

Siegrist M^{1,2}, Lammel C², Jeschke D^{1,2}

Krafttraining an konventionellen bzw. oszillierenden Geräten und Wirbelsäulengymnastik in der Prävention der Osteoporose bei postmenopausalen Frauen

¹ Lehrstuhl und Poliklinik für Präventive und Rehabilitative Sportmedizin, TU München

² Kuratorium für Prävention und Rehabilitation, TU München

Zusammenfassung

In einer 12-monatigen prospektiven, randomisierten und kontrollierten Studie an 69 osteopenischen, postmenopausalen Frauen wurden die Effekte verschiedener Trainingsprogramme auf Knochen, Muskelkraft, dynamische Leistungsfähigkeit sowie Befindlichkeit untersucht.

Alle Frauen nahmen an einer angeleiteten Wirbelsäulengymnastik 2x/Woche teil. Zusätzlich führten 26 Frauen 2x/Woche ein konventionelles Krafttraining (KT) bei 60–80 % des Einwiederholungsmaximums (1RM) und 23 Frauen ein Krafttraining mit vibrierenden Trainingsgeräten (VT) 2x/Woche durch. 20 Frauen betrieben nur Wirbelsäulengymnastik (WS). Verglichen mit WS führte KT zu einer Vergrößerung der mittels DXA gemessenen Knochenfläche am Oberschenkelhals (+1,3 %). An der LWS waren in keiner Gruppe signifikante Veränderungen von Knochenmasse und -dichte (DXA) zu beobachten. Beide Krafttrainingsformen zeigten Zunahmen der max. dyn. Kraft der Beinstrecker (KT:+50 %; VT:+54 %) und Armbeuger (KT:+24 %, VT:+17 %). WS verbesserte die Bein kraft (+22 %). Fahrradergometrisch war eine Zunahme der rel. Maximalleistung durch KT um +8 % und durch WS um +6 % festzustellen. Schmerzen und Wohlbefinden besserten sich durch WS am besten. Im Rahmen der Osteoporose-Prävention kann eine WS-Gymnastik Kraft und Befinden verbessern. Das Vibrationstraining mit Zusatzgewichten bewirkt primär eine Kraftzunahme. Verbesserungen von Kraft und Knochenstruktur sind durch Krafttraining erreichbar.

Schlüsselwörter: Osteopenie, konventionelles Krafttraining, Vibrationskrafttraining, Wirbelsäulengymnastik, BMD

Einleitung

Zunehmende Lebenserwartung und veränderte Lebensgewohnheiten mit geringer körperlicher Alltagsaktivität sind wesentliche Ursachen, dass Osteoporose zu einem wachsenden Gesundheitsproblem mit erheblichen sozialen und finanziellen Auswirkungen geworden ist. Diese systemische Skeletterkrankung ist gekennzeichnet durch eine Reduktion der Knochenmasse und Störung der Mikroarchitektur des Knochengewebes mit erhöhtem Frakturrisiko. Etwa 250 000 Patienten mit Osteoporose werden wegen Frakturen jährlich in Deutschland stationär behandelt. Die Kosten dafür betragen über drei Milliarden Euro (17). Es wird erwartet, dass die Zahl der Frauen, die osteoporose-bedingte Frakturen erleiden, deutlich ansteigen wird (10). Häufigere medikamentöse Behandlungen von Hochrisikopatientinnen werden aber die Frakturrate

Summary

The effects of different training programs on bone, muscle strength, maximal power, pain and well-being were analyzed in a 12-month prospective, randomized and controlled study with 69 postmenopausal osteopenic women. All women took part in a basic tutorial gymnastic program; 26 women performed resistance training (KT) (60–80 % of the 1-Repetition-Maximum, 1RM) in addition to this basic program, and 23 women performed the gymnastic program and two additional exercises with a vibration ground plate and a vibrating dumb-bell (VT). 20 women only participated in the basic program (WS). Compared to WS, KT induced a significant increase in bone area of the femoral neck (+1,3 %) in DXA-measurements. No changes were observed at the lumbar spine. Women who participated in the vigorous training groups improved significantly in dynamic strength leg extension (1RM) (KT: +50 %; VT: +54 %) and arm flexion (KT:+24 %; VT: +17 %), whereas women who took part solely in WS showed only improvements in leg extension (+22 %). Ergometry resulted in an increase in relative power in KT (+8 %) and in WS (+6 %). Participants in WS produced the best results concerning improvements of subjectively perceived well-being and pain, assessed by visual analogue scales. It can be concluded that gymnastic programs are useful to improve physical performance and well-being, whereas adaptations in bone are only seen with resistance training of higher intensity. Vibration training in combination with additional load primarily shows improvements in strength.

Key words: Osteoporosis, resistance training, vibration training, well-being, BMD

nur gering reduzieren, da 50–70 % der osteoporose-typischen Frakturen bei Frauen vorliegen, die nur eine geringe Abnahme der Knochendichte aufweisen (36). Ziel der Prävention und Therapie der Osteoporose muss es deshalb sein, sowohl die Knochenfestigkeit zu erhöhen oder wenigstens zu erhalten, als auch sensomotorische, neuromuskuläre und kardiovaskuläre Risikofaktoren zu minimieren, die am Anfang einer Verletzungskette stehen.

Knochenmasse und -architektur ändern sich lebenslang. Neben genetischen Anlagen zählen hormonelle Regulation des Knochenstoffwechsels, Ernährung und körperliche Aktivität zu den bestimmenden Einflussfaktoren (19, 20). Systemisch wirken kalziumregulierende Hormone wie Parathormon, Kalzitinin, Vitamin D 3 bzw. Wachstums- und Sexualhormone. Für die lokale Festigkeit sind in erster Linie mechanische Verformungen des Knochens (40), nach experimentell belegten Daten in einer Größenordnung von 1 500–3 000 μ strain (1 000 μ strain = axiale Verformung von 0,1 %)

entscheidend (2, 12, 23). Sie führen zu Anpassungen der kollagenen Faserstruktur, des Mineralgehalts und der Makro- und Mikroarchitektur des Knochens (16, 43).

Nach vergleichenden Knochendichteanalysen in Quer- und Längsschnittstudien an erwachsenen Sportlern ist davon auszugehen, dass diese Bedingungen einerseits in Sportarten mit axialer Belastung bei wiederholt einwirkenden Gravitations- und Stoßkräften (Impacts), z.B. bei Sprüngen erfüllt werden. Andererseits treten physiologisch wirksame Verformungen auch bei den durch muskuläre Kraftentwicklung verursachten Zug-, Biegs- und Torsionskräften auf, wie sie in Kraftsportarten und in Sportarten mit hohen Maximalkraftanteilen wie z.B. Turnen, Ballett oder Sportspiele sowie bei gezieltem Krafttraining an Geräten entstehen. Die dadurch entstehenden Verformungskräfte haben eine deutliche und umfassende Steigerung der Knochendichte zur Folge (46, 47).

Für eine gezielte Osteoporoseprävention von Älteren und Untrainierten bietet sich nach diesen Erkenntnissen und im Hinblick auf ein minimales Verletzungsrisiko das apparative Krafttraining an, mit dem wesentliche Muskelgruppen des Körpers und entsprechende Skelettanteile individuell je nach Belastbarkeit optimal dosiert trainiert werden können. Studien mit postmenopausalen Frauen konnten in dieser Altersgruppe einen Erhalt oder leichten Gewinn an Knochenmasse (18, 22) durch regelmäßiges Krafttraining zeigen.

Neue Möglichkeiten werden mit Hilfe oszillierender Apparate gesehen, bei denen unter Ausnutzung des tonischen Vibrationsreflexes eine Koaktivierung von Agonisten und Antagonisten vermutet wird, was zu einer höheren Kraftentwicklung, zu einer höheren Gelenkstabilität und zu höheren auf den Knochen einwirkenden Kräften führen soll. Tierexperimentell (9, 31, 32) und in einigen Studien an Spitzensportlern (5, 42) wurde die Wirksamkeit dieser Maßnahme vereinzelt belegt. Beim Training auf einer vibrierenden Wippe bzw. mit einer vibrierenden Hantel sind nur einfache Willkürbewegungen in Form von Kniebeugen bzw. Unterarmbeugen vorzunehmen, deren Intensität durch Zusatzlasten variabel gestaltet werden kann. Bei geringerem Zeitaufwand im Vergleich zum konventionellen apparativen Krafttraining und weitgehend unabhängig von motivationalen Faktoren werden überschwellige Reize für Muskulatur und Knochengewebe erwartet.

Vor diesem Hintergrund stellte sich uns die Frage, ob bei postmenopausalen Frauen mit Osteopenie ein progressives Krafttraining über 12 Monate mit oszillierenden Geräten zu vergleichbaren Veränderungen am primären Endpunkt „Knochenmineralgehalt bzw. -dichte der Lendenwirbelsäule und des Oberschenkelhalses“ wie ein konventionelles apparatives Krafttraining führt. Als Kontrollintervention wurde Wirbelsäulengymnastik gewählt, da bezüglich des Endpunktes aufgrund des geringen „Impact“ bzw. anderer Stu-

dienergebnisse (28) keine messbaren Veränderungen zu erwarten waren. Im Verlauf und als weitere Endpunkte interessierten knochengeometrische Parameter von Oberschenkelhals, Tibia und Radius, die Muskelkraft und die dynamische Leistungsfähigkeit als wesentliche Faktoren einer Sturzprophylaxe sowie Schmerzempfinden bzw. Befindlichkeit, die für eine langfristige, konsequente Teilnahme an Trainingsprogrammen maßgebend sind.

Methodik

Im Einverständnis mit der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität München wurden 100 postmenopausale Frauen rekrutiert.

Einschlusskriterien waren das Alter (50 bis 70 Jahre), das Vorliegen der Menopause (mindestens zwei Jahre nach der letzten Menstruation) sowie ein Body-Mass-Index zwischen 18 und 30 kg/m². Die flächenbezogene Knochendichte ge-

Tabelle 1: Anthropometrische Grunddaten, maximale Leistung, flächenbezogene Knochendichte der Trainingsgruppen und Dropouts

Variable	WS-Gymnastik	Vibrationstraining	Krafttraining	Dropouts
N	19	17	20	13
Alter (Jahre)	61,4 ± 4,7	59,4 ± 4,1	60,6 ± 4,8	57,0 ± 5,3
Körpergröße (cm)	167,4 ± 6,4	163,9 ± 4,6	166,1 ± 5,4	163,4 ± 5,5
Körpergewicht (kg)	69,6 ± 8,9	64,4 ± 7,4	66,8 ± 7,9	65,6 ± 10,3
BMI (kg/m ²)	24,8 ± 2,8	24,0 ± 3,2	24,2 ± 2,5	24,5 ± 3,1
Max. Leistung (W)	130,1 ± 22,5	135,8 ± 18,5	142,7 ± 30,1	137,4 ± 22,1
aBMD LWK 2-4 (g/cm ²)	0,924 ± 0,090	0,951 ± 0,083	0,906 ± 0,100	0,897 ± 0,114
aBMD OSH (g/cm ²)	0,791 ± 0,109	0,832 ± 0,101	0,751 ± 0,049	0,777 ± 0,087

Werte sind angegeben als Mittelwert ± Standardabweichung

Abkürzungen: BMI, body mass index; aBMD, area-related bone mineral density = flächenbezogene Knochendichte

messen mittels DXA (dual energy x-ray absorptiometry in g/cm²) an der Lendenwirbelsäule (LWK 2-4) und am Oberschenkelhals (OSH) sollte zwischen -1 SD (Standardabweichungen) und -2,5 SD im Vergleich zum Referenzwert junger gesunder Frauen betragen (T-Score).

Ausschlusskriterien waren Erkrankungen mit Einfluss auf den Knochenstoffwechsel oder die Trainingsfähigkeit der Frauen. Medikamente mit Auswirkungen auf den Knochenstoffwechsel wie Bisphosphonate, Hormone, Kalzitinin oder Fluor durften nicht eingenommen werden. Die Einnahme von Calcium (bis 1 000 mg) und Vitamin D3 (bis 800 I.E.) waren erlaubt. 69 Frauen konnten in die Studie aufgenommen werden (Tab. 1). Frauen, die weniger als 40 Wochen trainierten, wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Folgende Messmethoden wurden vor, partiell im Trainingsverlauf und nach 12 Monaten angewandt:

Anamnese und klinische Untersuchung

Zu Beginn erfolgte eine eingehende Anamnese und klinische Untersuchung unter internistischen und orthopädischen Aspekten mit Überprüfung gesundheitsrelevanter Parameter und Erhebung anthropometrischer Grunddaten.

Fahrradergometrie

Zur Beurteilung der kardiovaskulären Belastbarkeit und Bestimmung der dynamischen Leistungsfähigkeit wurde unter ärztlicher und fortlaufender EKG-Kontrolle eine stufenweise ansteigende Fahrradergometrie (ergoline 900, Bitz, Deutschland) im Sitzen bei einer Tretfrequenz von 70/min beginnend mit 25 Watt und Steigerung um jeweils 25 Watt nach 2 Minuten bis zur subjektiven Erschöpfung oder dem Auftreten von subjektiven und/oder objektiven Abbruchkriterien (Angina pectoris, massive Dyspnoe, Zyanose, ischämische EKG-Alterationen, maligne Herzrhythmusstörungen, RR > 250/120 mmHg, RR-Abfall) durchgeführt. Eine Blutdruckkontrolle erfolgte vor und am Ende jeder Belastungsstufe sowie sofort, nach +1, +3, +5 min nach Abbruch. Vor und 1 min nach Belastung wurde Laktat aus dem Blut des Ohrläppchens mittels Biosen 5040 (EKF-diagnostics, Barleben, Deutschland) bestimmt.

Osteodensitometrie

Mittels DXA (Norland XR-26 Mark II, New York, USA) wurden der Knochenmineralgehalt [g] (BMC) und die flächenbezogene Knochendichte [g/cm²] (aBMD) an der Lendenwirbelsäule anterior/posterior (LWK 2-4) und am Oberschenkelhals (OSH) gemessen und über die integrierte Software Version 2.5.3 ausgewertet. Am OSH wurde die Knochenfläche [cm²] bestimmt. Zusätzlich wurden mittels peripherer quantitativer Computertomographie (pQCT) die volumetrische Knochendichte [g/cm³] sowie die Gesamtknochenfläche (CSA) [cm²] und endostale Fläche (end. A; Gesamtfläche abzüglich kortikaler Fläche) [cm²] an drei Messbereichen des Radius (4 %, 14 %, 38 %) und vier Bereichen der Tibia (4 %, 14 %, 38 %, 66 %) erfasst (XCT 2000, Stratec, Pforzheim, Deutschland) und über die integrierte Software Version 5.4 berechnet.

Kraftmessungen

Die maximale Kraft der Kniegelenkstrecker und Unterarmbeuger wurde als Einwiederholungsmaximum (1RM) am m3Diagnos+ (Schnell, Peutenhausen, Deutschland) bei vorgegebener Bewegungsamplitude bestimmt. Das Gewicht wurde so gewählt, dass das 1 RM nach etwa 5 Versuchen erreicht war (26). Die Messungen wurden immer vom gleichen Untersucher durchgeführt, der auf eine gleichmäßig langsame Bewegungsausführung und Bewegungsgeschwindigkeit achtete.

Befindlichkeitsmessungen

Zur Quantifizierung von Rücken- und Nackenschmerzen sowie Wohlbefinden füllten die Teilnehmerinnen einmal pro Woche an einem Trainingstag eine vertikale visuelle Analogskala (VAS) nach Guilford (14) am Morgen sowie vor und nach dem Training aus. Die 10 cm lange Skala enthielt als Extremwerte „100“ (keine Schmerzen bzw. gutes Wohlbefinden) und „0“ (sehr starke Schmerzen bzw. schlechtes Befinden).

Alltagsaktivitäten und Trainingsstatus, Trainingsdokumentation

Zu Beginn der Studie sowie halbjährlich wurden eingehend Alltags- und Sportaktivitäten mittels des Aktivitätsscores nach Sinaki (39) erfasst. Während der Intervention wurden Trainingshäufigkeit und -intensität, Satz- und Wiederholungszahlen sowie Veränderungen bei der progressiven Trainingsgestaltung von den Teilnehmerinnen dokumentiert und von der Studienleitung überprüft.

Randomisierte Interventionen

Randomisierung: Sie erfolgte anhand der im 1RM erreichten Werte. Die Frauen wurden nach der Summe der Maximalkraftwerte der Armbeuger und Beinstrecker rangiert und daraus jeweils Gruppen mit ähnlichen Kraftsummenwerten gebildet. Aus diesen Primärgruppen wurden die Teilnehmerinnen per Los einer der drei Trainingsgruppen zugeteilt.

Wirbelsäulengymnastik: Alle Probandinnen führten 2x/Woche eine angeleitete 45 Minuten dauernde Wirbelsäulengymnastik durch, die sich in ihrer Intensität an Alltagsreizen orientierte und als subjektiv anstrengend empfunden werden sollte. Schwerpunkte bildeten rumpfstabilisierende Übungen.

20 Teilnehmerinnen wurden nur dieser Intervention (WS) unterzogen.

Konventionelles Krafttraining (KT) an Geräten: 26 Frauen führten ergänzend zur Wirbelsäulengymnastik ein konventionelles Krafttraining durch, das nach einem 4-6wöchigen Eingewöhnungstraining als Muskelaufbautraining bei 60-80 % des 1RM mit 8-12 Wiederholungen und einem Satz an folgenden Geräten durchgeführt wurde: Latissimuszug, Ruderzug, Brustdrücken, Butterfly, Bauchflexion, Rückenextension, Beinab- und -adduktion und Beinpresse. Konnten die Teilnehmerinnen mehr als 12 Wiederholungen ausführen, wurde die Last gesteigert. Zusätzlicher Zeitumfang etwa 30 Minuten.

Oszillierendes Training (VT): 23 Frauen trainierten im Anschluss an die Wirbelsäulengymnastik mit oszillierenden Trainingsgeräten. Auf einer Vibrationsplattform (Galileo 2000, Novotec, Pforzheim, Deutschland) wurden bei 26 Hz mit einer Amplitude von 10-15 mm und einer Beschleunigung von 2,7 g gleichmäßig Kniebeugen ohne Pausen durchgeführt. Mit Hilfe von Gewichtswesten, deren Last im Verlauf gesteigert wurde, sollte innerhalb von 3 Minuten nach 20 bis 25 Kniebeugen eine lokale Muskelermüdung eintreten. Mit einer oszillierenden Hantel (Galileo 100, Novotec, Pforzheim, Deutschland) erfolgten bei 28 Hz, einer Amplitude von 6 mm und einer Beschleunigung von 1,7 g Bizepscurls mit Nackendrücken. Das Hantelgewicht wurde im Verlauf gesteigert, so dass nur 8 bis 12 Wiederholungen möglich waren. In einer Trainingseinheit wurde jeweils 1 Satz durchgeführt. Zusätzlicher Zeitaufwand etwa 10 Minuten.

Statistische Auswertung

Für alle statistischen Analysen wurde SPSS, Version 11.0.1 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA) verwendet. Prozentuale Veränderungen innerhalb der Gruppen wurden über den gepaarten t-Test bzw. bei fehlender Normalverteilung über den Wilcoxon-Test analysiert. Veränderungen zwischen den Gruppen wurden über die Varianzanalyse (ANOVA) untersucht und das Signifikanzniveau bei $p < 0,05$ festgesetzt. Veränderungen bei Schmerzempfinden und Wohlbefinden wurden innerhalb der Gruppen mit dem Wilcoxon-Test und zwischen den Gruppen mit dem Kruskal-Wallis-Test geprüft. Für Korrelationsanalysen wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman bestimmt.

Ergebnisse

Zu Studienbeginn unterschieden sich die Trainingsgruppen und späteren Dropouts nicht in anthropometrischen Grunddaten, Leistungsparametern, flächenbezogener

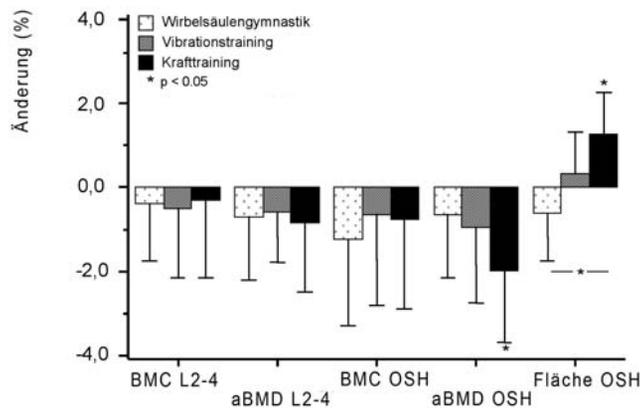


Abbildung 1: Prozentuale Änderungen von Knochenmineralgehalt (BMC) und flächenbezogener Knochendichte (aBMD) der Lendenwirbel 2-4 (L 2-4) sowie BMC, aBMD und Knochenfläche des Oberschenkelhalses (OSH) im Studienverlauf. Mittelwert \pm 95 % Konfidenzintervall der Mittelwerte

Knochendichte (Tab. 1), Befindlichkeit oder Trainingsanamnese.

13 der 69 Probandinnen brachen das Training vorzeitig ab. Die Dropout-Quoten waren mit 23 % in KT und 26 % in VT deutlich höher als in WS mit 5 %. Ursachen waren private Gründe (berufliche Belastung, Pflegefall in der Familie; KT, n=5; WS, n=1), akute Erkrankungen (VT, n=2), Knochenschmerzen (VT, n=1) bzw. Beschwerden im Rücken- (VT, n=2; KT, n=1) und Kniebereich (VT, n=1), die zu längeren Trainingspausen und damit zum Studienabschluss führten. Die Alltagsaktivitäten der Frauen änderten sich nicht.

An der LWS waren sowohl innerhalb als auch zwischen den Gruppen keine Veränderungen bzw. Unterschiede von BMD und BMC festzustellen. Am OSH zeigte sich durch das konventionelle Krafttraining eine Zunahme der Knochenfläche von $5,088 \pm 0,598$ auf $5,154 \pm 0,605$ cm²

(+1,3 %, $p=0,015$), die sich nach 12 Monaten signifikant ($p=0,020$) von WS unterschied. Der BMC im Gruppendurchschnitt blieb unverändert (Abb. 1). Es bestand ein Zusammenhang zwischen der Zunahme des BMC und der Zunahme der Knochenfläche des Schenkelhalses ($r=0,63$).

An der distalen Tibia (4 %-Messbereich) vergrößerte sich durch VT die Gesamtknochenfläche signifikant um +2,1 % ($p=0,038$) bei unveränderter kortikaler Knochendichte. Im 66 %-Messbereich der Tibia zeigte sich durch KT tendenziell sowohl eine periostale als auch endostale Knochenformation. Unter WS vergrößerte sich in diesem Messbereich der Medullarraum (endostale Fläche) signifikant (+1,8 %, $p=0,015$). Am distalen Radius (4 %-Messbereich) nahm durch KT die Gesamtknochenfläche um +2,0 % zu ($p=0,023$), ohne Veränderung der Gesamtknochendichte (Abb. 2). Gruppenunterschiede ergaben sich nicht.

Die maximale dynamische Kraft der Kniegelenkstrecker verbesserte sich durch KT um +50,1 % ($p < 0,001$), durch VT um +53,7 % ($p < 0,001$) und durch WS um +21,9 % ($p=0,018$) mit signifikanten Gruppenunterschieden (VT/WS, $p < 0,001$; KT/WS, $p=0,001$). Die Kraft der Unterarmbeuger erhöhte sich durch VT um +16,7 %

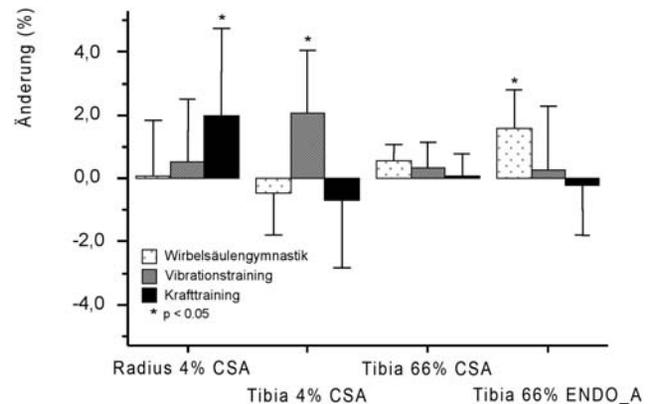


Abbildung 2: Prozentuale Änderungen von Querschnittsfläche (CSA) bzw. endostaler Fläche (ENDO_A) im 4- bzw. 66 %-Messbereich von Radius und Tibia. Mittelwert \pm 95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts

($p=0,003$), vor allem im ersten Halbjahr, während durch KT über den ganzen Untersuchungszeitraum Verbesserungen um insgesamt 24,2 % verzeichnet werden konnten ($p < 0,001$). Zwischen den beiden Krafttrainings- und der WS-Gruppe waren Unterschiede nachzuweisen (VT/WS, $p=0,030$; KT/WS, $p < 0,001$) (Tab. 2).

Durch KT stieg die relative maximale Leistung in der Ergometrie um +8 % ($p < 0,001$) (Tab. 3). Durch WS war ein Anstieg der relativen maximalen Leistung um +6 % ($p=0,001$) bei signifikant höherer Herzfrequenz ($p=0,025$) und höherem maximalen Laktat Spiegel ($p=0,006$) festzustellen. Bei VT zeigten sich keine signifikanten Änderungen.

Positive Veränderungen des Wohlbefindens bzw. vorhandener Rückenschmerzen konnten besonders durch WS im gesamten Studienverlauf beobachtet werden. KT führte vor allem im ersten Halbjahr zu eindeutigen Verbesse-

Tabelle 2: Prozentuale Änderungen Δ der maximalen dynamischen Muskelkraft im Studienverlauf

Gruppen	Δ 1RM Beinstrecker (%)			Δ 1RM Armbeuger (%)			
	MW \pm SD	Monat 1-6	Monat 1-12	Monat 6-12	Monat 1-6	Monat 1-12	Monat 6-12
WS	MW \pm SD	9,5 \pm 15,8**	21,9 \pm 20,8*	11,3 \pm 10,4*	-1,6 \pm 10,1	1,4 \pm 13,7	2,5 \pm 11,4
	N	19	18	18	20	18	18
VT	MW \pm SD	27,1 \pm 12,2*	53,7 \pm 19,8*	19,7 \pm 14,4*	13,2 \pm 13,3*	16,7 \pm 20,2*	3,6 \pm 8,7
	N	19	17	17	18	15	15
KT	MW \pm SD	28,6 \pm 20,1*	50,1 \pm 26,2*	16,5 \pm 11,4*	18,0 \pm 15,5*	24,2 \pm 15,1*	7,7 \pm 11,1**
	N	20	20	20	20	18	18

Werte sind angegeben als Mittelwert MW \pm Standardabweichung SD
 Abkürzungen: 1 RM, One-Repetition-Maximum = Einwiederholungsmaximum; WS, Wirbelsäulengymnastik; VT, Vibrationstraining; KT, Krafttraining
 * p < 0,001, ** p < 0,01, *** p < 0,05

rungen dieser Parameter. VT verbesserte nur das Wohlbefinden (Abb. 3). Hinsichtlich der Rückenschmerzen ergaben sich signifikante Gruppenunterschiede zwischen WS und VT (p=0,010) bzw. WS und KT (p=0,036).

Diskussion

Bei Frauen in und nach der Menopause kommt es häufig zu einem verstärkten Knochenverlust. Davon ist zunächst

Tabelle 3: Ergometrische Leistungsdaten vor und nach 12monatigem Training

Gruppen	Studienbeginn			Studienende			
	MW \pm SD	max. Leistung (W)	rel. Leistung (W/kg)	Laktat (mmol/l)	max. Leistung (W)	rel. Leistung (W/kg)	Laktat (mmol/l)
WS	MW \pm SD	130,1 \pm 22,5	1,9 \pm 0,3	6,8 \pm 1,5	137,3 \pm 26,6*	2,0 \pm 0,4*	7,5 \pm 1,2*
	N	19	19	19	19	19	19
VT	MW \pm SD	135,8 \pm 18,5	2,1 \pm 0,4	7,5 \pm 1,5	138,7 \pm 15,3	2,2 \pm 0,4	7,8 \pm 1,6
	N	17	17	17	17	17	17
KT	MW \pm SD	142,7 \pm 30,1	2,1 \pm 0,3	7,5 \pm 1,3	151,6 \pm 30,4*	2,3 \pm 0,3*	7,2 \pm 1,9
	N	20	20	20	20	20	20

Werte sind angegeben als Mittelwert MW \pm Standardabweichung SD
 Abkürzungen: WS, Wirbelsäulengymnastik; VT, Vibrationstraining; KT, Krafttraining
 * p < 0,05 (t-Test für gepaarte Stichproben)

primär der trabekuläre Knochen und insbesondere die Wirbelsäule betroffen. Eine Zunahme der Umbaurate führt zum Knochenmassenverlust und zur Verminderung der Mineralisierung, wodurch das Risiko für Wirbelkörperbrüche steigt. Später finden zunehmend auch Abbauprozesse am kortikalen Knochen statt, mit Erweiterung des Medullarraums und Abnahme der Kortikalisstärke (1, 33, 35). Dies vermindert die Knochenfestigkeit und erhöht das Risiko bei Stürzen, die mit zunehmendem Alter gehäuft auftreten, Frakturen zu erleiden. Diese Veränderungen entstehen durch Alterungsprozesse an sich, durch die geringere Stimulation des Knochens aufgrund häufig reduzierter körperlicher Aktivität im Alter und durch das geringere osteogene Potential, das körperliche Aktivität im Alter auf den Knochen, insbesondere bei postmenopausalen Frauen, hat (21).

Die verschiedenen Trainingsformen, die von den postmenopausalen osteopenischen Frauen mit vergleichbaren Ausgangswerten über ein Jahr mit gleicher Trainingshäufigkeit durchgeführt worden sind, führten zu unterschiedlichen Veränderungen.

Besonders das konventionelle Krafttraining ergab signifikante Veränderungen der Makroarchitektur des Knochens.

Bei 19 von 20 Frauen dieser Gruppe war eine Zunahme der Knochenfläche am Oberschenkelhals zu beobachten mit positivem Zusammenhang (r=0,63) zwischen den Änderungen der Knochenmasse und -fläche. Unter Berücksichtigung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten und den Ergebnissen anderer Studien kann ein

Festigkeitserwerb vermutet werden. Das Flächenträgheitsmoment, das die geometrischen Eigenschaften des Knochens repräsentiert, bestimmt im wesentlichen die Widerstandsfähigkeit des Knochens gegenüber Biegung und Torsion. Eine Vergrößerung der Querschnittsfläche erhöht das Flächenträgheitsmoment und damit die Festigkeit gegenüber einwirkenden Biegekräften. Im Gegensatz zur altersbedingten Verkleinerung der Knochenquerschnittsfläche am Oberschenkelhals, die bei Frauen oft gefunden wird (37), kommt es bei Männern häufig zur kompensatorischen Rekonstruktion des altersbedingten Knochenmassenverlustes in Form vergrößerter Querschnittsflächen (3). Diese geometrischen Veränderungen am Oberschenkelhals fanden Brahm und Mitarbeiter (6) vor allem bei Personen, die körperlich sehr aktiv waren.

Die höhere Reizintensität beim Krafttraining führte

über mechanische Stimuli zu signifikanten Flächenvergrößerungen bei gleichbleibender Knochendichte durch VT an der distalen Tibia und durch KT im Bereich des Handgelenks und hat damit einen positiven Einfluss auf die Knochenfestigkeit in diesem Bereich. Die alterstypische „Aus-

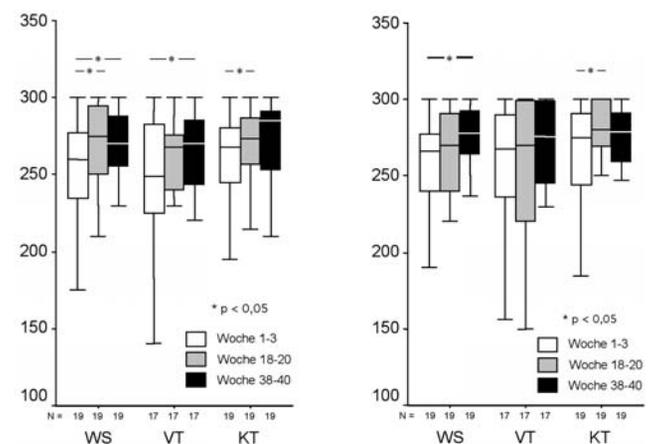


Abbildung 3: Allgemeines Befinden sowie Rückenschmerzen im Studienverlauf. Mediane mit Quartilen sowie Extremwerten (0 = maximale Schmerzen, schlechtes Wohlbefinden, 300 = keine Schmerzen, sehr gutes Wohlbefinden)

höhlung“ des Röhrenknochens, die in der Gymnastikgruppe mit Erweiterung des Medullarraums zu beobachten war, zeigte sich durch KT tendenziell reduziert, ähnlich Ergebnissen von Nara-Ashizawa (27) und Uusi-Rasi (44).

Im Gegensatz zu den eher lokalen Wirkungen am peripheren Skelett spielen am trabekulären Knochen der Lendenwirbelsäule systemische Einflüsse eine größere Rolle (29). Der postmenopausale Knochenabbau findet vor allem hier statt und beträgt durchschnittlich 1-2 % im Jahr (11). In unserer Studie waren in keiner Gruppe wesentliche Ab- oder Zunahmen von BMD oder BMC zu beobachten. Andere Autoren stellten bei älteren Frauen ebenfalls lediglich einen Erhalt oder einen geringen Gewinn an Knochenmasse durch Krafttraining fest (18, 46, 47, 48). Ursache für die geringen messbaren Veränderungen sieht Lanyon (21) darin, dass Anpassungen an die mechanischen Reize vor allem auf zellulärer Ebene mit Optimierung der Mikroarchitektur ablaufen, die sich nicht über eine Veränderung des BMD widerspiegeln. Dies könnte auch die Ergebnisse einer Untersuchung von Sinaki (38) erklären, die nach einem zweijährigen Rückentrainingsprogramm keine BMD-Unterschiede an der LWS zwischen Trainingsgruppe und Kontrollgruppe fand und trotzdem nach 10 Jahren eine deutliche Reduktion der WK-Frakturen in der Trainingsgruppe mit verbesserter Rückenmuskulatur feststellen konnte.

Eine größere Effektivität oszillierender Interventionen gegenüber konventionellem Krafttraining am Knochengewebe, die aufgrund tierexperimenteller Ergebnisse (24, 25, 31) vermutet werden, konnten wir nicht bestätigen. In der Literatur werden die Effekte mechanischer Schwingungsreize auf das menschliche Skelett nach wie vor kontrovers beurteilt (15). Verschueren (45) konnte durch ein 6monatiges Vibrationstraining bei postmenopausalen Frauen (3x/Woche über 30 Minuten, 35-40 Hz, Amplitude 1,7-2,5 mm) einen BMD-Gewinn von 0,93 % am Oberschenkelhals, aber keine Veränderungen an der LWS oder für die Gesamtkörperknochendichte feststellen. Rubin (30), der eine doppel-blinde Studie mit Vibrationstrainingsgeräten bei älteren Frauen (30 Hz, vertikale Vibration, 0,2 g, 2x 10 min/täglich) durchführte, konnte keine Veränderungen der Knochendichte nach einem Jahr feststellen. Nur bei leichten Frauen (< 65 kg) mit hoher Compliance kam es zur Reduzierung des BMD-Verlustes im Vergleich zur Kontrollgruppe. Torvinen (42), der ein Vibrationstraining über 8 Monate (4 min, 3-5x/Woche, 25-45 Hz, 2-8 g) bei jüngeren Personen durchführte, konnte keine Veränderungen am Knochen beobachten. Im Gegensatz zu den Studien von Verschueren, Rubin oder Torvinen (30, 42, 45), die bei keinem Teilnehmer Probleme durch das Training feststellen konnten, führte das oszillierende Training in unserer Studie bei einer Teilnehmerin zu Knochenschmerzen und zum Studienabbruch.

Neben einer Optimierung der Knochenfestigkeit ist eine Minderung des Sturzrisikos ein – wie einleitend angedeutet – vordringliches präventives Ziel. Bei älteren Menschen steht ein erhöhtes Sturzrisiko in engem Zusammenhang mit der Abnahme der Beinkraft und einer verschlechterten Gehfähigkeit (34). Prospektive und randomisierte Studien zeigen,

dass durch Verbesserung der neuromuskulären Funktion, insbesondere der Kraftfähigkeit, das Sturzrisiko deutlich reduziert werden kann (8, 13, 41). Alle drei Trainingsmaßnahmen verbesserten die Beinkraft wesentlich, erwartungsgemäß am stärksten die beiden Krafttrainingsformen. Obwohl beim oszillierenden Training progressiv Zusatzlasten von 15-30 kg verwendet wurden, war der Kraftgewinn nicht höher als beim konventionellen Krafttraining, so dass ein zusätzlicher Nutzen der Oszillation nicht gezeigt werden konnte.

Bei dem eindeutigen Kraftzuwachs der Beinmuskulatur hätte man eine Zunahme der maximalen ergometrischen Leistung in allen drei Gruppen erwartet. Nur bei KT und WS war dies zu beobachten. Die durch oszillierendes Krafttraining gewonnene Kraft konnte offenbar nicht in einem längerandauernden Arbeitsprozess umgesetzt werden.

Gesundheitliche Aspekte sind für Ältere zwar wesentliche rationale Beweggründe zum Sporttreiben, aber in der Hierarchie überdauernder Motivationen dominieren Spaß, Freude an Bewegung und in der Gruppe sowie das Streben nach Wohlbefinden (4, 7). Deswegen war es uns ein Anliegen, nicht nur physische Parameter, sondern auch Veränderungen der Befindlichkeit zu prüfen. Obwohl alle drei Trainingsgruppen die gleiche zielorientierte Wirbelsäulengymnastik durchführten, zeigten sich im gesamten Verlauf bei der alleinigen Wirbelsäulengymnastik bei Wohlbefinden und Schmerzempfinden bessere Ergebnisse als beim zusätzlichen Krafttraining.

Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die Praxis. Eine systematische WS-Gymnastik kann bereits Wohlbefinden und Kraft deutlich verbessern und hat damit einen positiven Einfluss auf die Lebensqualität und die Reduzierung des Sturzrisikos. Das oszillierende Training erbringt unter Zuhilfenahme von Zusatzgewichten primär Verbesserungen der Muskelkraft und es bedarf weiterer Untersuchungen, um seinen Stellenwert in der Osteoporoseprävention abschätzen zu können. Das konventionelle Krafttraining bewirkt neben deutlichen Kraftgewinnen zusätzlich Verbesserungen der Knochengeometrie. Durch die progressive, individuell dosierbare Trainingsmodifikation ist es als präventives Osteoporose-Training gut geeignet.

Literatur

1. Ahlborg HG, Johnell O, Turner CH, Rannevik G, Karlsson MK: Bone loss and bone size after menopause. *N Engl J Med* 349 (2003) 327-334.
2. Basso N, Heersche JN: Characteristics of in vitro osteoblastic cell loading models. *Bone* 30 (2002) 347-351.
3. Beck TJ, Ruff CB, Bissessur K: Age-related changes in female femoral neck geometry: implications for bone strength. *Calcif Tissue Int* 53 Suppl 1 (1993) S41-46.
4. Berger BG, Owen DR: Relation of low and moderate intensity exercise with acute mood change in college joggers. *Percept Mot Skills* 87 (1998) 611-621.
5. Bosco C, Colli R, Introvini E, Cardinale M, Tsarpela O: Adaptive response of human skeletal muscle to vibration exposure. *Clin Physiol* 19 (1999) 183-187.
6. Brahm H, Mallmin H, Michaelsson K, Strom H, Ljunghall S: Relationships between bone mass measurements and lifetime physical activity in a Swedish population. *Calcif Tissue Int* 62 (1998) 400-412.

7. Brehm W, Abele A: Auswirkungen sportlicher Aktivität, in: Baumann H (Hrsg.): Altern und körperliches Training. Bern, Göttingen, Toronto, 1992, 93-113.
8. Buchner DM, Cress ME, de Lateur BJ, Esselman PC, Margherita AJ, Price R, Wagner EH: The effect of strength and endurance training on gait, balance, fall risk, and health services use in community-living older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 52 (1997) M218-224.
9. Cullen DM, Smith RT, Akhter MP: Bone-loading response varies with strain magnitude and cycle number. *J Appl Physiol* 91 (2001) 1971-1976.
10. Cummings SR, Melton LJ: Epidemiology and outcomes of osteoporotic fractures. *Lancet* 359 (2002) 1761-1767.
11. Felsenberg D: Knochendichtemessung mit Zwei-Spektren-Methoden. *Radiologie* 39 (1999) 186-193.
12. Frost HM: Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal. *Anat Rec* 219 (1987) 1-9.
13. Gardner MM, Robertson MC, Campbell AJ: Exercise in preventing falls and fall related injuries in older people: a review of randomised controlled trials. *Br J Sports Med* 34 (2000) 7-17.
14. Guilford JP, Dingman HF: A validation study of ratio-judgement methods. *American J. Psychol.* 67 (1954) 395-410.
15. Haas CT, Turbanski I, Kaiser D, Schmidtbleicher D: Biomechanische und physiologische Effekte mechanischer Schwingungsreize beim Menschen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 55 (2004) 34-43.
16. Heinonen A, Sievanen H, Kyrolainen H, Perttunen J, Kannus P: Mineral mass, size, and estimated mechanical strength of triple jumpers' lower limb. *Bone* 29 (2001) 279-285.
17. Henke K, Martin K, Behrens C: Direkte und indirekte Kosten der Krankheiten in der Bundesrepublik Deutschland 1980 und 1990. *Zeitschrift für Gesundheitswissenschaft* 5 (1997) 123-145.
18. Kelley GA, Kelley KS, Tran ZV: Resistance training and bone mineral density in women: a meta-analysis of controlled trials. *Am J Phys Med Rehabil* 80 (2001) 65-77.
19. Kemper HC, Twisk JW, van Mechelen W, Post GB, Roos JC, Lips P: A fifteen-year longitudinal study in young adults on the relation of physical activity and fitness with the development of the bone mass: The Amsterdam Growth And Health Longitudinal Study. *Bone* 27 (2000) 847-853.
20. Krall EA, Dawson-Hughes B: Heritable and life-style determinants of bone mineral density. *J Bone Miner Res* 8 (1993) 1-9.
21. Lanyon L, Skerry T: Postmenopausal osteoporosis as a failure of bone's adaptation to functional loading: a hypothesis. *J Bone Miner Res* 16 (2001) 1937-1947.
22. Layne JE, Nelson ME: The effects of progressive resistance training on bone density: a review. *Med Sci Sports Exerc* 31 (1999) 25-30.
23. Martin RB: Toward a unifying theory of bone remodeling. *Bone* 26 (2000) 1-6.
24. Mosley JR, Lanyon LE: Strain rate as a controlling influence on adaptive modeling in response to dynamic loading of the ulna in growing male rats. *Bone* 23 (1998) 313-318.
25. Mosley JR, March BM, Lynch J, Lanyon LE: Strain magnitude related changes in whole bone architecture in growing rats. *Bone* 20 (1997) 191-198.
26. Müller KJ: Statische und dynamische Maximalkraft. Harri Deutsch Verlag, Frankfurt/Main, 1987.
27. Nara-Ashizawa N, Liu LJ, Higuchi T, Tokuyama K, Hayashi K, Shirasaki Y, Amagai H, Saitoh S: Paradoxical adaptation of mature radius to unilateral use in tennis playing. *Bone* 30 (2002) 619-623.
28. Papaioannou A, Adachi JD, Winegard K, Ferko N, Parkinson W, Cook RJ, Webber C, McCartney N: Efficacy of home-based exercise for improving quality of life among elderly women with symptomatic osteoporosis-related vertebral fractures. *Osteoporos Int* 14 (2003) 677-682.
29. Parfitt AM: Targeted and nontargeted bone remodeling: relationship to basic multicellular unit origination and progression. *Bone* 30 (2002) 5-7.
30. Rubin C, Recker R, Cullen D, Ryaby J, McCabe J, McLeod K: Prevention of postmenopausal bone loss by a low-magnitude, high-frequency mechanical stimuli: a clinical trial assessing compliance, efficacy, and safety. *J Bone Miner Res* 19 (2004) 343-351.
31. Rubin C, Turner AS, Mallinckrodt C, Jerome C, McLeod K, Bain S: Mechanical strain, induced noninvasively in the high-frequency domain, is anabolic to cancellous bone, but not cortical bone. *Bone* 30 (2002) 445-452.
32. Rubin CT, Gross TS, McLeod KJ, Bain SD: Morphologic stages in lamellar bone formation stimulated by a potent mechanical stimulus. *J Bone Miner Res* 10 (1995) 488-495.
33. Ruff CB, Hayes WC: Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *J Orthop Res* 6 (1988) 886-896.
34. Runge M: Gehstörungen, Stürze, Hüftfrakturen. Steinkopff-Verlag, Darmstadt, 1998, 98.
35. Russo CR, Lauretani F, Bandinelli S, Bartali B, Di Iorio A, Volpato S, Guralnik JM, Harris T, Ferrucci L: Aging bone in men and women: beyond changes in bone mineral density. *Osteoporos Int* 14 (2003) 531-538.
36. Seeman E: An exercise in geometry. *J Bone Miner Res* 17 (2002) 373-380.
37. Sievanen H, Uusi-Rasi K, Heinonen A, Oja P, Vuori I: Disproportionate, age-related bone loss in long bone ends: a structural analysis based on dual-energy X-ray absorptiometry. *Osteoporos Int* 10 (1999) 295-302.
38. Sinaki M, Itoi E, Wahner HW, Wollan P, Gelzcer R, Mullan BP, Collins DA, Hodgson SF: Stronger back muscles reduce the incidence of vertebral fractures: a prospective 10 year follow-up of postmenopausal women. *Bone* 30 (2002) 836-841.
39. Sinaki M, Offord KP: Physical activity in postmenopausal women: effect on back muscle strength and bone mineral density of the spine. *Arch Phys Med Rehabil* 69 (1988) 277-280.
40. Sterck JG, Klein-Nulend J, Lips P, Burger EH: Response of normal and osteoporotic human bone cells to mechanical stress in vitro. *Am J Physiol* 274 (1998) E1113-1120.
41. Tinetti ME, Baker DI, McAvay G, Claus EB, Garrett P, Gottschalk M, Koch ML, Trainor K, Horwitz R: A multifactorial intervention to reduce the risk of falling among elderly people living in the community. *N Engl J Med* 331 (1994) 821-827.
42. Torvinen S, Kannus P, Sievanen H, Jarvinen TA, Pasanen M, Kontulainen S, Nenonen A, Jarvinen TL, Paakkala T, Jarvinen M, Vuori I: Effect of 8-month vertical whole body vibration on bone, muscle performance, and body balance: a randomized controlled study. *J Bone Miner Res* 18 (2003) 876-884.
43. Uusi-Rasi K, Kannus P, Cheng S, Sievanen H, Pasanen M, Heinonen A, Nenonen A, Halleen J, Fuerst T, Genant H, Vuori I: Effect of alendronate and exercise on bone. *Bone* 33 (2003) 132-143.
44. Uusi-Rasi K, Sievanen H, Pasanen M, Oja P, Vuori I: Associations of calcium intake and physical activity with bone density and size in premenopausal and postmenopausal women: a peripheral quantitative computed tomography study. *J Bone Miner Res* 17 (2002) 544-552.
45. Verschuere SM, Roelants M, Delecluse C, Swinnen S, Vanderschueren D, Boonen S: Effect of 6-month whole body vibration training on hip density, muscle strength, and postural control in postmenopausal women: a randomized controlled pilot study. *J Bone Miner Res* 19 (2004) 352-359.
46. Vuori IM: Dose-response of physical activity and low back pain, osteoarthritis, and osteoporosis. *Med Sci Sports Exerc* 33 (2001) S551-S586; discussion 609-510.
47. Wallace BA, Cumming RG: Systematic review of randomized trials of the effect of exercise on bone mass in pre- and postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 67 (2000) 10-18.
48. Wolff I, van Croonenborg JJ, Kemper HC, Kostense PJ, Twisk JW: The effect of exercise training programs on bone mass: a meta-analysis of published controlled trials in pre- and postmenopausal women. *Osteoporos Int* 9 (1999) 1-12.

Korrespondenzadresse:

Dr. Monika Siegrist

Präventive und Rehabilitative Sportmedizin, TU München

Connollystr. 32

80809 München

e-Mail: siegrist@sport.med.tum.de