Knochen

Autor: Axel Enke
Fotos: Axel Enke, Alan Boyd
Grafiken: Fabio Parizzi

Das menschliche Bewegungssystem fasziniert Axel Enke bereits seit seiner Ausbildung zum Krankenpfleger. Auch heute hat das Thema für ihn als Kinaesthetics-Trainer nicht an Relevanz eingebüßt – im Gegenteil: Mit zunehmender Erfahrung scheinen Ähnlichkeiten auf und es werde erkenntlich, wie sich Themenbereiche aus diesen Wissensgebieten überschneiden und ergänzen, so Enke. An seinen Erkenntnissen und Überlegungen möchte er die LeserInnen der LQ teilhaben lassen, und zwar in Form einer dreiteiligen Artikelserie zum Thema Bewegungssystem und Kinästhetik. In diesem ersten Teil beschäftigt er sich mit den Knochen.

Abb. 1: **Knochen eines Dinosauriers**

Unser Bewegungssystem. Schon lange fasziniert mich das Wunder «Mensch» als biologisches System. Dieses steht stellvertretend für viele andere biologische Systeme. Beschäftigt man sich mit dem Menschen, lernt man gleichzeitig auch viel über die Anatomie und Physiologie anderer Wirbeltiere. Schließlich haben diese ebenfalls Knochen und Muskeln.

So kam mir vor einiger Zeit die Idee, eine dreiteilige Serie zum Thema Bewegungsapparat zu schreiben. Doch halt: Der Begriff Bewegungsapparat passt so gar nicht zu meinem Verständnis des Aufbaus und der Funktion eines lebenden Systems. Ich bin diesem Begriff während meiner Ausbildung zum Krankenpfleger im medizinischen Standardwerk «Der Körper des Menschen» von Adolf Faller begegnet (Faller 1984, S. 53 f.). Dahinter steht ein für unsere Kultur typisches mechanistisches Welt- und Menschenbild. Bei Knochen und Muskeln handelt sich es sich jedoch um ein hoch dynamisches lebendes System, weshalb ich fortan den Begriff Bewegungssystem verwenden werde. Möge der Funke der Faszination auch auf die LeserInnen überspringen.

Damit dies auf verständliche Weise gelingt, werde ich dieses facettenreiche und komplexe System aus verschiedenen Perspektiven beleuchten. Die Schwierigkeit dabei wird sein, die einzelnen Systemteile isoliert voneinander zu betrachten. Bereits dieser künstliche Schritt widerspricht eigentlich einer Systembetrachtung. Aus pragmatischen Gründen der Platzaufteilung ist es dennoch notwendig. In dieser ersten Folge wird es um die Knochen gehen. Die zweite Folge wird die Gelenke und die dritte die Muskeln thematisieren.

Indirekte Beobachtung. In der Kinästhetik nutzen wir die 1.-Person-Methode, um die eigene Bewegung mit den Kinästhetik-Konzepten differenziert zu beobachten, unter anderem mit dem Konzept «Funktionale Anatomie». So entstanden zum Beispiel die Kinaesthetics-Blickwinkel «Knochen und Muskeln» sowie «Massen und Zwischenräume». Um zu solchen Modellen zu gelangen, muss eine vereinfachende Perspektive auf die Anatomie eingenommen werden – vereinfachend, da wir unsere enorm komplexen anatomisch-physiologischen und biochemischen Interaktionssysteme nicht direkt beobachten können, sondern über deren Wirkungsmechanismen immer nur im indirekten Nachvollzug über Umwege etwas in Erfahrung bringen können. Dennoch ist dieser «Einblick» faszinierend.

Ich lade Sie nun ein, mit mir in diese Welt der Mikro- und Makrostrukturen unserer Knochen einzutauchen. Beginnen wir mit der Geschichte ihrer Entstehung.

Unsere Knochen. Sie wirken stabil, hart und können sogar etwas nachgeben. Sie halten viel aus, insbesondere wenn sie gesund und jung sind. Jeder weiß: Unsere Knochen können auch brechen, was insbesondere bei Stürzen geschieht und im Alter deutlich häufiger als bei jüngeren Menschen. Früher war ein Oberschenkelhalsbruch für ältere Menschen fast gleichbedeutend mit einem Todesurteil. Sie mussten bis zur Heilung lange liegen und starben währenddessen häufig an Lungenentzündungen. Heute sind sie dank modernen und schonenderen Operationsverfahren meist viel schneller wieder mobil.

Der Anteil der Knochen an der Mobilität ist bedeutsam, weswegen sie zum Bewegungssystem gehören. Einerseits geben sie den weichen, anatomischen Strukturen eine feste Basis, über die Gewicht an die Unterstützungsfläche abgegeben werden kann. Andererseits stellen sie stabile Fixpunkte für die Muskeln bereit – eine mindestens ebenso wichtige Funktion. Über die Sehnen und Bänder sind die Muskeln mit den Knochen verbunden. Das erklärt, warum Knochenbrüche eine Auswirkung auf die Muskulatur und somit auf die Bewegung haben. Ohne Knochen könnten wir die Muskeln nur in geringem Ausmaß gegen die Schwerkraft bewegen. Man kann das gut bei Würmern beobachten, die keine Knochen haben und sich nur durch die abwechselnde Kontraktion von Ring- und Längsmuskeln und den dadurch erzeugten Druck der Leibeshöhlenflüssigkeit bewegen.

Schutzfunktion. Daneben darf die dritte Funktion der Knochen nicht vergessen werden: ihre Schutzfunktion. Betrachtet man einen menschlichen Körper, erkennt man schnell eine Art Muster. Die großen Körperteile im Zentrum (Zentralmassen) werden von oben nach unten immer offener, umschließen also das, was sich in ihrem Inneren befindet, stets weniger (von Kopf zu Brustkorb zu Becken). Daraus lässt sich die Bedeutung des Gehirns für das Gesamtsystem ersehen. Es handelt sich um eine Art genetische Konstante bei Säugetieren, die sich offenbar bewährt hat. Das Gehirn muss am stärksten geschützt werden; der Brustkorb muss wegen der Atmung beweglicher sein und gleichzeitig Herz und Lunge schützen; und das Becken darf nur noch halb offen sein, damit der Nachwuchs genug Platz hat. Dies alles ist rasch zu erkennen.

Doch in seinem Inneren ist der Knochen nicht so stabil, wie es für uns den Anschein hat. Innen pulsiert das Leben, und sehr komplexe Mechanismen sorgen zugleich dafür, dass er trotzdem (meist) stabil genug bleibt.

Evolution der Knochen. Die Evolution der Knochen begann vor sehr langer Zeit, als die ersten Zellen vor circa 2,5 Milliarden Jahren im Urmeer auftauchten. In jener Zeit entstand der bis heute existente Druck im Blutplasma von 290 mosmol/l. Über unvorstellbar lange Zeiträume lernten die damaligen Zellen, sich im Urmeer zu behaupten. Diese Druckverhältnisse blieben bis heute stabil. Hauptverantwortlich für den Druck ist zu neunzig Prozent Salz, für die übrigen zehn Prozent sind es Kalzium und Magnesium (vgl. Horn 2020, S. 486).

Vor circa eineinhalb Milliarden Jahren wurden durch geologische Prozesse sehr große Mengen an Mineralien in →

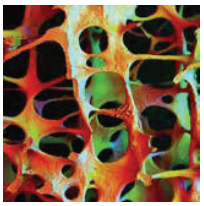


Abb. 2: **Osteoporotische Architektur im vierten Lendenwirbel einer älteren Frau.** Aufnahme mit einem Rasterelektronen-Mikroskop von Alan Boyde.

© Bone Research Society 2015 – 2016. Abgebildet in: Osteoporose Selbsthilfegruppen Dachverband e. V. (2023): Knochenstruktur – was geschieht im Inneren der Knochen? www.osd-ev.org/osteoporose/knochen/struktur (Zugriff: 15.03.2023).

die Meere gespült (ebd.). Im Ausgang des Ediacariums (das die Zeitspanne von vor circa 635 Millionen bis 541 Millionen Jahren umfasst) entwickelten sich daraus erste Skelettsysteme – die Vorläufer der heutigen Skelette der Wirbeltiere.

Obwohl es im Meer viel mehr Kalziumkarbonat gab, «entschied» sich die Evolution für Phosphatkarbonat als Grundbausubstanz von Skeletten, vielleicht, weil Phosphat chemisch stabiler ist und Säuren besser trotzen kann (ebd., S. 487). Skelette erfordern deshalb aus chemischen Gründen einen besonderen Umgang mit Phosphat und Kalzium. Fische beispielsweise nehmen Kalzium über das Meerwasser auf, überschüssiges Kalzium geben sie über die Kiemen wieder ans Meer ab. Phosphat nehmen sie über die Nahrung auf.

Aus dem Wasser ans Land. Plattentektonische Bewegungen führten im weiteren Verlauf der Erdgeschichte zu Gegenden, in denen große Süßwasserseen und Flüsse entstehen konnten. Große Mengen dieses Süßwassers flossen fortan zusätzlich ins Meer. Süßwasser enthält weniger Kalzium, weshalb die Tiere eine Strategie entwickeln mussten, Kalzium in ihre Skelette einzulagern. Dies führte zu Anpassungen an Kiemen, Nieren und Darm.

Der viel spätere Landgang der Tiere erforderte erneute Anpassungen, da die Schwerkraft stärker auf ihren Körper einwirkte, als der Auftrieb im Wasser entfiel. Die Bedingungen an Land verlangten nach härteren Knochenstrukturen und gleichzeitig brauchte es größere Kalziumspeicher. Damit verbunden war gleichzeitig die Herausforderung, Kalzium mit der Nahrung aufzunehmen. Denn Kalzium ist – im Gegensatz zu Phosphor – in der Nahrung viel weniger vorhanden als im Meer. Die Knochen boten sich als ideale Kalziumspeicher an. Gleichzeitig durften sie aber auch nicht zu schwer werden, da ihre BesitzerInnen sonst zu schwerfällig geworden wären. Die im evolutionären Prozess entstandene Kompromisslösung ist die uns heute bekannte, für Knochen typische Struktur (siehe Abb. 2).

Aufbau unserer Knochen. Der Innenraum unserer Knochen, die Spongiosa, ist schwammartig aufgebaut, wobei entlang der Belastungslinien kleine Bälkchen aus Knochengewebe (Trabekel) so angeordnet sind, dass der Knochen trotz geringer Substanz eine hohe Stabilität aufweist (vgl. Horn 2020, S. 488). An Stellen, die längere Zeit unbelastet waren, wurde Knochensubstanz aber abgebaut. Man kann also festhalten: Die an Land rareren Rohstoffe kamen dort zum Einsatz, wo sie wirklich gebraucht wurden, und wurden dort, wo sie weniger benötigt wurden, wiederum abgebaut. Dieser Prozess findet bis heute auch bei jedem einzelnen Individuum im Laufe seines Lebens statt: Die Trabekel bilden sich in einem ständigen Prozess individuell in typischen Kraft- und Belastungslinien weiter um.

Die organische Eiweißmatrix des Knochens besteht hauptsächlich aus dem Protein Kollagen und den eingelagerten Mineralien Kalzium, Magnesium, Phosphat und Natrium, die zu ihrer Festigkeit beitragen. Kollagen enthält besonders viel Prolin, eine Aminosäure, für deren Bildung ausreichend Vitamin C benötigt wird.

Nährstoffverteilung. Unser Blut ist eine Art Organsystem, das alles in unserem Körper miteinander verbindet. Es beinhaltet all die Stoffe, welche die Organe des Gesamtsystems benötigen. So gesehen ist es das Verkehrsnetz, auf dem die nachgefragten «Waren» überallhin transportiert werden. Wegen dieser zentralen Bedeutung ist es für den Körper wichtig, dass die Menge aller im Blut enthaltenen wesentlichen Stoffe in einem gewissen Normalbereich liegt, damit spezifische Bedarfe einzelner Zellen, Gewebe oder Organe bedient werden können. Sinkt beispielsweise der Kalziumspiegel im Blut, versuchen unterschiedliche Akteure, den Kalziumspiegel wieder anzuheben. So entstanden über lange Zeiträume Interaktionsmechanismen (Interaktionssysteme), die diese Normwerte aufrechterhalten. Die Menge der Stoffe im Blut kann dabei von den intrazellulären Mengen erheblich abweichen.

Osteozyten. Kalzium ist für viele biochemische Prozesse im Körper von Bedeutung, zum Beispiel für die Reizübertragung in Muskeln und Nerven, für die intrazelluläre (innerhalb einer Zelle stattfindende) Signalübermittlung, die Stabilisierung von Zellmembranen sowie für die Blutgerinnung. Aus diesem Grund muss der Körper in der Lage sein, bei einem plötzlichen Bedarf kurzfristig Kalzium und Phosphat aus den Knochen ans Blut abzugeben und danach auch wieder in die Knochen zurückzutransportieren, da ein akuter Kalziummangel für das Gesamtsystem lebensbedrohlich ist (weil er zum Beispiel zu einer Reizleitungsstörung am Herzen führen kann). Für diese Freisetzung wird ein weiteres Interaktionssystem benötigt: hormonelle Regelkreise. Damit diese Hormone überhaupt wirken können, werden Zielzellen im Knochen benötigt, die die «Befehle» der Hormone ausführen. So entstanden hoch spezialisierte Knochenzellen: die Osteozyten.

Osteozyten sind einerseits in der Lage, Knochensubstanz abzubauen (Osteoklasten), wobei Kalzium freigesetzt wird, als auch Knochen aufzubauen (Osteoblasten), wobei wiederum Kalzium benötigt wird. Dieses holen sich die Osteozyten aus dem Blut. Daneben verfügen sie zusätzlich über die Fähigkeit, Druck wahrnehmen zu können (Mechanorezeptoren). Das erklärt die vorab erwähnte Fähigkeit des Knochens, bei Belastung härter zu werden und bei fehlender Druckbelastung, wie im Weltall oder bei Bettlägerigkeit, Knochen abzubauen. Die Annahme, dies liege an den Druckrezeptoren der Haut, ist ein gängiger Irrtum. Neben all dem können im Knochenmark bestimmter platter Knochen (Hüfte, Brustbein, Rippen) Fresszellen (Makrophagen) aus blutbildenden Osteoklasten entstehen, die unterschiedliche Aufgaben auf dem Feld der Erregerabwehr übernehmen.

Der gesunde Knochen befindet sich so in einem ständig fluktuierenden Gleichgewicht zwischen Auf- und Abbau. Ist es nicht faszinierend, wie vielfältig und lebendig Knochen sind? Und dabei bin ich auf die Regulation des Zusammenspiels all dieser beteiligten Zellen noch gar nicht eingegangen. Gehen wir also noch eine Ebene tiefer und betrachten die Zusammenhänge im molekularen Bereich, um zu erklären, wie die Zellen dies bewerkstelligen (siehe Abb. 3).

RANK und RANKL. Die Osteblasten produzieren das Zytokin M-CSF (macropohage colony-stimulation factor). Dieses bindet an den Rezeptor von Monozyten, die sich zu makrophagenähnlichen Vorläuferzellen entwickeln und dabei den Rezeptor RANK an ihrer Oberfläche ausbilden. RANK ist ein Rezeptor für die Aktivierung von NF-kB; dies ist ein zentrales Protein, das an intrazellulären Steuerungsvorgängen bei Immunzellen beteiligt ist, so eben auch bei diesen Monozyten. RANK koppelt nun an RANKL (das L steht für Liganden). Darunter versteht man in der Biologie, beziehungsweise Biochemie Moleküle, die sich spezifisch an Rezeptoren binden und dadurch Folgereaktionen auslösen. Diese Verbindung führt zur Weiterreifung der jungen Osteoklasten, wobei mehrere dieser Osteoklasten zu einem mehrkernigen Osteoklasten fusionieren. Gleichzeitig produzieren die Osteoblasten das Glykoprotein Osteoprotegerin (OPG). OPG bindet mit einer stärkeren Bindung als RANK an RANKL und verdrängt so die Ausreifung von Osteoklasten. So steuern die Osteoblasten den Auf- und Abbau des Knochens (vgl. Horn S. 458, 494 – 495).

Dynamische Stoffregulation. Die im Körper eines ausgewachsenen Menschen befindliche Kalziummenge von etwa einem Kilogramm ist zu 99 Prozent gemeinsam mit Phosphat als Kalziumphosphat in Knochen und Zähnen

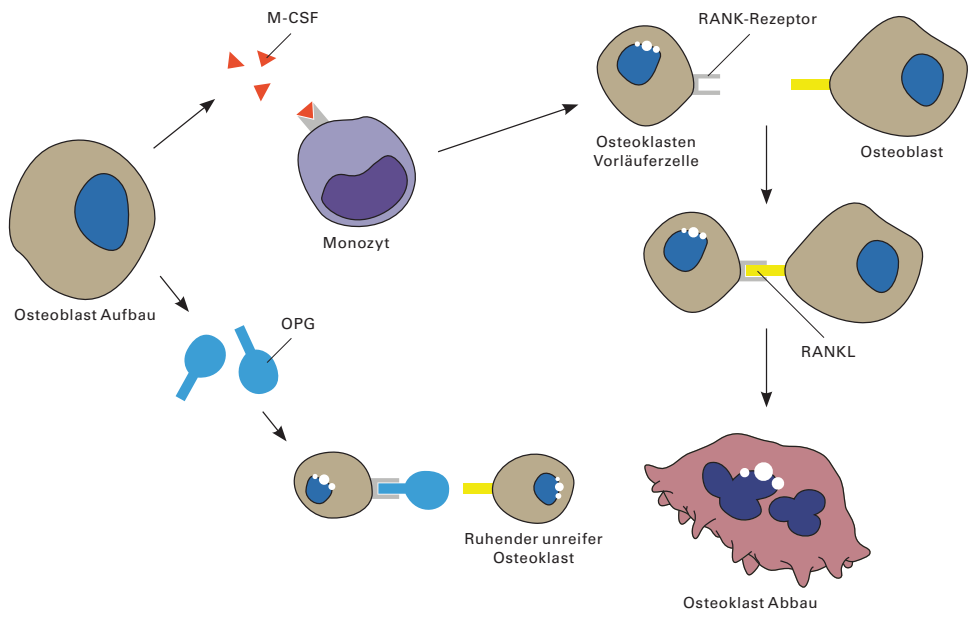


Abb. 3: **Dynamische Stoffregulation durch Osteozyten**

→

Abb. 4: **Wirkungen des Parathormons**

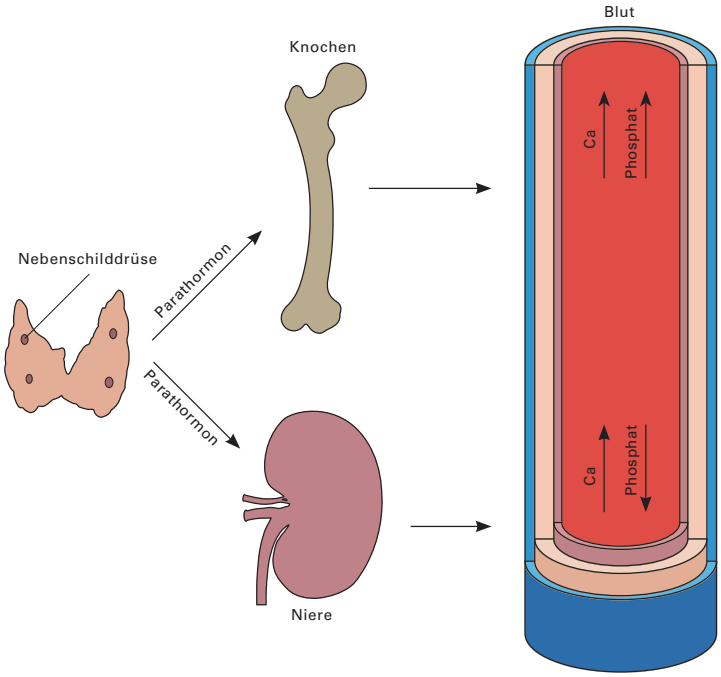
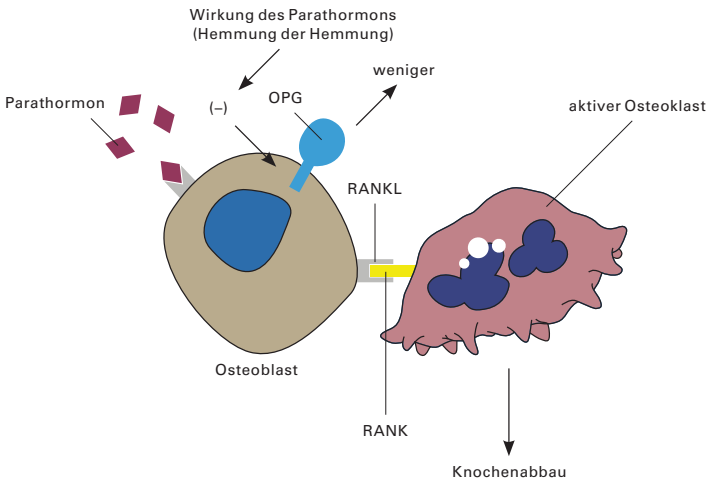


Abb. 5: **Wirkungen des Parathormons** (Hemmung der Hemmung)



eingelagert. Die Restmenge befindet sich in Extrazellulärräumen zwischen Zellen sowie in Zellen. Die Phosphormenge umfasst circa 700 Gramm, wobei der Großteil als Phosphat vorliegt. Hiervon sind 85 Prozent in den Knochen, 1 Prozent zwischen den Zellen und der Rest in den Zellen (vgl. Horn 2020, S. 488). Die fortlaufende, dynamische Regulierung der Menge der beiden Stoffe übernehmen bei uns Menschen im Wesentlichen drei Hormone: Calcitriol, Parathormon und Zytokin. Alle drei bemühen sich um die Aufgabe, den Kalzium- und Phosphatspiegel im Blut konstant zu halten. Hierbei hat der Kalziumspiegel Priorität, da dieser – wie schon erwähnt – bei vielen weiteren Mechanismen mitwirkt.

Das Hormon Calcitriol. Calcitriol (Vitamin D) ist die physiologisch aktive Form des Prohormons Cholecalciferol respektive von Vitamin D3, und ist als ein Abkömmling des Vitamin-D-Stoffwechsels das älteste Hormon des menschlichen Organismus. Es wird – über viele verschiedene Zwischenschritte unter anderen in Leber und Nieren vorab – in der Haut gebildet; dies allerdings nur, wenn die Haut genügend UV-Licht empfängt, was in unseren Breiten schwierig ist. Vitamin D, also Calcitriol, bewirkt im Darm und in den Nieren die Aufnahme von Kalzium und Phosphat ins Blut und es stimuliert die knochenbildenden Osteoblasten. Phosphat ist in diesem Zusammenhang der Gegenspieler von Calcitriol und veranlasst kurzfristig bei den speziellen Zielzellen der Knochen eine Mobilisierung von Kalzium und Phosphat (vgl. Horn 2020, S. 489 – 491). Ein hoher Gehalt an Kalzium und Phosphat im Blut wiederum hemmt die Bildung von Calcitriol (negative Rückkopplung).

Darüber hinaus gibt es viele weitere Zielzellen, die von Vitamin-D angesteuert werden, auf die ich hier aber nicht genauer eingehe.

Das Hormon Zytokin. Der Phosphathaushalt wird durch das Hormon Zytokin (FGF23) gesteuert. Dieses wird von den Osteozyten gebildet und senkt den Phosphatspiegel im Blut über die Nieren. Zytokin, Phosphat und Calcitriol befinden sich fortlaufend in einem gemeinsamen dynamischen Prozess.

Das Hormon Parathormon. Das Parathormon wird in den Ribosomen der Nebenschilddrüsen (genauer in den Epithelkörperchen) gebildet. Die Hormonbildung und -abgabe wird durch die Kalziumkonzentration im Blutplasma zirkulär geregelt. Im Rahmen dieses Prozesses steuert das Kalzium die Aminosäuren, die zur Bildung des Parathormons notwendig sind. Sinkt die Blutplasma-Kalziumkonzentration unter einen genetisch festgelegten Normalwert, wird Parathormon abgegeben, und umgekehrt. Das Hormon wirkt auf die Knochenzellen, damit diese mehr Kalzium im Knochen abbauen, um es dem Blut zuzuführen.

Das Parathormon kann aber auch Einfluss auf den Phosphathaushalt nehmen, indem es auf die Oberflächenzellen

(Epithelzellen) der Niere einwirkt, was dort zu einer vermehrten Ausscheidung von Phosphat führt. Eine erhöhte Phosphatkonzentration im Blut wiederum zieht eine erhöhte Abgabe von Kalzium ans Blut nach sich, damit sich das Verhältnis der beiden Stoffe wieder ausgleicht.

Antagonisten und Gleichgewicht. Wir können daran erkennen, dass hier viele Akteure zusammenarbeiten, um das körperliche Gleichgewicht stabil zu halten (siehe Abb. 4). Und nicht nur das; es wird deutlich, wie im Körper Wirkungsketten dafür sorgen, dass das Gesamtsystem funktioniert (siehe Abb. 5 und 6).

Es gäbe im Körper jedoch kein Gleichgewicht, hätten die einzelnen Akteure nicht auch Gegenspieler. Hier ist beispielsweise das zuvor erwähnte Antagonistenpaar Phosphat und Calcitriol zu nennen. Aber auch das Parathormon hat einen Gegenspieler: Thyreocalcitonin. Dieses Peptidhormon wird in den C-Zellen der Schilddrüse gebildet. Es hemmt die Osteoklasten beim Knochenabbau, wenn im Blut wieder genügend Kalzium vorhanden ist. Dadurch fördert Thyreocalcitonin zugleich deren Gegenspieler, die Osteoblasten, die Kalzium wieder in die Knochen einbauen. Durch diesen fortwährenden Auf- und Abbau der Knochen erneuert sich ein Knochen alle sechs bis zwölf Monate komplett (wobei für die Dauer die Art des Knochens relevant ist). Im Zuge dieses fortwährenden Erneuerungsprozesses können noch nicht differenzierte Zellen an der Knochenoberfläche jeweils sowohl zu Osteoklasten (durch Parathormon und Vitamin D) wie auch zu Osteoblasten (durch Östrogene, auf die in diesem Artikel nicht genauer eingegangen werden konnte) umgewandelt werden.

Vom Kleinen zum Grossen. Diese und viele weitere Prozesse steuern bei Säugetieren und damit auch bei uns den Erhalt einer Struktur, die es ermöglicht, den Körper ins-

Abb. 6: **Zehen eines Dinosauriers**

Abb. 7: **Zehen eines Dinosauriers**

Abb. 8: **Zehen einer Echse**

Abb. 9: **Zehen einer Schildkröte**

→

www.verlag-lq.net
Eine Kooperationsprodukt von:
stiftung lebensqualität
European Kinaesthetics Association
Kinaesthetics Deutschland
Kinaesthetics Italien
Kinaesthetics Österreich
Kinaesthetics Schweiz
www.kinaesthetics.net

Was man für seine Knochen tun kann:

- für einen ausgeglichenen Kalziumhaushalt sorgen, bei dem sich die Aufnahme und die Abgabe von Kalzium die Waage hält (Milch, Käse, Eier und hartes Wasser enthalten meist viel Kalzium. Die Ausscheidung erfolgt zu 9/10 über den Stuhl, zu 1/10 über den Urin),
- ausreichend Vitamin C zu sich nehmen,
- sich sportlich betätigen,
- für ausreichend Lichtkontakt auf nackter Haut sorgen
- und ausreichend Eiweiß zu sich nehmen.

gesamt aufrecht gegen die Schwerkraft zu bewegen. In der Evolutionsgeschichte ist es daher zur Ausbildung unterschiedlicher Varianten von Knochen gekommen, die bei genauerer Betrachtung allerdings viele Gemeinsamkeiten aufweisen.

Schauen Sie sich zum Beispiel die Knochen eines Dinosauriers an (siehe S. 48, Abb. 1). Diese riesigen Knochen sind im Inneren grundsätzlich gleich aufgebaut wie die viel kleineren Knochen einer Maus. Dies gilt auch für die Anordnung der einzelnen Knochen. So finden sich hier wie dort genetisch «eingefrorene» Baumuster; dazu gehört beispielsweise die grundsätzliche Einteilung von Kopf, Brustkorb und Becken ebenso wie der prinzipielle Aufbau der Wirbelsäule oder das Muster der Extremitäten, das sich stets in «eins – zwei – viele» ausprägt (ein Oberarmknochen – zwei Unterarmknochen – viele Handknochen). Diese Grundmuster existieren seit vielen Millionen Jahren und haben sich offensichtlich evolutionär sehr bewährt. Variiert wurden im Laufe der Evolution jedoch Größe, Länge und Anzahl von Fingern und Zehen respektive Finger- und Zehenknochen (siehe Abb. 6 – 9).

Ähnlichkeiten. Auf einer Musterebene erkennen wir hier Mechanismen, die uns ebenfalls in anderen Themengebieten begegnen, so auch in der Kinästhetik:

- Viele Akteure sind gemeinsam an den Prozessen beteiligt.
- Der Körper versucht ein bewährtes Gleichgewicht zu halten. Dies schafft er aber nur, indem er eine ständig Fehlerkorrektur betreibt.
- Die Gesamtregelung verläuft zirkulär, wodurch der Komplexität des Lebens begegnet werden kann.
- Die Verbindungen zwischen einzelnen Akteuren sind durchaus auch linear-kausal ausgeprägt. Das ist ein Grund, warum es auch bei einer zirkulären Gesamtorganisation zu erheblichen Problemen kommen kann, nämlich wenn einzelne Ursache-Wirkungs-Ketten nicht funktionieren.
- Das Gesamtsystem benötigt eine Mindestmenge an Voraussetzungen (beim Knochen sind dies Baustoffe, Mineralien, Vitamine), um funktionieren zu können.

Das eigentliche Staunen stellt sich bei mir ein, wenn ich mir vor Augen führe, was für ein Paradebeispiel für Kooperation unser Organismus doch ist. So viele unterschiedliche spezialisierte Zellen an verschiedensten Orten sorgen dafür, dass unsere Knochen stabil sind und bleiben. Und genau das ist vielleicht die tiefere Botschaft der Knochen an uns: Kooperation ist besser als Wettbewerb. ●

Faller, Adolf (1984): Der Körper des Menschen. Einführung in Bau und Funktion. 10., überarbeitete Auflage. München: Deutscher Taschenbuch-Verlag/ Stuttgart, New York: Thieme Verlag. ISBN 978-3-1332-9710-3.

Horn, Florian (2020): Biochemie des Menschen. Das Lehrbuch für das Medizinstudium. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag. ISBN 978-3-13-243342-7.

Hollmann, Wildor; Hetinger, Theodor (2000): Sportmedizin. Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin. 4. Auflage. Stuttgart: Schattauer Verlag. ISBN 3-7945-1672-9.

Schmidt, Robert F.; Thews, Gerhard (1996): Physiologie des Menschen. 26. Auflage. Berlin: Springer Verlag GmbH Deutschland. ISBN 3-540-58034-4.

Silbernagel, Stefan; Despopoulos, Agamemnon (1983): Taschenatlas der Physiologie. 2. Auflage. Stuttgart, New York: Thieme Verlag. ISBN 978-3-1356-7702-6.

Axel Enke
ist Kinaesthetics-Trainer und Ausbilder für die European Kinaesthetics Association (EKA), Gesundheitsplaner (Universität Bielefeld), Mikronährstoff-Coach, Epigenetik-Coach (i. A).