

Naturformen : Netz- und Schalenstrukturen in der Natur = Structure de resonance [i.e. résonance]au sein de la nature = Network and shell structures in nature

Autor(en): **Helmcke, J.-G,**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift**

Band (Jahr): **30 (1976)**

Heft 11

PDF erstellt am: **04.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-335564>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Naturformen

J.-G. Helmcke, Berlin

Netz- und Schalenstrukturen in der Natur

Structure de resonance au sein de la nature
Network and shell structures in nature

... die Fülle biologischer Netz- und Schalenformen, die sowohl schön sind als auch den Forderungen der Bautechnik zu entsprechen scheinen, wirft die Frage auf: Welche Prinzipien liegen jenen Kräften zugrunde, die derartig vollkommene Strukturen entstehen lassen? J.-G. Helmcke warnt vor voreiligen Schlüssen, aber er weist auch darauf hin, daß unter einer Vielzahl im Sinne der Bautechnik unsinnigen Gestalten einige nachzuweisen sind, die trotz anderer Entstehungsprinzipien bautechnisch optimal sind – und außerdem unser ästhetisches Schönheitsbedürfnis erfüllen ...

... la multiplicité des formes biologiques en résille ou en coque qui sont à la fois belles et conformes aux exigences de la technique constructive, nous conduit à poser la question: Quels sont les principes qui sont à la base des forces engendrant la naissance de structures aussi parfaites? J.-G. Helmcke nous met en garde contre les conclusions trop hâtives mais nous fait remarquer que parmi le grand nombre de formes insensées du point de vue constructif, on peut en trouver certaines issues d'autres principes générateurs mais optimales structurellement et satisfaisant en même temps notre besoin esthétique de beauté ...

... the abundance of biological mesh and shell structures, which are not only beautiful but also seem to meet the requirements of construction engineering, raises this question: What are the underlying principles that cause the emergence of such perfect structures? J.-G. Helmcke warns against overly hasty conclusions, but he also points out that, out of many natural shapes that are non-sensical from the engineering point of view there are some which are optimal from the engineering standpoint although they have come into being on the basis of quite different principles – and, moreover, are aesthetically satisfying ...

Einleitung

Eine altgriechische Sage berichtet, daß die künstereiche Göttin Athene beim Anblick des höchstvollkommenen Gewebes der lydisch-karischen Prinzessin Arachne eifersüchtig erzürnte, das unnachahmliche Gewirk zerriß und die Arachne in eine häßliche Spinne verwandelte. Seitdem spinnt diese die mannigfaltigen natürlichen Netze, deren Schönheit und technische Perfektion uns immer wieder erstaunen lassen.

Die Fülle mikroskopisch und sogar elektronenmikroskopisch kleiner biologischer Netz- und Schalenformen, die sowohl unser ästhetisches Gefühl für Schönheit anregen als auch den Forderungen der Technik nach Zug- und Druckbeanspruchbarkeit bei minimalem Materialaufwand zu entsprechen scheinen, wirft sogleich die Frage auf: Welche Prinzipien liegen jenen Kräften zugrunde, die derartig vollkommene Strukturen – ohne menschliche Überlegungen – entstehen lassen?

Es handelt sich bei dieser Frage keineswegs um einen Gesprächsstoff in schöngestiger Gesellschaft oder um den Versuch, die Weisheit und Allmacht Gottes an den Werken der Natur zu beweisen, sondern um das ganz nüchterne Problem, jene biomechanischen Prozesse des Protoplasmas zu erforschen sowie mit anderen Mitteln nachahmen und technisch nutzen zu können.

Netze und Schalen sind in der lebenden Natur in so mannigfaltigen Ausbildungsweisen und bei so vielen Gruppen von Organismen verwirklicht, daß diesem kurzen Aufsatz eine bewußte Beschränkung auferlegt werden mußte. Daher wurden nur die skelettartigen Gerüste von einigen Strahlentierchen (= Radiolarien) ausgewählt; diese sind mikroskopisch kleine Einzeller aus warmen Meeren. Da sie schwerelos im Wasser schweben (Planktonorganismen), unterliegen die Gerüste nicht denselben Bedingungen, denen die entsprechenden Strukturen landbewohnender Pflanzen und Tiere ausgesetzt sind. Die Kräfte, die auf die Bildung dieser Gerüste einwirken, stammen ausschließlich aus dem protoplasmatischen Zellkörper und dessen Oberflächenspannungen mit dem umgebenden Wasser. Die Fülle der hierbei entstehenden Formen ist so groß, daß gar nicht selten Strukturen auftreten, die ebensogut zur Aufnahme von äußeren Kräften (z. B. Erdgravitation im Luftraum) geeignet sein könnten.

Aus diesen Vorbemerkungen ist zu entnehmen, daß eine völlige Übereinstimmung zwischen diesen natürlichen Gerüsten und den menschlichen Bauwerken nicht erwartet werden darf, doch unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen ist das Herausschälen gleicher Bauprinzipien durchaus lehrreich.

Trotz vieler Bemühungen ist es bisher nicht gelungen, einige der Rätsel zu lösen, die uns diese mikroskopisch kleinen Lebewesen im Ablauf von nur wenigen Minuten immer wieder vorführen; es sind sowohl die chemische Synthese von Kieselsäureverbindungen in den Skeletten als auch die Ausprägung der Skelettstrukturen in all den mannigfaltigen Mustern. Würden diese Rätsel gelöst werden, dann könnte eine sprunghafte Entwicklung der Technik vorausgesagt werden, vergleichbar etwa den Auswirkungen nach der Erfindung der hochpolymeren Kunststoffe.

Solange uns die unterschiedlichen formbildenden Kräfte in diesen Mikroorganismen unbekannt bleiben, müssen wir uns mit dem Vergleich zwischen den natürlichen Strukturen und den menschlichen Konstruktionen begnügen und die offensichtlichen Übereinstimmungen für Analogien halten.

Mit dem Begriff Analogie bezeichnen wir diejenigen Erscheinungen, die sich zwar – morphologisch oder funktionell – ähneln, die aber nicht miteinander verwandt sind, d. h., die Übereinstimmungen können ganz zufällig entstanden sein. Lassen sich aber zwei oder mehrere Dinge aus einem gemeinsamen Ursprung ableiten, dann sprechen wir von Homologie, und zwar auch dann, wenn gar keine offensichtliche Ähnlichkeit vorliegt.

Aus Unkenntnis der naturgesetzlichen Zusammenhänge müssen wir nur allzuoft von Analogien sprechen, die sich nach Entschleierung der wirklichen Verhältnisse als Homologien herausstellen.

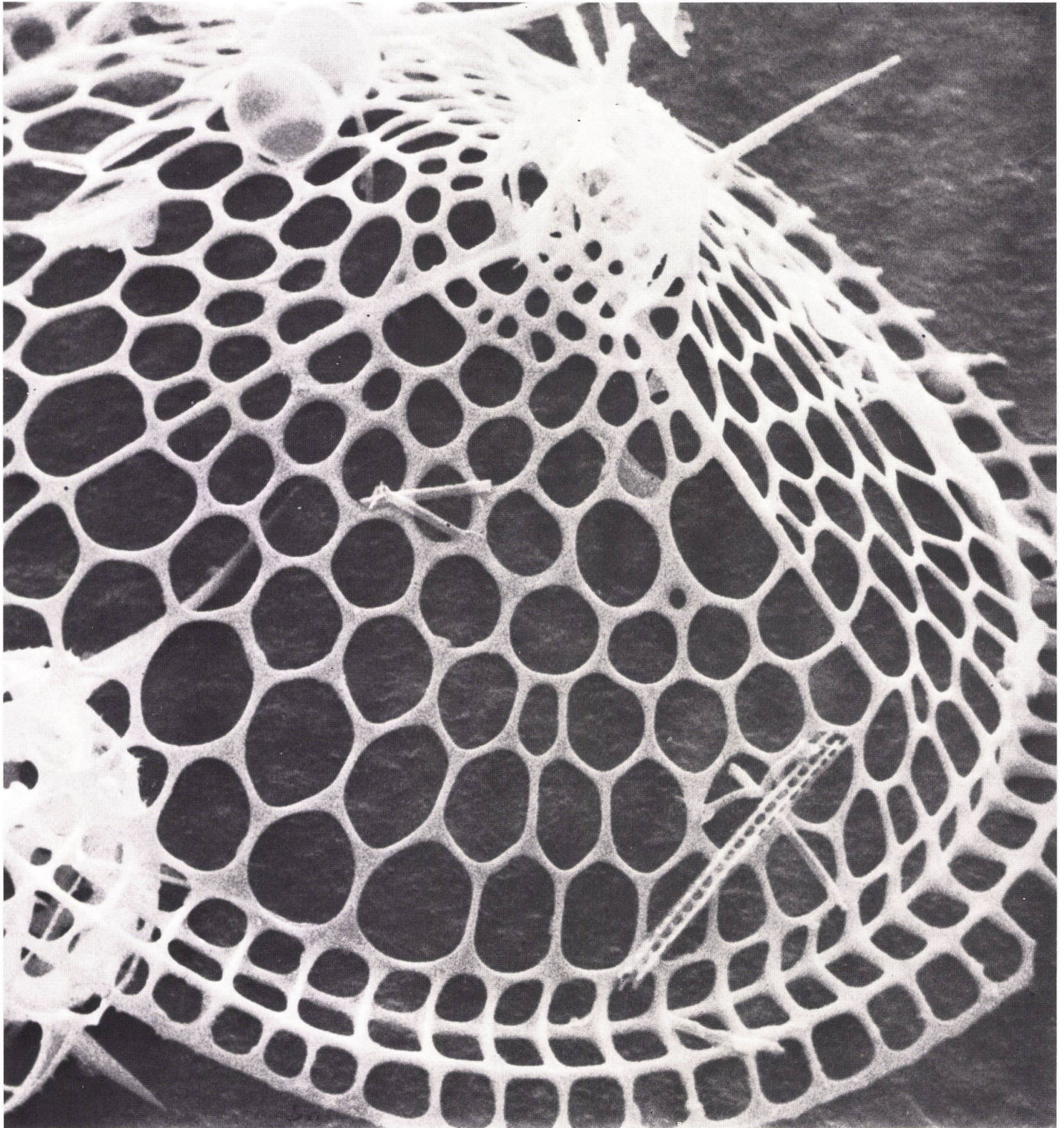
Zur »Konstruktion« von Naturformen

Das Spinnennetz ist ein zugbeanspruchbares, biegeunsteifes Flächentragwerk, das an Aufhängepunkten befestigt ist, aus Seilen (Fäden) besteht, welche miteinander verknötet sind und auf diese Weise Maschen bilden. Ein Netz wird also vornehmlich zweidimensional (d. h. flächig) oder dreidimensional (d. h. räumlich) sein. Allerdings wird bereits der eindimensionale (d. h. gestreckte) Faden von einigen Spinnenarten in der Funktion eines

Die den Text begleitenden Bilder sind Raster elektronenmikroskopischer Aufnahmen von skelettartigen Gerüsten einiger Radiolarien (einzellige Strahlentierchen aus der Verwandtschaft der Amöben). Obwohl die meisten Arten höchst bizarre Strukturen bilden, sind hier nur wenige der einfachsten Gitterschalen und Netze abgebildet, um an ihnen die grundsätzlichen Bauprinzipien erklären zu können. Als Beispiel sei auf den Vergrößerungsmaßstab hingewiesen. Er beträgt bei Abb. 1 2180:1, bei Abb. 2 405:1, bei Abb. 11 32500:1.

Les illustrations accompagnant le texte sont extraites de photographies au microscope électronique montrant des squelettes d'animaux radiolaires (animaux unicellulaires rayonnants se rattachant aux amibes). Bien que la plupart de ces êtres présentent des structures bizarres, nous avons choisi ici les structures en coque résiliée et en nappe afin d'illustrer les principes constructifs de base. Remarquons aussi l'échelle des grossissements: 2180:1 pour la vue 1, 405:1 pour la vue 2, 32500:1 pour la vue 3.

The illustrations accompanying the text are based on micro-photographs of skeletons of radiolarians (unicellular animals resembling amoebas). Although most species produce highly bizarre structures, only a few of the simplest reticular shells are shown, to illustrate the most fundamental construction principles. Note the enlargement scales, for Fig. 1 2180:1, for Fig. 2 405:1, for Fig. 11 32500:1.



Fangnetzes gebraucht; aber dieses sind Ausnahmen und entsprechen eigentlich nicht dem ursprünglichen Sinn des Wortes »Netz«, das etymologisch mit »nähen, nesteln, nodus (= lat. Knoten)« verwandt ist. Ein Netz ist demnach ein System von verknoteten Fäden. Da ein einzelner Faden biegeunsteif ist, kann er keine Druckkräfte aufnehmen und ableiten; sein Vorteil liegt in seiner Zugbeanspruchbarkeit.

Im Gegensatz zu dem Begriff des zugbeanspruchbaren Netzes wurde in der Architektur der Begriff »Schale« vorwiegend für räumlich gekrümmte, druck- und zugbeanspruchbare Flächen-tragwerke verwendet.

Nicht nur die Beanspruchbarkeit, sondern alle Eigenschaften sind gegensätzlich – sofern wir hängende Netze und stehende, selbsttragende Schalen vergleichen. Hieraus erwächst der Eindruck, als ob es keine Übergangsformen zwischen diesen beiden Extremen geben könne. Sowie wir aber denselben Kunstgriff des Umkehrens (d. h. des Vertauschens von oben und unten) auch auf das Netz anwenden (nach vorheriger Versteifung der Seile), dann lassen sich sogleich alle nur denkbaren strukturellen Zwischenformen konstruieren; denn nun ist auch das Netz druckbeanspruchbar geworden.

Drehen wir die selbsttragende Schale wieder zurück in ihre ursprüngliche, hängende Form, dann wird ihr flächiges Material ebenso auf Zug beansprucht, wie das Seil des hängenden Netzes. Statt des vorherigen steifen Schalenwerkstoffes gleicht sich jetzt eine plastisch verformbare Masse den neuartigen Einflüssen weit besser an.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, daß die Gegensätzlichkeit zwischen Netz und Schale lediglich durch eine unterschiedliche Anordnung im Raum, d. h. in der Ausrichtung zur Anziehungskraft der Erde, begründet ist. Die Ausrichtung von Netz und Schale ist aber bestimmt durch die Lage der Befestigungspunkte. Befinden sich diese Punkte räumlich unterhalb von Netz oder Schale, dann müssen deren Materialien zug- und druckbeanspruchbar, also biegesteif, sein. Befinden sich die Punkte oberhalb von Netz oder Schale, dann sollten die Materialien biegeunsteif und zugbeanspruchbar sein.

Im Laufe dieser Betrachtung hat sich unser Problem »Netz und Schale« wesentlich vereinfacht und läßt sich auf die gegenseitige Abhängigkeit von Druck und Zug reduzieren.

Drückt man ein Material (zwischen Unterlage und Auflage) zusammen, dann weicht es seitlich (d. h. senkrecht zur Krafrichtung) aus. Derselbe Effekt würde eintreten, wenn der Körper nicht von oben nach unten zusammengedrückt, sondern nach den Seiten auseinandergezogen werden würde. Jedoch wenn der Körper seitlich gedrückt wird, dehnt er sich in Richtung unten–oben aus, und zwar in derselben Weise, als ob er von unten und oben auseinandergezogen werden würde. Die beiden Scharen der (Druck- und Zug-)Kraftlinien überkreuzen sich innerhalb des beanspruchten Körpers immer rechtwinklig (sie werden in der Mechanik als Trajektorien bezeichnet).

Übertragen wir diese Vorstellung auf eine Hohlkugel, deren Hälften sich im (horizontalen) Äquator berühren, und nehmen wir ferner an, daß dieser Äquator fixiert sei, während die obere Schalenhälfte selbsttragend ist und die untere hängt, dann wirkt der Äquator für die obere Hälfte als druckbeanspruchter Ringanker (indem er das seitliche Ausweichen verhindert) und für die untere Hälfte als zugbeanspruchter Sprengring (indem er den einwärtsgerichteten Kräften entgegenwirkt).

Die Formtypen Netz und Schale können nach den geschilderten Bedingungen zweimal strukturelle Zwischenformen haben: einmal, wenn Netz und Schale hängen, zum anderen Mal, wenn beide um 180 Grad umgekehrt sind. Zwischen dem hängenden Netz und der umgekehrten (= stehenden) Schale gibt es aber keine einfachen strukturellen Zwischenformen.

Wir gehen nun von der Betrachtung hängender Formen im Luft-raum aus: Die auf sie einwirkenden, formbestimmenden Kräfte sind durch die Faktoren des Materials, die Erdanziehung und durch die Art des (Netz- oder Schalen-)Inhalts bestimmt. Da es

sich stets um Zugbeanspruchung handelt, wird das Material (in Richtung der Schwerkraft) gestreckt und (jeweils senkrecht dazu nach dem Prinzip der Trajektorien) zusammengedrückt. Durch die gleichmäßige Anheftung des Schalenmaterials am Rande (z. B. Sprengring) kann hier der Materialaufwand relativ gering sein. Je kleiner die Anzahl der Anheftungspunkte bei hängenden Netzen ist, desto größer werden an diesen Stellen Beanspruchung und Aufwand an das Material.

In einer hängenden Schale (aus homogenem Material und ohne innere Eigenspannungen) ordnen sich die Spannungstrajektorien zu einem System an, dessen Gestalt mit dem Koordinatennetz der südlichen Erdhalbkugel (mit dem Südpol an der tiefsten Stelle – Nadir) vergleichbar ist: die Längskreise entsprächen Zuglinien, die Breitenkreise Drucklinien.

Mit diesem Denkmodell haben wir bereits einen Hinweis auf den kontinuierlichen Übergang von der hängenden Schale über strukturell unterschiedliche Zwischenformen bis zum hängenden Netz. Wir brauchen uns nämlich nur vorzustellen, daß das Material der Schale nicht überall gleichmäßig, sondern auf ein bestimmtes Koordinaten-»Netz« verteilt ist, dann ergibt sich zunächst der Typ einer Gitterschale mit kleinen Materialausparungen, die über weitere morphologische Zwischenformen mit immer größeren Fenstern sowie kräftigerem Seilwerk bis hin zu dem extremen Maschennetz führt.

Entsprechend der rechtwinkligen Kreuzung der Trajektorien wird die Form eines solchen Netzes mit orthogonaler Anordnung der Maschen am stabilsten sein. Ein derartiges Muster werden wir stets dann erwarten, wenn der Fertigungsprozeß beim Netz mit der Verspannung und Verknotung der Seile und bei der Schale mit der Bewehrung beginnt, wobei die Maschen leer bleiben (= Netz) oder sekundär beliebig (weit oder dicht) geschlossen werden (= Gitterschalen bis Schalen). Dieses nach statischen Gesetzen gebildete Muster ist fast nur in seinen Kantenproportionen variabel.

Fängt der Fertigungsprozeß aber nicht mit dem linearen Bauelement »Seil«, sondern mit dem zwei- (oder drei-)dimensionalen Bauelement »Masche« an, dann kann das orthogonale Muster in mannigfaltigster Weise abgewandelt werden.

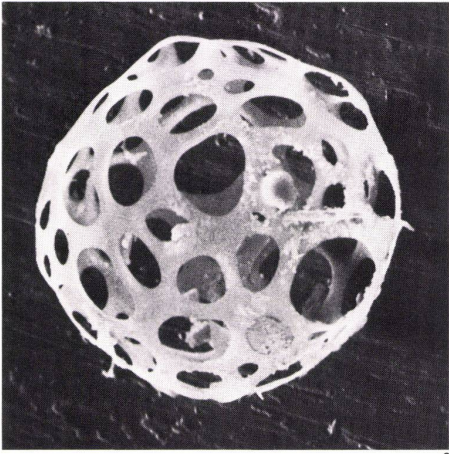
Als Beispiel möge die Zusammenlagerung von Pneus (Tröpfchen oder Bläschen) zu einem (zweidimensionalen) Floß (oder Schaum) dienen. Sekundär ist in diesem Falle die Vergußmasse (= Zwischenklemmungsmasse), die allmählich versteift und als Gitter-(Rahmen-)werk bestehen bleibt, selbst wenn der Inhalt der Pneus entfernt wird. – Bei gleich großen, gegenseitig verformbaren Pneus entsteht zwangsläufig ein orthogonales Muster, das – entsprechend dem Nachweis von Richard Buckminster Fuller – nur dann auf einer (Halb-)Kugel verwirklicht werden kann, wenn an bestimmten Stellen des Musters ein Fünfeck (statt eines Sechsecks) eingefügt wird.

Mit dem hexagonalen Gerüst kann das Prinzip des durchgängigen trajektoriiellen Systems nicht in Einklang gebracht werden. Das bedeutet zwar Verzicht auf maximale Stabilität, jedoch auch Zuwachs an mechanischer Elastizität.

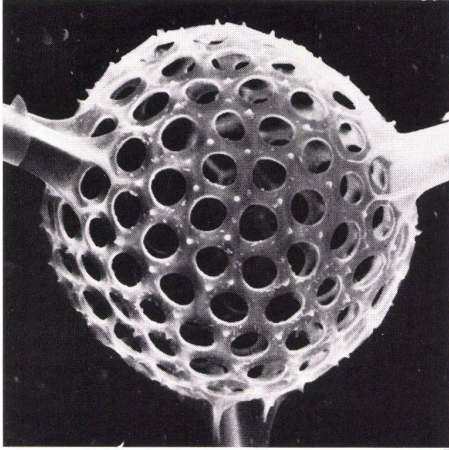
Wir können daher zur Deutung der biologischen Netz- und Gitterschalenstrukturen hinzufügen, daß der Fertigungsprozeß im orthogonalen Fall vorwiegend mit dem Bauelement »Seil« (d. h. Fibrille, Faser, Faden) unter (Zug-)Vorspannung erfolgt sein muß, während er im hexagonalen Fall vorwiegend mit dem Bauelement »Pneu« (d. h. Tröpfchen, Bläschen) nach dem (kristallographischen) Gesetz der »dichtesten Packung« stattfand.

Mit dieser Überlegung ist die theoretische Strukturanalyse aber noch nicht erschöpft; denn die Abweichungen von der idealen hexagonalen Form (mit gleicher Länge der sechs Kanten und mit gleicher Größe der sechs Innenwinkel von 120°) deuten ebenfalls auf besondere, formbeeinflussende Kräfte während der Bildungsperiode hin.

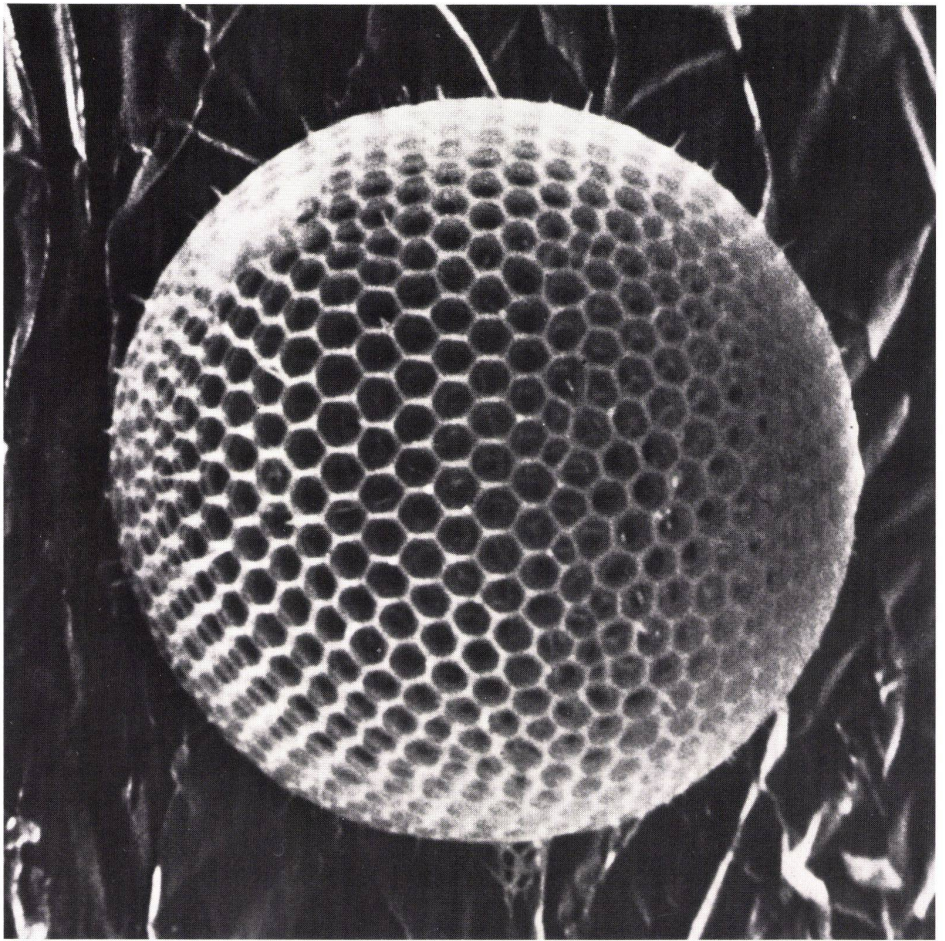
Durch den Mittelpunkt des Sechsecks lassen sich zwei verschiedene Systeme von je drei Kraftlinien legen: das eine durchschneidet die Mitten der Kanten, das andere die Knoten zwi-



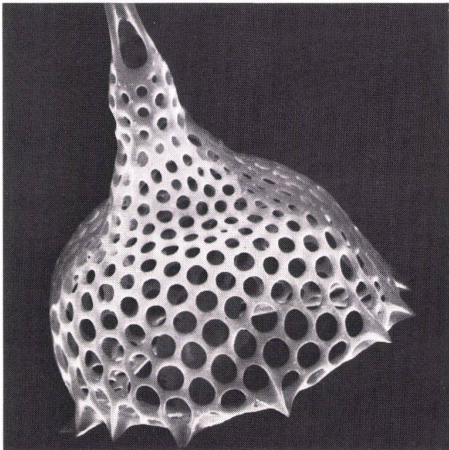
2



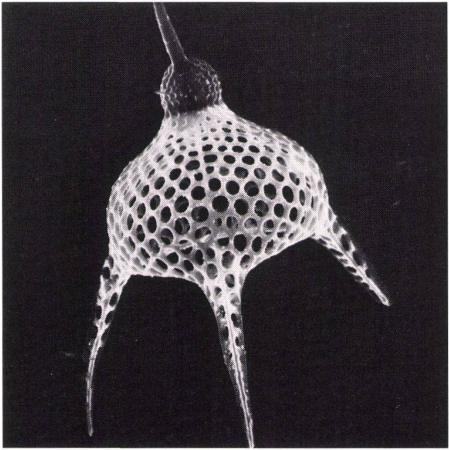
3



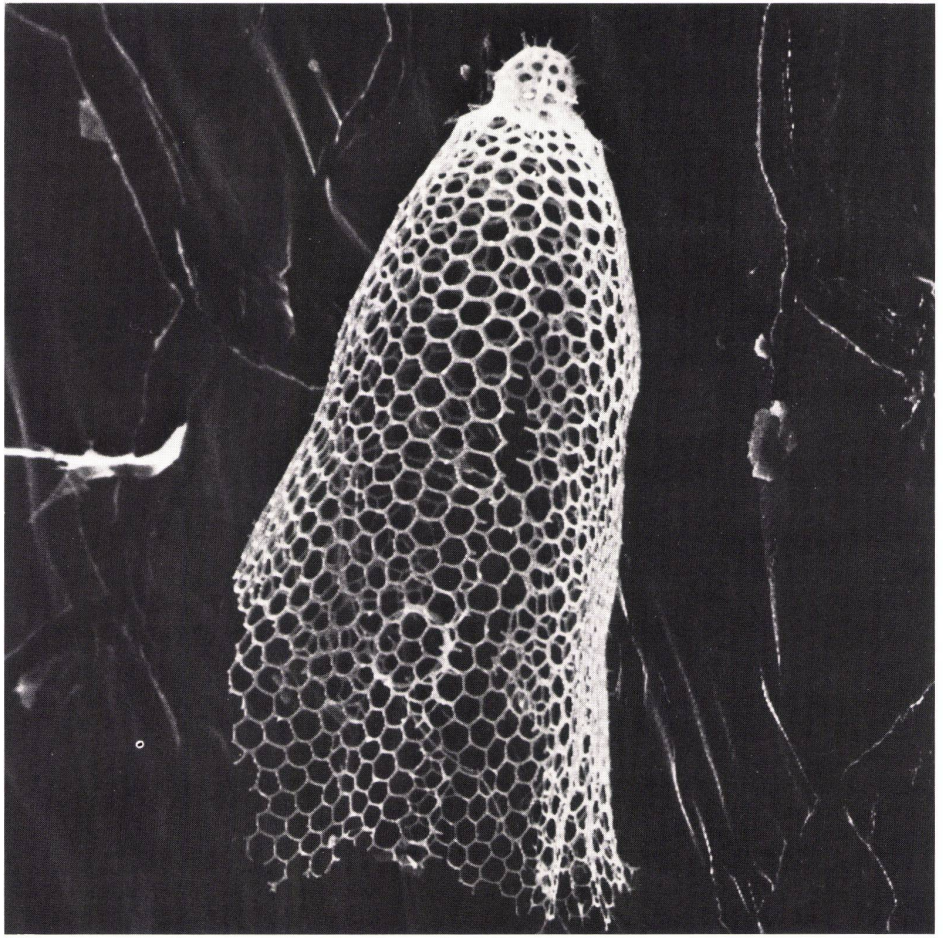
4



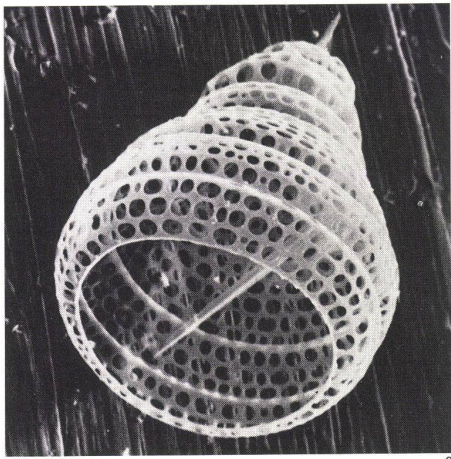
5



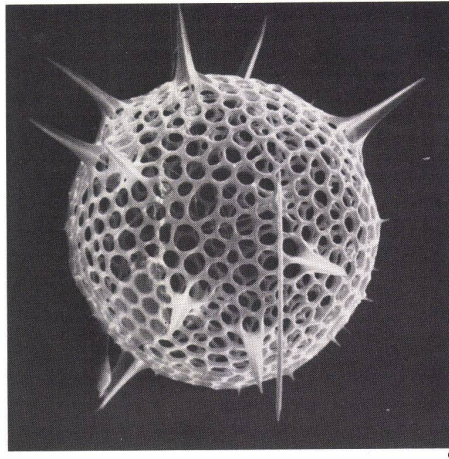
6



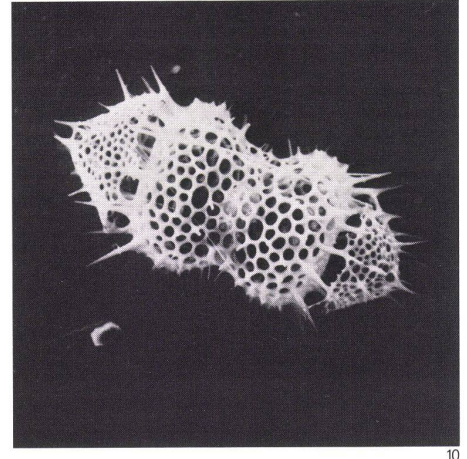
7



8



9



10

schen den Kanten. Beide Liniensysteme, in ein Sechseck eingezeichnet, lassen erkennen, daß sich jeweils eine Linie des einen Systems rechtwinklig kreuzt mit einer Linie des anderen Systems, d. h. daß diese beiden Linien miteinander Trajektorien bilden. Eine Zugbeanspruchung in dem einen Liniensystem (z. B. über zwei entgegengesetzte Knoten) führt – nach dem Parallelogramm der Kräfte – zu einer Annäherung der beiden (trajektorieell) entsprechenden Kanten, während das Dehnen eines Sechsecks durch Zug an diesen Kanten gleichzeitig den Abstand zwischen jenen Knoten verringert. – Es bedarf keines besonderen Hinweises, daß ein hexagonales Netz weit nachgiebiger auf verformende Kräfte reagiert als ein orthogonales.

Sofern sich die vorangegangenen Ausführungen auf die Struktur- bildung durch Zug- und Druckbeanspruchung innerhalb hängender Netze und Schalen bezogen, lassen sich unsere Ergebnisse in gleicher Weise auch auf die umgekehrten (d. h. stehenden) Netze und Schalen anwenden, jedoch mit dem Unterschied, daß die zuvor zugbeanspruchten Elemente nunmehr biegesteif und damit druckbeanspruchbar sein müssen. Im Grunde handelt es sich eigentlich nur um den Vorzeichenwechsel (von plus in minus und umgekehrt) bei den Werten für die formbeeinflussenden Kräfte.

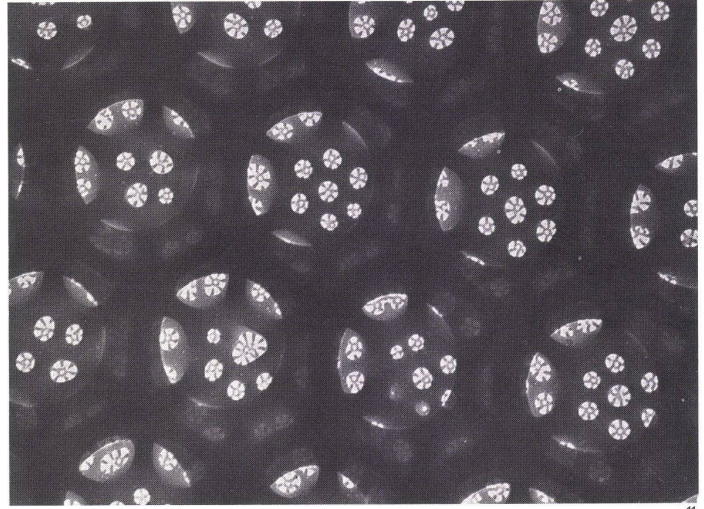
Wenn wir bisher von zwei Bauelementen sprachen (dem »materiellen« Seil oder Faden und dem »leeren« Element Masche), dann könnte man hieraus folgern, daß der gestreckte Faden im Luftraum der Natur bevorzugt bei Bildung hängender Strukturen benutzt wird, während das hexagonale Schaum-, Bläschen- oder Tröpfchenfloß ähnlich wie die Quadersteine eines echten Gewölbes für selbsttragende Gitterschalen verwendet wird. Ob diese Vermutung bei größeren Organismen in Wirklichkeit zutrifft, läßt sich bisher noch nicht nachprüfen. Bei mikroskopisch kleinen, im Wasser schwebenden Organismen werden derartige Verhältnisse kaum von Bedeutung sein.

Übrigens scheint alles darauf hinzudeuten, daß die in diesem Beitrag berücksichtigten Skelette der Radiolarien nach dem Gußverfahren entstehen.

Naturform und Bauform

Alle diese Betrachtungen geben uns gute Hinweise zum Verständnis der biotechnischen Verhältnisse während der Bildung derartig einfacher biologischer Netz- und Schalenstrukturen. Trotzdem blieb eine Frage noch unbeantwortet: Erfüllen diese Strukturen auch eine Aufgabe im Sinne unserer menschlichen Baukonstruktionen, d. h., sind sie so angelegt, daß sie Kräfte aufnehmen und ableiten können, welche dieses Netz- oder Schalenwerk während der Lebenszeit eines solchen Organismus belasten?

Aus der Sicht der Architekten und Bauingenieure ist diese Frage ganz richtig gestellt; denn sie entspricht durchaus den täglichen Aufgaben und Denkweisen. Aber aus der Sicht des Biologen ist sie unzulässig. Diese Behauptung läßt sich mit wenigen Worten begründen: Der anatomische Bauplan eines jeden noch so hoch-



11

komplexen Lebewesens war bereits in der befruchteten Eizelle vorgegeben. Das gilt sogar für den Menschen. Während der embryonalen Entwicklung bilden sich Arme, Beine und alle anderen Organe in der Weise aus, daß sie zum späteren Gehen, Laufen, Greifen oder anderen Körperfunktionen geeignet sind – oder klarer formuliert: weil die Organe so sind (und nicht anders), können sie diese Tätigkeiten ausüben.

Auf unsere biologischen Netze und Schalen übertragen, lautet daher die Antwort: weil diese Gerüste so strukturiert sind, können sie gewissen (Druck- und Zug-)Kräften standhalten. Und unbedingt hinzuzufügen ist: Diese planktonischen Organismen haben diese Strukturen, obwohl die fertig ausgebildeten Netze oder Schalen niemals auf entsprechende Druck- oder Zugbelastungen beansprucht werden. Diese Netze und Schalen sind »versteinerte Entwicklungsprozesse«, aber keine zielbewußt geplanten Zweckbauten. Wäre dieses der Fall, dann gäbe es bestimmt nur ganz wenige Strukturformen; in Wirklichkeit ist deren Zahl nahezu unermesslich groß und enthält Gestalten, die – im Sinne unserer Bautechnik – unsinnig sind.

All diese Formen schweben gewichtslos und unbelastet im Wasser und leben – die einen mit baustatisch optimalen, die anderen mit baustatisch ungünstigen Schalen.

Durch diese für Architekten und Bauingenieure gewiß enttäuschende Feststellung sollten wir uns aber nicht in dem Bestreben entmutigen lassen, unter den vielen Strukturtypen diejenigen herauszusuchen, die trotz anderer Entstehungsprinzipien »zufällig« auch noch bautechnisch optimal sind – und außerdem unser ästhetisches Schönheitsbedürfnis befriedigen.

Möge das Studium der schier unerschöpflichen Vielfalt an biologischen Bauelementen und Formkombinationen dazu beitragen, uns vor weiteren Werken offensichtlicher Phantasiearmut in unseren Städten zu bewahren!