

4 DISKUSSION

Der Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität, Muskulatur und Knochenmasse stellt eine bekannte Tatsache dar und ist in zahlreichen Querschnittsstudien gut belegt. Positive Korrelationen zwischen Muskel- und Knochenmassen und -flächen konnten in Untersuchungen an Frauen verschiedener Altersgruppen bestätigt werden.⁵¹⁻⁵³

Der größte und am längsten anhaltende Einfluss auf die Knochenmasse ist für körperliche Aktivität und Sport in der Kindheit beschrieben.⁵⁴ Ab der Pubertät ist eine Zunahme an Knochenmasse durch Training nur in geringerem Umfang möglich: Eine Untersuchung der Knochenmassen der Radii bei Tennisspielern z.B. ergab größere BMD-Differenzen zwischen dem dominanten und dem nicht-dominantem Arm bei den Spielern, die vor dem 5. Lebensjahr trainiert hatten als bei den Spielern, die erst in der Jugend mit dem Tennis begannen.^{20, 55} Kannus et al. untersuchten ebenfalls die Knochenmassen der oberen Extremitäten von Tennisspielerinnen. Die Differenz zwischen Spiel- und nicht-dominantem Arm war bei den Frauen, die vor der Menarche mit dem Training begonnen hatten, ca. doppelt so groß wie bei den Spielerinnen, die erst nach der Menarche mit dem Tennisspielen angefangen hatten.⁵⁶

Frost beschreibt die Fähigkeit des adulten Knochens, auch nach Abschluss der Skelettentwicklung und Erreichen der Peak Bone Mass auf intensives Training mit Modeling zu reagieren. Modeling wird dabei durch eine Verformung des Knochens durch die Muskulatur ausgelöst, die die sog. Modeling-Schwelle überschreitet. Es kommt zu einer lokalen Aktivierung von Osteoblasten, die neues Osteoid synthetisieren, das nach und nach mineralisiert wird. Im Rahmen der Strukturanpassung der Knochen an veränderte mechanische Beanspruchungen kann durch Osteoklasten-Drifts im Rahmen des Modeling auch Knochensubstanz abgebaut werden. Generell ergibt sich jedoch ein Zugewinn von Knochenmasse.⁹

In höherem Alter kann durch Training lediglich einem Knochenmasseverlust vorgebeugt werden.¹¹ Durch Veränderung des humoralen Umfeldes kommt es zu einer Anhebung der Modeling- bzw. Remodeling-Schwelle, sodass die Verformungen, die durch Alltagsbelastungen auf den Knochen wirken, nicht mehr ausreichend sind, um dem Knochenabbau entgegen zu wirken. Durch Training kann dann der Verlust von Knochenmasse zwar aufgehalten werden, ein Aufbau von neuer Knochensubstanz ist aber wegen der Verschiebung der Modeling-Schwelle auf ein höheres Niveau fast nicht mehr möglich.¹¹

Diese Aussage wird durch 2 aktuelle Metaanalysen bestätigt, die die Ergebnisse von Trainingsstudien zur Osteoporose-Prävention untersuchten. Für peri- und postmenopausale Frauen wurde - unabhängig von der Art der Trainingsintervention - ein Unterschied von 0,9 – 2 % BMD zwischen Trainings- und Kontrollgruppe ermittelt.^{33, 57}

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass einem Knochenmasseverlust nur durch Training, das große Kräfte und Verformungen am Knochen bewirkt, vorgebeugt werden kann.^{11, 58-60}

Dieser Zusammenhang konnte in tierexperimentellen Studien bestätigt werden.⁵⁸ Dabei scheint eine relativ geringe Anzahl an Verformungszyklen ausreichend zu sein, wie in einer „Trainingsstudie“ an Ratten gezeigt werden konnte: Die Knochenmassen an Femur und Tibia der Ratten, die über 8 Wochen täglich 5 Sprünge absolvierten, nahmen vergleichbar zu wie die der Tiere, die 10, 20 oder 40 mal pro Tag sprangen.⁶¹

Die Schwierigkeit bestand nun darin, vor diesen Hintergründen ein geeignetes Trainingskonzept zu entwickeln, das für ältere Menschen geeignet ist und eben diese biomechanischen Reize setzen kann. Dabei muss gewährleistet sein, dass das Verletzungsrisiko minimal ist, und auch bei langfristiger Ausübung kein gesundheitlicher Schaden verursacht wird.

Neben der Ausarbeitung einer idealen Trainingsform darf die Problematik der Motivation nicht übersehen werden. Lediglich 50 – 60 % der Anfangsteilnehmer führen – unabhängig vom Alter - nach Dishman et al. ein sportliches Übungsprogramm länger als 3 Monate fort.⁶² Daher ist es wichtig, die Durchführbarkeit von Trainingskonzepten in Hinblick auf den Zeitaufwand für die Teilnehmer, als auch auf die Kosten zu überprüfen.

Das Konzept des intensiven Krafttrainings scheint die genannten Forderungen an ein Osteoporosetraining zu erfüllen. In einer Studie von Fiatarone et al.⁶³ wurde zum Beispiel ein Krafttraining bei teils stark gebrechlichen Altenheimbewohnern mit hohen Gewichten, entsprechend 70 – 80 % der Maximalkraft, durchgeführt. Dabei konnten Maximalkraft, Ganggeschwindigkeit und spontanes Aktivitätslevel der Studienteilnehmer deutlich gesteigert werden. Neben dieser zeigen weitere Arbeiten, dass ein intensives Krafttraining bei älteren Frauen ohne Gefahr durchgeführt werden kann.⁶⁴⁻⁶⁶ Fiatarone et al. kamen zu dem Schluss, dass niedrige Muskelmasse und Muskelschwäche streng mit der reduzierten Mobilität bei gebrechlichen Senioren korreliert.⁶³ Die Verbesserung von Muskelkoordination und Mobilität führt zu einer besseren Bewältigung von Alltagssituationen und Erhalt der Selbständigkeit im Alter, sowie der Reduktion des Sturzrisikos.^{67, 68}

Auch in den Richtlinien des American College of Sports Medicine für das Training von älteren Menschen⁶⁹ und zur Prävention der Osteoporose⁷⁰ wird Krafttraining ausdrücklich als wichtiger Übungskomplex empfohlen.

In dieser Studie sollte daher ein Trainingskonzept zur Anwendung kommen, das einen schnellen Zugewinn an Muskelkoordination und -kraft erwarten ließ. Durch die größere Verformung des Knochens, verursacht durch die zunehmende Kraft, wurde eine positive Stimulation des Knochenstoffwechsels bei einem vertretbaren zeitlichen Trainingsaufwand erwartet. Ein Ansatzpunkt war dabei die Integration von Übungen auf einem vibrierenden Trittbrett (Galileo 2000) in das Osteoporosetraining.

Da die vorliegende Studie bis dato die erste war, die den Effekt eines Vibrationstrainings auf die Knochenmasse von postmenopausalen Frauen untersuchte, konnte bei der Trainingsplanung lediglich auf Erkenntnisse aus anderen Forschungsbereichen und Pilotstudien zu Effekten des Galileo 2000 zurückgegriffen werden:

Im Bereich des Leistungssports spielen Vibrationen v.a. im Skiabfahrtslauf eine große Rolle und sind Forschungsgegenstand der Trainings- und Bewegungslehre.^{41, 42} Bei Tests, die ein Abfahrtsrennen simulierten, wurden dabei Frequenzen bis zu 30 Hz auf der Höhe der Hüfte gemessen. Die entsprechenden Beschleunigungen betragen dabei mehr als die vierfache Erdbeschleunigung.^{41, 42} Derartige stoßartige, rhythmische Vibrationsreize bewirken durch Entkopplung der Reflexe eine Koaktivierung von Agonist und Antagonist. Neben einer größeren Gelenksteifigkeit, die vermutlich einen phylogenetischen Schutzreflex darstellt, resultiert aus dieser Koaktivierung eine stärkere muskuläre Anspannung und Kraft, die eine größere Verformung am Knochen bewirken kann.^{41, 42, 71}

Neben diesen physiologischen Hintergründen der Vibration kann von einer Vielzahl weiterer Faktoren ausgegangen werden, die im Training auf dem Galileo 2000 eine Rolle spielen:

Durch die Vibration wird der Körper einer zusätzlichen schnell wechselnden Beschleunigung ausgesetzt. Bei Training auf dem Galileo 2000 z.B. beträgt die Beschleunigung in der äußersten Standposition (Position 4) etwa 4 g ($g = \text{Erdbeschleunigung} = 9,81 \text{ m/s}^2$). Die neuromuskulären Reaktionen auf diese Beschleunigung dienen der Dämpfung und der Wiederherstellung des Gleichgewichtes und reduzieren die zuvor beschriebene Beschleunigung auf ca. 2 g. Ein derartiger Vibrationsreiz führt auf der Ia-Schleife zu einer Aktivierung der Alpha-Motoneurone, ohne die übliche zentrale Ansteuerung und Kontrolle. Dadurch kommt es zu der bereits angesprochenen Koaktivierung der Muskulatur mit größerer Kraftentfaltung, die eine stärkere Verformung des Knochens zur Folge hat.^{41, 42}

Darüber hinaus wird die intra- und intermuskuläre Koordination durch eine verbesserte und schnellere Nervenreizleitung gesteigert. Diese verbesserte Koordination wird für kurzfristige Steigerungen der Muskelleistung verantwortlich gemacht.^{44, 72}

Einige Studien untersuchten den Einfluss von Vibrationstraining auf Muskelkraft und -leistung: In einer Studie von Issurin et al.⁷³ mit 28 Sportstudenten konnte die Maximalkraft der Armbeuger durch ein 3-wöchiges Vibrationstraining (44 Hz, Amplitude 3 mm) um fast 50 % gesteigert werden im Gegensatz zu einer 16 %igen Steigerung in der Vergleichsgruppe, die ein konventionelles Training absolvierte. Die italienische Arbeitsgruppe von C. Bosco untersuchte den Kurzzeiteffekt von Training auf dem Galileo 2000 auf Bewegungsgeschwindigkeit, Muskelkraft und -leistung an der Beinpresse bei Volleyballspielerinnen, wobei ein Bein als Kontrolle diente. Bei allen genannten Parametern konnten signifikante absolute Verbesserungen für das mit Vibration trainierte Bein beobachtet werden, während keine Änderungen für das Kontroll-Bein zu verzeichnen waren.⁷²

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse einer Untersuchung von Schlumberger et al.,⁷⁴ in der 7 Sportstudenten und 3 Sportstudentinnen über einen Zeitraum von 6 Wochen bei 3 Trainingseinheiten/Woche an einem Galileo-Training teilnahmen. Dabei wurden einbeinige Kniebeugen mit einer Hantelstange als Zusatzgewicht durchgeführt. Das Gewicht wurde so gewählt und angepasst, dass die Durchführung von 4 Serien mit 8 – 12 Wiederholungen gerade noch möglich war. Bei der Hälfte der Probanden wurde das stärkere, bei der anderen Hälfte das schwächere Bein mit Vibration auf dem Galileo trainiert (25 Hz, Amplitude 6 mm), mit dem jeweils anderen Bein wurden Kniebeugen ohne Vibration durchgeführt. Am Ende des Trainings ergab sich kein signifikanter Unterschied der isometrischen Maximalkraft und der „Explosivkraft“ (Kraftänderung pro Zeit) für das Training auf Vibrationsbasis. Kritikpunkte an dieser Studie sind jedoch die geringe Probandenzahl und die kurze Interventionsdauer. Zudem könnten die Ergebnisse der Kraft- und „Explosivkraft“-Messung bei den 3 weiblichen Studienteilnehmerinnen durch unterschiedliche Phasen im Menstruationszyklus beeinflusst sein.^{75, 76} Auch kann ein Symmetrie-Effekt oder ein Einfluss des außerhalb der Studie durchgeführten Trainings im Rahmen des Sportstudiums, das mit einer Dauer von 10 – 12 Stunden/Woche angegeben ist, nicht ausgeschlossen werden, auch wenn zusätzliches Krafttraining nicht gestattet war.

Neben leistungssportlichen Untersuchungen sind auch einige Untersuchungen zu den physiologischen Effekten und der Sicherheit des Galileo-Trainings durchgeführt worden.^{43, 77} Diese dienten u.a. der Einschätzung von Nebenwirkungen wie sie aus der Arbeitsmedizin

bekannt sind. Dabei handelt es sich z.B. um muskuläre Verspannungen, Durchblutungsstörungen, Gelenk- oder Kopfschmerzen, die für Führer von Hubschraubern⁷⁸ oder Bulldozern⁷⁹ beschrieben sind, oder durch Arbeiten mit dem Presslufthammer⁸⁰ verursacht werden.

Rittweger et al.⁴³ sowie die Arbeitsgruppe von Hartard⁷⁷ untersuchten die Effekte einer Ausbelastung durch Kniebeugen mit Zusatzgewichten auf dem Galileo 2000. Blutdruck, Herzfrequenz, maximale Sauerstoffaufnahme und maximales Laktat wurden mit den durch eine ausbelastende Fahrradergometrie vorab ermittelten Maximalwerten verglichen. Beide Gruppen fanden übereinstimmend geringere Werte aller genannter Parameter bei gleicher subjektiver Ausbelastung durch Kniebeugen auf dem Galileo 2000 als durch die Fahrrad-Ergometrie. Demnach sind auch bei vollständiger muskulärer Ausbelastung wesentliche kardiovaskuläre Effekte durch das Vibrationstraining wenig wahrscheinlich.

Kershan-Schindl et al.⁸¹ untersuchten den Einfluss des Galileo 2000 auf rheologische Parameter. Dabei standen 8 Frauen (Alter $28,5 \pm 2,2$ Jahre) und 12 Männer (Alter $32,7 \pm 3,3$ Jahre) in 3 verschiedenen Positionen für jeweils 3 Minuten auf dem Galileo 2000 (26 Hz, Amplitude 3 mm). Vor und sofort nach der Intervention wurde die Geschwindigkeit des Blutflusses am M. gastrocnemius und M. Quadriceps mittels Farb-Doppler und Herzfrequenz und Blutdruck bestimmt. Durch die Vibration war es an beiden Messorten zu signifikanten Steigerungen der Flussgeschwindigkeit ($p = 0,0001$) bei unveränderten Herzfrequenz- und Blutdruckwerten gekommen. Dieser Effekt wurde als Verbesserung der Stoffwechselsituation im Muskel ohne Belastung des Herz-, Kreislaufsystems gewertet.

Erkenntnisse über die Wirkung von Vibration auf den Knochen sind bis jetzt nur aus tierexperimentellen Untersuchungen verfügbar. So konnte ein positiver Einfluss auf den Erhalt der Knochenmasse und –festigkeit bei ovariectomierten Ratten⁸² und die Zunahme von Spongiosa im Femur bei Schafen belegt werden.⁸³

Diese genannten Untersuchungen zeigen, dass keine Nebenwirkungen durch Übungen auf dem Galileo 2000 im Rahmen eines Osteoporose-Trainings zu erwarten waren. Die obengenannten Erkenntnisse aus der Muskelphysiologie (Koaktivierung, Aktivierung der Motoneurone,^{41, 42} Verbesserung der Nervenreizleitung^{44, 72}) und den tierexperimentellen Studien^{82, 83} ließen zudem einen positiven Einfluss auf den Knochen erwarten.

Da keine praktischen Erfahrungen mit Vibrationstraining bei postmenopausalen Frauen existierten, wurde in dieser Studie bei der Trainingsgestaltung sehr behutsam vorgegangen, und v.a. die Intensität nur langsam durch Zusatzgewichte gesteigert. So wurde in den ersten

6 Monaten insbesondere Wert auf den sicheren freihändigen Stand auf dem Galileo 2000 und die korrekte Ausführung der Kniebeugen gelegt, und das Zusatzgewicht nur wenig gesteigert. Die nachfolgende deutliche Erhöhung der Trainingsgewichte sollte von den Teilnehmerinnen gut toleriert werden.

Da zudem noch keine Erkenntnisse zum Galileo-Training bei verschiedenen Frequenzen vorlagen, wurden die Grundlagen der Muskelphysiologie zur Orientierung herangezogen: Die maximale Zuckungszeit der schnellen Typ-II-Fasern liegt etwa im Bereich von 40 ms. Durch Training in dem entsprechenden Frequenzbereich (20 – 30 Hz) würden v.a. die schnell kontrahierenden Fasern angesprochen. Es wurde daher eine Frequenz von 25 Hz für die Studie festgelegt.

Das Krafttraining an Geräten wurde dem Galileo-Training soweit wie möglich in Bezug auf die Intensität angepasst. Mit 50 – 60 % während der ersten und 60 – 70 % der Maximalkraft während der zweiten 6 Monate entsprach es in etwa einem Kraftausdauertraining.⁸⁴ Als Orientierung zur Festlegung der Anzahl der Wiederholungen diente die Dauer jeder Übung auf dem Galileo 2000 (2 – 3 min).

Die Akzeptanz dieses Trainings war bei den Teilnehmerinnen groß. Es ergaben sich lediglich kurzfristige Beschwerden, die mit dem Training in Zusammenhang zu bringen waren: Durch das Galileo-Training kam es in einzelnen Fällen in der Anfangsphase zu juckenden Rötungen z.T. mit leichter Schwellung der Unterschenkel oder zu Kopfschmerzen. Diese Nebenwirkungen hielten nicht lange an und traten nach den ersten Wochen nicht mehr auf. Beim Auftreten von orthopädischen Beschwerden (z.B. Rücken-, Knie-, Schulterschmerzen) wurde das Training - wenn möglich - nicht abgebrochen, sondern mit niedrigen Gewichten und geringerer Wiederholungszahl fortgesetzt.

Um die Drop Out-Rate wegen Unverträglichkeit der Hormontherapie möglichst gering zu halten, konnten sich die Probandinnen frei für oder gegen die Einnahme entscheiden. Ein ähnliches Vorgehen wurde in der Trainingsstudie von Heinonen et al. gewählt, in der sich ein in etwa ausgewogenes Verhältnis von therapierten zu nicht-therapierten Frauen in den Trainingsgruppen ergab.³⁵ Im Gegensatz dazu ergaben sich in der Studie von Pruitt et al., in der die HRT-Einnahme ebenfalls freigestellt war, sehr unterschiedliche Verteilungen innerhalb der Gruppen, die eine Beurteilung der Wirksamkeit des Trainings durch Überlagerung mit Effekten durch HRT schwierig gestaltet.⁸⁵

In der vorliegenden Studie ist die Vergleichbarkeit der zwei Trainingskonzepte gegeben, da der Anteil der Frauen, die das Hormonpräparat einnahmen, in beiden Trainingsgruppen annähernd gleich groß war.

Die Wirksamkeit der beiden Trainingsformen auf die Muskelkraft der unteren Extremitäten konnte durch die hochsignifikante Zunahme der Drehmomente belegt werden, wobei kein Unterschied zwischen den Gruppen zu beobachten war.

Die Auswertung der flächenbezogenen Knochenmassen an Lendenwirbelsäule und Femur der beiden Trainingsgruppen zeigte keinen unterschiedlichen Einfluss durch Training. Durch das Galileo-Training wurde die Knochenmasse an beiden Messorten lediglich tendenziell mehr erhöht als durch das Krafttraining, das einem leichten Knochenmasseverlust v.a. im Bereich der Lendenwirbelsäule nicht vorbeugen konnte (Abb. 3.1, Seite 34).

Durch beide Trainingsformen wird die Muskulatur der unteren Extremitäten stärker trainiert als die des Rumpfes. Vor allem das Galileo-Training übt den größten Einfluss auf die Muskulatur aus, die der vibrierenden Platte am nächsten ist, da hier die reflektorische Dämpfung am geringsten ist. Als Folge der größeren Kraftentwicklung kommt es zu stärkeren Verformungen an den Skeletteilen, die mit dieser Muskulatur in Verbindung stehen. Diese Tatsache könnte den größeren Einfluss auf den Femur erklären.

Diese Ergebnisse entsprechen denen der folgenden Trainingsstudien, die besagen, dass der Einfluss einer Intervention auf die Knochenmasse in den Skelettregionen am größten ist, die mit den durch das Training am intensivsten beanspruchten Muskelgruppen in Bezug stehen:

In einer randomisierten Trainingsstudie von Kerr et al.³⁸ führten postmenopausale Frauen entweder ein intensives Krafttraining (8 Wiederholungen pro Übung) oder ein Kraftausdauertraining (20 Wiederholungen) in 3 Sätzen durch. Dabei wurde jeweils nur ein Arm und ein Bein mit freien Gewichten oder an Kraftmaschinen trainiert. Nach einem Jahr ergaben sich signifikante Unterschiede beim Vergleich der Knochenmassen von Femur und Radius der trainierten Extremität mit der nicht trainierten. Auch war der Einfluss des intensiven Krafttrainings in dieser Studie deutlich größer als der des Kraftausdauertrainings.

Revel et al.⁸⁶ verglichen den Einfluss eines einjährigen Trainings des M. psoas auf die trabekuläre Dichte der Lendenwirbelkörper 1 – 4 mit dem des M. deltoideus als Kontrolle. Das Training des M. psoas bestand aus dem Anheben des mit Sandsäcken (5 kg) beschwerten Oberschenkels im Sitzen. Diese Übung wurde auf jeder Seite 60 mal in 2 - 3 Sätzen wiederholt. Die Kontrollgruppe führte 60 beidseitige Abduktionen der gestreckten Arme mit Sandsäckchen von je 1 kg ebenfalls im Sitzen durch. Die Ergebnisse zeigten, dass der

postmenopausale Knochendichteverlust an der Lendenwirbelsäule durch Training des M. psoas , nicht aber durch Training des M. deltoideus verhindert werden kann. Die Autoren erklären die knochenprotektiven Effekte durch den Ansatz des M. psoas an den Wirbelkörpern T12 bis L5 und die direkte Krafteinleitung auf die Wirbelkörper bei Kontraktionen.

Auch in den Studien von Haapasalo et al. und C. Jung konnte der direkte Zusammenhang von Muskulatur und Knochenmasse belegt werden.^{20, 87}

Die Veränderungen der BMD an Lendenwirbelsäule und Oberschenkelhals entsprechen demnach weitgehend den Ergebnissen der 2 bereits genannten Metaanalysen von Wolff et al.⁵⁷ bzw. Wallace et al.³³ Beide Arbeiten belegen eine geringe Zunahme der Knochenmassen (0,9 – 2,0 % pro Jahr) durch unterschiedliches Krafttraining.

In den bislang veröffentlichten Trainingsstudien wurden fast ausschließlich DXA-Messungen zur Beurteilung der Veränderungen der Knochenmassen durchgeführt. In der vorliegenden Studie wurden zudem Messungen an der Tibia mittels peripherer quantitativer Computertomographie (pQCT) durchgeführt. Diese Messmethode ermöglicht die Differenzierung von kortikalem und spongiösem Knochen durch eine 3-dimensionale Messtechnik. Durch pQCT-Verlaufsmessungen der Tibia wurden mehrere geometrische Parameter und die volumetrische Dichte bestimmt. Zudem konnte der Festigkeitsindex BSI (Bone Strength Index) berechnet werden, der den Schwerpunkt dieser Auswertung darstellt. Der BSI ist ein Parameter, der in ähnlicher Form in der Biomechanik zur Beschreibung der Widerstandsfähigkeit von rohrförmigen Körpern gegen Biegung und Torsion herangezogen wird. In seine Berechnung gehen das Widerstandsmoment als geometrischer und ein Quotient aus gemessener und idealer Kortikalisdichte (entspr. 1200 mg/cm^3) als materialabhängiger Parameter ein. Der BSI hat in Bereichen mit rein kortikalem (= rohrförmigen) Knochen die größte Aussagekraft. Daher erfolgte seine Auswertung hier nur für den 14% und 38%-Bereich.

Bisherige Tests zur Validierung des BSI durch Biege- und Bruchtests zeigten einen eindeutigen Zusammenhang mit der Bruchlast.⁵⁰ Auch Untersuchungen zum Einfluss der Muskelkraft auf den BSI ergaben hohe Korrelationen zwischen dem Drehmoment der oberen Extremitäten und dem BSI am distalen Radius⁸ bzw. der Griffstärke und dem BSI am Mittschaft des Radius.⁸⁸

Um mögliche ossäre Veränderungen durch die unterschiedlichen Kräfte, die von der Muskulatur auf den Knochen übertragen werden, erfassen zu können, wurden in

unterschiedlichen Knochenabschnitten Messungen durchgeführt: Da der 4%-Bereich am Radius einen Referenzmessort darstellt, wurde er in unserer Studie für die Tibia identisch übernommen. Hier kann v.a. die Beurteilung der trabekulären Dichte erfolgen. Da in diesem Bereich nur axiale Kräfte (= Druck) auftreten, ist der BSI als Parameter der Festigkeit gegenüber Biege- und Torsionskräften nur bedingt aussagekräftig. Ungeachtet dieser Tatsache konnten auch für diesen Bereich gute Zusammenhänge mit der Muskelkraft ermittelt werden.⁸

Eine Messung war am Mittschaft vorgesehen, da hier ein Bereich erfasst wird, in dem neben Druck auch Biege- und Torsionskräfte wirksam werden. Der 38%-Messbereich war der am weitesten proximal gelegene Messort, der aufgrund des limitierten Einstellungsbereiches der Gantry des pQCT-Gerätes ohne Neupositionierung der Probandin erreichbar war.

Der Messort bei 14 % der Tibialänge entspricht einem Bereich, in dem nur noch minimal trabekuläre Knochenanteile zu finden sind. Da in diesem Abschnitt keine Zuggurtung durch die Muskeln und Bänder wirksam wird, treten hier v.a. axiale Kräfte auf. Auch findet man hier die kleinste Knochenfläche.²

Vor diesem Hintergrund wurde für beide Gruppen insbesondere an der Tibia eine Zunahme der Knochenfestigkeit als Adaptation an die zunehmende Muskelkraft erwartet. Die Dimensionen der Kräfte, die durch Muskelkontraktionen auf den Knochen wirksam werden, sollen am Beispiel von Kniebeugen auf dem Galileo 2000 beschrieben werden: Die Kraft, die z.B. bei der Durchführung von Kniebeugen mit anschließendem Zehenstand von der Wadenmuskulatur der beiden Beine aufgebracht werden muss, entspricht der 4-fachen Gewichtskraft der jeweiligen Person. Dieser Faktor ergibt sich aus den Hebelverhältnissen im Sprunggelenk. (Der Abstand des Fußballens zum Sprunggelenk entspricht etwa dem 3-fachen Abstand vom Ansatz der Achillessehne zum Gelenk.) Die oben beschriebene Koaktivierung der Muskulatur und die zusätzliche Beschleunigung durch den Galileo 2000 verstärken die Druck-, Torsions- und Biegekräfte am Knochen zudem um das ca. 2,5-fache.

Es wurde daher vermutet, dass möglicherweise ein stärkerer biomechanischer Reiz durch diese Effekte des Galileo-Trainings als durch das Kraft-Training an den unteren Extremitäten auftreten könnte.

Durch die Veränderungen des BSI im 38%-Messbereich konnte diese Hypothese belegt werden. In der Galileo-Gruppe stabilisierte sich der BSI nach einem anfänglichen leichten Rückgang auf einem höheren Niveau. In der Kraft-Gruppe kam es hingegen nach einer tendenziellen Zunahme in den ersten 3 Monaten zu einer deutlichen Abnahme. Zu allen

folgenden Messzeitpunkten zeigten sich eindeutige Unterschiede in den BSI-Änderungen zwischen den Trainingsgruppen, die einen Hinweis auf die bessere Effektivität des Galileo-Trainings geben (Abb. 3.6, Seite 40).

Die Auswertung des 14%-Messbereichs ergab nur geringe Veränderungen des BSI der Kraft-Gruppe nach einem Anstieg in den ersten drei Monaten. Interessant ist dabei die Tatsache, dass die geometrischen und dichteabhängigen Parameter, die z.T. zur Berechnung des BSI herangezogen werden, ein gegenläufiges Verhalten zeigten. So wurde ein Rückgang von kortikaler Dichte als auch von Bone Mineral Content (BMC) festgestellt, während die Gesamtfläche im Studienverlauf zunahm (Abb. 3.5, Seite 39). Die Abnahme von kortikaler Dichte und BMC könnte eine mögliche Folge eines verstärkten Knochenumbaus (siehe unten) darstellen. Dabei bilden die Osteoklasten u.a. vermehrt und größere Haversche Kanäle in der Kortikalis, die dadurch an apparater Dichte verliert. Dadurch wäre auch der geringere Wert von BMC zu erklären. Die Zunahme der Gesamtfläche (Visit D nach G) weist auf einen periostalen Anbau hin. Die signifikant abnehmende Masse (BMC) kann außer durch die geringere Kortikalisdichte auch durch einen endostalen Abbau bedingt sein. Eine Vergrößerung der Querschnittsfläche in Verbindung mit einer Verbreiterung des Markraumes ist für das alternde Skelett gut bekannt.⁸⁹ Sie dient dem Erhalt der Festigkeit des Knochens als Reaktion auf den im Alter u.a. durch niedrigere Östrogenspiegel bedingten endostalen und intrakortikalen Abbau. Der nahezu konstante Verlauf des BSI könnte als Hinweis für den gelungenen Erhalt der Festigkeit dienen. Allerdings kann für das Krafttraining trotz signifikanter Zunahme des Drehmoments keine Zunahme der Knochenfestigkeit in diesem Bereich der Tibia festgestellt werden. Es ist möglich, dass die Verformung durch die Muskelkraft in diesem Bereich der Tibia noch zu gering war und die Modeling-Schwelle nicht erreichte, und daher keine Zunahme der Festigkeit zu beobachten war.¹¹ Diskutiert wird auch eine langsamere Anpassung des Knochens an mechanische Reize mit zunehmendem Alter und v.a. bei postmenopausalen Östrogenstatus.¹¹ Eine Zunahme der Festigkeit in der Zeit nach Abschluss der Studie wäre also denkbar.

Überraschend war der Verlauf des BSI des 14%-Bereichs in der Galileo-Gruppe: Nach einer Zunahme in der ersten kam es zu einem deutlichen Rückgang in der zweiten Studienhälfte. Die Auswertungen von BMC und Kortikalisdichte als Parameter zur Berechnung des BSI zeigten das selbe Verhalten, im Fall der Kortikalisdichte allerdings nur tendenziell.

Um die Veränderungen interpretieren zu können, wurden die BSI-Verläufe der einzelnen Probandinnen betrachtet. Dabei zeigten 73,1 % der Frauen, die auf dem Galileo trainierten, einen Rückgang des BSI nach 6 Monaten (Abb. 3.7 a und b, Seite 43) im Gegensatz zu dem deutlich geringeren Anteil in der Kraft-Gruppe (60 %, $p < 0,05$). Dieser Rückgang der Knochenparameter kann also in Zusammenhang mit der Steigerung der Trainingsintensität gebracht werden. Durch die bereits beschriebenen Effekte des Galileo-Trainings auf die Muskulatur (Hebelverhältnisse im Sprunggelenk, Koaktivierung der Muskulatur, Beschleunigung durch den Galileo) wirkt jedes zusätzliche Trainingsgewicht mit seiner ca. 4-fachen Gewichtskraft als Druck auf die Querschnittsfläche der Tibia. Durch diesen Druckanstieg kam es zu einer stärkeren Verformung in diesem Bereich der Tibia, die zu einer Stimulation des Knochenumbaus d.h. zu vermehrten Remodeling-Vorgängen führte.

Im Rahmen des Remodelings kommt es nach der Aktivierungsphase zur Resorption von defekten Knochenstrukturen durch die Osteoklasten, die durch intensiviertes Training verursacht sein können. In der Kortikalis werden dabei vermehrt Haversche Kanäle gebildet. Diese vermehrte Resorptionstätigkeit könnte den Hintergrund für den hier beobachteten Rückgang von BMC und Kortikalisdichte darstellen. Durch die Steigerung des Trainingsgewichtes, die für alle Probandinnen im selben Studienabschnitt erfolgte, kam es möglicherweise zu einer Synchronisation der ARF-Sequenz (Activation, Resorption Formation im Rahmen des Remodeling-Zyklus). Der BSI als arithmetische Größe könnte demnach durch die Einbindung mehrerer Messgrößen ein schneller und sensibler Parameter sein, um Umbauvorgänge des Knochens zu erkennen.

Diese Umbauvorgänge konnten in dieser Studie jedoch nur im 14%-Messbereich beobachtet werden. Der unterschiedliche Verlauf des BSI an den einzelnen Messorten kann erklärt werden, wenn man sich die Kräfte, die in den jeweiligen Knochenbereichen auftretenden, verdeutlicht: Während im distalen Knochen v.a. axiale Kräfte, d.h. Drücke, auftreten, ist die Diaphyse zusätzlich Biege- und Torsionskräften ausgesetzt. Im 38%-Bereich findet man daher eine größere Kortikalisfläche und damit eine größere Knochenfestigkeit als im 14%-Bereich.² Durch die Erhöhung des Trainingsgewichtes und die Effekte des Vibrationstrainings auf die Muskulatur (Koaktivierung, zusätzliche Beschleunigung) ergab sich dann im 14%-Bereich bei geringerer Fläche ein größerer Druck (= Kraft pro Fläche) als im 38%-Bereich, der vermehrte Strukturverletzungen und damit Umbauvorgänge zur Folge hatte, die hier durch die BSI-Abnahme erfasst wurden.

Im Rahmen eines vollständigen Remodelingzyklus kommt es nach der Resorption zur Formation, d.h. zu einem Neuaufbau von Knochensubstanz durch die Osteoblasten. Diese Formationsphase konnte in der Gesamtgruppe nicht belegt werden, war jedoch bei der Differenzierung in die 4 Untergruppen erkennbar, auf die später eingegangen wird.

In der Literatur ist zum jetzigen Zeitpunkt kein Hinweis zu dieser Problemstellung zu finden. Momentan ist nur die Studie von Heinonen et al. verfügbar, in der Veränderungen der Knochenfestigkeit durch eine Trainingsintervention untersucht wurden.⁹⁰ In einer 9-monatigen Untersuchung mit prä- und postmenarchalen Mädchen wurden zu Studienbeginn und –ende Messungen des BSI an der Tibia mittels pQCT durchgeführt. Die Intervention bestand aus einem Step Aerobic-Programm mit zusätzlichen Sprungübungen. Während sich bei den prämenarchalen Mädchen deutliche Veränderungen der Knochenmassen (BMC) an Lendenwirbelsäule und Femur der Trainingsgruppen im Gegensatz zu den Kontrollgruppen ergaben, wurden keine Veränderungen des Festigkeitsindex am Mittschaft der Tibia gemessen. Bei den postmenarchalen Mädchen zeigten sich an keinem Messort Unterschiede zwischen Trainings- und Kontrollgruppe. Im Bereich der Diaphyse der Tibia konnte also auch in dieser Altersgruppe keine Zunahme des BSI durch Training beobachtet werden. Allerdings verdeutlichen die vorliegenden Ergebnisse, dass es nötig sein kann, Messungen an verschiedenen Bereichen eines Knochens durchzuführen, um Anpassungsreaktionen des Knochens in Form von Festigkeitsänderungen in jedem Fall zu erfassen.

Neben dem Einfluss des Trainings auf die ossären Parameter soll hier der Effekt der Hormontherapie untersucht werden. Diese Auswertung hat rein explorativen Charakter.

In dieser Studie konnte der osteoprotektive Einfluss von HRT an den beiden Messorten LWS und proximaler Femur durch die unterschiedlichen BMD-Veränderungen dokumentiert werden (Abb. 3.4, Seite 37).

Auch der BSI am 14%- und BMC an allen Messorten zeigten den positiven Einfluss von HRT im Gegensatz zur Gruppe ohne Hormontherapie. Die Ergebnisse entsprechen dem aus der Literatur bekannten positiven Einfluss von HRT auf die Knochenmasse.^{12, 29} Neu, aber nicht unerwartet, ist die Tatsache, dass auch die Knochenfestigkeit durch die Hormontherapie positiv beeinflusst wird. Östrogene wirken durch Resorptionshemmung osteoprotektiv, sodass der endostale Knochenabbau und das Auftreten von neuen Haverschen Kanälen

reduziert wird. Diese Effekte könnten die Ursachen für die Zunahme von BSI und BMC darstellen.

Bis jetzt ist lediglich die therapiebedingte Veränderung des BSI durch das Bisphosphonat Alendronat dokumentiert.⁹¹ Der Wirkungsmechanismus der Bisphosphonate beruht ebenfalls auf einer Resorptionshemmung, allerdings durch eine direkte Hemmung der Osteoklasten im Gegensatz zu Östrogen, das die Freisetzung von Cytokinen aus Stromazellen und damit indirekt die Osteoklastenaktivität hemmt.²⁶

Auch das Verhalten der Knochenstoffwechselfparameter zeigt den stabilisierenden Einfluss der Hormontherapie, wie er z.B. von Thomsen et al.³² beschrieben wurde: Osteocalcin und Desoxypyridinolin stiegen im Studienverlauf in den 2 Gruppen mit HRT nicht an im Gegensatz zu den Gruppen ohne Hormontherapie. Dieser Anstieg der Bone Marker durch Krafttraining steht im Einklang mit den Ergebnissen anderer Trainingsstudien: Nelson et al.³⁷ dokumentierten einen 14-%igen Anstieg von Osteocalcin in der Trainingsgruppe im Gegensatz zu einem Rückgang in der Kontrollgruppe (5 %). Auch Fujimura et al.⁹² beschrieben signifikant höhere Serumspiegel von Osteocalcin und knochenspezifischer alkalischer Phosphatase.

Des Weiteren wurde eine Auswertung für 4 Gruppen durchgeführt, um mögliche synergistische Effekte von Hormontherapie und Training zu erfassen.

Die Auswertung der Drehmomente zeigte keine Wechselwirkungen zwischen Hormon- und Trainingsintervention.

Die Knochenmasse in der LWS nahm in den beiden Gruppen mit HRT leicht zu und in den Gruppen ohne Hormontherapie ab. Nur in der Gruppe Kraft-HRT waren die Veränderungen signifikant (Abb. 3.2, Seite 35). Der deutliche Unterschied zwischen den beiden Gruppen der HRT-Einnehmerinnen und der Gruppe Kraft-HRT geht konform mit dem in der Literatur gut dokumentierten knochenprotektiven Einfluss der Hormontherapie.^{12, 29}

Am Femur ergab sich nur in der Gruppe Galileo-HRT ein leichter Knochenmasseverlust, während in den anderen Gruppen leichte, in der Gruppe Galileo+HRT sogar deutliche BMD-Zunahmen festgestellt werden konnte. Der signifikante Unterschied zwischen den beiden Galileo-Gruppen dokumentiert ebenfalls den positiven Effekt von HRT auf die Knochenmasse (Abb. 3.3, Seite 36).^{12, 29}

Diese Beobachtung steht im Einklang mit mehreren Untersuchungen, die einen positiven Einfluss von HRT auf den Femur beschreiben, der allerdings deutlich geringer als der auf die Knochendichte der Lendenwirbelsäule ausfällt.^{12, 93} Ein synergistischer Effekt von Training

und Hormontherapie, wie er in der Literatur beschrieben ist, kann hier jedoch nicht eindeutig belegt werden.^{39, 94}

Im Gegensatz dazu deuten die Ergebnisse der pQCT- Messungen der 4 Gruppen auf einen synergistischen Effekt von Galileo-Training und HRT hin: Nur in dieser Gruppe sind Zunahmen von BSI und Kortikalisdichte im 14%-Bereich, Kortikalisdichte im 38%-Bereich sowie BMC an allen 3 Messorten zu beobachten.

Um den Einfluss von HRT und Galileo-Training auf den BSI-Verlauf differenzieren zu können, wurden folgende Hypothesen überprüft: Ein BSI-Anstieg sei durch HRT, der BSI-Abfall nach 6 Monaten durch das intensivierete Galileo-Training bedingt. Diese Hypothesen ergaben ein Verlaufsschema mit einem Anstieg während des ersten Halbjahres, gefolgt von einem Abfall und einer erneuten Zunahme des BSI während der letzten 3 Studienmonate. Der BSI-Verlauf jeder Probandin wurde auf das Zutreffen dieses Schemas hin überprüft. Dieses Verlaufsschema war in der Gruppe Galileo+HRT (70 %) signifikant häufiger anzutreffen (Abb. 3.7 a, Seite 43), als zu erwarten war. In der Gruppe Kraft-HRT (7,1 %) zeigte sich diese BSI-Sequenz signifikant seltener.

Diese Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu: Am Anfang der Interventionen könnte die Zunahme der Knochenfestigkeit durch die Hormontherapie bedingt sein. Der nachfolgende Abfall des BSI deutet, wie bereits angesprochen, auf eine Stimulierung des Knochenumbaus durch das intensivierete Trainings hin (Galileo-Gruppe 73,1 %, vs. Kraft-Gruppe 60,0 %). Der Anstieg des BSI in den letzten 3 Studienmonaten gibt möglicherweise einen Hinweis auf eine Zunahme der Festigkeit als Anpassung an die stärkere mechanische Beanspruchung durch die kräftigere Muskulatur. Dieser Anstieg ist in der Gruppe ohne HRT nicht sichtbar (Abb. 3.7 a und b, Seite 43).

Einen weiteren Hinweis auf den Einfluss der Hormontherapie ergibt der Vergleich der Entwicklung der Differenzen der 2 Galileo-Gruppen mit und ohne HRT während der letzten 6 Monate: Bei 8 von 10 Probandinnen der Gruppe mit HRT kam es während der letzten 3 Monate zu einer „Erholung“ des BSI (Abb. 3.7 a, Seite 43) im Gegensatz zur Gruppe ohne HRT (8 von 16 Probandinnen, Abb. 3.7 b, Seite 43). Auch ergab der Vergleich der absoluten Differenzen des BSI des zweiten Studienhalbjahres signifikante Unterschiede.

Die Entwicklungen zeigen möglicherweise, dass der Knochen unter Hormontherapie schneller in der Lage ist, sich an muskuläre Reize zu adaptieren. Dabei ist ein Einfluss auf

den Remodeling-Vorgang durch Verkürzung der Dauer der ARF-Sequenz denkbar. Man könnte auch die Hypothese wagen, dass die Verformungen, die durch das Training an der Tibia auftraten, möglicherweise den Bereich der Modeling-Schwelle, die unter HRT niedriger anzusetzen sein könnte, erreichten. Nach Frost kann die Modeling-Schwelle bei einem Druck von ca. 20 N/mm^2 auf die Knochenfläche erreicht sein, wobei eine Erhöhung dieser Schwelle in zunehmendem Alter und bei postmenopausalem Östrogenstatus angenommen wird.^{3, 11}

Zur Abschätzung von Verformung und Druck, die durch die Muskulatur während des Trainings an der Tibia wirksam wurden, wurden Berechnungen durchgeführt, in denen Körper- und Zusatzgewicht, die bereits beschriebenen Hebelgesetze sowie Koaktivierung der Muskulatur und Beschleunigung durch den Galileo berücksichtigt wurden. (Bei diesen Berechnungen kann es sich nur um Schätzungen der tatsächlichen biomechanisch wirksamen Kräfte handeln, genauere Erkenntnisse können nur mit der Einsetzung von Dehnungsmessstreifen gewonnen werden, wie z.B. in einer Studie von Burr et al. beschrieben.⁹⁵)

Die Berechnungen brachten folgendes Ergebnis: Auch durch das Galileo-Training mit größeren Gewichten nach 6 Monaten, das größere Kräfte an den unteren Extremitäten bewirkt als das Kraft-Training, konnten bei weitem keine Werte von 20 N/mm^2 an der Tibia im 14%-Bereich erreicht werden. Es stellt sich daher die Frage, ob es möglich ist, die biomechanischen Kräfte, die nötig sind, um den Knochenstoffwechsel positiv zu beeinflussen, während eines Krafttrainings, das die bereits beschriebenen Kriterien an Sicherheit und Verträglichkeit erfüllen muss, zu erzeugen. Es wäre auch denkbar, dass durch das Training die muskulären und koordinativen Voraussetzungen für eine vermehrte und sicherere Aktivität im Alltag geschaffen werden. Im Rahmen dieser gesteigerten Alltagsaktivität könnten die für den Knochenerhalt bzw. -aufbau nötigen Kräfte z.B. durch unkontrollierte oder Bewegungen, die „schwungvoller“ als früher ausgeführt werden, auftreten.

Auch in der Metaanalyse von Wallace et al.,³³ in der Ergebnisse von Trainingsstudien an prä- und postmenopausalen Frauen untersucht wurden, konnten die Autoren keinen unterschiedlichen Einfluss von Training mit hohen („impact exercise“) und niedrigen Gewichten („non-impact exercise“) feststellen. Für beide Trainingsformen wurden BMD-Zunahmen an der Lendenwirbelsäule von 1 - 2 % und am Femur von 0,9 - 1,4 % bei postmenopausalen Frauen ermittelt. Die Höhe der im Training auftretenden Kräfte könnte demnach einen möglicherweise geringeren Einfluss auf die Knochenmasseentwicklung haben, als das durch Training veränderte Verhalten im Alltag.

Das Training auf dem Galileo 2000 zeigte sich in der vorgestellten Studie dem herkömmlichen Krafttraining an Geräten zumindest ebenbürtig. Die Drehmomente konnten durch das Galileo-Training in gleichen Umfang wie durch das Kraft-Training gesteigert werden. Darüber hinaus zeichnete sich in dieser Studie ein positiver Einfluss des Galileo-Trainings auf den Knochenstoffwechsel ab, der dem des Kraft-Trainings vergleichbar war. Durch die pQCT-Messungen konnten neue Erkenntnisse über den Knochenumbau als Reaktionen auf Krafttraining gewonnen werden. Der BSI erwies sich dabei als ein schnell und sensibel reagierender Parameter.