

Birgit Friedmann

Neuere Entwicklungen im Krafttraining. Muskuläre Anpassungsreaktionen bei verschiedenen Krafttrainingsmethoden

Muscular adaptations to different strength training methods

Abteilung Innere Medizin VII, Sportmedizin, Universitätsklinikum Heidelberg

Zusammenfassung

Für ein effektives Krafttraining wird eine Kombination aus dynamischen konzentrisch/exzentrischen Muskelaktionen in ein- und mehrgelenkigen Übungen empfohlen mit Variation von Last, Wiederholungszahl, Bewegungsgeschwindigkeit und Pausendauer. Zu Beginn eines Krafttrainings verbessern sich die Kraftfähigkeiten recht schnell durch eine neuromuskuläre Adaptation. Ein mindestens mehrwöchiges Training erzeugt darüber hinaus morphologische Anpassungsreaktionen des Skelettmuskels mit Entwicklung einer Muskelhypertrophie und einer Vergrößerung des relativen Anteils schneller Typ IIA-Fasern an der Muskelquerschnittsfläche. Diese Anpassungsreaktionen werden durch mechanische Reize, Stoffwechselreaktionen und hormonelle Veränderungen ausgelöst und auf molekularer Ebene durch Änderungen in der Translation und Transkription sowie eine Vermehrung und Inkorporation von Satellitenzellen bewirkt. Einige Studienergebnisse weisen darauf hin, dass zwei relativ neu entwickelte Krafttrainingsformen die neuromuskulären und morphologischen Anpassungsreaktionen im Vergleich zu einem konventionellen Krafttraining steigern bzw. modifizieren können. Ein computergesteuertes Krafttraining mit erhöhter exzentrischer Last (desmodromisches Krafttraining) kann offenbar infolge einer gesteigerten Rekrutierung schneller Muskelfasern während des Trainings die Ausbildung eines schnellen Muskelphänotyps fördern. Die während des Krafttrainings auf den Muskel einwirkende Vibrationen (Vibrationstraining) erhöhen anscheinend die neuromuskuläre Adaptation, bewirken hierdurch eine akute Steigerung der Kraftfähigkeiten und verstärken die Trainingseffekte. Insgesamt existieren zum desmodromischen Training und auch zum Vibrationstraining nur wenige kontrollierte Studien. Es sind weitere Untersuchungen erforderlich, bevor generelle Empfehlungen zum Einsatz dieser Trainingsmethoden ausgesprochen werden können.

Schlüsselwörter: Desmodromisches Krafttraining, Vibrationstraining, Muskelfasertypen, Muskelhypertrophie, Genexpression

Einleitung

Das Krafttraining hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Ursprünglich wurde es nur von wenigen sogenannten Kraftsportlern durchgeführt, später im Leistungssport wegen seiner Effektivität für die Verbesserung der athletischen Fähigkeiten in das Training nahezu aller Sportarten integriert. Inzwischen hat das Krafttraining

Summary

Strength can be effectively trained by combined concentric/eccentric dynamic muscle actions in single- or multiple joint exercises performed with free weight or using training machines. For strength development, a variation of training load, repetition numbers and velocity as well as rest intervals is recommended. After onset of strength training, there is a rapid initial increase in strength due to neural adaptations. Adaptive changes of the exercised skeletal muscles, such as hypertrophy and an increase in the percentage area of fast type IIA-fibres, only take place following at least several weeks of training. These morphological muscular adaptations are caused by mechanical and/or metabolic stress of the exercised skeletal muscles and by hormonal regulation which, on the molecular level, lead to alterations of translation and transcription as well as to proliferation and incorporation of satellite cells. The results of some recently-published controlled studies suggest that two newly-developed strength training regimens might increase and modify neural and morphological adaptations. Computer-guided strength training with eccentric overload (desmodromic training) seems to increase the recruitment of fast muscle fibres during strength training, leading to distinct adaptations towards a faster muscle phenotype. Application of vibration during strength training apparently increases the neuromuscular adaptations and thereby causes acute strength and power enhancement and increased training effects. However, there still is a lack of controlled studies for desmodromic training as well as for vibration training, and additional investigations are needed before recommendations can be made for these training methods.

Key words: Desmodromic training, vibration training, muscle fibres, muscle hypertrophy, gene expression

darüber hinaus im Gesundheits- und Rehabilitationssport einen festen Stellenwert und kommt auch bei älteren Menschen und chronisch Kranken zum Einsatz (31, 36). Zu Trainingsbeginn werden die Kraftfähigkeiten bei Untrainierten aufgrund einer neuromuskulären Adaptation recht schnell verbessert. Ein über mindestens mehrere Wochen bis Monate ausgeübtes Training bewirkt darüber hinaus morphologische Veränderungen des Skelettmuskels, die für die weitere Zunahme der Muskelkraft verantwortlich sind (29).

Im Leistungssport wurden spezielle Krafttrainingsmethoden und -programme zur Ausbildung der verschiedenen Kraftfähigkeiten (Maximalkraft, Schnellkraft, Kraftausdauer) entwickelt, die in abgewandelter bzw. angepasster Form auch im Gesundheits- und Rehabilitationssport Anwendung finden (10, 21, 33). Ein effektives Krafttraining besteht in der Regel aus kombinierten konzentrischen und exzentrischen Muskelaktionen; isometrische Belastungen spielen nur eine untergeordnete Rolle. In der Rehabilitation kommt außerdem das isokinetische Training an computergestützten Systemen zur Anwendung. Das Krafttraining kann eingelenkig oder mehrgelenkig, an Krafttrainingsmaschinen oder mit der freien Hantel erfolgen. Widerstand/Last, Bewegungsgeschwindigkeit, Trainingsumfang (Trainingseinheiten pro Woche, Wiederholungen einer Übung in einem Satz, Wiederholungszahl der Sätze in einer Trainingseinheit), Pausendauer zwischen den einzelnen Sätzen und Übungsabfolge müssen wohlüberlegt in Abhängigkeit von der individuellen Leistungsfähigkeit und dem Trainingsziel festgelegt werden. Für eine kontinuierliche Verbesserung der Kraftfähigkeiten ist eine Progression des Krafttrainings erforderlich, wofür sich einige Variationsmöglichkeiten ergeben: Der Widerstand/die Last wird in der Regel gesteigert und die Trainingseinheiten pro Woche werden häufig erhöht. In Abhängigkeit von der zu trainierenden Kraftfähigkeit können die Anzahl der Wiederholungen pro Satz und die Anzahl der Sätze pro Trainingseinheit gesteigert oder reduziert, die Pausendauer verlängert oder verkürzt werden.

In dem Bestreben, die Anpassungsreaktionen möglichst schnell, spezifisch und mit maximaler Ausprägung auszubilden, wurden in den letzten Jahren neue Krafttrainingsmethoden entwickelt. Der folgende Übersichtsartikel fokussiert auf die morphologische Adaptation des Skelettmuskels an ein Krafttraining unter besonderer Berücksichtigung der Effekte zweier relativ neuer Trainingsmethoden, des desmodromischen Krafttrainings und des Vibrationstrainings.

Anpassungsreaktionen des Skelettmuskels an Krafttraining

Muskelhypertrophie

Nach Aufnahme eines Krafttrainings wird eine neuromuskuläre Adaptation mit Steigerung der neuralen Aktivität und verbesserter Synchronisation von motorischen Einheiten beobachtet, was in typischen EMG-Veränderungen zum Ausdruck kommt. Bei einer Muskelaktion können nun erhöhte integrierte EMG-Potentiale nachgewiesen werden, wobei sich die Amplituden-Zeitkurve in Abhängigkeit von der ausgeübten Krafttrainingsform verändert (29). Durch die Aktivierung einer größeren Anzahl motorischer Einheiten bei gleichzeitiger Reduktion der Antagonisten-Koaktivität tritt eine schnelle Verbesserung der Kraftfähigkeiten ein. Im weiteren Verlauf kann sich bei Fortführung des Krafttrainings über mindestens mehrere Wochen bis Monate eine Muskelhypertrophie entwickeln. Hierfür ist ein kombiniert konzentrisch/exzentri-

sches Krafttraining mit einer Last/einem Widerstand von ca. 60 - 85 % des Einwiederholungsmaximums, einer Wiederholungszahl von 6 - 20 pro Satz mit 5 bis 6 Sätzen pro Muskelgruppe und einer Pausendauer von 2 - 3 Minuten zwischen den einzelnen Sätzen besonders effektiv (21). Die Ausbildung einer Hypertrophie des Musculus (M.) quadriceps femoris oder des M. biceps brachii nach einem solchen typischen Krafttraining wurde in einigen Studien mittels wiederholter Magnetresonanztomographien objektiviert. Eine Übersicht über die Studienergebnisse mit jungen Erwachsenen gibt Tabelle 1. Sowohl für die Ausbildung einer Muskelhypertrophie als auch für die Verbesserung der Maximalkraft existiert offenbar eine ausgeprägte interindividuelle Variabilität. In einer Studie von Hubal et al. (25) variierten die Querschnittsänderungen des M. biceps brachii nach einem standardisierten 12-wöchigen Armkrafttraining bei 342 Frauen und 243 Männern im Alter von 18 - 40 Jahren zwischen einer Abnahme um ca. 3 % bis zu einer Zunahme um 59 %, die Verbesserungen des Einwiederholungsmaximums bewegten sich zwischen 0 und 250 %. Diese Variabilität bestand bei Frauen und Männern gleichermaßen.

Muskelfasertypverteilung und Muskelfaserquerschnitt

Muskelfasertypen

Die Krafteigenschaften eines Muskels werden nicht nur durch seinen Querschnitt, sondern auch durch die kontraktile und Stoffwechseleigenschaften seiner Fasern bestimmt. Da für die meisten strukturellen Proteine der Myofibrillen und auch für die Enzyme des Muskelenergiestoffwechsels verschiedene Isoformen existieren, gibt es eine Vielzahl verschiedener Muskelfasertypen. Eine Möglichkeit zur Differenzierung von schnellen Typ IIA- und Typ IIX- sowie langsamen Typ I Muskelfasern ist beispielsweise durch die unterschiedliche ATPase-Aktivität in verschiedenen Isoformen der schweren Myosinketten gegeben. Eine Differenzierung der einzelnen Fasertypen ist darüber hinaus immunhistochemisch unter Verwendung spezifischer Antikörper möglich. Die Typ IIX-Fasern wurden lange Zeit als IIB-Fasern bezeichnet. Diese Bezeichnung wird heute in der Regel nur auf die schnellsten Muskelfasern angewandt, die beim Menschen in den Extremitätenmuskeln nicht gefunden werden. Die Kontraktionsgeschwindigkeit der schnellsten menschlichen IIX-Muskelfasern ist etwas geringer als die der Typ IIB-Fasern (41). Aus Einzelfaseranalysen weiß man, dass eine Muskelfaser mehr als nur eine Isoform der schweren Myosinketten (MHC = myosin heavy chain) enthalten kann. Um die Gesamtverteilung der MHC-Isoformen im Muskel zu erfassen, wird häufig aus dem Muskelhomogenisat eine elektrophoretische Auftrennung der schweren Myosinketten vorgenommen (SDS-Page).

Es ist allgemein bekannt, dass Spitzensportler aus Kraft- und Schnellkraftsportarten – bei allerdings großer interindividueller Variabilität – durchschnittlich einen höheren prozentualen Anteil an schnellen Typ II-Fasern aufweisen als

Tabelle 1: Übersicht über Studien mit jungen Erwachsenen, in denen Querschnittsmessungen der bevorzugt trainierten Muskulatur (Quadriceps femoris oder Biceps brachii) vor und nach einem konventionellen konzentrisch/exzentrischen Maximal- oder Schnellkrafttraining mittels Magnetresonanztomographie erfolgten.

Training	Probanden	Muskelquerschnitt	Maximalkraft	Referenz
M. quadriceps femoris				
6 Monate	7 Freizeitsportler	19.2 % (22 cm ²) ↑	29.6 % ↑	Narici et al. 1996 (39)
21 Wochen	a) 8 untrainierte Männer	a) 5.6 % (5.5 cm ²) ↑	a) 19 % ↑	Ahtiainen et al. 2003 (4)
	b) 8 Kraftsportler	b) [- 1.8 % n.s.]	b) 7 % ↑	
24 Wochen	85 untrainierte Frauen	6.6 % (4.2 cm ²) ↑	32 % ↑	Kraemer et al. 2004 (32)
6 Wochen	17 Sportler mit Erfahrung im Krafttraining	6.6 % (6.0 cm ²) ↑	22.9 % ↑	Friedmann et al. nicht publizierte Daten
M. biceps brachii				
12 Wochen	12 Sportler mit Erfahrung im Krafttraining	12.2 % (1.5 cm) ↑	25 % ↑	Mc Call et al. 1996 (38)
24 Wochen	85 untrainierte Frauen	13 % (1.1 cm) ↑	27.5 % ↑	Kraemer et al. 2004 (32)
12 Wochen	a) 342 Frauen	a) 17.9 % (2.4 cm ²) ↑	a) 64.1 % ↑	Hubal et al. 2005 (25)
	b) 243 Männer	b) 20.4 % (4.2 cm ²) ↑	b) 39.8 % ↑	

Ausdauersportler im Spitzenbereich, deren Muskeln einen sehr hohen Anteil an langsamen Typ I-Fasern besitzen (37). Die Bedeutung des Anteils schneller Muskelfasern für die Kraftentwicklung wurde in einer Studie von Aagaard und Andersen (1) nachgewiesen: Zwischen dem prozentualen Anteil schwerer Myosinketten in Biopsien aus dem M. vastus lateralis und der konzentrischen Kraftentwicklung pro Quadricepsvolumen in isokinetischen Maximalkrafttests bestand eine signifikante lineare Korrelation ($R=0,929$).

Da die Muskelfasern ein hohes adaptives Potential besitzen, kann sich die Muskelfasertypverteilung infolge regelmäßiger Trainingsbelastung verändern (41). In mehreren Studien wurde im M. vastus lateralis nach einem mehrwöchigen Krafttraining eine Vergrößerung des Anteils Typ IIA-Fasern bei gleichzeitiger Abnahme des Anteils Typ IIX-Fasern nachgewiesen (3, 5, 14, 15, 23, 34, 44, 46, 47). Offenbar kam es hier zu einer Transformation von Typ IIX- in Typ IIA-Fasern. Eine Transformation von langsamen in schnelle Muskelfasern ist schwerer zu erreichen. Lediglich in zwei Untersuchungen zu den Effekten eines Oberkörperkrafttrainings fanden sich Hinweise auf eine solche Transformation: In der Studie von Kadi et al. (27) nahm der prozentuale Anteil an MHC IIA im M. trapezius von untrainierten Frauen nach einem Maximalkrafttraining auf Kosten von MHC IIB(x) und MHC I zu. Liu et al. (34) beschrieben nach Kombination eines Maximalkrafttrainings mit einem niedrig intensiven, mit hoher Bewegungsgeschwindigkeit ausgeführten konzentrischen Krafttraining eine Zunahme von MHC IIA bei gleichzeitiger Abnahme von MHC I und unverändertem MHC IIX im M. triceps brachii von Sportstudenten.

Faserquerschnitt

In Querschnittsstudien zu Unterschieden im Muskelfaserquerschnitt von Kraft- und Schnellkraftsportlern im Vergleich zu nicht Sport treibenden Normalpersonen oder zu Ausdauersportlern wird generell ein signifikant größerer Querschnitt der schnellen Typ II-Fasern bei Kraft- und Schnellkraftsportlern beschrieben. Für die Typ I-Fasern hingegen sind die Untersuchungsergebnisse uneinheitlich. Es wird sowohl über größere Querschnitte auch der Typ I-Fasern als auch über fehlende Unterschiede berichtet (9, 16, 42).

Auch die Ergebnisse von Trainingsstudien sind nicht einheitlich. Nach einem mehrwöchigen konzentrisch/exzentrischen Maximalkrafttraining nahm in mehreren Studien sowohl der Querschnitt der Typ II- als auch der Typ I-Fasern signifikant zu (14, 22, 23, 38). In anderen Untersuchungen zeigte sich eine nur für die Typ II-Fasern (2, 5) eine signifikante

Querschnittszunahme oder war allenfalls tendenziell zu beobachten (39, 44).

Ein mehrwöchiges Krafttraining bewirkt nicht nur Veränderungen der Muskelfasertypverteilung und des Faserquerschnitts, sondern auch der Muskelarchitektur mit geänderten Fiederungswinkeln, die zwischen der Aponeurose und Muskelfaszikeln in Ultraschalluntersuchungen gemessen werden können. Die Fiederungswinkel sind in hypertrophierten Muskeln offenbar vergrößert und haben Einfluss auf die kontraktiven Eigenschaften eines Muskels (2, 11, 28).

Molekulare Anpassungsmechanismen

Für die Entwicklung einer Muskelhypertrophie ist eine Vermehrung der kontraktiven und nicht kontraktiven Proteine erforderlich. Durch ein Krafttraining wird sowohl die Proteinsynthese als auch der Proteinabbau beeinflusst, wobei mehr Erkenntnisse zu den Änderungen in der Proteinsynthese als im Proteinabbau vorliegen. Ca. 3 Stunden nach einer Trainingseinheit ist die Proteinsynthese gesteigert, was bis zu 48 Stunden andauern kann. Während die akute Steigerung der Proteinsynthese durch Änderungen der translationalen und posttranslationalen Regulation bedingt ist, können nach wiederholten Krafttrainingseinheiten auch erhöhte mRNA-Spiegel von myofibrillären Proteinen festgestellt werden. Diese Steigerung der Transkription erfolgt durch eine erhöhte Aktivität der vorhandenen Myonuklei und durch eine Inkorporation von Satellitenzellkernen. Sowohl bei Kraftsportlern als auch bei Probanden nach einem mehrwöchigen Krafttraining wurde eine im Vergleich zu untrainierten Kontrollpersonen größere Anzahl Myonuklei pro Faserquerschnitt gefunden (12, 18, 26).

In einigen Studien wurde eine vermehrte Expression der mRNA von MHC-Isoformen nach einem mehrwöchigen konzentrisch/exzentrischen Krafttraining beobachtet. Während Bala-gopal et al. (7) über eine vermehrte Expression von MHC I-mRNA berichten, fanden Willoughby & Rosene (47) eine signifikante Zunahme der Expression von MHC I- und MHC IIa-mRNA. Änderungen in der Genexpression und der Muskelfasertypverteilung treten wegen des im Verhältnis langsameren Umsatzes der Proteine von MHC-Isoformen nicht gleichzeitig auf. So nahm in einer Untersuchung von Andersen & Schiaffino (6) nach einem mehrwöchigen Krafttraining der Anteil der Muskelfasern zu, die ein "Mismatch" zwischen Protein- und mRNA-Expression aufwiesen, z.B. Typ IIX-Fasern, die MHC IIa-mRNA exprimierten und offenbar in Umwandlung zu Typ IIa-

Fasern begriffen waren. Eine Übersicht über Studien zu morphologischen Anpassungsreaktionen und Änderungen in der Genexpression nach einem konzentrisch/exzentrischen Maximal-krafttraining wird in Tabelle 2 gegeben.

Muskuläre Anpassungsreaktionen werden durch mechanischen Reiz und Stoffwechselreaktionen sowie durch hormonelle Veränderungen ausgelöst. Die Transduktion dieser physiologischen Stressoren in eine Translationssteigerung, eine Proliferation und/oder Differenzierung von Satellitenzellen oder in Änderungen der Transkription ist komplex und teilweise noch nicht vollständig bekannt. Eine Darstellung der bekannten Regulationsmechanismen würde den Rahmen der vorliegenden Übersichtsarbeit sprengen, weshalb an dieser Stelle auf entsprechende Reviewartikel verwiesen wird (18, 43, 45).

Tabelle 2: Übersicht über Studien zu morphologischen Anpassungsreaktionen des Skelettmuskels an konzentrisch/exzentrisches Maximal- bzw. Schnellkrafttraining bei jungen Erwachsenen.

Training	Probanden	Muskel	Fasertypverteilung		Faserquerschnitt	mRNA-Expression	Referenz
			ATPase-Färbung	SDS-Page			
19 Wo.	8/5 untrainierte Männer	Vastus lateralis	IIA↑, IIB↓, I ↔	Ila↑, Iib↓, I ↔	Typ I und II ↑	---	Hather et al. 1991/Adams et al. 1993 (22, 3)
8 Wo.	21 Männer, 14 Frauen (untrainiert)	Vastus lateralis	IIB↓, I, IIA ↔	Iib ↓, I, Iia ↔	Typ I, IIA, IIB ↔	---	Staron et al. 1994 (44)
6 Mo.	7 Freizeitsportler	Vastus lateralis	---	---	Mittlerer Querschnitt ↔	---	Narici et al. 1996 (39)
6/9 Wo.	9 (8) Freizeitsportler(innen)	Vastus lateralis	---	Ila↑, I, Iix ↔	---	---	Carroll et al. 1998 (15)
3 Mo.	9 untrainierte Männer	Vastus lateralis	IIA↑, IIB↓, I ↔	Ila↑, Iib ↔, I ↔	Typ II↑, Typ I ↔	---	Andersen et al. 2000 (5)
3 Mo.	Je 24 Freizeitsportler/inne	Vastus lateralis	IIA↑, IIX↓, I ↔	---	Typ I, IIA, IIX↑	I, Ila, Iix ↔	Hortobágyi, et al. 2000 (23)
14 Wo.	11 untrainierte Männer	Vastus lateralis	---	I u. II ↔	Typ II↑, Typ I ↔	---	Aagaard et al. 2001 (2)
12 Wo.	Je 6 untrainierte Frauen und Männer	Vastus lateralis	Hybridfasern?	Ila↑, Iib↓, I ↔	---	---	Williamson et al. 2001 (46)
12 Wo.	8 untrainierte Männer	Vastus lateralis	---	Ila u. I ↑, Iix↓	---	Ila u. I ↑, Iix↓	Willoughby et al. 2001 (47)
8 Wo.	9 untrainierte Männer	Vastus lateralis	IIAB↑, IIB↓, IIA u. I ↔	Ia↑ Iixb↓, I ↔	Typ I, IIA u. IIB↑	---	Campos et al. 2002 (14)
10 Wo.	9 untrainierte Frauen	Trapezius	---	Ila↑, I, Iib↓	---	---	Kadi et al. 1999 (27)
6 Wo.	12 trainierte Sportstudenten	Triceps brachii	---	Ila↑, Iix↓, I ↔	---	slow↑, slow, Ila u. Iix ↔	Liu et al. 2003 (34)

Desmodromisches Krafttraining

Seit einigen Jahren führen einige Spitzensportler aus Kraft- und Schnellkraftsportarten ein desmodromisches Krafttraining durch – in der Annahme, dass diese Krafttrainingsform einem konventionellen Krafttraining für die Ausbildung einer schnellkräftigen Muskulatur überlegen sei. Bei einem desmodromischen Krafttraining handelt es sich um ein computergesteuertes geführtes Maschinentraining mit einer im Vergleich zum konventionellen konzentrisch/exzentrischen Krafttraining erhöhten exzentrischen Belastung. Derzeit ist ein eingelenkiges desmodromisches Training für Knie (Extension), Ellenbogen (Flexion/Extension) und Schulter (Flexion/Extension) möglich. Für mehrgelenkige Übungen stehen eine desmodromische Beinpresse, ein Zugapparat und ein Trainingsgerät für die Rückenstrecker zur Verfügung. Im Unterschied zu einem Training an einem isokinetischen Krafttrainingsgerät verändert sich die Bewegungsgeschwindigkeit während des desmodromischen Krafttrainings. Von einem konventionellen konzentrisch/exzentrischen Krafttraining unterscheidet sich das desmodromische Krafttraining vor allem darin, dass es eine relativ gleiche Belastung während der konzentrischen und exzentrischen Muskelaktion ermöglicht. Da die maximale willkürliche Kraftentwicklung während der exzentrischen Muskelaktion größer ist als während der konzentrischen Muskelaktion (30), ist bei einem konventionellen Krafttraining – das mit gleicher absoluter Last (mit gleichem Trainingsgewicht) während beider Muskelaktionen durchgeführt wird – somit die exzentrische Belastung immer relativ geringer als die konzentrische Belastung. Bei einem desmodromischen Kraftausdauertraining ist die Last während der exzentrischen Aktion ca. 2,3-mal, bei einem Maximalkrafttraining ca. 1,9-mal höher als während der konzentrischen Belastung (19, Friedmann et al. unveröffentlichte Resultate).

Die exzentrische Belastung ist für die muskuläre Adaptation offenbar von besonderer Bedeutung. So wurde eine Zunahme des Muskelfaserquerschnitts, insbesondere der Typ IIA-Fasern, in einigen Untersuchungen nur dann beobachtet, wenn das Krafttraining neben konzentrischen auch exzentrische Muskelaktionen enthielt (22, 23). In zwei kontrollierten Studien führte ein Krafttraining mit erhöhter exzentrischer Belastung zu einer signifikant größeren Verbesserung von Kraftfähigkeiten als ein konzentrisch/exzentrisches Krafttraining mit gleicher absoluter Last für beide Muskelaktionen (13, 24). Als Ursache hierfür wurde in beiden Studien – bei fehlender Zunahme des Muskelquerschnitts (13) und typischen EMG-Veränderungen (24) – eine vermehrte Rekrutierung schneller Typ II-Fasern während eines Krafttrainings mit erhöhter exzentrischer Belastung angenommen. Muskelbiopsische Untersuchungen wurden jeweils nicht durchgeführt.

In einer Studie zu den Auswirkungen eines 4-wöchigen desmodromischen Kraftausdauertrainings bei Untrainierten

wurden in Muskelbiopsien aus dem Vastus lateralis signifikante Konzentrationsanstiege in der mRNA von MHC IIa und Laktatdehydrogenase (LDH) A (LDH-Isoenzym, das die Reaktion des Pyruvats zum Laktat katalysiert und vor allem in den schnellen Typ II-Fasern in hoher Konzentration vorhanden ist) beobachtet sowie ein tendenzieller ($p=0,056$) Konzentrationsanstieg der MHC IIx mRNA und eine tendenzielle Zunahme ($p=0,084$) des prozentualen Anteils an Typ IIA-Fasern. In der konventionell trainierenden Gruppe wurden diese Veränderungen nicht gefunden. Offenbar induziert ein desmodromisches Kraftausdauertraining bei Untrainierten eine vermehrte Expression von Genen der schnellen Muskelfasertypen und somit möglicherweise eine Transformation hinzu einem schnelleren Muskelphänotyp (19). Die Vermutung, dass eine vermehrte Rekrutierung schneller Muskelfasern hierfür verantwortlich sein könnte, wurde durch Befunde in einer Studie zu den Effekten eines desmodromischen Maximalkrafttrainings bei krafttrainierten Sportlern bestätigt. In Querschnitten von Biopsien aus dem M. Vastus lateralis wurden Änderungen im Glykogengehalt der einzelnen Muskelfasertypen nach der zweiten von insgesamt 18 Trainingseinheiten mittels der PAS-Färbung untersucht. Bei 8 von 11 Probanden der desmodromisch trainierenden Gruppe war eine Entfärbung der Typ II-Fasern gegenüber dem Ausgangswert und damit eine Abnahme des Glykogengehalts dieser schnellen Fasertypen zu beobachten, während sich bei den Probanden der konventionell trainierenden Kontrollgruppe lediglich eine leichte Entfärbung der Typ I-Fasern zeigte (8). Darüber hinaus konnten nur die desmodromisch trainierenden Probanden die anaerob laktazide Energiebereitstellung im Laufe des 6-wöchigen Trainings steigern.

Vor einem unkritischen Einsatz des desmodromischen Krafttrainings – vor allem bei Untrainierten – muss gewarnt werden. Die Erhöhung der exzentrischen Muskelbelastung bedeutet eine Vergrößerung der Gefahr einer Muskelschädigung. Das kommt beispielsweise im CK-Anstieg 24 Stunden nach der 1. Trainingseinheit zum Ausdruck. Nach dem desmodromischen Krafttrainings war die CK-Konzentration im venösen Blut um 951 ± 1918 U/l signifikant ($p < 0,01$) deutlicher angestiegen als nach konventionellem Krafttraining (136 ± 320 U/l). Trotz sorgfältiger Instruktion der Probanden und Überwachung des Trainings musste jeweils ein Proband in unseren beiden Untersuchungen die Studie wegen starker Muskelbeschwerden und eines exzessiven CK-Anstiegs (CK $> 25\,000$ U/l) abbrechen.

Vibrationstraining

Eine weitere neue Entwicklung im Krafttraining ist das Vibrationstraining. Hierbei werden während eines Krafttrainings mechanische Schwingungen auf den trainierenden Muskel appliziert, meistens indirekt, indem z. B. beim Stehen auf einer Vibrationsplatte der ganze Körper von den Schwingungen erfasst wird und damit auch die bei Kniebeugen trainierten Muskeln. Eine direkte Applikation über den Muskelbauch oder die Sehne erfolgt meistens

nur im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen. Es wurden bereits einige kontrollierte Studien zu den Effekten eines Vibrationstrainings publiziert, in denen nicht nur unterschiedliche Frequenzen und Amplituden bei den Vibrationen zu Anwendung kamen, sondern auch verschiedene Krafttrainingsmethoden und unterschiedliche Krafttests. Der Reviewartikel von Luo et al. (35) bietet eine Übersicht über diese Untersuchungen. Offenbar kann die maximale Kraftentwicklung eines Muskels gesteigert werden, wenn während einer einige Sekunden bis eine Minute dauernden Kraftübung Vibrationen mit 30 - 40 (maximal 50 Hertz) und einer Amplitude von 0,3 - 0,8 mm einwirken. Grund hierfür ist eine in EMG-Untersuchungen nachgewiesene verbesserte neuromuskuläre Aktivität, unter anderem infolge einer Hemmung der Antagonistenaktivität. Diese akuten Effekte waren bei krafttrainierten Sportlern ausgeprägter als bei Untrainierten. In einigen bisher nur mit Untrainierten durchgeführten Trainingsstudien war die Zunahme der Maximalkraft oder auch der Leistung in Sprungtests größer, wenn während des Krafttrainings zusätzlich ein Vibrationsreiz einwirkte.

Zu morphologischen Anpassungsreaktionen des menschlichen Skelettmuskels an ein Vibrationstraining sind uns keine Studien bekannt. In einer Untersuchung mit Ratten wurde eine Hypertrophie der Typ I- und Typ IIC-Fasern im Plantarmuskel gefunden, nachdem die Tiere an zwei aufeinander folgenden Tagen für jeweils 5 Stunden auf einer Vibrationsplatte exponiert worden waren. Obwohl weitere eindeutige Zeichen einer Zellschädigung fehlten, wurde dieses Ergebnis als Zellschwellung und damit als Hinweis auf eine beginnende Muskelschädigung interpretiert (40). Eine weitere mit Ratten durchgeführte Studie zeigte, dass eine Muskelatrophie infolge Muskelruhigstellung abgeschwächt werden kann, wenn der ruhiggestellte Muskel täglich einem Vibrationsreiz ausgesetzt wurde. Während der Muskelfaserquerschnitt in den unbehandelten Muskeln nach 2-wöchiger Ruhigstellung um ca. 55 % abgenommen hatte, betrug die Reduktion bei Vibrationsbehandlung lediglich ca. 28 % (17).

Zusammenfassung und Ausblick

Ein dynamisches Maximal- und Schnellkrafttraining bewirkt nach anfangs überwiegender neuronaler Adaptation charakteristische morphologische Anpassungsreaktionen des Skelettmuskels: eine Muskelhypertrophie und eine Vergrößerung des Anteils schneller Typ IIA-Fasern an der Muskelquerschnittsfläche. Bisher wurde allerdings kaum systematisch untersucht, wie sich bei unterschiedlichen Muskelgruppen Variationen von Trainingslast, Bewegungsgeschwindigkeit, Trainingsumfang und Pausendauer auf die morphologische Adaptation des Skelettmuskels auswirken (20). Da Anpassungsvorgänge offenbar vor allem in den bzw. durch die während des Trainings überwiegender rekrutierten Muskelfasern ausgelöst werden, sollten Trainingsprogramme zur Verbesserung der Maximal- und Schnellkraft auf eine Rekrutie-

rung der schnellen Typ II-Fasern (mit hoher Reizschwelle) abzielen. Bisher vorliegende Untersuchungsergebnisse sprechen dafür, dass ein desmodromisches Training und ein Vibrationstraining eine verstärkte Rekrutierung der Typ II-Fasern bewirken können. Zu beiden Krafttrainingsformen gibt es aber noch einigen Forschungsbedarf, ehe konkrete Empfehlungen für Sportler, Untrainierte und Patienten gegeben werden können.

Danksagung

Die Durchführung unserer zitierten Studien zu morphologischen Anpassungsreaktionen des Skelettmuskels an verschiedene Krafttrainingsformen wäre ohne die Mitarbeit folgender Personen nicht möglich gewesen: Judith Schönith, Dr. med. Timm Bauer und Stefan Borisch (Abteilung Innere Medizin VII: Sportmedizin, Universitätsklinikum Heidelberg); PD Dr. sc. nat. Rudolf Billeter (School of Biomedical Sciences, University of Leeds); Prof. Dr. sc. hum Ralf Kinscherf und Silke Vorwald (Abteilung Anatomie und Zellbiologie III, Universität Heidelberg), Helmut Müller (Olympiastützpunkt Rhein-Neckar); Dr. med. Marc-Andre Weber (Innovative Krebsdiagnostik und Therapie, Abteilung Radiologie); Prof. Dr. med. Götz Richter (Radiologische Klinik, Abteilung Radiodiagnostik, Universitätsklinikum Heidelberg). Unser Dank gilt auch der Firma Schnell Trainingsgeräte für die Bereitstellung der Krafttrainingsmaschinen.

Die Studien wurden gefördert durch das Bundesinstitut für Sportwissenschaft (VF 0407/01/04/98 und VF 07/05/66/2004) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (FR 1262/3-1).

Literatur

1. Aagaard P, Andersen J: Correlation between contractile strength and myosin heavy chain isoform composition in human skeletal muscle. *Med Sci Sports Exerc* 30 (1998) 1217-1222.
2. Aagaard P, Andersen JL, Poulsen PD, Leffers AM, Wagner A, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Simonsen EB: A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol* 534 (2001) 613-623.
3. Adams GR, Hather BM, Baldwin KM, Dudley GA: Skeletal muscle myosin heavy chain composition and resistance training. *J Appl Physiol* 74 (1993) 911-915.
4. Ahtiainen JP, Pakarinen A, Alen M, Kraemer WJ, Hakkinen K: Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men. *Eur J Appl Physiol* 89 (2003) 555-563.
5. Andersen JL, Aagaard P: Myosin heavy chain IIx overshoot in human skeletal muscle. *Muscle & Nerve* 23 (2000) 1095-1104.
6. Andersen JL, Schiaffino S: Mismatch between myosin heavy chain mRNA and protein distribution in human skeletal muscle fibers. *Am J Physiol* 272 (1997) C1881-C1889.
7. Balagopal P, Schimke JC, Ades P, Adey D, Nair KS: Age effect on transcript levels and synthesis rate of muscle MHC and response to resistance exercise. *Am J Physiol* 280 (2001) E203-E208.
8. Bauer T, Klute K, Kinscherf R, Vorwald S, Billeter R, Müller H, Bärtsch P, Friedmann B: Auswirkungen eines desmodromischen Maximalkrafttrain-

- nings auf den Glykogengehalt der Muskelfasern und die Laktatmobilisation. *Dtsch Z Sportmed* 56 (2005) 281.
9. Billetter R, Jostarndt-Fogen K, Günthör W, Hoppeler H: Fiber type characteristics and myosin light chain expression in a world champion shot putter. *Int J Sports Med* 24 (2002) 203-207.
 10. Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE: Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness: a review of the acute programme variables. *Sports Med* 35 (2005) 841-851.
 11. Blazevich AJ, Gill ND, Bronks R, Newton RU: Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 35 (2003) 2013-2022.
 12. Booth FW, Tseng H-M, Abe T, Flück M, Carson JA: Molecular and cellular adaptation of muscle in response to physical training. *Acta Physiol Scand* 162 (1998) 343-350.
 13. Brandenburg JP, Docherty D: The effects of accentuated eccentric loading on strength, muscle hypertrophy, and neural adaptations in trained individuals. *J Strength Cond Res* 16 (2002) 25-32.
 14. Campos GER, Luecke TJ, Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, Ragg KE, Ratamess NA, Kraemer WJ, Staron RS: Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 88 (2002) 50-60.
 15. Carroll TJ, Abernethy PJ, Logan PA, Barber M, McEniery MT: Resistance training frequency: strength and myosin heavy chain responses to two and three bouts per week. *Eur J Appl Physiol* 78 (1998) 270-275.
 16. Edström L, Ekblom B: Differences in sizes of red and white muscle fibres in vastus lateralis of musculus quadriceps femoris of normal individuals and athletes. Relation to physical performance. *Scand J clin Lab Invest* 30 (1972) 175-181.
 17. Falempin M, In-Albon SF: Influence of brief daily tendon vibration on rat soleus muscle in non-weight-bearing situation. *J Appl Physiol* 87 (1999) 3-9.
 18. Flück M, Hoppeler H: Molecular basis of skeletal muscle plasticity - from gene to form and function. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 146 (2003) 159-216.
 19. Friedmann B, Kinscherf R, Vorwald S, Müller H, Kucera K, Borisch S, Richter G, Bärtsch P, Billetter R: Muscular adaptations to computer-guided strength training with eccentric overload. *Acta Physiol Scand* 182 (2004) 77-88.
 20. Fry AC: The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med* 34 (2004) 663-679.
 21. Güllich A, Schmidtbleicher D: Struktur der Kraftfähigkeiten und ihrer Trainingsmethoden. *Dtsch Z Sportmed* 50 (1999) 223-234.
 22. Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA: Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta Physiol Scand* 143 (1991) 177-185.
 23. Hortobágyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J, Dohm L: Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol* 524 (2000) 293-304.
 24. Hortobágyi T, Devita P, Money J, Barrier J: Effects of standard and eccentric overload strength training in young women. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) 1206-1212.
 25. Hubal MJ, Gordish-Dressman H, Thompson PD, Price TB, Hoffman EP, Angelopoulos TJ, Gordon PM, Moyna NM, Pescatello LS, Visich PS, Zoeller RF, Seip RL, Clarkson PM: Variability in muscle size and strength gain after unilateral resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 37 (2005) 964-972.
 26. Kadi F, Charifi N, Denis C, Lexell J, Andersen JL, Schjerling P, Olsen S, Kjaer M: The behaviour of satellite cells in response to exercise: what have we learned from human studies? *Pflügers Arch* 451 (2005) 319-327.
 27. Kadi F, Thornell L-E: Training affects myosin heavy chain phenotype in the trapezius muscle of women. *Histochem Cell Biol* 112 (1999) 73-78.
 28. Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T: Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J Appl Physiol* 74 (1993) 2740-2744.
 29. Komi PV: Training of muscle strength and power: interaction of neuro-motoric, hypertrophic, and mechanical factors. *Int J Sports Med* 7 (1986) S10-S15.
 30. Komi PV, Vitasalo JT: Changes in motor unit activity and metabolism in human skeletal muscle during and after repeated eccentric and concentric contractions. *Acta Physiol Scand* 100 (1977) 246-254.
 31. Kraemer WJ, Adams K, Cafarelli E, Dudley GA, Dooly C, Feigenbaum MS, Fleck SJ, Franklin B, Fry AC, Hoffman JR, Newton RU, Potteiger J, Stone MH, Ratamess NA, Triplett-McBride T: American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 364-380.
 32. Kraemer WJ, Nindl BC, Ratamess NA, Gotshalk LA, Volek JS, Fleck SJ, Newton RU, Hakkinen K: Changes in muscle hypertrophy in women with periodized resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 36 (2004) 697-708.
 33. Kraemer WJ, Ratamess NA: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 36 (2004) 674-688.
 34. Liu Y, Schlumberger A, Wirth K, Schmidtbleicher D, Steinacker JM: Different effects on human skeletal myosin heavy chain isoform expression: strength vs. combination training. *J Appl Physiol* 94 (2003) 2282-2288.
 35. Luo J, McNamara B, Moran K: The use of vibration training to enhance muscle strength and power. *Sports Med* 35 (2005) 23-41.
 36. Mayer F, Gollhofer A, Berg A: Krafttraining mit Älteren und chronisch Kranken. *Dtsch Z Sportmed* 54 (2003) 88-94.
 37. McArdle WD, Katch FI, Katch VL: Skeletal muscle: structure and function, in: McArdle WD, Katch FI, Katch VL (Hrsg.): Exercise Physiology. Energy, nutrition and human performance. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2001, 358-382.
 38. McCall GE, Byrnes WC, Dickinson A, Pattany PM, Fleck SJ: Muscle fiber hypertrophy, hyperplasia, and capillary density in college men after resistance training. *J Appl Physiol* 81 (1996) 2004-2012.
 39. Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gavardi C, Conti M, Cerretelli P: Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Physiol Scand* 157 (1996) 175-186.
 40. Necking LE, Lundstrom R, Lundborg G, Thornell LE, Friden J: Skeletal muscle changes after short term vibration. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg* 30 (1996) 99-103.
 41. Pette D: Das adaptive Potential des Skelettmuskels. *Dtsch Z Sportmed* 50 (1999) 262-271.
 42. Shoepf TC, Stelzer JE, Garner DP, Widrick JJ: Functional adaptability of muscle fibers to long-term resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35 (2003) 944-951.
 43. Spangenburg EE, Booth FW: Molecular regulation of individual skeletal muscle fiber types. *Acta Physiol Scand* 178 (2003) 413-424.
 44. Staron RS, Karapondo DL, Kraemer WJ, Fry AC, Gordon SE, Falkel JE, Hagerman FC, Hikida RS: Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J Appl Physiol* 76 (1994) 1247-1255.
 45. Tidball JG: Mechanical signal transduction in skeletal muscle growth and adaptation. *J Appl Physiol* 98 (2005) 1900-1908.
 46. Williamson DL, Gallagher PM, Carroll CC, Raue U and Trappe SW: Reduction in hybrid single muscle fiber proportions with resistance training in humans. *J Appl Physiol* 91 (2001) 1955-1961.
 47. Willoughby D, Rosene J: Effects of oral creatine and resistance training on myosin heavy chain expression. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) 1674-1681.

Korrespondenzadresse:

PD Dr. med. Birgit Friedmann

Abteilung Innere Medizin VII: Sportmedizin

Universitätsklinikum Heidelberg

Im Neuenheimer Feld 710

69120 Heidelberg

e-Mail: birgit_friedmann@med.uni-heidelberg.de