

1 EINLEITUNG

„Nur die statische Brauchbarkeit und Nothwendigkeit oder das statische Überflüssigsein entscheiden über die Existenz und Örtlichkeit jedes einzelnen Knochenpartikelchens und demgemäß auch über die ganze Knochenform.“

Vor mehr als 100 Jahren bereits veröffentlichte Johann Wolff diese Theorie in seinem Buch „Das Gesetz der Transformation der Knochen“.¹ Er formulierte damit als erster den inzwischen allgemein akzeptierten „form-follows-function“-Zusammenhang, der besagt, dass Knochenmasse und –architektur durch Größe und Richtung der einwirkenden Kräfte bedingt werden. Das Skelettsystem unterliegt zeitlebens einem regen Umbauprozess, durch den der Knochen sich an veränderte mechanische und metabolische Gegebenheiten anpasst. Die Zusammenhänge und Mechanismen dieser Adaptionsvorgänge sind heute Inhalte intensiver Forschung. Schwerpunkte neben vielen anderen sind der quantitative Zusammenhang zwischen Muskel- und Knochenmasse,²⁻⁹ der Einfluss des humoralen Umfeldes und seiner Veränderungen (z.B. durch Medikation oder während der Menopause^{10, 11, 12}), auf zellulärer Ebene die Signaltransduktion¹³⁻¹⁶ sowie die Reaktion des Skelettsystems auf veränderte Krafteinwirkung (z.B. Schwerelosigkeit, Training).¹⁷⁻¹⁹

Zur Beschreibung der grundlegenden Umbauvorgänge des adulten Knochens haben sich die Begriffe „Modeling“ und „Remodeling“ etabliert.⁹ Modeling stellt die ungekoppelte Aktivierung von Osteoblasten und Osteoklasten dar und repräsentiert die örtlich begrenzte zelluläre Reaktion auf mechanische Reize. Modeling ist - um ein Beispiel zu nennen - dafür verantwortlich, dass der Spielarm eines Tennisspielers deutlich dickere Knochen aufweist als der nicht-dominante Arm.²⁰

Im Erwachsenenalter überwiegt das „Remodeling“. Es stellt die geordnete Kooperation zwischen Osteoblasten und Osteoklasten dar, die als „Bone-Multicellular-Unit“ (BMU) den Umbau des Knochengewebes regulieren.⁹ Diese Abfolge von Ab- und Anbau wird als ARF-Sequenz (Activation Resorption Formation) bezeichnet. Defekte Strukturen des Knochengewebes, die z.B. durch zu große mechanische Reize verursacht sein können, sog. Microdamages, werden durch die BMU's abgebaut und durch neue Knochenmatrix ersetzt.

Für das Einsetzen von Modeling - oder Remodeling - Vorgängen wird die Existenz sog. Schwellen (Set-Points) angenommen. Überschreitet die Verformung eines Knochens durch mechanische Kräfte einen bestimmten Grenz- (= Schwellen-) wert, wird eine der beiden Formen des Knochenumbaus aktiviert. Die Remodeling-Schwelle liegt dabei im Bereich der Alltagsbelastung. Um Modeling-Prozesse in Gang zu setzen, muss die Verformung des Knochens um ein Zehn- bis Zwanzigfaches größer sein.^{3, 6, 9, 21}

Es ist unbestritten, dass die Ansprechbarkeit des Knochens auf muskuläre und mechanische Reize entscheidend durch das humorale Umfeld beeinflusst wird.

Hormonelle oder medikamentöse Veränderungen können zu einer Verschiebung der Set-Points führen.^{9, 11} V.a. am Beispiel von Menarche und Menopause wird der Einfluss physiologischer Veränderungen des Hormonstatus auf den Knochenstoffwechsel deutlich. Im ersten Fall kommt es durch den steigenden Einfluss von Östradiol zu einer größeren Zunahme an Knochenmasse im Verhältnis zur Muskelmasse bei den Mädchen als bei gleichaltrigen Jungen.^{6, 22} Im Fall der Menopause kann es durch das drastische Absinken der Östradiol- und Progesteronspiegel im Serum zu einem Knochenmasseverlust von bis zu 10 % pro Jahr kommen.²³⁻²⁵

In vielen Studien konnte gezeigt werden, dass dieser Abbau durch geeignete Hormontherapie (HRT) aufgehalten werden kann.^{12, 26-29} Als Mechanismus wird die Verschiebung der Remodeling-Schwelle auf das prämenopausale Niveau mit verbesserter Ansprechbarkeit des Knochens auf mechanische Reize mit einer Hemmung der Osteoklastentätigkeit diskutiert.^{30, 31} Die Knochenumbaurate mit negativer Bilanz kann jedoch nur für die Dauer der Therapie gesenkt werden. Nach Beendigung der Substitution steigt die Aktivität des Knochenstoffwechsels erneut auf das Niveau in der frühen Postmenopause.³²

Neben der Hormontherapie und anderen Faktoren wie gesunde, kalziumreiche Ernährung etc. ist „ausreichende Bewegung“ ein unbestrittener Eckpfeiler der Osteoporoseprävention. Allerdings ist der positive Einfluss für den Knochen nicht mit jeder Art von „körperlicher Aktivität“ gesichert. In einer Reihe kontrollierter Studien wurde der Effekt von körperlichem Training auf die Knochendichte bei prä- und postmenopausalen Frauen untersucht. Dabei wurde durch verschiedene methodische Ansätze ein positiver Einfluss auf den Knochen erreicht. Es wurde gezeigt, dass Alltagsbelastungen alleine den allmählichen Verlust von Knochenmasse nicht aufhalten können. Die positive Beeinflussung des Knochenstoffwechsels scheint durch körperliche Aktivitäten, bei denen sehr hohe mechanische Kräfte auftreten, am größten zu sein. Im Erwachsenenalter ist Knochenerhalt oder –aufbau also nur durch mechanische Kräfte möglich, die deutlich größer sind als die, die im Alltag auftreten.³³⁻³⁵

Untersucht wurden auch verschiedene Formen des Krafttrainings. Dementsprechend war Krafttraining oft nur dann wirksam, wenn mit großen Gewichten gearbeitet wurde. Erst bei Intensitäten von etwa 80 % des Einwiederholungsmaximums (EWM) konnte der Knochenaufbau stimuliert werden.³⁶⁻³⁸

In einigen der obengenannten Trainingsstudien wurde zudem der Einfluss des Trainings auf den Knochenstoffwechsel in Kombination mit Hormontherapie untersucht. Teilweise konnte ein synergistischer Effekt der beiden Interventionen festgestellt werden. Diese Beobachtungen stützen die Theorie der Set-Point-Verschiebung durch Sexualhormone. Der Knochen wäre dabei in der Lage, schneller und effektiver auf mechanische Reize zu reagieren.^{30, 31, 39, 40}

Ein Ziel sollte daher - neben der medikamentösen Osteoporoseprävention - sein, mit den Erkenntnissen aus den vorliegenden Studien Trainingskonzepte zu entwickeln und zu validieren, die auch bei älteren Menschen gefahrlos und ohne Verlust der Akzeptanz wirksam einem Knochenmasseverlust vorbeugen können. Eine Möglichkeit stellt dabei das Krafttraining an Geräten dar. Es eröffnet die Möglichkeit eines wirksamen, individuellen und vielseitigen Ganzkörpertrainings mit geringem Risiko für den Bewegungsapparat oder das Herz-Kreislaufsystem in dieser Altersgruppe.³⁶

In dieser Pilotstudie kam neben herkömmlichem Krafttraining an Geräten ein oszillierendes Wippbrett, Galileo 2000, als neues Trainingsgerät zum Einsatz. Bei Frequenzen im Bereich von 20 – 30 Hz kommt es zu einer verstärkten Koaktivierung von Agonisten und Antagonisten im Sinne eines Schutzreflexes, wie in Untersuchungen an Skiabfahrtsläufern gezeigt werden konnte. Dieser Reflex führt zu einer höheren Gelenksteife und –stabilität sowie zu einem verstärkten Druck auf den Knochen.^{41, 42} Durch Training auf dem Galileo 2000 bei diesen Frequenzen wird derselbe Effekt verbunden mit einer positiven Beeinflussung des Knochenstoffwechsels erwartet. Vorstudien zur Wirkung des Galileo 2000 ergaben einen raschen und deutlichen Anstieg von Koordination, Muskelmasse und –kraft ohne negative Beeinflussung von Hämodynamik und Stoffwechsel.⁴³⁻⁴⁵ Diese Ergebnisse zeigen, dass der Galileo 2000 ohne Bedenken in das Training von älteren Frauen eingebunden werden konnte.

Zielparameter in dieser Studie war die prozentuale Veränderung der Knochenmasse nach einem Jahr Krafttraining an Lendenwirbelsäule und proximalem Femur gemessen mittels Dual-Energy-X-ray-Absorptiometry (DXA).

Zudem wurden die ossären Veränderungen an mehreren Messorten von Tibia und Radius mit peripherer quantitativer Computertomographie verfolgt. Neben Knochenfläche und -dichte wurde ein Festigkeitsindex bestimmt.