

KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

Knochen auf den Zahn geföhlt

Zähne, Knochen, Sehnen, Bänder und Knorpel bestehen sämtlich aus dem gleichen biologischen Grundbaustoff: aus Kollagen. Die fadenartigen Moleküle dieses Proteins sind für sich allein weich und elastisch, können aber mineralische Partikel einlagern und sich so zu ungemein festen, knochenharten Gefügen verbinden. Die mechanischen Eigenschaften von Knochen beruhen wesentlich auch auf einer besonderen, hierarchisch gegliederten Struktur. Diese funktionelle Architektur ergründen Wissenschaftler des Potsdamer Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung mit Partnern in Wien, Triest und Grenoble. Dabei ziehen sie unter anderem mineralisierte Beinsehnen von Truthähnen in die Länge – und leuchten mittels Synchrotron-Strahlung den Feinbau dieser „eindimensionalen Modellknochen“ aus. (PHYSICAL REVIEW LETTERS, 8. Oktober und 26. November 2004)

An Knochen, kann man sagen, haben Materialforscher viel zu kauen. Zwar ist schon seit über einem Jahrhundert bekannt, dass Knochen in ihrer Struktur jeweils optimal an örtlich verschiedene mechanische Belastungen angepasst sind. Doch wie die Natur – mit nur zwei Grundmaterialien – zu derart anpassungsfähigen Konstruk-

tionen gelangt, ist bislang erst in Ansätzen aufgeklärt.

Hier tiefer vorzustoßen, und das mit allen Mitteln moderner Strukturforschung, ist Ziel der Abteilung Biomaterialien am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam. Ihr Leiter Peter Fratzl und seine Mitarbeiter kooperieren dabei eng mit Medizinern am Ludwig-Boltzmann-Institut für Osteologie in Wien, mit Materialforschern am Synchrotron ELETTRA in Triest sowie an der Universität Grenoble.

Der Stoff, um den es in Sachen Knochen geht, ist fachlich gesprochen ein Nanokomposit: ein Verbundmaterial aus zwei molekularen Komponenten. Die eine Komponente, Kollagen, besteht aus drei schraubenförmig umeinander gewundenen Eiweißketten, die einen Faden von 300 Nanometern (millionstel Millimeter) Länge und 1,5 Nanometern Dicke bilden. Diese weichen und dehnbaren Molekülfäden lagern sich parallel zu Fibrillen aneinander – und zwischen diese Fibrillen wird als zweite Komponente mineralisches Kalziumphosphat in Gestalt winziger, etwa 2 bis 4 Nanometer dicker kristalliner Plättchen eingebunden. Je nach dem Grad dieser Mineralisation wird dadurch das flexible Grundgerüst aus Kollagen mechanisch verstärkt und zudem gehärtet.

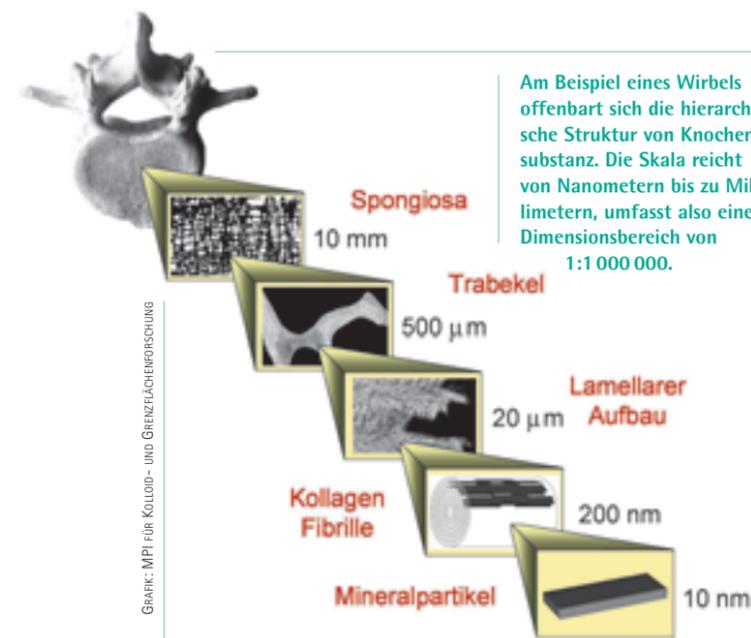
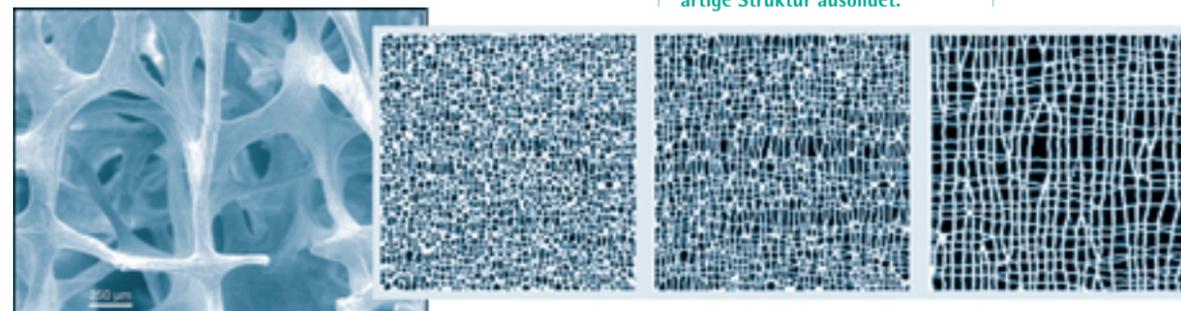
Die mineralisierten Kollagen-Fibrillen lagern sich weiter parallel zu stärkeren Bündeln

oder Schichten zusammen, zu so genannten Lamellen, deren typische Abmessungen bei einigen zehn Mikrometern liegen. Und diese Lamellen wiederum fügen sich zu Trabekeln: zu Bälkchen und Streben, einige zehntel Millimeter dick, die schließlich ein schaumartiges, dreidimensionales Stütz- und Tragegerüst (die Spongiosa) im Innern von Knochen aufbauen.

Der Sinn und Zweck dieser hierarchischen Struktur liegt darin, die Kräfte, die auf Knochen einwirken, möglichst stetig – ohne lokale Überlastungen – von größeren auf immer feinere Strukturen zu verteilen. Am Ende müssen dann die mineralisierten Kollagenfasern erhalten: Sie nehmen die Kräfte als Zugspannungen auf und federn sie durch elastische Dehnung ab.

Wie sie solche Kraftakte meistern, konnten die Potsdamer Forscher vor kurzem im Detail verfolgen. Dabei dienten die großen Beinsehnen von Truthähnen als „eindimensionale“ Modellknochen. Denn die Kollagenfasern dieser Sehnen sind zum Teil stark mineralisiert und gleichen so denen in Knochen. Zugleich sind sie gemäß der Zugrichtung der Sehne streng parallel und quasi eindimensional ausgerichtet – in na-

Das Elektronenmikroskop enthüllt die poröse Spongiosa eines Knochens (links). Die drei Bilder rechts zeigen, wie ein simulierter Knochen im Computer unter Belastung die gleiche schwammartige Struktur ausbildet.



GRAFIK: MPI FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

hezu kristallinem und somit für Röntgenbeugungsanalysen geeignetem Regellaß.

Und das nutzten Fratzl und seine Mitarbeiter: Am Synchrotron ELETTRA in Triest unterwarfen sie Truthahnsehnen der sehr kurzwelligen Strahlung dieser „Röntgenlampe“ und konnten so verfolgen, wie sich die Kollagenfasern unter wachsender Dehnung verhalten.

Diese Messungen zeigen, dass die Truthahnsehnen aus Bündeln jeweils unterschiedlich stark mineralisierter Kollagenfasern bestehen – also zum einen aus sehr weichen und entsprechend dehnbaren Fasern, zum anderen aus hoch mineralisierten und deshalb wenig elastischen Fasern. Letztere sorgen bei geringen Dehnungen der Sehne für deren Festigkeit, reißen aber bei sehr starker Dehnung und kontrahieren in einen unbelasteten Zustand: Dann geht die gesamte Last auf die weicheren, sehr dehnbaren Fasern über – die damit den strukturellen Zusammenhalt der Sehne gewährleisten und deren vollständigen Riss verhindern. Eine derart überdehnte Sehne erweist sich mangels der Mitwirkung der hoch mineralisierten Fasern unter neuerlicher Belastung schon bei geringer Dehnung als weich und elastisch.

Wie Knochen als biologisches Material in seine Funktion hineinwächst, wie seine optimale Struktur dann ein Leben lang erhalten bleibt und auch jeweils wechselnden Erfordernissen angepasst wird, gehört zu den weiteren Themen der Potsdamer Wissenschaftler. Dabei geht es um Auf- und Abbauprozesse innerhalb von Knochen, die gezielt und deshalb kontrolliert erfolgen müssen. So gilt als sicher, dass spezielle Zellen innerhalb des Knochens als mechanische Sensoren fungieren und einen Regelkreis anstoßen, der den Abbau alter oder schadhafter Knochensubstanz und deren Ersatz durch neues Material steuert.

Basierend auf dieser Vorstellung wurde ein Computermodell entwickelt, das den Knochenbau in einem simulierten menschlichen Wirbelknochen unter vertikaler Belastung durchspielt. Dieses Modell lieferte, selbst wenn es von der unrealistischen Annahme eines vollständig dichten Wirbelknochens startete, am Ende stets die natürliche Struktur: eine schaumartige Spongiosa, umhüllt von einer vergleichsweise dünnen Schale aus dichtem Knochen. Interessanterweise lieferten sämtliche dieser Simulationen mit der Zeit einen

konstanten Wert für die Knochenmasse – während der Umbau innerhalb der Spongiosa zu immer größeren Strukturen führte, das heißt zu weniger, dafür aber dickeren Trabekeln: Genau das geschieht auch im Zug der physiologischen Alterung von Knochen.

Wurde jedoch im Computermodell zugleich die Empfindlichkeit jener Knochenzellen vermindert, die als Sensoren arbeiten, kam zu der größeren Spongiosa noch ein Schwund an Knochenmasse: ein Bild, kennzeichnend für die Osteoporose, eine der häufigsten degenerativen Erkrankungen des Knochens. Demnach ist dieses Leiden nicht einfach altersbedingt, sondern auf eine Störung innerhalb des Regelkreises zurückzuführen, dem der Auf- und Abbau von Knochensubstanz unterliegt. Aus diesem Befund könnten sich neue Ansätze zur Therapie der Osteoporose ergeben.

Doch auch anderen Krankheiten, die mit einer verminderten Quantität oder Qualität der Knochensubstanz einhergehen, hoffen die Potsdamer Forscher mit ihrem breiten materialtechnischen Instrumentarium beizukommen. Es gilt dabei zunächst herauszufinden, auf welcher Ebene innerhalb der strukturellen Hierarchie des Knochens der betreffende Defekt vorliegt, um davon weiter zu den genauen Ursachen und schließlich zu einer gezielten Therapie zu gelangen.

Und sogar dort, wo das nicht gelingt, wird das Know-how der Materialforscher hilfreich werden. Denn je feiner sie Architektur und Mechanik von Knochensubstanz auf jeder ihrer Ebenen durchschauen, um so naturgetreuer kann man diesen natürlichen Stoff auch technisch nachbilden – und so zu biomimetischen Materialien gelangen, die als Implantate dem gewachsenen Knochen in möglichst vielen seiner Eigenschaften gleichkommen und ihn somit ersetzen können. ●

④ Weitere Informationen erhalten Sie von: PROF. DR. PETER FRATZL Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam Tel.: +49 331 567-9401 Fax: +49 331 567-9402 E-Mail: fratzl@mpikg.mpg.de