

Krabbenaugen-Design: Optimale Nanotechnologie

Eine erstaunliche Augenkonstruktion ermöglicht es einer Garnelenart, in der Tiefsee auch bei sehr wenig Licht noch sehen zu können. Winzige Spiegel im Facettenauge richten das Licht auf einen Brennpunkt. Dabei handelt es sich um sogenannte „photonische Kristalle“, also periodische Nanostrukturen, deren Design darauf ausgerichtet ist, die Bewegung von Photonen zu lenken..

Peter Borger

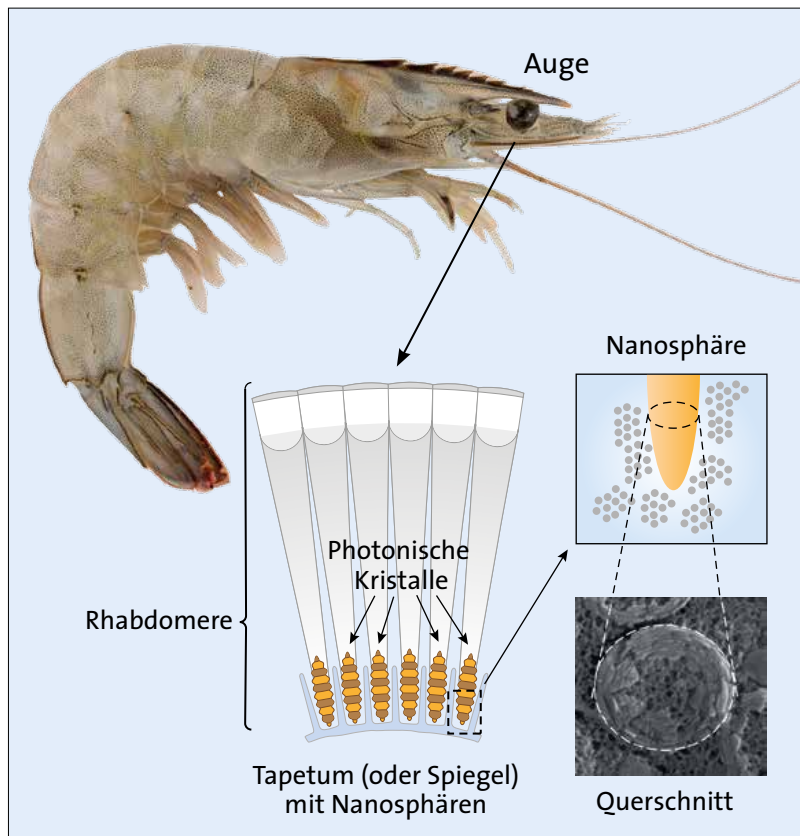
Dekapoden („Zehnfußkrebse“) sind zehnbeinige Krustentiere wie Hummer, Garnelen und Krebse. Sie besitzen Augen, die sich stark von unseren Linsenaugen unterscheiden. Unsere Augen fokussieren das Licht durch Lichtbrechung mittels Linsen, während die aus vielen kleinen Einzelaugen zusammengesetzten Facettenaugen der Zehnfußkrebse winzig kleine Spiegel verwenden, um das Licht auf einen Brennpunkt zu richten. Die Konstruktionsprinzipien könnten nicht unterschiedlicher sein und beide erfordern spezielle Ausführungen. Ein Team von israelischen Wissenschaftlern des Weizmann Institute of Science und der Ben-Gurion-Universität hat bei einer Garnelenart eine erstaunliche Augenkonstruktion entdeckt,

die es ihnen ermöglicht, in der Tiefsee auch bei sehr wenig Licht noch sehen zu können.

Die Forscher analysierten die Augen der Weißfußgarnele (*Litopenaeus vannamei*) unter dem Elektronenmikroskop. Sie entdeckten, dass der Spiegel (das Tapetum) aus einer Anordnung von Nanosphären (winzigen Spiegelkugeln) mit einem Durchmesser von 330 Nanometern besteht (0,00033 mm); ihr Durchmesser ist somit kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Diese Nanosphären sind in einer regelmäßigen Anordnung gepackt und um die untere Hälfte des Rhabdoms gewickelt. Das Rhabdom ist die kristalline Struktur in den Facettenaugen der Gliederfüßer, die die Lichtrezeptorproteine zum Einfangen der Photonen enthält (Abb. 1). Die Sphären selbst bestehen aus 8-10 dünnen konzentrischen Schichten von insgesamt 70 Nanometern Manteldicke, die einen mit einer flüssigen Substanz gefüllten Kern umgeben. Die Schichten werden aus Einzelkristallen von Isoxanthopterin gebildet, eine außergewöhnliche Konstruktion, da diese chemische Substanz prismatische Kristalle bildet. Dies verleiht den Sphären in ihrer Gesamtheit eine außergewöhnliche Eigenschaft, nämlich Doppelbrechung. Bei der Doppelbrechung variiert der Umfang der Lichtablenkung, also der Brechungsindex, je nach der Position im Bereich der Sphäre. Entlang der Mitte der Sphäre beträgt der Index 1,4, der ungefähr demjenigen von Wasser entspricht. Aber entlang des Randes ist der Index mit fast 1,96 „einer der höchsten Brechungsindizes aller biologischen Materialien“ (PALMER et al. 2020).

Die Forscher führten Computersimulationen durch, um die Reflexion von verschiedenen möglichen Anordnungen der Sphären zu vergleichen. Es stellte sich heraus, dass die Größe und Dicke der Sphären und die Schichten, aus denen sie bestehen, optimal konzipiert waren. Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass sie mit

Abb. 1 Der ausgeklügelte Aufbau des Auges der Weißfußgarnele (*Litopenaeus vannamei*). (Bild: Garnele: geshas, AdobeStock; Grafiken nach PALMER et al. 2020).



Flüssigkeit gefüllt statt massiv waren. Auch die Doppelbrechung der Sphären sorgte für bessere Reflexion als die simulierten Sphären, die in allen Richtungen den gleichen Brechungsindex hatten. Außerdem waren sie optimal beschaffen für blaues Licht, den einzigen Bereich des Spektrums des Sonnenlichts, der nennenswert bis in die Tiefen des Lebensraum der Garnele vordringt (SARFATI 2021).

Die Konstruktion ist also optimal ausgestattet für die Reflexion des Lichts, sodass die Fotorezeptoren am Boden der Nanosphären alle Lichtquanten, die in diese Meerestiefen eindringen, verlustfrei einfangen. Nach allem, was bisher bekannt ist, kann das gesamte Design dieser Augen nicht verbessert werden. Die israelischen Forscher kamen zu dem Schluss, dass „die Größe, das Kern/Schale-Verhältnis und die Anordnung der Partikel ebenfalls optimiert sind, um die Rückstreuung des Spiegel-Reflektors zu maximieren, sowohl in Bezug auf die Intensität als auch auf die spektralen Eigenschaften“ (PALMER et al. 2020).

Die winzigen Spiegel im Auge der Garnele sind ein wahres Wunderwerk, bei dem es sich – wie es im Fachjargon heißt – um „photonische Kristalle“ handelt, also um periodische Nanostrukturen, deren Design speziell darauf ausgerichtet ist, die Bewegung von Photonen zu lenken. In der Diskussion führten die Forscher an, dass es zwar theoretische Studien über die überlegene Optik von photonischen Kristallen mit doppelbrechenden Bausteinen gibt. Dennoch seien sie in der Praxis nicht hergestellt worden,

Die winzigen Spiegel im Auge der Garnele sind ein wahres Wunderwerk.

weil es nicht gelungen ist, ihre Bausteine richtig anzuordnen. Die Forscher bezeichneten die Konstruktion der sphärischen doppelbrechenden Bausteine als „das Genie der Shrimp-Lösung“, weil für diese Form keine besondere Ausrichtung erforderlich war (SARFATI 2021).

So kamen sie zu dem Schluss, dass „die Garnele ein einzigartiges Beispiel für ein natürliches photonisches System darstellt, das optische Eigenschaften aufweist, die zuvor nicht synthetisch (d. h. vom Menschen) erforscht wurden. [...] Das System bietet Inspiration für das Design von photonischen Kristallen, die aus sphärisch symmetrischen doppelbrechenden Partikeln aufgebaut sind, für den Einsatz in ultradünnen Reflektoren und nicht-irisierenden Pigmenten“ (PALMER et al. 2020). Die Garnele hat für ihren Lebensraum einen überaus effizienten optischen Sensor: Augen, die auch die letzte Spur des verfügbaren Lichtes nutzen. Neben anderen faszinierenden Typen von Augen handelt es sich um eine besondere Ausprägung, über die wir nur staunen können!

Literatur

- PALMER BA et al. (2020) A highly reflective biogenic photonic material from core-shell birefringent nanoparticles. *Nature Nanotechnology* 15, 138–144.
- SARFATI J (2021) Shrimp Eye Design: Reflective nanotechnology could inspire new optical coating. *Creation* 43, 22–23.