



universität
wien

Magisterarbeit

Titel der Magisterarbeit

Krafttraining in der Schwerelosigkeit unter besonderer
Berücksichtigung der exzentrischen Bewegungsphase

Verfasser

Christian Polt

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, im Mai 2009

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 190 482 412

Studienrichtung lt. Studienblatt: Lehramtsstudium UF Bewegung und Sport / UF Physik

Betreuer: Ass. -Prof. Mag. Dr. Harald Tschan

Vorwort

Ich möchte dieses Vorwort nutzen, um einigen Personen zu danken:

An erster Stelle möchte ich Ass. -Prof. Mag. Dr. Harald Tschan danken, der mir die Bearbeitung dieses Themas ermöglichte und mich stets mit Rat und Tat unterstützte.

Mag. Dr. Roman Talla von der TU Wien danke ich für die Zusammenarbeit und Hilfe bei der Planung und Durchführung der Studie.

Ein herzlicher Dank gilt auch den Probanden, die freiwillig und unentgeltlich an der Studie teilnahmen.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Quellen erstellt und mich keiner sonstigen Hilfsmittel bedient habe.

Christian Polt

Wien, Mai 2009

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	8
1.1 Gliederung der Arbeit.....	9
2 Aufbau und Funktion der Skelettmuskulatur.....	10
2.1 Aufbau der Skelettmuskulatur.....	10
2.2 Zustandekommen der Muskelkontraktion.....	12
2.3 Muskelfasertypen	13
2.4 Neuromuskuläre Erregung	14
2.5 Kontraktionsformen der Muskulatur	14
2.6 Kraftarten	15
2.7 Steigerung der Maximalkraft durch Krafttraining	15
2.8 Steigerung des Muskelquerschnitts durch Krafttraining.....	16
3 Auswirkungen von realer und simulierter Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper.....	18
3.1 Modelle zur Simulation von Schwerelosigkeit	18
3.2 Allgemeine Physiologische Auswirkungen von Schwerelosigkeit auf den menschlichen Organismus.....	19
3.3 Auswirkungen von realer und simulierter Schwerelosigkeit auf die Skelettmuskulatur	19
3.3.1 Strukturelle Veränderungen	20
3.3.2 Funktionelle Veränderungen.....	20
3.3.3 Studien zu Veränderungen in der Skelettmuskulatur	21
3.3.3.1 STS-78 Mission des Spaceshuttles Kolumbia	21
3.3.3.2 Motomir-Experimente an Bord der Raumstation MIR.....	23
3.3.3.3 Bed-Rest-Experiment Toulouse.....	24
3.4 Methoden, um gegen die muskulären Auswirkungen von Schwerelosigkeit anzukämpfen	25
3.4.1 Trainingsmethoden.....	25
3.4.1.1 Bed-Rest-Experiment Toulouse.....	27
3.4.1.2 Trainingsversuch mit dem Dynamo- Ergometer Motomir	28
3.4.2 Krafttrainings- und Diagnosegeräte für den Einsatz im Weltraum.....	28
3.4.3 MDS (Multifunctional Dynamometer for Application in Space)	34
3.4.4 Sonstige Trainingsgeräte und Maßnahmen	36

4 Die Bedeutung der exzentrischen Bewegungsphase beim Krafttraining in Bezug auf Muskelkraft und –masse	38
4.1 Isoliert-exzentrisches versus isoliert-konzentrisches Krafttraining	38
4.1.1 Veränderungen der Muskelkraft.....	39
4.1.2 Veränderungen der Muskelmasse	40
4.2 Traditionelles Krafttraining im Vergleich zu Krafttraining mit exzentrischer Mehrbelastung.....	40
4.2.1 Studien, die herkömmliches Krafttraining mit Krafttraining mit exzentrischer Mehrbelastung vergleichen	41
4.2.1.1 Diskussion der Veränderungen der Muskelkraft	45
4.2.1.2 Diskussion der Veränderungen der Muskelmasse	46
5 Empirische Untersuchung.....	47
5.1 Fragestellung	47
5.2 Forschungshypothesen	47
5.3 Studiendesign	48
5.3.1 Probanden.....	48
5.3.2 Training	49
5.3.2.1 Trainingsübungen und Geräte.....	49
5.3.2.2 Trainingsprotokoll.....	52
5.3.2.3 Trainingsbeteiligung	52
5.3.3 Tests	53
5.3.3.1 Konzentrisches Einwiederholungsmaximum (1 RM).....	53
5.3.3.2 Isokinetische Maximalkraft	56
5.3.4 Statistik.....	58
6 Ergebnisdarstellung.....	59
6.1 Körpergewicht und Ausgangsniveau	59
6.2 Ergebnisübersicht	59
6.3 Testung des Einwiederholungsmaximums.....	60
6.3.1 Ellbogenbeuger.....	60
6.3.2 Beinpresse	61
6.4 Isokinetische Maximalkrafttests.....	62
6.4.1 Linker Arm konzentrisch 30° pro Sekunde.....	62
6.4.2 Linker Arm exzentrisch 30° pro Sekunde	63
6.4.3 Linker Arm konzentrisch 60° pro Sekunde.....	64
6.4.4 Linker Arm exzentrisch 60° pro Sekunde	65

6.4.5 Rechtes Bein konzentrisch 30° pro Sekunde	66
6.4.6 Rechtes Bein konzentrisch 60° pro Sekunde	67
7 Diskussion der Ergebnisse.....	68
7.1 Resümee	72
9 Literaturverzeichnis	73
10 Abbildungsverzeichnis.....	78
11 Tabellenverzeichnis.....	80
12 Zusammenfassung.....	81
13 Abstract.....	82

1 Einleitung

Der menschliche Organismus ist daran gewöhnt, der Erdanziehungskraft, welche sämtliche Körper in Richtung Erdmittelpunkt zieht, entgegenzuwirken. Unter speziellen Bedingungen, wie sie etwa an Bord einer Raumstation oder eines antriebslosen Raumschiffes herrschen, muss der Körper keinerlei Kräften entgegenwirken. Man spricht dann von Schwerelosigkeit (vgl. Tipler, 1994, S.78- 80). Hält dieser Zustand länger an, so kommt es zu einer Vielzahl von Anpassungsreaktionen des Herz-Kreislauf-Systems, des Nervensystems, der Knochen sowie der Muskulatur. Diese können die Gesundheit von Astronauten während und nach dem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit beeinträchtigen. Aufgrund dessen werden seit Beginn der zivilen Raumfahrt Gegenmaßnahmen zur Erhaltung der Gesundheit entwickelt und eingesetzt (Payne et al., 2007).

In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich auf muskuläre Auswirkungen der Schwerelosigkeit und Methoden zur Bekämpfung dieser Auswirkungen eingegangen. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Verlust an Muskelkraft, welcher die Bewältigung der vielfältigen Aufgaben von Astronauten im Weltraum sowie die Rehabilitation nach Rückkehr auf die Erde erschwert. Ein wichtiges Mittel zur Erhaltung der Muskelkraft ist regelmäßiges, gezieltes Krafttraining. Dieses wird größtenteils an speziellen Trainingsgeräten durchgeführt. Bis dato können diese Geräte den Abbau an Muskelkraft aber nur teilweise verhindern.

Das nächste große Ziel der Raumfahrt ist der bemannte Flug zum Mars. Ein großes Problem bei der Realisierung dieses Projektes ist die dafür nötige lange Aufenthaltsdauer in der Schwerelosigkeit. So würde der Hinflug zumindest einige Monate dauern, die gesamte Mission etwa 3 Jahre. Amerikanische Astronauten absolvieren derzeit nach der Rückkehr von Langzeitmissionen an Bord der ISS ein 45-tägiges Rehabilitationsprogramm. Dabei können sie anfangs nicht einmal alleine gehen. Dies zeigt, dass die derzeitigen Maßnahmen für eine Marsmission nicht ausreichen. Daher ist es u.a. wichtig, effektive Trainingsgeräte zu entwickeln, die den Verlust an Muskelkraft langfristig verhindern können (Payne, 2007).

Eines dieser Trainingsgeräte ist das MDS (Multifunctional Dynamometer for Application in Space). Es wird in Zusammenarbeit der Universität Wien, der TU Wien und der Russischen Akademie der Wissenschaften entwickelt und soll bei dem von der russischen Weltraumagentur Roskosmos und der ESA geplanten Experiment „Mars 500“ zum Einsatz

kommen. Dabei soll in einem nachgebauten Raumschiff in der Nähe von Moskau eine 520- bis 700-tägige Marsmission simuliert werden. Der Start ist für Oktober 2009 geplant. Seit 31. März läuft ein 105-tägiges Vorexperiment, bei dem das MDS bereits inkludiert ist (European Space Agency, 2009).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das MDS in einer vierwöchigen Trainingsstudie unter terrestrischen Bedingungen getestet und mit herkömmlichen Krafttrainingsgeräten verglichen. Dabei wurde am MDS mit exzentrischer Mehrbelastung trainiert, was bedeutet, dass das Gewicht während der „nachgebenden Muskelarbeit“ (bzw. beim Absenken der Last) größer war als bei der „überwindenden Muskelarbeit“ (siehe auch Kapitel 2.5 und Kapitel 3.4.3). Aus diesem Grund befassen sich Teile dieser Arbeit speziell mit der exzentrischen Bewegungsphase beim Krafttraining.

1.1 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit besteht aus einem Theorieteil (Kapitel 2 bis 4) und einen empirischen Teil (Kapitel 5 bis 7).

Der Theorieteil beginnt in Kapitel 2 mit allgemeinen anatomisch-physiologischen Grundlagen. In Kapitel 3 wird vor allem auf die muskulären Auswirkungen der Schwerelosigkeit sowie konkrete Gegenmaßnahmen eingegangen. Kapitel 4 widmet sich speziell der exzentrischen Bewegungsphase beim Krafttraining und deren Wirkung auf Muskelkraft und –masse.

Im empirischen Teil werden in Kapitel 5 zunächst die wissenschaftliche Fragestellung sowie Forschungshypothesen formuliert, gefolgt von einer detaillierten Beschreibung der Untersuchung. In Kapitel 6 werden die Untersuchungsergebnisse prägnant und anschaulich dargestellt während sie in Kapitel 7 ausführlich diskutiert und resümiert werden.

Auf den letzten Seiten befindet sich eine einseitige Zusammenfassung der gesamten Arbeit in deutscher und englischer Sprache.

2 Aufbau und Funktion der Skelettmuskulatur

Muskeln sind durch die Fähigkeit zur Kontraktion ausgezeichnet. Anatomisch bzw. morphologisch kann eine Unterscheidung in Herzmuskulatur, glatte Muskulatur und Skelettmuskulatur getroffen werden. Herzmuskulatur und glatte Muskulatur können im Gegensatz zur Skelettmuskulatur nicht willkürlich angesteuert werden. Während die Herzmuskulatur für die unermüdlichen Kontraktionen des Herzes sorgt findet man die glatte Muskulatur im Magen-Darm-Trakt, in der Blase, den ableitenden Harnwegen, in den Blutgefäßen und in der Lunge. Die Skelettmuskulatur, welche aufgrund ihres Aussehens unter dem Mikroskop auch quergestreifte Muskulatur genannt wird, dient sämtlichen Bewegungstätigkeiten des Menschen einschließlich Haltearbeit. Sie wird fast ausschließlich willkürlich eingesetzt (Badtke, 1999).

Da im vorliegenden Themenzusammenhang nur die Skelettmuskulatur von Bedeutung ist, wird diese nun näher beschrieben.

2.1 Aufbau der Skelettmuskulatur

Ein Skelettmuskel besteht aus Muskelsträngen, die ihrerseits aus Bündel von Muskelfasern¹ bestehen (siehe Abb. 1). Muskelfasern setzen sich wiederum aus Myofibrillen zusammen, welche tausende Eiweißfäden (Aktin- und Myosinfilamente) enthalten. Diese können sich unter Energieverbrauch zueinander verschieben und sind somit für die kontraktile Eigenschaft der Muskulatur verantwortlich.

Die kleinste kontraktile Einheit der Myofibrillen ist das Sarkomer (siehe Abb. 2). Es ist als der Bereich zwischen 2 Z-Linien (3-dimensional Z-Scheiben) definiert. Die Z-Linien befinden sich in der Mitte der Aktinfilamente. Gemeinsam mit den M- Linien, welche sich in der Mitte der Myosinfilamente befinden, dienen sie wahrscheinlich der mechanischen Querstabilisation der Filamente.

¹ Muskelfasern sind Muskelzellen und besitzen die üblichen Einrichtungen wie Zellkern, Mitochondrien und Ribosomen sowie die Fähigkeit zum Stoffwechsel.

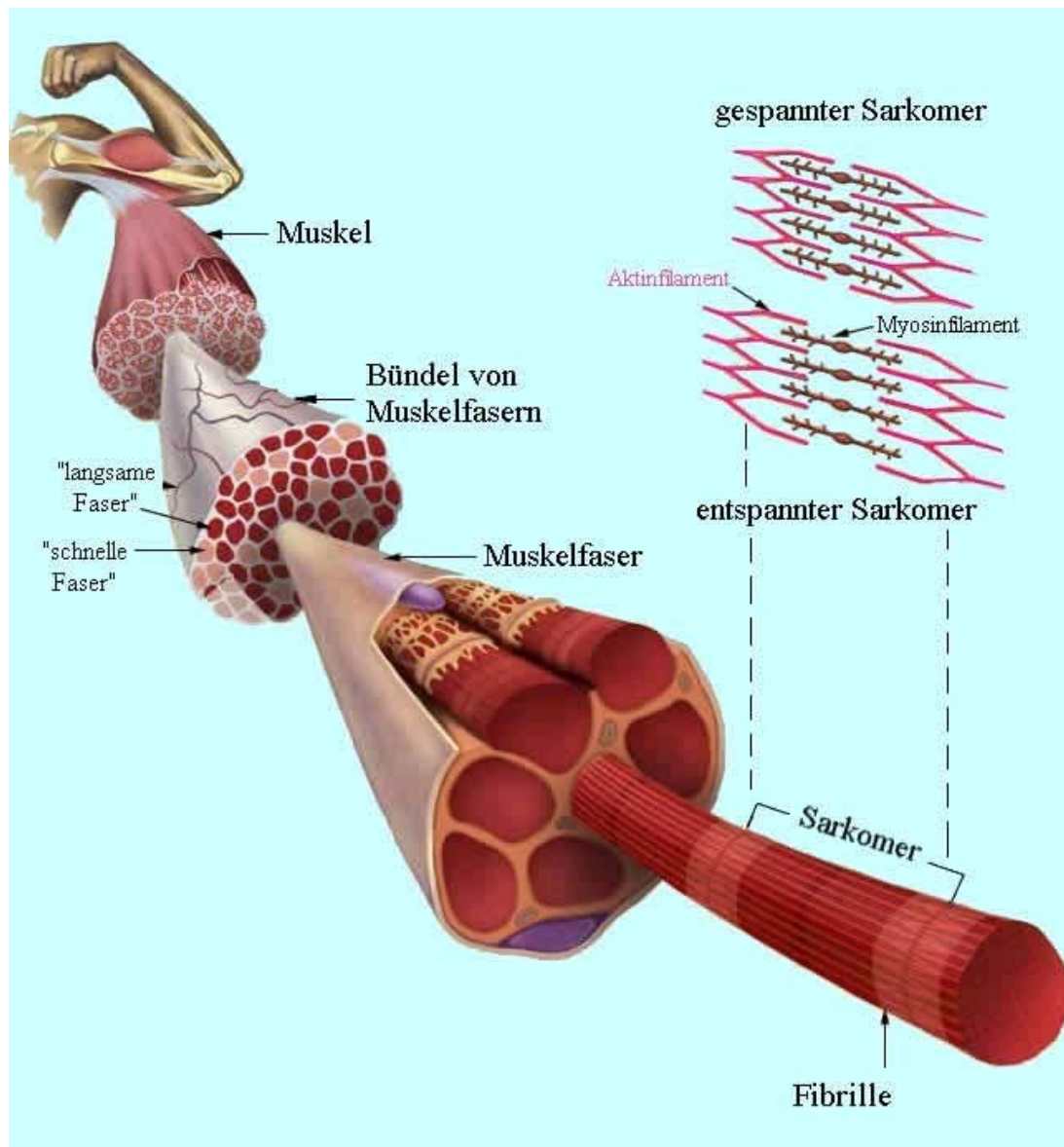


Abb. 1: Aufbau der Skelettmuskulatur (Leitner, 2006)

Aktin und Myosin ragen ineinander wobei jedes Myosinfilament von 6 Aktinfilamenten umgeben wird. Jene Bereiche, in denen sie nicht ineinander ragen werden als H- Zone bzw. I- Band bezeichnet. Der Bereich in dem sich das Myosin befindet wird A- Band genannt. Durch die dadurch entstehenden optisch helleren und dunkleren Bereiche erscheint die Muskulatur unter dem Mikroskop quergestreift (de Mareés, 2003; Badtke, 1999).

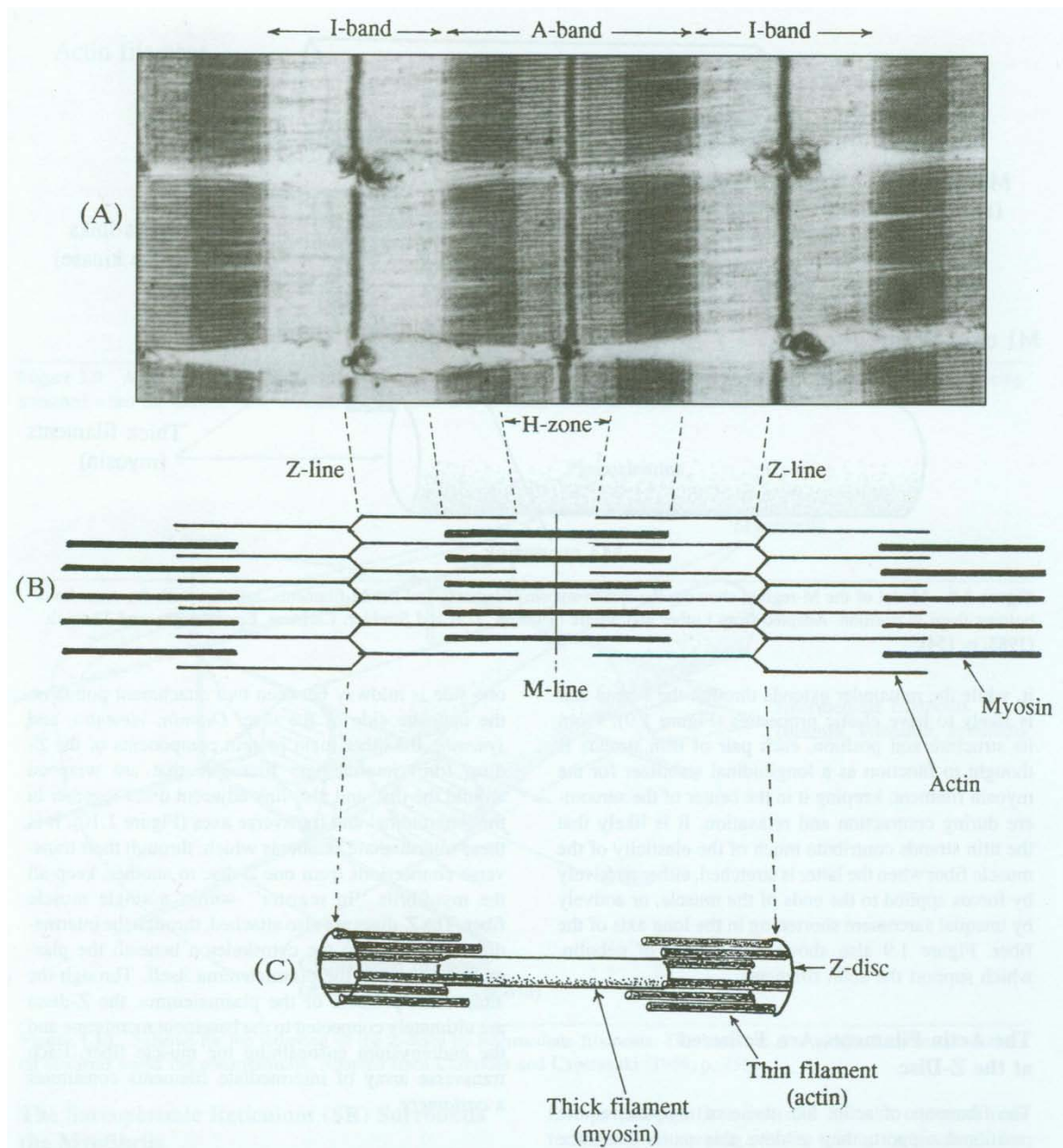


Abb. 2: (A) Ausschnitt von drei Myofibrillen unter dem Elektronenmikroskop. Der Bereich zwischen den dunklen äußeren Z-Linien wird als Sarkomer bezeichnet. (B) Schematische Darstellung der Überlappung der Aktin- und Myosinfilamente. (C) Ein Myosinfilament wird von 6 Aktinfilamenten umgeben (McComas, 1996, S. 13).

2.2 Zustandekommen der Muskelkontraktion

Laut der allgemein anerkannten Gleittheorie der Muskelkontraktion gleiten die Aktin- und Myosinfilamente bei einer Längenänderung der Muskelfaser aneinander vorbei, ohne dabei die Eigenlänge wesentlich zu verändern. Bei der Kontraktion werden die Aktinfilamente in den A-Abschnitt hineingezogen. Dadurch werden die H- und I- Abschnitte schmaler und die Sarkomere verkürzen sich.

Das Hineingleiten der Aktinfäden in die Myosinzwischenräume kann durch den Querbrückenzyklus erklärt werden. Die Myosinfilamente besitzen bewegliche Köpfe, die an den Aktinfilamenten abwechselnd andocken und sich wieder ablösen. Im gelösten Zustand werden die Myosinköpfe durch Spaltung von ATP vorgespannt, ähnlich dem Spannen einer Feder. Nach dem Andocken löst sich die Spannung und die Aktinfilamente werden ruderschlagartig bewegt. Ausgelöst wird dieser Mechanismus durch die elektrische Erregung der Muskelfasern (de Mareés, 2003).

2.3 Muskelfasertypen

Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Struktur der Myosinmoleküle innerhalb einer Muskelfaser kann zwischen verschiedenen Muskelfasertypen unterschieden werden:

Typ I- Fasern („slow twitch fibers“) kontrahieren relativ langsam, sind dafür aber relativ ermüdungsresistent. Sie erscheinen aufgrund des hohen Myoglobingehaltes dunkelfarben, rot und sind für länger andauernde Belastungen reich mit Mitochondrien sowie Enzymen des oxidativen Stoffwechsels ausgestattet. Typ I- Fasern überwiegen in Muskeln mit vorwiegender Stützfunktion wie z.B. dem M. soleus, einem Wadenmuskel.

Typ II- Fasern („fast twitch fibers“) kontrahieren schneller als Typ I- Fasern, ermüden allerdings auch schneller. Aufgrund des geringeren Myoglobingehaltes erscheinen diese Fasern blassfarben und werden deshalb auch als „weiße“ Muskelfasern bezeichnet. Ihren Energiebedarf stellen sie überwiegend anaerob bereit und sind daher entsprechen reich an Enzymen der Glykolyse. Typ II- Fasern überwiegen in Muskeln mit primär zielmotorischen Funktionen, wie z.B. im M. triceps brachii, einem Strecker im Ellbogengelenk. Typ II- Fasern lassen sich wiederum in langsamere Typ IIa- und schnellere Typ IIb- Fasern (bzw. IIX- Fasern beim Menschen) unterscheiden.

Zwischen den 3 Hauptformen Typ I, Typ IIa und Typ IIb können durch genauere Untersuchungsmethoden noch Hybridformen identifiziert werden die in ihren Eigenschaften zwischen den Hauptformen liegen.

Die Verteilung der Muskelfasertypen ist nicht nur zwischen verschiedenen Muskeln, sondern auch von Mensch zu Mensch verschieden. Im Mittel ergeben sich laut Badtke (1999) für die Gesamtbevölkerung Verteilungen von 50 bis 60% Typ I- und 40 bis 50% Typ II- Fasern (davon wiederum 60% IIa- und 40% IIX- Fasern). Die individuelle Verteilung streut allerdings sehr stark und ist größtenteils genetisch bedingt. Laut heutiger Lehrmeinung ist eine Umwandlung von Typ I in Typ II- Fasern und umgekehrt zumindest

nach der Pubertät kaum mehr möglich. Durch gezieltes Training kann allerdings innerhalb der Typ II- Fasern eine Anpassung Richtung IIa oder IIx erfolgen. Bei erfolgreichen Sportlern überwiegen je nach Sportart die Typ I- (Ausdauersportarten) oder Typ II- Fasern (Schnellkraftsportarten) (de Mareés, 2003; Badtke, 1999).

2.4 Neuromuskuläre Erregung

Sämtliche Kontraktionen der Skelettmuskulatur werden vom Nervensystem gesteuert. Dabei werden Reize aus der Umwelt von den Sinnesorganen bzw. Sinnesrezeptoren oder Sensoren (z.B. Auge, Hautsensoren) aufgenommen und als Erregung über die afferenten Nervenbahnen zum Zentralnervensystem geleitet. Dort erfolgt die Verarbeitung und Umschaltung auf die efferenten Nervenbahnen, die die Erregung zu den entsprechenden Muskeln leiten und die Bewegung veranlassen. Es werden dabei immer mehrere Muskelfasern von einer motorischen Nervenzelle mit ihren efferenten Nervenfasern angesteuert. Diese Muskelfasern treten immer gemeinsam in Aktion und werden als motorische Einheit bezeichnet. Die Erregung der motorischen Einheiten bzw. Muskelfasern erfolgt über elektrische Aktionspotentiale, die mit einer gewissen Frequenz von den Motoneuronen ausgesandt werden. Je nach Anzahl der angesteuerten motorischen Einheiten (Rekrutierung) und der Zahl der Aktionspotentiale pro Zeiteinheit (Frequenzierung) kann die Kraftentwicklung der Muskulatur gesteuert werden (de Mareés, 2003).

2.5 Kontraktionsformen der Muskulatur

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen statischen (isometrischen) und dynamischen Kontraktionsformen. Bei statischen Kontraktionen ändert sich der Gelenkwinkel zwischen Ursprung und Ansatz nicht. Der Muskel entwickelt eine Spannung, ändert allerdings seine Länge nicht. Statische Kontraktionen findet man bei der Haltearbeit oder der Spannungsentwicklung gegen einen unüberwindbaren Widerstand. Dynamische Formen der Muskelkontraktion lassen sich wiederum in überwindende (konzentrische) und nachgebende (exzentrische) Kontraktionen unterteilen. Bei konzentrischen Kontraktionen verkürzt sich die Muskulatur. Dies kann isotonisch (gleichbleibende Muskelspannung), isokinetisch (gleichbleibende Geschwindigkeit) oder auxotonisch (Veränderbare Kraftentwicklung als auch Geschwindigkeit) erfolgen. Bei der exzentrischen Kontraktion ist die einwirkende Kraft größer als die Kontraktionskraft der Muskulatur. Dies hat zur

Folge, dass der Muskel bei gleichzeitiger Zugspannungsentwicklung gedehnt wird. Beispiel dafür ist das absetzen einer Last (Badtke, 1999).

2.6 Kraftarten

Definition der Kraft:

„Physiologisch lässt sich die Kraft definieren als die Fähigkeit des Muskels, sich zu kontrahieren und dabei Längenänderungen bzw. Zugspannungen zu entwickeln“ (Israel in Badtke, 1999, S. 386)

Die Kraft kommt in der sportlichen Praxis als Maximalkraft vor, oder sie tritt in Kombination mit der Schnelligkeit (Schnellkraft, Explosivkraft) oder mit der Ausdauer (Kraftausdauer) in Erscheinung (Badtke, 1999).

Die drei wichtigsten Kraftarten können nach Weineck (2007) folgendermaßen definiert werden:

„Die *Maximalkraft* stellt die höchstmögliche Kraft dar, die das Nerv-Muskel-System bei maximaler willkürlicher Kontraktion auszuüben vermag.“ (Weineck, 2007, S. 371)

„Die *Schnellkraft* beinhaltet die Fähigkeit des Nerv-Muskel-Systems, den Körper, Teile des Körpers (...) oder Gegenstände (...) mit maximaler Geschwindigkeit zu bewegen.“ (Weineck, 2007, S. 374)

„Die *Kraftausdauerleistungsfähigkeit* lässt sich als Ermüdungsfähigkeit gegenüber Belastungen größer 30% des individuellen isometrischen Kraftmaximums definieren.“ (Weineck, 2007, S.379)

2.7 Steigerung der Maximalkraft durch Krafttraining

Die Steigerung der Maximalkraft im Verlauf eines Trainingsprozesses ist für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung. Grundsätzlich ist die Maximalkraft laut de Mareés (2003) von folgenden Faktoren abhängig:

- Querschnitt der eingesetzten Muskelfasern
- Muskelfaserzahl
- individuelle Struktur des Muskels (z.B. gefiedert)
- intramuskuläre Koordination (innerhalb der Muskeln)
- intermuskuläre Koordination (Zusammenspiel mehrerer Muskeln)
- Muskellänge (Ruhelage oder gedehnt)

- Winkel zwischen Kraftangriffsrichtung und Knochenachse (Abhängig z.B. von der Gelenkstellung)
- Motivation

Geht man von einer relativen Konstanz der Größen „Struktur des Muskels, Muskellänge, Gelenkwinkel und Motivation“ im Verlauf eines Krafttrainings aus, so verbleiben die Vergrößerung von Querschnitt und Zahl der Muskelfasern sowie die Verbesserung der intra- und intermuskulären Koordination als potentiell kraftsteigernde Faktoren.

In den ersten 2-3 Wochen eines effektiven Krafttrainings kommt es dabei zu einer deutlichen Zunahme der Maximalkraft, ohne dass sich eine nennenswerte Querschnittszunahme der Muskelfasern zeigt. Dies ist vor allem auf ein verbessertes Zusammenspiel der beteiligten Muskeln (intermuskuläre Koordination) zurückzuführen. Auch innerhalb der Muskeln kommt es zu einer Optimierung im zeitlichen Zusammenwirken der motorischen Einheiten und einer erhöhten Aktionspotentialfrequenz der aktiven Motoneurone (verbesserte intramuskuläre Koordination). Außerdem sind biochemische Anpassungen festgestellt worden, die die Sarkomeraktivierung bzw. die Energiebereitstellung für die Brückenbildung verbessern.

Sind diese vorwiegend koordinativ bedingten Kraftsteigerungen ausgeschöpft, so kann eine weitere Erhöhung der Maximalkraft nur durch eine Vergrößerung des Muskelquerschnitts erreicht werden. Dies kann wiederum durch eine Zunahme des Querschnitts der einzelnen Muskelfasern (Faserhypertrophie), oder einer Zunahme der Zahl der Muskelfasern (Faserhyperplasie) geschehen. Während die Hypertrophie unumstritten ist wurde eine trainingsbedingte Hyperplasie der Skelettmuskulatur nur bei Tieren nachgewiesen (de Mareés, 2003).

2.8 Steigerung des Muskelquerschnitts durch Krafttraining

Grundsätzlich ist die Hypertrophie eines Muskels in erster Linie einer gesteigerten Anzahl an Myofibrillen und somit einer Querschnittszunahme der einzelnen Muskelfasern zuzuschreiben. Dabei sind Typ II- Fasern deutlich stärker betroffen als Typ I- Fasern (McComas, 1996).

Der entsprechende Reiz für eine Hypertrophie (Querschnittszunahme) des Muskels wird bei einer optimalen Wirkungskombination von mechanischer Spannungshöhe und Spannungsdauer bei seriellen Muskelkontraktionen erreicht. Meistens wird dabei dynamisches, auxotonisches Krafttraining durchgeführt mit konzentrischen und

exzentrischen Belastungsphasen. Für Anfänger haben sich nach einer Eingewöhnungsphase Lasten von 50 bis 70% des konzentrischen Einwiederholungsmaximum (1 RM) bewährt während bei Fortgeschrittenen mit 70 bis 85% des 1 RM trainiert wird. Damit können ca. 10 Wiederholungen durchgeführt werden. Als ökonomisch haben sich 1-3 Sätze erwiesen wobei in mancher Literatur bis zu 6 Sätze angegeben werden. Die Serienpausen sollten eher kurz sein (ca. 2-3 Minuten) wobei auch diesbezüglich die Angaben beträchtlich variieren (de Mareés, 2003).

Entsprechend den Kontraktionsformen der Muskulatur sind auch statische, isokinetische oder exzentrische Trainingsformen möglich. Statisches Training hat den Hauptnachteil, dass die Kraftzunahme stark vom trainierten Gelenkwinkel abhängt. Außerdem fehlt bei statischem sowie isokinetischem Training der Bezug zu den meisten sportartbezogenen Bewegungsabläufen. Ein Vorteil beider Trainingsmethoden liegt in der geringen Verletzungsgefahr, wodurch sie vor allem für die Rehabilitation geeignet sind. Auf exzentrische Krafttrainingsformen und deren Bedeutung zur Steigerung von Muskelkraft und –querschnitt wird in Kapitel 4 näher eingegangen (de Mareés, 2003).

3 Auswirkungen von realer und simulierter Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper

3.1 Modelle zur Simulation von Schwerelosigkeit

Die Möglichkeiten zur Untersuchung von physiologischen Auswirkungen der Schwerelosigkeit unter realen Bedingungen sind begrenzt. Raumfahrt-Missionen sind sehr teuer und finden nicht allzu häufig statt. Oft ist die Dauer zu kurz oder die Anzahl der Probanden zu gering. Astronauten haben außerdem ein dicht gedrängtes Programm um den wissenschaftlichen Output einer Mission zu maximieren. Aus diesen und anderen Gründen ist es schwierig, ein entsprechendes Design für Studien zu finden welches grundlegende Elemente wie Kontrollgruppen, standardisierte Nahrungsaufnahme und Betätigung etc. beinhaltet (Adams et al., 2003).

Jene Simulation, die am besten der realen Schwerelosigkeit entspricht ist der Parabelflug mit einem Flugzeug. Aufgrund der kurzen Dauer von etwa 20 Sekunden eignet sich dieser allerdings nicht, um mittel- und langfristige Effekte auf den menschlichen Körper zu untersuchen (Pletzer, 2004).

Grundsätzlich bewirkt der Aufenthalt in der Schwerelosigkeit Adaptionen, wie sie in ähnlicher Weise unter terrestrischen Bedingungen bei andauernder Inaktivität auftreten. Die naheliegendste und gängigste Methode, Schwerelosigkeit zu simulieren ist daher die Bettruhe (Bed-Rest). Dabei liegen die Probanden auf einem Bett, welches meistens ca. 6° kopfwärts geneigt ist (Head-down Bed-Rest). Dadurch soll die in der Schwerelosigkeit herrschende Verschiebung der Körperflüssigkeiten Richtung Kopf simuliert werden (Pavy-Le Traon et al., 2007).

Bei Immobilisations- und Suspensionsexperimenten werden Gliedmaßen, meistens handelt es sich dabei um die Beine, ruhiggestellt oder zumindest entlastet.

Laut Adams et. al. (2003) eignen sich Bed rest-, Immobilisations- und Suspensionsexperimente relativ gut, um vor allem muskuläre Auswirkungen der Schwerelosigkeit zu simulieren. Bed-Rest ist die umfassendere Methode, welche in begrenztem Ausmaß neben muskulären Auswirkungen auch andere physiologische Effekte simulieren kann während der Vorteil von Immobilisations- und Suspensionsexperimente in der einfacheren Durchführung liegt.

3.2 Allgemeine Physiologische Auswirkungen von Schwerelosigkeit auf den menschlichen Organismus

Die Auswirkungen von Schwerelosigkeit auf den Menschen sind vielfältig. Zu den Auswirkungen auf das kardiovaskuläre System gehören z.B. die Abnahme des Blutvolumens, des diastolischen Blutdrucks und des Herzschlagvolumens welche Folgeerscheinungen wie Schwindel, Herzrasen und Herzklopfen mit sich bringen. Bei der Rückkehr zur Erde kommt es zur sogenannten „post-flight orthostatic intolerance“ (PSOI), einer massiven Kreislaufstörung die durch eine Unterversorgung des Gehirns mit Blut begründet ist und bis zur Ohnmacht führen kann. Knochen verlieren unter der verminderten Belastung an Substanz und der Mineralhaushalt verändert sich. Neurologische und vestibuläre Störungen wie Beeinträchtigungen der Bewegungskoordination, des Gleichgewichtssinns, der Sensorik oder visuelle Störungen treten während und nach dem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit auf. Unerwünschte Effekte betreffen auch den Verdauungstrakt, das Blutbild und den Hormonhaushalt (Payne et al., 2007).

Schließlich gibt es auch eine Vielzahl von Auswirkungen auf die Muskulatur auf die im nächsten Kapitel genauer eingegangen wird.

3.3 Auswirkungen von realer und simulierter Schwerelosigkeit auf die Skelettmuskulatur

Die Skelettmuskulatur reagiert sehr rasch und stark auf reale und simulierte Schwerelosigkeit mit strukturellen und funktionellen Einbußen. Diese erschweren das Leben im Weltraum wie auch nach Rückkehr auf die Erde. Da die Erforschung dieser Anpassungsmechanismen von fundamentalem Interesse für die Raumfahrt ist, wurden diese bereits seit den Skylab-Missionen der NASA in den 1970er Jahren sowohl in realer, wie auch in simulierter Schwerelosigkeit systematisch untersucht. Dabei sollte man bei allen Untersuchungen in realer Schwerelosigkeit bedenken, dass von Beginn der bemannten Raumfahrt an körperliche Gegenmaßnahmen getroffen wurden, die das tatsächliche Ausmaß der muskulären Veränderungen entscheidend verzerren (Adams, 2003; Tschann, 1999). Simulationsexperimente wie in 3.1 beschrieben haben zwar den Vorteil, dass solche Verzerrungen bei entsprechendem Design wegfallen, dafür können sie Schwerelosigkeit natürlich nur bis zu einem gewissen Grad simulieren.

3.3.1 Strukturelle Veränderungen

Sowohl in realer, wie auch in simulierter Schwerelosigkeit kommt es zu einem substanziellen Verlust an Muskelmasse. Davon betroffen sind allerdings nicht alle Muskeln in gleichem Ausmaß. Muskeln die der Gravitation entgegen wirken sind am stärksten betroffen (Tschan, 1999; Fitts et al., 2000 und 2001; Adams et al., 2003; di Pampero et al., 2003;). Dies sind vor allem die Muskeln der Beine und in einem geringeren Ausmaß des Rückens. Laut di Pampero et al. (2003) sind die Beuger im Sprunggelenk (M. gastrocnemius und M. soleus) am stärksten betroffen, wobei der Soleus deutlich stärker atrophiert als der Gastrocnemius (Fitts et al., 2001). In weiterer Reihenfolge sind es der M. tibialis anterior, die Kniestrecker (M. quadrizeps), die Kniebeuger (Hamstrings), und die Rückenmuskeln.

Über den zeitlichen Verlauf der Atrophie kann man anhand von Langzeit-Simulationsexperimenten bis zu 120 Tage vermuten, dass sich nach ca. 270 Tagen ein konstantes Niveau von 2/3 des Ausgangswertes einstellen dürfte (di Pampero et al., 2003).

Betrachtet man die Atrophie von einzelnen Muskelfasertypen innerhalb eines Muskels, so sind bei Ratten die langsamen ST-Fasern stärker betroffen als die schnellen FT-Fasern. Bei Menschen scheinen beide Typen gleichermaßen betroffen, eventuell atrophieren sogar die FT-Fasern stärker. In den Fasern kommt es zu einem überproportionalen Verlust der kontraktilen Proteine und innerhalb dieser zu einem stärkeren Verlust von Myosin im Vergleich zu Aktin (Fitts et al., 2001).

Die Gründe für die Atrophie liegen laut Fitts et al. (2000) in erster Linie in einer reduzierten Proteinsynthese.

Eng mit der Atrophie verbunden ist das Ansteigen der Verletzungsanfälligkeit bei Belastungen nach Aufenthalt in der Schwerelosigkeit oder nach Inaktivität (di Pampero et al., 2003; Pavy-Le Traon et al., 2007).

3.3.2 Funktionelle Veränderungen

Nicht zuletzt aufgrund der umfassenden strukturellen Veränderungen der Muskulatur kommt es durch den Aufenthalt in der Schwerelosigkeit bzw. durch Inaktivität auch zu funktionellen Veränderungen. Unter funktionellen Veränderungen versteht man Veränderungen in Kraft, Kontraktionsgeschwindigkeit, Leistung und Ermüdungsverhalten (Fitts et al., 2001).

Generell zeigt sich, dass wiederum jene Muskeln, die der Gravitation entgegenwirken am stärksten betroffen sind. Maximalkraft und Leistung nehmen ab während die Kontraktionsgeschwindigkeit zumindest in den Wadenmuskeln zunimmt. Die Ursache für den Verlust an Maximalkraft kann sowohl in der Atrophie als auch dem selektiven Verlust des kontraktiven Proteins liegen (Fitts et al., 2001). Die Verluste sind dabei größer als jene der Muskelmasse, was sich in einem Absinken des Verhältnisses von Kraft zu Muskelquerschnitt zeigt. Di Pampero et al. (2003) vermutet, dass der Grund dafür in einer verminderten Effizienz der Erregungsübertragung auf den Muskel liegt.

Die Abnahme an Leistung ist vor allem bei explosiven Bewegungen besonders stark im Vergleich zum Verlust an Muskelmasse was zu einem großen Teil einer verschlechterten Bewegungskoordination zuzuschreiben ist (di Pampero et al., 2003).

Gründe für die Zunahme der Kontraktionsgeschwindigkeit sind sowohl eine höhere Kontraktionsgeschwindigkeit der bestehenden Muskelfasern, als auch eine Umwandlung der Muskelfasern in Richtung schnellerer Typen.

Bei Ratten konnte nachgewiesen werden, dass Schwerelosigkeit eine geringere Oxidation von Fetten zur Folge hat und stattdessen auf Glykogen zurückgegriffen wird, was eine höhere Ermüdungsrate zur Folge hat (Fitts et al., 2001).

3.3.3 Studien zu Veränderungen in der Skelettmuskulatur

Es sollen nun beispielhaft Studien in realer sowie in simulierter Schwerelosigkeit vorgestellt werden. Zuerst werden relativ kurzzeitige Effekte anhand von Studien im Rahmen einer 17-tägigen Raummission aufgezeigt. Danach werden Ergebnisse von Kraftmessungen während Langzeituntersuchungen an Bord der Raumstation MIR beschrieben. Schließlich sollen Erkenntnisse eines 90-tägigen Bed-Rest-Experiments die Langzeiteffekte besonders auf strukturellem Niveau verdeutlichen.

3.3.3.1 STS-78 Mission des Spaceshuttles Kolumbia

Am 20. Juni 1996 startete das Space-Shuttle Kolumbia zu einem 17-tägigen Raumflug bei dem eine Reihe von Testungen der Muskulatur von vier Astronauten unternommen wurde. Als konkrete Gegenmaßnahme gab es während der Mission Ausdauereinheiten an einem Radergometer bei einer maximalen Belastung von 85% der maximalen aeroben Leistung. Man kann davon ausgehen, dass diese Einheiten keinen allzu großen Einfluss auf strukturelle und funktionelle Veränderungen der Muskulatur hatten (Tesch et al., 2005). Als problematischer können die Testungen der Sprunggelenkmuskulatur während des

Fluges angesehen werden. Diese könnten laut Trappe et al. (2001), welche im Rahmen dieser Mission keine Veränderungen in Morphologie und Kraft der Wadenmuskulatur feststellen konnten, als effektive Gegenmaßnahmen gewirkt haben. Diese Ergebnisse sind allerdings konträr zu jenen von Narici et al. (2003) und Widrick et al. (1999, 2001).

Tesch et al. (2005) ermittelten eine Querschnittsverminderung von 8% in M. quadriceps und M. gluteus maximus. Die Hamstrings zeigten keine signifikante Atrophie. Krafttests wurden an einer Flywheel-Beinpresse durchgeführt, die es erlaubte, konzentrische, exzentrische wie auch isometrische Maximalkräfte zu messen. Es zeigte sich ein Kraftverlust von rund 10% bei allen Muskelkontraktionsformen.

Narici et al. (2003) untersuchten den M. gastrocnemius. Es zeigte sich eine Abnahme des Querschnitts (CSA) um 8%. Krafttests wurden an einem speziellen Gerät (siehe Abb. 3) mithilfe von elektrischer Stimulation vor, während und nach der Mission durchgeführt. Interessanterweise zeigte sich keine Veränderung während dem Flug, allerdings eine beachtliche Abnahme von 24% bei der Maximalkraft (peak twitch) und 21% bei der tetanischen Kraft acht Tage nach der Rückkehr. Außerdem zeigte sich, dass die Ermüdungsfähigkeit zunahm.



Abb. 3: Muskelfunktionstest am "percutaneous electrical muscle stimulator and torque-velocity dynamometer" während der STS-78 Mission (Narici et al., 2003, S277)

Widrick et al. (1999) untersuchten die Eigenschaften von Typ I- Fasern des M. soleus 45 Tage vor und 2 Stunden nach dem Raumflug mittels Biopsie. Es stellte sich heraus, dass

die Muskelfasern um 15% in der Querschnittsfläche atrophierten und die Kraft um 21% abnahm. Die Kontraktionsgeschwindigkeit nahm jedoch um 30% zu, was den Verlust an maximaler Muskelleistung reduzierte oder sogar aufhob.

Auch die Muskelfasern des M. gastrocnemius wurden von Widrick et al. (2001) getestet. Die Ergebnisse waren sehr ähnlich zu jenen des M. soleus, die Auswirkungen waren jedoch deutlich geringer.

3.3.3.2 Motomir-Experimente an Bord der Raumstation MIR

Im Zeitraum von 1991 bis 1995 wurden bei einem Kurzzeitraumflug von neun Tagen und fünf Langzeitmissionen von 127-438 Tagen an Bord der Raumstation MIR Tests der Muskelkraft der oberen und unteren Extremitäten mithilfe des Dynamo-Ergometers Motomir (für eine genaue Beschreibung siehe Kapitel 3.4.2) durchgeführt. Bei einem Raumflug von 175 Tagen wurde das Gerät auch zum Training verwendet. Insgesamt wurden dabei acht Kosmonauten (wobei ein Kosmonaut an zwei Missionen teilnahm) vor, während und nach dem Flug unter annähernd gleichen Bedingungen getestet. Die Tests beinhalteten standardisierte Programme zur Erfassung der isometrischen, dynamisch-konzentrischen und dynamisch-exzentrischen Muskelkraft der gesamten Strecker- und Beugerketten der oberen und unteren Extremitäten.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich unter Berücksichtigung der geringen Stichprobenzahl sowie der individuellen Unterschiede in den begleitenden Trainingsmaßnahmen als Längsschnittuntersuchung zusammenfassen. Die wichtigsten Erkenntnisse (siehe auch Abb. 4) sind:

- Bereits nach wenigen Tagen im Weltall kommt es zu einer drastischen Abnahme der Kraft der unteren Extremitäten. Bei den oberen Extremitäten erfolgt die Abnahme etwas verzögert.
- Nach 3-4 Wochen bildet sich bei den unteren Extremitäten ein neues Kraftniveau welches vom Ausmaß der Trainingsreize abhängt und meistens deutlich unterhalb des Ausgangsniveaus liegt. Bei den oberen Extremitäten wird dieses neue Kraftniveau später erreicht.
- Die unteren Extremitäten sind von der Kraftabnahme signifikant stärker betroffen als die oberen Extremitäten.

-Bei den unteren Extremitäten ist die Kraftabnahme bei der Streckerkette signifikant stärker ausgeprägt als bei der Beugerkette. Bei den oberen Extremitäten scheinen tendenziell die Flexoren stärker betroffen.

-Die Verminderung der Kraft ist bei allen Aktionsformen (Isometrie, Konzentrik und Exzentrik) sowie bei allen Gelenkwinkeln etwa gleich stark ausgeprägt.

-Bei langsamen Bewegungen ist die Kraftabnahme stärker als bei schnelleren Bewegungen (Tschan, 1999).

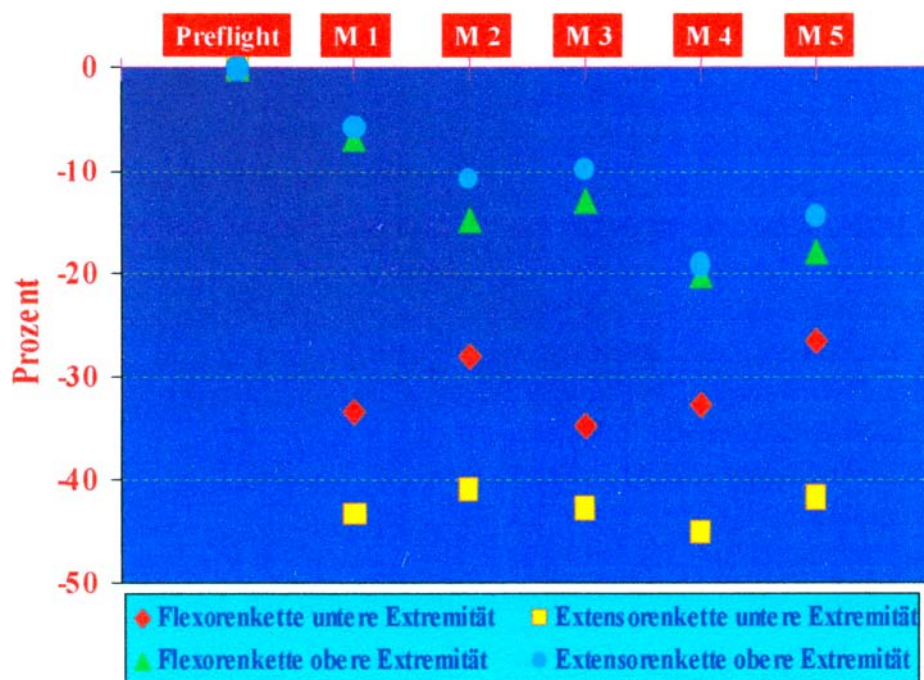


Abb. 4: „Zeitdynamik der mikrogravitationsbedingten Kraftminderung bei der unteren und oberen Extremität beim Experiment Motomir (exemplarisch dargestellt an Hand der Mittelwerte in den ersten fünf Flugmonaten bei isometrischer Arbeitsweise).“ (Tschan, 1999, S.209)

3.3.3.3 Bed-Rest-Experiment Toulouse

Dieses Experiment fand in zwei Teilen mit 14 bzw. 11 männlichen Probanden im Zeitraum von August 2001 bis Juli 2002 statt. Die Probanden wurden in zwei Gruppen (mit oder ohne Gegenmaßnahmen) unterteilt und einer 90-tägigen strikten Bettruhe mit 6° Neigung (Head-down Bed-Rest) unterzogen (Rittweger et al., 2005).

Alkner und Tesch (2004 a,b) untersuchten Kniestrecker und Plantarflexoren auf Veränderungen des Muskelvolumens und der Funktion. Bereits nach 29 Tagen nahm das Muskelvolumen bei den Kniestreckern und Plantarflexoren um 10 bzw. 16% ab. Nach 90 Tagen waren es bereits 18% bei den Kniestreckern und 29% bei den Plantarflexoren. Bei

Kraft und Leistung kam es nach 90 Tagen zu einer Reduktion von 31-60% bei den Kniestreckern und 37-56% bei den Plantarflexoren. Außerdem nahm die EMG-Aktivität um 31-38% bzw. 28-35% ab.

Rittweger et al. (2005) ermittelten eine Reduktion des Muskelquerschnitts um 25,6% im Waden, allerdings keine signifikante Reduktion im Unterarm.

Drei verschiedene Forschungskreise analysierten mittels Biopsie Muskelfasern des M. vastus lateralis und M. soleus:

Nach 84 Tagen Bettruhe berichten Rudnick et al. (2004) von einer Abnahme des Querschnitts von Typ I- Fasern von 35% und Typ II- Fasern von 20% im M. vastus lateralis. Der Querschnitt von Soleus-Fasern reduzierte sich um 42% in Typ I- Fasern und 25% in Typ II- Fasern.

Im selben Zeitraum untersuchten Trappe et al. (2004) die funktionellen Eigenschaften der Muskelfasern des M. vastus lateralis. Es zeigten sich Abnahmen der Typ I- und Typ IIa-Fasern um 15 bzw. 8% im Durchmesser, 46 bzw. 25% in der Kraft, 21 bzw. 6% in der Geschwindigkeit und 54 bzw. 24% in der Leistung. Bei Typ I-Fasern konnte außerdem eine Reduktion des Verhältnisses von Kraft zu Querschnittsfläche nachgewiesen werden. Dies deutet darauf hin, dass die Abnahme der Kraft nicht alleine durch die Atrophie der Muskelfasern zu erklären ist.

Gallagher et al. (2005) verglichen die Verteilung der Muskelfasertypen in M. vastus lateralis und M. soleus vor und nach 84-tägiger Bettruhe. Die Anzahl der Typ I- und IIa-Fasern sank im Vastus lateralis um 16 bzw. 14% während die Anzahl der Hybridformen um 30% anstieg. Beim Soleus sank die Anzahl der Typ I- Fasern um 19% während die Hybridformen um 22% zunahmen. Bei den Typ IIa- Fasern gab es keine Veränderungen.

3.4 Methoden, um gegen die muskulären Auswirkungen von Schwerelosigkeit anzukämpfen

3.4.1 Trainingsmethoden

Um den Auswirkungen der Schwerelosigkeit auf die Skelettmuskulatur entgegenwirken zu können bedarf es spezieller Trainingsmethoden. Vor allem in den frühen Jahren der Raumfahrt wurde sehr viel Wert auf Ausdauertraining auf Laufbändern und Fahrradergometern gelegt. Dieses ist zwar geeignet eine gewisse aerobe Leistungsfähigkeit zu erhalten, kann aber den Verlust an Muskelkraft und -masse nicht verhindern. Laut einer

Literaturdurchsicht von di Pampero et al. (2003) braucht es dazu vor allem Krafttraining mit hohen Lasten und Explosivkrafttraining. Eine Bedeutung könnten auch die Kraftspitzen am Ende der exzentrischen und zu Beginn der konzentrischen Bewegungsphase, wie sie beim Krafttraining mit freien Gewichten aufgrund der Massenträgheit auftreten, haben. So wurde z.B. beim Design des neuesten Trainingsgerätes der NASA, dem aRED (siehe Kapitel 3.4.2), darauf geachtet, diese Kraftspitzen mithilfe von Schwungrädern zu imitieren (Bentley et al., 2006). Eine wichtige Rolle könnten die Belastungen während der exzentrischen Bewegungsphase, welche potentiell deutlich höher sein können als jene der konzentrischen Bewegungsphase, spielen. (siehe Kapitel 4).

Es sollen nun einige Studien, in denen die Wirksamkeit spezieller Trainingsmethoden vor allem während Bed-Rest-Experimenten untersucht wurde, vorgestellt werden.

Akima et al. (2001) führten eine 20-tägige Bed-Rest-Studie mit insgesamt 15 Probanden durch, wobei 5 davon täglich dynamisches Krafttraining in einer Beinpresse durchführten. Es wurden 3 Sätze zu 10 Wiederholungen (Serienpause 1 Minute) am Vormittag und Kraftausdauertraining mit 40% der Maximalkraft am Nachmittag durchgeführt. Die Last wurde dabei im 3-Sekunden-Rhythmus (1 Sekunde während der konzentrischen Phase und 2 Sekunden während der exzentrischen Phase) bewegt. Untersucht wurde der physiologische Muskelquerschnitt (PCSA) der unteren Extremitäten. Die Maßnahmen führten zu einer signifikanten Vergrößerung des Muskelquerschnitts der Knieextensoren und einer verminderten Atrophie der Knieflexoren. Bei den Plantarflexoren zeigten sich jedoch keine Auswirkungen im Vergleich zur nicht trainierenden Gruppe.

Bei kombinierter Anwendung der Beinpresse mit dynamischen Kräftigungsübungen der Plantarflexoren während 20-tägiger Bed-Rest konnten Akima et al. (2003) schließlich auch einen Erhalt des Muskelquerschnitts und der Muskelkraft dieser Muskelgruppe nachweisen. Das Training beinhaltete jeweils 5 Sätze zu 10 Wiederholungen an 16 von 20 Tagen (wiederum im 3-Sekunden-Rhythmus mit einer Minute Serienpause). Auch die Kraft der Knieextensoren blieb laut Shinohara et al. (2003) in der Trainingsgruppe unverändert. Bei den Krafttests handelte es sich um isometrische, trainingsunspezifische Maximalkrafttests an einem Dynamometer.

Im Kontrast dazu blieb während einer 14-tägigen Bed-Rest Studie von Bamman et al. (1998) bei ähnlichem Training an der Beinpresse nur die Trainingsspezifische Maximalraft

erhalten. Die isometrische, trainingsunspezifische Testung der Knieextensoren an einem Dynamometer ergab ähnliche Abnahmen der Maximalkraft wie in der Vergleichsgruppe.

3.4.1.1 Bed-Rest-Experiment Toulouse

Bei dem bereits in Kapitel 3.3.3.3 erläuterten Bed-Rest Experiment, an dem insgesamt 25 Probanden teilnahmen, trainierten 8 Personen jeden 3. Tag mit einem Flywheel-Gerät (siehe Kapitel 3.4.2), welches vor allem das Training der Kniestrecker (Quadrizeps) mittels Beinpresse und das Training der Plantarflexoren (Trizeps surae) mittels Wadenpresse ermöglichte. Flywheel-Training zeichnet sich vor allem durch erhöhte Belastungen in der exzentrischen Bewegungsphase aus. Das Training beinhaltete 4 Sätze zu 7 maximalen Wiederholungen der Kniestrecker und 4 Sätze zu 14 maximalen Wiederholungen der Plantarflexoren.

Alkner und Tesch (2004 a, b) untersuchten Kniestrecker und Plantarflexoren auf Veränderungen in Muskelvolumen und Funktion. Nach 29 Tagen konnte Flywheeltraining Verluste im Volumen von 10% bei den Kniestreckern verhindern und Verluste von 16% bei den Plantarflexoren halbieren. Auch nach 90 Tagen konnte dieser Trend fortgesetzt werden mit gleichbleibendem Muskelvolumen bei den Kniestreckern (statt 18% Abnahme) und 15% Abnahme bei den Plantarflexoren (statt 29%). Trainingsspezifische Leistungen, Kräfte und EMG-Aktivitäten konnten in beiden Muskelgruppen zumindest erhalten werden während die statische Maximalkraft (getestet am Flywheel) nur bei der Beinpresse gleich blieb. Testungen an einem isokinetischen Dynamometer ergaben bei beiden Muskelgruppen Abnahmen der Kraft wobei lediglich bei den Kniestreckern die Kraftabnahme in der Flywheel-Gruppe signifikant weniger stark ausgeprägt war als in der Vergleichsgruppe ohne Trainingsmaßnahmen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Erhaltung der Kraft stark trainingspezifisch ist. Gründe für das schlechtere greifen der Trainingsmaßnahmen beim M. trizeps surae sehen die Autoren darin, dass dieser unter dem Einfluss der Schwerkraft wesentlich häufiger und stärker belastet wird als der Quadrizeps und dass daher häufigere und intensivere Trainingsmaßnahmen zur Erhaltung nötig wären.

Rudnick et al. (2004) fanden heraus, dass Flywheel-Training die Verluste im Muskelfaserquerschnitt des Vastus lateralis bei den Typ I- Fasern von 35% auf 15% und bei den Typ II- Fasern von 20% auf 10% reduzierte. Beim Soleus konnte die Abnahme sogar verhindert werden.

Die funktionelle Eigenschaften der Muskelfasern des Vastus lateralis wurden von Trappe et al. (2004) untersucht. Die Typ I- Fasern in der Flywheel-Trainingsgruppe zeigten keine Veränderungen in Größe und Kontraktionsgeschwindigkeit. Ein Trend zu Abnahmen in Kraft und Leistung war zwar ersichtlich, jedoch nicht signifikant. Die MHC IIa- Fasern blieben bis auf eine Erhöhung der Kontraktionsgeschwindigkeit um 13% unverändert.

Gallagher et al. (2005) ermittelten in der Bed-Rest Gruppe ohne Trainingsmaßnahmen eine Erhöhung der Anzahl der Hybridformen im Vastus lateralis und Soleus bei gleichzeitiger Abnahme der MHC I- und IIa- Fasern im Vastus lateralis und der MHC I- Fasern im Soleus. Durch Flywheel-Training konnte diese Verschiebung im Vastus lateralis abgeschwächt und im Soleus verhindert werden.

3.4.1.2 Trainingsversuch mit dem Dynamo- Ergometer Motomir

Bei einem Trainingsversuch an Bord der Raumstation MIR mit dem Dynamo- Ergometer Motomir konnten Kraftverluste der Strecker- und Beugerketten der oberen und unteren Extremitäten während einer 175-tägigen Mission verhindert werden. Die Gründe dafür sahen der Kosmonaut sowie die Wissenschaftler in den hochintensiven konzentrischen aber besonders exzentrischen Belastungen, mit hohen Kraftspitzen und hohen Kraftanstiegsgeschwindigkeiten, wie sie beim Training mit dem Dynamo- Ergometer auftraten. Der Kosmonaut trainierte dabei in den letzten 8 Wochen der Mission einmal wöchentlich intensiv mit dem Gerät (Tschan, 1999; Tschan et al., 2001).

Betrachtet man die Studien von Alkner und Tesch (2004 a, b) sowie Bamman et al. (1998), in denen die Erhaltung der Maximalkraft stark trainingsspezifisch war, so muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass das Dynamo- Ergometer sowohl als Trainings- als auch als Diagnosegerät verwendet wurde.

3.4.2 Krafttrainings- und Diagnosegeräte für den Einsatz im Weltraum

iRED (Interim Resistive Exercise Device)

Das iRED ist ein von der NASA entwickeltes Krafttrainingsgerät und bereits seit einigen Jahren an Bord der ISS im Einsatz. Die Widerstandskräfte werden durch speichenartig angeordnete Gummibänder in sogenannten flex packs erzeugt (Siehe Abb. 5). Bei Rotation der Achse gegenüber dem Gehäuse werden die Gummibänder gedehnt und erzeugen so die gewünschten Kräfte. Das iRED erlaubt eine Vielzahl von Übungen, wird aber hauptsächlich zum Training der unteren Extremitäten verwendet (Amonette et al., 2004; Schneider et al., 2003).

Amonette et al. (2004) testeten das iRED bezüglich Bodenreaktionskräften und „Range of Motion“ (ROM) bei Kniebeugen. Als Hauptprobleme sahen sie den eingeschränkten ROM und die 28% geringere Belastung während der exzentrischen Bewegungsphase gegenüber der konzentrischen.

Trotzdem ermittelten Schneider et al. (2003) vergleichbare muskuläre Veränderungen nach 16-wöchigem Training am iRED verglichen mit Training mit freien Gewichten.



Abb. 5: Training mit dem iRED (links) und flex pack des iRED (rechts) (Amonette, 2004, S.6)

aRED (Advanced Resistive Exercise Device)

Bei diesem Gerät (Siehe Abb. 6) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des iRED. Es wurde im Rahmen der STS-126 Mission, welche am 15. November 2008 startete, mit dem Spaceshuttle Endeavour zur ISS gebracht und dort installiert. Das aRED erzeugt den Trainingswiderstand durch Vakuumzylinder kombiniert mit Schwungrädern wodurch ein Training mit freien Gewichten simuliert wird. Es erlaubt einen größeren Bewegungsumfang als das iRED, vielfältigere Übungen und höhere Trainingslasten von bis zu 270 kg in der konzentrischen Bewegungsphase. Außerdem werden die Trainingsdaten mithilfe von Kraft- und Positionssensoren automatisch und simultan auf einem PC dargestellt, protokolliert und zur Bodenstation in Houston gesendet. Somit ist eine detaillierte Trainingsüberwachung und -Planung möglich (Bentley et al., 2006).

Obwohl laut Bentley et al. (2006) die exzentrische Belastung beim Training am aRED nur ca. 80 – 90% der konzentrischen Belastung beträgt, zeigt die neueste Trainingsstudie von

Nash et al. (2008), dass es keine Unterschiede gibt zwischen dem Training am aRED und dem Training mit freien Gewichten bezüglich Zuwächse in Kraft und Muskelvolumen. Somit sei es wahrscheinlich, dass mit diesem Gerät Verluste in Muskelvolumen und –kraft in der Schwerelosigkeit verhindert werden können.

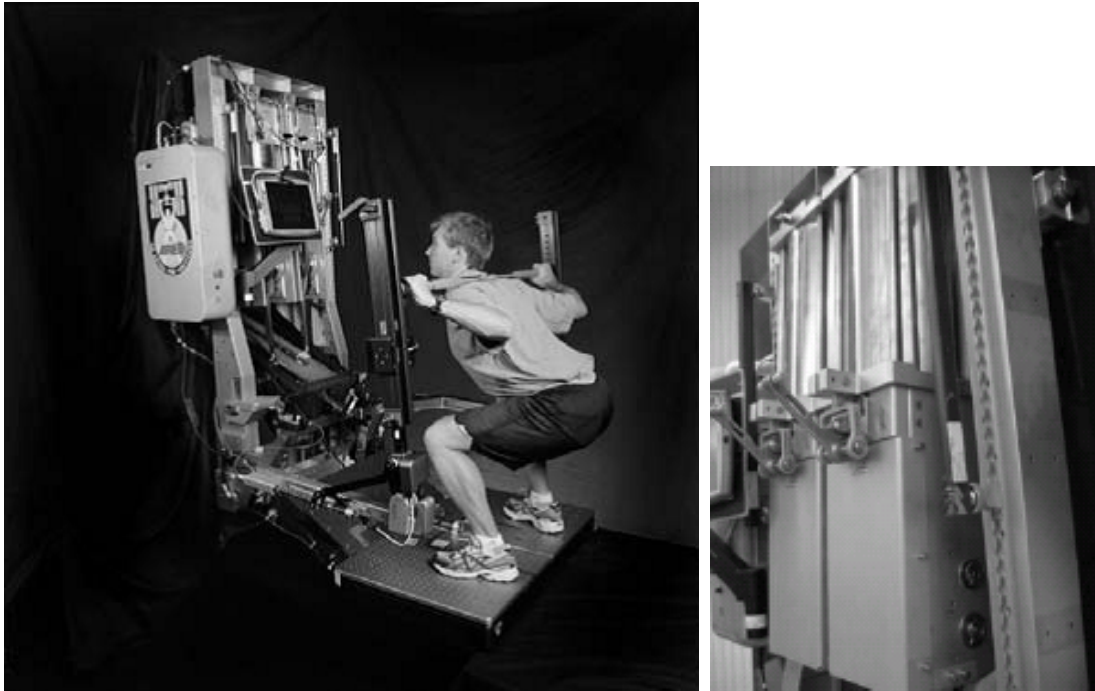


Abb. 6: Training am aRED (links) und Vakuumzylinder des aRED (rechts) (Bentley, 2006, S.1)

Flywheel Exercise Device (FWED)

Das FWED ist ein, nach dem Jojo-Prinzip arbeitendes Kraft- und Ausdauertrainingsgerät. Eine Schwungscheibe wird über eine Seilwinde in Rotation versetzt. Aufgrund des Trägheitsmoments der Scheibe ist dafür eine gewisse Kraft nötig. Dies geschieht in der konzentrischen Bewegungsphase. In der exzentrischen Bewegungsphase beginnt sich das Seil wieder aufzurollen und es ist wiederum Kraft nötig um die Scheibe abzubremsen (siehe Abb. 7). Mit dem FWED sind viele Übungen möglich, es eignet sich aber besonders zum Training der unteren Extremitäten. Die Vorteile des FWED bestehen in der Energieunabhängigkeit und den hohen Kräften während der exzentrischen Bewegungsphase (siehe Abb. 8), deren Bedeutung in Kapitel 4 näher beschrieben wird. Größter Nachteil ist die relativ hohe Verletzungsgefahr (European Space Agency, 2009b).

Die Flywheel-Technologie wurde bereits Anfang der 1990er Jahre von Berg und Tesch vorgestellt (vgl. Berg und Tesch, 1994). Seitdem wurden einige Geräte entwickelt, die

dieses Prinzip nutzen. Die Wirksamkeit von Flywheel-Training wurde oftmals untersucht. So konnte z.B. in den Studien zum Bed-Rest-Experiment in Toulouse nachgewiesen werden (siehe Kapitel 3.4.1.1), dass durch Flywheel-Training der unteren Extremitäten die muskulären Veränderungen größtenteils verhindert oder zumindest reduziert werden können (Alkner und Tesch, 2004a,b; Rudnick et al., 2004; Trappe et al., 2004; Gallagher et al., 2005; Rittweger et al., 2005).

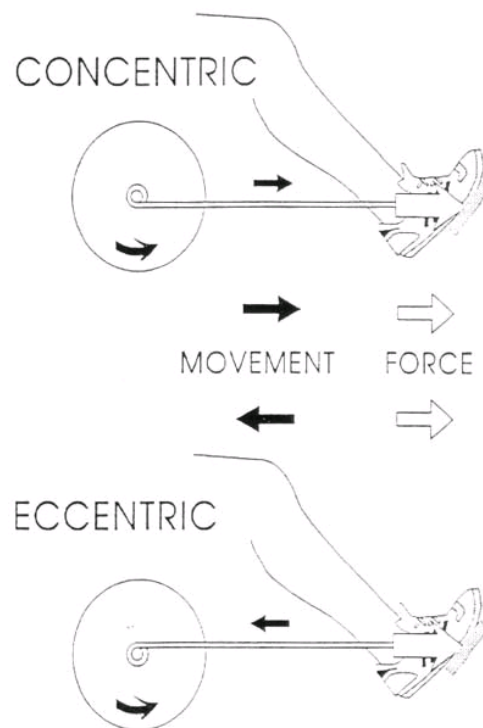


Abb. 7: Prinzip eines Flywheel Trainingsgerätes
(http://lsda.jsc.nasa.gov/lsda_data/dil_data/msci722.jpg)

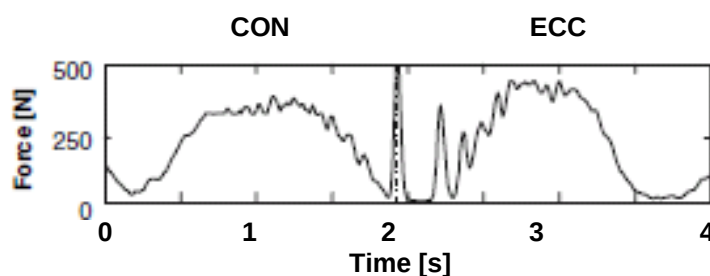


Abb. 8: Typischer Kraftverlauf an einer Beincurl-Trainingsmaschine mit Flywheel-Technologie: Die Kraftentwicklung während der exzentrischen Bewegungsphase (ECC) erfolgt über einen kürzeren Zeitraum als in der konzentrischen Phase (CON), ist dafür allerdings auch entsprechend höher. Außerdem kann man eine Kraftspitze am Umkehrpunkt zwischen konzentrischer und exzentrischer Bewegungsphase erkennen (modifiziert nach Norrbrand et al., 2008, S.279).

Penguin Suit

Der Penguin Suit ist ein spezieller, mit Gummizügen ausgestatteter Anzug der jeder Bewegung einen passiven Widerstand entgegensetzt (Tschan, 1999). Er wird bereits seit einigen Jahrzehnten vor allem von russischen Kosmonauten verwendet. In einer 2-monatigen Bed Rest Studie konnte gezeigt werden, dass das Tragen eines Penguin Suits während 10 Stunden am Tag die funktionellen Eigenschaften der ST-Fasern im Soleus erhalten konnte (Yamashita-Goto et al., 2001) und eine Abnahme des Muskelfaserquerschnitts verhindern konnte (Ohira et al. 1999).

Muscle Atrophy Research and Exercise System (MARES)

MARES (siehe Abb. 9) wurde für den Einsatz in der ISS entwickelt und dient hauptsächlich der Diagnose von muskulären Veränderungen während dem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit. Es ermöglicht eine genaue Testung isolierter Muskelgruppen mit verschiedensten Kraft-Geschwindigkeits-Verläufen. Der Widerstand wird dabei von einem starken, computergesteuerten Elektromotor geliefert. Die größten Nachteile des Gerätes sind vor allem der hohe Energieverbrauch von bis zu 1000 Watt, das hohe Gewicht von ca. 250kg und die relativ zeitintensive Bedienung (European Space Agency, 2005).

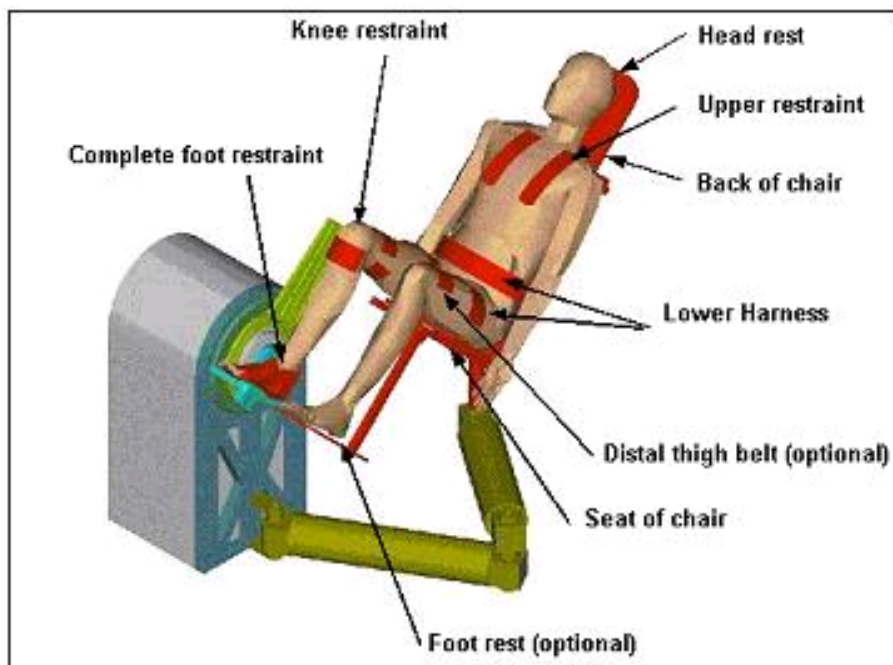


Abb. 9: Schematische Darstellung des MARES
(European Space Agency, 2005)

Dynamo-Ergometer Motomir

Das Dynamo-Ergometer Motomir ist ein Diagnose- und Trainingsgerät für die oberen und unteren Extremitäten während dem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit sowie unter terrestrischen Bedingungen. Das Gerät war in den Jahren 1991-1995 während einer Kurzzeitmission und 5 Langzeitmissionen an Bord der Raumstation MIR im Einsatz. Es wurde im Rahmen des Projektes Austromir im Jahre 1991, bei dem erstmals ein österreichischer Kosmonaut in den Weltraum zur Raumstation MIR flog, entwickelt.

Das Dynamo-Ergometer Motomir (siehe Abb. 10) ist ein elektromechanisch und translatorisch arbeitendes Gerät. Es ermöglicht die Erfassung der Muskelkraft der oberen und unteren Extremitäten während dynamisch konzentrischen, dynamisch exzentrischen sowie isometrischen Kontraktionen. Die Trainingskräfte liefern dabei zwei elektronisch gesteuerte Gleichstrommotore, welche zwei Aktoren mit konstanter Geschwindigkeit zwischen 0,15 und 0,6 m/s innerhalb einer Führung bewegen. Die Aktoren können sowohl mit den Armen, als auch mit den Beinen in einem Bewegungsausmaß von 450 mm bewegt werden. Die Beuge- und Streckbewegungen der gesamten Arm- und Bein- Muskulatur ermöglichen die Testung bzw. das Training von gesamten funktionellen Einheiten bzw. Muskelschlingen. Beim konzentrischen Modus gilt es dabei, den Aktor zu „beschleunigen“, beim exzentrischen Modus sollte der Aktor „abgebremst“ werden. Beides ist aufgrund der elektronisch gesteuerten Motorkraft nicht möglich. Über eine Analyse-Software können schließlich Kraft-Zeit- bzw. Kraft-Gelenkwinkelbeziehungen aufgezeichnet und ausgewertet werden.

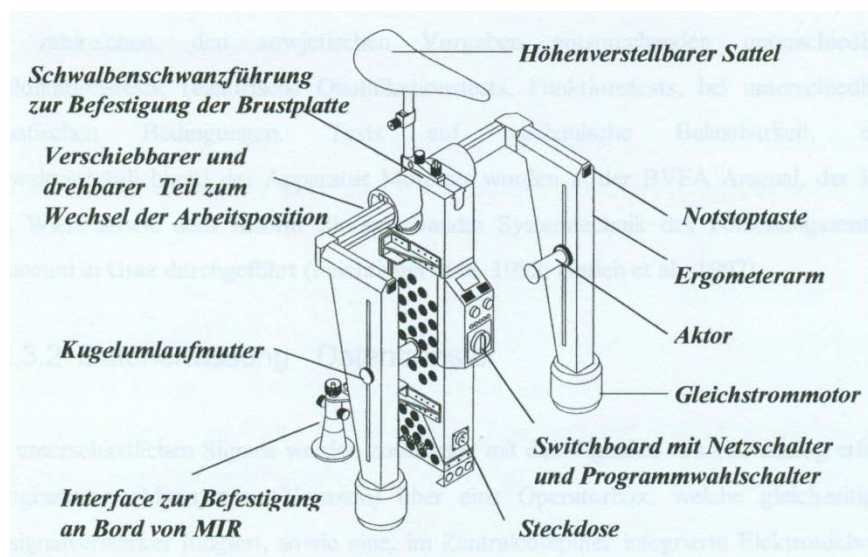


Abb. 10: Schematische Darstellung des Dynamo-Ergometers Motomir (Tschan, 1999, S.116)

Mit dem Dynamo-Ergometer Motomir konnte erstmals in der Geschichte der bemannten Raumfahrt die Diagnostik der motorischen Grundeigenschaft Kraft während eines Raumfluges durchgeführt werden (Tschan, 1999).

3.4.3 MDS (Multifunctional Dynamometer for Application in Space)

Das MDS ist ein multifunktionelles Trainings- und Diagnosegerät für Langzeitmissionen im Weltall. Es wird in Zusammenarbeit der Universität Wien (ZSU- Zentrum für Sportwissenschaft), der TU Wien (IKL- Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik) und der Russischen Akademie der Wissenschaften (IBMP- Institut für Biomedizinische Probleme) entwickelt. Das Projekt ist Teil einer bereits seit 1988 bestehender Zusammenarbeit von Österreich und Russland im Bereich biomedizinischer Weltraumforschung. Die Russische Akademie plant, das MDS beim Experiment „Mars 500“ und danach auf der ISS einzusetzen. Vom „Mars 500“- Experiment erwartet man sich mithilfe des MDS auch Fortschritte in der rehabilitativen Medizin.

Das MDS ist vor allem für ein Krafttraining von langen Muskelschlingen und großen Muskelgruppen konzipiert um ein zeitsparendes und intensives Ganzkörpertraining zu ermöglichen. Außerdem ist der Einsatz als Ruderergometer für ein umfassendes Ausdauertraining möglich. Den Widerstand liefert ein Servo-Synchron-Motor welcher die Trainingskraft über zwei Seilzüge auf eine frei bewegliche Hantelstange überträgt. Das MDS ist mit einem Linear- und einem Rotationsführungssystem ausgestattet, welche reproduzierbare Bedingungen für leistungsdagnostische Zwecke ermöglichen.

Mit dem MDS können verschiedene Trainingsmodi absolviert werden. Im Modus „Simuliertes Krafttraining“ wird das Gewicht während der gesamten Bewegung konstant gehalten. Beim „Exzentrischen Training“ besteht die Möglichkeit, mit exzentrischer Mehrbelastung oder rein exzentrisch zu trainieren. Im Modus „Isokinetische Bewegung“ wird die Geschwindigkeit konstant gehalten während bei der „Wegabhängigen Kraftregelung“ mit übungsspezifischen Kraftverläufen trainiert werden kann.

Bedient soll das Gerät über ein User-Interface werden. Dieses soll das Einstellen der Trainingsbelastung und des Trainingsmodus sowie eine interaktive Bedienungsanleitung gewährleisten. Außerdem sollen die Trainingsdaten gespeichert und spezifisch ausgewertet werden können.

Mögliche Übungen am MDS:

- Kniebeugen
- Bankdrücken
- Kreuzheben
- Lat-ziehen
- Wadenheben
- Bizeps Curls

Folgende Übungen können auch zu diagnostischen Zwecken verwendet werden:

- Rückenstrecken
- Beinpresse
- Bauchmuskel-Übungen

Technische Daten des MDS:

Gewicht:	150 kg
Dimensionen:	2000 x 970 x 940 mm
Max. mechanische Leistung:	1500 W
Max. Trainingskraft:	250 kg
Max. Trainingsgeschwindigkeit:	0,6 m/s

(Adamcik et al., 2008)

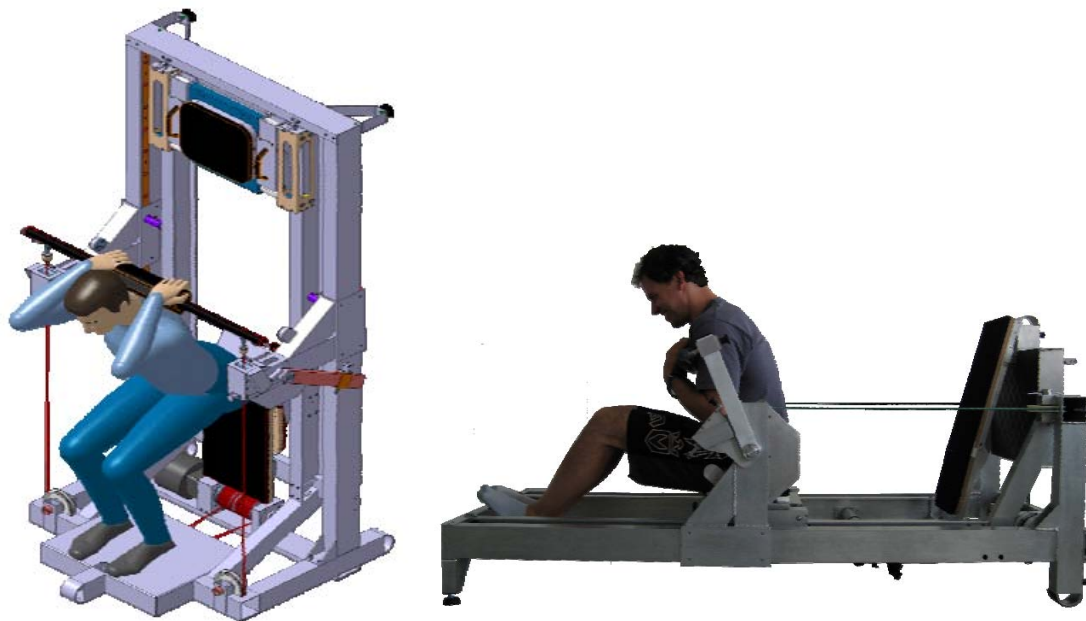


Abb. 11: Kniebeugen (links) und Bauchmuskeltraining (rechts) am MDS (Adamcik et al., 2008)

3.4.4 Sonstige Trainingsgeräte und Maßnahmen

Ausdauertrainingsgeräte

An Bord der ISS sind derzeit 3 Ausdauertrainingsgeräte im Einsatz. Es handelt sich dabei um das Laufband TVIS (Treadmill with Vibration Isolation System), den Fahrradergometer CEVIS (Cycle Ergometer with Vibration Isolation System) und den russischen Veloergometer (ebenfalls ein Fahrradergometer). Diese Geräte werden zum Herzkreislauf-Training und für diagnostische Zwecke verwendet. TVIS und CEVIS zeichnen sich dadurch aus, dass sie mechanisch von der ISS entkoppelt sind und somit die Übertragung von Vibrationen auf die Raumstation während des Trainings verhindert werden. Um das Training in der Schwerelosigkeit zu ermöglichen, müssen die Astronauten ausreichend an den Geräten fixiert werden. Beim CEVIS dient der Subjekt Load Device (SLD) zusätzlich dazu, den Trainierenden auf das Laufband zu ziehen um so die Schwerkraft zu simulieren (Norcross et al., 2007).

Simulierte Gravitation

Bereits seit 50 Jahren gibt es Ideen, Gravitation während dem Aufenthalt im Weltraum zu simulieren. Die meisten Ansätze beinhalten Zentrifugen, in denen Menschen aufgrund der Zentripetalkraft beschleunigt werden. Es besteht dabei die Möglichkeit, das Raumfahrzeug bzw. die Raumstation selbst rotieren zu lassen oder eine Zentrifuge an Bord zu verwenden (siehe Abb. 12). Künstliche Gravitation hat gegenüber allen anderen Gegenmaßnahmen den Vorteil, dass es potenziell sämtliche physiologische Auswirkungen (ausgenommen jener hervorgerufen durch die erhöhte Strahlenbelastung) gleichzeitig bekämpfen kann. Durch Simulationsexperimente auf der Erde konnte gezeigt werden, dass dies bereits bei niedrigeren Beschleunigungen als der Erdbeschleunigung der Fall ist und dass teilweiser Aufenthalt in künstlicher Gravitation ausreichen dürfte. Momentan ist es technisch und finanziell zu aufwendig, eine rotierende Raumstation zu konstruieren, besonders wenn diese manövrierfähig bleiben soll. Zentrifugen an Bord sind aufgrund der knappen Maße (die ISS hat z.B. einen Innendurchmesser von weniger als 2 Meter) ebenfalls noch nicht realisierbar. Für zukünftige Langzeitmissionen wie jene zum Mars scheinen Zentrifugen allerdings eine vielversprechende Möglichkeit zu sein, um den Auswirkungen der Schwerelosigkeit entgegenzuwirken (Pavy-Le Traon et al., 2007; Clement und Pavy-Le Traon, 2004).

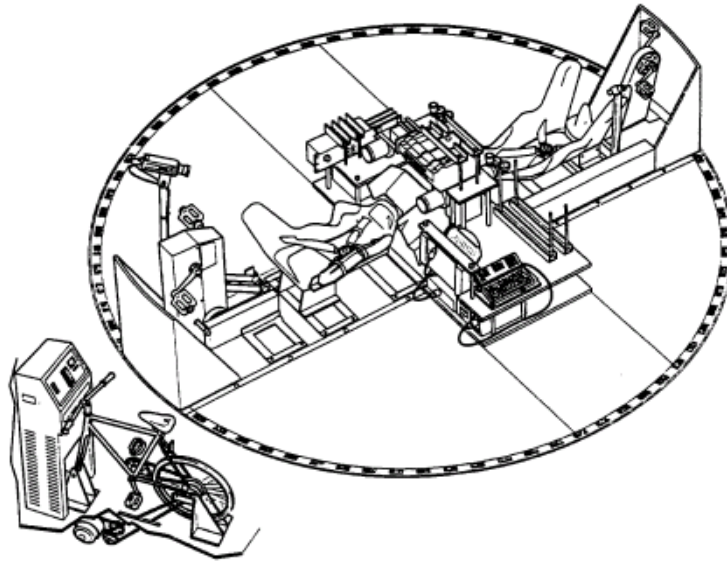


Abb. 12: Schematische Darstellung der NASA Ames Human Powered Centrifuge.
(Greenleaf et al. 1977a in Clement und Pavy-Le Traon, 2004)

Lower Body Negative Pressure (LBNP)

Wie bereits in Kapitel 3.1 angesprochen bewirkt Schwerelosigkeit eine Flüssigkeitsverschiebung von den Beinen Richtung Kopf welche eine Reihe physiologischer Folgen nach sich zieht. Bei LBNP wird der Unterkörper in einer Unterdruckkammer eingeschlossen. Das dadurch entstehende Druckgefälle wirkt der Flüssigkeitsverschiebung entgegen. LBNP wurde bereits mit Erfolg bei Raumfahrtmissionen eingesetzt und die Wirksamkeit wurde in unzähligen Studien überprüft. Besonders effektiv ist LBNP in Kombination mit Trainingsmaßnahmen der unteren Extremitäten wie z.B. Laufbandtraining, wodurch vor allem eine Stimulation des Blutkreislaufes sowie der Skelettmuskeln und -knochen gewährleistet wird (Pavy-Le Traon, 2007).

4 Die Bedeutung der exzentrischen Bewegungsphase beim Krafttraining in Bezug auf Muskelkraft und –masse

Beim herkömmlichen Krafttraining werden meist dynamische, abwechselnd konzentrische („überwindende“) und exzentrische („nachgebende“) Bewegungen mit gleichbleibender Belastung durchgeführt. Betrachtet man diese Kontraktionsformen isoliert, so wirken diese unterschiedlich auf den menschlichen Körper. Zu den speziellen neurologischen Auswirkungen exzentrischer Kontraktionen gehören u.a. eine schnellere neurologische Adaptionen in Folge von exzentrischem Krafttraining sowie reduzierte EMG-Amplituden bei gleicher Belastung im Vergleich zu konzentrischem Training (Roig et al., 2008).

Mechanisch betrachtet kann der Muskel während exzentrischer Kontraktionen höhere Kräfte entwickeln als bei konzentrischen Kontraktionen (vgl. Hollander et al., 2007). Bei gleicher Belastung ermüdet damit der Muskel langsamer, arbeitet also metabolisch effizienter bzw. der Muskel kann bei gleichem Energieaufwand länger oder mit höheren Lasten arbeiten. Da Verbesserungen der Kraft in direktem Zusammenhang stehen mit der entwickelten Kraft der Muskulatur während der Belastung und der Dauer der Belastung (bzw. der Anzahl der Wiederholungen), kann man durch die exzentrische Belastungen ein entsprechend größeres Potential zur Stimulation und Adaption der Muskulatur als durch konzentrische Belastungen erwarten (Roig et al., 2008).

Außerdem kommt es durch exzentrische Muskelkontraktionen vermehrt zur Schädigung und vorübergehenden Kraftminderung der Muskulatur sowie zu Muskelkater (Paschalis et al., 2005). Diese Auswirkungen gehen einher mit einem erhöhten Verletzungsrisiko, gelten allerdings auch als Auslöser für eine vermehrte Hypertrophie der Muskulatur (Chen et al., 2003).

4.1 Isoliert-exzentrisches versus isoliert-konzentrisches Krafttraining

Roig et al. (2008) untersuchten in einem systematischen Review mit Metaanalyse die Auswirkungen von exzentrischem Krafttraining verglichen mit konzentrischem Krafttraining auf Muskelkraft und –masse.

Für die Metaanalyse wurden 20 vergleichbare Studien untersucht in denen „isoliert-exzentrisch“ bzw. „isoliert-konzentrisch“ trainiert und getestet wurde. Das bedeutet, dass keine kombiniert konzentrisch-exzentrischen Trainings- und Testmethoden zugelassen wurden. Bei der Auswahl der Studien wurde neben allgemeinen Mindestanforderungen an

das Studiendesign darauf geachtet, dass es sich um gesunde Personen im Alter von 18 – 65 Jahren handelte die zumindest 4 Wochen mindestens zwei mal pro Woche trainierten.

Um exzentrisches und konzentrisches Training isoliert durchführen zu können wurde in 17 Studien mit einem isokinetischen Dynamometer trainiert. In 13 Studien wurde jede Wiederholung mit maximaler Anstrengung durchgeführt, während in den restlichen 7 Studien mit submaximalen Belastungen trainiert wurde. Bedingt durch die höhere realisierbare Kraft während exzentrischen Bewegungen waren die Belastungen in jenen 13 Studien und 3 weiteren Studien bei exzentrischem Training höher als bei konzentrischem Training. In den restlichen 4 Studien wurden die Belastungen als Prozentsatz des konzentrischen 1 RM und somit für beide Kontraktionsformen gleich gewählt.

Trainiert wurden in 15 Studien die Kniestrecker, in 4 Studien die Ellbogenbeuger, in zwei Studien die Rotatorenmanschette und in einer Studie die Ellbogenstrecker.

Im Schnitt wurde 3 Mal pro Woche trainiert, wobei pro Trainingseinheit insgesamt zwischen 10 und 80 Wiederholungen durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse der Metaanalyse werden in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

4.1.1 Veränderungen der Muskelkraft

Exzentrisches Training führte zu einer stärkeren Verbesserung der exzentrischen und „totalen Kraft“ als konzentrisches Training (unter der „totalen Kraft“ verstehen die Autoren die Summe von konzentrischer, exzentrischer und isometrischer Kraft). Die Verbesserungen durch exzentrisches Training waren dabei geschwindigkeitsspezifischer als jene durch konzentrisches Training.

Konzentrisches Training zeigte einen nicht signifikanten Trend, dass es die konzentrische Kraft stärker verbessert als exzentrisches Training.

Die isometrische Kraft wurde durch beide Trainingsformen gleichermaßen verbessert.

Somit sind die größeren Zuwächse der „totalen Kraft“ bei exzentrischem Training vor allem auf die größeren Zuwächse der exzentrischen Kraft zurückzuführen. Besonders groß waren die Unterschiede in jenen Studien, in denen exzentrisches und konzentrisches Training mit maximaler Anstrengung durchgeführt wurden und somit die Belastungen bei exzentrischem Training entsprechend größer waren. In jenen 4 Studien in denen die Belastungen gleich gewählt wurden schnitt exzentrisches Training immerhin gleich gut ab.

4.1.2 Veränderungen der Muskelmasse

Exzentrisches Training erwies sich als effektiver, um den Muskelumfang zu erhöhen als konzentrisches Training. Allerdings sollten Messungen des Muskelumfanges aufgrund der schlechten Reproduzierbarkeit vorsichtig betrachtet werden. Bei Muskelquerschnittmessungen gab es einen Trend, dass exzentrisches Training, wenn es mit entsprechend höheren Belastungen durchgeführt wurde, auch zu einer stärkeren Zunahme des Muskelquerschnitts führte. Unterschiedliche Resultate der Studien könnten dabei teilweise durch unterschiedliche Messmethoden zustande gekommen sein.

4.2 Traditionelles Krafttraining im Vergleich zu Krafttraining mit exzentrischer Mehrbelastung

In Kapitel 4.1 wurde beschrieben, dass exzentrisches Krafttraining bei gleichem Energieaufwand und Umfang mit höheren Lasten durchgeführt werden kann als konzentrisches Krafttraining. Nutzt man diese Tatsache aus so können durch exzentrisches Krafttraining signifikant bessere Ergebnisse bei der Steigerung von Muskelkraft und -masse erzielt werden.

Meist wird Krafttraining allerdings kombiniert konzentrisch-exzentrisch und mit gleichen Lasten in der konzentrischen und exzentrischen Bewegungsphase durchgeführt. Abgesehen von relativ kurzzeitigen Kraftschwankungen, verursacht durch die Massenträgheit, ist beim Training mit freien Gewichten die Last während der gesamten Bewegung konstant, da alle Massen von der Erde mit zeitlich konstanter Kraft angezogen werden. Auch bei den meisten Trainingsgeräten müssen Massen gegen die Erdanziehungskraft bewegt werden. Durch spezielle Exzenter, welche die Hebelverhältnisse während der Bewegung verändern, kann zwar der Kraftverlauf beeinflusst werden, die verrichtete Muskularbeit bleibt aber während der exzentrischen und konzentrischen Bewegungsphase gleich groß. Diese Tatsache bewirkt, dass die relative Intensität während der exzentrischen Bewegungsphase bei herkömmlichem Krafttraining deutlich niedriger ist als während der konzentrischen Bewegungsphase.

Aufgrund der Ergebnisse der Metaanalyse in Kapitel 4.1 und der Erkenntnis, dass Zuwächse der Muskulatur in Kraft und Masse mit Intensität und Dauer der Belastung korrelieren, liegt die Vermutung nahe, dass Krafttraining mit zusätzlichen Lasten während der exzentrischen Bewegungsphase die Steigerung von Muskelkraft und –Masse maximieren könnte.

4.2.1 Studien, die herkömmliches Krafttraining mit Krafttraining mit exzentrischer Mehrbelastung vergleichen

Es sollen nun einige Studien zu dieser Thematik näher beschrieben und anschließend diskutiert werden. Die Studien wurden durch ausführliche Literaturrecherche in Pubmed und durch Durchsicht der Referenzen der dadurch erhaltenen Artikel ermittelt. In den folgenden Ausführungen wird jenes Training, bei dem konzentrisch und exzentrisch mit gleicher Last trainiert wird, mit TRAD (für traditionelles Training) bezeichnet. Training mit einer Mehrbelastung während der exzentrischen Bewegungsphase wird mit EX⁺ bezeichnet.

1) *Brandenburg et al. (2002)* untersuchten die Auswirkungen von 9-wöchigem TRAD- und EX⁺-Krafttraining der Ellbogenflexoren und -extensoren auf das konzentrische 1 RM sowie den Muskelquerschnitt. Es nahmen 18 krafttrainingserfahrene Männer (10 TRAD, 8 EX⁺) im Studentenalter teil. In den ersten beiden Wochen wurde 2 mal wöchentlich trainiert, in den darauffolgenden 3 mal wöchentlich mit einer Mindestpause von 48 Stunden zwischen den Trainingseinheiten. Eine Trainingseinheit in der TRAD-Gruppe beinhaltete 4 Sätze zu 10 Wiederholungen mit ca. 75% des Ein- Wiederholungsmaximums (1 RM). Die EX⁺-Gruppe absolvierte 3 Sätze zu 10 Wiederholungen mit ca. 75% des 1 RM in der konzentrischen Phase und 110- 120% des 1 RM in der exzentrischen Phase. Die Pause zwischen den Sätzen betrug 3 Minuten. Das Trainingsgewicht wurde laufend angepasst, sodass nicht mehr als 10 Wiederholungen möglich waren bzw. nach 10 Wiederholungen vollkommene Erschöpfung eintrat. Jede Wiederholung wurde so ausgeführt, dass sowohl die konzentrische, als auch die exzentrische Phase 2 Sekunden dauerte. Durch die unterschiedliche Anzahl der Sätze versuchte man den Trainingsumfang abzugleichen.

Das Training sowie die Krafttests der Ellbogenflexoren wurden bilateral an einer „preacher curl“-Bank mit einer freien Langhantel durchgeführt. Training und Krafttests der Extensoren wurden ebenfalls mit einer freien Langhantel in Rückenlage auf einer Bank durchgeführt. Das Gewicht in der EX⁺-Gruppe wurde dabei laut den Autoren nach jeder konzentrischen und exzentrischen Bewegung umgehend von Trainingspartnern adjustiert.

9 Wochen TRAD-Training führten zu einer signifikanten Steigerung des 1 RM der Ellbogenflexoren (11%) und –extensoren (15%). Gleiches galt für EX⁺ mit 9% Steigerung bei den Flexoren und 24% Steigerung bei den Extensoren. EX⁺-Training konnte die

Ellbogenflexoren signifikant besser steigern als TRAD-Training. Der Muskelquerschnitt (ermittelt durch MRI) blieb in beiden Gruppen unverändert.

2) *Norrbrand et al. (2008)* untersuchten die Auswirkungen von 5-wöchigem unilateralem TRAD- und EX⁺-Krafttraining der Kniestrecker auf die isometrische Maximalkraft, den Muskelquerschnitt und die gerätspezifischen Leistungen. Es nahmen 15 Männer mit wenig bis keiner Krafttrainingserfahrung teil. Acht Männer trainierten an einer „Weight stack-Maschine“ (TRAD), welche die gleiche Belastung während der konzentrischen und exzentrischen Phase bereitstellte. Sieben weitere Männer trainierten an einem Flywheel-Gerät (EX⁺), welches exzentrische Mehrbelastung gewährleistete. Die beiden Geräte ermöglichten identische Beincurl-Bewegungsabläufe. In der ersten, dritten und fünften Woche wurde das Training 2 Mal durchgeführt, in der zweiten und vierten Woche 3 Mal. In jeder Trainingseinheit wurden 4 Sätze zu 7 Wiederholungen mit einer Pause von 2 Minuten zwischen den Sätzen absolviert. Bei der WS- Maschine wurde der Widerstand bei jedem Satz so gewählt, dass bis zur Erschöpfung gerade 7 Wiederholungen möglich waren. Die Flywheel- Maschine ermöglichte 7 maximale Kontraktionen hintereinander. Die Wiederholungen wurden im 3-Sekunden Rhythmus (jeweils 1,5 Sekunden konzentrisch und exzentrisch) durchgeführt.

Die isometrische Maximalkraft (gemessen bei 90 und 120° Kniewinkel am modifizierten Flywheel-Gerät) stieg bei der EX⁺- Gruppe zumindest bei 90° signifikant um 11,6% an. Bei der TRAD-Gruppe konnten keine signifikante Steigerung festgestellt werden. Auch der Unterschied zwischen beiden Gruppen bei 90° war signifikant. Das Muskelvolumen (gemessen durch MRI) stieg in beiden Gruppen signifikant an. Obwohl der Anstieg in der EX⁺-Gruppe mit 6,2% doppelt so hoch war wie jener der TRAD-Gruppe, war der Unterschied zwischen beiden Gruppen nicht signifikant. Bei den gerätspezifischen Leistungen konnte die TRAD-Gruppe ihr Trainingsgewicht signifikant um 48% steigern, hingegen war ein Anstieg der durchschnittlich geleisteten Arbeit pro Satz um 8,7% in der EX⁺-Gruppe nicht signifikant.

An dieser Stelle sei auf die Bed-Rest-Experimente in Kapitel 3.4.1.1 hingewiesen, bei denen ebenfalls mit Flywheel-Geräten trainiert wurde.

3) *Godard et al. (1998)* testeten die Auswirkungen von 10-wöchigem TRAD- und EX⁺-Krafttraining der Kniestrecker auf das konzentrische 1 RM und den Oberschenkel-Umfang. 28 sportlich aktive Frauen und Männer, die gegenwertig kein Krafttraining

absolvierten, wurden gleichmäßig in drei Gruppen (TRAD, EX⁺, sowie eine Kontrollgruppe) aufgeteilt. 18 Probanden absolvierten dabei 2 mal pro Woche einen Satz zu 8-12 Wiederholungen an einem isotonischen Dynamometer, wobei jede Wiederholung 6 Sekunden (3 Sekunden konzentrisch und 3 Sekunden exzentrisch) dauerte. Der Trainingswiderstand in der TRAD-Gruppe wurde zu Beginn auf 80% des 1 RM gesetzt. Die EX⁺-Gruppe trainierte ebenfalls mit einem konzentrischen Widerstand von 80% des 1 RM. Der exzentrische Widerstand wurde 40% höher gewählt. Schafften die Probanden 12 Wiederholungen, so wurde der Trainingswiderstand um ca. 5% erhöht.

Das 1 RM (gemessen am Trainingsgerät) stieg in beiden Gruppen signifikant an (95,1 % TRAD und 93,6 % EX⁺). Der Oberschenkel-Umfang nahm ebenfalls in beiden Gruppen signifikant zu (6,3 % TRAD und 5 % EX⁺). Die Unterschiede zwischen den Gruppen waren weder beim 1 RM noch beim Oberschenkel-Umfang signifikant.

4) *Yarrow et al. (2008)* untersuchten die Auswirkungen von 5-wöchigem TRAD- und EX⁺-Krafttraining auf das 1 RM. Im Rahmen der Trainingseinheiten wurden außerdem einige Hormon-Konzentrationen sowie die Laktatkonzentration gemessen. 22 untrainierte Männer im Studentenalter trainierten 3 Mal pro Woche Bankdrücken und Kniebeugen. Zu Beginn der Trainingsperiode absolvierte die TRAD-Gruppe (n=12) in jeder Trainingseinheit 4 Sätze zu 6 Wiederholungen mit 52,5% des 1 RM. Die EX⁺-Gruppe (n=10) absolvierte 3 Sätze zu 6 Wiederholungen mit 40% des 1 RM konzentrisch und 100% des 1 RM exzentrisch. Jede Wiederholung dauerte 6 Sekunden (3 Sekunden- 3 Sekunden) und die Pause zwischen den Sätzen betrug 1 Minute. Das Trainingsgewicht wurde jede Woche nach einem strikten Plan erhöht und endete schließlich bei 75% des 1 RM bei der TRAD-Gruppe sowie 49 bzw. 121% bei der EX⁺-Gruppe. Die 1 RM- Tests wurden an den Trainingsgeräten durchgeführt.

In beiden Gruppen zeigten sich Steigerungen des 1 RM ohne signifikanten Unterschied für Bankdrücken (+10,1% TRAD, +9,0% EX⁺) und Kniebeuge (+25,4% TRAD, +18,6% EX⁺). Die Hormonkonzentrationen (totales Testosteron, bioverfügbares Testosteron und Wachstumshormon) veränderten sich ebenfalls im gleichen Ausmaß während die Laktatkonzentration in der Erholungsphase 30 bis 60 Minuten nach dem Training in der EX⁺-Gruppe signifikant niedriger war.

5) *Kaminski et al. (1998)* untersuchten die Auswirkungen von 6-wöchigem TRAD- und EX⁺-Krafttraining der Hamstrings auf das 1 RM sowie die isokinetische konzentrische und

exzentrische Kraft (gemessen bei 60 und 180°/s). 27 Studenten, welche kein Krafttraining der unteren Extremitäten in den 6 Monaten vor der Studie durchgeführt hatten, wurden in drei Gruppen (TRAD, EX⁺, sowie eine Kontrollgruppe) zu jeweils 9 Leuten aufgeteilt und absolvierten 2 Mal wöchentlich 2 Sätze zu 8 Wiederholungen mit 1 Minute Pause zwischen den Sätzen. Das Gewicht wurde zu Beginn auf 80% des 1 RM in der TRAD-Gruppe und 40 bzw. 100% in der EX⁺-Gruppe gesetzt. Konnten die Probanden 2 mal 8 Wiederholungen ohne entsprechender Anstrengung (weniger als 8 auf der modifizierten Borg-Skala von 0-10) absolvieren, wurde der Wert für das 1 RM um 5,44 kg erhöht und das Trainingsgewicht neu berechnet. Die 1 RM- Tests wurde am Trainingsgerät durchgeführt während die isokinetischen Tests an einem isokinetischen Dynamometer durchgeführt wurden.

Für die Auswertung wurden jegliche Kraftwerte auf das Körpergewicht bezogen. Das 1 RM/Körpergewicht konnte in beiden Gruppen signifikant gesteigert werden (+19% TRAD, +28,8% EX⁺) mit einem signifikant größeren Anstieg in der EX⁺-Gruppe. Das maximale exzentrische Drehmoment/Körpergewicht stieg nur in der EX⁺-Gruppe signifikant an (+37,7% bei 60°/s und +22% bei 180°/s) und die EX⁺-Gruppe konnte sich bei beiden Geschwindigkeiten signifikant mehr steigern als die TRAD-Gruppe. Beim maximalen konzentrischen Drehmoment/Körpergewicht konnte kein signifikanter Anstieg verzeichnet werden wenngleich in beiden Gruppen Trends vorhanden waren.

6+7)Hortobagyi et al. (2000, 2001) untersuchten die Auswirkungen von 7-tägigem, submaximalem TRAD- und EX⁺-Krafttraining der Kniestrecker bei älteren (durchschnittlich 71,4 Jahre) und jüngeren (durchschnittlich 20,9 Jahre) Frauen auf verschiedene Kraftwerte. Es nahmen jeweils 30 Frauen teil, welche gleichmäßig in die 3 Gruppen TRAD, EX⁺ sowie eine Kontrollgruppe aufgeteilt wurden. Das Training wurde an 7 aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt und beinhaltete 5-6 Sätze zu 9-12 submaximalen (80% des 3 RM bzw. ca. 60% des 1 RM) Wiederholungen. Die EX⁺-Gruppe trainierte mit 40-50% höheren Lasten während der exzentrischen Phase. Das insgesamt absolvierte Trainingsvolumen wurde in beiden Gruppen gleich gehalten. Dabei ist allerdings zu bemerken, dass die EX⁺-Gruppe aufgrund der erhöhten exzentrischen Last mit einer höheren Intensität trainierte, was durch eine niedrigere Anzahl an Wiederholungen (ca. 9 statt 12) ausgeglichen wurde. Getestet wurden das 3-Wiederholungsmaximum (3 RM) sowie die isokinetische Maximalkraft jeweils konzentrisch und exzentrisch, sowie die isometrische Maximalkraft. Das 3-

Wiederholungsmaximum wurde an jenem Dynamometer getestet, an dem auch trainiert wurde.

Alle Kraftwerte zusammengefasst, zeigte die EX⁺-Gruppe 1,8-fach (ältere Frauen) und 2-fach (jüngere Frauen) größere Zuwächse als die TRAD-Gruppe. Die Unterschiede waren dabei bei den exzentrischen Kraftwerten am größten. Bei den älteren Frauen konnte bei den isokinetischen Maximalkrafttests neben der exzentrischen und isometrischen Kraft auch die konzentrische Maximalkraft in der EX⁺-Gruppe signifikant stärker gesteigert werden. Beim konzentrischen 3 RM konnten hingegen generell keine Unterschiede festgestellt werden. EMG-Untersuchungen ergaben einen Zusammenhang zwischen gesteigerter EMG-Aktivität und gesteigerter Kraft der Kniestrecker.

4.2.1.1 Diskussion der Veränderungen der Muskelkraft

Fasst man die Ergebnisse der Studien bezüglich Kraftzuwächse zusammen, so ermittelten 5 von 7 Studien (1,2,5,6,7) insgesamt bessere Resultate für EX⁺-Training als für TRAD-Training. In 2 Studien (3,4) erzielte EX⁺-Training immerhin gleich gute Resultate verglichen mit TRAD-Training. Die zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnisse müssen unter dem Aspekt betrachtet werden, dass es beim Design der Studien eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten und somit auch Unterschiede gab. In den Studien 1,2 und 4 wurde teilweise (1) oder durchgehend (2,4) 3 Mal pro Woche intensiv trainiert. Angesichts der höheren und ungewohnten Belastungen durch EX⁺-Training könnte dies zu unzureichenden Regenerationsphasen bzw. Übertraining geführt haben, was ein besseres Abschneiden von EX⁺-Training verhindert haben könnte. Konkrete Hinweise darauf finden sich in Studie 4. Im Widerspruch dazu stehen allerdings die Ergebnisse von Studie 3, in der nur 2 Mal wöchentlich trainiert wurde und trotzdem durch EX⁺-Training keine besseren Resultate erzielt werden konnten. Eine Alternative boten diesbezüglich die Studien 6 und 7, in denen 7 Tage hintereinander, dafür allerdings submaximal, trainiert wurde. Es ergaben sich dadurch große Steigerungen (vor allem angesichts der extrem kurzen Trainingsperiode) und signifikant bessere Ergebnisse für die EX⁺-Gruppe.

Gründe dafür, warum in Studie 4 keine besseren Resultate mit EX⁺-Training erzielt werden konnten, vermuten die Autoren vor allem darin, dass die Probanden der EX⁺-Gruppe dem vorgegebenen Trainings-Protokoll nicht folgen konnten und dadurch ein geringeres Trainingsvolumen absolvierten. Grund dafür könnten wiederum Muskelkatererscheinungen sein, über die in der EX⁺-Gruppe, jedoch nicht in der TRAD-

Gruppe geklagt wurde und welche die Trainingsleistungen negativ beeinflusst haben könnten. Da somit mit niedrigerem Trainingsvolumen die gleichen Resultate erzielt wurden, kann man EX⁺-Training als die effizientere Methode betrachten.

Bei Studie 3 ist es etwas schwieriger, potentielle Gründe dafür auszumachen, warum EX⁺-Training nicht besser abschnitt als TRAD-Training. Die Autoren vermuten, dass aufgrund dessen, dass jeweils bis zur konzentrischen Erschöpfung trainiert wurde, 40% mehr Last während der exzentrischen Phase nicht ausreichten, um zusätzlich motorische Einheiten zu rekrutieren. Außerdem ist es möglich, dass bei isometrischen oder exzentrischen Kraftwerten Unterschiede zu Gunsten der EX⁺-Gruppe festgestellt hätten werden können. Letztere Annahmen werden durch die Studien 6 und 7, in denen die Kniestrecker an einem ähnlichen Dynamometer trainiert und getestet wurden, untermauert. Dabei zeigten sämtliche Tests signifikant bessere Ergebnisse für die EX⁺-Gruppe bis auf jenen zum konzentrischen 3 RM, bei dem keine Unterschiede zwischen der EX⁺- und der TRAD-festgestellt werden konnten.

4.2.1.2 Diskussion der Veränderungen der Muskelmasse

Die Muskelmasse wurde nur in 3 Studien (1-3) gemessen. In den Studien 1 und 2 wurde der Muskelquerschnitt mittels MRI bestimmt während in Studie 3 der Muskelumfang gemessen wurde. Zuwächse wurden in beiden Gruppen in Studie 2 und 3 festgestellt, allerdings ohne signifikanten Unterschied. In Studie 2 gab es einen deutlichen Trend, dass der Muskelquerschnitt in der EX⁺-Gruppe stärker zunahm als in der TRAD-Gruppe.

Generell keine Zuwächse konnten in Studie 1 beobachtet werden. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die Probanden krafttrainingserfahren waren und somit weitere Zuwächse schwieriger zu erreichen waren als bei untrainierten Personen. Außerdem ist zu bedenken, dass die Trainingsphasen in allen Studien relativ kurz waren was einen Nachweis von Zuwächsen der Muskelmasse erschwerte.

5 Empirische Untersuchung

5.1 Fragestellung

Wie effektiv ist das Krafttraining an einem, speziell für den Weltraum konstruierten Trainingsgerät im Vergleich zum Training an herkömmlichen Krafttrainingsgeräten?

5.2 Forschungshypothesen

Auf Basis der Ergebnisse in Kapitel 4 werden folgende Forschungshypothesen formuliert:

Hypothese 1

Vierwöchiges Krafttraining führt sowohl in der TRAD- als auch in der MDS- Gruppe zu signifikanten Steigerungen des Einwiederholungsmaximums sowie der konzentrischen und exzentrischen isokinetischen Maximalkraft.

Hypothese 2

MDS- Training führt aufgrund seiner exzentrischen Mehrbelastung zu stärkeren Anstiegen der exzentrischen isokinetischen Maximalkraft. Beim Einwiederholungsmaximum sowie der konzentrischen isokinetischen Maximalkraft sind zumindest vergleichbare Steigerungen zu erwarten.

Diese Hypothesen sollen anhand der in folgenden Kapiteln beschriebenen Empirischen Untersuchung verifiziert oder widerlegt werden.

5.3 Studiendesign

Im Rahmen der vorliegenden Studie absolvierten 16 männliche Probanden im Alter von 19 – 36 Jahren ein vierwöchiges Krafttraining. Acht Probanden trainierten mit traditionellen Krafttrainingsgeräten (Gruppe TRAD) während weitere acht Probanden mit dem MDS (siehe Kapitel 3.4.3) trainierten (Gruppe MDS). Es wurde zwei Mal wöchentlich trainiert wobei in jeder Einheit Kniebeugen sowie eine Bizeps-Übung mit der Langhantel durchgeführt wurden. Vor Beginn und nach Ende der Trainingsperiode wurden verschiedenen Krafttests durchgeführt um die Veränderungen in der Kraft zu quantifizieren und um einen Vergleich der beiden Gruppen zu ermöglichen.

5.3.1 Probanden

An der Studie nahmen 16 durchwegs sportlich aktive Männer Teil. Um an der Studie teilnehmen zu können durften die Probanden in den letzten sechs Monaten vor Studienbeginn keine speziellen Kräftigungsübungen der oberen und unteren Extremitäten absolviert haben. Außerdem wurden sie dazu aufgefordert, auch während der Studie keine zusätzlichen Kräftigungsübungen der Arme und Beine durchzuführen und starke Belastungen an den Trainingstagen zu vermeiden.

Eine Übersicht der physischen Daten der Probanden ist in Tabelle 1 dargestellt. Körpergewicht und Fettanteil wurden vor und nach der Studie mit einem bioelektrischen Impedanzgerät (InBody 3.0, Biospace Europe GmbH, 63067 Offenbach am Main, Deutschland) bestimmt.

Tabelle 1: Physische Daten der Probanden vor Beginn der Trainingsphase

	Gruppe TRAD	Gruppe MDS
Anzahl	8	8
Alter [Jahre]	$24,3 \pm 3,8$	$29,0 \pm 4,5$
Größe [cm]	$182,8 \pm 7,0$	$179,9 \pm 6,2$
Gewicht [kg]	$77,8 \pm 7,5$	$73,7 \pm 8,1$
Fettanteil [%]	$12,5 \pm 4,0$	$12,2 \pm 3,4$
Body- Mass Index [kg/m^2]	$23,3 \pm 1,3$	$22,8 \pm 1,4$

5.3.2 Training

5.3.2.1 Trainingsübungen und Geräte

Das Training beinhaltete in beiden Gruppen beidbeinige Kniebeugen sowie beidarmiges Ellbogenbeuger-Training, jeweils ausgeführt mit einer Langhantel. In der TRAD-Gruppe wurde das Ellbogenbeuger-Training mit einer freien Langhantel (Langhantel-Set der Marke Energetics, siehe Abb.13) durchgeführt während die Kniebeugen an einer geführten Langhantel (Powerrack TMEK RR 360, Ennikl & Ko, 4522 Siering, Österreich; siehe Abb.14) absolviert wurden. In der MDS-Gruppe wurden die gleichen Übungen mit der über einen Seilzug befestigten, ansonsten jedoch frei beweglichen Hantelstange durchgeführt (siehe Abb. 15 und 16). Bei der Durchführung der Übungen wurde darauf geachtet, dass diese in der TRAD- und der MDS-Gruppe exakt gleich absolviert wurden. Die Kriterien zur Ausführung der Trainingsübungen waren:

Kniebeuge:

- hüft- bis schulterbreiter Stand
- Zehenspitzen zeigen nach vorne
- der Blick ist nach vorne gerichtet
- der Rücken ist gerade
- im Bewegungsablauf werden die Knie ca. 90° gebeugt und nicht vollständig gestreckt
- die Projektion der Kniescheiben auf den Boden befindet sich nicht wesentlich vor den Zehenspitzen

Ellbogenbeugen:

- hüft- bis schulterbreiter Stand
- leichte Beugung in Knie- und Hüftgelenk
- die Ellbogen sind seitlich am Rumpf angelegt und bleiben während der gesamten Bewegung fixiert
- die Bewegung erfolgt im gesamten Bewegungsumfang wobei im Ellbogengelenk nicht vollständig gestreckt wird
- keine Bewegungen im Rumpf (Bauch und Gesäß anspannen)



Abb. 13: Ellbogenbeugen in der TRAD-Gruppe



Abb. 14: Kniebeugen in der TRAD-Gruppe

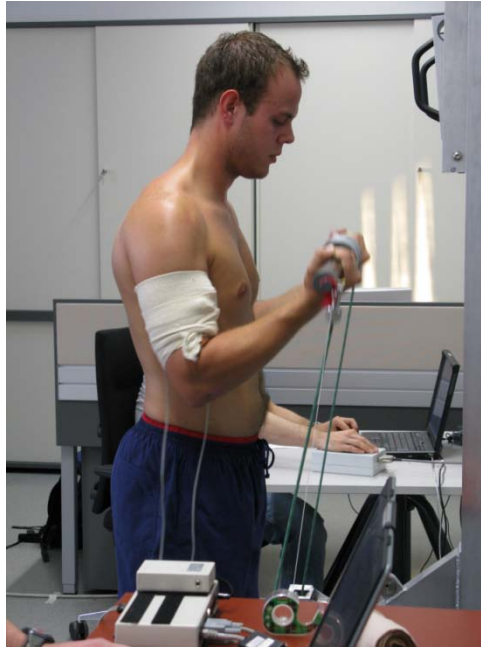


Abb. 15: Ellbogenbeugen am MDS (Die Aufnahme stammt von Voruntersuchungen in deren Rahmen eine Elektromyographie durchgeführt wurde)



Abb. 16: Kniebeugen am MDS (Die Aufnahme stammt von Voruntersuchungen in deren Rahmen eine Elektromyographie durchgeführt wurde)

5.3.2.2 Trainingsprotokoll

Das Training wurde im Zeitraum vom 13. November bis 12. Dezember 2008 abgehalten. Die insgesamt acht Trainingseinheiten wurden zwei Mal pro Woche durchgeführt wobei eine Pause von drei bzw. vier Tagen zwischen den Einheiten eingehalten wurde. Jedes Training wurde mit fünf Minuten lockerem Einlaufen begonnen. Die Trainingsübungen wurden so durchgeführt, dass sowohl die konzentrische, als auch die exzentrischen Bewegungsphase zwei Sekunden dauerte. Die exakte Einhaltung dieses Tempos wurde durch ein periodisches akustisches Signal ermöglicht. Die Pause zwischen den Trainingssätzen betrug zwei Minuten.

Das Ellbogenbeuger-Training begann mit einem Aufwärmsetz von 10 Wiederholungen mit 5 kg, gefolgt von einem weiteren Aufwärmsetz von 10 Wiederholungen mit 60% des Trainingsgewichtes. Danach wurden zwei Trainingssätze bis zur Erschöpfung absolviert. In den ersten vier Einheiten wurde die Trainingslast so gewählt, dass beim zweiten Satz gerade 15 Wiederholungen möglich waren. Ab der fünften Einheit wurde das Gewicht derart gesteigert, dass beim zweiten Satz nur noch 10 Wiederholungen möglich waren. Das Gewicht wurde dabei zwischen den einzelnen Einheiten laufend angepasst. Die MDS-Gruppe trainierte in den ersten vier Einheiten mit einer exzentrischen Last, die 140% der konzentrischen Last betrug. In den restlichen vier Einheiten wurde die exzentrische Last auf 170% der konzentrischen Last gesteigert.

Das Kniebeugen-Training begannen mit einem Aufwärmsetz von 10 Wiederholungen mit 20 kg, gefolgt von einem weiteren Aufwärmsetz von 10 Wiederholungen mit 60% des Trainingsgewichtes. Danach wurden ebenfalls zwei Trainingssätze bis zur Erschöpfung absolviert. Die Trainingslast wurde in allen acht Einheiten so gewählt, dass beim zweiten Satz gerade 15 Wiederholungen möglich waren. Die MDS Gruppe trainierte durchgängig mit einer exzentrischen Last von 140% der konzentrischen Last.

5.3.2.3 Trainingsbeteiligung

Aufgrund von körperlichen Beschwerden mussten sowohl in der MDS- als auch in der TRAD- Gruppe zwei Probanden das Kniebeugen- Training abbrechen. Sie kamen nicht in die Wertung. Das Ellbogenbeuger-Training wurde von allen Probanden absolviert. Zwei Probanden der MDS- Gruppe konnten eine gesamte Trainingseinheit nicht absolvieren, wurden jedoch trotzdem in die Auswertung aufgenommen.

5.3.3 Tests

Im Rahmen der Krafttests vor und nach der Studie wurde das bilaterale konzentrische Einwiederholungsmaximums (1 RM) an einer Beinpresse und einer Ellbogenbeuger-Maschine sowie die monolaterale konzentrische und exzentrische isokinetische Maximalkraft der Kniestrecker und Ellbogenbeuger an einem isokinetischen Dynamometer bestimmt. Aus organisatorisch Gründen fanden bei den Einstiegstests die 1 RM- Tests bereits am 3. und 4. November 2008 statt während die isokinetischen Tests unmittelbar vor Beginn der Trainingsperiode durchgeführt wurden. Die abschließenden 1 RM- Tests fanden am 16. und 17. Dezember, die isokinetischen Tests am 19. und 20. Dezember statt. Zwischen der letzten Trainingseinheit und den 1 RM- Tests sowie zwischen den 1 RM- Tests und den isokinetischen Tests hatten dabei alle Probanden mindestens drei Tage Pause. Ein Proband der MDS-Gruppe konnte nicht an den isokinetischen Tests teilnehmen.

5.3.3.1 Konzentrisches Einwiederholungsmaximum (1 RM)

Testübungen und Geräte

Zur Ermittlung des 1 RM („one repetition maximum“) der Ellbogenbeuger wurde eine kombinierte Bizeps-Trizeps-Maschine (Schnell Trainingsgeräte GesmbH, 86565 Peutenhausen, Deutschland, siehe Abb.17) mit Steckgewichten und Getriebe verwendet. Sämtliche Einstellungen der Maschine wurden beim ersten Test notiert um gleiche Bedingungen für den zweiten Test zu ermöglichen. In der Ausgangsposition für jeden Testversuch waren die Ellbogen ca. 20° gebeugt (Lastarm in der Verankerung, Siehe Abb.17). Um einen erfolgreichen Versuch zu erzielen musste eine Beugung im Ellbogengelenk von deutlich über 90° erfolgen. Außerdem durfte kein Schwung für die Bewegung geholt werden (dafür wurde an den Schultern zusätzlich händisch fixiert). Das 1 RM wurde auf 0,5 kg genau bestimmt. Durch die unterschiedlichen Längen der Hebel von Kraft- und Lastarm entsprach eine Steigerung von 0,5 kg am Lastarm einer etwas geringeren Steigerung am Kraftarm. Außerdem war ein gewisses Leergewicht vorhanden. Deshalb wurde die tatsächlich aufzuwendende Kraft an den Griffen (bei horizontaler Lage des Kraftarms) mittels Federwaage für mehrere Lasten bestimmt. Die dadurch gewonnenen Wertepaare zwischen Lastgewicht und tatsächlichem Gewicht wurde in einem Diagramm aufgetragen. Mittels linearer Regression konnte so eine Formel zur Ermittlung des realen Gewichtes bei bekanntem Lastgewicht ermittelt werden (siehe Abb.18).



Abb. 17: Ausgangsposition Testung des 1 RM der Ellbogenbeuger

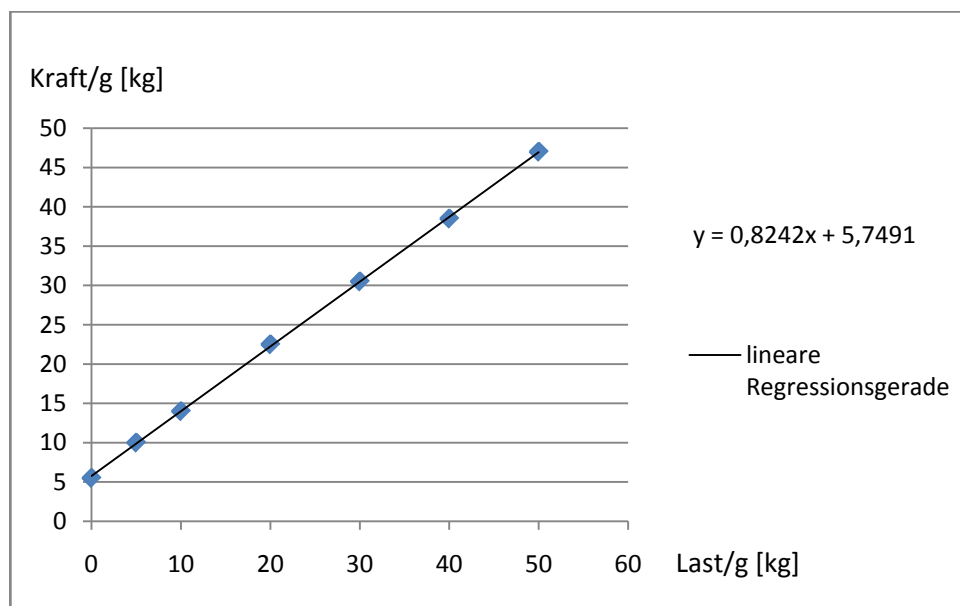


Abb. 18: Beziehung zwischen Last und Kraft an der Ellbogenbeuger- Maschine:
Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde bei der Achsenskalierung die Kraft durch die Erdbeschleunigung (g) dividiert und somit die der Gewichtskraft entsprechende Masse (unter erdnahen Bedingungen) angegeben.

Zur Ermittlung des 1 RM der Strecker der unteren Extremitäten wurde eine Beinpresse (Sonderkonstruktion mit 600kg Steckgewichte, Ennikl & Ko, Siering, Österreich, siehe Abb.19) verwendet. Auch bei diesem Gerät wurden sämtliche Einstellungen notiert um reproduzierbare Bedingungen zu schaffen. Die Probanden begannen die Testübung mit einem Kniewinkel von 90° wozu der elektrohydraulisch steuerbare Beinschub in die entsprechende Position gebracht wurde. Die Position des Schlittens wurde an einer Zentimeter-Skala abgelesen und für alle folgenden Versuche des jeweiligen Probanden notiert. Die Füße wurden parallel und hüft- bis schulterbreit abgesetzt. Die Ferse schloss mit der Unterkante der Trittfläche ab und die Hände umfassten die Griffe neben der Sitzfläche. Ein erfolgreicher Versuch wurde absolviert, wenn eine Streckung im Kniegelenk gelang wobei aus Sicherheitsgründen auf eine vollständige Extension verzichtet wurde². Die Beinpresse wurde ohne Exzenter betrieben und bot somit einen konstanten Widerstand über den gesamten Bewegungsablauf. Mittels Federwaage wurde ein Leergewicht von 50 N ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt. Die Bestimmung der Bestleistung erfolgte auf 5 kg genau.



Abb. 19: Ausgangsposition Testung des 1 RM in der Beinpresse

² Außerdem stellte sich heraus, dass die maximale Anstrengung zu Beginn der Bewegung nötig war, um den Schlitten in Bewegung zu versetzen. Danach nahm die subjektive Belastung aufgrund der günstigeren Gelenkwinkel sukzessiv ab. Eine vollständige Extension wäre daher für die Ermittlung der Bestleistung sowieso nicht relevant gewesen.

Testprotokoll 1 RM- Test

Die Probanden absolvierten ein einheitliches Aufwärm- bzw. Testprotokoll. Begonnen wurde mit fünf Minuten lockerem Einlaufen. Danach wurde ein Aufwärmsetz an der Ellbogenbeuger- Maschine von 10 Wiederholungen mit 10 kg (reale Last) durchgeführt, gefolgt von zwei Wiederholungen mit 18 kg. Dann wurden individuelle Einzelversuche durchgeführt, wobei zwischen den Versuchen eine Pause von vier bis fünf Minuten eingehalten wurde. Das Gewicht wurde dabei so gewählt, dass die Bestleistung im Schnitt nach $4,7 \pm 1,3$ Versuchen erreicht wurde. Fortgesetzt wurden die Testungen an der Beinpresse. Zuerst wurden 10 Wiederholungen mit dem auf die 10er-Stelle gerundeten Körpergewicht absolviert, gefolgt von zwei Wiederholungen mit dem doppelten Körpergewicht. Danach wurden wiederum Einzelversuche mit vier bis fünf Minuten Pause zwischen den Versuchen durchgeführt. Die Bestleistung wurde dabei nach durchschnittlich $3,9 \pm 2,1$ Versuchen erreicht. Gemessen wurden die Bestleistungen auf 0,5 kg genau bei der Ellbogenbeuger- Maschine und auf 5 kg genau bei der Beinpresse.

5.3.3.2 Isokinetische Maximalkraft

Testübungen und Geräte

Die isokinetischen Maximalkrafttest wurden mit einem isokinetischen Dynamometer (LIDO-ACTIVE, Loredan Biomedical Inc. Davis, California, USA, siehe Abb. 20 und 21) getestet. Jegliche Einstellungen wurden laut Bedienungsanleitung durchgeführt und für jeden Probanden notiert. Aus technischen Gründen wurden der linke Arm und das rechte Bein getestet. Die Winkelgeschwindigkeiten bei den Testversuchen betrugen 30 bzw. 60° pro Sekunde.

Die Ellbogenbeuger wurden in einem Winkelbereich (Beugungswinkel) von 10 – 110°, die Kniestrecker bei 20 – 90° getestet. Bei der Testung der Kniestrecker (siehe Abb.20) wurden die Probanden an Hüfte, Brust und Oberschenkel fixiert. Die Arme mussten während der gesamten Übung vor der Brust überkreuzt werden. Bei der Ellbogenbeuger- Übung (siehe Abb.21) gab es keine spezielle Fixierung. Es wurde allerdings darauf geachtet, dass die Probanden keine Ausweichbewegungen durchführten und der freie rechte Arm während der Übung seitlich nach unten hing. Generell wurde versucht, die Maschine derart einzustellen, dass die Drehachsen von Maschine und getestetem Gelenk übereinstimmten.



Abb. 20: Testung der isokinetischen Maximalkraft der Kniestrecke



Abb. 21: Testung der isokinetischen Maximalkraft der Ellbogenbeuger

Testprotokoll

Nach fünf Minuten lockerem Einlaufen absolvierten die Probanden einen Eingewöhnungsversuch mit dem linken Arm bei beiden Geschwindigkeiten. Sie bekamen dabei die Anweisung, sich nicht anzustrengen. Danach wurde zuerst bei 30° pro Sekunde getestet. Die Probanden führten dabei zwei Wiederholungen in Serie aus. In der konzentrischen Phase galt es dabei den Hebelarm maximal zu „beschleunigen“, in der exzentrischen Phase sollte der Hebelarm maximal „abgebremst“ werden. Beides war aufgrund der Motorkraft nicht möglich. Aufgezeichnet wurden die maximal entwickelten Kräfte (Drehmomente) während der konzentrischen und exzentrischen Phase aus beiden Versuchen. Nach drei Minuten Pause wurde der gleiche Test bei 60° pro Sekunde absolviert. Die Testung der Kniestrecker erfolgte nach dem gleichen Protokoll wie die Testung der Ellbogenbeuger.

5.3.4 Statistik

Die Statistische Auswertung erfolgte mit SPSS 16.0. Die Signifikanzgrenze wurde für alle Tests bei $p=0,05$ (5% Irrtumswahrscheinlichkeit) festgelegt. Die Veränderungen der Leistungen sowie des Körpergewichtes innerhalb der Gruppen wurden mittels zweiseitigem t-Test für verbundene Stichproben analysiert. Falls die Differenzen der Messwertpaare nicht normalverteilt waren (Signifikanz $p<0,05$ bei Kolmogorov-Smirnov-Test), wurde ein Wilcoxon-Test durchgeführt. Eine einfaktorielle ANOVA mit dem Faktor „Gruppe“ und den Differenzen der Messwertpaare als Variable wurde angewendet um festzustellen, ob sich TRAD- und MDS-Gruppe hinsichtlich der Veränderungen der Leistungen voneinander unterscheiden.

Das Ausgangsniveau der Gruppen wurde mittels einfaktorieller ANOVA mit dem Faktor „Gruppe“ und den Testleistungen bzw. dem Körpergewicht als Variable auf Unterschied geprüft.

Zusätzlich wurden sämtliche Leistungen auch auf das Körpergewicht der einzelnen Probanden bezogen und mit diesen Daten die beschriebenen statistischen Tests durchgeführt.

6 Ergebnisdarstellung

6.1 Körpergewicht und Ausgangsniveau

Das durchschnittliche Körpergewicht veränderte sich zwischen Einstiegs- und Endtest in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,833$) von 77,8 auf 78,3 kg. In der MDS-Gruppe war eine Veränderung von 73,7 auf 74,3 kg ebenfalls nicht signifikant ($p=0,297$).

Die beiden Gruppen unterschieden sich beim Einstiegstest weder in Bezug auf das Körpergewicht noch auf die Leistungen (bzw. Leistungen pro Körpergewicht) bei den Krafttests signifikant voneinander.

6.2 Ergebnisübersicht

Ein Überblick über die Veränderungen der durchschnittlichen Testleistungen in Prozent ist in Tabelle 2 dargestellt. Im Mittel über alle Tests steigerte sich die TRAD-Gruppe um 8,8% während sich die MDS-Gruppe um 10,0% steigerte. Der Unterschied in den Steigerungen zwischen den Gruppen ist bei allen Tests nicht signifikant.

Tabelle 2: Prozentuelle Veränderungen der Testleistungen nach vierwöchigem Training

Testübung	$\Delta\%$ TRAD	$\Delta\%$ MDS
1 RM Arme	+6,0 *	+4,4
1 RM Beine	+6,3 *	+7,0 * ^w
Arm konzentrisch 30°/s	+6,9	+9,0
Arm exzentrisch 30°/s	+7,4 *	+10,9 ^w
Arm konzentrisch 60°/s	+12,5 ^w	+12,5
Arm exzentrisch 60°/s	+6,8	+12,1
Bein konzentrisch 30°/s	+12,6	+5,6
Bein konzentrisch 60°/s	+11,5	+18,2

* bedeutet signifikante Steigerung ($p \leq 0,05$)

^w bedeutet Signifikanzprüfung durch Wilcoxon-Test

Bezieht man die Leistungen der Probanden auf das Körpergewicht, so ergeben sich sehr ähnliche Steigerungen wie in Tabelle 2. Die Signifikanzprüfung ergibt jedoch in der MDS-Gruppe zusätzlich zwei signifikante Steigerungen bei den Testübungen „Arm Konzentrisch 60°/s“ (+11,4%) sowie „Arm exzentrisch 60°/s“ (+11,4%).

6.3 Testung des Einwiederholungsmaximums

6.3.1 Ellbogenbeuger

Das durchschnittliche konzentrische Einwiederholungsmaximum (1 RM) stieg in der TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,045$) um 6,0% von 31,1 auf 32,9 kg. In der MDS-Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,062$) um 4,4% von 30,3 auf 31,7 kg. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,602$).

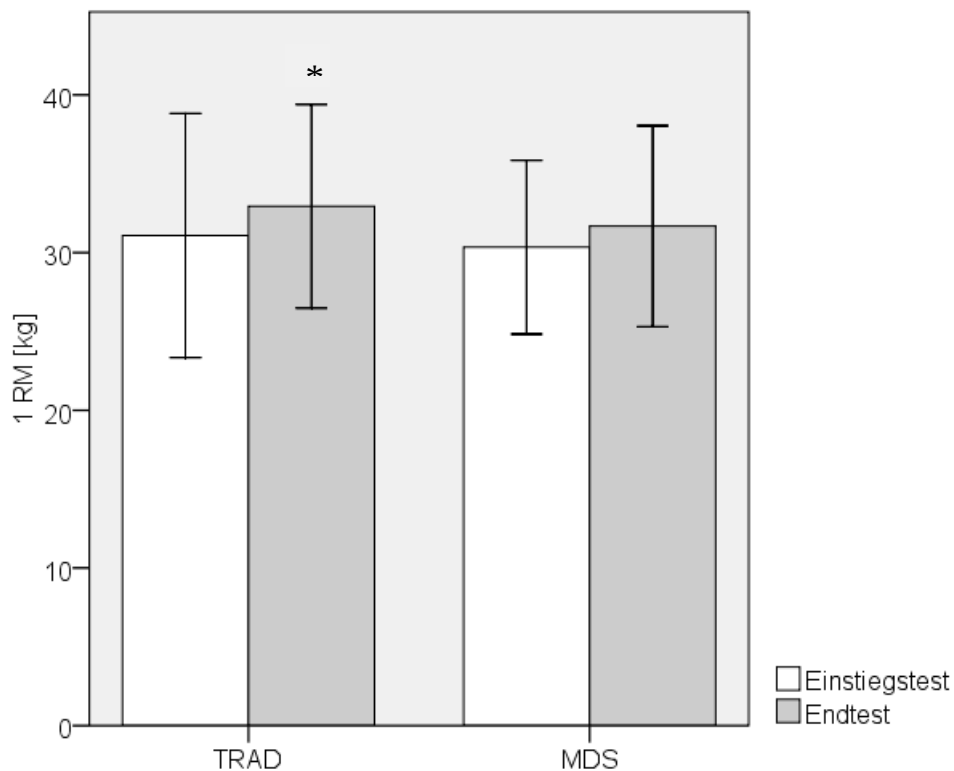


Abb. 22: Durchschnittliches ($\pm$ SD) 1 RM der Ellbogenbeuger vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=8$; MDS: $n=8$).

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,034$) um 6,3%. Die MDS-Gruppe steigerte sich nicht signifikant ($p=0,067$) um 4,2%. Der Unterschied in den Anstiegen ist nicht signifikant ($p=0,545$).

6.3.2 Beinpresse

Das durchschnittliche konzentrische Einwiederholungsmaximum (1 RM) stieg in der TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,010$) um 6,3% von 224 auf 238 kg. In der MDS-Gruppe gab es eine signifikante Steigerung ($p=0,026$) um 7,0% von 189 auf 203 kg. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,862$).

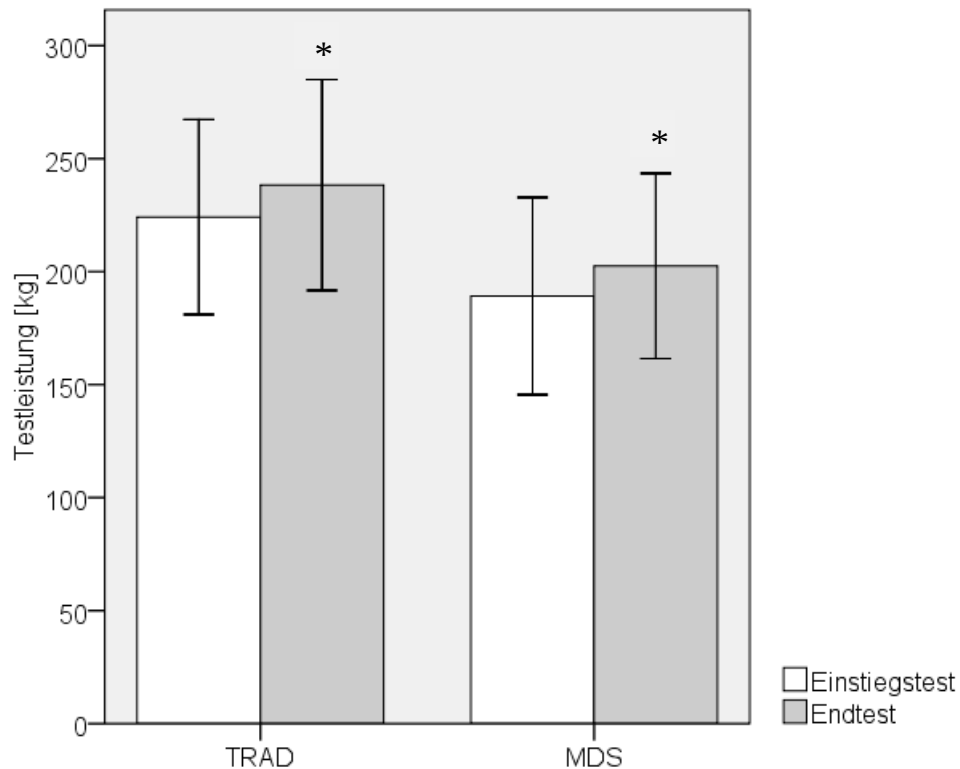


Abb. 23: Durchschnittliches ($\pm$ SD) 1 RM in der Beinpresse vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=6$; MDS: $n=6$).

Auf das Körpergewicht bezogen steigerte sich die TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,008$) um 6,3%. Die MDS-Gruppe steigerte sich ebenfalls signifikant ($p=0,009$) um 7,2%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,918$).

6.4 Isokinetische Maximalkrafttests

6.4.1 Linker Arm konzentrisch 30° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,081$) um 6,9% von 52,4 auf 56,0 Nm. In der MDS Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,087$) um 9,0% von 57 auf 62,1 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,624$).

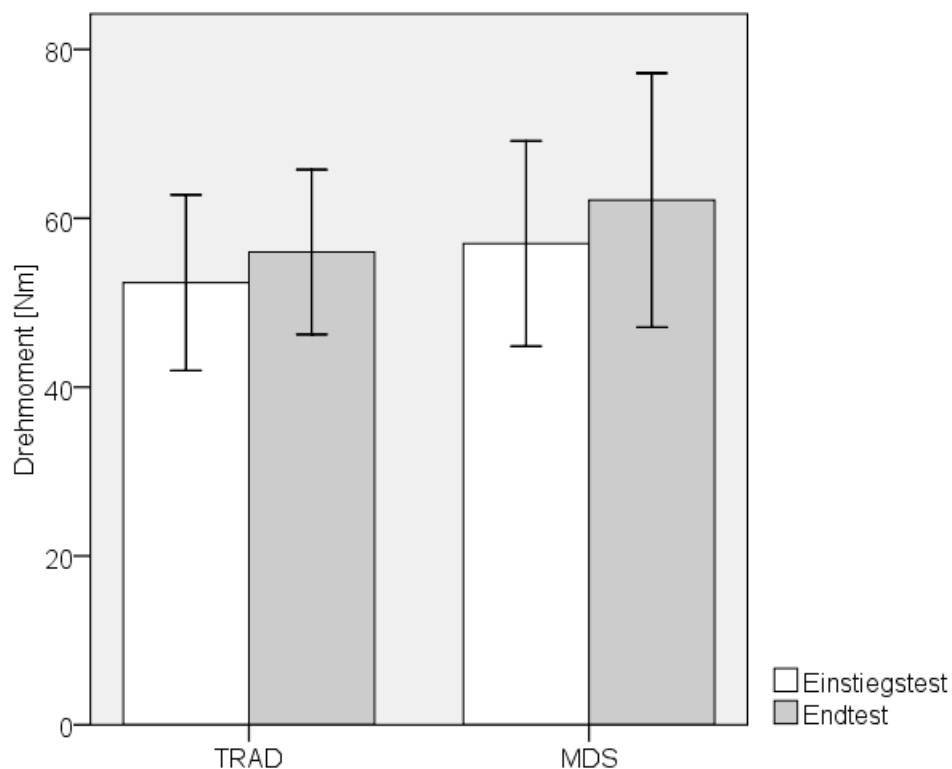


Abb. 24: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=8$; MDS: $n=7$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,069$) um 7,0%. Die MDS-Gruppe steigerte sich nicht signifikant ($p=0,085$) um 8,5%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,644$).

6.4.2 Linker Arm exzentrisch 30° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,015$) um 7,4% von 69,0 auf 74,1 Nm. In der MDS Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,127$) um 10,9% von 73,0 auf 81,1 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,436$).

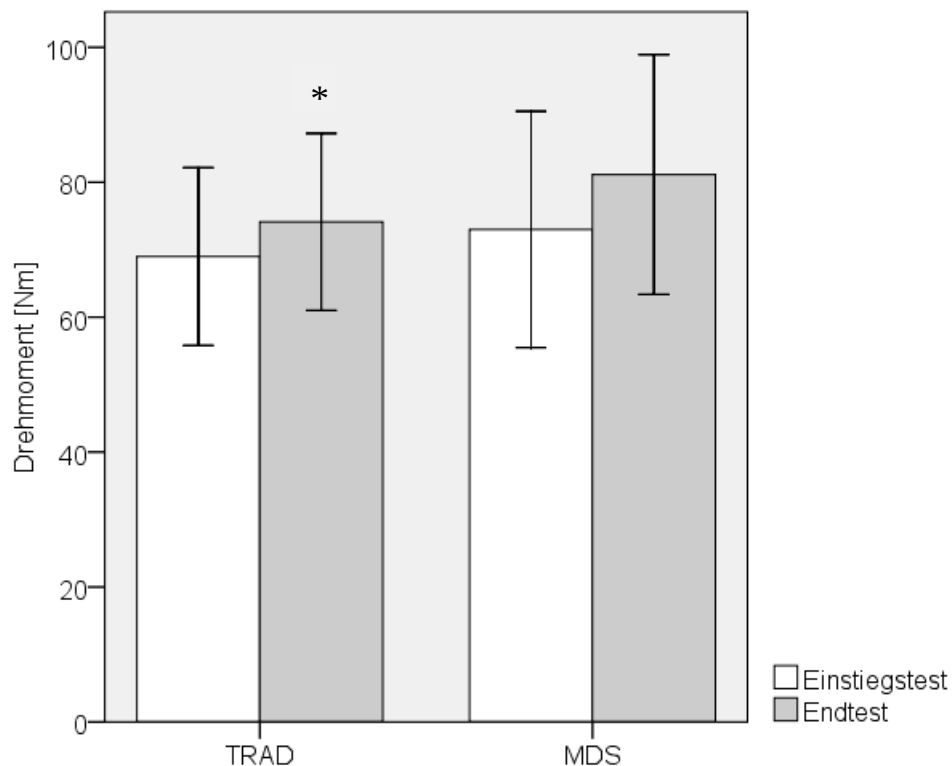


Abb. 25: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=8$; MDS: $n=7$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe signifikant ($p=0,009$) um 7,3%. Die MDS-Gruppe steigerte sich nicht signifikant ($p=0,075$) um 11,3%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,394$).

6.4.3 Linker Arm konzentrisch 60° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,063$) um 12,5% von 48,1 auf 54,1 Nm. In der MDS Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,069$) um 12,5% von 53,9 auf 60,6 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,880$).

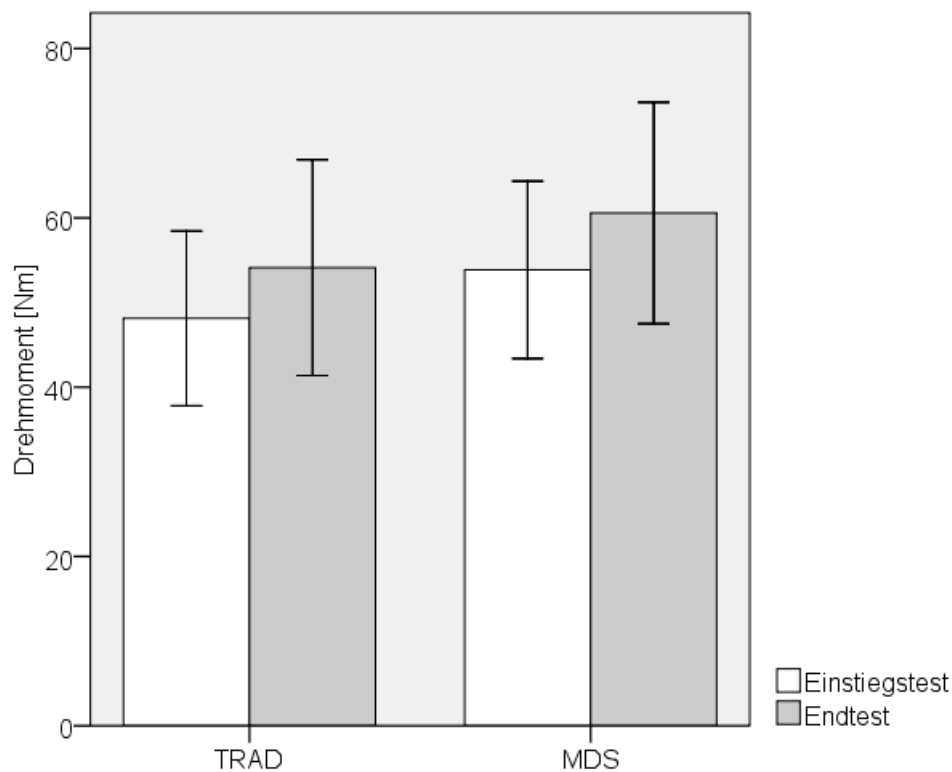


Abb. 26: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 60°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=8$; MDS: $n=7$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,118$) um 12,6%. Die MDS-Gruppe steigerte sich signifikant ($p=0,043$) um 11,4%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,922$).

6.4.4 Linker Arm exzentrisch 60° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,243$) um 6,8% von 66,5 auf 71,0 Nm. In der MDS Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,052$) um 12,1% von 73,1 auf 82,0 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,408$).

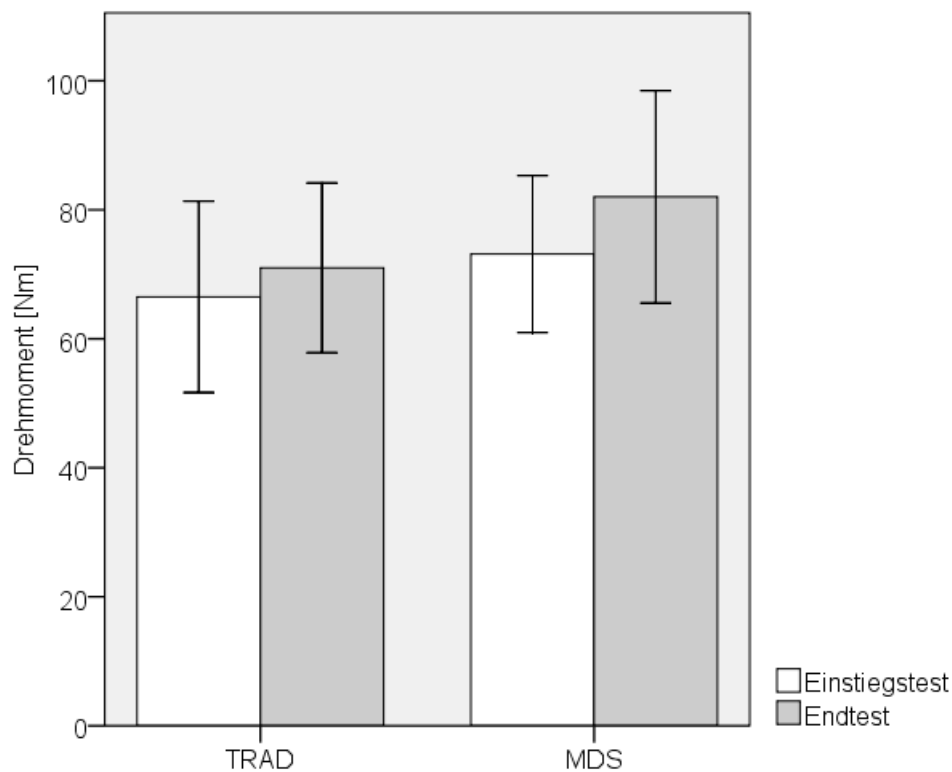


Abb. 27: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 60°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=8$; MDS: $n=7$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,236$) um 6,8%. Die MDS-Gruppe steigerte sich signifikant ($p=0,036$) um 11,4%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,402$).

6.4.5 Rechtes Bein konzentrisch 30° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,195$) um 12,6% von 204 auf 230 Nm. In der MDS Gruppe gab es ebenfalls eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,465$) um 5,6% von 209 auf 221 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,560$).

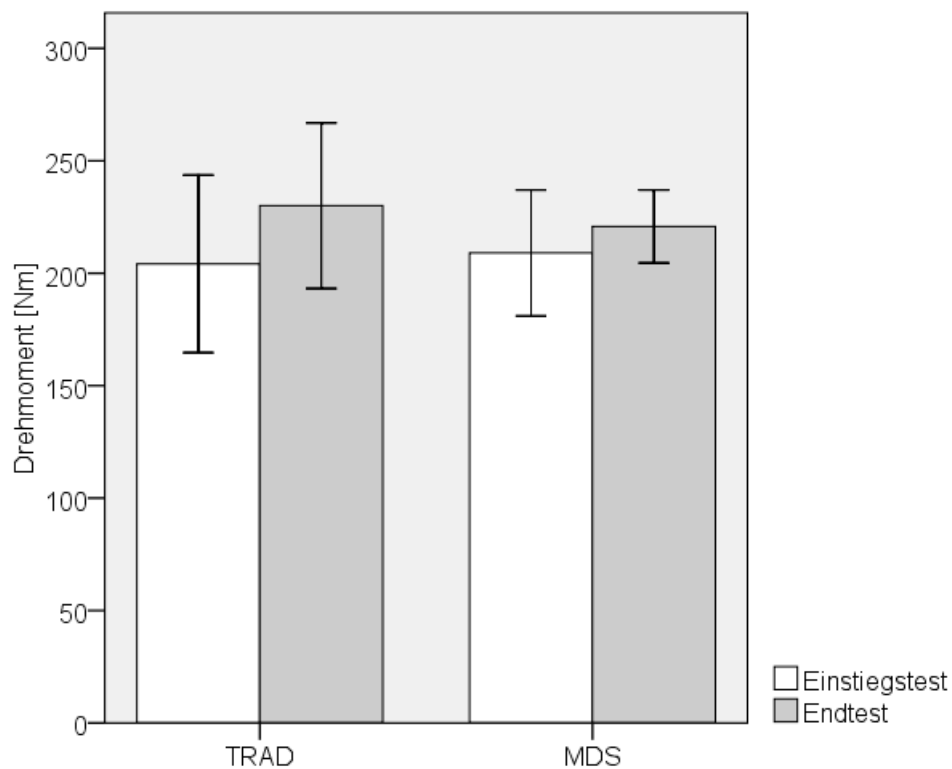


Abb. 28: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der Kniestrecker am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=6$; MDS: $n=5$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,194$) um 11,8%. Die MDS-Gruppe steigerte sich nicht signifikant ($p=0,428$) um 6,5%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,685$).

6.4.6 Rechtes Bein konzentrisch 60° pro Sekunde

Der durchschnittliche Wert für das maximal entwickelte Drehmoment stieg in der TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,085$) um 11,5% von 201 auf 224 Nm. In der MDS Gruppe gab es eine nicht signifikante Steigerung ($p=0,051$) um 18,2% von 185 auf 219 Nm. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,529$).

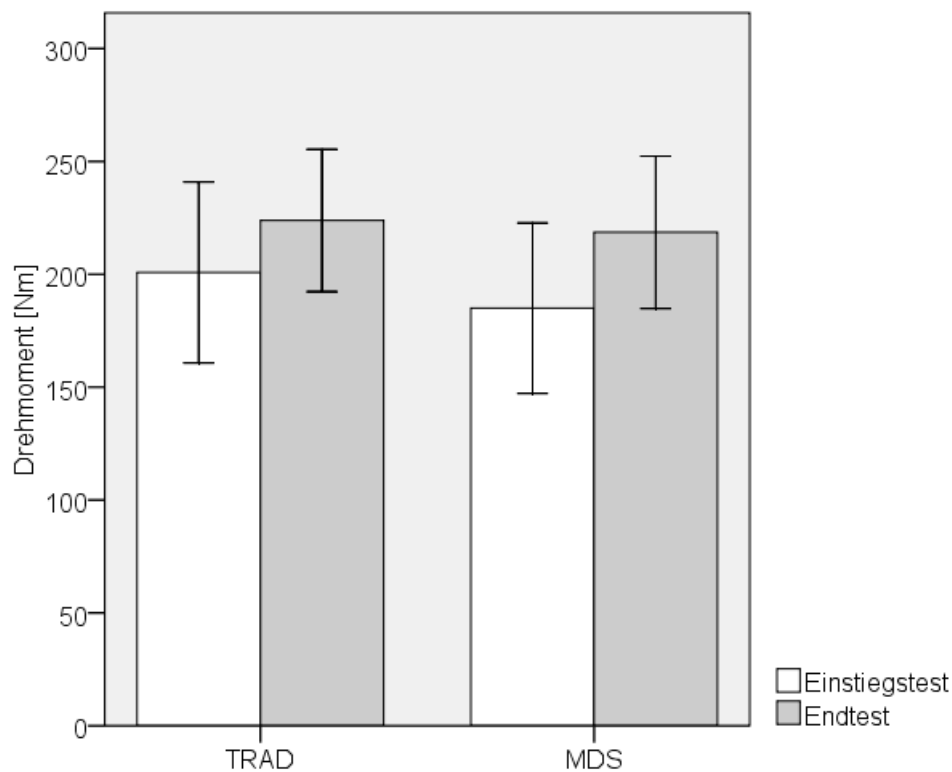


Abb. 29: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der Kniestrecker am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe (* bedeutet signifikante Steigerung zwischen Einstiegs- und Endtest; TRAD: $n=6$; MDS: $n=5$)

Bezieht man die Leistungen auf das Körpergewicht, so steigerte sich die TRAD-Gruppe nicht signifikant ($p=0,098$) um 12,0%. Die MDS-Gruppe steigerte sich nicht signifikant ($p=0,055$) um 18,8%. Die Anstiege unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($p=0,490$).

7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse sollen nun anhand der in Kapitel 5.2 formulierten Forschungshypothesen diskutiert werden.

Hypothese 1

Vierwöchiges Krafttraining führt sowohl in der TRAD- als auch in der MDS- Gruppe zu signifikanten Steigerungen des Einwiederholungsmaximums sowie der konzentrischen und exzentrischen isokinetischen Maximalkraft.

Diese Hypothese kann durch die vorliegenden Ergebnisse teilweise bestätigt werden. Signifikante Steigerungen wurden zwar nur bei drei Tests in der TRAD- Gruppe sowie bei einem Test in der MDS- Gruppe erreicht. Deutliche Trends zur Steigerung ($p < 0,1$) waren jedoch bei jeweils sechs Tests zu erkennen. Dass der Unterschied in der Anzahl der signifikanten Ergebnisse nicht überbewertet werden sollte zeigt sich u.a. daran, dass das Signifikanzniveau in der MDS- Gruppe bei der Testübung „Arm exzentrisch $60^\circ/\text{s}$ “ ($p = 0,052$) sowie „Bein konzentrisch $60^\circ/\text{s}$ “ ($p = 0,051$) nur äußerst knapp verfehlt wurde. Außerdem konnten bei der gewichtsbezogenen Auswertung jeweils drei mal signifikante Steigerungen verzeichnet werden. Zu beachten ist auch, dass in der MDS- Gruppe bei den isokinetischen Tests ein Proband weniger zur Verfügung stand, was das Erreichen signifikanter Anstiege zusätzlich erschwerte.

Der mittlere prozentuelle Kraftanstieg von 8,8% in der TRAD- und 10,0% in der MDS- Gruppe entspricht unter Berücksichtigung der unspezifischen Testweise den Werten aus einschlägiger Literatur für vierwöchiges Krafttraining (vgl. Hollmann und Hettinger, 2000, S.226; Weineck, 2007, S.408).

Hypothese 2

MDS- Training führt aufgrund seiner exzentrischen Mehrbelastung zu stärkeren Anstiegen der exzentrischen isokinetischen Maximalkraft. Beim Einwiederholungsmaximum sowie der konzentrischen isokinetischen Maximalkraft sind zumindest vergleichbare Steigerungen zu erwarten.

Auch diese Hypothese kann durch die vorliegende Untersuchung nur teilweise bestätigt werden. Klammert man die exzentrischen Tests aus, so ergibt sich eine vergleichbare durchschnittliche Steigerungen von 9,3% in der TRAD- Gruppe und 9,5% in der MDS- Gruppe. Die Signifikanzgrenze bei der Prüfung auf Unterschied zwischen den Gruppen

wurde allerdings bei allen Tests weit verfehlt. Es fällt zwar auf, dass die prozentuellen Unterschiede bei den exzentrischen Testformen relativ groß sind und die MDS- Gruppe jeweils besser abschneidet, aufgrund der hohen Irrtumswahrscheinlichkeit von $p=0,436$ bzw. $p=0,408$ darf jedoch nicht von einem tatsächlichen Unterschied ausgegangen werden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die MDS-Gruppe bei der Testübung „Arm exzentrisch 30°/s“ zwar prozentuell besser abschnitt, sich jedoch im Gegensatz zur TRAD-Gruppe nicht signifikant steigerte.

In Kapitel 4.2.1 wurden Studien vorgestellt, welche ebenfalls Krafttraining mit exzentrischer Mehrbelastung (EX^+) mit traditionellem Krafttraining (TRAD) verglichen. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der angewandten Tests so stellt sich heraus, dass das 1 RM lediglich in zwei Studien (Kaminski et al., 1998; Brandenburg et al., 2002) in der EX^+ - Gruppe signifikant mehr anstieg als in der TRAD-Gruppe. In der Studie von Brandenburg et al. (2002) wurde dabei ein Unterschied nur bei einer von zwei Übungen ermittelt. In den Studien von Godard et al. (1998) und Yarrow et al. (2008) konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Die Studien von Hortobagyi et al. (2000, 2001) ergaben keinen Unterschied beim 3 RM. Angesichts dieser Ergebnisse ist es also nicht außergewöhnlich, dass in der vorliegenden Untersuchung kein Unterschied beim 1 RM festgestellt werden konnte. Die isokinetischen Maximalkraftwerte wurden lediglich in drei Studien (Kaminski et al., 1998; Hortobagyi et al., 2000, 2001) untersucht. Die konzentrische Maximalkraft stieg dabei in der EX^+ - Gruppe nur in der Studie von Hortobagyi et al. (2000) stärker an als in der TRAD- Gruppe. In den beiden restlichen Studien war kein Unterschied festzustellen. Somit stellen die vorliegenden Ergebnisse auch bezüglich konzentrischer isokinetischer Maximalkraft keinen Widerspruch zur Literatur dar. Die exzentrische isokinetische Maxmalkraft konnte jedoch in allen drei Studien in der EX^+ - Gruppe signifikant mehr gesteigert werden als in der TRAD- Gruppe. Gründe für das verhältnismäßig nicht so gute Abschneiden der MDS- Gruppe in der vorliegenden Studie können vielfältig sein. Es werden nun einige potentielle Faktoren diskutiert.

Probanden

Für die vorliegende Studie konnten 16 Probanden gewonnen werden. In der TRAD-Gruppe absolvierten acht Personen die armspezifischen Tests und sechs Personen die beinspezifischen Tests. In der MDS- Gruppe waren es bei den 1 RM- Tests ebenfalls acht bzw. sechs Personen, bei den isokinetischen Tests nur sieben bzw. fünf Personen. Aufgrund dieser sehr kleinen Stichproben sollten die Ergebnisse generell mit Vorsicht

betrachtet und nicht überbewertet werden. Außerdem sind dadurch signifikante Steigerungen bzw. Unterschiede in den Steigerungen nur sehr schwierig zu erreichen. Dies wird besonders klar, wenn man sich die individuellen Unterschiede zwischen den Probanden vor Augen hält. Durch die Anforderung an die Teilnehmer, in den sechs Monaten vor Studienbeginn kein Krafttraining durchgeführt zu haben, wurde versucht, Verzerrungen durch unterschiedlichen Trainingsstatus zu vermindern. Trotzdem gab es unterschiedlichste körperliche Voraussetzungen u.a. durch die individuell ausgeübten Sportarten, welche sehr vielfältig und unterschiedlich waren wie z.B. Fußball, Tennis, Tischtennis, Skifahren, Klettern, Basketball oder Radfahren. Ebenso wie die körperlichen Voraussetzungen spielt auch das Verhalten der Probanden während der Studie eine große Rolle. Eine Kontrolle oder Standardisierung von Faktoren wie Nahrungsaufnahme oder sonstiger Aktivitäten während der Trainingsperiode wäre aber aufgrund der freiwilligen und unentgeltlichen Teilnahme der Probanden nicht zumutbar gewesen. Die Teilnehmer wurden schriftlich aufgefordert, starke Belastungen an den Trainingstagen zu vermeiden und kein zusätzliches Krafttraining der Arme und Beine während der Trainingsperiode durchzuführen. Allerdings können sich auch Aktivitäten zwischen den Trainingstagen auf die Effektivität des Trainings auswirken. Außerdem wurden die Probanden ersucht, zu den Tests in vollständig erholtem Zustand zu erscheinen. Dennoch können die Testleistungen durch das individuelle Verhalten im Vorfeld der Tests sowie durch die Tagesverfassung entscheidend beeinflusst werden. Abgesehen von diesen Faktoren gibt es natürlich auch grundsätzliche Unterschiede in der Trainierbarkeit der Probanden, welche bei solch kleinen Stichproben Verzerrungen hervorrufen können.

Training

Zwei Probanden der MDS- Gruppe mussten ein Training auslassen. Dies könnte die Steigerungen in dieser Gruppe etwas abgeschwächt haben. Die Trainingsdauer war mit vier Wochen sehr gering. In dieser kurzen Zeit sind signifikante Zuwächse bzw. Unterschiede in den Zuwächsen generell schwierig nachzuweisen. Zu erwähnen ist auch, dass die meisten Probanden der MDS- Gruppe nach den ersten zwei Einheiten Muskelkater hatten während in der TRAD- Gruppe kaum davon berichtet wurde.

Allgemein ist zum Design des Trainings zu sagen, dass ein Kompromiss gewählt wurde zwischen möglichst großer Kraftsteigerung auf der einen Seite und Verträglichkeit und Zeitökonomie für die Probanden auf der anderen Seite. Wie in Kapitel 2.7 angesprochen, wird eine Steigerung der Maximalkraft vorwiegend durch Verbesserungen der inter- und

intramuskulären Koordination sowie einer Erhöhung des Muskelfaserquerschnitts erzielt. Innerhalb von vier Wochen ist eine Zunahme der Maximalkraft fast ausschließlich durch eine verbesserte inter- und intramuskuläre Koordination zu erreichen. Daher war das grundsätzliche bestreben bei der Planung des Trainings, eher wenige Wiederholungen mit hohen Lasten durchzuführen, da dies die inter- und intramuskuläre Koordination am besten schult. Allerdings setzt das Training mit hohen Lasten aufgrund der erhöhten Verletzungsgefahr ein gewisses Maß an Krafttrainingserfahrung voraus. Da die Mehrheit der Probanden krafttrainingsunerfahren war, wurde zu Beginn mit relativ geringen Lasten (15-Wiederholungsmaximum) trainiert. Bei der Ellbogenbeuger- Übung wurde das Trainingsgewicht nach zwei Wochen gesteigert, sodass nur mehr 10 Wiederholungen möglich waren. Außerdem wurden die exzentrischen Belastungen in der MDS- Gruppe von anfangs 140% der konzentrischen Last, ab der fünften Einheit auf 170% gesteigert. Da bei den Kniebeugen bei einigen Probanden körperliche Beschwerden auftraten wurde auf eine Steigerung des Gewichtes bzw. eine Änderung des Verhältnisses von konzentrischer zu exzentrischer Last verzichtet. Das Training wurde mit nur zwei Sätzen absolviert, um den Zeitaufwand für die Teilnehmer gering zu halten und um eine Überforderung, speziell am Beginn der Trainingsphase, zu vermeiden.

Tests

Die Auswahl der Tests orientierte sich an vergleichbaren Studien (siehe Kapitel 4.2.1). Außerdem wurde versucht, trainingsunspezifische Testübungen bzw. -geräte auszuwählen um keiner der beiden Gruppen einen Vorteil zu gewähren. Die trainingsunspezifische Testweise hat allerdings den Nachteil, dass die Kraftzuwächse geringer sind als bei trainingsspezifischen Tests und somit Zuwächse schwieriger nachzuweisen sind. Die Testung an Maschinen wurde einer Testung mit freien Gewichten vorgezogen um standardisierte Bedingungen zu ermöglichen und um die Verletzungsgefahr gering zu halten. Trotz der unspezifischen Testübungen kann eine systematische Bevorteilung der einen oder anderen Gruppe durch die ausgewählten Tests nicht ausgeschlossen werden. Dies soll anhand folgender beispielhafter Überlegung verdeutlicht werden:

Der Kraftverlauf am MDS wurde so eingestellt, dass die Belastung während der gesamten konzentrischen bzw. exzentrischen Phase konstant war. Beim Training mit Gewichten, wie es in der TRAD- Gruppe erfolgte, kommt es aufgrund der Beschleunigungskräfte zu Kraftspitzen am Ende der exzentrischen und am Beginn der konzentrischen Bewegungsphase (vgl. Amonette et al., 2004, S.12). Bei der Testung in der Beinpresse war

die größte Anstrengung zu Beginn der (konzentrischen) Bewegung nötig. Sobald der Schlitten in Bewegung versetzt wurde, gelang es stets, einen gültigen Versuch zu erzielen. Gründe dafür könnten zum Einen die Haftreibungskräfte und Beschleunigungskräfte zu Beginn der Bewegung und zum Anderen der große Beugungswinkel von 90° im Kniegelenk in der Startposition, welcher eine geringere Kraftentfaltung ermöglicht als die kleineren Beugungswinkel im Verlauf der Bewegung, sein. Auch beim Kniebeugen-Training war der Kniewinkel zu Beginn der konzentrischen Phase 90°. Laut Weineck (2007, S.493- 495) ist die Entwicklung der Maximalkraft am stärksten im trainierten Winkelbereich ausgeprägt. Es ist daher durchaus möglich, dass die Kraftspitzen beim TRAD- Training im Bereich von 90° Beugungswinkel zu größeren Steigerungen der Maximalkraft in diesem Winkelbereich führten und daher die TRAD- Gruppe beim Test in der Beinpresse verhältnismäßig besser abschnitt als die MDS- Gruppe.

Zu Beachten ist auch, dass Einstiegs- und Endtests aus organisatorischen Gründen nicht zur gleichen Tageszeit stattfanden. Laut Hollmann und Hettinger (2000, S.180- 182) gibt es tageszeitliche Schwankungen der Maximalkraft. Daher könnte auch dieser Umstand die Ergebnisse beeinflusst haben.

7.1 Resümee

Vierwöchiges Krafttraining führte zu vergleichbaren Steigerungen der Kraftwerte in der TRAD- und MDS-Gruppe. Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich der Steigerungen konnten nicht festgestellt werden.

Als Hauptgründe für die geringe Anzahl an signifikanten Steigerungen und das Ausbleiben signifikanter Unterschiede können die sehr kleine Stichprobe und die trainingsunspezifische Testweise angesehen werden. Aufgrund der kleinen Stichprobe in Kombination mit einer Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Ergebnisse (siehe Kapitel 7) sind einseitige Verzerrungen der Ergebnisse nicht ausgeschlossen.

Auf Basis der vorliegenden Untersuchung scheint das MDS zur Steigerung der Kraft in einem ähnlichen Ausmaß geeignet zu sein wie traditionelles Krafttraining. Zur Bestätigung dieser Annahme müsste jedoch eine größer angelegte Studie durchgeführt werden. Ob das MDS als Trainingsgerät für den Weltraum geeignet ist, ist von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig. Die Klärung dieser Frage ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit.

9 Literaturverzeichnis

- Adamcik, G., Barta, N., Talla, R., Angeli, T., Kozlovskaya, I.B., Grigoriev, A.I., Tschan, H. & Bachl, N. (2008). MDS – Multifunctional Dynamometer for Application in Space. Proceeding of the Symposium: Life in Space for Life in Earth, Angers, Frankreich, 22-27 Juni 2008.
- Adams, G.R., Caiozzo, V.J. & Baldwin, K.M. (2003). Skeletal muscle unweighting: spaceflight and ground-based models. *J Appl Physiol*, 95 (6), 2185-2201.
- Akima, H., Kubo, K., Imai, M., Kanehisa, H., Suzuki, Y., Gunji, A., Fukunaga, T. (2001). Inactivity and muscle: effect of resistance training during bed rest on muscle size in the lower limb. *Acta Physiol Scand*, 172 (4), 269-278.
- Akima, H., Ushiyama, J., Kubo, J., Tonosaki, S., Itoh, M., Kawakami, Y., Fukuoka, H., Kanehisa, H., Fukunaga, T. (2003). *Resistance training during unweighting maintains muscle size and function in human calf. Med Sci Sports Exerc*, 35 (4), 655-662.
- Alkner, B.A. & Tesch, P.A. (2004a). Efficacy of a gravity-independent resistance exercise device as a countermeasure to muscle atrophy during 29-day bed rest. *Acta Physiol Scand*, 181 (3), 345-357.
- Alkner, B.A. & Tesch, P.A. (2004b). Knee extensor and plantar flexor muscle size and function following 90 days of bed rest with or without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol*, 93 (3), 294-305.
- Amonette, W.E., Bentley, J.R., Lee, S.M., Loehr, J.A. & Schneider, S. (2004). *Ground Reaction Force and Mechanical Differences Between the Interim Resistive Exercise Device (iRED) and the Smith Machine While Performing a Squat*. Technical Report TP-2004-212063, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas.
- Bachl, N. Angeli, T. (2008). *Österreichisches Weltraumprogramm. 5. Ausschreibung. ASAP 2007. Zweiter Zwischenbericht über den Zeitraum 1.9.08- 30.11.2008*. Wien: Universität Wien - Zentrum für Sportwissenschaft und TU Wien – Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik.
- Bamman, M.M., Clarke, M.S.F., Feedback, D.L., Talmadge, R.J., Stevens, B.R., Lieberman, S.A., Greenisen, A.M.C. (1998). Impact of resistance exercise during bed rest on skeletal muscle sarcopenia and myosin isoforms distribution. *J Appl Physiol*, 84 (1), 157-163.
- Badtke, G. (Hrsg.). 1999. *Lehrbuch der Sportmedizin* (4.Auflage). Heidelberg, Leipzig: J.A. Barth Verlag.
- Bentley, J.R., Leach, M.A., McCleary F., Smith, C., Norcross, J., Hagan, R.D. (2006). *Advanced Resistive Exercise Device (ARED) Man-In-The-Loop Test (MILT)*. Technical Report TP-2006-213717, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas.
- Berg, H.E., Tesch, P.A. (1994). A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space. *Aviat Space Environ Med*, 65, 752-756.
- Brandenburg, J.P. & Docherty, D. (2002). The Effects of Accentuated Eccentric Loading on Strength, Muscle Hypertrophy, and Neural Adaptations in Trained Individuals. *J Strength Cond Research*, 16 (1), 25-32.

- Brown, L.E. & Weir, J.P. (2001). ASEP Procedures Recommendation I: Accurate Assessment of Muscular Strength and Power. *Journal of Exercise Physiology online*, 4 (3), 1-21.
- Chen, Y.W., Hubal, M.J., Hoffman, E.P., Thompson, P.D., Clarkson, P.M. (2003). Molecular responses of human muscle to eccentric exercise. *J Appl Physiol*, 95 (6), 2485-2494.
- Clement, G., Pavy-Le Traon, A. (2004). Centrifugation as a countermeasure during actual and simulated microgravity: a review. *Eur J Appl Physiol*, 92 (3), 235-248.
- de Mareés, H. (2003). *Sportphysiologie* (9.Auflage). Köln: Sportverlag Strauss.
- di Pampero, P.E. & Narici, M.V. (2003). Muscles in Microgravity: from fibres to human motion. *Journal of Biomechanics*, 36 (3), 403-412.
- European Space Agency. (2005, 26. Oktober). Muscle Atrophy and Exercise Research System. Zugriff am 20. Mai 2009 unter <http://spaceflight.esa.int/users/virtualinstitutes/mares/index1.html>
- European Space Agency. (2009a, Februar). Mars 500. Isolation Study. Information Kitt. Zugriff am 20. Mai 2009 unter http://esamultimedia.esa.int/docs/Mars500/ESA_Mars500InfoKit.pdf
- European Space Agency. (2009b). ISS Factsheets. Flywheel Exercise Device (FWED). Zugriff am 20. Mai 2009 unter http://www.spaceflight.esa.int/users/downloads/factsheets/fs044_10_fwed.pdf
- Fitts, R.H., Riley, D.R. & Widrick, J.J. (2000). Physiology of a Microgravity Environment. Invited Review: Microgravity and skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 89 (2), 823-839.
- Fitts, R.H., Riley, D.R. & Widrick, J.J. (2001). Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *The Journal of Experimental Biology*, 204 (18), 3201-3208.
- Gallagher, P., Trappe, S., Harber, M., Creer, A., Mazzetti, S., Trappe, T., Alkner B. & Tesch, P. (2005). Effekts of 84-days of bedrest and resistance training on single muscle fibre myosin heavy chain distribution in human vastus lateralis and soleus muscles. *Acta Physiol Scand*, 185 (1), 61-69.
- Godard, M.P., Wygand, J.W., Carpinelli, R.N., Catalano, S. & Otto, R.M. (1998). Effects of Accentuated Eccentric Resistance Training on Concentric Knee Extensor Strength. *J Strength Cond Res*, 12 (1), 26-29.
- Hollander, D.B., Kraemer, R.R., Kilpatrick, M.W., Ramadan, Z.G., Reeves, G.V., Francois, M., Hebert, E.P. & Tryniecki, J.L. (2007). Maximal Eccentric and Concentric Strength Discrepancies Between Young Man and Women for Dynamic Resistance Exercise. *J Strength Cond Res*, 21 (1), 34-40.
- Hollander, D.B., Kraemer, R.R., Kilpatrick, M.W., Ramadan, Z.G., Reeves, G.V., Francois, M., Hebert, E.P. & Tryniecki, J.L. (2007). Maximal Eccentric and Concentric Strength Discrepancies Between Young Men and Women for Dynamic Resistance Exercise. *J Strength Cond Res*, 21 (1), 34-44.
- Hollmann, W., Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin. Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin* (4.Auflage). Stuttgart: Schattauer.

- Hortobagyi, T., Barrier, J., Beard, D., Braspenincx, J., Koens, P., Devita, P., Dempsey, L., Lambert, J. (1996). Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *J Appl Physiol*, 81 (4), 1677-1682.
- Hortobagyi, T., DeVita, P. (2000). Favorable Neuromuscular and Cardiovascular Responses to 7 Days of Exercise With an Eccentric Overload in Elderly Women. *Journal of Gerontology: Biological Science*, 55 (8), 401-410.
- Hortobagyi, T., DeVita, P., Money, J., Barrier, J. (2001) Effects of standard and eccentric overload strength training in young women. *Med Sci Sports Exerc*, 33 (7), 1206-1212.
- Kaminski, K.W., Wabberson, C.V. & Murphy, R.M. (1998). Concentric Versus Enhanced Eccentric Hamstring Strength Training: Clinical Implications. *Journal of Athletic Training*, 33 (3), 216-221.
- Loehr, J.A., Schneider, S.M. (2003). *Use of a Slick-Plate as a Contingency Exercise Surface for the Treadmill With Isolation Vibration*. Technical Report TM-2003-210789, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas.
- Leitner, E. (2006, 27. März). Detaillierter Aufbau eines Muskels. Zugriff am 20. Mai 2009 unter http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph07_g8/umwelt_technik/09muskelfkraft/muskelfkraft.htm
- McComas, A.J. (1996). Skeletal Muscle. Form and Function. Human Kinetics Champaign, IL.
- Narici, M., Kayser, B., Barattini, P. & Cerrettelli, P. (2003). Effects of 17-day spaceflight on electrically evoked torque and cross-sectional area of the human triceps surae. *Eur J Appl Physiol*, 90 (3), 275-282.
- Nash, R.E., Loehr, J.A., Lee, S.M.C. English, K. L., Evans, H., Smith, S.A., Hagan, R.D. (2008, 19.November). Changes in Muscle Volume and Strength Following 16 Weeks of Training using the Advanced Resistive Exercise Device (ARED) and Free Weights. Zugriff am 25. März 2009 unter <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=961411&id=4&q=Ntt%3DARED%26Ntk%3Dall%26Ntx%3Dmode%2520matchall%26N%3D0%26Ns%3DHarvestDate%257c1>
- Norcross, J., Bentley, J.R., Moore, A.D. & Hagan R.D. (2007). *Comparison of the U.S. and Russian cycle Ergometers*. Technical Report TP-2007-214760, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas.
- Norrbbrand, L., Fluckey, J.D., Pozzo, M. & Tesch, P.A. (2008). Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *Eur J Appl Physiol*, 102 (3), 271-281.
- Ohira, Y., Yoshinaga, T., Ohara, M., Nonaka, I., Yoshioka, T., Yamashita-Goto, K., Shenkman, B.S., Kozlovskaya, I.B., Roy, R.R. & Edgerton, V.R. (1999). Myonuclear domain and myosin phenotype in human soleus after bed rest with or without loading. *J Appl Physiol*, 87 (5), 1776-1785.
- Paschalis, V., Koutedakis, Y., Jamurtas, A.Z., Mougios, V & Baltzopoulos, V. (2005). Equal Volumes of High and Low Intensity of Eccentric Exercise in Relation to Muscle Damage and Performance. *J Strength Cond Res*, 19 (1), 184-188.

- Pavy-Le Traon, A., Heer, M., Narici, M.V., Rittweger, J. & Vernikos, J. (2007). From Space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *Eur J Appl Physiol*, 101 (2), 143-194.
- Payne, M.W.C., Williams, D.R. & Trudel, G. (2007). Space Flight Rehabilitation. *Am J Phys Med Rehabil*, 86 (7), 583-591.
- Pletser, V. (2004). Short duration microgravity experiments in physical and life sciences during parabolic flights: the first 30 ESA campaigns. *Acta Astronautica*, 55 (10), 829-854.
- Rittweger, J., Frost, H.M., Schiessl, H., Ohshima, H., Alkner, B.A., Tesch, P.A. & Felsenberg, D. (2005). Muscle atrophy and bone loss after 90 days' bed rest and the flywheel resistive exercise and pamidronate: Results from the LTBR study. *Bone*, 36 (6), 1019-1029.
- Roig, M., O'Brien, K., Kirk, G., Murray, R., McKinnon, P., Shadgan, B. & Reid, D.W. (2008). The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analyses. *Br J Sports Med. published online 4 Nov 2008; doi: 10.1136/bjsm.2008.051417*. Zugriff am 31. März 2009 unter <http://bjsm.bmj.com/> (limitierter Zugriff)
- Rudnick, J., Püttmann, B., Tesch, P.A., Alkner, B.A., Schoser, B.G.H., Salanova, M., Kirsch, K., Gunga, H.C., Schiffl, G., Lück, G. & Blottner, D. (2004). Differential expression of nitric oxide synthases (NOS 1-3) in human skeletal muscle following exercise countermeasure during 12 weeks of bed rest. *The FASEB Journal*, 18 (11), 1228-1230.
- Schneider, S.M., Amonette, W.E., Blazine, K., Bentley, J., Lee, S.M., Loehr, J.A., Moore, A.D. Jr, Rapley, M., Mulder, E.R. & Smith, S.M. (2003). Training with the International Space Station interim resistive exercise device. *Med Sci Sports Exerc*, 35 (11), 1935-1945.
- Shinohara, M., Yoshitake, Y., Kouzaki, M., Fukuoka, H. & Kukunaga, T. (2003). Strength training counteracts motor performance losses during bed rest. *J Appl Physiol*, 95 (4), 1485-1492.
- Tesch, P.A., Berg, H.E., Bring, D., Evans, H.J. & LeBalnc, A.D. (2005). Effects of 17-day spaceflight on knee extensor muscle function and size. *Eur J Appl Physiol*, 93 (4), 463-468.
- Tippler, P.A. (1994). Physik. Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Trappe, S., Trappe, T., Gallagher, P., Harber, M., Alkner, B. & Tesch, P. (2004). Human muscle fibre function with 84 day bed-rest and resistance exercise. *J Physiol*, 557 (2), 501-513.
- Trappe, S.W., Trappe, T.A., Lee, G.A., Widrick, J.J., Costill, D.L. & Fitts, R.H. (2001). Comparison of a space shuttle flight (STS-78) and bed rest on human muscle function. *J Appl Physiol*, 91 (1), 57-64.
- Tschan, H. (1999). *Muskuläre Veränderungen durch den Langzeitaufenthalt in Mikrogravitationsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung der motorischen Grundeigenschaft Kraft*. Dissertation, Wien: Universität Wien, Institut für Sportwissenschaft.

- Tschan, H., Bachl, N., Baron R., Kozlovskaya I.B. & Polyakov V.V. (2001). Exercising in Space: Muscle strength assessment in microgravity during space station MIR flights. *Sport & Medicine Today*, 5, 42-46.
- Weineck, J. (2007). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (15. Auflage). Balingen: Spitta Verlag GmbH & Co. KG.
- Widrick, J.J., Knuth, S.T., Norenberg, K.M., Romatowski, J.G., Bain, J.L.W., Riley, D.A., Karhanek, M., Trappe, S.W., Trappe T.A., Costill, D.L. & Fitts, R.H. (1999). Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres. *Journal of Physiology*, 516 (3), 915-930.
- Widrick, J.J., Romatowski, J.G., Norenberg, K.M., Knuth, S.T., Bain, J.L.W., Riley, D.A., Trappe, S.W., Trappe, T.A., Costill, D.L. & Fitts, R.H. (2001). Functional properties of slow and fast gastrocnemius muscle fibers after a 17-day spaceflight. *J Appl Physiol*, 90 (5), 2203-2211.
- Yamashita-Goto, K., Okuyama, R., Honda, M., Kawasaki, K., Fujita, K., Jamada, T., Nonaka, I., Ohira, Y. & Yoshioka, T. (2001). Maximal and submaximal forces of slow fibers in human soleus after bed rest. *J Appl Physiol*, 91 (3), 427-424.
- Yarrow, J.F., Borsa, P.A., Borst, S.E., Sitren, H.S., Stevens, B.R., White, L.J. (2008). Early-Phase Neuroendocrine Responses and Strength Adaptations Following Eccentric-Enhanced Resistance Training. *J Strength Cond Res*, 22 (4), 1205-1214.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Skelettmuskulatur	11
Abb. 2: Ausschnitt von drei Myofibrillen unter dem Elektronenmikroskop	12
Abb. 3: Muskelfunktionstest am "percutaneous electrical muscle stimulator and torque-velocity dynamometer" während der STS-78 Mission	22
Abb. 4: „Zeitdynamik der mikrogravitationsbedingten Kraftminderung bei der unteren und oberen Extremität beim Experiment Motomir.....	24
Abb. 5: Training mit dem iRED (links) und flex pack des iRED (rechts).....	29
Abb. 6: Training am aRED (links) und Vakuumzylinder des aRED (rechts).....	30
Abb. 7: Prinzip eines Flywheel Trainingsgerätes	31
Abb. 8: Typischer Kraftverlauf an einer Beincurl-Trainingsmaschine mit Flywheel-Technologie .	31
Abb. 9: Schematische Darstellung des MARES	32
Abb. 10: Schematische Darstellung des Dynamo-Ergometers Motomir	33
Abb. 11: Kniebeugen (links) und Bauchmuskeltraining (rechts) am MDS	35
Abb. 12: Schematische Darstellung der NASA Ames Human Powered Centrifuge.....	37
Abb. 13: Ellbogenbeugen in der TRAD-Gruppe	50
Abb. 14: Kniebeugen in der TRAD-Gruppe.....	50
Abb. 15: Ellbogenbeugen am MDS	51
Abb. 16: Kniebeugen am MDS.....	51
Abb. 17: Ausgangsposition Testung des 1 RM der Ellbogenbeuger	54
Abb. 18: Beziehung zwischen Last und Kraft an der Ellbogenbeuger- Maschine	54
Abb. 19: Ausgangsposition Testung des 1 RM in der Beinpresse.....	55
Abb. 20: Testung der isokinetischen Maximalkraft der Kniestrecker	57
Abb. 21: Testung der isokinetischen Maximalkraft der Ellbogenbeuger	57
Abb. 22: Durchschnittliches ($\pm$ SD) 1 RM der Ellbogenbeuger vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	60
Abb. 23: Durchschnittliches ($\pm$ SD) 1 RM in der Beinpresse vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	61
Abb. 24: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	62
Abb. 25: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	63

Abb. 26: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 60°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	64
Abb. 27: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der linken Ellbogenbeuger am isokinetischen Dynamometer bei 60°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe.....	65
Abb. 28: Durchschnittliches ($\pm$ SD) konzentrisches Drehmomentmaximum der Kniestrecker am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe	66
Abb. 29: Durchschnittliches ($\pm$ SD) exzentrisches Drehmomentmaximum der Kniestrecker am isokinetischen Dynamometer bei 30°/s vor und nach der vierwöchigen Trainingsphase in der TRAD- und MDS-Gruppe	67

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physische Daten der Probanden vor Beginn der Trainingsphase.....	48
Tabelle 2: Prozentuelle Veränderungen der Testleistungen nach vierwöchigem Training.....	59

12 Zusammenfassung

Der Aufenthalt in der Schwerelosigkeit führt zu strukturellen und funktionellen Adaptionen der Skelettmuskulatur. Bereits nach kurzer Zeit kommt es zu einem Verlust an Muskelmasse und –kraft. Durch regelmäßiges Krafttraining an speziellen Geräten kann der Verlust derzeit zwar vermindert, jedoch nicht aufgehalten werden. Um dem großen Ziel der Raumfahrt, dem bemannten Flug zum Mars, näher zu kommen, müssen die Trainingsmethoden und Geräte weiter verbessert werden. Einen Schritt in diese Richtung versucht das österreichisch-russische Projekt MDS (Multifunktional Dynamometer for Application in Space) zu setzen. Das MDS ist ein Trainingsgerät, welches speziell für den Einsatz bei Langzeitmissionen im Weltraum konstruiert wurde. Der entscheidende Vorteil des MDS besteht darin, dass damit prinzipiell beliebige Kraftverläufe während dem Training erzeugt werden können. So kann zum Beispiel mit exzentrischer Mehrbelastung trainiert werden. Viele Studien deuten darauf hin, dass die exzentrische Bewegungsphase eine besondere Bedeutung bei der Steigerung von Muskelkraft und –masse hat.

Im empirischen Teil dieser Arbeit wurde das MDS in einer vierwöchigen Trainingsstudie getestet und mit traditionellem Krafttraining (TRAD) verglichen. Es nahmen 16 männliche Probanden im Alter von 19 bis 36 Jahren teil, wobei acht davon mit dem MDS und acht weitere mit traditionellen Krafttrainingsgeräten trainierten. In den ersten zwei Wochen wurden zwei Mal wöchentlich zwei Sätze zu 15 Wiederholungen Kniebeugen und Ellbogenbeugen durchgeführt. Die exzentrische Last betrug dabei in der MDS-Gruppe 140 Prozent der konzentrischen Last. In den Wochen drei und vier wurden bei der Ellbogenbeuger- Übung nur mehr 10 Wiederholungen durchgeführt und die exzentrische Last wurde in der MDS- Gruppe auf 170 Prozent der konzentrischen Last gesteigert. Das Trainingsgewicht wurde in jeder Einheit derart angepasst, dass die Absolvierung der vorgegebenen Anzahl an Wiederholungen gerade möglich war. Getestet wurden das konzentrische Einwiederholungsmaximum in der Beinpresse sowie an einer Bizeps-Maschine sowie die konzentrische und exzentrische isokinetische Maximalkraft der Kniestrecke und Ellbogenbeuger vor und nach der Trainingsphase.

Das vierwöchige Training führte im Mittel über alle Tests zu vergleichbaren Steigerungen von 10% in der MDS- und 8,8% in der TRAD-Gruppe. Die Zuwächse waren dabei bei drei Tests in der TRAD-Gruppe und einem Test in der MDS-Gruppe signifikant. In keinem der acht Tests gab es einen signifikanten Unterschied in den Zuwächsen.

13 Abstract

Microgravity leads to structural and functional adaptations of the skeletal muscle. Within a short time in space there is a loss of muscle-mass and -strength. Resistance training on special devices is the most common way to reduce these losses but yet it is not possible to fully avoid this loss. The biggest aim of the space agencies in future is the interplanetary travel to mars. Therefore training devices have to get better. One innovation is the MDS (Multifunctional Dynamometer for Application in Space), which is developed by an Austrian-Russian cooperation. The biggest advantage of this device is the variety of training-modes that can be performed on it. Especially it offers an eccentric-enhanced training. Many studies have shown that the eccentric part of the movement plays an important role for increasing strength and mass of the muscle.

The empiric part of this paper is about a four week study where training on the MDS has been compared to traditional training (TRAD). Therefore 16 male subjects at the age of 19 to 36 were parted into two groups of eight men to MDS- or TRAD-training performing squats and elbow-flexions. At the beginning, both groups trained with two sets of 15 repetitions to muscular fatigue twice a week. The eccentric load was set at 140% of the concentric load in the MDS-group. In week three and four, weights were increased for elbow-flexion so that ten repetitions could be performed and the eccentric load was set to 170% for this exercise. Strength testing included measuring of concentric one repetition maximum on a leg press and a biceps-machine and measuring of isokinetic peak forces of the knee extensors and elbow flexors pre- and posttraining.

After four weeks of training there were comparable average increases in strength of 10% in the MDS- and 8,8% in the TRAD-group. One test in the MDS-group and three tests in the TRAD-group showed significant increases. There was no significant difference in the increases in any test between the groups.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Christian Polt
Geboren am: 16.11.1984 in Gmünd (NÖ)

Schul Ausbildung:

1991 - 1995 Volksschule Schrems
1995 - 2003 Realgymnasium Gmünd
06/2003 Reifeprüfung

Präsenzdienst:

07/2003 - 02/2004 Allentsteig/ Kaufholz

Studium:

Seit 03/2004 Lehramt mit der Fächerkombination Bewegung und Sport und Physik an der Universität Wien

Fremdsprachen: Englisch, Russisch

Zusatzausbildung: Skiinstruktor

Sonstige Tätigkeiten:

Seit 2003 Kinder- und Jugend-Skitrainer sowie Skilehrertätigkeit beim SC Nordwald
2002 – 2004 Kinder- Tennistrainer beim ASV Schrems