Das Geheimnis der Stärke von Nagetierzähnen

Biochemie. Forscher des Stuttgarter Max-Planck-Instituts haben herausgefunden, was Nagetierzähne so widerstandsfähig macht. Das Material wird jetzt auf seine Eignung für die humane Zahnmedizin untersucht.

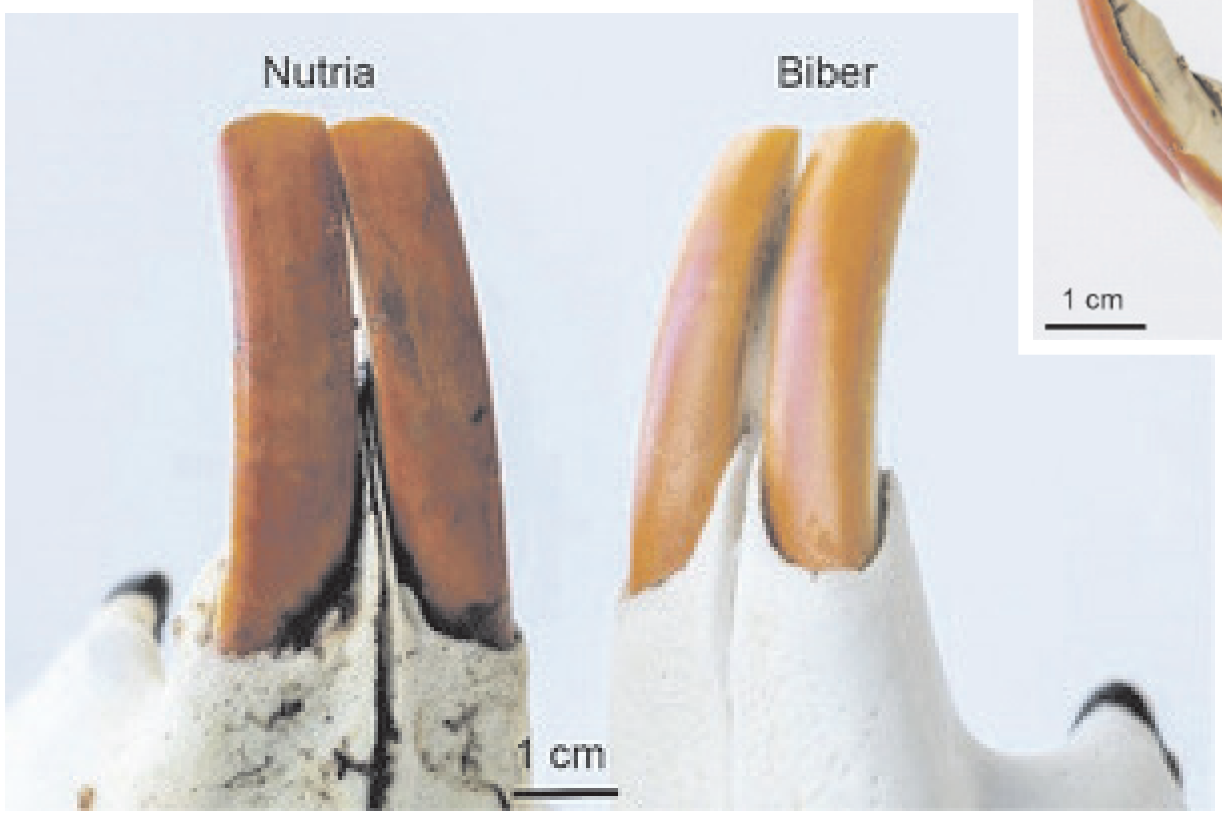

Abb. 1: Aufnahme der unteren Schneidezähne von Nutria und Biber.

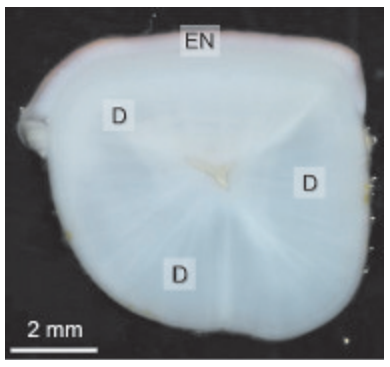

Abb. 2: Foto der Seitenansicht der unteren Schneidezähne (links) und binokulares Bild des Schneidezahnquerschnitts mit Schmelz (EN) und Dentin (D).

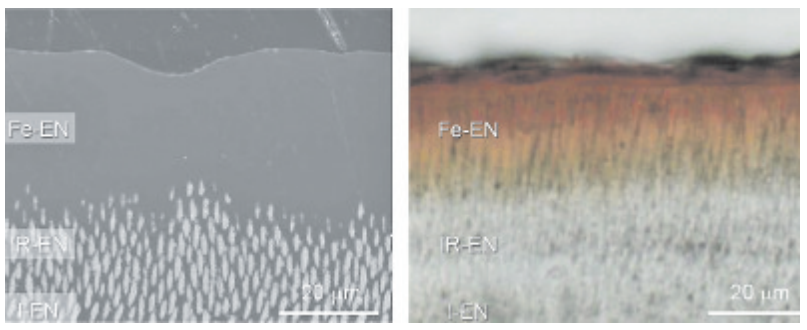

Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des geätzten Querschnitts eines Nagetier-Schneidezahns (links) im Vergleich zur optischen Aufnahme desselben Bereichs (rechts). Letztere zeigt den Effekt, dass die Farbe von der Zahnoberfläche durch den eisenreichen Zahnschmelz (Fe-EN) ins Zahninnere hindurchscheint.

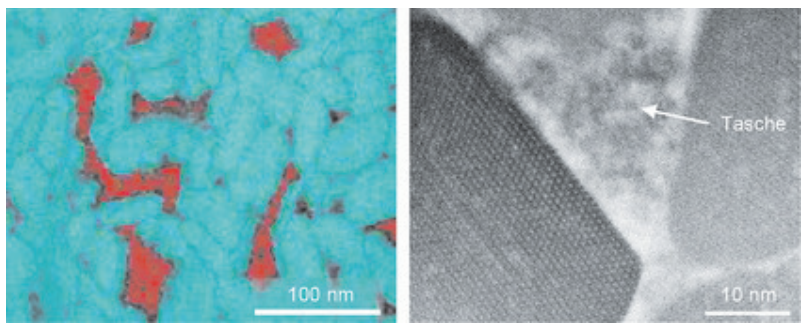

Abb. 4: Die Elementkarten, gemessen mit Hilfe der Elektronenenergieverlustspektroskopie von Kalzium (cyan) und Eisen (rote Flecken), zeigen die eisenhaltigen Taschen (rot) im eisenreichen Schmelz (links).

© modifiziert aus ACS Nano (4)

Von Christopher Waxenegger

„Es ist schon verwunderlich, dass niemand vor uns auf diese Idee gekommen ist. Seit über 70 Jahren sprechen wir bei Nagetierzähnen wie selbstverständlich von „pigmentierten Zahnschmelz". Ob dieser tatsächlich pigmentiert ist, hat bislang aber noch niemand überprüft. Wir waren die ersten", sagt Dr. Vesna Srot vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Deutschland. Zwar ist es naheliegend dem orange-braunen Zahnschmelz auf den Schneidezähnen von Nagetieren dieses Merkmal zu unterstellen, doch der Schein trügt.

Nichts ist so wie es scheint

Die Natur ist reich an natürlichen Verbundwerkstoffen. Schneckenhäuser, Muschelschalen und der Panzer von Krabben sind gute Beispiele dafür. Auch Zähne bestehen aus einfachen organischen und anorganischen Stoffen, die aufgrund ihrer Struktur besonders resistent gegenüber äußerlichen Einflüssen sind. „Die Kombination aus organischen und anorganischen Materialien ist es, was den Zahnschmelz zum härtesten Gewebe in unserem Körper macht. Warum haben wir uns dann Schneidezähne von Nagetieren angesehen? Weil man an diesen sämtliche Stadien der Zahnentwicklung sieht. Das macht sie zum idealen Modellsystem, um menschliche Zähne zu untersuchen", erklärt Srot.

Die kontinuierlich wachsenden Schneidezähne von Nagetieren sind perfekt an die Nagetätigkeit angepasst. Ihre Vorderseite wird von hartem Zahnschmelz geschützt, während sich die aus Dentin bestehende Rückseite abnützt. Auf diese Weise bleiben die Zähne immer scharf und funktionstüchtig. In ihrer Arbeit haben Srot und ihr Team die Zahnstruktur sieben verschiedener Nagetierspezies (Nutria, Biber, Murmeltier, Eichhörnchen, Ratte, Wühlmaus, Hausmaus) bis in den Nanometerbereich analysiert. Ziel war es herauszufinden, ob sie sich chemisch, mikrostrukturell bzw. interindividuell unterscheiden und was der Grund für ihre hohe Widerstandsfähigkeit ist.

Mit Eisen gefüllte Taschen

„Dafür schnitten wir mit einer Diamantsäge wie bei einer Salami circa 2-3mm dicke Scheiben von den Zähnen, die wir anschließend präparierten, um die unterschiedlichen Schichten des Zahnschmelzes mikroskopisch zu begutachten", so Srot. Dabei zeigen sich bei allen Spezies drei klar voneinander abtrennbare Zonen: Der orange-braun gefärbte eisenreiche Schmelz (Fe-EN), der innere radiale Zahnschmelz (IR-EN) sowie der innere Zahnschmelz (I-EN).

Bei genauerem Hinsehen entdecken Srot und ihre Kollegen nanometergroße Zwischenräume zwischen den länglichen Hydroxylapatit-Kristallen des Fe-EN und IR-EN. „Man muss sich das so wie ein Bündel Bleistifte vorstellen. Egal wie fest man sie auch aneinander drückt, es bleiben immer kleine Lücken", sagt Srot. Und genau diese Lücken sind im Fe-EN mit einem amorphen, ferrihydritähnlichen Material gefüllt – im IR-EN jedoch leer.

Die chemische Analyse ergab eine hohe Konzentration von Eisen und Sauerstoff. Der Calcium- und Phosphorgehalt, beides Hauptbestandteile von Hydroxylapatit, war demgegenüber fast nicht vorhanden. In Summe machen die gefüllten Zwischenräume weniger als 2 Volumsprozent des gesamten eisenreichen Zahnschmelz aus. Doch sind es genau diese zwei Prozent, die den Nagetierschneidezähnen ihre einzigartigen Eigenschaften verleihen.

Der Pigmentierung auf der Spur

„Im nächsten Schritt wollten wir wissen, ob der ferrihydritähnliche Inhalt tatsächlich für die Färbung des Zahnschmelz verantwortlich ist. Falls ja, sollte es Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung der Ober- und Unterzähne geben, da die oberen Schneidezähne der meisten Nagetiere sehr oft dunkler sind als die unteren," beschreibt Srot das weitere Vorgehen.

Doch dem war nicht so. Als Grund für die stärkere Pigmentierung stellte sich vielmehr die variable Dicke der Oberflächenschicht (engl.: surface layer) heraus, die dem Fe-EN aufliegt. Wurde diese vorsichtig wegpoliert, verschwand die orange-braune Farbe und es kam der weiße Zahnschmelz zum Vorschein. „Im Mikroskop sahen wir, dass nach der Politur die Fe-EN nach wie vor vorhanden war und wir lediglich die Oberflächenschicht entfernt hatten. Fe-EN dürfte demnach eine viel geringere Rolle bei der Pigmentierung einnehmen als bisher angenommen", so die Expertin. Dies erklärt auch den Vorschlag der Forschungsgruppe die Bezeichnung von „pigmentierten Zahnschmelz" in „eisenreichen Zahnschmelz" zu ändern.

> Wir haben die Zähne wie eine Salami aufgeschnitten.
>
> **Dr. Vesna Srot**
> Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Nutzen für die Zahnmedizin

Sollte das innerhalb der Taschen befindliche Material tatsächlich die Eigenschaften des menschlichen Zahnschmelz verbessern, ohne dessen Farbe zu verändern, wäre dies der Ausgangspunkt einer völlig neuen Klasse von Biomaterialien. Srot ist überzeugt: „Bereits geringe Mengen derartiger Verbindungen könnten unsere Zähne außerordentlich gut schützen. Etwa indem man sie Zahnpflegeprodukten beimengt, so ähnlich wie man es jetzt schon bei den verschiedenen Zahnpasten mit künstlichem Zahnschmelz macht."

Fazit

Bisher wurde fälschlicherweise angenommen, dass die Färbung der Schneidezähne von Nagetieren auf dem eisenreichen Schmelz beruht. Diese Auffassung gilt nun als widerlegt.

Das verbesserte Verständnis des zugrunde liegenden Farbmechanismus hat weitreichende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und restaurative Zahnheilkunde. Biokompatible Eisenhydroxidoxide sind ein potenzieller Ausgangspunkt neuer Dentalbiomaterialien mit verbesserten Eigenschaften, inspiriert vom genialen Design der Natur.

Originalstudie:
Srot V, Houari S et. al.: „Ingenious Architecture and Coloration Generation in Enamel of Rodent Teeth.", in ACS Nano. 2024 Apr 17;18(17):11270-11283.
DOI: 10.1021/acsnano.4c00578