

Aus dem Zentrum für Muskel- und Knochenforschung
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Untersuchungen zur Optimierung des körperlichen Trainings bei Frauen mit
postmenopausal verminderter Knochendichte**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Nils Stolzenberg

aus Berlin

Datum der Promotion: 14.02.2014

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Titel/Autor/Abstract deutsch.....	03
Titel/Autor/Abstract englisch.....	04
Einleitung/Zielsetzung.....	05
Methoden.....	06
Ergebnisse.....	11
Diskussion.....	14
Literaturliste.....	16
Anteilerklärung.....	17
Publikation I.....	19
Journal: Gait&Posture; Titel: Whole-body vibration versus proprioceptive training on postural control in postmenopausal osteopenic women. <i>5 Seiten</i>	
Publikation II.....	24
Journal: International Journal of Sports Medicine; Titel: Vibration or balance training on neuromuscular performance in osteopenic women. <i>7 Seiten</i>	
Publikation III.....	31
Journal: Journal of Musculoskeletal Neuronal Interaction; Titel: Bone strength and density via pQCT in post-menopausal osteopenic women after 9 months resistive exercise with whole body vibration or proprioceptive exercise. <i>11 Seiten</i>	
Lebenslauf.....	42
Publikationsliste.....	45
Eidesstattliche Erklärung.....	46
Danksagung.....	47

Untersuchungen zur Optimierung des körperlichen Trainings bei Frauen mit postmenopausal verminderter Knochendichte

Nils Stolzenberg¹, *Dipl. Sportwissenschaftler*

¹ Zentrum für Muskel- und Knochenforschung, Charité Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 12203 Berlin, Germany.

Zusammenfassung

Hintergrund: Der Erhalt von neuromuskulären Funktionen und einer tragfähigen Knochenmasse bei älteren Menschen wird immer wichtiger, besonders bei älteren Frauen mit verminderter Knochendichte, die zu Stürzen mit daraus resultierenden Knochenbrüchen neigen.

Studiendesign: Diese nicht-pharmakologische, randomisierte, kontrollierte Studie untersuchte die Effekte von einem Ganzkörpervibrationstraining (VIB) im Vergleich mit einem Koordinations-/Balancetraining (BAL) auf neuromuskuläre Funktionen (countermovement jump, multiple one leg hopping, sit-to stand test, verschiedene Stände auf stabiler/instabiler Unterlage), sowie Veränderungen am Knochen.

Methodik: 68 Frauen mit postmenopausal verminderter Knochendichte (Osteopenie/Osteoporose) wurden für die Studie rekrutiert. 57 Probandinnen beendeten das neunmonatige Trainingsprogramm mit zweimaligem Training pro Woche. Alle Probandinnen führten bei jedem Training ein 30 Minuten langes Krafttraining durch. Zusätzlich absolvierte die VIB-Gruppe (N=26) ein 4-minütiges Vibrationstraining auf dem Galileo Fitness (24-26Hz, 2-4mm Amplitude). Die BAL-Gruppe (N=31) absolvierte parallel ein Koordinations- und Gleichgewichtstraining. Gleichgewichtstests wurden auf dem posturomed (instabil) und auf der Bodenreaktionsmessplatte Leonardo (stabil) durchgeführt. Alle Muskelleistungstests (z.B. countermovement jump) wurden auf dem Leonardo gemessen. Die Knochenparameter wurden mit Hilfe der peripheren quantitativen Computertomographie (pQCT) erfasst.

Ergebnisse: Schwerpunkt Gleichgewicht: Die Bewegungsgeschwindigkeit auf dem posturomed verringerte sich um 28,3(36,1)% ($p<,001$) bei der VIB-Gruppe und um 18,5(31,5)% ($p<,001$) bei der BAL-Gruppe zum Ende der Trainingsintervention. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gemessen ($p=0,45$). Keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen wurden bei den Gleichgewichtstests auf dem Leonardo (Rombergstand, semi-Tandemstand, Tandemstand, Einbeinstand) gemessen ($p=0,45$). Schwerpunkt Muskelleistung: In der Spitzenleistung beim countermovement jump wurden Verbesserungen bei der VIB-Gruppe ($p=0,004$) und ein signifikanter Abfall der Sprunghöhe in der BAL-Gruppe ($p=0,021$) gemessen. Die Daten des multiple one leg hopping zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen in der intent-to-treat Analyse. Die per-protocol Analyse zeigte dagegen signifikant höhere Verbesserungen in der Spitzenbeschleunigung ($p=0,014$) und Leistung (0,033) in der VIB-Gruppe im Vergleich zur BAL-Gruppe. Schwerpunkt Knochenuntersuchungen: Die Ergebnisse der pQCT-Messungen ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ($p\geq 0,08$). In beiden Gruppen wurde in der Tibia ein signifikanter Anstieg der trabekulären Knochendichte (BMD) der distalen Epiphyse gemessen.

Schlussfolgerungen: Diese Studie zeugt auf, dass ein Ganzkörpervibrationstraining kombiniert mit einem Krafttraining höhere Auswirkungen auf einige neuromuskuläre Funktionen in postmenopausalen Frauen mit verminderter Knochendichte haben kann als ein Koordinations- und Gleichgewichtstraining mit Krafttraining.

Optimising exercise in post-menopausal women with low bone density

Nils Stolzenberg¹

¹ Center for Muscle and Bone Research, Charité University Medical School Berlin, Hindenburgdamm 30, 12203 Berlin, Germany.

Summary

Background: Maintaining neuromuscular function and bone density during aging is becoming more important in an aging society. These issues are of particular concern in older, post-menopausal, women with low bone density who are at an increased risk of bone fractures subsequent to falls.

Design: This non-pharmacological randomised controlled interventional study examined the effect of whole-body vibration exercise (VIB) in comparison to coordination and balance training (BAL) on neuromuscular function (postural control, countermovement jump, multiple one leg hopping, sit-to-stand test) and bone changes.

Methods: 68 post-menopausal women with low bone density (osteopenia or osteoporosis) were included in the study. 57 subjects completed the 9-month intervention period with two training sessions per week. All subjects performed 30 minutes of general strength training. In addition, the VIB-group (N=26 at the end of the study) performed 4 minutes of vibration exercise on the Galileo Fitness (24-26Hz, 2-4mm Amplitude). The BAL-group performed 15 minutes of coordination and balance training. Postural control tests were performed on an unstable surface (Posturomed) and on a ground reaction force plate (Leonardo). The remaining neuromuscular tests were performed on the Leonardo testing device. Bone density was measured by use of peripheral quantitative computed tomography (pQCT).

Results: Speed of movement on the Posturomed testing device decreased by 28.3(36.1)% ($p<0.001$) in the VIB-group and by 18.5(31.5)% ($p<0.001$) in the BAL-group at the end of the intervention period. The improvements over time were not significantly different between groups for this parameter. Similarly, for testing of postural control on the Leonardo device, no significantly different response was seen between the groups ($p=0.45$). The increase in peak power during the countermovement jump was significantly greater in the VIB-group than in BAL-group ($p=0.004$ between groups). Differences between the groups on the multiple one leg hopping test did not reach significance on the intent-to-treat analysis, but the per-protocol analysis showed a significantly greater improvement in peak acceleration ($p=0.014$) and power ($p=0.033$) in the VIB-group than in BAL-group for this test. Tibia bone density improved in both groups, but with no significant difference between the groups.

Conclusion: This study provides some evidence that whole-body vibration exercise, combined with resistive exercise, can have a greater impact on peak performance in jumping tasks than coordination and balance training in addition to resistive exercise.

Einleitung / Zielsetzung

Mit dem Altersgang verliert der Mensch an Muskelmasse und Knochenmasse. Neuromuskuläre Funktionen wie das Gleichgewicht und die Koordination nehmen ab. Auch die neuromuskuläre Spitzenleistung nimmt mit dem Alter ab und ist dabei ein Indikator für die physische Performance im Altersgang¹. Die Muskelleistung und Muskelkraft verringern sich. Bei älteren, dekonditionierten Menschen mit verminderter Knochendichte steigt dadurch das Sturzrisiko² und damit die Gefahr von Knochenbrüchen³. Um zu verhindern dass ältere Menschen durch Frakturen in eine Abhängigkeit geraten, sollten speziell die Muskulatur und das neuromuskuläre System trainiert werden. Eine Verbesserung der neuromuskulären Performance durch Training ist beim älteren Menschen möglich⁴.

Ein abwechslungsreiches Koordinationstraining und Gleichgewichtstraining verbessert das Gleichgewichtsverhalten und beugt Stürzen vor^{5, 6}. Es gibt Hinweise darauf, dass auch ein Vibrationstraining speziell die neuromuskulären Eigenschaften und somit das Gleichgewicht positiv beeinflussen kann⁷. Über reflektorische Prozesse (Muskelspindelreflex) kann sich speziell durch das Vibrationstraining die Muskelleistung verbessern⁸. Ein Muskelkrafttraining an Geräten kann sich positiv auf das Gleichgewicht auswirken⁹ und trägt somit auch zur Sturzprävention bei¹⁰. Die Auswirkungen und Veränderungen des Krafttrainings auf die Muskulatur und den Knochen können über die periphere quantitative Computertomographie (pQCT) erfasst werden, insbesondere Veränderungen der Knochendichte, die Aussagen über die Belastbarkeit des Knochen treffen. Besonders das Krafttraining kann dabei im Altersgang einen zu schnellen Abfall der Knochendichte verhindern¹¹.

Das Primärziel der Arbeit waren Gleichgewichtsmessungen auf dem posturomed (instabile Plattform). Dabei war der entscheidende Messwert die Bewegungsbeschleunigung der Platte. Die Hypothese hierzu lautete, dass sich das Gleichgewichtsverhalten durch das Koordination- und Gleichgewichtstraining stärker verbessern würde als durch das Vibrationstraining. Alle anderen Gleichgewichtstests, die Muskelleistungs- und Muskelkraftdaten auf dem Leonardo, sowie die Knochenparameter waren Sekundärziele. Als weitere Hypothese wurde erwartet, dass das Vibrationstraining größere Verbesserungen in der Muskelleistung und Muskelkraft beim countermovement jump, dem multiple single leg hopping, sowie dem sit-to-sand test aufweist, als das Koordinationstraining. In den Knochen wurden größere Effekte in der Tibia durch die Kombination Krafttraining mit Vibrationstraining, als durch ein Krafttraining mit Koordinationstraining angenommen.

Methoden

Studiendesign, Ein- und Ausschlusskriterien, Probandinnen

Die zu Grunde liegende Studie war eine nicht-pharmakologische, randomisierte, kontrollierte Studie, genehmigt von der Ethikkommission der Charité Universitätsmedizin Berlin. Alle Probandinnen gaben schriftlich ihre Einwilligung zur Studie. 68 postmenopausale Frauen mit verminderter Knochendichte nahmen an der neun monatigen Trainingsintervention teil, randomisiert entweder zum Vibrationstraining (VIB) oder zum klassischen Balancetraining (BAL).

Die wichtigsten Einschlusskriterien bei den Probandinnen waren: mindestens acht Jahre postmenopausal, ein T-Score der Hüfte (total) oder der Lendenwirbelsäule (L1-L4) von -2,0 bis -3,0 SD gemessene Knochendichte per DXA (dual energy X-ray absorptiometry). Die wichtigsten Ausschlusskriterien waren: Erfahrungen mit Vibrationstraining, Balancetraining oder Krafttraining in den letzten sechs Monaten, jegliche Metallimplantate (Zähne ausgenommen), bekannte Störung des Vestibularsystems, Knochenfrakturen in den letzten zwölf Monaten, neuromuskuläre und neurologische Erkrankungen.

Die Probandinnen für die Studie wurden mit Hilfe der Siemens Betriebskrankenkasse, dem Zentrum für Muskel- und Knochenforschung (Charité, Campus BF), sowie der Knochensprechstunde des Immanuel Krankenhauses rekrutiert. Von 101 untersuchten Frauen wurden 68 in die Studie eingeschlossen, 57 Probandinnen beendeten die Studie erfolgreich: 26 in der VIB-Gruppe (Alter: 67,3 Jahre; Größe: 161,1 cm; Gewicht: 62,8 kg; alle Werte gemittelt) und 31 in der BAL-Gruppe (67,3 Jahre; 161,4 cm, 64 kg). Für einen erfolgreichen Studienabschluss waren mindestens 75% Trainingsanwesenheit gefordert, bei einer maximalen Abwesenheit von vier Terminen in Folge. Die drop-outs (N=8 in der VIB-Gruppe, N=3 in der BAL-Gruppe) erfolgten durch Verletzungen oder Krankheitsfällen, unabhängig von der Studie.

Interventionen

Jede Probandin absolvierte zwei Trainingstermine pro Woche in einer Gruppe von maximal zehn Teilnehmerinnen. Zu Beginn jeden Trainings wurden 15 Minuten Fahrradergometrie durchgeführt. Danach folgte ein Einsatz-Krafttraining mit einer Wiederholungsrate von mindestens zehn bis maximal zwanzig Wiederholungen pro Gerät. Bei Erreichen von zwanzig Wiederholungen wurde das Gewicht erhöht (mit mindestens zehn geschafften Wiederholungen). Dadurch beinhaltete das Krafttraining einen Wechsel zwischen Muskelaufbau und Muskelkraftausdauer. Folgende Krafttrainingsgeräte wurden benutzt: Beinpresse (liegend), Hüftabduktion und –adduktion (sitzend), Hüftextension links und rechts (stehend), Rumpffrotation (sitzend), Rumpfflexion und Rumpfextension (sitzend), Latissimus-Zug (sitzend) und Ruderzug am Seilzug von unten (stehend). Das Krafttraining dauerte 30 Minuten, Die Teilnehmerinnen der BAL-Gruppe und der VIB-Gruppe trainierten gemischt zusammen.

Im Anschluss an das Krafttraining absolvierte die BAL-Gruppe ein abwechslungsreiches und im Anspruch sich steigerndes Koordinations- und Gleichgewichtstraining über maximal 15 Minuten. Es wurden jede Woche verschiedene Aufgaben gestellt mit und ohne Kleingeräten und verschiedenen Unterlagen (stabil, instabil, labil) um den Schwierigkeitsgrad zu verändern. Folgende Hauptübungen wurden durchgeführt: Rombergstand, Tandemstand und Einbeinstand (links, rechts) wurden auf verschiedenen Unterlagen geübt (Kippelbrettchen, Therapiekreisel, Luftkissen, Balance-Kissen), mit offenen oder geschlossenen Augen. Als Kleingeräte kamen Softbälle, Tennisbälle, Stäbe, Gummibänder zum Einsatz. Allein oder mit dem Partner gab es Übungen wie Werfen, Fangen, Übergeben, Prellen, Ziehen und Schieben. Zur gleichen Zeit absolvierten die Teilnehmerinnen der VIB-Gruppe ein Vibrationstraining auf dem Galileo Fitness (Novotec, Pforzheim, Deutschland). Die Amplitude begann bei 2mm und wurde in den ersten vier Wochen auf 4mm erhöht. Drei verschiedene Übungen wurden in jeder Trainingseinheit durchgeführt: 1. Leichte Knie- und Hüftbeuge bei geradem Rücken für 1:30 Minuten, gesteigert von 22Hz auf 24Hz in den ersten zwei Wochen; 2. Dynamische Kniebeuge bis maximal 90 Grad Kniebeuge für 1:30 Minuten (je zwei Sekunden Beugen und zwei Sekunden Strecken). Die Frequenz wurde ebenso von 22Hz auf 24Hz gesteigert; 3. Eine Minute in einer Kniebeuge von 90 Grad Stehen, bei einer Frequenz von 26Hz. Das Vibrationstraining dauerte effektiv vier Minuten, mit einer Minute Pause zwischen jedem Durchgang. Die Fersen waren während des Trainings immer auf der Platte.

Gleichgewichtstestungen auf dem posturomed

Das posturomed 202 (60x60cm, Haider Bioswing, Pullenreuth, Deutschland) wurde in Verbindung mit dem CMS 10 System (Zebris Medizintechnik, Isny, Deutschland) zur Untersuchung der Standbewegung auf einer instabilen Unterlage (posturomed) mit Hilfe von Ultraschallsensoren (CMS 10) benutzt. Dabei waren zwei Marker an der linken Seite des posturomeds für die Messungen befestigt. Der Sensorkopf des CMS 10 Systems war in einem Winkel von 60 Grad zu den Markern positioniert. Das posturomed war bei allen Messungen in mittlerer Einstellung des Freiheitsgrades eingestellt. Dies wurde über zwei diagonal am Gerät angebrachte Bewegungsbremsen ermöglicht (eine Bremse offen, eine geschlossen). Vorhergegangene Tests zeigten diese Einstellung als ideal für die Testpopulation.

Es wurde der Einbeinstand bei jeder Probandin getestet. Nach fünf Standschritten auf dem posturomed wurde jeweils fünf Mal der Stand auf dem linken Bein, beim Zweiten Test der Stand auf dem rechten Bein getestet. Das andere Bein wurde jeweils knapp unter Hüfthöhe hochgezogen. Ziel war es, möglichst fünf Sekunden bei jedem Standversuch zu stehen. Direkt mit dem Beginn jeder Standphase wurde die Messung gestartet. Jeder Standversuch endete nach fünf Sekunden, sowie beim vorzeitigen Absetzen des Fußes, Berühren des Geländers, oder bei zu viel Bewegung des Standfußes. Jeder Versuch zählte. Eine Wiederholung erfolgte nur bei starker externer Störung. Bei allen Versuchen standen die Teilnehmerinnen aufrecht auf dem posturomed mit offenen Augen und Blick auf eine an der gegenüberliegenden Wand versehene Markierung. Es wurden immer Sportschuhe getragen.

Die Aufzeichnungen ergaben eine Weg-Zeit-Messung der Platte in Bewegung. Aus diesen Daten wurde die durchschnittliche Beschleunigung (in Millimeter pro Sekunde) der Platte als Hauptmesswert der Testung berechnet¹². Pro Probandin gab es zehn Testtermine: direkt vor Beginn des ersten Trainings, danach im Abstand von vier Wochen bis zum Ende der Studie. Zur Aufzeichnung der Daten wurde die herstellereigene Software benutzt (WinData V.2.22.13; Zebris). Weniger Bewegungsbeschleunigung des posturomeds beim Einbeinstand wurde als Verbesserung des Gleichgewichts angesehen. Demnach wurde eine Abnahme der Bewegungsbeschleunigung als Verbesserung erachtet.

Weitere Gleichgewichtstests auf dem Leonardo

Weitere Gleichgewichtstests wurden auf einer Bodenreaktions-Kraftmessplatte (Leonardo, Mechanograph GRFP, Novotec GmbH, Pforzheim, Deutschland) durchgeführt. Folgende Stände wurden in dieser Reihenfolge getestet: Rombergstand, semi-Tandemstand, Tandemstand, Einbeinstand (links und rechts). Jeder Test wurde je einmalig mit offenen und geschlossenen Augen durchgeführt. Nur in Ausnahmefällen (externe Störung) wurde ein Test wiederholt. Die Testposition sollte zehn Sekunden lang gehalten werden. Für die spätere Analyse der einzelnen Standtests wurden die Bewegungsgeschwindigkeit des Druckmittelpunktes (in mm/s) und die Fläche der Ellipse (in cm²) um den Druckmittelpunkt verwendet. Bei den Gleichgewichtstests auf dem Leonardo wurde eine Verkleinerung der Bewegungsfläche, sowie die Abnahme der Bewegungsgeschwindigkeit, als Gleichgewichtsverbesserung angesehen.

Neuromuskuläres Testprotokoll

Die neuromuskulären Tests (Gleichgewicht) und Muskelleistungstests (Sprungtests und sit-to-stand test) wurden kurz vor Beginn der Intervention und innerhalb von sieben Tagen nach dem neun-monatigen Training durchgeführt. Zum Testungstag waren alle Probandinnen angehalten nichts direkt vor den Tests zu essen und nicht zu hohe körperliche Belastungen zu absolvieren. Alle Probandinnen trugen Sportschuhe bei den Tests.

Muskelleistungstests auf dem Leonardo

Auf der Bodenreaktions-Kraftmessplatte Leonardo wurden an den beiden Testungstagen vor und nach Beendigung der Intervention folgende Muskelleistungstests durchgeführt: Countermovement jump, multiple one leg hopping und der sit-to-stand test. Alle Testabläufe und -ziele wurden vorher genau mit jeder Probandin besprochen.

Countermovement jump:

Die Aufgabe beim countermovement jump bestand darin, „so hoch wie möglich“ zu springen. Für die spätere Auswertung wurde der höchste Sprung aus drei Versuchen gewertet. Zwischen den drei Versuchen gab es jeweils eine Minute Pause. Folgende Werte waren für die spätere Analyse interessant: die Spitzenkraft, die Spitzenleistung (Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit), die Spitzenbeschleunigung und die Sprunghöhe. Des Weiteren wurden die Sprungeffizienz und der „Esslinger Fitness Index“ in die Auswertung mit eingeschlossen.

Multiple one leg hopping:

Bei diesem Test war das Hauptziel, die Spitzenkraft und -leistung am Sprunggelenk zu messen. Während der Testung sollte zehnmal auf einem Bein gehüpft werden, bei möglichst gestrecktem Bein. Die Bewegung sollte primär über das Fußgelenk erfolgen. Aus Sicherheitsgründen und zur Orientierung im Raum berührten sich leicht die Zeigefinger der Probandin und des Untersuchers. Diese Maßnahme erfolgte bei allen Testversuchen in dieser Testreihe und beeinflusste die Ergebnisse nicht. Bei den Hüpfbewegungen sollte darauf geachtet werden, dass die Ferse nicht den Boden berührt. Mit einer Pause von jeweils einer Minute wurde jede Seite zweimal getestet. Dabei wurde für jede Seite der Hüpfversuch mit der höchsten gemessenen Kraft in die Auswertung genommen. Bei dieser Testreihe war vor allem die Hüpfleistung pro kg Körpergewicht interessant, sowie die Beschleunigung und die erbrachte Spitzenkraft beim Hüpfen.

Sit-to-stand test:

Für diesen Test war ein Hocker mit 45cm Sitzhöhe auf dem Leonardo angebracht. Die Probandinnen mussten fünfmal hintereinander so schnell wie möglich aus dem Sitz aufstehen und sich wieder hinsetzen. Die Wiederholungen während jeder Messung wurden laut vom Untersucher angesagt. Ein Test wurde abgebrochen wenn a) die Probandin die Armposition (gekreuzte Arme vor der Brust) nicht hielt und so ein Schwungmoment erzeugte, b) die Knie beim Aufstehen nicht vollständig durchgestreckt wurden, oder c) die Probandin weniger als 2/3 ihres Körpergewichtes in der Sitzphase auf die Messplatte brachte. Im Schnitt wurde jede zweite Messung abgebrochen und musste wiederholt werden. Die maximale Leistung pro kg Körpergewicht, die maximale Beschleunigung und die Wiederholungszeit für jeden „Aufsteh- und Hinsetz-Zyklus“ waren die wichtigsten Parameter für die Auswertung.

Für alle Tests auf dem Leonardo wurde die Software (Leonardo Mechanography Research Edition v4.2.b01.06c) zur Datenspeicherung und späteren Aufarbeitung der entscheidenden Daten verwendet.

Periphere quantitative Computertomographie (pQCT)

Für die pQCT-Messungen am linken Unterschenkel und linken Unterarm wurde das XCT 2000 (Stratec Medizintechnik, Pforzheim, Deutschland) verwendet. Schichtaufnahmen wurden bei 4% (distale Epiphyse) und bei 66% (Diaphyse) der Länge von Tibia und Ulna generiert. Es wurde die integrierte XCT 2000 Software (Version 6.20A) zur Analyse der pQCT-Daten verwendet.

Am distalen Radius und der Tibia (4% Schicht) wurden die totale und trabekuläre Knochenmineraldichte (BMD) ermittelt [threshold 180 mg/cm³ (contour mode 1, peel mode 1)], die corticale BMD an der Diaphyse (66% Schicht) [threshold 711 mg/cm³ (cortical mode 1)]. Der periostale Umfang (Ringmodel), der endostale Umfang (Ringmodel), das Dichtegewichtete, polare Trägheitsmoment und der section modulus an der Diaphyse (66% Schicht) wurden ebenso gemessen [threshold 480 mg/cm³ (cortical mode 1)]. Die muskuläre Querschnittsfläche (CSA) an der Diaphyse (66% Schicht) am Unterarm und am Unterschenkel wurde die Knochenfläche berechnet [threshold 280 mg/cm³ (contour mode 1, peel mode 1, filter 2: F03)] und von der kombinierten Muskel- und Knochenfläche [threshold 45 mg/cm³ (contour mode 3, peel mode 1, filter 2: F03F05)] abgezogen.

Ergebnisse

Probandinnen

Zu Beginn der Studie wurden keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Gruppen bei den anthropometrischen Daten gemessen ($p \geq 0,15$). Die Teilnehmerinnen der VIB-Gruppe absolvierten 91,1% aller Trainingseinheiten, in der BAL-Gruppe waren es 90,5%.

Gleichgewichtstestung auf einem instabilen Untergrund: posturomed

Signifikante Verbesserungen wurden über den Studienverlauf in beiden Gruppen gemessen, wobei der Unterschied zwischen den Gruppen nicht signifikant war (Gruppe×Studienzeitpunkt: $p=0,45$). Zum Ende der Studie nahm die Bewegungsbeschleunigung beim posturomed-Test signifikant um 28,3(36,1)% ($p < ,001$) in der VIB-Gruppe und um 18,5(31,5)% ($p < ,001$) in der BAL-Gruppe ab.

Gleichgewichtstestung auf einem stabilen Untergrund: Leonardo Mechanography

Die Einbeinstandtests zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen (Gruppe×Studienzeitpunkt: $p \geq 0,09$) und keine signifikanten Unterschiede nach den neun Monaten Interventionstraining innerhalb jeder Gruppe ($p \geq 0,053$). Bei den zusammengefassten Daten der beiden Gruppen wurde eine Verkleinerung der Standfläche beim Einbeinstand (nicht dominantes Bein, geschlossene Augen) und für den Einbeinstand (dominantes Bein, offene Augen) gemessen. Signifikante Veränderungen beim Rombergstand (geschlossene Augen) wurden in der VIB-Gruppe gefunden ($p=0,039$), in der BAL-Gruppe beim Tandemstand (offene Augen) ($p=0,011$) und beim semi-Tandemstand (geschlossene Augen) ($p=0,020$). Bei allen anderen verbliebenen Tests wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gemessen (Gruppe×Studienzeitpunkt: $p \geq 0,24$).

Countermovement jump

Eine Veränderung über die Zeit in den beiden Gruppen wurde mit Hilfe von ANOVA bei der Spitzenleistung pro kg Körpergewicht ($p=0,004$), bei der Sprunghöhe ($p=0,017$), bei der Sprungeffizienz ($p=0,002$) und dem „Esslinger Fitness Index“ ($p=0,006$) gemessen, aber nicht bei der Spitzenbeschleunigung ($p=0,41$). Signifikante Veränderungen wurden innerhalb der VIB-Gruppe gemessen, aber nicht in der BAL-Gruppe. Die Sprunghöhe und Effizienz verbesserte sich nicht signifikant bei der VIB-Gruppe, verschlechterte sich aber signifikant in der BAL-Gruppe. Beide Gruppen zeigten Verbesserungen bei der maximalen Sprungbeschleunigung.

Multiple one leg hopping

Die Daten des multiple one leg hopping zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen in der intent-to-treat Analyse ($p \geq 0,081$). Die Hüpfkraft und Beschleunigung verbesserte sich bei beiden Gruppen im linken Bein, sowie bei der VIB-Gruppe im rechten Bein. Die Hüpfleistung hingegen verschlechterte sich signifikant in beiden Beinen bei der BAL-Gruppe, nicht aber in der VIB-Gruppe. Eine Veränderung über die Zeit in den beiden Gruppen wurde bei der Spitzenhüpfbeschleunigung und -kraft im rechten Bein gefunden ($p=0,037$; $p \geq 0,25$). Die Spitzenbeschleunigung und -kraft verbesserten sich signifikant im rechten Bein bei der VIB-Gruppe, keine Veränderungen wurden bei der BAL-Gruppe gemessen.

Sit-to-stand test

Auch hier wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gefunden ($p \geq 0,12$). Es verbesserten sich die Wiederholungszeiten pro Aufsteh-/ Hinsetzbewegung und bei mittlerer Beschleunigung bei der VIB-Gruppe, aber nicht in der BAL-Gruppe. Keine signifikanten Veränderungen wurden bei der mittleren Leistung pro kg Körpergewicht gefunden.

Veränderungen der Knochenmineraldichte und-stärke

Mit Ausnahme der totalen Knochenmineraldichte am distalen Radius (group×time: $p=0,023$), wurden bei keinem gemessenen Knochenparameter (in allen Schichten am Unterschenkel und Unterarm) signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gefunden (group×time: $p \text{ all} \geq 0,08$). Signifikante Unterschiede wurden dennoch bei einigen Parametern nach den neun Monaten Training gefunden.

In der Tibia hat sich die trabekuläre BMD der distalen Epiphyse (4% Schicht) signifikant in der VIB-Gruppe (+0,32(0,83)%; $p=0,033$) und in der BAL-Gruppe (+0,52(1,35)%; $p=0,021$) verbessert, mit einer entsprechenden Zunahme in der totalen BMD der distalen Epiphyse (BAL: +0,48(1,44)%, nicht signifikant; VIB: +0,33(0,75)%; $p=0,015$).

Im Radius wurden signifikante Zunahmen der trabekulären BMD (Epiphyse, 4% Schicht) in der VIB-Gruppe (+1,05(2,69)%; $p=0,032$) und signifikante Zunahmen in der kortikalen BMD (Diaphyse, 66% Schicht) in der BAL-Gruppe (0,42(0,86)%; $p=0,008$) gemessen.

In der Ulna wurden signifikante Verbesserungen bei der BAL-Gruppe im Flächenträgheitsmoment (1,11(2,30)%; $p=0,009$) und im Widerstandsmoment (1,86(4,11)%; $p=0,014$) in der Diaphyse (66% Schicht) gemessen.

Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen und nach den neun Monaten innerhalb der Gruppen wurden in den Muskelquerschnittsflächen gemessen.

Diskussion

Bei den Gleichgewichtstests stellte sich heraus, dass die Ergebnisse in beiden Gruppen bei einigen Tests ähnlich ausgefallen sind. Damit ist dem Koordination- und Gleichgewichtstraining kein klarer Vorteil gegenüber dem Vibrationstraining nach zu weisen. Eine interessante Erkenntnis dieser Studie war, dass die Veränderungen der posturalen Kontrolle im Einbeinstand auf dem posturomed (instabile Plattform) nicht durch die Ergebnisse auf dem Leonardo widergegeben wurden. Verbesserungen des Gleichgewichtes auf dem posturomed wurden durch eine Verringerung der Bewegungsbeschleunigung der Platte reflektiert. In Hinsicht auf die zu Grunde liegende Literatur zu diesem Thema ist es unklar, ob eine Zunahme der Druckmittelpunkt- Bewegungsgeschwindigkeit und der Fläche auf dem Leonardo eine Verbesserung oder Verschlechterung des Gleichgewichtes dar stellt. Es ist anzunehmen, dass die Teilnehmerinnen im Laufe der Studie gelernt haben, die Freiheitsgrade der Gelenke, speziell in den Fußgelenken, den Knien und den Hüften, besser zu nutzen, als Teil des Einbeinstandes. In diesem Fall verringerte sich das Bewegungsausmaß und die Geschwindigkeit auf dem posturomed. Auf dem Leonardo hingegen entstand dadurch beim Druckmittelpunkt eine größere Bewegungsgeschwindigkeit, sowie eine größere Fläche aufgrund der besser genutzten Freiheitsgrade.

Bei den Muskelleistungstests (countermovement jump, multiple one leg hopping) wiederum bestätigte sich die Hypothese, dass sich ein Ganzkörpervibrationstraining kombiniert mit einem Krafttraining effektiver auf die neuromuskuläre Performance auswirkte als ein Gleichgewichtstraining mit Krafttraining. Dieser Effekt war beim countermovement jump in der Spitzenleistung und Sprunghöhe zu sehen. Beim multiple one leg hopping wurde bei der per-protocol Analyse eine bessere neuromuskuläre Performance in der VIB-Gruppe nach neun Monaten gefunden. Hinweise auf eine Verbesserung der neuromuskulären Performance durch ein Vibrationstraining sind schon in früheren Studien erbracht worden^{7, 13}.

Die Daten in den pQCT-Untersuchungen spiegelten nicht deutlich genug die Hypothese wieder, dass sich ein Krafttraining mit Vibrationstraining besser auf die Knochendichte in der Tibia auswirkt, als ein Krafttraining mit Gleichgewichtstraining. Dafür wurden neben der Tibia und dem Radius auch die Fibula und die Ulna betrachtet. Die Daten deuten darauf hin, dass die Ulna im Vergleich zum Radius viel mehr Kräften über die Muskulatur und von außen widerstehen muss.

Die Studie zeigt aber auch ein paar Limitierungen auf. Mit der zu Grunde liegenden Methodik ist es nicht möglich zu sagen, in wie weit das Krafttraining sowohl das Gleichgewichtsverhalten als auch die Muskelleistung beeinflusst hat. Es ist anzunehmen, dass das Krafttraining mehr die Muskelkraft verbessert hat, als die neuromuskuläre Leistung und Koordination. Durch die Primärzielstellung „Gleichgewichtsverhalten“ war das Training nicht optimal für die Knochenuntersuchungen abgestimmt. Die pQCT-Messungen konnten somit keine starken Effektgrößen in den Daten aufweisen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Untersuchung von postmenopausalen Frauen mit verringerter Knochendichte die Hypothesen nur zum Teil bestätigte. Konträr zu den Erwartungen zeigten sich ähnliche Effekte beim Vibrations- und Gleichgewichtstraining kombiniert mit einem Krafttraining. Dies bedeutet, dass ein Vibrationstraining in Verbindung mit einem Krafttraining das Gleichgewicht ähnlich verbessern kann, wie ein Krafttraining mit Gleichgewichtstraining. Der Gedanke eines Muskelleistungstrainings beim älteren Menschen wurde durch diese Studie noch einmal verstärkt, da sich speziell durch das Vibrationstraining die muskuläre Performance zum Teil sehr deutlich verbesserte. Die Ergebnisse unterstützen demnach die Einbindung eines Vibrationstrainings mit Krafttraining in das Trainingsmanagement bei Frauen mit osteoporotisch verminderter Knochendichte. Die Studie unterstützt die Aussage, dass ein Krafttraining (zweimal wöchentlich über neun Monate) die Knochendichte an der distalen Tibia verbessern kann. Ein zugeschaltetes Vibrationstraining oder Gleichgewichtstraining beeinflusst diesen Effekt nicht messbar. Die zu betrachtenden Messungen der Ulna und der Fibula weisen darauf hin, dass die Ulna die meisten Kräfte am proximalen Unterarm erfährt, wobei hingegen beim Radius die meisten Kräfte am distalen Unterarm einwirken. Die Daten der Ulna sollten in künftigen Studien genauer betrachtet werden.

Literaturliste

1. Runge M, Rittweger J, Russo CR, Schiessl H, Felsenberg D. Is muscle power output a key factor in the age-related decline in physical performance? A comparison of muscle cross section, chair-rising test and jumping power. *Clin Physiol Funct Imaging* 2004;24(6):335-40.
2. Lord SR, Clark RD, Webster IW. Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J Gerontol* 1991;46(3):M69-76.
3. Kannus P, Parkkari J, Koskinen S, Niemi S, Palvanen M, Jarvinen M, et al. Fall-induced injuries and deaths among older adults. *JAMA* 1999;281(20):1895-9.
4. Roubenoff R. Sarcopenia and its implications for the elderly. *Eur J Clin Nutr* 2000;54 Suppl 3:S40-7.
5. Perrin PP, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C. Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Br J Sports Med* 1999;33(2):121-6.
6. Chang JT, Morton SC, Rubenstein LZ, Mojica WA, Maglione M, Suttrop MJ, et al. Interventions for the prevention of falls in older adults: systematic review and meta-analysis of randomised clinical trials. *BMJ* 2004;328(7441):680.
7. Rittweger J. Vibration as an exercise modality: how it may work, and what its potential might be. *Eur J Appl Physiol* 2010;108(5):877-904.
8. Cochrane DJ, Loram ID, Stannard SR, Rittweger J. Changes in joint angle, muscle-tendon complex length, muscle contractile tissue displacement, and modulation of EMG activity during acute whole-body vibration. *Muscle Nerve* 2009;40(3):420-9.
9. Krebs DE, Scarborough DM, McGibbon CA. Functional vs. strength training in disabled elderly outpatients. *Am J Phys Med Rehabil* 2007;86(2):93-103.
10. Campbell AJ, Robertson MC, Gardner MM, Norton RN, Tilyard MW, Buchner DM. Randomised controlled trial of a general practice programme of home based exercise to prevent falls in elderly women. *BMJ* 1997;315(7115):1065-9.
11. Martyn-St James M, Carroll S. Progressive high-intensity resistance training and bone mineral density changes among premenopausal women: evidence of discordant site-specific skeletal effects. *Sports Med* 2006;36(8):683-704.
12. Chiari L, Cappello A, Lenzi D, Della Croce U. An improved technique for the extraction of stochastic parameters from stabilograms. *Gait Posture* 2000;12(3):225-34.
13. Russo CR, Lauretani F, Bandinelli S, Bartali B, Cavazzini C, Guralnik JM, et al. High-frequency vibration training increases muscle power in postmenopausal women. *Arch Phys Med Rehabil* 2003;84(12):1854-7.

Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen

Nils Stolzenberg hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: Stolzenberg N, Belavý D, Rawer R, Felsenberg D. Whole-body vibration versus proprioceptive training on postural control in postmenopausal osteopenic women. Gait& Posture (2013); article in press (j.gaitpost.2013.01.002)

Anteil: 85%

Beitrag im Einzelnen: Erstellung des Studiendesigns/Arbeitsplans, Erstellung des Ethikantrags, Erstellung des Antrags für das Bundesamt für Strahlenschutz, Probandenrekrutierung, gesamte Betreuung des Interventionstrainings, Erhebung aller Studiendaten (außer den radiologischen Daten), Bearbeitung von Studiendaten, Durchführung der Literaturrecherchen, Interpretation der Ergebnisse, Erstellung des Manuskriptes, Einreichung und Überarbeitungen der Artikel.

Publikation 2: Stolzenberg N, Belavý D, Rawer R, Felsenberg D. Vibration or balance training on neuromuscular performance in osteopenic women. Int. J. Sports Medicine (2013); article in press.

Anteil: 85%

Beitrag im Einzelnen: Erstellung des Studiendesigns/Arbeitsplans, Erstellung des Ethikantrags, Erstellung des Antrags für das Bundesamt für Strahlenschutz, Probandenrekrutierung, gesamte Betreuung des Interventionstrainings, Erhebung aller Studiendaten (außer den radiologischen Daten), Bearbeitung von Studiendaten, Durchführung der Literaturrecherchen, Interpretation der Ergebnisse, Erstellung des Manuskriptes, Einreichung und Überarbeitungen der Artikel.

Publikation 3: Stolzenberg N, Belavý D, Beller G, Armbrecht G, Semler, J, Felsenberg D. Bone strength and density via pQCT in post-menopausal osteopenic women after 9 months resistive exercise with whole body vibration or proprioceptive exercise. J. Musculoskeletal Neuronal Interaction. 2013; 13(1):66-76

Anteil: 85%

Beitrag im Einzelnen: Erstellung des Studiendesigns/Arbeitsplans, Erstellung des Ethikantrags, Erstellung des Antrags für das Bundesamt für Strahlenschutz, Probandenrekrutierung, gesamte Betreuung des Interventionstrainings, Erhebung aller Studiendaten (außer den radiologischen Daten), Bearbeitung von Studiendaten, Durchführung der Literaturrecherchen, Interpretation der Ergebnisse, Erstellung des Manuskriptes, Einreichung und Überarbeitungen der Artikel.

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

Berlin, den 07.05.2013

Stolzenberg N, Belavý DL, Rawer R, Felsenberg D (2013).

Gait & Posture 38(3): 416-420.

Link:

<http://www.gaitposture.com/article/S0966-6362%2813%2900004-0/abstract>

Stolzenberg N, Belavý DL, Rawer R, Felsenberg D (2013).

International Journal of Sports Medicine

DOI: 10.1055/s-0033-1334870

Link:

<https://www.thieme-connect.com/DOI/DOI?10.1055/s-0033-1334870>

Stolzenberg N, Belavý DL, Beller B, Armbrrecht G, Semler J,
Felsenberg D (2013). Journal of Musculoskeletal and Neuronal
Interactions 13(1): 66-76.

Link:

<http://www.ismni.org/jmni/pdf/51/08STOLZENBERG.pdf>

Lebenslauf

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

Publikationsliste

Publikation 1: Stolzenberg N, Belavý D, Rawer R, Felsenberg D. Whole-body vibration versus proprioceptive training on postural control in postmenopausal osteopenic women. *Gait& Posture* (2013); article in press (j.gaitpost.2013.01.002)

Impact Factor: 2.123 (2011)

Publikation 2: Stolzenberg N, Belavý D, Rawer R, Felsenberg D. Vibration or balance training on neuromuscular performance in osteopenic women. *Int. J. Sports Medicine* (2013); article in press.

Impact Factor: 2.433 (2011)

Publikation 3: Stolzenberg N, Belavý D, Beller G, Armbrecht G, Semler, J, Felsenberg D. Bone strength and density via pQCT in post-menopausal osteopenic women after 9 months resistive exercise with whole body vibration or proprioceptive exercise. *J. Musculoskeletal Neuronal Interaction*. 2013; 13(1):66-76

Impact Factor: 2.00

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Nils Stolzenberg, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: "Untersuchungen zur Optimierung des körperlichen Trainings bei Frauen mit postmenopausal verminderter Knochendichte" 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.“

Datum 07.05.2013

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich zuerst bei meinen tollen Probandinnen bedanken, die alles dafür getan haben um an dieser Studie teil zu nehmen und die Termine regelmäßig zu besuchen. Ohne diesen Einsatz wäre die Studie mit ihren Ergebnissen nicht so zu Stande gekommen wie sie nun vorliegt. Natürlich gilt mein Dank Hr. Prof. Dr. Dieter Felsenberg, der mir diese Arbeit ermöglichte und in fast allen Belangen freie Hand ließ. Wenn es darauf an kam, war er immer für mich da und hat mir mit seiner einmaligen Art und Weise zur Seite gestanden und mich beraten. Vielen Dank Dieter. Aus seinem Arbeitsteam des Instituts für Muskel- und Knochenforschung, sowie der Radiologie möchte ich folgenden Personen danken: Fr. Dr. Gisela Beller, die mir bei der Bearbeitung und Interpretation der pQCT-Daten zur Seite stand, Fr. Dr. Gabriele Armbricht für die Hilfe bei der Probandenrekrutierung per DXA-Untersuchung. Des Weiteren möchte ich Martina Kratzsch und Frank Touby danken für die immer nette und tolle Hilfe bei den DXA-Messungen, pQCT-Messungen und der Unterstützung bei der Datenverarbeitung. Ein besonderer Dank gilt Hr. Dr. Daniel Belavý, der mich bei der statistischen Auswertung, der Übersetzung der Artikel ins Fachenglisch, sowie deren Struktur unterstützt hat. Daniel, du warst für mich ein „Sechser im Lotto“. Für die Unterstützung der ersten Rekrutierungswelle möchte ich mich bei der Siemens Betriebs Krankenkasse bedanken (SBK), die viele hundert Briefe an mögliche Studieninteressentinnen verschickte. Ich möchte mich bei Mitarbeitern des Immanuel-Krankenhauses Wannsee bedanken. Bei Fr. Dr. Jutta Semler und Fr. Dr. Maya Hellmich für die Nutzung der Osteoporosedatenbank für die Probandenrekrutierung. Ab diesem Zeitpunkt war die Rekrutierung fast ein Selbstläufer. Bei Fr. Theel möchte ich mich für die DXA-Untersuchungen und Datensuche von Patienten bedanken. Mein Dank gilt Hr. Dr. Rainer Rawer von der Firma Novotec. Alle gesammelten Rohdaten über die Kraftmessplatte Leonardo wurden von ihm gesichtet und für die Statistik bearbeitet. Vielen Dank dafür. Ich bedanke mich beim Sport-Gesundheitspark für die Bereitstellung der Trainingsräume mit allen notwendigen Trainingszeiten und Materialien. Besonderen Dank gilt hierbei Fr. Beate Weyer, die alle sportmedizinischen Untersuchungen durchführte, unterstützt von Fr. Bettina Stempel. Danke schön. Vielen Dank an Hr. Wolfgang Brunner (Firma Zebris) und Hr. Eduard Haider (Firma Haider-Bioswing) für die Bereitstellung der Gerätschaften CMS10 (Zebris), sowie dem posturomed (Haider-Bioswing). Natürlich darf meine Familie nicht fehlen. Bei meiner Frau, meinen Eltern und Schwiegereltern möchte ich mich vor allem dafür bedanken, dass ich in aller Ruhe arbeiten konnte und moralisch unterstützt wurde. Den größten Dank an meine Frau, die mir die unzähligen Abende und Nächte der „Abwesenheit“ einräumte und mich ertrug, wie es so schön heißt: „Im Guten, wie im Schlechten“.