

Aus der Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin
Zentrum für Muskel- & Knochenforschung

DISSERTATION

**Einfluss von Krafttraining auf die
muskuloskeletale Morphologie und Funktion
während Bettruhe**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Ulf Gast

aus Templin

Datum der Promotion: 25. Oktober 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
1.1. Abstrakt	
Abstrakt Deutsch	3
Abstrakt Englisch	4
1.2. Abkürzungsverzeichnis	5
1.3. Einführung	6
1.4. Methodik	7
1.4.1. Studiendesign	7
1.4.1.1. Berliner Bedrest-Studie 1	9
1.4.1.2. Berliner Bedrest-Studie 2	10
1.4.2. Statistik	13
1.5. Ergebnisse	13
1.6. Diskussion	16
1.7. Literaturverzeichnis	20
2. Eidesstattliche Versicherung	21
3. Anteilserklärung	22
4. Publikationen	
4.1. <i>Short-duration resistive exercise sustains neuromuscular function after bed rest</i>	
4.2. <i>Changes in lower extremity muscle function after 56 days of bed rest</i>	
4.3. <i>Countermeasures against lumbar spine deconditioning in prolonged bed rest: resistive exercise with and without whole body vibration</i>	
5. Lebenslauf	23
6. Publikationsliste	24
7. Danksagung	25

1. Zusammenfassung

1.1. Abstrakt

Deutsch

Schwerelosigkeit und längere Bettruhe führen zu Muskelatrophien im posturalen System und vermindern dessen neuromuskuläre Leistungsfähigkeit und lokomotorische Kompetenz. Morphologische Anpassungen an die reduzierten muskulären Kräfte führen zudem zu Schmerzen, zumeist im Lumbalbereich. Muskel- und Knochenabbau sind erhebliche Limitationen geplanter Langzeitmissionen im All. Bisher auf der ISS eingesetzte Laufbänder und Fahrradergometer konnten diese Probleme nicht lösen. Die Untersuchung von Effekten eines neu entwickelten Krafttrainings auf Veränderungen der Skelettmuskulatur und alltagsrelevante Funktionen war Ziel der durchgeführten Bedrest-Studien.

In die *Berliner Bedrest-Studie 1 (BBR 1)* wurden 20 männliche Probanden eingeschlossen. Während 56-tägiger Bettruhe trainierten 10 Probanden 2-mal täglich liegend mit einem Vibrationstrainingsgerät bei submaximaler Intensität. 10 Probanden der Kontrollgruppe trainierten nicht. Vor und nach der Liegephase wurden die isometrischen Kräfte der Plantarflexion (IPFF) sowie die maximale Leistung und Sprunghöhe beim counter-movement jump getestet. Gleichzeitig wurden Spannungszustände der eingesetzten Muskulatur mittels Elektromyographie (EMG) gemessen und ein EMG/Kraft-Quotient ermittelt.

Die IPFF (-17,1%), die maximale Sprungleistung (-24,1%) und die Sprunghöhe (-28,5%) nahmen in der Kontrollgruppe ab ($p < 0,05$). Für die Abnahme des EMG/Kraft-Quotienten (-20%) gab es einen Trend ($p = 0,051$). In der Interventionsgruppe konnte das Vibrationstraining die IPFF erhalten und Verluste der Sprungleistung (-12,2%) und Sprunghöhe (-14,2%) reduzieren.

In der *Berliner Bedrest-Studie 2 (BBR 2)* lagen 24 Probanden 60 Tage in 6° Kopftieflage. Die Probanden der Interventionsgruppen führten ein hochintensives Widerstandstraining ohne (RE; $n=8$), beziehungsweise mit Ganzkörpervibration (RVE; $n=7$) durch. Zur Erhöhung von Compliance und Effizienz wurde im Gegensatz zur BBR 1 die Belastungszeit auf drei mal 6 Minuten pro Woche reduziert. Die Kontrollgruppe (CTR; $n=9$) trainierte nicht. Die intervertebrale Morphologie und die vertebrale Muskelquerschnittsflächen (CSA) wurden in 28-tägigen Intervallen mittels Magnetresonanztomographie gemessen. Ein neuromuskuläres Assessment auf einer Kraftmessplatte, Kurzsprints über 15m und 30m sowie ein Maximalkrafttest auf einer Beinpresse wurden vor und direkt nach der Immobilisation durchgeführt.

Das Training verhinderte den Leistungsverlust bei Aufstehetests aus 30cm ($p < 0,001$) und 45cm ($p = 0,034$) Sitzhöhen, den Anstieg der Sprintzeiten über 15m ($p = 0,037$) und 30m ($p = 0,005$), sowie Verluste der Maximalkraft ($p < 0,001$), maximalen Sprungleistung und Sprunghöhe ($p < 0,001$). Die Interventionsgruppen zeigten eine geringere Abnahme der CSA in den Mm. multifidii, M. erector spinae und M. quadratus lumborum, sowie Zunahmen in den Mm. psoas major und minor ($p \leq 0,004$). Die Trainingsinterventionen zeigten keine Effekte auf Veränderungen der spinalen Morphologie ($p \geq 0,22$).

Die in diesem Zusammenhang erstmals untersuchten Trainingsinterventionen konnten die muskulären Atrophien und Funktionsverluste während Immobilisation deutlich verringern. Die Integration der Trainingsregime in den klinischen Alltag und bemannte Weltraummissionen werden Ziele weiterer Forschung sein.

English

Weightlessness and prolonged bed-rest result in postural muscle atrophy and decreases in neuromuscular performance. Adaptations to the reduced muscular forces during bed-rest can also lead in lower back pain. Muscle and bone loss are particular concerns for planned long term spaceflight missions. Presently on the International Space Station treadmills and bicycle ergometers are implemented, but cannot prevent all the detrimental effects of spaceflight. The aim of the bed-rest studies implemented by the Center of Muscle and Bone Research was investigation of effects of resistive exercise with and without whole-body vibration during prolonged immobilization (bed-rest).

In the 1st *Berlin BedRest Study (BBR1)* 20 male subjects were included. During 56-day bed-rest 10 subjects conducted resistive vibration exercise two times daily in the supine position near maximal intensity. 10 subjects in the control group did not exercise. Isometric plantar flexion forces (IPFF), maximum power and jump height during countermovement jumping (CMJ) were tested before and after bed-rest. During CMJ, electromyography (EMG) of the lower-limb muscles and a EMG/Force quotient was calculated. IPFF (-17.1%), jump peak power (-24.1%) and jump height (-28.5%) decreased in the control group ($p < 0,05$) and there was a trend ($p = 0,051$) for decreased in EMG/Force-Quotient (-20%) in this group. In the RVE group IPFF was preserved and losses in peak jump power (-12.2 %) and jump height (-14.2%) were reduced.

In the 2nd *Berlin BedRest Study (BBR2)* 24 subjects underwent in 60-day 6° head down tilt bed-rest. Subjects in intervention groups conducted a high load resistant training without (RE, $n = 8$) or with whole body vibration (RVE, $n = 7$). To assess efficiency, the training frequency was reduced to 3 times per week each with 6 minutes of actual loading. Control group (CTR, $n = 9$) did not exercise. Intervertebral morphology and vertebral muscle- cross sectional area (CSA) was measured with magnetic resonance imaging before, at mid- and end-bed-rest. Neuromuscular assessments on a ground reaction force platform, 15m and 30 m sprints, and a one repetition maximum leg-press test were performed before and after immobilisation. Training (RE and RVE pooled) prevented losses in sit-to-stand tests from 30cm ($p < 0,001$) and 45cm ($p = 0,034$) sitting heights, increases in 15m ($p = 0,037$) and 30m ($p = 0,005$) sprint time, as well as loss in CMJ peak force ($p < 0,001$), power ($p < 0,001$) and height ($p < 0,001$). The intervention groups shows less decreases in size of the multifidus, lumbar erector spinae and quadratus lumborum muscles, with greater increases in psoas major and minor muscles ($p \leq 0,004$). The exercise interventions had no effects to changing in spinal morphology ($p \geq 0,22$).

The current studies represent the first implementations of resistive vibration exercise in bed-rest and these regimes were able to reduce muscle atrophy and losses in function due to immobilisation. Integration in clinical practice and manned spaceflight will be an aim of further research.

1.2. Abkürzungsverzeichnis

BBR 1	Berliner Bedrest-Studie 1
BBR 2	Berliner Bedrest-Studie 2
BDC	<i>baseline data collection</i>
BR	<i>bedrest</i>
CMJ	<i>counter movement jump</i>
CRT	<i>chair rising test</i>
CSA	<i>cross-sectional area</i>
CTR	<i>control</i> (inaktive Kontrollgruppe)
EMG	<i>electromyography</i>
ES	<i>M. erector spinae</i>
GRFP	<i>ground reaction force platform</i>
HDT	<i>head-down tilt</i>
H _{jump}	Sprunghöhe des counter movement jump
IPFF	<i>isometric plantar flexion force</i>
LBP	<i>lower back pain</i>
LWS	Lendenwirbelsäule
MF	<i>M. multifidus</i>
MRT	Magnetresonanztomographie
P _{peak}	maximale Leistung pro Körpermasse (W/kg) beim counter movement jump
PS	<i>M. psoas</i>
QL	<i>M. quadratus lumborum</i>
RE	<i>resistance exercise</i> , Krafttraining
RMS	<i>root mean square</i>
RVE	<i>resistance vibration exercise</i> , Krafttraining mit Vibration
R+ 180	<i>recovery +180 days after bedrest</i> , 180 Tage nach dem Tag des Aufstehens
VAS	<i>visual analog scale</i>
1 RM	<i>one repetition maximum</i>

1.3. Einführung

Während des Aufenthaltes in schwerkraftverminderter Umgebung kommt es zu Anpassungen des menschlichen Organismus. Diese zeigen sich z.B. in Skelettmuskelatrophie infolge der fehlenden Kraftentwicklung (1), in Muskelschwäche und Knochenverlust (2) insbesondere im Bereich des posturalen Systems. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen führen die Knochendichteabnahme und der Muskelfunktionsverlust beim Wiedereintritt in ein Gravitationsfeld (Mars, Erde) zu erhöhter Sturz- und Frakturwahrscheinlichkeit. Somit sind Muskel- und Knochenverlust wesentliche Limitationen bemannter Langzeitmissionen im All.

Durch Unfall oder Krankheit bedingte Immobilisation führt zu vergleichbaren Befunden wie der Aufenthalt in schwerkraftverminderter bzw. -freier Umgebung (3, 4). Krafttraining im Bett findet in den Behandlungsleitlinien wenig Eingang und somit in der Therapie de facto nicht statt (5). Jedoch sind die in der Zeit der Bettlägerigkeit progressiv anwachsenden Defizite regelmäßig nur unzureichend aufzuarbeiten und erschweren die Rehabilitation erheblich. Dies ist sicher auch ein Grund für das hohe Risiko von Folgefrakturen und der ansteigenden Mortalitätsrate nach Frakturen.

Längerfristige kontrollierte Bettruhe hat sich zur Simulation von Schwerelosigkeit (6) und Bettlägerigkeit bewährt. Kopftieflage erzeugt darüber hinaus eine dem All ähnliche Kreislauf- und Flüssigkeitssituation.

Bedrest-Studien bieten die Möglichkeit, Wirkungen von Immobilität auf das muskuloskeletale System zu untersuchen und Effekte von Interventionen kontrolliert zu erfassen.

Da der Verlust muskulärer Leistungsfähigkeit während Immobilisation sowohl Ergebnis neuronaler Defizite der zentralen Aktivierung (7) als auch muskulärer (kontraktiler) Faktoren im engeren Sinne ist (3), müssen Trainingsmittel und Trainingsmethodik darauf fokussieren.

Sowohl der Einsatz von dynamischem Krafttraining als auch das Ganzkörper-Vibrationstraining lieferten bereits positive Ergebnisse. In verschiedenen Studien wurden Steigerungen neuronaler Aktivität bei Vibrationstraining im Vergleich zu klassischem Krafttraining festgestellt (8).

Vibrationen lösen über das Golgi-Sehnen-Organ und die Muskelspindel Reflexsignale im Rückenmark aus. Dadurch gesteigerte Dehnungs-Verkürzungs-Zyklen führen über mono- und polysynaptische Reflexe zur hochfrequenten neuronalen Aktivierung (9).

Die Erhöhung der Stimuli erhöht die Zahl der rekrutierten motorischen Einheiten. Aktivierende und hemmende Reflexe nehmen gleichermaßen zu. Letztlich erhöht sich die Zahl der unwillkürlich ausgelösten Muskelkontraktionszyklen um die eingesetzte Wiederholungsrate (Hertz) solange, bis die Reize nicht mehr vollständig verarbeitet werden können. Es werden Kontraktionsraten möglich, die zentral nicht aktivierbar sind. In Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz begünstigt der Einsatz dieser Methode die Muskelhypertrophie und/oder die Verbesserung der intra- und intermuskulären Koordination.

Ein hochintensives Hypertrophietraining in Kombination mit Vibrationsreiz als Maßnahme gegen Muskelatrophie und neuromuskulären Funktionsverlust wurde in Bettruhestudien bisher nicht eingesetzt. Wir erwarteten durch die Kopplung eine frühere und größere Erschöpfung der Arbeitsmuskulatur.

Ziel der dargestellten Arbeiten war es, die Wirkungen von Bettruhe auf die Muskelmorphologie und die Leistung des neuromuskulären Systems während motorisch einfacher und komplexer Bewegungsabläufe herauszustellen. Zudem sollte untersucht werden, inwieweit Effektstärken durch ein speziell konzipiertes Krafttraining mit oder ohne Vibration beeinflusst werden.

1.4. Methodik

1.4.1. Studiendesign (soweit übereinstimmend für beide Studien):

Die *Berliner Bedrest-Studien* waren randomisierte, prospektive Interventionsstudien, die in der Charité- Campus Benjamin Franklin durchgeführt wurden. Beide Studienprotokolle sind von der zuständigen Ethikkommission überprüft und genehmigt worden. Alle Studienteilnehmer erklärten schriftlich ihr Einverständnis. Die Studienteilnehmer wurden in einem mehrstufigen medizinischen und psychologischen Auswahlverfahren rekrutiert. Die anthropometrischen Daten der Probanden sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Die Werte für Alter, Größe und Gewicht sind Mittelwerte (\pm SD)

Studie	BBR 1		BBR 2		
N, gesamt	20		24		
Gruppe	control	resistance vibration exercise (RVE)	control	resistance (RE)	resistance vibration exercise (RVE)
N, je Gruppe	10	10	7	8	9
Alter (Jahre)	33.4 (6.6)	32.6 (4.8)	33.1 (7.8)	31.1 (5.1)	32.2 (10.4)
Größe (cm)	185 (7)	183 (9)	181.3 (6.0)	179.3 (7.7)	179.6 85.8)
Gewicht (kg)	79.4 (9.7)	81.7 (14.4)	80.6 (5.2)	75.0 (12.8)	81.5 (6.2)

Zur Erhöhung der Compliance wurden Motivationsprofile erstellt. Leistungssportler, deren Beendigung ihrer Karriere weniger als 5 Jahre zurücklag, waren ausgeschlossen. Mittels Ultraschallmessung am Herzen und Belastungs-EKG wurden die kardiovaskuläre Unbedenklichkeit der Studienteilnahme und die Trainierbarkeit der Kandidaten sportärztlich abgeklärt.

Während der gesamten Liegephase herrschte strikte Bettruhe, welche über nachttaugliche Kameras in den Zimmern überwacht wurde. Die Einhaltung des Studienprotokolls hinsichtlich der Aufforderung an die Probanden sich, abgesehen vom Training, so wenig wie möglich zu bewegen, wurde durch Kraftsensoren in den Betten nachweisbar.

Bei den Interventionen wurden die Vibrationsgeräte Galileo Space und Galileo Space Sensor (Novotec Medical GmbH, Pforzheim, Germany) eingesetzt. Die Geräte arbeiten als seitalternierende Kippwippen mit Amplituden zwischen 1 mm – 4,5 mm. Die stufenlos regulierbaren Kräfte wurden mit den eingebauten Sensoren gemessen und über die mitgelieferte Software analysiert.

Die Lasten wurden in Abhängigkeit von der Leistungssteigerung der Probanden progressiv erhöht. Die Übungen wurden bis zur Erschöpfung durchgeführt.

Um die Intensität der Belastung zu überwachen, wurden regelmäßig Blutlaktat-Level während des Trainings ermittelt. Hierzu wurde aus dem Ohrläppchen Kapillarblut entnommen (Kits von Boehringer, Mannheim, Germany).

Zu den Messungen der isometrischen Kraft der Plantarflexoren (IPFF), der Spitzenkräfte beim Beidbeinsprung (CMJ) und bei den Aufstehetests (Sit-to-stand) wurde die Jump Mechanographie eingesetzt. Hierbei nutzten wir die zweigeteilte Bodenreaktions-Kraftmessplatte (GRFP) Leonardo (Novotec Medical GmbH, Pforzheim, Germany) und einen Multikanal Analog-Digital Wandler (PowerLab, Ad Instruments, Sydney, Australien).

1.4.1.1. Berliner Bedrest-Studie 1

An der BBR 1 nahmen 20 gesunde Männer im Alter zwischen 20 und 45 Jahren teil. Nach einer Basisdatenerhebung verbrachten die Probanden 56 Tage in Liegeposition. 10 Probanden wurden in die Interventionsgruppe (RVE), die anderen 10 in die inaktive Kontrollgruppe (CTR) gelost.

Da die detaillierte Methodik der Trainingsintervention in der Publikation 2 beschrieben ist, wird hier nur auf die Grundzüge eingegangen. Während der Phase zur Basisdatenerhebung (BDC) wurde ein Test des Ein-Wiederholungsmaximum (1RM) durchgeführt, von dem die Anfangslasten für das Training abgeleitet wurden. Vormittags trainierten die Probanden mit 75-85%, nachmittags mit 60-80% ihres 1 RM. Die Probanden trainierten zweimal täglich. Die Belastungszeit lag bei ca. 6 min in der Vormittagssession und zwischen 6-8 min in der Nachmittagssession. Die Vibrationsfrequenz lag bei 24 Hertz (Hz). Laktatmessungen fanden wöchentlich statt.

IPFF/EMG. Die willentlich maximal erreichbare Plantarflexionskraft des linken Beines wurde vor und nach der Liegephase auf einem hierfür konstruierten Dynamometer unter Einbeziehung der Kraftmessplatte (Bild 1) gemessen. Die Probanden wurden aufgefordert, ihre Ferse mit maximalem Krafteinsatz (100%) für mindestens 1s anzuheben, ohne dabei andere Gelenke wie Knie, Hüfte oder Wirbelsäule zu bewegen. Danach sollten sie die Ferse mit 75%, 50% und 25% Krafteinsatz für mindestens 2s anheben. Gleichzeitig wurde ein Elektromyogramm (EMG) der Wadenmuskulatur mittels bipolarer Elektroden (Dahlhausen, Köln, Germany) abgeleitet. Durch die gleichzeitige Messung von Erregungspotentialen und Bodenreaktionskräften konnten EMG/Kraft-Gradienten ermittelt werden.

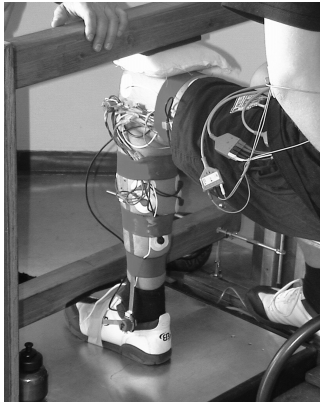


Bild 1. *Dynamometer zur Messung der IPFF.*

Das Knie ist eingespannt in einen Rahmen und der Fuß steht auf der Bodenreaktionsplatte. Knie- und Fußgelenkwinkel betragen 90°. Auf die Muskelbäuche des *M. soleus*, des lateralen und medialen *M. gastrocnemius* sind Elektroden aufgeklebt. Am Sprung- und Kniegelenk sind lateral Goniometer (Winkelmesser) angebracht.

CMJ. Während der Basisdatenerhebung und direkt nach dem Aufstehen wurden counter movement jump Tests durchgeführt. Pro Messung wurden 12 Einzelsprünge auf der Kraftmessplatte ausgeführt. Die Probanden sprangen 25%, 50%, 75% und 100% der selbst eingeschätzten maximalen Sprunghöhe. Um intraindividuell veränderte Techniken nach der Bettruhe, z.B. eine tiefere Kniebeugeposition, auszuschließen, wurden wie bei der Messung der IPFF Goniometer benutzt. Gemessen wurden die maximale Sprunghöhe (H_{jump}) und die maximale Leistung bezogen auf das Körpergewicht (P_{peak}).

1.4.1.2. Berliner Bedrest-Studie 2

Studiendesign und Training. An der Berliner Bedrest-Studie 2 (BBR 2) nahmen 24 medizinisch und psychologisch gesunde Männer teil. Es erfolgte die Randomisierung der Probanden in 3 Gruppen; eine Vibrations-Widerstands-Gruppe (RVE; n=7), eine Widerstandsgruppe (RE; n=8) und eine inaktive Kontrollgruppe (CTR; n=9). Die 60-tägige Liegezeit verbrachten die Probanden in 6° Kopftieflage (HDT).

Alle Interventionen der BBR 2 fanden auf dem Galileo Space Sensor (Bild 2) statt. Da die detaillierte Methodik der Trainingsintervention in Publikation 1 beschrieben ist, wird hier nur auf die Grundzüge eingegangen. Das mit dem Ziel der Hypertrophie konzipierte Training wurde während der HDT-Phase 3 mal pro Woche durchgeführt. Die Belastungszeit pro Trainingssession lag zwischen 5-6 Minuten. Die Laktat-Level wurden 14-tägig bestimmt.

1 RM. An BDC-2 und R+2 wurde das Einwiederholungsmaximum einer Beinpressübung (leg press) liegend auf dem Trainingsgerät getestet. Hierbei wurde eine Kniebeuge simuliert. Der Widerstand lag anfangs bei ca. 70 % des erwarteten Maximums. Jeweils nach Bewältigung der Last wurde diese um 5% erhöht. Der letzte bewältigte Versuch an BDC-2 diente als 100% Referenzwert für die Trainingslasten während Bettruhe.



Bild 2. Proband trainiert in 6° HDT auf dem Galileo Space Sensor. Die Lasten lagen in beiden Interventionsgruppen zu Beginn bei 75 % des 1 RM. Bei der RVE Gruppe vibrierte die Standfläche während der Übungen zusätzlich mit Frequenzen zwischen 18 und 24 Hz.

Bandscheibenmorphologie und Muskel-CSA. In der BDC-Phase, an Liegetag 27/28 und an Liegetag 55/56 wurden zur Messung der vertebrealen Morphologie (Bild 3) und der Muskelquerschnittsflächen (Bild 4) Magnetresonanztomographien (MRT; 1,5 Tesla Siemens Avanto, Erlangen, Deutschland) der Wirbelsäule von BWK 10 bis einschließlich SWK 1 durchgeführt. Zu Schichtdicken, Wiederholungszeiten und Echozeiten siehe Publikation 3.

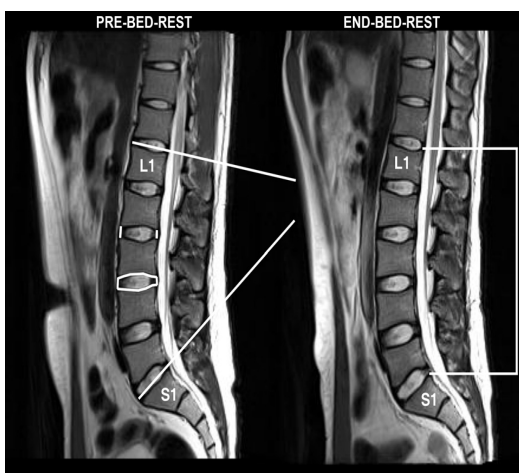


Bild 3. Messung der Bandscheibenmorphologie. Die Bandscheibenhöhe wurde anterior und posterior gemessen und das Volumen der Bandscheibe über die sagittale Flächenansicht interpoliert. Der Lordosewinkel wurde durch die Verlängerung der oberen Deckplatten von L1 und S1 bestimmt. Die Wirbelsäulenlänge wurde als Abstand zwischen Deckplattenhinterkante L1 und Deckplattenhinterkante S1 bestimmt.

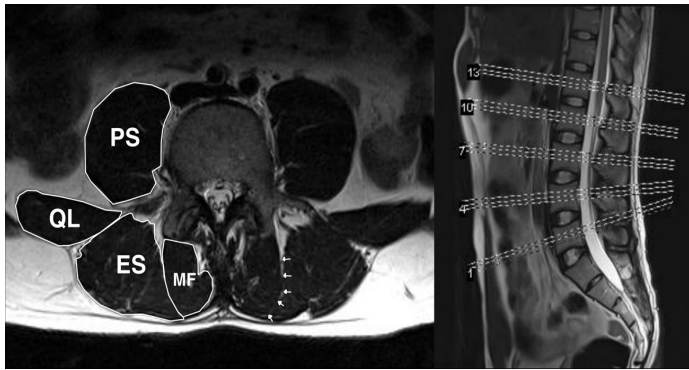


Bild 4. *Messung der Muskel-CSA*

Linke Seite: Querschnitte des M. psoas (PS), des M. erector spinae (ES) und des M. multifidus (MF).

Rechte Seite: Je drei Schichten in Höhe von L1 bis L5 wurden analysiert

CMJ. Beim Beidbeinsprung wurden die maximale Sprunghöhe und die maximale Leistung an BDC-7 und BDC-2, direkt nach dem Aufstehen an R+1 und an R+2, R+5, R+14 und R+90 bestimmt. Um Sprungleistungen zwischen Probanden vergleichen zu können, wurden diese auf deren Körpergewicht bezogen.

Sit-to-stand. Bei Aufstehtests sollten die Probanden fünf mal, so schnell wie möglich, aus einer Sitzhöhe von 45cm (Test 1) und zehn mal, so schnell wie möglich, aus einer Sitzhöhe von 30cm (Test 2) aufstehen. In einem weiteren Versuch (Test 3) sollten die Probanden versuchen aus abnehmenden Sitzhöhen mit einem Bein aufzustehen. Beginnend bei 45cm Sitzhöhe wurde in 5cm Intervallen die Sitzbank so lange abgesenkt, bis der Proband nicht mehr in den Stand kam.

Test 1 war der in der Geriatrie etablierte Chair Rising Test (CRT). Dieser wurde für die beiden anderen Tests an die „junge“ Probandenauswahl angepasst. In Test 1 und 2 wurden Zeit und Kraft gemessen und die Leistung berechnet. In Test 3 wurde die minimal bewältigte Sitzhöhe ausgewertet.

15 m und 30 m Sprints wurden an BDC-2 und R+1 jeweils im Anschluss an die sit-to-stand Tests durchgeführt. Die Probanden durchliefen zwei Lichtschranken (TC-Timing Center, Brower Timing Systems, Salt Lake City, Utah, USA), die Start und Ziel markierten.

1.4.2. Statistik

Um den Einfluss der Interventionsprogramme auf die Zielparameter zu testen, wurden linear-mixed-effects models mittels G*Power (Version 3.1.2; <http://www.psych.uni-duesseldorf.de/abteilungen/aap/gpower3>) berechnet. Für weitere statistische Analysen zu Gruppenunterschieden und Zeiteffekten wurden Varianzanalysen (ANOVA) mittels Microsoft Excel (Redmond, WA), SPSS (Chicago, IL; Version 13), and JMP (SAS Institute, Cary NC; Version 8) durchgeführt. Ein α von 0,05 wurde als Signifikanzlevel verwendet.

1.5. Ergebnisse

BBR 1

Hinsichtlich Alter und anthropometrischer Werte der Probanden gab es an BDC-2 keine Unterschiede zwischen den zwei Gruppen. Auch im Verlauf gab es keine Unterschiede in den Körpermassen beider Gruppen. Alle 20 Teilnehmer beendeten die Bettruhe-Phase und die relevanten Nachuntersuchungen.

IPFF. Vor der Bettruhe unterschieden sich die maximalen isometrischen Plantarflexionskräfte zwischen den Gruppen nicht. Es zeigte sich jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen im Verlauf ($p = 0,0032$). Nach Bedrest (R+1, vormittags) war die IPFF in der Kontrollgruppe um 17,1% ($p = 0,002$) verringert. In der RVE-Gruppe fand sich keine Abnahme ($p = 0,73$). Bei den Messungen am Abend (R+1, nachmittags) verringerte sich die IPFF in beiden Gruppen signifikant.

EMG und neuromuscular drive. An BDC und R+1 fand sich ein starker linearer Zusammenhang zwischen IPFF und den aus den EMG ermittelten root mean square (RMS) in beiden Gruppen. Die Wiederholungsmessung zeigte keine Unterschiede im RMS/Force Gradienten zwischen den beiden Gruppen im Verlauf. ($p = 0,117$). Die EMG-Amplitude während maximaler IPFF änderte sich in keiner Gruppe signifikant (CTR: $p = 0,157$; RVE: $p = 0,697$).

CMJ. Bei der Mechanographie des Beidbeinsprungs zeigten beide Gruppen im Verlauf signifikante Verluste an maximaler Sprunghöhe und Sprungleistung bezogen auf die Körpermasse. An R+1 lag der Verlust an P_{peak} in der Kontrollgruppe im Vergleich zur BDC- Messung bei 24,1%; die RVE-Gruppe verlor 12,2%. Die Sprunghöhenverluste waren hiermit vergleichbar (CTR: -28.5%; RVE: -14,2%).

BBR 2

Zu Studienbeginn gab es keine Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich Muskelquerschnittsdaten, morphologischer Daten der Wirbelsäule und neuromuskulärer Parameter. Ein Teilnehmer (RE-Gruppe) schied aufgrund medizinischer Gründe in der Bedrest Phase aus. Ein weiterer Proband (CTR-Gruppe) absolvierte nur die R+1 Messungen. An R+2 konnte ein Proband (CTR-Gruppe) wegen Muskelschmerzen die CMJ nicht durchführen.

Zwei Probanden (RE-Gruppe; CTR-Gruppe) kamen ab R+90 nicht mehr zu den Untersuchungen.

1 RM. Im Verlauf der Studie erhöhten sich die Trainingslasten bei der beidbeinigen leg-press Übung. Zwei Tage nach dem Aufstehen (R+2) war das 1RM der leg-press in der Kontrollgruppe im Vergleich zum Test vor Bedrest (BDC-2) signifikant verringert ($p=0,00001$). Es gab keine Veränderung in der RE-Gruppe ($p=0,37$) und eine Erhöhung in der RVE-Gruppe ($p=0,0045$). Während die Unterschiede beider Trainingsgruppen verglichen mit der Kontrollgruppe signifikant waren ($p\leq 0,0006$), gab es zwischen RE- und RVE- Gruppe keine Signifikanz ($p=0,065$).

CSA. Die Intervention reduzierte den Muskelquerschnittsverlust in den Mm. multifidii, M. erector spinae and M. quadratus lumborum. In beiden Trainingsgruppen vergrößerte sich der M. psoas. Für die CSA Änderungen gab es eine geringe statistische Evidenz für einen zusätzlichen Effekt der Vibration gegenüber dem alleinigen Widerstandstraining.

Vertebrale Morphologie. Alle untersuchten Parameter der Bandscheiben zeigten signifikante Veränderungen während Bedrest ($F_{all} \geq 6,7$, $P \leq 0,003$). Die Gegenmaßnahmen beeinflussten diese Änderungen nicht. Es gab eine Verringerung der lumbalen Lordose mit einer Verlängerung der Lendenwirbelsäule (LWS) und eine Zunahme der Bandscheibenhöhen anterior und posterior. Die Anstiege der Bandscheibenvolumina waren in allen Gruppen signifikant. Nach partiellen Korrelationsanalysen war die CSA-Zunahme im M. psoas nicht durch die vertebrale Längenzunahmen, die Höhen- und Volumenzunahmen der Bandscheiben oder die Verringerung der LWS-Lordose zu erklären. Die Wirbelsäulenverlängerung zeigte nur einen schwachen Zusammenhang mit der Abnahme der QL-CSA und keine Korrelation für ES-CSA und MF-CSA.

CMJ. Die auf die Körpermasse bezogene Spitzenleistung P_{peak} des Beidbeinsprungs, die Beschleunigung und die Sprunghöhe H_{jump} veränderten sich im Studienverlauf signifikant. Die Differenzen zwischen den Trainingsgruppen und der Kontrollgruppe waren signifikant ($p < 0,001$). Die Kontrollgruppe verlor an R+1 und R+2 am stärksten. Vierzehn Tage nach Bettruhe (R+14) zeigten sich die Verminderungen nur noch in der CTR-Gruppe. An R+90 waren alle Gruppen auf dem Ausgangsniveau. Die in der Kontrollgruppe aufgetretenen Verluste wurden in RE und RVE verhindert.

Sit-to-stand. Die benötigten Zeiten bei den Aufstehetests aus 45 cm und aus 30 cm Sitzhöhen waren nach Bedrest in der Kontrollgruppe signifikant erhöht.

In den Trainingsgruppen waren die Aufstehzeiten nicht signifikant verändert. Der Unterschied zwischen den zwei Trainingsgruppen und der Kontrollgruppe war signifikant, jedoch nicht der Vergleich der Trainingsgruppen untereinander. Beim einbeinigen Aufstehetest (Test 3) konnte die Kontrollgruppe die zur BDC ermittelten Sitzhöhen nach der Liegephase bis R+14 nicht mehr erreichen. Die Trainingsgruppen waren nach der Liegephase besser als vorher, aber nur der Unterschied zwischen RE und CTR war signifikant ($p = 0,023$).

15 m und 30 m Sprints. In allen Gruppen kam es zu einer signifikant erhöhten Zeit nach Bedrest bei den Sprinttests über 15 m und 30 m, mit einer statistisch geringeren Zunahme der Zeit von RE gegenüber CTR.

Die **Blut-Laktatwerte** während und nach der leg-press Übung erhöhten sich mit zunehmender Bettruhezeit ($p < 0,0001$). Zwischen den Trainingsgruppen gab es keinen Unterschied in diesem Anstieg ($p = 0,35$).

1.6. Diskussion

Studien in tatsächlicher Schwerelosigkeit sind teuer und nur wenige Probanden können gleichzeitig untersucht werden. Unsere Studien haben durch die Ergebnisse in den Kontrollgruppen gezeigt, dass strikte Bettruhe ein ähnlich aussagekräftiges Instrument ist, um (negative) Anpassungen an ausbleibende Stimuli quantifizieren zu können und weitere Erkenntnisse über Muskel- und Knocheninteraktionen zu generieren

Das Training verringerte die paravertebrale Muskelatrophie, aber dieser Effekt beeinflusste nicht alle Teile der paravertebralen Muskeln in gleichem Maße. Während die Querschnitte der MF, ES, und QL in allen Gruppen abnahmen, hypertrophierte der M. psoas. Nach Weltraumaufenthalt fand man dagegen Volumenabnahmen des M. psoas. (10) Diese Differenz deutet darauf hin, dass die Immobilisation im Bett die Situation im All nicht vollständig zu simulieren vermag. Es ist wahrscheinlich, dass die Zunahme Ergebnis ungewohnter Bein- und Hüftbewegungen im Liegen ist.

Aus unseren Daten ergeben sich wirksame Übungen zur Verhinderung von Muskelatrophien während Bettruhe. Erkenntnisse zu Dauer und Häufigkeit der Intervention lassen sich aus dem Vergleich beider Bedrest-Studien gewinnen.

Das Training in der BBR 1 führte mit 11 Trainingseinheiten pro Woche zu einem Verlust von 7,6% im CSA-MF in der RVE-Gruppe, während die Verluste in der BBR 2 mit nur drei Trainingseinheiten pro Woche in der RE-Gruppe bei 5,6% und in der RVE-Gruppe bei 4,1% lagen. Auch andere Arbeiten unterstützen die Erkenntnis, dass ein Training während Bettruhe nicht täglich durchgeführt werden muss, um ähnlich starke Effekte auf die Verhinderung des Muskelverlustes zu erreichen. Weitere Arbeiten zur LWS und zu den unteren Gliedmaßen deuten auf eine Überlegenheit hochintensiven Trainings (sei es mit oder ohne Vibration) gegenüber Krafttrainingsansätzen mit geringen und mittleren Lasten hin.

Die starke Korrelation zwischen Muskelatrophie und Muskelleistung zeigt, dass Muskelverlust die Hauptursache für den nach Bettruhe beobachteten Funktionsabfall ist.

Wie erwartet kam es in der Kontrollgruppe der BBR 1 zu einem signifikanten Verlust an Plantarflexionskraft. Ähnlich hohe Verluste (-17%) zeigten sich in der isometrischen Kraft der Knieextensoren dieser Probanden nach Bedrest.

Weil die Muskelatrophie den Verlust an isometrischer Muskelkraft in der Kontrollgruppe nicht vollständig erklärt, ist zu vermuten, dass die Kraftminderungen zusätzlich auf neuromuskulären Effizienzverlusten beruhen. Die Verringerung (-12%) der maximalen EMG-Amplitude und die Erhöhung des EMG-Kraft Gradienten (21%) deuten auf einen Zusammenhang hin. Die Ergebnisse bleiben als Trend aber deutlich hinter den in der Schwerelosigkeit gemessenen Werten zurück.

Die Sprungkraft veränderte sich hingegen sowohl in der Kontroll- als auch in der Trainingsgruppe nicht.

Das Krafttraining beider Studien verringerte zwar die Abnahme der Spitzenleistung und der maximalen Sprunghöhe beim CMJ im Vergleich zur Kontrollgruppe, konnte die Verluste an Ppeak und Hjump, die in beiden Studien ähnlich waren, aber nicht vollständig verhindern.

Auch wenn die Sprintzeiten der Trainingsgruppen sich nach Bedrest signifikant von denen der Kontrollgruppe unterschieden, waren diese bei beiden Krafttrainingsvarianten verschlechtert. Frühere Arbeiten zeigten auch nach kürzerer Bettruhe von 15- (11) oder 30 Tagen (12) Anstiege der Sprintzeiten über 30 m, die jedoch nicht signifikant waren.

Da die Energiespeicherfähigkeit der kontraktilen und elastischen Filamente erheblichen Einfluss auf Leistung und Sprunghöhe beim CMJ sowie die Sprintleistung hat, kann man bei unveränderten Kraftwerten davon ausgehen, dass sich die Energiespeicherfähigkeit während Bettruhe verschlechtert. Dies sollte auch eine Erklärung dafür sein, dass die Bettruhe zu größeren Defiziten an Leistung als an (isometrischer) Kraft führt.

In der BBR 2 wurde erstmals die Aufstehfähigkeit untersucht. Das Training beugte Verlusten sowohl beim klassischen als auch beim modifizierten CRT vor, während die inaktive Kontrollgruppe in den gleichen Tests durchgehend signifikante Verschlechterungen zeigte.

Das kurze Training der BBR 2 konnte zwar die Muskelquerschnitte, nicht aber die morphologischen Veränderungen der Bandscheiben, spinale Längenänderungen und Lordoseänderungen beeinflussen. Die zur Verfügung stehenden Daten legen aber nahe, dass hierfür ein Krafttraining an mehr als 3 Tagen in der Woche (13) und/oder für eine längere Dauer, dynamisch ausgeführt werden sollte (14).

In Arbeiten von Holguin und Walsh zeigte sich auch, dass die Wirksamkeit der Intervention, bezogen auf die vertebrale Morphologie, nicht von hohen Kräften abhängt (13, 15).

Die Trainingsgruppen beider Studien hatten nach der Liegephase weniger Verluste bei allen Messungen der Muskelkraft und Muskelleistung. Zudem regenerierten die trainierten Probanden in den Verlaufsuntersuchungen schneller. Die Trainingsgruppen erreichten die Werte der Basisdatenerhebung im CMJ und beim Sit-to-stand bereits an R+5. Die Leistungen der Kontrollgruppen blieben bis R+14 bei den Aufstehtests, und hinsichtlich Ppeak und Hjump des Beidbeinsprungs bis R+90 verringert. Dies zeigt, dass die Regeneration selbst nach 90 Tagen nicht komplett beendet ist.

Es hat sich gezeigt, dass Trainingsansätze, welche Muskelfunktionen junger, gesunder Menschen im Alltag verbessern ebenso effektiv für gesunde Menschen in Bettruhe sind. Da die Adherence abhängig von der Dauer und der Häufigkeit des Trainings ist, wird wahrscheinlich auch in Bettruhe einem kurzen Training mehr gefolgt werden als längeren und umfangreicheren Maßnahmen.

Das Trainingskonzept der BBR 1 führte, wie schon Interventionen mit dem Flywheel oder der Lower Body Negative Pressure Kammer (LBNP), in Verbindung mit Laufband oder Fahrradergometer, bei ähnlich häufiger Anwendung zu vergleichbaren Effekten. Derartige Trainingsregime sind jedoch wegen der hohen Trainingshäufigkeit (etwa 2x täglich an 7 Tagen in der Woche) weniger alltagstauglich.

In der BBR 2 hatte die Intervention mit 3 kurzen Trainings-Einheiten pro Woche vergleichbare Effekte. Eine lange Trainingsdauer war nicht notwendig, um durch Bettruhe induzierte Änderungen der neuromuskulären Funktion entgegenzuwirken und eine schnelle Regeneration danach zu ermöglichen. Da die "Fallzahlschätzung" beider Studien auf erwartete Veränderungen von Knochenparametern basierte, konnte bei der geringen Teilnehmerzahl nicht geklärt werden, ob der Einfluss des kumulativen Vibrationsreizes dem intensiven Krafttraining zusätzliche Effekte bzw. größere Effektstärken ermöglicht. Da die Knochendichtemessung gegenüber den komplexen Anforderungen bei muskulären Leistungsuntersuchungen eine relativ robuste Methode ist, bleibt die für Bedreststudien relativ große Probandenzahl von 24 Personen zur statistischen Erfassung von Unterschieden zwischen Interventionen (RVE vs. RE) teilweise zu gering.

Insofern konnte eine verstärkende Wirkung des Vibrationsreizes zur Verhinderung von neuronalen Funktionsverlusten und Funktionsverlusten durch muskuläre Querschnittsänderungen nicht nachgewiesen werden.

Jedoch haben wir mit dem sehr kurzen, aber intensiven Krafttraining, mit oder ohne Vibration, erstmalig ein effizientes Trainingsregime gegen die Veränderungen durch Bettruhe gefunden. Das Training würde eine deutliche Verringerung der Trainingszeit für Patienten und Astronauten mit sich bringen. Die Untersuchung der (technischen) Machbarkeit im All und der Integrierbarkeit in den klinischen Alltag bleibt weiteren Studien vorbehalten.

1.7. Literatur

1. Frost HM. Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal. *Anat Rec* 1987;219(1):1-9.
2. Gates S, Fisher JD, Cooke MW, Carter YH, Lamb SE. Multifactorial assessment and targeted intervention for preventing falls and injuries among older people in community and emergency care settings: systematic review and meta-analysis. *Bmj* 2008;336(7636):130-3.
3. Clark BC, Fernhall B, Ploutz-Snyder LL. Adaptations in human neuromuscular function following prolonged unweighting: I. Skeletal muscle contractile properties and applied ischemia efficacy. *J Appl Physiol* 2006;101(1):256-63.
4. Karladani AH, Svantesson U, Granhed H, Styf J. Postural control and torque of the knee joint after healed tibial shaft fracture. *Injury* 2001;32(1):57-60.
5. Leitlinien: Schenkelhalsfraktur des Erwachsenen. AWMF, http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012001l_S2e_Schenkelhalsfraktur_des_Erwachsenen.pdf. (Accessed 30.10.2012)
6. Akima H, Ushiyama J, Kubo J, et al. Resistance training during unweighting maintains muscle size and function in human calf. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(4):655-62.
7. Clark BC, Taylor JL, Hoffman RL, Dearth DJ, Thomas JS. Cast immobilization increases long-interval intracortical inhibition. *Muscle Nerve*;42(3):363-72.
8. Bosco C, Cardinale M, Tsarpela O. Influence of vibration on mechanical power and electromyogram activity in human arm flexor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1999;79(4):306-11.
9. Roelants M, Verschueren SM, Delecluse C, Levin O, Stijnen V. Whole-body-vibration-induced increase in leg muscle activity during different squat exercises. *J Strength Cond Res* 2006;20(1):124-9.
10. Gopalakrishnan R, Genc KO, Rice AJ, et al. Muscle volume, strength, endurance, and exercise loads during 6-month missions in space. *Aviat Space Environ Med*;81(2):91-102.
11. Watenpaugh DE, Ballard RE, Schneider SM, et al. Supine lower body negative pressure exercise during bed rest maintains upright exercise capacity. *J Appl Physiol* 2000;89(1):218-27.
12. Lee SM, Schneider SM, Boda WL, et al. Supine LBNP exercise maintains exercise capacity in male twins during 30-d bed rest. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(8):1315-26.
13. Holguin N, Muir J, Rubin C, Judex S. Short applications of very low-magnitude vibrations attenuate expansion of the intervertebral disc during extended bed rest. *Spine J* 2009;9(6):470-7.
14. Walsh AJ, Lotz JC. Biological response of the intervertebral disc to dynamic loading. *J Biomech* 2004;37(3):329-37.
15. Cao P, Kimura S, Macias BR, Ueno T, Watenpaugh DE, Hargens AR. Exercise within lower body negative pressure partially counteracts lumbar spine deconditioning associated with 28-day bed rest. *J Appl Physiol* 2005;99(1):39-44.

2. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Ulf Gast, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: **„Einfluss von Krafttraining auf die muskuloskeletale Morphologie und Funktion während Bettruhe“** selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

05.Dezember 2012

Datum

Unterschrift

3. Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Ulf Gast hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

Gast U, John S, Runge M, Rawer R, Felsenberg D, Belavy DL.,
Short-duration resistive exercise sustains neuromuscular function after bed rest.
Medicine and Science in Sports and Exercise, 2012

doi: 10.1249/MSS.0b013e318256b53b

Beitrag im Einzelnen:

Beteiligung am Konzept und Design der Gesamtstudie. Beteiligung am Entwurf des Studienprotokolls. Erstellung der Anträge und Verantwortlichkeit für Einhaltung von Ethik und Datenschutz. Durchführung von Pilotexperimenten.

Konzeption und Betreuung der Intervention. Auswahl, Anpassung und Durchführung sämtlicher Testverfahren. Datenauswertung und -analyse. Erstellung der Publikation.

Publikation 2:

Buehring B, Belavy DL, Michaelis I, **Gast U**, Felsenberg D, Rittweger J.,
Changes in lower extremity muscle function after 56 days of bed rest.
Journal of Applied Physiology, 2011

doi:10.1152/jappphysiol.01294.2010

Beitrag im Einzelnen:

Erarbeitung der Intervention. Betreuung der Intervention. Gemeinsame Durchführung der EMG- Messungen und den Messungen auf der Kraftmessplatte mit dem Erstautor.
Bearbeitung und Überarbeitung des Manuskripts.

Publikation 3:

Belavý DL, Armbrrecht G, **Gast U**, Richardson CA, Hides JA, Felsenberg D.,
Countermeasures against lumbar spine deconditioning in prolonged bed rest: resistive exercise with and without whole body vibration.,
Journal of Applied Physiology, 2010

doi:10.1152/jappphysiol.00707.2010

Beitrag im Einzelnen:

Beteiligung am Konzept und Design der Gesamtstudie.

Beteiligung an der Versuchsplanung.

Konzeption und Betreuung der Intervention. Beteiligung am Manuskriptentwurf.

Bearbeitung des Manuskriptes und Überarbeitung nach den Reviews.

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der betreuenden Hochschullehrerin

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

6. Publikationsliste

Gast U, Belavý DL, Armbrrecht G, Kusy K, Lexy H, Rawer R, Rittweger J, Winwood K, Zieliński J, Felsenberg D. Bone density and neuromuscular function in older competitive athletes depend on running distance.
Osteoporos Int. 2012 Dec 15. [Epub ahead of print]

Gast U, John S, Runge M, Rawer R, Felsenberg D, Belavy DL.
Short-Duration Resistive Exercise Sustains Neuromuscular Function after Bed Rest.
Med Sci Sports Exerc. 2012 Sep;44(9):1764-72. doi: 10.1249/MSS.0b013e318256b53b.

Buehring B, Belavy DL, Michaelis I, Gast U, Felsenberg D, Rittweger J.
Changes in lower extremity muscle function after 56 days of bed rest.
J Appl Physiol. 2011 Jul;111(1):87-94. Epub 2011 Apr 28.

Belavý DL, Armbrrecht G, Gast U, Richardson CA, Hides JA, Felsenberg D.
Countermeasures against lumbar spine deconditioning in prolonged bed rest: resistive exercise with and without whole body vibration.
J Appl Physiol. 2010 Dec;109(6):1801-11. Epub 2010 Sep 23.

Belavý DL, Beller G, Armbrrecht G, Perschel FH, Fitzner R, Bock O, Börst H, Degner C, Gast U, Felsenberg D. Evidence for an additional effect of whole-body vibration above resistive exercise alone in preventing bone loss during prolonged bed rest.
Osteoporos Int. 2011 May;22(5):1581-91. Epub 2010 Sep 3.

Belavý DL, Bock O, Börst H, Armbrrecht G, Gast U, Degner C, Beller G, Soll H, Salanova M, Habazettl H, Heer M, de Haan A, Stegeman DF, Cerretelli P, Blottner D, Rittweger J, Gelfi C, Kornak U, Felsenberg D. The 2nd Berlin BedRest Study: protocol and implementation.
J Musculoskelet Neuronal Interact. 2010 Sep;10(3):207-19.

Rittweger J, Beller G, Armbrrecht G, Mulder E, Buehring B, Gast U, Dimeo F, Schubert H, de Haan A, Stegeman DF, Schiessl H, Felsenberg D. Prevention of bone loss during 56 days of strict bed rest by side-alternating resistive vibration exercise.
Bone. 2010 Jan;46(1):137-47. Epub 2009 Sep 2.

Armbrrecht G, Belavý DL, Gast U, Bongrazio M, Touby F, Beller G, Roth HJ, Perschel FH, Rittweger J, Felsenberg D. Resistive vibration exercise attenuates bone and muscle atrophy in 56 days of bed rest: biochemical markers of bone metabolism.
Osteoporos Int. 2010 Apr;21(4):597-607. Epub 2009 Jun 18.

Michaelis I, Kwiet A, Gast U, Boshof A, Antvorskov T, Jung T, Rittweger J, Felsenberg D. Decline of specific peak jumping power with age in master runners.
J Musculoskelet Neuronal Interact. 2008 Jan-Mar;8(1):64-70.

Rittweger J, Belavy D, Hunek P, Gast U, Boerst H, Feilcke B, Armbrrecht G, Mulder E, Schubert H, Richardson C, de Haan A, Stegeman DF, Schiessl H, Felsenberg D. Highly demanding resistive vibration exercise program is tolerated during 56 days of strict bed-rest. Int J Sports Med. 2006 Jul;27(7):553-9.

7. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt zuerst meinem Betreuer und Mentor Herrn Prof. Dr. Felsenberg. Durch ihn hat mein Leben diese ungewöhnliche und spannende Wendung genommen. Mit ihm und durch ihn habe ich an Projekten teilnehmen können die für viele Wissenschaftler Träume sind.

Er hat mich ermutigt und motiviert. Er hat meine Neugierde und meine Passion alles wissen zu wollen gefördert und fokussiert. Nicht zuletzt hat er mir im Zentrum für Muskel- und Knochenforschung die Möglichkeit und das Vertrauen geschenkt als Teil seines Teams zu forschen und dieses Thema zu bearbeiten.

Den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe bin ich ebenfalls zu großem Dank verpflichtet.

Dieser gilt zuerst Dr. Daniel Belavy, der mir mit seinem „drive“ den nötigen Anstoß gab und mit seiner fordernden und tatkräftigen Unterstützung maßgeblich zum Gelingen unserer Forschung und dieser Arbeit beigetragen hat.

Ebenso danken möchte ich Dr. Gabriele Armbrrecht die sich nachhaltig bemüht hat meine juristische Diktion in medizinische Sachlichkeit zu verwandeln.

Meine tiefste Dankbarkeit gebührt meiner Familie. Durch sie habe ich den Rückhalt den ich für meine Arbeit brauche und durch sie werden alle Dinge leichter. Danke Tini, Richard und Jasper.