Die Rezeptur der Hummerschale



Für Feinschmecker sind sie vor allem lästig, Helge Fabritius weiß sie dafür umso mehr zu schätzen. Der Biologe untersucht am Max-Planck-Institut für Eisenforschung den Bauplan von Hummer- und Krabbenschalen. Dabei enthüllt er auch, wie Gliederfüßer mit einer sehr überschaubaren Palette von Ausgangsstoffen vielfältige Materialeigenschaften erzeugen.

TEXT ALEXANDER STIRN

elge Fabritius mag Hummer, am liebsten fangfrisch und in einem kleinen Restaurant irgendwo an der Küste. Fabritius ist aber auch nicht traurig, wenn die Hummer auf Eis liegen. Im Gegenteil, dann sind sie für ihn besonders wertvoll. Denn es ist gar nicht so sehr das weiße Fleisch oder der süßliche Geschmack. was den 41-Jährigen fasziniert. Es ist vielmehr das, was Feinschmecker links liegen lassen: die Schale des Hummers und ihre raffinierte Struktur.

Helge Fabritius ist Biologe. Er arbeitet in Düsseldorf, am Max-Planck-Institut für Eisenforschung. Was wie ein Widerspruch klingt, hat seine guten Gründe: Auf der Suche nach neuartigen Materialien erkunden die Düsseldorfer Wissenschaftler längst nicht mehr nur Erze und Metalle. Ihr Augenmerk gilt auch sogenannten Verbundwerkstoffen - und hier ist die Natur mit ihrer seit Jahrmillionen bewährten Art. besonders raffinierte Materialien herzustellen, ein gutes Vorbild.

"So ziemlich alle natürlichen Verbundwerkstoffe folgen den mehr oder weniger gleichen Regeln", sagt Helge Fabritius. "Die Exoskelette von Gliederfüßern sind daher ein sehr schönes Modell, um zu lernen, wie die Natur unterschiedliche Probleme löst." Ziel ist es dabei gar nicht so sehr, die Natur nachzunahmen. Fabritius will vielmehr neue Einblicke, neue Ideen und letztlich Tipps für neue Materialien finden.

Es ist kühl im Keller des Düsseldorfer Backsteingebäudes, und ein Rauschen ist zu hören. Also fast so wie an der Küste – mit dem kleinen Unterschied, dass das Rauschen und der Luftzug nicht vom Meer, sondern von der Klimaanlage stammen. Die ist notwendig, um feine Temperaturschwankungen in dem Raum auszugleichen, in dem Helge Fabritius' Lieblingswerkzeug steht: ein Rasterelektronenmikroskop. Denn nur wenn das Gerät bei konstanter Temperatur misst, liefert es die erhofften Einblicke.

EIN BIOLOGE IN DER EISENFORSCHUNG?

Behände dreht Helge Fabritius an den handtellergroßen Knöpfen des Steuerpults. Er verändert den Ausschnitt, er vergrößert die Aufnahme, er fokussiert. Auf dem Monitor erscheint ein Bild, das ein Wirrwarr grauer Bindfäden zeigen könnte. Doch es ist der Blick in eine Hummerschale.

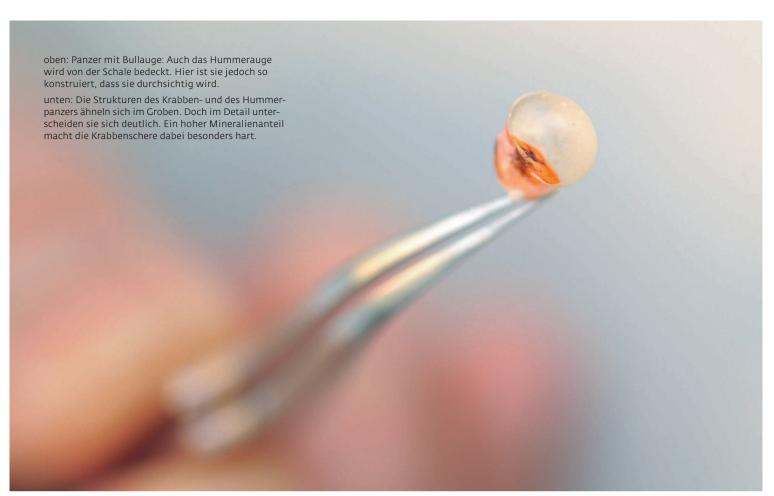
Dass Helge Fabritius hier sitzt, hat er einem Hummeressen zu verdanken - so geht zumindest die Geschichte, die man sich auf den Fluren des Düsseldorfer Instituts erzählt: Dierk Raabe, Direktor am Düsseldorfer Max-Planck-Institut und Leiter der Abteilung Mikrostrukturphysik und Legierungsdesign, soll im Restaurant eines der Tiere verspeist haben. Dabei weckten die Schalen sein Interesse. Wenig später setzte Raabe einen Physiker, eine Chemikerin und einen Ingenieur auf den Hummerpanzer an. Sie sollten klären, wie dessen überraschend feste und zugleich leichte Struktur aufgebaut ist.

Die Forscher begannen, das Material zu studieren - nach allen Regeln der Kunst, die im Metallbereich so üblich sind. Die großen Erfolge blieben jedoch aus, der Stoff verhielt sich einfach nicht wie ein Metall. Dann bekam Helge Fabritius eine E-Mail. Er saß zu jener Zeit gerade in Ulm an seiner Doktorarbeit. Thema: Die Biomineralisation bei Asseln. "Eisenforschung? Ich habe erst mal gedacht, da will mich jemand veräppeln", erzählt Fabritius und lacht. "Warum sollte ich dort einen Vortrag halten, der sich mit kleinen Calciumcarbonat-Kügelchen in Asseln beschäftigt?" Er hielt den Vortrag. Und kurze Zeit später hatte Fabritius eine Postdoktorandenstelle in der Eisenforschung inne.

Das war 2005. Seitdem sind Hummer eine feste Größe auf dem wissenschaftlichen Speiseplan des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung.

Helge Fabritius nimmt eine Hummerschale in die Hand. Er klopft mit dem Finger dagegen, das Material klingt hohl. Es ist leicht, fast so, als wäre es aus Styropor. Es ist biegsam, jedoch fest. Vor allem aber ist es äußerst vielfältig: Wie alle Gliederfüßer haben auch Hummer ein sogenanntes Exoskelett. Die Schale umschließt dabei den ganzen Körper – ähnlich der Haut beim Menschen.

Damit das funktionieren kann, muss das Material eine Vielzahl von Eigenschaften beherrschen. Der Hummer



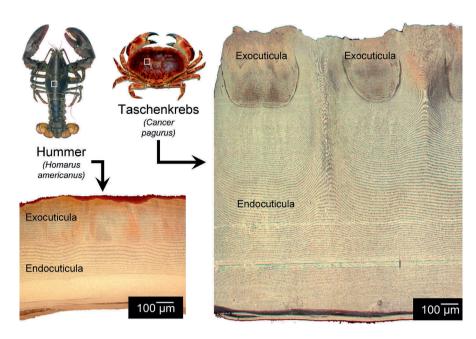


braucht harte Teile, zum Beispiel am Panzer und an seinen Gliedmaßen. Er braucht bewegliche Teile, zum Beispiel im Bereich der Gelenke. Er braucht flexible Membranen, die Bewegungen mitmachen und verhindern, dass der Körper ausläuft. Und er braucht transparente Bauteile, schließlich will er mit seinen Sehzellen durch das Exoskelett hindurchblicken können. Und schließlich müssen Hummer, wie alle anderen Gliederfüßer auch, ihr Skelett immer wieder erneuern, sobald ihnen ihre alte Schale zu klein wird.

So unterschiedlich die Anforderungen an die Hummerschale auch sein mögen, ihre Struktur folgt stets demselben grundlegenden Bauplan, und auch die kleinsten Bestandteile sind - wie bei allen Gliederfüßern – immer dieselben. An die verschiedenen Funktionen hat die Natur das Material angepasst, indem sie kleinste Bausteine im Detail unterschiedlich anordnet und zusammensetzt. "Wir haben quasi ein natürliches multifunktionelles Material. Und weil solche Werkstoffe für technische Anforderungen immer wichtiger werden, interessiert das natürlich die Forschung", sagt Fabritius.

Die ersten Ergebnisse machen Mut: Bei Krebsen ist das Exoskelett demnach ein klassisches Verbundmaterial, das organische und anorganische Teile kombiniert. Sein Aufbau folgt zudem einer strengen Hierarchie, die sich von der molekularen Ebene bis zum fertigen Bauteil erstreckt.

Ganz am Anfang steht Zucker, genauer gesagt N-Acetylglucosamin. Die Zuckermoleküle verbinden sich zu Chitin, einem langkettigen, in der Natur äußerst häufig vorkommenden Baumaterial. Zwölf bis 18 dieser Chitinmoleküle finden sich zu einem kleinen Faden zusammen. Fibrillen nennen Biologen die fünf bis sieben Nanometer - ein Nanometer entspricht einem Millionstel Millimeter - dicken Strukturen, die von einem Mantel aus Proteinen umhüllt werden. Ordentlich parallel aufgereiht lagern sie sich auf dem Epithel ab, der äußersten Zellschicht der Gliederfüßer. Eine geschlossene Schicht aus Fibrillen entsteht.



Hummer- und Krabbenschalen unter dem Lichtmikroskop: Die Aufnahmen von polierten Querschnitten des Körperpanzers zeigen die Unterschiede in der Dicke und der Organisation der verschiedenen Cuticulaschichten. Exo- und Endocuticula weisen jeweils eine eigene Feinstruktur auf und sind anders mineralisiert.

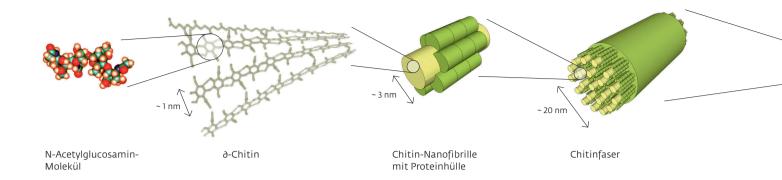
Die Zellen machen sich anschließend daran, unter dieser Lage die nächste Schicht zu bilden; sie verändern dabei aber die Ausrichtung der Fibrillen um einige Grad. So entsteht ein Stapel von Faserschichten, in denen Fibrillen stets um einen bestimmten Winkel gegeneinander verdreht sind. Als "Sperrholzprinzip" bezeichnet Fabritius dieses Vorgehen: Ähnlich wie bei Sperrholz, bei dem zwei dünne Holzbrettchen im rechten Winkel laminiert und dadurch stabiler werden, ergeben auch die gegeneinander versetzten Fibrillenlagen ein äußerst festes Material.

OB HUMMER ODER KRABBE, ZEIGT DIE FEINSTRUKTUR

"Genau das sehen wir im Elektronenmikroskop", sagt Helge Fabritius und zoomt tiefer ins schwarz-weiße Bindfadenbild. In der Tat: Mit etwas Fantasie sind übereinanderliegende Fasern zu erkennen, die sich Stück für Stück aus der Bildebene herausdrehen, bis sie schließlich auf den Beobachter zuzukommen scheinen. "Wenn man so etwas zum ersten Mal sieht, ist es recht verwirrend", gibt Fabritius zu. "Da hilft nur, sich viele Proben anzuschauen und immer mehr Erfahrung zu sammeln, um aus den Bildern den Entstehungsprozess zu rekonstruieren."

Der Biologe fährt mit seinem Mikroskop an eine andere Stelle im Hummerpanzer, näher an der Oberfläche. Selbst mit größter Mühe sind jetzt keine einzelnen Fasern mehr zu erkennen. "Manchmal fragt man sich wirklich: Wo ist jetzt die Landkarte oder die Gebrauchsanweisung?", sagt Fabritius und schmunzelt. Letztlich helfe es, das Auge von irgendwelchen Besonderheiten in der Aufnahme zu lösen und nach unscheinbaren Motiven zu suchen, die sich ein ums andere Mal wiederholen nach der Grundstruktur des Materials.

Um Einblicke in die Feinstruktur zu bekommen, muss Helge Fabritius das Material aus allen Blickwinkeln betrachten. Deshalb zerschneidet oder zerbricht er die Schale, beschichtet die Proben mit Platin und steckt sie ins Elektronenmikroskop. Das bedeutet, dass der Blick auf die Hummerstrukturen nicht zwangsläufig von der Seite fällt. Die verdrehten Ebenen können auch schräg angeschnitten sein. Ein verwirrendes Muster entsteht, ähnlich wie bei der Maserung eines Holzschrankes, bei dem der ursprüngliche Verlauf



der Jahresringe ebenfalls kaum zu erahnen ist. "Zum Üben schaue ich mir manchmal sogar Möbel an und überlege, wie das Muster entstanden sein könnte", sagt Helge Fabritius.

Auch wenn die Schale, die sogenannte Cuticula, bei allen Gliederfüßern die gleiche grundsätzliche Struktur besitzt, zeigen sich im Detail doch große Unterschiede. Fabritius drückt einen Knopf. Wie in einer Sushi-Bar fährt im Elektronenmikroskop die nächste vorbereitete Probe ins Bild. Es ist die Schale einer Krabbe. Nach wenigen Sekunden wird das unscharfe Bild klar, verglichen mit dem Hummer ist es deutlich strukturierter: Die einzelnen Fibrillen sind zu dickeren Fasern gebündelt - ähnlich den Strängen eines Seils. Diese Bündel liegen dann wiederum in Schichten nebeneinander, die horizontal gegeneinander verdreht gestapelt sind.

Beim genauen Blick sowohl in die Hummerschale als auch in den Krabbenpanzer sind Poren zu erkennen, die die Struktur in Form langer Kanäle von unten nach oben durchziehen. Sie entstehen, während die Epithelzellen vor der Häutung einen neuen Panzer bilden. Winzige Ausstülpungen ragen so aus den Zelloberflächen der Hummeroder Krabbenhaut hervor, dass die Schichten aus Chitinfasern um sie herumgewoben werden müssen. Nach und nach entstehen ovale, schraubenförmig verdrehte Porenkanäle. Sie dienen vorerst als Transportwege für die Stoffe, mit denen die Tiere das zunächst weiche Grundgerüst des neuen Panzers rasch härten, nachdem sie den alten Panzer abgeworfen haben.

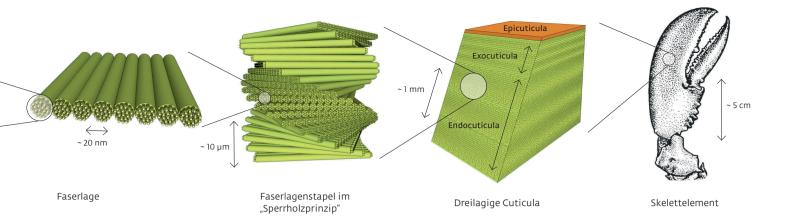
Wenn Fabritius noch weiter in die Elektronenmikroskop-Proben hineinzoomt, treten Partikel hervor, die neben den organischen Fasern den zweiten Hauptbestandteil des natürlichen Verbundwerkstoffes bilden: Sie bestehen im Wesentlichen aus unterschiedlichen Formen von Calciumcarbonat, das aus Küche und Bad als Kalk bekannt ist. In einigen Teilen der Hummerschale liegen die Partikel als winzige Kügelchen zwischen den Chitinfasern. In der Krabbenschale bilden ähnliche Teilchen geschlossene Röhren um die Faserbündel. Die Art des Kristallgitters, Form und Menge der Kalkteilchen bestimmen die Härte des Exoskeletts, die je nach Tierart, aber auch innerhalb einer Schale variiert.

Welche Elemente in den Mineralpartikeln neben Calciumcarbonat enthalten sind, lässt sich selbst mit einem hochauflösenden Elektronenmikroskop nicht klären. Helge Fabritius' Lieblingsinstrument hat allerdings einen Trick auf Lager: Neben den Elektronen, die letztlich für die Schwarz-Weiß-Bilder verantwortlich sind, regt das Mikroskop auch Röntgenquanten an - und deren Energie ist charakteristisch für die in der Probe enthaltenen Elemente.

Die Technik, energiedispersive Röntgenspektroskopie genannt, liefert farbenfrohe Landkarten aus dem Innern der Krebsschalen. Rot steht für Calcium, Gelb für Magnesium, Blau für Phosphor. Die Verteilung der Farben ist dabei mindestens so vielfältig wie die Eigenschaften des Exoskeletts: Bei der Krab-

Ein Blick für die besonders feinen Details: Helge Fabritius vor einem Rasterelektronenmikroskop, mit dem er die Feinstruktur von Exoskeletten enthüllt.





Die Strukturhierarchie der Hummerschale (von links): Moleküle des Zuckers N-Acetylglucosamin verbinden sich zu dem Biopolymer Chitin. Die Chitinmoleküle lagern sich zu Chitinfibrillen zusammen, die von einer Proteinhülle umschlossen werden. Viele dieser Bündel schließen sich zu Chitinfasern zusammen, die sich wiederum zu einer Faserlage nebeneinanderlegen. Die Faserlagen stapeln sich ähnlich, wie die Lagen einer Sperrholzplatte, versetzt übereinander. Diese Stapel bilden schließlich die Cuticula des Hummers, die aus drei Schichten mit variierender Struktur besteht. Während Endo- und Exocuticula der Schale ihre mechanische Stabilität geben, schützt die Epicuticula, die vor allem aus Proteinen und Fetten besteht, den Hummer vor schädlichen Umwelteinflüssen.

be offenbaren die Aufnahmen zum Beispiel Regionen, in denen sich genau dort besonders viel Magnesium befindet, wo wenig Calcium vorliegt. Sie enthüllen aber auch Gebiete, in denen fast kein Magnesium anzutreffen ist. Magnesiumatome in Calciumcarbonat-Kristallen verzerren das regelmäßige Kristallgitter und erhöhen damit die Festigkeit des Minerals.

KRUSTENTIERE DOSIEREN MINERALIEN IN DEN SCHALEN

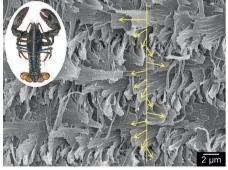
Eine Antwort auf die Frage nach der chemischen Zusammensetzung der Mineralien liefern allerdings auch die Elementkarten nicht. Aufklärung gibt es erst in Kombination mit einem weiteren Instrument, dem konfokalen Ramanmikroskop. In ihm beleuchtet ein Laser die Probe. Das Material streut das Licht, die Verteilung der Wellenlängen wird analysiert. Steile Spitzen im Spektrum dieses Lichts stehen für unterschiedliche Moleküle - Carbonate, Phosphate, Calcite.

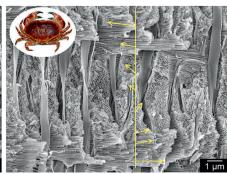
Zusammen mit den Elementkarten geben die Kurven interessante Einblicke in die Mineralisation der Cuticula. So besteht beim Hummer lediglich eine dünne Schicht in den äußersten Regionen der Schale aus kristallinem Calcit, einer besonders widerstandsfähigen Verbindung. Offensichtlich soll sie vor Angriffen und Abnutzung schützen. Darunter ist der Panzer mit ungeordnetem, amorphem Calciumcarbonat gehärtet. Dieser Stoff weist zwar geringfügig schlechtere mechanische Eigenschaften auf, ist dafür aber leichter löslich, was etwa die Häutung erleichtert. Auch sonst achten die Krustentiere genau darauf, wie viele Mineralien sie an welcher Stelle einbauen: In den Scheren, die besonders starken Belastungen standhalten müssen, wies Fabritius einen vergleichsweise hohen Mineraliengehalt nach. Im Körperpanzer finden sich dagegen weniger Mineralien, sodass das Material leichter wird. Anders bei Krabben, die bei feindlichen Angriffen nicht schwimmend die Flucht ergreifen können. Sie setzen auf eine dickere Schale und bauen widerstandsfähigere Verbindungen in ihren Panzer ein.

Helge Fabritius will es jedoch nicht beim Anschauen, Erkennen, Interpretieren belassen. Er will auch verstehen, welche Auswirkungen das Zusammenspiel von Struktur und Zusammensetzung hat. Erste Anhaltspunkte sollen mechanische Tests liefern: Winzige, mal stern-, mal kreisförmige Eindrücke verteilen sich über den polierten Querschnitt des Hummerpanzers im Elektronenmikroskop. Sie stammen von der Spitze eines sogenannten Nanoindenters, die Fabritius immer wieder in die unterschiedlich angeschnittenen Fibrillenbündel gedrückt hat. Dabei trifft er die Fasern mal senkrecht zur Längsrichtung, dann schräg von der Seite, schließlich drückt er die Spitze in Längsrichtung in die Faser. Das Gerät misst dabei, wie weit die Spitze bei einer vorgegebenen Kraft eindringt. Daraus lassen sich Härte und Elastizität des Materials errechnen. "Wie erwartet, sind die Fibrillen in Längsrichtung steifer", sagt Helge Fabritius.

Zum Einsatz kommen aber auch die klassischen Zug-, Druck- und Scherversuche aus der Materialprüfung. Sie helfen, die mechanischen Eigenschaften der Gesamtstruktur besser zu verstehen. Helge Fabritius nimmt ein rötliches Plättchen aus einer Plastikbox und legt

Die Mikrostruktur der Hummer- und Krabbenschale: Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen die Faserbündel an Querbrüchen. Wie die Faserbündel in verschiedenen Lagen gegeneinander verdreht sind, veranschaulichen die Pfeile.









Ein Material, viele Formen: Die Exoskelette der Gliederfüßer wie des Pfeilschwanzes, eines tropischen Prachtkäfers, und des Taschenkrebses (von links) bestehen vor allem aus Chitin und Proteinen, die je nach Anforderung anders strukturiert sind. Bei Krebsen sind zusätzlich Mineralien eingelagert. Der tropische Prachtkäfer bildet in seiner Cuticula sogar photonische Kristalle, um die schillernde Farbe zu erzeugen.

es auf seine Fingerkuppe. Es ist ein Stück Hummerpanzer, zwei Millimeter dick, 18 Millimeter lang, sauber herausgefräst. Seine beiden Enden sind etwas breiter, damit die Prüfmaschine daran ziehen kann.

Die bewährten Methoden der Metallforschung gelangen bei den Hummerschalen immer wieder an ihre Grenzen. So sprühen die Forscher um Helge Fabritius auf die Oberfläche der Panzerproben ein unregelmäßiges Muster aus Grafit. Mit dem gleichen Muster versehen Materialforscher etwa Stahlproben, ehe sie deren Zugfestigkeit messen. Im Test verzieht sich das Grafit-Muster mit der Probe. Aus der Verzerrung berechnet ein Computerprogramm, wie sich das Material an jeder Stelle verformt. Um den Einfluss der feinen Variationen in der Hummerstruktur zu verstehen, ist das Muster allerdings noch zu grobmaschig. "Hier bleibt viel Spielraum, um die Messmethoden zu verfeinern", sagt Helge Fabritius.

Es ist nicht die einzige Herausforderung: Welche Eigenschaften das Material dem Hummer bietet, gibt die Cuticula nur im feuchten, lebensnahen Zustand preis. Hummer & Co. müssen daher auf Eis präpariert und möglichst schnell vermessen werden. Für einige Messmethoden wie etwa die Nanoindentation eignen sich feuchte Proben jedoch nicht. Ohnehin stoßen die Forscher, beim Versuch immer tiefer in die Strukturen zu blicken, langsam an die Grenzen der vorhandenen Messmethoden. Computergestützte Modellierung und Simulationen sind daher zu einem zweiten Standbein geworden.

EIN OPTIMALES MATERIAL, ABER NICHT FÜR DIE TECHNIK

"Als experimenteller Biologe konnte ich anfangs nicht viel mit Simulationen anfangen, inzwischen weiß ich sie zu schätzen", sagt Helge Fabritius. "Ich kann die Komplexität des Materials, die die Interpretation der Experimente schwierig macht, vergessen und mich auf einen Parameter konzentrieren." Bis es so weit war, musste Fabritius aber erst die passenden Modelle entwickeln - gemeinsam mit Forschern der Gruppe für Computergestütztes Materialdesign am Max-Planck-Institut für Eisenforschung und einem Kollegen, der mittlerweile in Bulgarien arbeitet.

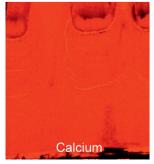
Die Wissenschaftler setzen dabei unter anderem auf sogenannte Ab-initio-Rechnungen: Anhand der Atomabstände und Bindungsenergien in den Chitinmolekülen und dem Calciumcarbonat ermittelt der Computer die mechanischen Eigenschaften der Substanzen - auf einer Größenskala, die experimentell nicht zugänglich ist. Die Daten fließen in mathematische Modelle ein, die die Strukturen möglichst realitätsnah beschreiben sollen.

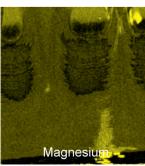
Das Ergebnis hat Helge Fabritius überzeugt. Füttert er das Modell zum Beispiel mit der Größe der mineralisierten Partikel, mit dem Volumenanteil der Chitinfasern, mit Anzahl und Abmessungen der Porenkanäle, ermittelt es, bei welchem Mineralgehalt die höchste Steifigkeit erreicht werden kann. "Wir haben das anschließend mit den Messdaten verglichen und gesehen, dass fast alle ermittelten Werte im Bereich der besten Vorhersage liegen", sagt Fabritius. Aus Sicht des Hummers und mit den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln ist die Hülle also optimal konstruiert.

Allerdings nur aus Sicht des Hummers: "Die Materialien in den Exoskeletten sind stets für ihre Funktion bei der jeweiligen Tierart optimiert - und nicht für den Menschen", sagt Helge Fabritius. "Man kann daraus nichts für menschliche Ansprüche herstellen, das sich nicht gleichwertig, weniger aufwendig und preisgünstiger mit klassischen Werkstoffen wie Kunststoffen oder Metallen produzieren ließe." Die Natur einfach nachzubauen wäre daher keine erfolgversprechende Idee.

"Was uns wirklich interessiert, sind die Prinzipien, nach denen ein Material aufgebaut ist", erklärt Helge Fabritius.

Elemente nach Farben: Die energiedispersive Röntgenspektroskopie enthüllt die Verteilung der Elemente in der Cuticula. Im Krabbenpanzer etwa findet sich in der äußeren Schicht relativ wenig Calcium, aber viel Magnesium und Phosphor.









So untersucht er derzeit auch die Cuticula von Insekten. Sie besteht ebenfalls aus sperrholzartig angeordneten Chitinfibrillen. Im Detail unterscheidet sich ihr Bauplan jedoch von dem der Hummer und Krabben; so verwenden Insekten keine Mineralien. Spezielle Modifikationen der Schalenstruktur verhelfen den Insekten zu ihrer Farbe.

Auf dem Exoskelett tropischer Rüsselkäfer mit einem grünlich schillernden Panzer beispielsweise entdeckten Helge Fabritius und seine Mitarbeiter winzige Schuppen. In diesen formen die Chitinfasern eine Diamantstruktur, deren Hohlräume mit Luft gefüllt sind. So entsteht ein sogenannter dreidimensionaler photonischer Kristall. Ein solches Material reflektiert je nach Größe der Gitterabstände und Orientierung nur Licht einer bestimmten Farbe. Strukturen dieser Art haben die Düsseldorfer Materialwissenschaftler mittlerweile auch im Labor hergestellt. Die sehen nicht nur hübsch aus, sie eignen sich vielmehr auch als Gassensoren. Die Farbe des Materials verändert sich nämlich, wenn ein Gas mit einem anderen Brechungsindex als Luft in die Poren eindringt.

Aus all dem, davon ist Helge Fabritius überzeugt, lassen sich durchaus Lehren für künftige Verbundmaterialien ziehen. Die großen Porenkanäle im Hummerpanzer, die dem Tier Gewicht sparen, ohne auf Kosten der Stabilität zu gehen, könnten zum Beispiel ein Vorbild für leichte, aber dennoch feste Materialien sein.

Helfen soll dabei auch das bereits entwickelte Modell. Je mehr Daten die Forscher bekommen, desto genauer wird es. "Irgendwann können wir damit Vorhersagen treffen", hofft der Biologe. Die könnten zum Beispiel darin bestehen, dass das Programm eine Faser, eine strukturelle Umgebung und eine Mischung aus Mineralien vorschlägt, die sich danach im Labor zu einem Verbundmaterial mit den gewünschten Eigenschaften zusammenfinden.

Helge Fabritius nimmt die Hummerschale noch einmal in die Hand, dreht und wendet sie, schaut sie genau an. "Ich denke, dass es in Zukunft immer mehr Beispiele geben wird, bei denen wir in technischen Anwendungen biologischen Prinzipien folgen", sagt er, "jedoch nicht eins zu eins, sondern immer nur als Teil des Ganzen."

Biomaterial in der Zugmaschine: Helge Fabritius prüft die Zugfestigkeit einer Probe, die zwischen zwei Schlitten eingespannt wird (links oben). Zwei Kameras, von zwei Lampen flankiert, dokumentieren die Verformung während des Versuchs.

.....

GLOSSAR

Arthropoden-Cuticula

Die äußere Körperdecke von Gliederfüßern: sie wird von Epidermiszellen, die der Haut von Wirbeltieren entsprechen, gebildet und dient durch entsprechende Anpassung von Struktur und Zusammensetzung als Exoskelett.

Ein Vielfach-Zucker, der einen Hauptbestandteil in den Schalen von Gliederfüßern bildet.

Exoskelett

Die äußere Schale, mit der Gliederfüßer wie Krebstiere oder Insekten ihren weichen Körper stabilisieren.

Fibrillen

Feine Fasern, die je nach Vorkommen und Funktion aus unterschiedlichen Substanzen wie Proteinen, Cellulose oder Chitin aufgebaut sein können.

Nanoindentation

Methode, um die Härte eines Materials zu testen. Eine Spitze wird mit vorgegebener Kraft in eine Oberfläche gedrückt. Aus Eindringtiefe und Kontaktfläche werden die Härte und die Elastizität berechnet.