

Kieselalgen als Muster für Technische Konstruktionen

Christian Hamm

Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

► Eukaryotische Einzeller befinden sich in astronomischen Zahlen im Meereswasser. Sie erreichen dabei in etwa die Anzahl der Sterne im Universum (ca. 10^{22}). Dies führt insbesondere durch autotrophe Organismen (einzellige Algen) zu Verfärbungen des Wassers, die mit Satelliten gestützten Systemen sehr genau detektiert werden können. Während die Pigmentzusammensetzung dieser marinen Algen relativ einförmig ist^[1], gibt es sehr große Unterschiede bei den Materialien und Bauprinzipien, die unterschiedliche Taxa verwenden, um ihren Zellinhalt vom Seewasser abzugrenzen. So verwenden die Coccolithophoriden Kalzit (CaCO_3), Diatomeen und Silikoflagellaten Silikat ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$), um skelettartige Strukturen aufzubauen. Auch heterotrophe Einzeller wie Radiolarien (Silikat), Acantharinen (Coelestin, SrSO_4) und Foraminiferen (Kalzit) bauen komplexe mineralische Schalen mit oft sehr unterschiedlichen Geometrien auf.

Die produktivste und dominierende Gruppe (25 Prozent der globalen Primärproduktion) unter diesen Protisten sind die Diatomeen oder Kieselalgen, die eine silifizizierte Zellwand besitzen, die oft als opal- oder glasartig beschrieben wird. Neben ihrer Dominanz im Ozean und ihrem Vorkommen in fast jedem aquatischen Lebensraum der Erde ist es auch die Gruppe, die die höchste Diversität an Morphologien aufweist. Obwohl ihr prinzipieller Aufbau fast immer dem einer Petrischale gleicht, variieren Größenspektrum (wenige Mikrometer bis über einen Millimeter) und äußere Ge-

stalt (nadelförmig, zylindrisch, schiffsförmig, dreieckig und anderes) in hohem Maße (Abb. 1). Eine hohe Komplexität der Schalen ergibt sich dadurch, dass Strukturen wie Rippen, Waben und Poren in unterschiedlichen Dimensionen (etwa 1 μm , 150 nm, 20 nm) ausgeprägt sein können. Oft entstehen dabei auch fraktale (selbstähnliche) Strukturen (Abb. 2). Die Anzahl der Arten wird auf etwa 100.000 geschätzt.

Wasserqualität und Wasserleichen: Wissenschaftliche Anwendungen

Wegen der hohen Anzahl unterschiedlicher Arten beschäftigen sich viele Wissenschaftler mit der Taxonomie der Diatomeen. Es werden immer noch neue Arten gefunden, und zwar sowohl an exotischen Orten wie etwa in isolierten Seen auf Hawaii^[2], als auch in scheinbar gut untersuchten Ökosystemen wie der Nordsee (S. Kühn, persönliche Mitteilung). Ein direkter Nutzen der taxonomischen Expertisen kann die Bewertung der

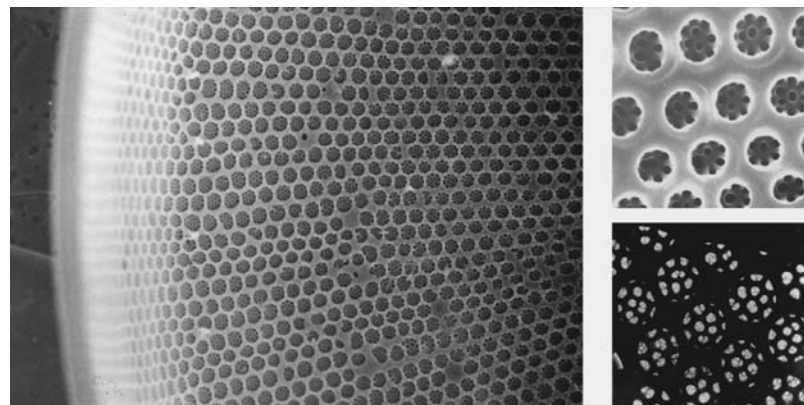


Abb. 2: Porenarchitektur von *Coscinodiscus walesii*. Links: größerer Ausschnitt aus der kreisförmigen Silikatschale; der Durchmesser der großen Poren beträgt 0,8 μm . Rechts: Porenfeinstruktur (raster- und transmissionselektronenmikroskopische Bilder).

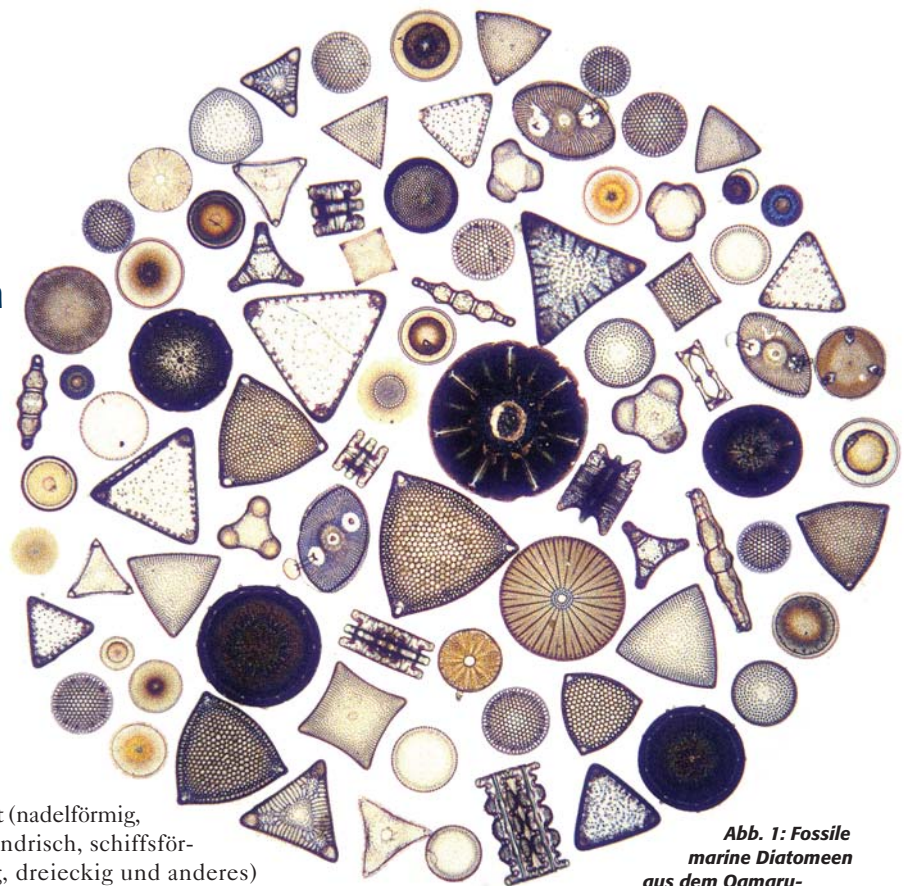


Abb. 1: Fossile marine Diatomeen aus dem Oamaru-Deposit in Neuseeland (spätes Eozän), von Alfred Elger arrangiert, Kreisdurchmesser ca. 500 μm . Hustedt Sammlung, Bremerhaven, Foto: Hinz/Crawford

Gewässergüte durch die Charakterisierung der darin lebenden Diatomeengemeinschaft sein. Da die Zusammensetzung der Diatomeengemeinschaft oft für bestimmte Gewässer und für bestimmte Zeiträume hochspezifisch ist, werden Kieselalgen auch in der Forensik eingesetzt, etwa um den Ort einzugrenzen, an dem ein Opfer ertrunken ist: Die jeweilige Diatomeengemeinschaft befindet sich dann im Lungengewebe. In der Archäologie werden Diatomeen genutzt, um die Herkunft von Keramik zu analysieren – finden sich Schalen spezieller Arten in der Tonmatrix, kann man dessen Herkunft genau bestimmen.

Die über längere Zeiträume abgelagerten Schalen der Diatomeen werden auch zu vielfältigen wissenschaftlichen Untersuchungen herangezogen: Diatomeenhaltige Sedimentkerne erlauben Aussagen über die zeitliche Entwicklung von Salinität, pH-Werten, Wasserspiegel und anderen Umweltveränderungen^[3].

Nobelpreis und Hagia Sophia – Traditionelle industrielle Anwendungen

Die Schalen fossiler Diatomeen (Diatomit oder Kieselgur) werden schon seit langem für industrielle Zwecke eingesetzt – meist bisher jedoch in technisch wenig anspruchsvollen Bereichen. Eine der bekanntesten Anwendungen ist das von Alfred Nobel entwickelte Verfahren, mit dem Nitroglyzerin durch Diatomit zu Dynamit „veredelt“

wurde und damit wesentlich ungefährlicher einzusetzen ist. Immerhin wurde dieses einfache Prinzip zur Grundlage des renommiertesten Wissenschaftspreises der Welt. Diatomit wird auch zur Filtration von Flüssigkeiten wie Bier und Wein (Beseitigung der Hefe) eingesetzt, sowie als extrem saugfähiges Material (Bindemittel für Öl, Katzenstreu etc.). Eine dänische Varietät der Kieselalgen, der „Moler“ mit einem hohen Anteil an Tonmineralen, wird zur Produktion von leichten, wärmedämmenden Ziegeln verwendet. In der Kuppel der Hagia Sophia in Konstantinopel wurde Diatomit als Baumaterial verwendet.

Fraßschutz durch faszinierende Formen

Diatomeenschalen wurden bereits in den 80er Jahren intensiv von einer interdisziplinären Gruppe untersucht, an der unter anderem Architekten (Frei Otto), Anthropologen (Johann-Gerhard Helmcke) und Pflanzenphysiologinnen (Anne-Marie Schmid) beteiligt waren. Im Vordergrund dieser Arbeiten standen hervorragende Analysen zur Formentstehung der Diatomeenschalen. Ausdrücklich ausgeschlossen wurden Mutmaßungen über deren Funktion sowie eine direkte Umsetzung in die Technik.

Neue wissenschaftliche Arbeiten deuten aber auf klare mechanische Anforderungen für Diatomeen, und damit auch auf die Optimierung mechanischer Leistungsmerkmale hin. So besitzen etwa die im Ozean häufigen Ruderfußkrebse (Copepoden) effektive, mit Silikat überzogene Mundwerkzeuge – ein deutlicher Hinweis auf mechanisch gut geschützte Nahrung, die wiederum zum größten Teil aus Diatomeen besteht.

Die ersten Messungen der Festigkeit von biomineralisierten Protisten, Diatomeen aus dem Plankton, zeigten, dass tatsächlich erhebliche Kräfte aufgebracht werden müssen, um deren gläserne Panzer aufzubrechen^[4]. Durch die Anwendung der für technische Konstruktionen entwickelten Finiten Elemente-Methode (FEM) konnten Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften der Schalen gezogen werden. Das Silikat hält sehr hohe Druck- und Zugspannungen aus und hat ein ähnliches Elastizitätsmodul (in etwa: Steifigkeit) wie massiver Knochen. Außerdem zeigten sich außerordentlich günstige Spannungsverläufe innerhalb der Silikatstrukturen. Die Vereinfachung der Schalengeometrie bei gleichem Materialeinsatz führte zu wesentlich geringeren Festigkeiten.

Eine Abschätzung des Muskelquerschnitts, der nötig ist, um die zum Bruch der



Abb. 3: Optimierte Statik: a) Galleria Vittorio Emmanuele, von radiären und konzentrischen Eisenträgern gestützte Glaskuppel über dem zentralen Platz (Foto: Shannon Kyles). b) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Arachnoidiscus mit radiären und konzentrischen Silikat (Glas-) Trägern, die eine ebenfalls aus Silikat bestehende Schale versteifen. Durchmesser ca. 50 µm (Bild aus ADIAC project, CEC contract. MAS3-CT97-0122).

Schalen führende Kraft von etwa 730 µN zu erzeugen, weist darauf hin, dass die sehr häufigen kleineren Copepoden durch die Kieselalgenschalen am Fressen gehindert werden können. Aber auch die größeren Arten müssen mehr Kraft und Energie aufwenden, um gut geschützte Zellen zu fressen – weshalb weniger geschützte Arten bevorzugt werden. Damit sind die vielfältigen Formen der Kieselalgen – und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die anderer Protisten – nicht nur formschöne Spielereien, sondern effektive Antworten auf die hohen mechanischen Belastungen durch ihre Umwelt.

Bionische Anwendungen

Die Bionik (auch Biomimetics) beschäftigt sich mit der Umsetzung biogener Prinzipien im technischen Bereich. Da jedoch biologische Organismen komplexe, hoch integrierte Systeme sind, in denen häufig eine Vielzahl von Funktionen in einzelnen Strukturen vereinigt sind, ist die direkte Übertragung biogener Strukturen in technische Anwendungen meist nicht möglich. Zusätzlich gibt es häufig Probleme mit der Skalierung, da technische Strukturen in der Regel in anderen Dimensionen gebaut werden müssen als ihre biologischen Vorbilder.

Leichtbauschaalen bilden hier allerdings eine Ausnahme, da Flächendruck und Materialquerschnitt beide mit dem Quadrat des Längenmaßstabes skalieren – eine Diatomeenschale kann also beispielsweise um einen Faktor von 10^6 vergrößert werden, ohne dass sich die relativen Dimensionierungen wesentlich verändern müssen (Abb. 3). Dies wird an Beispielen wie den Glaskuppeln der Galleria Vittorio Emmanuele in Mailand oder dem

Climatron in St. Louis deutlich: Zu beiden, nach statischen Gesichtspunkten optimierten Strukturen existieren sehr ähnliche Diatomeenschalen (*Arachnoidiscus* und *Stephanopyxis*). Auch die Funktionen der Schalen können im Wesentlichen auf die Faktoren mechanische Festigkeit und Leichtbau, oft in Kombination mit Permeabilität, konzentriert werden – eine Kombination, die auch im technischen Bereich, etwa in der Luft- und Raumfahrt, aber auch in der Automobilindustrie ausgesprochen gefragt ist.

Die Kieselalgen bieten somit ein unglaublich großes Reservoir an hochentwickelten Leichtbaukonstruktionen, die vergleichsweise einfach in den technischen Bereich übertragen werden können. Ein entsprechendes Verfahren ist zum Patent angemeldet (www.awi-bremerhaven.de/TT/leichtbau/index-d.html). Erste Prototypen, unter anderem eine Ultraleichtfelge, existieren bereits (Abb. 4).

Biomineralisation und Nanotechnologie

Schon länger ist bekannt, dass sich die Entstehung der Kieselalgenschalen in speziellen Vesikeln, den „silica deposition vesicles“ (SDV), abspielt. Diese Vesikel bilden eine Hohlform, in der die Silikatfällung stattfindet. Wie allerdings die Bildung der SDV gesteuert wird, ist noch weitgehend ungeklärt. In jüngster Zeit wurden die Genome von Kieselalgen (*Phaeodactylum tricornutum* und *Thalassiosira pseudonana*) sequenziert und

lieferten so die Basis für fundamentale Erkenntnisse über die Steuerungsprozesse, die zur Schalenbildung führen. Die Biomineralisation der Kieselalgen ist in den letzten Jahren intensiv untersucht worden. Aus den

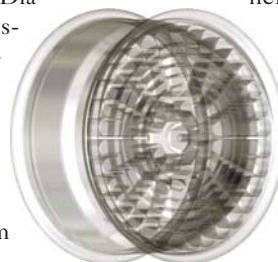




Abb. 4: Vorbild für technische Entwicklungen: a) leicht abstrahiertes CAD-Modell von Arachnoidiscus (J. Geisen, C. Hamm). b) Technische Umsetzung der Bauprinzipien von Arachnoidiscus in eine Ultra-leicht-PKW-Felge. Die sehr schlanken Speichen werden durch konzentrische Elemente stabilisiert (C. Hamm, U. Lüdemann)

Schalen konnten verschiedene Peptide isoliert und sequenziert werden, die in der Lage sind, aus silikatreichen Lösungen *in vitro* bei niedrigen Temperaturen feste Silikatkugeln auszufällen^[5]. Die Prinzipien der Biomineralisation sind auch für technische Anwendungen interessant. Eine Ausfällung glasartiger, nanostrukturierter Substanzen kann für eine Vielzahl nanotechnologischer Anwendungen von großem Nutzen sein^[6], insbesondere durch die Herstellung extrem

kleiner, komplexer Strukturen, an denen Materialwissenschaftler bisher noch scheitern.

Literatur

[1] **Falkowski, P. G., Katz, M., Knoll, A., Raven, J., Schofield, O., Taylor, M.** (2004): The consequences of the evolution of eukaryotic phytoplankton. *Science* 305: 354–360.

[2] **Main, S.** (2003): *Diprora haenaensis* Gen. Et Sp. Nov., A Filamentous, Pseudoaerial, Araphid Diatom From Kaua'i (Hawaiian Islands). *Diatom Research* 18: 259–272.

[3] **Stoermer, E. F. and Smol, J. P.** (1999): The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. Cambridge University Press, Cambridge.

[4] **Hamm, C. E., Merkel, R., Springer, O., Jurkojc, P., Maier, C., Prectel, K. and Smetacek, V.** (2003): Architecture and material properties of diatom shells provide efficient mechanical protection. *Nature* 421: 841–843.

[5] **Kröger, N., Deutzmann, R., and Sumper, M.** (1999): Polycationic peptides from diatom biosilica that direct silica nanosphere formation. *Science* 286: 1129–1132.

[6] **Bradbury, J.** (2004): Nature's Nanotechnologists: Unveiling the Secrets of Diatoms. *PLoS Biol.* 2(10): e306

Korrespondenzadresse:

Dr. Christian Hamm
Alfred-Wegener-Institut
Pelagische Ökosysteme/Biologische
Ozeanographie
Gebäude E-2485
Am Handelshafen 12
D-27570 Bremerhaven
Tel.: 0471-4831-1832
Fax: 0471-4831-1425
chamm@awi-bremerhaven.de