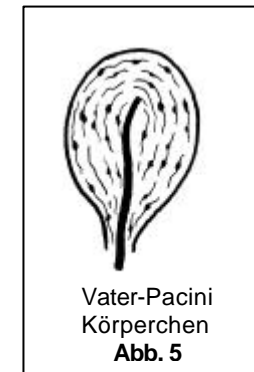
Auch die Massage eines Muskels, die ja immer „nur“ als ein passives Element in der Physikalischen Therapie dargestellt wird, ist meiner Auffassung nach ein Struktureiz, weil hierbei verschiedene Gewebeanteile und auch Sensoren taktile Reize empfangen und darauf sehr aktiv - zum Teil chemisch, zum Teil reflektorisch - reagieren. Denn die Massage bewirkt ja nicht nur das Verschieben von Körpersäften. So erfüllen Somatosensoren sicherlich nicht nur messende Funktionen, wie es von Meßgeräten in der Technik bekannt ist, sondern haben wohl auch spezifische Aufgaben, die reaktiv, strukturschützende Maßnahmen einleiten können. Der Chemismus oder die elektrischen Potentiale, die hierbei in den verschiedenen Körpergeweben evoziert werden (Neurotransmitter, Vesikel usw.), ist bislang nicht abzuschätzen.

Kontraktiler ABS-System?

Bei sportlichen Überbelastungen läßt sich erkennen, daß Zerrungen überwiegend dann geschehen, wenn der Muskel bzw. das „neuromuskuläre System“ seine Bremsarbeit nicht erfüllt hat, also daß sein Servomechanismus oder ABS-System - ähnlich dem Antilocksystem eines PKW - wie es hier definiert werden soll, versagt hat. Hier tritt nun wieder die Komponente des Bewahrenden, das der Bremsarbeit innewohnt, in den Vordergrund. Scheinbar werden Muskeln und Gelenke dadurch vor größeren

Schäden bewahrt. Denn das sensomotorische, dosierte Nachgeben des Muskels ist ein entscheidendes Kriterium für die Erhaltung der homonymen Muskelstruktur.

Beim ABS-System eines PKW, wird bei einem Bremsvorgang von den Sensoren die Umdrehungszahl der Räder ständig registriert und der elektronischen Systemeinheit gemeldet. Kommt es nun zum Blockieren eines Rades, wird ein Mechanismus in Gang gesetzt, der die entsprechende Bremsbacke veranlaßt, intervallmäßig sich im Bruchteil einer Sekunde zu lösen und zu fassen, damit Kontinuität gewahrt bleibt. Auf einen Muskel übertragen würde dies bedeuten, die messenden Sensoren, Muskelspindeln, Golgi - Sehnenorgane, die VATER - PACINI- schen Lamellenkörperchen⁶ und freie Nervenendigungen zu einem schnellen, harmonischen Kollektiv zu verschmelzen, um den Muskel vor Schädigung zu bewahren.



Hierzu ist es erforderlich, genügend kontraktile Elemente durch spezifisches Training dahingehend zu mobilisieren, daß die Querbrückenkinetik in den Sarkomeren des Muskels rechtzeitig und dosiert zum Einsatz kommt; denn wenn die Actinfilamente aus der Anordnung der Myosinfilamente herausrutschen, wird möglicherweise das Zytoskelett der Sarkomere traumatisiert und somit haben wir wahrscheinlich unsere/n Muskelzerrung bzw. Muskelfaserriß. Um dies zu verhindern muß der Muskel in kritischen Situationen, sehr schnell, sehr dosiert auf das willkürliche Potential - „Schutz“- reagieren können. Welchen Sinn hat ein Bereitschaftspotential, oder besser gesagt, welchen Sinn machen Führungskräfte (Sensoren und Motoneuronen), wenn nicht genügend konditionierte Arbeitskräfte (kontraktile Elemente) verfügbar sind bzw. nicht kräftig und schnell genug, um sie für diese Tätigkeit zu gewinnen (rekrutieren).

⁶ VATER PACINIsche Lamellenkörperchen, die sich im periostalen Bindegewebe zwischen den am Knochen ansetzenden Sehnenfasern und der äusseren Periostschicht befinden, sind sog. Beschleunigungssensoren. Auch werden Vibrationen von ihnen erfaßt. Sie befinden sich ferner in der Subcutis, an/in den Gelenkkapseln und den Fascien der Muskeln sowie im Mesenterium.

Immer wieder passiert es, daß auch gut trainierte Sportler inmitten eines Wettkampfes schwere Verletzungen der Muskulatur erleiden, sei es die Zerrung oder ein Muskelfaserriß oder sogar einen Muskelabriß, obwohl sie gut vorgedehnt waren. Zerrungen oder Muskelrisse entstehen überwiegend dann, wenn sehr schnelle Bewegungen abgebremst werden müssen oder auch bei sog. Umkehrbelastungen, d. h. wenn ein Bewegungsablauf spontan, entgegengesetzt abläuft (plyometrische Konterbewegung).

Bekannt ist, daß bei schnellen, leichten Bewegungen bedeutend weniger Muskelfasern rekrutiert werden als bei langsamen Bewegungen, bei denen ein Muskel mit allen Fasern eine schwere Last heben muß. Jede geplante Bewegung (Willkürbewegung) wird durch ein Bereitschaftspotential koordiniert. Somit werden motorische Einheiten also auf eine Rekrutierung vorbereitet. Ein Gewichtheber z.B. der eine schwere Last zur Hochstrecke bringen will, muß über seine Willensstärke ein Bereitschaftspotential entwickeln, möglichst alle verfügbaren motorischen Einheiten blitzartig zu rekrutieren. So ist auch davon auszugehen, daß beim Abbremsen einer schnellen, leichten Bewegung zunächst nur sehr wenige Muskelfasern für dieses Abbremsen rekrutiert werden. Wenn aber bei schnellen Abbremsbewegungen - z. B. Auffangen eines geworfenen Gegenstandes - das Gewicht nicht einzuschätzen ist, birgt dies die Gefahr einer Verletzung des Muskels, weil hierbei gewaltige Dehnungskräfte wirken und möglicherweise zu wenig kontraktile Elemente rekrutiert wurden. Ebenso im Boxsport, der Schlag ins Leere! Besonders aber beim *Plyometrietaining** (Anhang).

Auch bei schnell ablaufenden und nicht immer vorwegnehmbaren Bewegungsphasen, wie z.B. bei Landungen nach Sprüngen, weiß man, daß im Moment des Bodenkontakts eine kurzzeitige, ca. 1/100 s dauernde Kraftspitze wirkt, die anschließend ausschwingt, also geringer wird.

Entscheidend für die Intensität der Kraftspitze und deren Wirkung ist die Höhe aus der ein Niedersprung erfolgt und die Dämpfungseigenschaften des jeweiligen Untergrundes, wie auch der biologischen Gewebe.

Die Zeit, die vergeht bis die Bremsarbeit wirksam wird, ist länger, Sie beträgt im Durchschnitt ca. 4/100 s und ist auch bei kräftigen Muskeln nachzuweisen. Diese Phase wird als passive Belastung bezeichnet - die sich anschließende Phase der muskulären Absicherung ist die aktive Belastung. In der ersten Phase der Landung werden die biologischen Strukturen also oft sehr ungeschützt getroffen. Die genannte Zeitspanne, die in etwa der Reflexzeit entspricht, verlängert sich bei ungenügend erwärmten Muskeln und bei Durchblutungsbeeinträchtigung.

Nun bin ich der Auffassung, daß dieses Defizit durch ein gezieltes Training zur besseren intra- und intermuskulären Konditionierung der Bremstätigkeit des Muskels beiträgt. Entscheidend ist doch, wenn wesentlich mehr Muskelfasern die Bremsarbeit ausüben, die Verletzungsanfälligkeit, Zerrung / Muskelriß u. a., deutlich abnehmen muß. Die häufigsten Muskelverletzungen der Sportler sind bei den Extremitätenmuskeln anzutreffen. Dies ist bedingt durch schnelle raumgreifende Bewegungsabläufe, die im Breitensport wie auch im Leistungssport erforderlich sind, um eine

bestimmte, persönliche Leistung zu erbringen oder eine gewisse Fitneß zu erhalten. Es ist immer wieder zu beobachten, daß in der Trainingsphase vieler Sportler, was das Krafttraining betrifft, häufig Fehler gemacht werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß Agonisten und Antagonisten immer in einem ausgewogenen Kräfteverhältnis zueinander stehen sollten. Wenn beispielsweise der M. quadriceps femoris intensiv trainiert wird, muß gleichzeitig auch der M. biceps femoris eine gewisse Kraft besitzen (exzentrische Kraft), um die Streckbewegung ohne Verletzungsgefahr abbremsen zu können. Wird dies nicht beachtet, besteht vorprogrammierte Verletzungsgefahr!

Die hemmenden Systeme, die der eigentlichen Bremsarbeit vorgeschaltet erscheinen, sind bei einem zu schwachen Antagonisten scheinbar nicht reaktiv genug, sehr schnelle, kraftvolle Bewegungen rechtzeitig und ausreichend zu bremsen bzw. genügend konditionierte Muskelfasern sehr schnell zu rekrutieren (zu langsamer Ca^{2+} -Ioneneinstrom?).

Inwieweit auch VATER PACINISCHE Lamellenkörperchen, die in unterschiedlicher Modifikationsform vorkommen, und/oder freie Nervenendigungen in dieses Geschehen involviert sein könnten, läßt sich derzeit nicht abschätzen⁷ Läßt unzureichende Konvergenz möglicherweise auch bei gut trainierten Sportlern, Zerrungen und größere Verletzungen zu? Sicherlich spielt hierbei auch die Muskelermüdung eine große Rolle, weil diese Verletzungen selten in der Anfangsphase eines Wettkampfes auftreten.

Wenn sich die Funktion einer Bewegung verändert, das heißt eine langsame, Bewegung verändert sich in Halten, wird dies scheinbar durch eine mögliche **a - g - Balance** reguliert, die funktionsabhängig variiert werden kann (Bruggencate, 1994).

Schnelle, ballistische Bewegungen mit dieser Vorgabe sind offenbar komplett vorprogrammiert, weil die Reaktionszeit für die Muskelspindeln zu kurz ist um so schnell noch reagieren zu können.

Die Bremsarbeit selbst ist wohl eine bewußte, willkürliche Leistung, bei der ein Bereitschaftspotential vorhanden sein muß.

Ein unterschwelliges Bereitschaftspotential für koordinierte Bewegungsabläufe ist meiner Auffassung nach in den hemmenden Mechanismen verankert, man könnte dies durchaus als „somatische Intelligenz“ bezeichnen. Die Bremsarbeit selbst aber benötigt sicherlich ein erhöhtes Bereitschaftspotential.

⁷ In der letzten Zeit gab es recht kontroverse Ansichten über die Vermittlungseigenschaften die die verschiedenen Sensortypen zur Wahrnehmung beitragen. Aus diesem Grunde sind präzise Aussagen noch weitgehend hypothetisch. Es bleibt auch die Frage nach dem Zweck der Pacini Körper im Übergangsbereich Sehne/Periost.

Exzentrisches Training.

Aus Unkenntnis und vielleicht auch aus Bequemlichkeit wird dieses Ausgleichstraining häufig vernachlässigt. Nach meiner Auffassung ist es erforderlich, beide Muskeln - Agonisten und Antagonisten - durch das Training der bewußt aktiven Bremsarbeit, bei der ein Trainingspartner erforderlich ist, zu konditionieren. Das Training der muskulären Bremsarbeit ist relativ einfach. Es basiert auf dem Prinzip des kontrollierten Nachgebens, man könnte auch sagen, einen „Kampf“ bewußt, kontrolliert zu verlieren. Im Grunde genommen ist dies aber keine Niederlage, sondern ein Lernprozeß der den Muskel vor einer wirklichen Niederlage, und zwar der Verletzung, schützen kann. Denn hierbei kommt es auch zu einer profunden Verbesserung der Tiefensensibilität (Propriozeption).

Man könnte durchaus von „exzentrisch evozierten Potentialen“ sprechen, die scheinbar eine mögliche Bahnung dieses Belastungsmusters einzuleiten vermögen.

Als Beispiel die Bremsarbeit am *M. biceps brachii* nebst *M. brachialis* und (*M. brachioradialis*):

In der Rückenlage beugt der Proband den Unterarm über 90° hinaus und hält die Beugespannung aufrecht. Nun bringt der Therapeut den gebeugten Unterarm gegen den Widerstand des Probanden zur Streckung. Es sollte in sauberer Gelenkstellung (Supinationsstellung), zunächst ohne Faustschluß praktiziert werden. Dies geschieht zunächst langsam und mit mäßiger Muskelkraft. Die Dosierung wie auch die Beschleunigung kann später variabel gestaltet werden. Dieses Training kann auch dazu beitragen, das Ellenbogengelenk - durch Hypertrophie der gelenkbewegenden Muskeln - zu stabilisieren. Besonders dann, wenn eine Überstreckbarkeit über 180° hinaus vorliegt (Hypermobilität⁸). Hier sollte die exzentrische Belastung aber mit der nötigen Vorsicht und zwar fein dosiert angegangen werden; denn die Verletzungsgefahr durch maximale, exzentrische Anspannungen ist recht hoch.

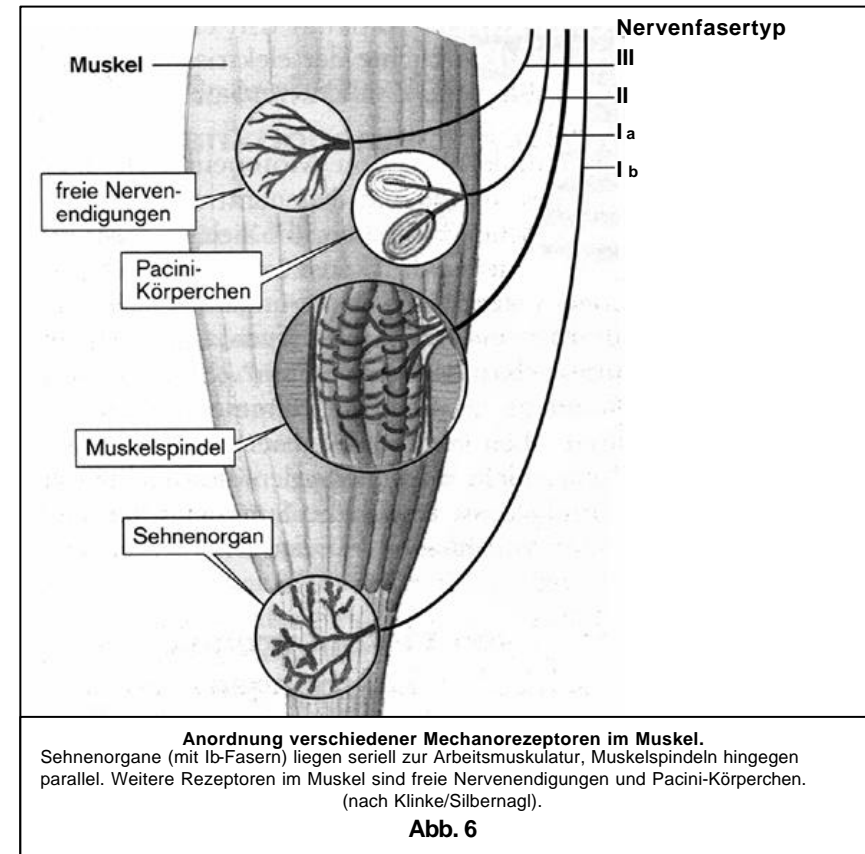
Im Gegenzug sollte auch der *M. triceps brachii* beübt werden und zwar im Wechsel. Es empfehlen sich Serien mit jeweils 8 bis 12 Wiederholungen. Entscheidend für eine erfolgreiche Behandlung der Hypermobilität ist, daß hierbei isoliert exzentrisch gearbeitet wird. Bei Untrainierten kann eine zu hohe Dosierung zu einem heftigen Muskelkater führen; auch in den statischen, langsamen, roten, Typ- I und II c Muskelfasern. Bei Fußballspielern z.B. sind sehr häufig die Adduktoren der Oberschenkel wie auch die Flexoren durch Zerrungen gefährdet, weil verkürzt (- RSV- * **Anhang**). Auch hier kann das Bremstraining der Adduktoren und/oder der Beuger seinen bewahrenden Charakter unter Beweis stellen. Hierbei bietet sich in der

⁸ Bei Hypermobilität geht es darum, neben der Muskelkräftigung auch die Bindegewebsstrukturen zu stabilisieren. Hier empfiehlt es sich die Betroffenen aufzuklären um über die Nahrungsergänzung Fluor und auch Silizium in Form von Kieselerde zuzuführen, weil hierdurch möglicherweise eine Stabilisierung stattfindet.

Vorbereitungsphase eines Wettkampfes besonders die sog. Oberschenkelzange exzentrisch - für die Adduktoren an. Es sollte aber immer beachtet werden, daß zuvor und auch danach die zu beübenden Muskeln gedehnt werden.

Schlußbetrachtung.

Resümierend kann gesagt werden, daß Verletzungen der Muskulatur nie auszuschließen sind, weil es bei Bewegungen im Alltag, besonders aber bei sportlichen Aktivitäten sehr häufig auch zu unkontrollierten Bewegungsabläufen kommt. Aber eine gute Vorbeugung ist durchaus in der Lage, gesunde Strukturen der Muskulatur, wie auch der Gelenke bewahren zu helfen. Lernprozesse sind im allgemeinen unbequem, weil sie mit sehr viel Arbeit bzw. Übung verbunden sind. Wir alle wissen, daß der Mensch zur Bequemlichkeit neigt. Und so wird vieles (Notwendige) verdrängt und zwar so lange, bis ein Problem zu Tage tritt. In den häufigsten Fällen ist dies aber durch Unbequemlichkeiten zu bereinigen.



In diesem Zusammenhang muß man auch das Training der Bremsarbeit des Muskels sehen. Dieses exzentrische Training scheint die Muskeln in die Lage zu versetzen, die verschiedenen Sensoren bzw. Mechanorezeptoren Abb. 6, Muskelspindeln (Längenkontrolle), Golgi - Sehnenorgane (Spannungskontrolle), VATER-PACINischen Lamellenkörperchen (Beschleunigungssensoren), freie Nervenendigungen im Muskel, zu einem schnelleren und homogeneren Miteinander zu konditionieren.

Offene Fragen.

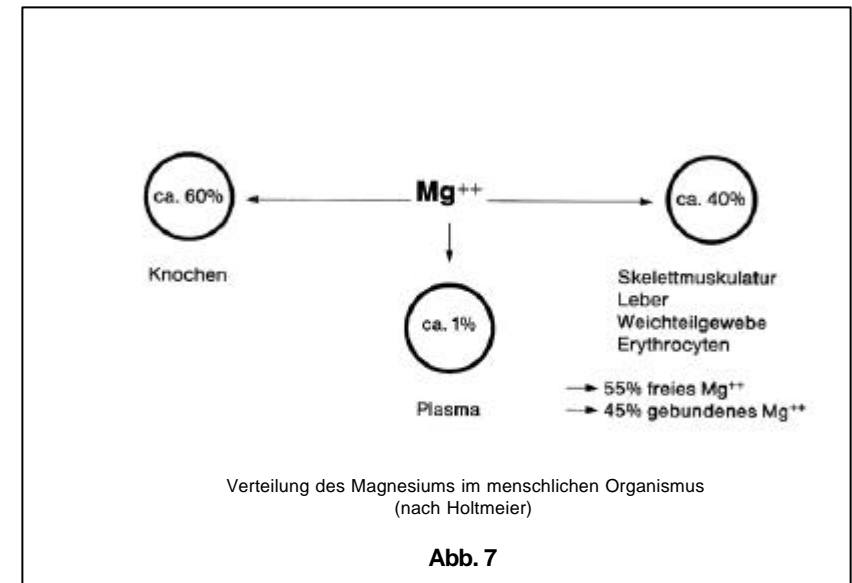
Abschließend bleibt die Frage, welcher dieser Mechanosensoren bzw. Rezeptoren das entscheidende Signal, zur Veränderung des Membranpotentials des Sarkolemm und/oder des sarkoplasmatischen Retikulums, vermittelt und letztendlich den Befehl für den Einstrom der Calciumionen in das Sarkoplasma initiiert.

Ebenso bleibt die Frage, wie der Rücktransport des Calciums in die intrazellulären Speicher, an dem ATP und Mg^{2+} - Ionen beteiligt sind, organisiert ist.

Ob den in der Muskulatur befindlichen Mechanorezeptoren, die über eigene Rezeptorneurone verschaltet sind, eine *somatische Intelligenz* bzw. „speicherbare Merkfähigkeit“ zugestanden werden kann, ist derzeit noch hypothetisch zu betrachten.

Über die Bedeutung des Magnesiums, das an zahlreichen Prozessen im menschlichen Organismus beteiligt ist, besteht kein Zweifel. So wirkt es z. B. bei der Stabilisierung von Zellmembranen; auch sonst spielt es bei den meisten enzymatisch gesteuerten Vorgängen eine große Rolle. Fast alle phosphatübertragenden Enzyme und Phosphatasen benötigen Magnesium bei Aktivierung der Nuklease wie auch bei der Glykolyse. Inwieweit Magnesium unter körperlicher Belastung im Rahmen der physiologischen Stoffwechselfvorgänge im Muskelstoffwechsel „gebraucht (bzw. verbraucht)“ wird, und es somit mittelfristig zum Absinken des Blutserummagnesiumspiegels kommt, der sich durch Verlagerung in die roten Blutkörperchen verschiebt (Lactatabhängige Verschiebung ?) ist nicht bekannt. Diese Verschiebung reguliert sich nach einigen Stunden wieder und verläuft scheinbar parallel mit dem Lactatabbau. Bislang ist nicht geklärt, warum diese Verschiebung des Magnesiums nach intrazellulär stattfindet. Magnesium wird durch ein noch nicht bekanntes Hormon der Nebenschilddrüse reguliert, das nicht mit dem Parathormon identisch ist und bei Mg-Defizit Mg^{2+} und Ca^{2+} aus dem Knochen mobilisiert. Die spezifischen Zusammenhänge bedürfen noch der völligen Klärung.

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die prozentuale Verteilung des Magnesiums im menschlichen Organismus.



Anhang:

Periphere Muskelrelaxation.

Durch chronische Dauerbelastungen der Muskulatur, insbesondere statische Belastungen, kann es zu Spannungserhöhungen mit verzögertem Ca^{2+} - Ionen Rücktransport in die terminalen Zisternen kommen (muskulärer Hartspann). Die vermehrte Aktivität bei verminderten Erholungsphasen bewirkt eine Änderung des Stoffwechselgleichgewichts des Muskels, wie auch der neuronalen Überträgerstrukturen (Schildt-Rudloff 1995). Diesen Zustand bezeichnet man als reversible strukturelle Verkürzung (RSV). Bei der Untersuchung läßt der Muskel sich passiv nicht so weit dehnen, wie es dem vollen Bewegungsausmaß des zugeordneten Gelenks entsprechen würde (Janda 1994). Eine passive Weiterdehnung bei diesem Zustand wäre von Schmerzen begleitet. Störungen dieser Art sollten mit der postisometrischen Relaxation (PIR) behandelt werden. Begleitend ist eine Magnesiumsupplementierung (Frauen 300 mg/tägl., Männer 400 mg/tägl.) für vier bis sechs Wochen zu empfehlen und zwar bei ausreichender Flüssigkeitszufuhr und intakten Nieren (Magnesium-*aspartat* !). Um eine solche Dehnung vorzunehmen ist es erforderlich, den betroffenen Muskel mit maximaler Kraft, gegen Widerstand, bis zum Stadium der Ermüdung anspannen zu lassen. Die Ermüdung wird erkennbar entweder durch Zittern oder Spannungsverminderung. Ist dieser Zustand erreicht, wird der Proband zur

Entspannung des Muskels aufgefordert und nach ca. 2 bis 3 s durch den Behandler in die Dehnstellung, für ca. 15 bis 20 s gebracht.

Dies ist nun die zur Zeit gängige Form der Muskelrelaxation.

***Leerlauf:**

Um aber die Muskelentspannung noch vollkommener zu gestalten praktiziere ich im Anschluß an die postisometrische Dehnung den sog. „*Muskelleerlauf*“, das heißt hierbei übernimmt der Therapeut die Funktion der agonistischen und der antagonistischen Muskeln des Probanden. Wenn nun die Behandlung einer Muskelzerrung im Vordergrund steht, ist es allerdings erforderlich den Muskelleerlauf isoliert durchzuführen also ohne vorherige PIR. Denn in diesem Falle geht es darum, die bewegungshemmenden Faktoren - Schutzspannung, Angst, Schonhaltung - auszuschalten.

Durch eine sehr einfache aber äußerst effektive Maßnahme, „das freie Muskelhandling“, eröffnen sich besonders auch für die Muskelrelaxation ideale Perspektiven. Der Therapeut übernimmt „sämtliche“ Aktivitäten der Bewegung und des Abbremsens der Bewegung des zu handelnden Körperteils. Sogar die Synergisten kommen hierbei zur völligen Entspannung. Derzeit ist nicht abzuschätzen, welchen Einfluß diese Technik auf die Muskelsensoren hat zumal es sich hierbei noch um Neuland handelt - möglicherweise eine Optimierung der Muskelrelaxation -. Insofern soll auf weitere Einzelheiten innerhalb dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

Zentral wirkende Muskelrelaxation

Wenn diese Maßnahmen keine eindeutigen Verbesserungen bei der Muskelentspannung bringen, kann es erforderlich werden hier mit *Zentral wirkenden Muskelrelaxantien* zu arbeiten. Hierbei ist aber Rücksprache mit dem verordnenden Arzt nötig.

Eine Sonderstellung bei Muskelrelaxantien bezüglich der Membranstabilisierung soll die Substanz Tolperison (*Mydocalm*[®]) einnehmen. Ihre strukturelle Ähnlichkeit mit dem Lokalanästhetikum *Lidocain* erklärt die stabilisierende Wirkung auf Membranen erregungsleitender Strukturen. Nachgewiesen wurde dieser Effekt sowohl für afferente Impulse am peripheren Nerven als auch für mono- und polysynaptische Reflexe auf spinaler und supraspinaler Ebene. Klinisch äußert sich dies in einer verminderten Reflexerregbarkeit und einer Abnahme des gesteigerten Muskeltonus.

Die Gesamthäufigkeit zentralnervöser Nebenwirkungen nach Tolperisongabe ist sehr gering, wobei Müdigkeit bzw. Muskelschwäche selten, d. h. unter 1% auftreten. Die Substanz ist auch für die Behandlung von Säuglingen ab 4 (!) Monaten zugelassen. Eine rasche Dosisanpassung ist aufgrund der kurzen Eliminationshalbwertszeit problemlos möglich bei einer großen therapeutischen Breite (Kokemohr/Seubert, 1995). Ergebnisse klinischer Studien belegten die Vorteile einer Behandlung mit

Tolperison in Verbindung mit Maßnahmen der Physiotherapie. Über Beeinträchtigungen bei der Durchführung von physiotherapeutischen Maßnahmen (aktive sowie passive) ist bisher nichts negatives bekannt. Wichtig hierbei ist, daß der Physiotherapeut (Masseur und med. Bademeister/ Krankengymnast) über eine begleitende Medikation informiert ist!

****Plyometrietaining (Reaktivtraining).***

Das Plyometrietaining ist eine der wichtigsten Trainingsmethoden für Explosivsportler. Sie stellt für die Körperstrukturen die belastendste Methode dar. Gerade deshalb ist diese Trainingsform auch für uns Sportphysiotherapeuten von großer Bedeutung, da wir sie am Ende einer Behandlung eines Explosivsportlers in die Trainingstherapie verstärkt eingliedern müssen. Die Strukturen sollen sich an diese Form der Belastung anpassen. Das Plyometrietaining wird auch als "Elastizitätstraining", als "reaktives Training", als "Niedersprungtraining" (Drop Jumps) oder auch als "Schlagmethode" bezeichnet. Die beiden Begriffe (reaktiv, plyometrisch) sind als synonym anzusehen. Von osteuropäischen Sportwissenschaftlern wird der Terminus der plyometrischen Methode verwendet.

Unter dem Wort "Plyometrie" bzw. auch "Reaktivkraft", wird jene Fähigkeit der Muskulatur verstanden, nach einer exzentrisch schnellen Kontraktion, möglichst schnell wieder konzentrisch zu arbeiten. Dies wird auch als "Arbeit im Dehnungs-Verkürzungszyklus" bezeichnet.

Es werden bei einer plyometrischen Bewegung die späteren Agonisten gedehnt. Der über die Muskelspindel ausgelöste Dehnungsreflex führt zu einer vermehrten Innervation von ansonst nicht aktiven Muskelfasern und damit zu einer höheren und schnelleren Kraftentwicklung bei der anschließenden Kontraktion.

Für die untere Extremität: bieten sich im Training besonders die Einbeinsprünge (3er-Hop; 10er-Hop, usw.), beidbeinige Sprünge, Hochweitsprünge, Tiefsprünge (Drop Jumps), Laufsprünge, Vor-, Seit- und Rücksprünge, Sprünge über Hindernisse und dergleichen an. Die simpelste Form des Plyometrietainings ist das Seilspringen.

Für die obere Extremität: bieten sich besonders beidarmige Überkopfwürfe, aber auch einarmige Würfe mit leichten Bällen bzw. auch schweren Bällen (z. B. Medizinbälle) an.

Da bei dieser Trainingsform die neuromuskuläre Ermüdung sehr groß ist, sollte die Serienpause zwischen vier und fünf Minuten gewählt werden.

Der Begriff Plyometrie geht zurück auf gr. „*plythyein*“ (steigern, erhöhen), besteht also aus den Bestandteilen „*plio*“ und „*metric*“, die „*mehr*“ und „*messen*“ bedeuten.

Die Geschichte der Plyometrie ist kurz. Erstmals beschrieben wurde diese Arbeitsweise von Sportwissenschaftlern aus osteuropäischen Ländern Mitte der sechziger Jahre. Die damaligen leichtathletischen Erfolge vor allem der Sowjetrussen beruhen zu einem großen Teil auf dieser Trainingsform (zumindest in den Schnelligkeits- und Explosivkraft-Wettbewerben). Ein früher Verfechter, *Yuri Veroshanskis*, hatte mit plyometrischem Training, vor allem mit von ihm trainierten Springern, große Erfolge. Er experimentierte ab 1967 mit Tiefsprüngen und der Schlagmethode. Eine wichtige Erkenntnis *Veroshanskis* war schon damals, mit dem Reaktivkrafttraining eine Methode gefunden zu haben, die nicht nur das kontraktile Gewebe auf schnellstkräftige Bewegungen vorbereitet, sondern entsprechende Adaptionerscheinungen im gesamten neuromuskulären System nach sich zieht.

Erstmals große Beachtung wurde dem plyometrischen Training durch die Erfolge des Sprinters *Valeri Borzov* geschenkt, der sehr intensiv in diesem Bereich trainiert hatte. Bei den Olympischen Spielen von 1972 gewann *Borzov* im Alter von 20 Jahren die Goldmedaille über 100 m in 10,0 Sekunden.

Inzwischen ist das plyometrische Training wissenschaftlich⁹ untersucht worden und in der Wirkung auf reaktive Kraftentwicklung allgemein anerkannt. Leider fehlen immer noch Untersuchungen über einen längeren Zeitraum, die außer über die muskuläre Verbesserung auch aussagekräftige Ergebnisse über die Verträglichkeit solcher Übungsformen liefern können. Zumindest aber für kürzere Zeiträume (im Bereich von einigen Wochen) liegen Ergebnisse vor. Zu nennen sind insbesondere die Arbeiten von *Viitasalo* (1981), *Bosco* (1982), *Schmidtbleicher* (1984 u. 1985), sowie *Komi* (1985).

Das Tiefsprungtraining ist sicherlich so etwas wie das „Paradebeispiel“ des plyometrischen Krafttrainings. Die Schulung der Reaktivkraftkomponente macht aber prinzipiell in allen Sportbereichen Sinn, in denen eine nicht-maximale Last (vom Diskus bis zum eigenen Körpergewicht) möglichst explosiv bewegt werden soll. Hier sind zunächst alle Sportarten der Leichtathletik zu nennen, die nicht dem Ausdauerbereich zuzuordnen sind. Aber auch für die großen Mannschaftssportarten und andere Sportarten mit schnellen Bewegungsformen macht ein plyometrisches Krafttraining Sinn. Wichtig ist nur zu bedenken, ob bestimmte Bewegungen eine Gefährdung für den passiven Bewegungsapparat beinhalten. Die Möglichkeit dazu muß stets mitkalkuliert werden, da die auftretenden Kraftspitzen ausgesprochen hoch sind, wie *Schmidtbleicher/Gollhofer* 1985 in Laborversuchen feststellten.

⁹ Reaktives Kraftverhalten wird schon bei *Harre* in der ersten Auflage der Trainingslehre (1972) erwähnt (Kap. 6.1.2.3). Empirische Untersuchungen beginnen aber erst in den 80er Jahren.

Vibrationskrafttraining

Beim Vibrationskrafttraining, das sportwissenschaftlich noch in den Kinderschuhen steckt, soll über den sog. tonischen Vibrationsreflex (TVR) ein verbesserter Kraftzuwachs erfolgen.

Durch vibratorische Anregung soll es möglich sein, Muskelfasern, die ohne Vibrationsstimulation bereits ermüdet waren und willentlich nicht mehr ansprechbar, erneut zur Kontraktion zu bringen. Die Anregungsfrequenzen sollen hierbei nicht über 60 Hz liegen und die Muskulatur sollte eine Vorspannung haben.

Bei den Trainingsgeräten, die hierbei zum Einsatz kommen, handelt es sich um Vibrationssplatten, ca. 50 x 50 cm, auf denen der Proband steht und sein Krafttraining durchführt.

Rätsel Muskelkraft

Ob wir atmen, sprechen, oder gehen - immer sind Skelettmuskeln beteiligt. Muskeln ermöglichen uns einmal einen schnellen Sprint und ein anderes Mal das Tragen einer Einkaufstasche. Diese grundverschiedenen Anforderungen können die Skelettmuskeln erfüllen, weil sie aus Tausenden von hochspezialisierten Muskelfasern bestehen. Deren unterschiedliches Kontraktionsverhalten ermöglicht sowohl lang andauernde Haltearbeit wie auch blitzschnelle nahezu lastfreie Bewegungen. Die molekulare Basis dafür bilden kleine Unterschiede in den Proteinen, die bei den krafterzeugenden Vorgängen beteiligt sind. Nahezu alle diese Eiweißstoffe gibt es in mehreren Strukturvarianten oder Isoformen.

Was ballt die Hand zur Faust?

Die Prozesse der Signalweiterleitung vom Nerv bis hin zu den krafterzeugenden Strukturen der Muskelfasern sind bereits weitgehend aufgeklärt. Der molekulare Kraftakt selbst ist jedoch immer noch ein Rätsel, so *Galler*. Bewegungen von biologischen Molekülen im Bereich von Millionstel Millimetern müßten mit einer zeitlichen Auflösung von Zehntausendstel Sekunden beobachtet werden, um die Tätigkeit der krafterzeugenden Moleküle erforschen zu können. Zwar gibt es viele experimentelle Daten dazu und in den Köpfen der Forscher existieren schon konkrete Vorstellungen davon, was auf molekularer Ebene in den Kraftkammern des Muskels geschieht. Doch noch fehlen die Beweise. Wie ein roter Faden durch den Dschungel Muskelforschung zieht sich das Werk von *Masataka Kawai*. Seit fast 30 Jahren forscht er am molekularen Motor von Skelett- und Herzmuskeln. *Kawai*s Forschungsobjekt ist die membranlose Muskelfaser, ein Präparat, das die krafterzeugenden Strukturen in seiner strukturellen Integrität bewahrt und zudem erlaubt molekularen Motor in frei wählbarer chemischer Umgebung zu untersuchen. Die Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Arbeit verläuft gerade im Muskel unvergleichlich effizient.

Rätsel bleibt

Kawai stellte seine Ergebnisse im September am Institut für Zoologie vor. Ihm ist es erstmals in der Geschichte gelungen, ein Modell für den krafterzeugenden Prozeß zu finden. Der atomare Antrieb für die Kraftentwicklung beruht demnach auf der Anziehung zwischen wasserabstoßenden Kohlenwasserstoffketten des Motormoleküls und seines Bindungspartners Aktin, die als hydrophobe Wechselwirkung bezeichnet wird. Durch diese Erkenntnisse ist das Rätsel der Entstehung von Muskelkraft aber immer noch nicht ganz gelöst. Denn die Formveränderung des Motormoleküls, welche Kraft und Bewegung des Muskels zur Folge hat, ist im Detail weiterhin unbekannt. Beobachtungen von Molekülbewegungen in biologisch intakten Systemen bleiben, so betont Stefan Galler, eine Herausforderung der Zukunft.

Literatur.**Bosco, C. und C. Pittera**

Zur Trainingswirkung neuentwickelter Sprungübungen auf die Explosivkraft.
In: Leistungssport 1/1982. S. 36 – 39

Galler, S.

Diversität von Skelettmuskeln - ein neuer Fasertyp.
Labor Aktuell 6/98. Seite 1-11

Harre, D.

(Gesamtredaktion): Trainingslehre. 10. überarbeitete Auflage. Berlin 1986

Holtmeier, H. J.

Das Magnesiummangelsyndrom
(Hippokrates Verlag, 1988)

Jerusalem, F., S. Ziertz, u. Mitarb.

Muskelerkrankungen (Thieme, 1991).

Klinke, R., und S. Silbernagl, (Hrsg.)

Lehrbuch der Physiologie (Thieme 1994).

Kokenmohr, H., M. Seubert

Medikamentöse Muskelrelaxation und Physiotherapie -
Synergismus oder Widerspruch.
(Z. Manuelle Medizin Nr. 4, Aug. 1995).

Komi, P.V.

Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus bei Bewegungen mit sportlicher Leistung.
IN: Bührlé, Martin (Hrsg.): Grundlagen des Maximal- und Schnellkraft-trainings. Bericht über ein internationales Symposium vom 6. bis 8. Oktober 1983 in Freiburg. Schorndorf 1985. S.254 - 270

Lucht, K., Persönliche Mitteilung (1995).

Schildt-Rudloff, K.

Zum Stellenwert der Muskulatur in der Manuellen Medizin.
(Z. Manuelle Medizin Nr. 4, Aug. 1995).

Schmidt/Thews, (Hrsg.)

Physiologie des Menschen (24. Aufl. Springer, 1990).

Schmidtbleicher, D. Sportliches Krafttraining und motorische Grundlagenforschung.

Heidelberg 1984

Schmidtbleicher, D. und A. Gollhofer

Einflußgrößen des reaktiven Bewegungsverhaltens und deren Bedeutung für die Sportpraxis. In: Bührlé, Martin (Hrsg.): Grundlagen des Maximal- und Schnellkrafttrainings. Bericht über ein internationales Symposium vom 6. bis 8. Oktober 1983 in Freiburg. Schorndorf 1985. S. 271 - 281

Schwarzer, J. Vibrationskrafttraining Einführung in eine „neue“ Krafttrainingsmethode

Leichtathletik Konkret (Trainingslehre) 5/99 S. 10-11

Thews, Mutschler, Vaupel

Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen.
(4. Aufl. 1991 Wissenschaftl. Verlagsges. m. b. H. Stuttgart).

Tidow, G.

Zur Optimierung des Schnellkrafttrainings
Die Lehre der Leichtathletik
(Leichtathletik Nr. 35/ Dez. 95 in LA 49/95)

Viiitalo, J.T. und O. Aura und K. Häkkinen und P.V. Komi und J. Nikula Untersuchungen

von Trainingswirkungen auf die Krafterzeugung und Sprunghöhe. In: Leistungssport 4/1981. S. 278 – 281

Anschrift des Verfassers

*Peter Posner
Masseur med. Bademeister
Sportphysiotherapeut
Lehmwohldstraße 12
25524 Itzehoe*