

Schlussbericht zu FKZ 50WB1527

**Effekte eines Trainings zur Erhaltung der Muskel- und Knochenmasse
während körperlicher Inaktivität im Rahmen einer Bettruhestudie**

-

**Einfluss auf die neuromuskuläre Kraft- und Leistungsfähigkeit der
unteren Extremität**

Prof. Dr. Markus Gruber

Dr. Andreas Kramer

Erstellt: 30.5.2018

Gefördert durch: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Ansprechpartner:

Dr. Andreas Kramer

andreas.kramer@uni-konstanz.de

I. Kurzdarstellung von Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Ablauf, wissenschaftlichen Grundlagen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1. Aufgabenstellung und Ziele

Ziel der Forschungsanstrengungen der Arbeitsgruppe der Universität Konstanz war einerseits, den Effekt und die Wirkweise des Sprung-Countermeasures hinsichtlich der Erhaltung von funktionellen Kraft- und Leistungsparametern zu untersuchen. Es sollte beurteilt werden, ob mittels dieser Trainingsintervention funktionellen Rückbildungen bei Leistung, Kraft und Koordination von unterer und oberer Extremität entgegengewirkt und die Countermeasure-Intervention somit auch effektiv im All bei längeren Missionen eingesetzt werden kann. Andererseits sollte die Adaptation der genannten funktionellen Parameter an körperliche Inaktivität untersucht werden, was grundlegende Informationen darüber liefern soll, welche Veränderungen bei Astronauten während längeren Aufenthalten im Weltall vonstatten gehen (bzw. bei Bettlägerigen auf der Erde) und inwiefern die Funktion der Extremitäten durch die längerfristige Inaktivität beeinträchtigt wird und wie lange es braucht, bis diese Anpassungen nach Wiederaufnahme der Alltagsaktivitäten nach Ende der Bettruhe wieder ausgeglichen sind. Zusätzlich sollten die neuromuskulären Grundlagen der funktionellen Veränderungen mittels Erfassung der Muskelaktivität während der Bewegung untersucht werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Voraussetzung für die Durchführung dieses Vorhabens war zunächst die positive Begutachtung des Vorhabens durch ESA und die Förderung und Finanzierung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Das DLR stellte die notwendigen Personal-, Reise- und Sachmittel für dieses Vorhaben zur Verfügung. Weiterhin war ein positives Ethikvotum der Ärztekammer Nordrhein sowie die Zustimmung des Bundesamtes für

Strahlenschutz Voraussetzung, da es sich um Humanexperimente handelt und im Rahmen der Studie mehrere Untersuchungen mit geringen Strahlendosen (pQCT, QCT, DXA) durchgeführt wurden. Ferner mussten 24 Probanden plus backup rekrutiert werden, die über vor allem über Zeitungsannoncen und social media Kanäle angesprochen wurden und in einem mehrstufigen Verfahren aus mehr als 1000 Bewerbern ausgesucht wurden. Die für unsere Messung notwendigen Geräte – darunter zwei mit Förderung des DLR angeschaffte Messgeräte – wurden von der Universität Konstanz zur Verfügung gestellt und für die Dauer der Studie im :envihab in Köln aufgebaut.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Gesamtrahmens zum Forschungsvorhaben übernahmen übergeordnet für alle beteiligten Forscherteams die Agenturen ESA und DLR. Insbesondere Dr. Edwin Mulder vom DLR war zuständig für die Erstellung des Zeitplans inklusive der Messzeitpunkte. Wir unterstützten Dr. Mulder im Vorfeld der Studie bei der Erstellung des Ethikantrags, bei der Erstellung des zeitlichen Ablaufs sowie bei der Abstimmung des Trainingsplans. Die Studie wurde in zwei Kampagnen à 12 Probanden geteilt, von denen die erste am 25. August 2015 begann und die zweite am 26. Januar 2016. Jede Kampagne beinhaltete 14 Tage Gewöhnung an die Bedingungen im :envihab nebst baseline Messungen (BDC-14 bis BDC-1), anschließend 60 Tage Bettruhe (HDT1 bis HDT60), gefolgt von 15 Tagen recovery im :envihab (R+0 bis R+14). Nach Ende der stationären Phase wurden die Probanden entlassen und kehrten für mehrere follow-up Messungen ans :envihab zurück (R+28, R+90, R+360 und R+720). Unsere Messungen fanden an 12 Zeitpunkten statt (BDC-14, BDC-1, HDT15, HDT30, HDT45, R+0, R+7, R+13, R+28, R+90, R+360, R+720), wobei aufgrund des gestaffelten Probandenstarts jeder Messzeitpunkt mindestens sechs aufeinanderfolgende Tage beinhaltete. Die Messungen fanden in einem uns zur Verfügung gestellten Raum im :envihab statt, in dem wir unsere Messgeräte für die Dauer der Studie aufbauen konnten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Trotz ausgedehnter Trainingsprogramme vor und während Raumfahrtmissionen mit bereits existierenden Trainingsgeräten – etwa dem Laufband TEVIS, dem Radergometer

CEVIS und dem Krafttrainingsgerät ARED – leiden Astronauten bei ihrer Rückkehr immer noch an vielen morphologischen Veränderungen (z.B. Knochen- und Muskelschwund (Ohshima 2010; DiPrampo & Narici 2003) und an noch schwerer wiegenden funktionellen Einbußen. Diese Einbußen sind bei den unteren Extremitäten – und dort bei der Beinstreckmuskulatur – besonders deutlich ausgeprägt, da die Beine unter normalen Schwerkraftbedingungen den Großteil des Körpergewichts tragen und sich deshalb die Aufhebung der Schwerkraft bei ihnen am stärksten bemerkbar macht (Fitts et al. 2000; Gopalakrishnan et al. 2010; Greenleaf et al. 1989). Im Mittel verlieren Beinstrecker wie der Triceps surae nach einem sechsmonatigen Aufenthalt an Bord der ISS ca. 20% ihrer Masse (Adams et al. 2003) und mehr als 40% ihrer maximalen willkürlichen Kraft (Koryak 2001). Diese Einbußen gehen mit Reduktionen in der Kraftanstiegsrate (45% bis 67%, abhängig von der Länge des Weltraumaufenthaltes) und Muskelleistung (bis zu 75%) einher (Fitts et al 2001, DiPrampo & Narici 2003). Die Atrophie des Muskelgewebes und Veränderungen innerhalb des zentralen Nervensystems (ZNS), die zur ineffizienten elektromechanischen Koppelung (muskuläre Aktivierung in Relation zum mechanischen Output) durch Erhöhung der Cokontraktion und Reduktion des neuronalen Drives zur Zielmuskulatur führen, werden als neuromuskuläre Ursachen der beobachteten funktionellen Einbußen diskutiert (Fitts et al 2001, DiPrampo & Narici 2003).

Es ist damit offensichtlich, dass die Trainingsmaßnahmen mit den momentan eingesetzten Countermeasures unzureichend sind. Zwar sind sie einigermaßen gut geeignet, um kardiovaskuläre Einbußen zu verhindern, jedoch nicht um dem Muskel- und Knochenschwund ausreichend entgegenzuwirken (Fitts et al. 2010; Hargens et al. 2013; Prisk et al. 2006; Siconolfi et al. 1994). Um dieses Problem anzugehen, wurde 2006 von der ESA ein Projekt ausgeschrieben mit dem Ziel, ein Trainingsgerät zu entwickeln, das als integriertes Countermeasure vor allem dem Muskel- und Knochenschwund entgegenwirken sollte, aber wenn möglich auch anderen negativen Veränderungen wie Verschlechterungen des sensomotorischen Systems. Ein solches Trainingsgerät wurde daraufhin von Novotec medical konstruiert, von der Arbeitsgruppe von Prof. Markus Gruber in mehreren Studien wissenschaftlich untersucht (Kramer et al. 2010; Kramer et al. 2012a; Kramer et al. 2012b) und wird nun in der Bettruhestudie als Trainingsgerät eingesetzt.

Die Idee, die dem Sprung-Trainingsgerät (Sledge Jump System, SJS) zugrunde liegt, ist dass hohe Kräfte und Kraftentwicklungsraten für den Erhalt von Knochen- und

Muskelmasse und ihrer Funktion notwendig sind (Frost 2003; Keller et al. 1992). Diese Theorie wurde bereits am Tiermodell validiert (Lanyon 1992). In Humanexperimenten wurden in mehreren Querschnittstudien Indizien gesammelt, die darauf hindeuten, dass sich die Anpassungen dort ähnlich verhalten (Heinonen et al. 1995; Heinonen et al. 2001; Schiessl et al. 1998). Aus diesem Grund sollten Trainingsformen, bei denen die Muskeln hohe Kräfte in kurzer Zeit entwickeln müssen, ideal sein, um hohe Belastungen zu generieren und so dem Muskel- und Knochen-schwund entgegenzuwirken. Bei welchen Übungsformen werden nun solcherart hohe Kräfte produziert? Ebben et al. (2010) gingen dieser Frage nach und fanden heraus, dass Sprünge von den untersuchten Übungsformen die höchsten Bodenreaktionskräfte und Kraftentwicklungsraten hervorrufen.

Ein weiterer Vorteil von Sprüngen, vor allem reaktiver Sprünge, also solchen, bei denen während der exzentrischen Phase der Muskel-Sehnen-Komplex zunächst gedehnt wird und sich erst während der konzentrischen Phase verkürzt, sind die Anforderungen, die diese verhältnismäßig komplexen motorischen Aufgaben an das neuronale System stellen: es ist eine hohe und zeitlich exakt koordinierte Rekrutierung und Frequenzierung von motorischen Einheiten der Zielmuskulatur erforderlich, um die erforderliche Kraft und Leistung für den Sprung zu erzeugen. Dies wiederum macht eine Gewichtung und Integration einer Vielzahl von sensorischen Informationen, u.a. visuelle, vestibuläre und Muskelspindelafferenzen, im ZNS notwendig um das motorische Programm dahingehend justieren zu können (Lackner & DiZio 2005). Dementsprechend stellen reaktive Sprünge nicht nur einen starken Stimulus für Muskeln, Sehnen und Knochen dar, sondern auch für das neuronale System; sie stellen also tatsächlich ein integriertes Countermeasure dar. Durch diese hohen Anforderungen an das gesamte motorische System eignen sich Sprünge jedoch nicht nur sehr gut als Trainingsform, sondern auch als Omnibus-Test der körperlichen Leistungsfähigkeit: es ist die Bewegungsform, die mit dem ca. siebenfachen des Körpergewichts die höchsten muskulären Kräfte erzeugt (Ebben et a. 2010) und bei der auch die höchste Leistung erbracht wird (Bosco et al. 1983). Zusätzlich ist wie oben beschrieben ein gut funktionierendes neuronales System notwendig, um diese motorische Aufgabe mit ihren Anforderungen an timing, inter- und intramuskulärer Koordination sowie die Integration von sensorischen Informationen zu erledigen. Sobald eines der beteiligten Teilsysteme durch die körperliche Inaktivität beeinträchtigt ist, spiegelt sich das unmittelbar in der Sprungleistung wider. Sind einige der benötigten Teilsysteme

beeinträchtigt, so multiplizieren sich diese Beeinträchtigungen, was Sprünge zu einem sehr sensitiven Test macht.

Um detailliertere Informationen über die Ursache und Mechanismen potentieller Leistungsveränderungen bei Sprungtests zu erhalten, ist es notwendig, nicht nur Kraft, Bodenkontaktzeit, Kraftentwicklungsrate und Leistung zu erfassen, sondern auch die neuromuskuläre Aktivität sowie die elektrisch evozierte Kraft des Muskels. Die Muskelaktivität mittels EMG aufzuzeichnen erlaubt es, Aktivierungsdefizite in verschiedenen Phasen aufzudecken und so zu spezifizieren, ob Voraktivierungsphase, primär spinal reflexinduzierte Phase oder eher kortikal modulierte spätere Phasen betroffen sind (Gollhofer et al. 1992). Hier sind nach Bettruhe einige Veränderungen zu erwarten: zum einen verändert chronische Inaktivität die sensorische Reizaufnahme und Gewichtung der Sinnesinformationen (Bloomberg et al. 1997, Paloski et al. 1993). Somatosensorische Informationen wie sie das ZNS etwa durch Rezeptoren wie die Muskelspindeln, das Golgisehnenorgane und Gelenkrezeptoren erhält, sind reduziert. Zum anderen verändert körperliche Inaktivität die Motorik: es konnte gezeigt werden, dass körperliche Inaktivität zur Reduktion des neuronalen Drives führt und somit die Rekrutierung Motorischer Einheiten verringert ist (Kalb & Solomon 2007). Ferner sind die Aktivierungsmuster der Beinmuskulatur erheblich verändert; durch Inaktivität vollzieht sich eine Verlagerung der neuronalen Aktivierung von den Extensoren hin zu den Flexoren. Diese instabilen Bewegungsmuster sind bereits nach wenigen Tagen der Inaktivität erkennbar (Mulavara et al. 2010). Darüber hinaus berichten Studien über adaptierte Reflexcharakteristiken: Untersuchungen von Paloski et al. zeigten stark erhöhte Dehnreflexamplituden nach Inaktivität und längeren Aufhalten in Schwerelosigkeit, die mit Veränderungen der Muskelspindelsensitivität einhergingen und Adaptionen im fusimotorischen System zugeschrieben werden (Paloski et al. 1993). Bisherige Studien mit dem während der Bettruhestudie verwendeten Trainingsgerät zeigen jedoch auch, dass die neuromuskuläre Aktivierung bei Sprüngen in diesem Gerät vergleichbar sind mit derjenigen bei normalen Sprüngen am Boden (Kramer et al. 2010). Somit ist zu erwarten, dass bei der Trainingsgruppe durch dieses Training die Veränderungen der Aktivierungsmuster nach Bettruhe deutlich geringer ausfallen als bei der komplett inaktiven Kontrollgruppe.

Um weiterhin den Ursprung von potentiellen Leistungseinbußen nach Bettruhe einzugrenzen, ist es wichtig zu wissen, ob die Defizite rein muskulären Ursprungs sind oder nicht. Um dies zu untersuchen, eignet sich die Methode der elektrisch evozierten

Muskelzuckungen (twitch torques): hierbei wird der Muskel nicht willkürlich aktiviert, sondern aufgrund einer elektrischen Reizung der entsprechenden efferenten Nervenbahn. Dadurch werden einige potentiell beeinträchtigte Teile der Aktivierungskette wie z.B. Volition, kortikale und subkortikale Strukturen des Nervensystems umgangen. Damit erlaubt es diese Methode den muskulären Anteil (motorische Endplatte, kontraktile Elemente, etc) direkt zu untersuchen. Indirekt lassen sich dann Rückschlüsse auf den zentralnervösen Anteil ziehen. Beispielsweise könnte man bei einer Verminderung der funktionellen Kraftfähigkeit in einem Maximalkrafttest um 40% und einer rein muskulären Einbuße von gemessenen 10% darauf schließen, dass ein Großteil der funktionellen Einbußen auf Anpassungen des neuronalen Systems zurückzuführen sind. Die Untersuchung der Sprünge, der dort zugrundeliegenden neuronalen Kontrolle in Zusammenhang mit Maximalkrafttests und artifiziellen Muskelkraftuntersuchungen erlaubt damit umfangreiche Einblicke in die zugrundeliegenden Mechanismen der Leistungseinbußen nach Bettruhe aber auch die Identifikation der Anpassungsmechanismen des eingesetzten Countermeasures.

Wie eingangs schon erwähnt ist die untere Extremität nach längeren Aufenthalten in der Schwerelosigkeit deutlich stärker betroffen als die obere Extremität (Fitts et al. 2000; Gopa-lakrishnan et al. 2010; Greenleaf et al. 1989). Nichtsdestotrotz ist die obere Extremität auch betroffen, und speziell die Handkraft gilt als wichtiger Parameter, der mit der Fähigkeit korreliert, Aktivitäten des täglichen Lebens zu verrichten (Taekema et al. 2010), und bei Älteren sogar einen übergeordneten Prädiktor der Mortalität darstellt (Ling et al. 2010). Deshalb ist es wichtig, die Veränderungen der Handkraft einerseits zur Quantifizierung der Fähigkeit zur Verrichtung täglicher Aktivitäten zu erfassen, und andererseits als Vergleichsparameter für die Veränderungen der Kraft der unteren Extremität.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass durch körperliche Inaktivität während achtwöchiger Bettruhe folgende Einbußen der körperlichen Leistungsfähigkeit zu erwarten waren: Während Sprüngen verringern sich die maximale Kraft, die maximale Leistung, die Kraftanstiegsrate und die Sprunghöhe. Es war außerdem eine verringerte willkürliche sowie elektrisch evozierte Kraft bei der isometrischen Plantarflexion zu erwarten, in geringerem Ausmaß auch bei der Handkraft. Bei der neuromuskulären Aktivität war vor allem eine Abnahme in der Phase der Voraktivierung wahrscheinlich. In der Trainingsgruppe, die 5-6x pro Woche das Sprungtraining im SJS absolvierte,

waren diese negativen Anpassungserscheinungen in deutlich geringerem Ausmaß zu erwarten.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Studie wurde in Zusammenarbeit mit DLR und ESA im :envihab am DLR in Köln durchgeführt. Wissenschaftlicher Projektleiter seitens DLR war Dr. Edwin Mulder, verantwortliche Kontaktperson bei ESA war Dr. Jennifer Ngo-Anh. Wissenschaftliche Kooperationen mit der Universität Freiburg und der Charité Berlin unterstützen die Durchführung des Experiments im Rahmen des Konsortiums Felsenbeg / Armbrecht et al.

Literatur

- Adams, G. R., Caiozzo, V. J., & Baldwin, K. M. (2003). Skeletal muscle unweighting: spaceflight and ground-based models. *Journal of applied physiology*, 95(6), 2185–2201.
- Bloomberg, J. J.; Peters, B. T.; Smith, S. L.; Huebner, W. P.; Reschke, M. F. (1997): Locomotor head-trunk coordination strategies following space flight. *J Vestib Res* 7 (2-3), S. 161–177.
- Bosco C, Luhtanen P, Komi PV (1983): A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology* 50 (2): 273-282.
- DiPrampo, PE; Narici, MV. (2003): Muscles in microgravity: from fibres to human motion. *J Biomech* 36 (3), S. 403–412.
- Ebben, William P.; Fauth, McKenzie L.; Kaufmann, Clare E.; Petushek, Erich J. (2010): Magnitude and rate of mechanical loading of a variety of exercise modes. *J Strength Cond Res* 24 (1), S. 213–217.
- Fitts, R. H., Riley, D. R., & Widrick, J. J. (2000). Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle. *Journal of applied physiology*, 89(2), 823–839.
- Fitts, R. H.; Riley, D. R.; Widrick, J. J. (2001): Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *J. Exp. Biol.* 204 (Pt 18), S. 3201–3208.
- Fitts, R. H., Trappe, S. W., Costill, D. L., Gallagher, P. M., Creer, A. C., Colloton, P. A., Peters, J. R., Romatowski, J. G., Bain, J. L., & Riley, D. A. (2010). Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres. *The Journal of physiology*, 588(Pt 18), 3567–3592.

- Frost, H. M. (2003). Bone's mechanostat: a 2003 update. *The anatomical record. Part A, Discoveries in molecular, cellular, and evolutionary biology*, 275(2), 1081–1101.
- Gollhofer, A., Strojnik, V., Rapp, W., Schweizer, L. (1992): Behaviour of triceps surae muscle-tendon complex in different jump conditions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 64 (4), S.283-91.
- Gopalakrishnan, R., Genc, K. O., Rice, A. J., Lee, S. M. C., Evans, H. J., Maender, C. C., Ilasslan, H., & Cavanagh, P. R. (2010). Muscle volume, strength, endurance, and exercise loads during 6-month missions in space. *Aviation, space, and environmental medicine*, 81(2), 91–102.
- Greenleaf, J. E.; Bulbulian, R.; Bernauer, E. M.; Haskell, W. L.; Moore, T. (1989): Exercise-training protocols for astronauts in microgravity. *J. Appl. Physiol*. 67 (6), S. 2191–2204.
- Hargens, Alan R.; Bhattacharya, Roshmi; Schneider, Suzanne M. (2013): Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. *Eur. J. Appl. Physiol*. 113 (9), S. 2183–2192.
- Heinonen, A., Oja, P., Kannus, P., Sievänen, H., Haapasalo, H., Mänttari, A., & Vuori, I. (1995). Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone*, 17(3), 197–203.
- Heinonen, A., Sievänen, H., Kyröläinen, H., Perttunen, J., & Kannus, P. (2001). Mineral mass, size, and estimated mechanical strength of triple jumpers' lower limb. *Bone*, 29(3), 279–285.
- Kalb, R.; Solomon, D. (2007): Space exploration, Mars, and the nervous system. *Arch. Neurol*. 64 (4), S. 485–490.
- Keller, T. S., Strauss, A. M., & Szpalski, M. (1992). Prevention of bone loss and muscle atrophy during manned space flight. *Microgravity quarterly*, 2(2), 89–102.
- Koryak, Y. U. (2001). Electrically evoked and voluntary properties of the human triceps surae muscle: effects of long-term spaceflights. *Acta physiologica et pharmacologica Bulgarica*, 26(1-2), 21–27.
- Kramer, A.; Ritzmann, R.; Gollhofer, A.; Gehring, D.; Gruber, M. (2010): A new sledge jump system that allows almost natural reactive jumps. *J Biomech* 43 (14), S. 2672–2677.
- Kramer, A.; Ritzmann, R.; Gruber, M.; Gollhofer, A. (2012a): Leg stiffness can be maintained during reactive hopping despite modified acceleration conditions. *J Biomech* 45 (10), S. 1816–1822.
- Kramer, A.; Ritzmann, R.; Gruber, M.; Gollhofer, A. (2012b): Four weeks of training in a sledge jump system improved the jump pattern to almost natural reactive jumps. *European Journal of Applied Physiology* 112 (1), S. 285–293.
- Kramer A, Kümmel J, Mulder E, Gollhofer A, Frings-Meuthen P, Gruber M (2017a). High-intensity jump training is tolerated during 60 days of bed rest and is very effective in preserving leg power and lean body mass: an overview of the Cologne RSL study. *PLoS ONE* 12(1):e0169793

- Kramer A, Gollhofer A, Armbrecht G, Felsenberg D, Gruber M (2017b). How to prevent the detrimental effects of two months of bed-rest on muscle, bone and cardiovascular system: an RCT. *Scientific Reports* 7, 13177
- Kramer A, Kümmel J, Gollhofer A, Armbrecht G, Ritzmann R, Belavy D, Felsenberg D, Gruber M (2018). Plyometrics can preserve peak power during two months of physical inactivity: an RCT including a one-year follow-up. *Frontiers in Physiology* 9, 633
- Lackner, J. R., & DiZio, P. (2005). Vestibular, proprioceptive, and haptic contributions to spatial orientation. *Annual review of psychology*, 56, 115–147.
- Lanyon, L. E. (1992). Control of bone architecture by functional load bearing. *Journal of bone and mineral research*, 7 Suppl 2, S369–75.
- Ling CH, Taekema D, de Craen AJ, Gussekloo J, Westendorp RG, Maier AB. (2010): Handgrip strength and mortality in the oldest old population: the Leiden 85-plus study. *CMAJ* 182(5), S. 429-435.
- Paloski, W.H.; Black, F.O.; Reschke, M. F.; Calkins, D. S.; Shupert, C. (1993): Vestibular ataxia following shuttle flights: effects of microgravity on otolith-mediated sensorimotor control of posture. *Am J Otol* 14 (1), S. 9–17.
- Prisk, G. K., Fine, J. M., Cooper, T. K., & West, J. B. (2006). Vital capacity, respiratory muscle strength, and pulmonary gas exchange during long-duration exposure to microgravity. *Journal of applied physiology*, 101(2), 439–447.
- Schiessl, H., Frost, H. M., & Jee, W. S. (1998). Estrogen and bone-muscle strength and mass relationships. *Bone*, 22(1), 1–6.
- Siconolfi, S. F., Charles, J. B., Moore, A. D., & Barrows, L. H. (1994). Comparing the effects of two in-flight aerobic exercise protocols on standing heart rates and VO₂(peak) before and after space flight. *Journal of clinical pharmacology*, 34(6), 590–595.
- Taekema DG, Gussekloo J, Maier AB, Westendorp RG, de Craen AJ (2010): Handgrip strength as a predictor of functional, psychological and social health. A prospective population-based study among the oldest old. *Age Aging* 39(3), S. 331-337.

II. Eingehende Darstellung der Verwendung, des zahlenmäßigen Nachweises, der Angemessenheit, des Nutzens und der Veröffentlichungen

1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde wie im Antrag geplant vor allem für Personal-, Sach- und Dienstreisekosten verwendet.

Die Bettruhestudie wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln durchgeführt. Nach einer zweiwöchigen Eingewöhnungs- und Messphase wurden 23 junge, gesunde männliche Probanden zufällig der Trainings- oder Kontrollgruppe zugeteilt. In den folgenden 60 Tagen unterzogen sich alle Probanden strikter Bettruhe. Die Mitglieder der Trainingsgruppe absolvierten in dieser Phase in einem Sprungtrainingsgerät, das Sprünge in der Horizontalen ermöglicht (Kramer 2010), 5-6x pro Woche eine Sprungtrainingseinheit, die exklusive Pausen drei Minuten in Anspruch nahm und aus Countermovement Jumps und Prellsprüngen bestand. Die Ein- und Ausgangsmessungen direkt vor und nach der Bettruhe beinhalteten Maximalkrafttests, Knochenquerschnittmessungen (pQCT), Körperkompositions-Messungen (DXA), Spiroergometrie, mehrere maximale Sprünge verschiedener Art, sowie Maximalkraftmessungen mit zusätzlichen elektrisch evozierten twitch torques. Zusätzlich wurden einige dieser Messungen 7, 13, 28, 90, 360 und 720 Tage nach Ende der Bettruhe wiederholt um den Erholungsverlauf zu dokumentieren (siehe Abbildung 1).

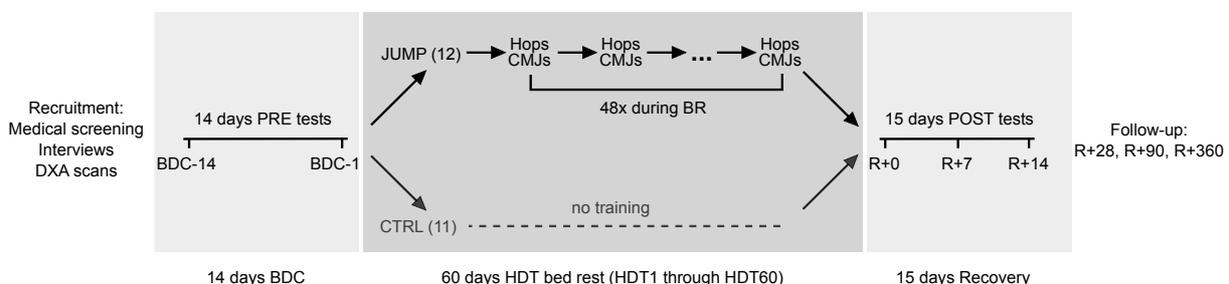


Abbildung 1: Studienablauf der Bettruhestudie

Die Knochenquerschnittmessungen (pQCT), Körperkompositionsmessungen (DXA) und Spiroergometrie sind Teil der ESA core data, die bei jeder Bettruhestudie erhoben

werden um die unterschiedlichen Countermeasures vergleichen zu können. Diese Daten wurden uns von ESA als Expert Group zur Verfügung gestellt, damit wir die Effektivität des Sprung-Countermeasures besser beurteilen konnten.

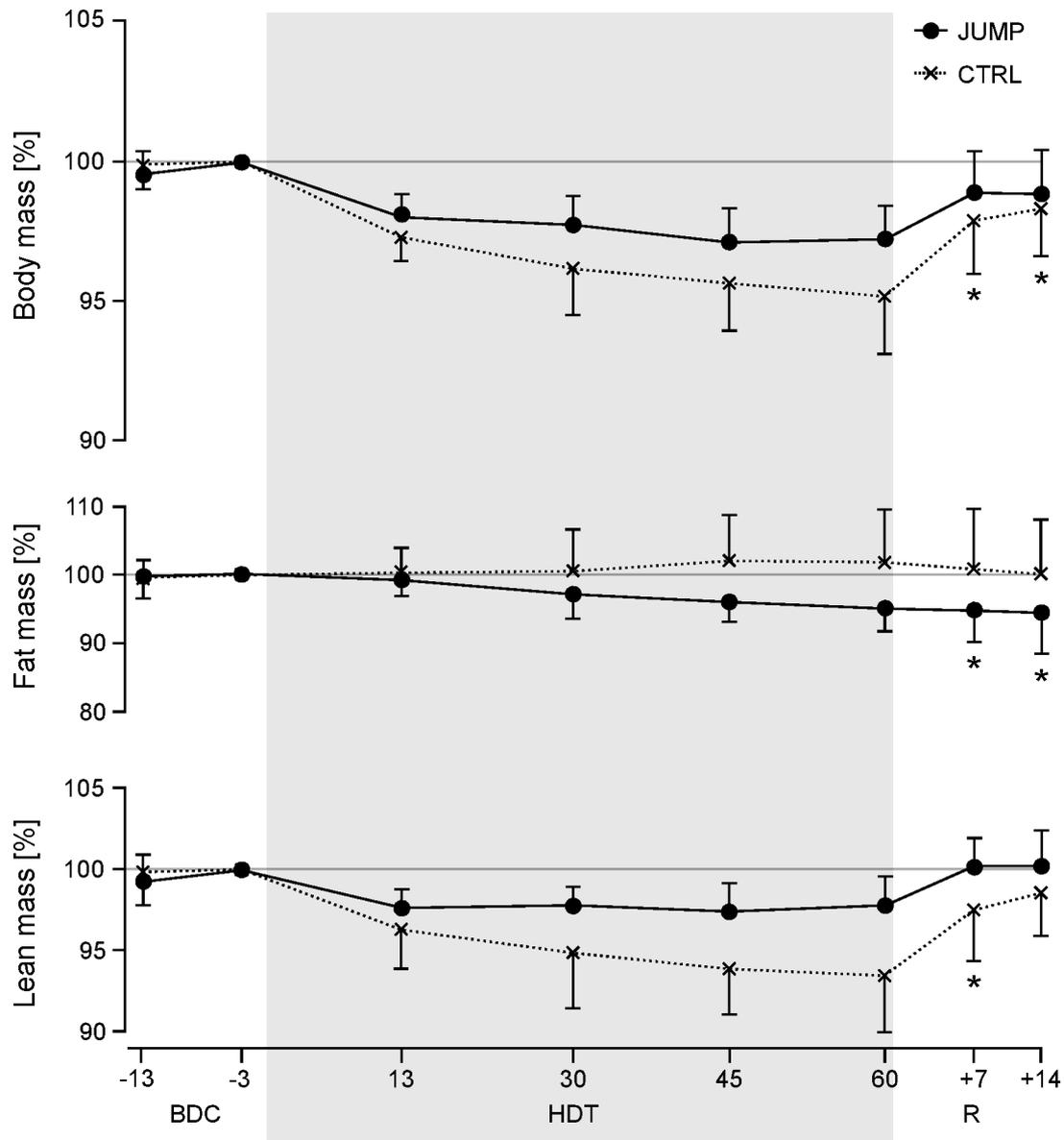


Abbildung 2: Entwicklung der Körperkomposition während und nach Bettruhe

In der Kontrollgruppe war wie erwartet eine deutliche Abnahme aller gemessenen Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit festzustellen, während in der Trainingsgruppe die Leistungsfähigkeit in nahezu allen Tests erhalten werden konnte. In allen gemessenen Parametern gab es signifikante Gruppe*Zeit Interaktionseffekte: Die Muskelmasse gemessen mit DXA Aufnahmen zeigte keine Änderungen in der Trainingsgruppe, während in der Kontrollgruppe eine Abnahme von 1,6kg festzustellen

war, siehe Abbildung 2. Die Fettmasse hingegen blieb in der Kontrollgruppe unverändert, während sie in der Trainingsgruppe leicht abnahm, obwohl die Trainingsgruppe eine höhere Kalorienzufuhr hatte um den erhöhten Energiebedarf durch das Training auszugleichen. Details zu den Ergebnissen von Körperkomposition, Trainingsverlauf und Vitalwerten finden sich bei Kramer 2017a.

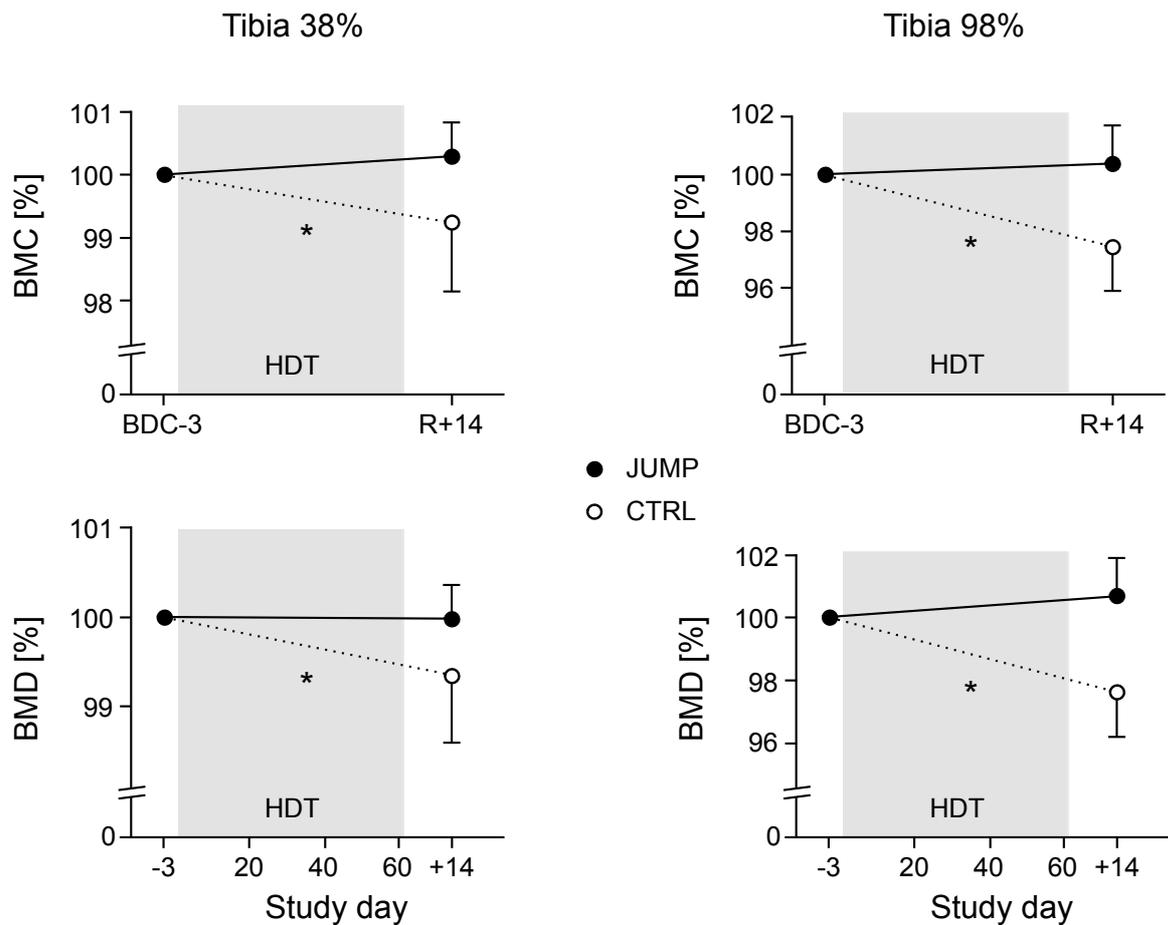


Abbildung 3: Vergleich der Knochenmasse (BMC, oben) und -dichte (BMD, unten) vor und nach Bettruhe, anhand von zwei Tibiaschnitten (bei 38% der Tibialänge und 98% der Tibialänge)

Die pQCT-Schnitte der Tibia zeigten keine Veränderungen in Knochenmasse und Knochendichte für die Trainingsgruppe, jedoch eine signifikante Abnahme in der Kontrollgruppe (bis zu 2.6%, siehe Abbildung 3).

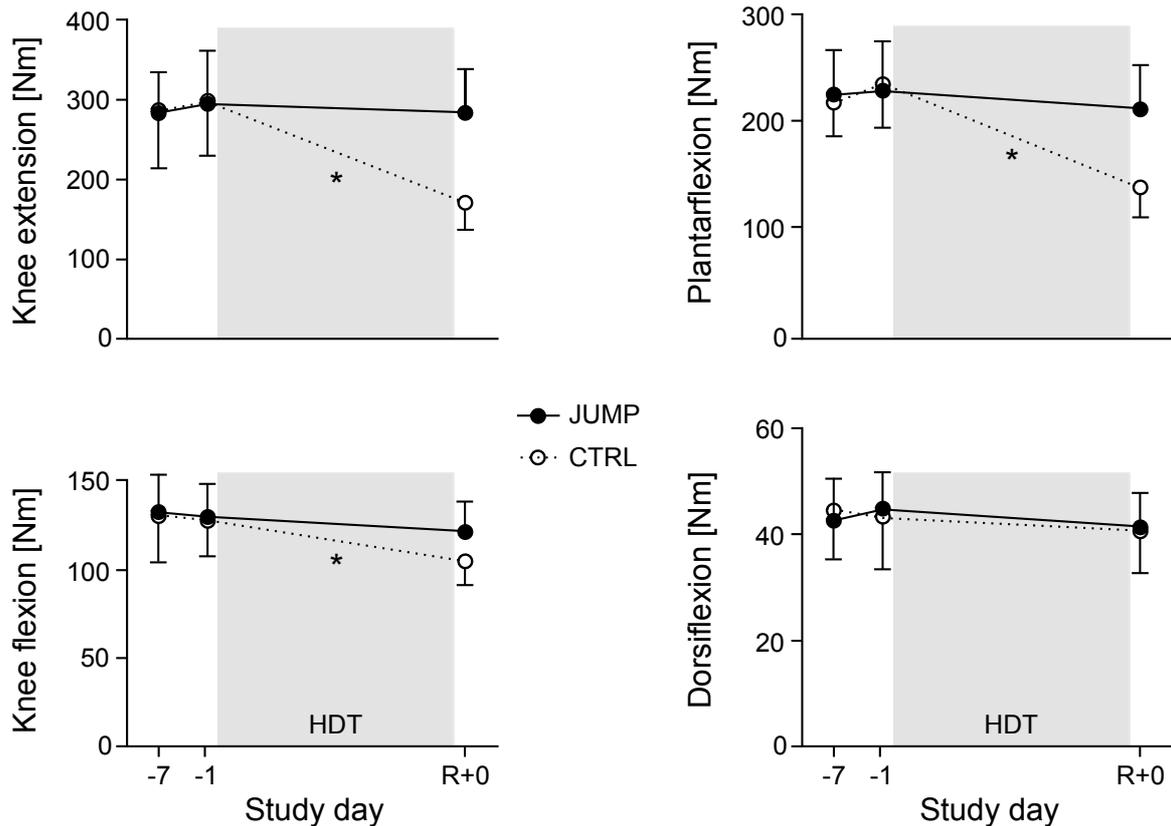


Abbildung 4: Vergleich der Maximalkraft von vier Beinbewegungen vor und nach Bettruhe

Das Training konnte auch die isometrische Maximalkraft bei Kniestreckung erhalten (Kontrollgruppe: Abnahme um $41 \pm 11\%$) und die Abnahme bei Plantarflexion deutlich reduzieren ($-8 \pm 10\%$ in der Trainingsgruppe vs. $-40 \pm 12\%$ in der Kontrollgruppe, siehe Abbildung 4). Die maximale Sauerstoffaufnahmekapazität konnte in der Trainingsgruppe ebenfalls erhalten werden (Kontrollgruppe: $-29 \pm 11\%$). Die Analyse der Handgriffkraft als Kontrollmessung für die obere Extremität zeigte für keine der beiden Gruppen eine Veränderung durch die Bettruhe, was die Ergebnisse früherer Studien bestätigt. Details zu den Ergebnissen von Maximalkraft, Knochenmasse und -dichte sowie zur maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität als wichtigstem Ausdauerleistungskriterium finden sich bei Kramer 2017b.

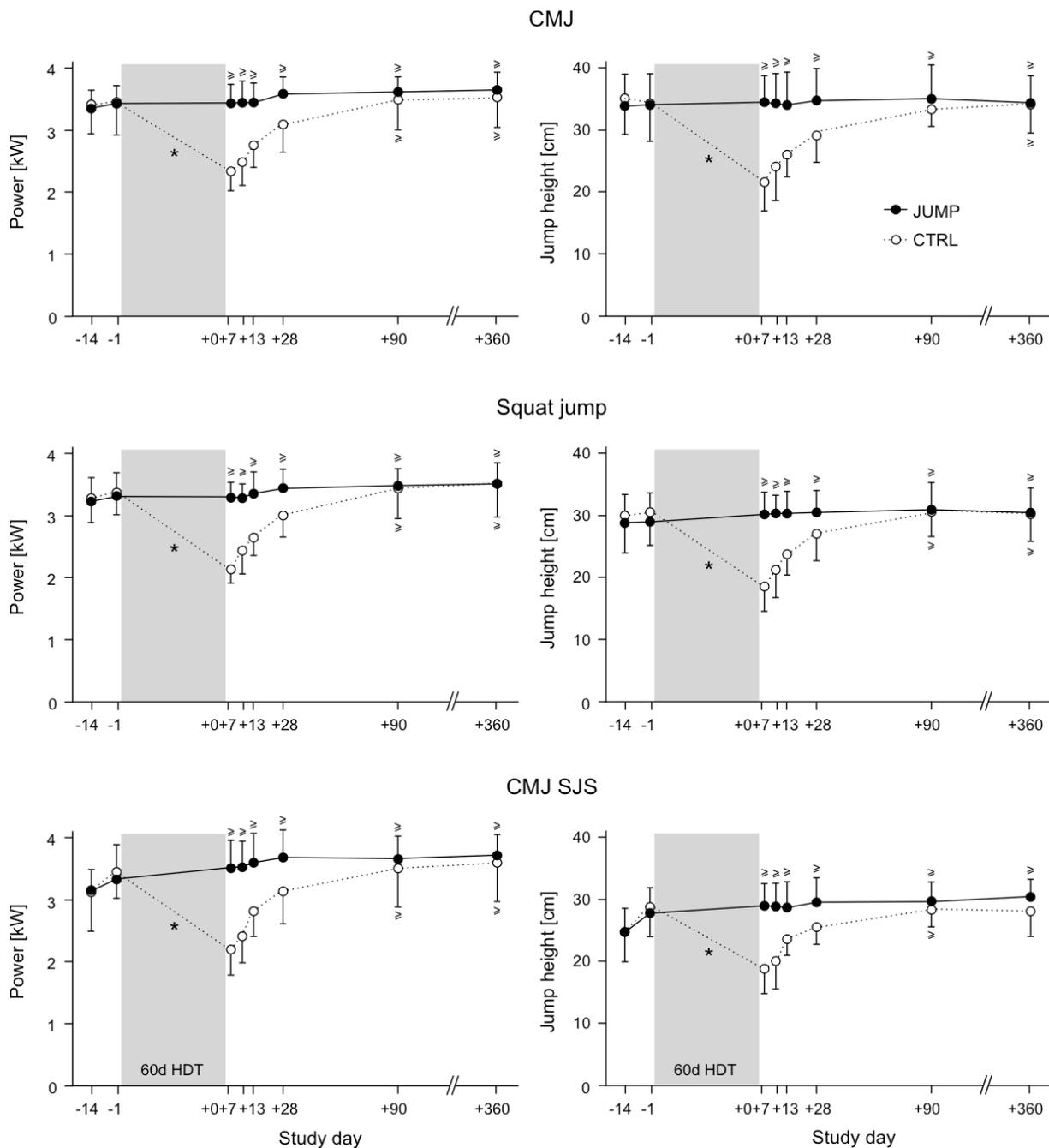


Abbildung 5: Entwicklung der maximalen Leistung (links) und der Sprunghöhe (rechts) drei verschiedener Sprungarten (Countermovement Jump (CMJ), Squat Jump und CMJ im Schlittensprungsystem) vor und nach Bettruhe sowie in der Erholungsphase (R+7, R+13) und den follow-up-Messungen (R+90, R+360)

Auch die maximale Leistung und Sprunghöhe konnte von der Trainingsgruppe gehalten oder sogar gesteigert werden (Kontrollgruppe: $-39\pm 12\%$, siehe Abbildung 5). Die Messungen im Erholungszeitraum nach der Bettruhe ergaben, dass nach ca. drei Monaten die Leistungsfähigkeit der Teilnehmer der Kontrollgruppe wieder auf dem Niveau von vor der Bettruhe angelangt war.

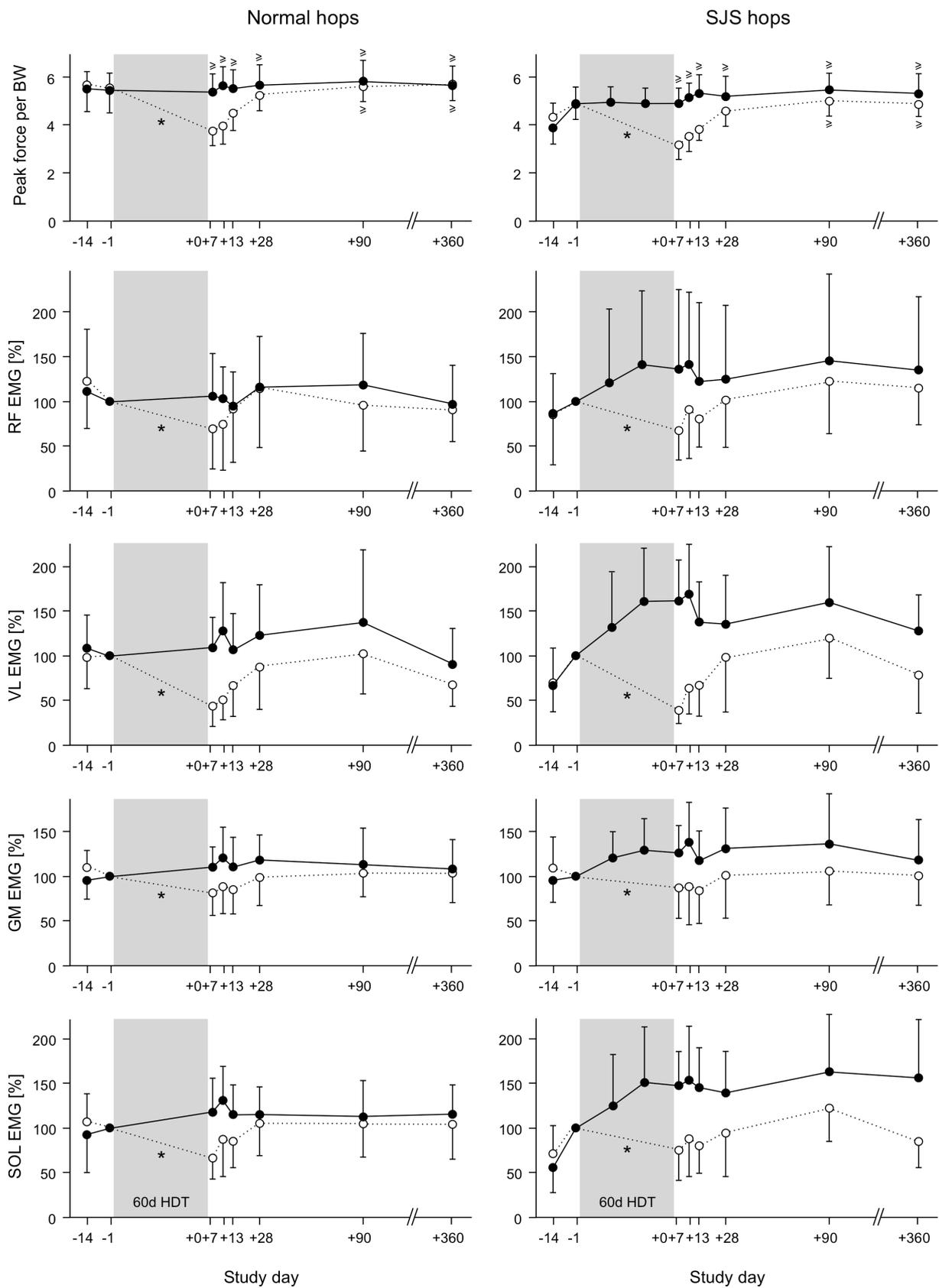


Abbildung 6: Entwicklung der maximalen Kräfte sowie der Muskelaktivität (EMG) vor und nach Bettruhe sowie in der Erholungsphase (R+7, R+13) und den follow-up-

Messungen (R+90, R+360), einmal für die reaktiven Sprünge am Boden (links) und einmal für die reaktiven Sprünge im Trainingssystem (SJS).

Man sieht in Abbildung 6, dass die Leistungseinbußen bei den reaktiven Sprüngen der Kontrollgruppe mit einer Abnahme der Muskelaktivität einhergehen. In der Trainingsgruppe ist bei den reaktiven Sprüngen im Trainingssystem eine Zunahme der Muskelaktivität zu beobachten, was als Aufgaben- und Gerät-spezifische positive Anpassung gewertet werden kann. Details zu diesem Teil der Ergebnisse sind bei Kramer 2018 zu finden.

Das kurze, intensive Sprungtraining war also in der Lage, die durch 60 Tage körperliche Inaktivität in der Kontrollgruppe beobachteten deutlichen Verluste an Muskelmasse, Knochenmasse, aerober Kapazität sowie Muskelkraft und -leistung zu verhindern. Dementsprechend scheint Sprungtraining ein sehr effizientes und effektives Training zu sein, das ohne großen Zeit- und Materialaufwand durchgeführt werden kann und so breiten Bevölkerungsgruppen helfen könnte, die körperliche Leistungsfähigkeit zu erhalten oder gar zu steigern, sowie den nachgewiesenen gesundheitlichen Folgen von körperlicher Inaktivität wie etwa Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Sarkopenie und Osteoporose effizient und effektiv entgegenzuwirken.

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Die wichtigsten Positionen waren Personalausgaben, Sachmittel und Dienstreisen.

Die Personalmittel waren notwendig, um das wissenschaftlich geschulte Fachpersonal zur Untersuchung der Probanden zu entlohnen. Mit den Sachmitteln wurden hauptsächlich Messgeräte angeschafft, die während der gesamten Studiendauer im :envihab am DLR in Köln für die Studie benötigt wurden. Die Reisemittel waren notwendig, um die Fahrt- und Übernachtungskosten am Studienort Köln zu decken.

In der Verwendung der Zuwendung wurde dem Gesamtfinanzierungsplan entsprochen. Alle genannten Zuwendungen waren notwendig, um die Studien ordnungsgemäß und entsprechend der wissenschaftlichen Gütekriterien durchführen zu können.

Detaillierte Darstellung der Verwendung der Zuwendung siehe Anlage.

3. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der Förderung lässt sich dadurch begründen, dass die Fachgruppe Sportwissenschaft der Universität Konstanz weder freie Personalkapazitäten noch Finanzmittel besaß, mit welchen die im Projekt angefallenen Arbeitszeiten, Dienstreisen und notwendigen Sachausgaben abgedeckt werden konnten. Selbstverständlich flossen in das Projekt alle vorhandenen Gerätschaften sowie die spezifische Fachexpertise und die Arbeitszeiten für die Aufgaben der Projektleitung ein. Zudem wurde der Antrag für den nicht-wirtschaftlichen Bereich der Universität gestellt. Die kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens konnte zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht abgesehen werden.

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ergibt sich aus den Zielen des Vorhabens: um die Effektivität des Countermeasures sowie den Einfluss der körperlichen Inaktivität in der Kontrollgruppe beurteilen zu können, waren die im Antrag aufgeführten Messungen notwendig (2x vor Beginn der Bettruhephase, 3x in der Bettruhephase, und 7x nach Ende der Bettruhephase). Durch die vorgegebene Struktur der Studie und den Studienort Köln ergaben sich daraus die entsprechenden Messzeiträume und Dienstreisen.

4. Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Vorhabens sind sowohl für die Raumfahrt als auch für die terrestrische Anwendung von großem Nutzen. Der Nutzen für die bemannte Raumfahrt besteht darin, dass zum ersten mal ein Countermeasure evaluiert wurde, das einer Vielzahl von negativen Anpassungserscheinungen an die reduzierte körperliche Aktivität während Bettruhe verhindert, und dies mit wenigen Minuten Training am Tag. Da eine Vielzahl von Studien belegt, dass die Ergebnisse von Bettruhestudien im Hinblick auf die Effekte von Trainingsprogrammen gut auf die Effekte bei längeren Weltraumaufenthalten übertragbar sind, ist davon auszugehen, dass das für die Bettruhestudie von uns entwickelte Sprungtraining eine deutliche Steigerung der

Effektivität des Astronautentrainings an Bord der ISS oder auf anderen längeren Raumfahrtmissionen zufolge hätte. Die bei Astronauten trotz des aufwendigen Trainings mit mehreren Geräten immer noch auftretende Abnahme von Knochen- und Muskelmasse, Muskelfunktion und aerober Kapazität würde damit der Vergangenheit angehören. Außerdem wäre es deutlich effizienter als die bisher eingesetzten Trainingsgeräte auf der ISS: einem Trainingsaufwand von wenigen Minuten für das Sprungtraining stehen momentan ca. 2,5h Trainingsaufwand mit den bestehenden Geräten (Laufband, Radergometer, ARED) gegenüber, was bei einer mit ca. 70.000\$ veranschlagten crew time eine massive finanzielle Einsparung bedeutet.

Für die terrestrische Anwendung sind die Ergebnisse auch sehr relevant, da in modernen Industriegesellschaften ein sitzender Lebensstil mit entsprechendem Bewegungsmangel immer weiter verbreitet ist. Ein kurzes, simples Trainingsprogramm wie das getestete Sprungtraining, das für viele der vom Bewegungsmangel betroffenen Systeme gleichzeitig wirksam ist, könnte bei entsprechender Verbreitung dazu beitragen, die mit dem Bewegungsmangel einhergehenden Zivilisationskrankheiten wie Diabetes, Übergewicht, Osteoporose und Herz- Kreislaufkrankheiten deutlich zu reduzieren.

Die wissenschaftliche Verwertbarkeit ist wie im Antrag beschrieben die Veröffentlichung der Ergebnisse in internationalen hochrangigen wissenschaftlichen Zeitschriften sowie die Präsentation der Ergebnisse auf Fachkongressen, um so unsere Erkenntnisse einem möglichst großen Publikum zugänglich zu machen. Dies ist für einen Großteil der Ergebnisse schon geschehen, weitere Veröffentlichungen werden angestrebt (siehe II.6).

5. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Uns sind während der Durchführung des Vorhabens keine Fortschritte bei anderen Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt.

6. Veröffentlichungen

Bisher haben wir drei Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften mit peer-review Verfahren veröffentlicht (siehe Anlage), drei weitere sind mit unseren Kooperationspartnern von Universität Freiburg und Charité Berlin in Arbeit. Hinzu kommen fünf Veröffentlichungen in conference proceedings sowie vier Abschlussarbeiten, die auf den Ergebnissen des Vorhabens sowie den dazugehörigen Vorstudien basieren. Die bereits veröffentlichten paper lauten wie folgt:

Kramer A, Kümmel J, Gollhofer A, Armbrrecht G, Ritzmann R, Belavy D, Felsenberg D, **Gruber M** (2018). Plyometrics can preserve peak power during two months of physical inactivity: an RCT including a one-year follow-up. *Frontiers in Physiology* 9, 633

Kramer A, Gollhofer A, Armbrrecht G, Felsenberg D, **Gruber M** (2017). How to prevent the detrimental effects of two months of bed-rest on muscle, bone and cardiovascular system: an RCT. *Scientific Reports* 7, 13177

Kramer A, Kümmel J, Mulder E, Gollhofer A, Frings-Meuthen P, **Gruber M** (2017). High-intensity jump training is tolerated during 60 days of bed rest and is very effective in preserving leg power and lean body mass: an overview of the Cologne RSL study. *PLoS ONE* 12(1):e0169793

In Arbeit oder im Review Prozess befindlich sind folgende Manuskripte:

Kramer A, Kümmel J, Gollhofer A, Armbrrecht G, Ritzmann R, Belavy D, Felsenberg D, **Gruber M** (2018). Loss of muscle force after prolonged bed rest: contribution of neural and structural mechanisms. *Journal of Applied Physiology*

Ritzmann R, Freyler K, **Kramer A, Kümmel J, Gruber M**, Belavy D, Felsenberg D, Gollhofer A, Armbrrecht G (2018). High intensity jump exercise preserves posture control, gait and functional mobility during 60 days of bed-rest: an RCT including 90 days of follow-up. *Journal of Applied Physiology*

Belavy D, **Kramer A**, Felsenberg D, Gollhofer A, Armbrecht G (2019). Bed-rest induced changes in bone mineral density during 60 days of bed rest and the influence of a jump countermeasure. *Bone*

Des weiteren sind in den conference proceedings die Abstracts mehrerer Kongressvorträge erschienen:

Hochschultag der dvs, München 2017: Kramer et al.: *Sprünge - eine effektive und effiziente Trainingsintervention gegen die durch Inaktivität bedingte Degeneration von Muskeln, Knochen und kardiovaskulärem System*

International Society for Gravitational Physiology (ISGP), Moskau 2017: Kramer et al.: *Preventing the detrimental effects of two months of bed rest on muscle, bone and cardiovascular system with a few minutes of exercise per day*

Sportmedizinisches Symposium, Budersand, Sylt 2017: Gruber et al.: *Fit zum Mars: Effizientes Training für den Weltraum und terrestrische Anwendung*

European College of Sport Science (ECSS), Wien 2016: Kramer et al.: *Efficacy of a reactive jump training program during 60 days of bed rest*

European Space Agency and ISGP, Toulouse 2016: Kramer et al.: *Jumps - effective countermeasure for muscle and bone loss? Results from the Cologne BR study*

Außerdem wurden vier Abschlußarbeiten veröffentlicht, die auf den Ergebnissen dieses Projektes und der dazugehörigen Vorstudien beruhen:

Habilitation Dr. Andreas Kramer (2018): Training und motorisches Lernen – Steigerung von Effektivität und Effizienz

Masterarbeit Marcello Grassi (2016): Using a tri-axial accelerometer to quantify the locomotive patterns before and after 60 days of bed-rest

Bachelorarbeit Ingmar Gutknecht (2014) Einfluss eines plyometrischen Training in einem Sprungschlitten auf die Leistung in Drop Jumps und Counter Movement Jumps

Bachelorarbeit Benjamin Weiss (2014) Effekte eines vierwöchigen plyometrischen Trainings (Hoppings) in einem Sprungschlitten auf die maximale Sauerstoffaufnahme

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN n/a	2. Berichtsart Forschungsbericht
3a. Titel des Berichts Effekte eines Trainings zur Erhaltung der Muskel- und Knochenmasse während körperlicher Inaktivität im Rahmen einer Betruhestudie - Einfluss auf die neuromuskuläre Kraft- und Leistungsfähigkeit der unteren Extremität	
3b. Titel der Publikation s.o.	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Kramer, Andreas; Gruber, Markus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.11.2017
	6. Veröffentlichungsdatum 30.5.2018
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) s.o.	7. Form der Publikation Forschungsbericht
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) FG Sportwissenschaft Universität Konstanz 78457 Konstanz
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution n/a
	10. Förderkennzeichen 50WB1527
	11a. Seitenzahl Bericht 26
	11b. Seitenzahl Publikation 26
	12. Literaturangaben 32
16. Zusätzliche Angaben n/a	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 6
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn, 30.5.2018 Vorträge u.a. Statusseminar „Forschung unter Weltraumbedingungen“ 28.-30.10.2015, ECSS Wien (8.7.2016, Efficacy of a jump training program during 60 days of bed rest), ISGP Moskau (01.06.2017, Preventing the detrimental effects of bed rest)	
18. Kurzfassung Astronauten büßen bei längeren Weltraummissionen trotz der vorhandenen Countermeasures immer noch Muskel- und Knochenmasse sowie an Leistungsfähigkeit ein. Ziel war es deshalb einerseits, den Effekt und die Wirkweise des Sprung-Countermeasures hinsichtlich der Erhaltung von funktionellen Kraft- und Leistungsparametern zu untersuchen. Es sollte beurteilt werden, ob mittels dieser Trainingsintervention funktionellen Rückbildungen bei Leistung, Kraft und Koordination von unterer und oberer Extremität entgegengewirkt und die Countermeasure-Intervention somit auch effektiv im All bei längeren Missionen eingesetzt werden kann. Andererseits sollte die Adaptation der genannten funktionellen Parameter an körperliche Inaktivität untersucht werden, was grundlegende Informationen darüber liefern soll, welche Veränderungen bei Astronauten während längeren Aufenthalten im Weltall vonstatten gehen (bzw. bei Bettlägerigen auf der Erde) und inwiefern die Funktion der Extremitäten durch die längerfristige Inaktivität beeinträchtigt wird und wie lange es braucht, bis diese Anpassungen nach Wiederaufnahme der Alltagsaktivitäten nach Ende der Bettruhe wieder ausgeglichen sind. Die Methoden, mit denen die Leistungsfähigkeit gemessen wurde, beinhalteten pQCT, DXA, Kraftmessplatten, Spiroergometrie und EMG. Diese Ziele wurden allesamt erreicht: das Sprung-Countermeasure erwies sich als sehr effektiv und effizient im Hinblick auf den Erhalt der Knochenmasse und –dichte, der Muskelmasse und –funktion sowie der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität während der zweimonatigen Bettruhe. In der Kontrollgruppe hingegen nahmen all diese Parameter deutlich ab, die Knochenmasse und –dichte der Tibia um ca. 2.5%, die maximale willkürliche Kraft der Beinstrecker um 30-40%, die maximale Sauerstoffaufnahmekapazität um 30% und die maximale Leistung der Beinstrecker auch um gut 30%. Diese Einbußen in der Leistungsfähigkeit wurden von ähnlichen Veränderungen der Muskelaktivität begleitet. Im Lauf der follow-up-Untersuchungen stieg die Leistungsfähigkeit der Kontrollgruppe wieder an und war in den meisten Parametern ca. 3 Monate nach Ende der Bettruhe wieder auf Ausgangsniveau angekommen. In der Trainingsgruppe waren in Lauf der follow-up-Untersuchungen keine großen Veränderung festzustellen da sie durch die Bettruhe sowieso keine Leistungseinbußen in Bezug auf die gemessenen Parameter ergeben hatten. Somit kann das Sprungtraining uneingeschränkt als effektives und effizientes Countermeasure für eine Vielzahl von negativen Anpassungserscheinungen bei längeren Weltraumaufenthalten empfohlen werden.	
19. Schlagwörter Training, Astronauten, Gegenmassnahmen, Körperzusammensetzung, Plasmavolumen, Herzfrequenz, Leistung, Bettruhe, Körperliche Inaktivität, DVZ	
20. Verlag n/a	21. Preis n/a

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN n/a	2. Type of Report Scientific report
3a. Report Title Effects of an exercise intervention aiming to maintain muscle and bone mass during physical inactivity in a bed rest study – influence on the neuromuscular capacity for force and power production of the lower extremity	
3b. Title of Publication see above	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Kramer, Andreas; Gruber, Markus	5. End of Project 30.11.2017
	6. Publication Date 30.5.2018
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) see above	7. Form of Publication Scientific report
	9. Originator's Report No. n/a
8. Performing Organization(s) (Name, Address) FG Sportwissenschaft Universität Konstanz 78457 Konstanz	10. Reference No. 50WB1527
	11a. No. of Pages Report 26
	11b. No. of Pages Publication 26
	12. No. of References 32
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 6
	16. Supplementary Notes n/a
17. Presented at (Title, Place, Date) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn, 30.5.2018 Presentations: Statusseminar „Forschung unter Weltraumbedingungen“ 28.-30.10.2015, ECSS Wien (8.7.2016, Efficacy of a jump training program during 60 days of bed rest), ISGP Moskau (01.06.2017, Preventing the detrimental effects of bed rest)	
18. Abstract Astronauts still lose muscle and bone mass as well as functional capacity during prolonged space missions, despite the extensive use of exercise countermeasures. In this project, we had a two-fold goal: On the one hand, we wanted to assess the effects of the reactive jump countermeasure with respect to the preservation of functional force and power parameters. We wanted to examine if the training intervention is suited to counteract functional degradation of power, force and coordination of the lower and upper extremities, and thus, if the training can be used as an effective countermeasure for long-term spaceflight missions. On the other hand, we wanted to investigate the adaptation of these functional parameters in response to physical inactivity as well as the time course of recovery. This will provide information about the degeneration processes during long-term spaceflights (and on earth during bed rest e.g. in hospitals) and to which extent long-term physical inactivity impairs the function of the extremities. In addition, we want to study the neuromuscular basis of the functional changes in response to bed rest by measuring muscular activity during the aforementioned strength and power tests. Methods included pQCT, DXA, force plates, spiroergometry and EMG. We were able to reach all of our goals: the jump countermeasure proved to be both effective and efficient with respect to maintaining bone mass and density, muscle mass and function as well as maximal oxygen uptake capacity during the two months of bed rest. In the control group however, all of these parameters significantly decreased: bone mass and density of the tibia by 2.5%, maximal voluntary contraction strength of the leg extensors by 30-40%, lower limb power by more than 30% and maximal oxygen uptake capacity by 30%. During the course of the follow-up measurements, the control group's performance increased again, and after three months most values had returned to baseline levels. As there were no significant changes in the training group after bed rest anyway, there were also no pronounced changes observed during the follow-up visits. Thus, the jump training can be recommended as an effective and efficient countermeasure for the degrading effects of microgravity on bone mass and density, muscle mass and function, and aerobic capacity.	
19. Keywords exercise, astronauts, countermeasure, body composition, plasma volume, heart rate, power, bed rest, physical inactivity, SSC	
20. Publisher n/a	21. Price n/a