

Die Gegenüberstellung von Bauwesen und Biologie führt zu vielerlei – manchmal verblüffenden – Analogien. Sie zeigt zunächst, dass die Grundgesetzmäßigkeiten in beiden Disziplinen durchaus vergleichbar sind. Deshalb lohnt sich Blicke über den Zaun, und zwar in beide Richtungen.

Darüber hinaus fordern allerdings ökologische, strukturfunktionelle und ästhetische Gesichtspunkte gebieterisch eine Rückbesinnung auf alte Tugenden des Bauwesens. Gemeint ist damit nicht ein naturtümelndes Bauen, sondern eines, das die Natur verstärkt mit einbezieht. Bereits die Architekten des Altertums hatten darauf geachtet, dass ihre Baukörper in die Naturgegebenheiten eingebettet waren, so dass sie beispielsweise mit der vorherrschenden Windrichtung harmonierten (strukturfunktioneller Aspekt) und letztlich einen überzeugenden und harmonischen Eindruck ergaben (bauästhetischer Aspekt). Sogenannte primitive Kulturen beherrschten diese Regeln ebenfalls bis vor kurzem (altiranische Architektur) und noch heute (Teile der ursprünglichen afrikanischen Architektur). Diese ursprünglichen Kulturen sind deshalb interessant, weil ihre Baugestaltung sozusagen „bionisch“ ist, nämlich ganz analog der natürlichen Evolution nach Versuchs- und Irrtums-Prinzipien vor sich gegangen ist. Noch im Mittelalter konnte man keine Hochbauten berechnen. Selbst die gotischen Dome sind im Wesentlichen nach dem Versuchs-Irrtums-Prinzip entstanden.

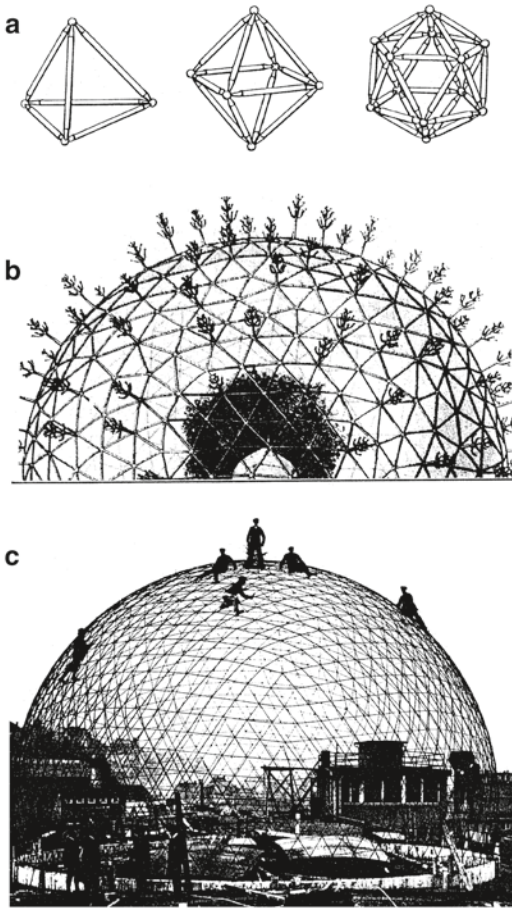
Außerdem bieten sich physikalisch basierte Vergleichsmöglichkeiten zwischen dem Menschen mit seinen technischen Behausungen und Lebewesen und ihren Bauten; Aspekte des Wärmehaushalts, wie sie im Eisbärfell verwirklicht sind, oder solarbetriebene Klimaanlage, wie sie die Termiten entwickelt haben, gehören in diese Betrachtungskategorie.

---

## 2.1 Technische Biologie und Bionik von Bau- und Tragkonstruktionen

Im Folgenden werden Bauformen der Natur und analoge technische Konzepte einander gegenübergestellt, wie sie sich aus historischer, physikalisch-funktioneller oder ökologischer Betrachtung ergeben.

Das analoge Gegenüberstellen wird in verschiedene Abschnitte gegliedert, von kuppelförmigen Knoten-Stab-Tragwerken bis zur Frage, ob man die Waben der Honigbiene denn schon vollständig verstanden habe und ob sie tatsächlich „technisch optimal“ seien. Im Rahmen dieser analogen Vergleiche (Nachtigall, Kresling 1992 a, b) hat die Architektin B. Kresling an einigen Stellen Kurz-Zusammenfassungen geschrieben, die in mancherlei Hinsicht durchaus neues Licht auf biologische Bau- und Selbstorganisationsvorgänge werfen könnten. Sie sind hier als Zitate in kursiver Schrift wiedergegeben.



**Abb. 2.1** Kuppelförmige Knoten-Stab-Tragwerke in Natur und Technik. **a** Platonische Körper; Stäbe gleicher Länge zum Dreieck geschlossen. **b** Biologisches Kugelnetz mit ungleichen Stablängen: Silikatskelett der Radiolarie *Aulosphaera spec.* (E. Haeckel 1899). **c** Technisches Kugelnetz mit gleichen Stablängen: erstes Planetarium von Zeiss/Jena. (nach Nachtigall, Kresling 1992a)

## 2.2 Kuppelförmige Knoten-Stab-Tragwerke

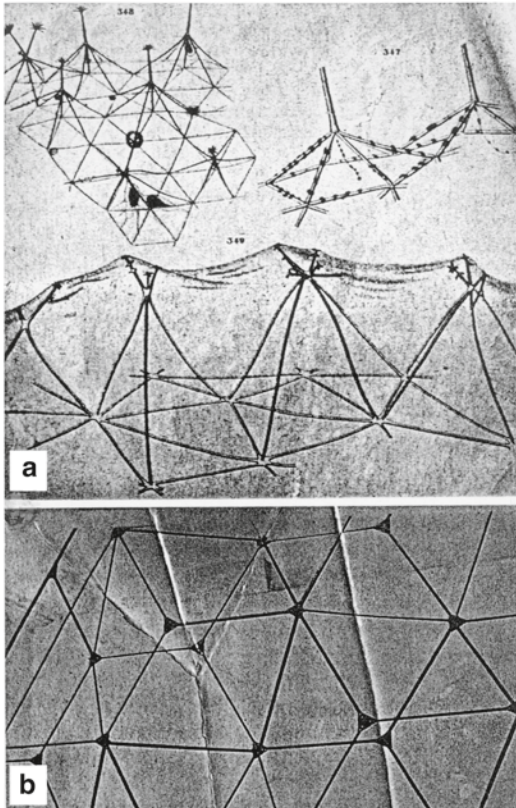
Derartige Tragwerke setzen sich aus Stäben (Druck- und Zugstäbe) sowie Knoten (Gelenke) zusammen. Ein optimales Bauwerk arbeitet mit einer möglichst geringen Zahl von Stäben, die im Idealfall dreieckige Netzmaschen bilden und den Kraftfluss so regeln, dass die einzelnen Stäbe biegeentlastet, das heißt nur Druck und Zug belastet sind.

Grundformen regelmäßiger derartiger Tragwerkskonstruktionen sind die drei Platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder und Ikosaeder (Abb. 2.1a). Bei diesen Körpern liegen alle Knoten auf einer gedachten Kugelschale. Jeder Knoten ist umgeben von der gleichen Zahl regelmäßiger Stabdreiecke. Den Knoten eines Tetraeders umgeben drei Stäbe, den des Oktaeders vier Stäbe, den des Ikosaeders fünf Stäbe („Grundfrequenz“, „Frequenz eins“). Unterteilt man die somit resultierenden Dreiecke (Abb. 2.1a) weiter, so lägen die dann resultierenden Verbindungselemente allerdings nicht mehr auf dieser Kugelschale, sondern „weiter innen“. Sollen sie darauf zu liegen kommen, müssten sie sozusagen von innen darauf „explodiert“ werden. Das ist ein Problem bei technischen, halbkugelförmigen Kuppeln.

In solchen Kuppeln umgeben einen Knoten mehrere Stäbe, nämlich fünf oder sechs („höhere Frequenzen“). Man kann auch sagen, die Grunddreiecke werden durch mehrere Maschen unterteilt, und diese werden auf eine Kugelform „explodiert“. Analoge biologische Konstruktionen besitzen bis zu sieben knotengebündelte Stäbe (Abb. 2.1b).

Die Kugelform als solche ist selbstredend völlig symmetrisch. Legt man dagegen ein kleinmaschiges Netz darüber, so existieren zwei Arten von Knotenpunkten und damit nur eine reduzierte Zahl von Symmetrieebenen. In der Biologie kommen besonders unregelmäßige Maschen mit einer relativ großen Stabzahl vor. Diese wurden häufig als „Fehler“ interpretiert; sie können aber auch darauf hinweisen, dass dynamische Selbstorganisationsprozesse stattgefunden haben und dann durchaus funktionelle mechanische Bedeutung besitzen.

Im Gegensatz zum technischen Kugelnetz, das von vorneherein „starr“ angelegt ist (Abb. 2.1c) und sich nicht vergrößert, muss ein „natürliches“ Kugelnetz – beispielsweise das von Radiolarien – wachsen. Es oszilliert dabei möglicherweise um einen mittleren Gleichgewichtszustand. Wenn dem so ist, muss es leicht von der Kugelform abweichen und damit ein wenig unregelmäßig und auch instabil sein.



**Abb. 2.2** Formen räumlicher Knoten-Stab-Tragwerke in Natur und Technik. **a** Detail des Silikatskeletts der Radiolarie *Sargosцена spec.* (V. Haecker 1908). **b** Frühe dreidimensionale Kuppel (Holz, Metall) nach dem *Sargosцена*-Vorbild, Originalfoto: R. Le Ricolais, ca. 1935. (nach Nachtigall, Kresling 1992a)

### 2.3 Sonderformen räumlicher Knoten-Stab-Tragwerke

Radiolarien, die kugelförmig aussehen, tragen oft noch eine bis mehrere, nach innen kleiner werdende Hohlkugeln in sich, die früher angelegt worden sind. Im Bauprozess wird jede neue Schale von radialen Streben – Spiculae genannt – abgehängt. Von den Abhängpunkten aus wachsen sich die einzelnen Strahlen entgegen und verschmelzen schließlich zu einem Kugelgebilde. Auch dieses Bauprinzip ist nur mit einem leicht instabilen Knoten-Stab-Tragwerk möglich (Abb. 2.2a). Nach der Verschmelzung wird Stabilität dadurch erreicht, dass das Tragwerk durch starke Verdickung von Stäben und Knoten in eine

Art Plattentragwerk übergeht. Damit ist die Ausformung einer Kugelschale abgeschlossen.

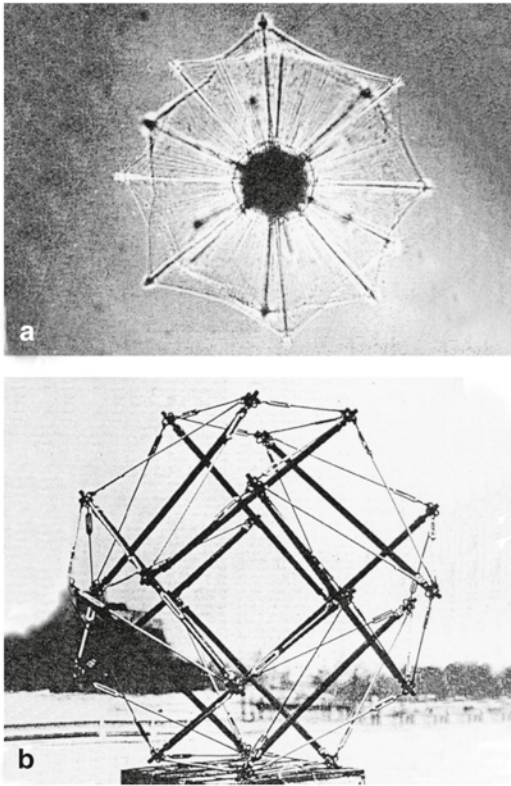
Der französische Ingenieur Robert Le Ricolais hat Radiolarienzeichnungen von E. Haeckel und von V. Haecker zum Anlass genommen, Versuchsmodelle für räumliche Tragwerke nach dem Bauprinzip von Radiolarienskeletten herzustellen. Bei seinen ersten Entwürfen hat er mit doppellagigen Netzen von Sechseckmaschen gearbeitet, die von Stab-Pyramiden versteift werden, welche nach oben und unten jeweils aus der mittleren Netzebene herausragen (Abb. 2.2b): eine Art Vortyp, der noch nicht vollständig stabil ist. Später wurden diese Konstruktionen in vielfältiger Weise abgewandelt und zu stabilen Tragwerken weiterentwickelt.

### 2.4 Selbstspannende Konstruktionen („Tensegrity-Strukturen“)

Bereits Le Ricolais hat darauf hingewiesen, dass die Radiolarien nicht reine Stabfachwerke darstellen, sondern statische Mischformen von Stabtragwerk und mittragender Verkleidung. Sich selbst spannende Konstruktionen bezeichnet man im Angelsächsischen als „Tensegrity“-Strukturen (R. B. Fuller), im Französischen als „structures auto-tendantes“ (D. G. Emmerich). Sie bestehen aus Bauelementen, die nur auf Zug (Zugdrähte) oder nur auf Druck (frei eingehängte und sich nicht berührende Druckstäbe) aufgebaut sind (Abb. 2.3b). A. Chassagnoux, ein Schüler von Emmerich, weist darauf hin, dass kleinste Unregelmäßigkeiten in der Spannung der Kabel die Konstruktion zum Verwinden bringen. Theoretisch sind in einem räumlichen Gebilde mehrere verschobene Positionen möglich, die von der idealen, das heißt geometrisch definierten Lage eines Gleichgewichtszustandes abweichen. Sie oszillieren sozusagen um ihn.

Analoge biologische Strukturen stellen beispielsweise Meeresradiolarien aus der Gruppe der Acantharia dar (Abb. 2.3a). Auch hier sind Zugelemente mit radialen, druckfesten Stacheln verspannt. Die Stacheln können wachsen. Die äußere Membran bildet in ihrer Gesamtheit das



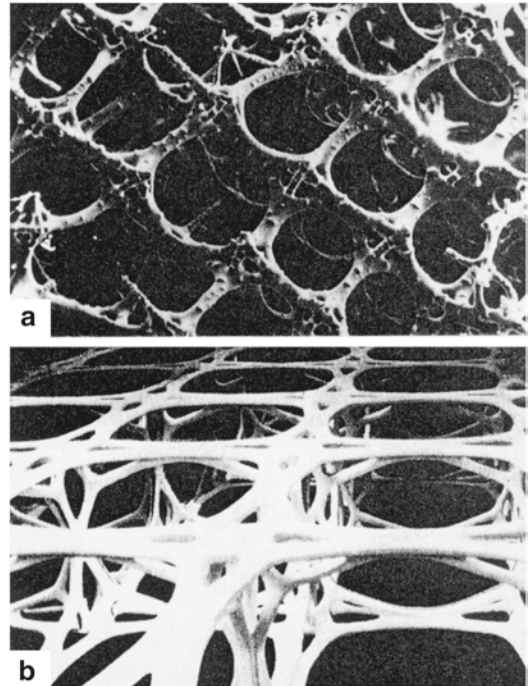


**Abb. 2.3** Selbstspannende Konstruktionen („Tensegrity-Strukturen“) in Natur und Technik. **a** Meeresradiolarie der Gruppe der Acantharia mit Skelett aus Strontiumsulfat. (Foto: C. Carre). **b** Spanndraht-Druckstab-„Tensegrity“-Struktur von G. Emmerich. (nach Nachtigall, Kresling 1992a)

biologische Analogon zu technischen Zuggliedern. Hierfür dürfte gelten, dass sich die Spannarbeit der „Kabel“ automatisch auf die gradlinig wachsenden, nur druckbelasteten Stäbe „einpendelt“.

## 2.5 Orthogonale Gitter-Konstruktionen

Phantastisch regelmäßige und – was die idealisierten einzelnen Achsen anbelangt – in etwa quadratische Gitterstrukturen findet man in den Wänden von röhrenförmigen Glasschwämmen (Abb. 2.4a). Sie bestehen aus Membranen, in die sternförmige Nadeln eingehängt sind. Diese tragen sechs Arme in Richtung der drei Raumachsen, die in diese Richtungen auswachsen können,



**Abb. 2.4** Orthogonale Gitter-Konstruktionen in Natur und Technik. **a** Glasschwamm *Aulocystis spec.* **b** Experimentelles Knoten-Stab-Tragwerk mit steifen Knoten von Frei Otto 1962. (nach Nachtigall, Kresling 1992a)

sich mit anderen Armen treffen und zu den orthogonalen Gitterstrukturen des ausgewachsenen Schwamms verschmelzen. Vor diesem Verschmelzungsprozess verschieben sich die Nadeln oft und orientieren sich immer wieder neu; sie „wandern“ im Rhythmus der aktiven Spann- und Entspannbewegungen der Membranen. Sobald sich die Nadelknoten zum Verbund eines orthogonalen Netzes organisiert haben, treten jedoch in den Knotenpunkten Biegespannungen auf. Diese führen dazu, dass sich die Knoten verdicken. Zusätzlich werden weitere Streben ausgebildet, und so versteift sich schließlich das Netz. Sobald das der Fall ist, beginnt die Ausformung der nächsten Schicht. In der Ontogenese des Schwamms wird ein rohrartig geschlossenes orthogonales Raumgitter über das andere angelegt; die äußeren sind die jüngsten.

Orthogonale Gitter zunächst gelenkig verbundener Stäbe sind ja nicht in sich stabil.

Warum arbeitet dann die Natur mit solchen Systemen?

Der Architekt Frei Otto hat ähnliche orthogonale Gitter entworfen (Abb. 2.4b). Hier dürfen die Knoten nicht mehr als Gelenkknoten, sondern müssen als steife Knoten ausgebildet werden, damit das System stabil bleibt. Die Konstruktion wird meist als tragende Decke verwendet, also senkrecht belastet. Da sie eben ist, muss sie in nicht zu großen Abständen beulungssicher unterstützt werden.

Im Gegensatz zu den technischen Bauwerken wird bei den biologischen dort besonders viel – später verhärtendes – Material angelagert, wo Biegespannungen entstehen. Diese werden also funktionell genutzt und durch die von ihnen induzierten Wachstumsprozesse gleichzeitig abgebaut: die Spanntätigkeit durch Membranen ist mitverantwortlich für die Bildung von Druckstäben, an denen das Zugsystem aufgehängt wird. Das lineare Wachsen der Druckstäbe erhöht wiederum die Spannung in den Membranen und ist somit mitverantwortlich für deren Entwicklung.

Bei Organismen, die aus ausgefallten, das heißt zunächst viskosen und dann erhärtenden Materialien Traggerüste bilden, arbeiten zwei Bildungssysteme rückgekoppelt zusammen.

Im Vergleich von Biologie und Technik hat sich bei diesen Bauformen also folgendes ergeben: Die Natur arbeitet offensichtlich nicht nach dem technischen Prinzip vorberechneter, bemessener und stabil verbundener Tragelemente. Da die natürlichen Konstruktionen wachsen müssen, müssen sie mit „präformierten Abweichungen“ arbeiten, das heißt leichte Instabilitäten und damit zufällige Schwankungen zulassen. Die Erkenntnis daraus bedeutet: Optimierungen in einem biologischen Bauwerk erzwingt nicht grundsätzlich das Erreichen einer Form mit hochgesteckten Sicherheitsgrenzen. Es wird vielmehr eine gegenüber Schwankungen sensible, jedoch gerade dadurch effiziente Bauform erreicht. Dabei werden die zum Teil durch den Wachstumsprozess selbst hervorgerufenen Spannungen zur Stimulation eben dieses Prozesses genutzt. So ergibt sich eine Vernetzung von Bauprozess, Funktion und spezifischer Belastungsanpassung.

Solche Selbstorganisationsprozesse lassen sich verständlicherweise nicht in den großen

Maßstab der Bautechnik rückübertragen. Sie könnten aber beispielsweise zu Versuchsaufbauten für die Fertigung neuartiger Materialien führen. Ingenieure suchen ja auch nach Mitteln, das Tragverhalten eines Bauwerks auf eventuelles Versagen ständig überprüfen zu können oder es gar sich selbst korrigieren zu lassen. Hier könnten Untersuchungen von Mikrooszillationen, wie sie beim Bau der genannten biologischen Konstruktionen auftreten, wertvolle Anregungen geben. Es könnte aber auch durchaus sein, dass der umgekehrte Weg beschritten wird, dass nämlich jemand, der sich in der Technik Kenntnisse über analoge Vorgänge angeeignet hat, a posteriori die natürlichen Vorgänge richtig beschreiben oder überhaupt erst richtig verstehen wird. Das wäre „Technische Biologie“ par excellence.

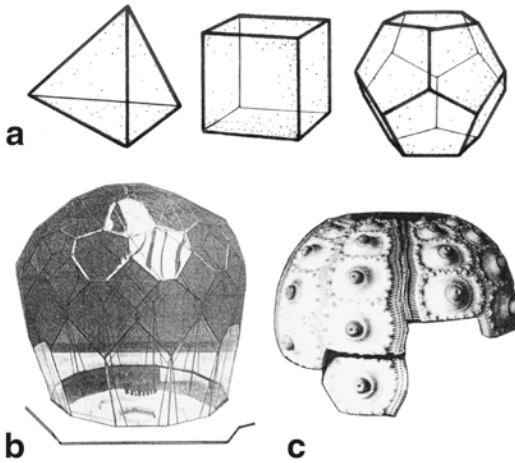
Technische Biologie kann eben auch zu Einsichten führen, die bionisch nicht oder doch nicht unmittelbar nutzbar sind. (Damit wird technisch-biologisches Vorgehen ja nicht entwertet.)

## 2.6 Plattenkonstruktionen

Abbildung 2.5a zeigt die Grundformen regelmäßiger Körper, die man aus an ihren Kanten verbundenen Platten aufbauen könnte. Es sind die 3 platonischen Körper Tetraeder, Kubus und Dodekaeder. Das Charakteristikum einer stabilen Plattenkonstruktion sind demnach Kanten, die in einem „Y“ zusammenlaufen.

Im Jahre 1984 hat der dänische Ingenieur T. Wester gefunden, dass es zwischen den netzförmigen Knoten-Stab-Tragwerken und Plattenkonstruktion enge formale und mechanische Entsprechungen gibt. Es handelt sich um duale Symmetrien. Daher lassen sich die für netzförmige Kuppelbauten erarbeiteten Rechnerprogramme durch Umformulierungen auch bei Plattenkonstruktionen anwenden.

Plattenkonstruktionen kann man so aufbauen, dass Platten an den Kanten gelenkig miteinander verbunden werden. Dadurch werden Scherkräfte (die sie gegeneinander zu verschieben trachten) aufgefangen. Man kann die Kanten als lineare Gelenke (z. B. in Form von Klavierbändern) oder mit Verzahnungen gestalten: Mit einer Y-artigen



**Abb. 2.5** Plattenkonstruktionen in Natur und Technik. **a** Platonische Körper: maximal 3 Platten um 1 Scheitelpunkt. Bei stabilen Plattenkonstruktionen laufen die Kanten in Form eines „Y“ zusammen. **b** Projekt für einen Museumsbau. (von T. Wester und K. Hansen 1988). **c** Australischer Seeigel *Phyllacanthus imperialis* aus der Sammlung des MNHN, Paris. (nach Nachtigall, Kresling 1992b)

Konfiguration der Scheitelpunkte der Platten sind auch solche Strukturen stabil – solange sich eben niemals mehr als drei Platten treffen. Kreuzen sich die Gelenklinien von vier Platten (dann in Form eines „X“), so erhält man in der Regel eine faltbare Konstruktion.

Im erstgenannten Fall befindet sich die Gesamtstruktur im Gleichgewicht, wenn die Summe aller auftretenden Drehmomente gleich Null ist. Aus solchen Platten kann sich ein Raumtragwerk zusammensetzen; ein Beispiel T. Westers zeigt Abb. 2.5b, nämlich eine Baukonstruktion aus tragenden Glasplatten. Es ist mehr als wahrscheinlich, dass auch viele biologische Konstruktionen, beispielsweise Seeigelschalen, diesem Bauprinzip folgen (Abb. 2.5c). Auch bei ihnen und bei anderen biologischen Schalen berühren sich die einzelnen Platten – mit leicht verzahnten Rändern oder Nähten – jeweils in Y-Form. Bei älteren, total ausgetrockneten Museumsexemplaren von Seeigeln kann man die Platten herausnehmen und wieder einfügen („Zusammenklipsen“); man erreicht dann wieder eine stabile Schale. Der Seeigel scheint dies als Wachstumsprinzip zu integrieren. Neue Wachstumsstreifen bilden sich immer entlang der Plat-

tenränder und bleiben in sich parallel. „Benachbarte Platten wachsen sich sozusagen im rechten Winkel zu ihren Rändern entgegen, wobei in ihnen theoretisch nur tangentielle Scherkräfte auftreten (Wester)“.

Ute Philippi, Doktorandin von W. N., hat sich vor einiger Zeit – in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustatik der Universität Stuttgart – im Rahmen des SFB 230 („Natürliche Konstruktionen“) mit der FE-Modellierung von Seeigelschalen befasst.

Die Untersuchungen ergaben unter anderem, dass die eigentümlich-„apfelförmige“ Schalenform besonders gut an die Zugkräfte der Ambulacralfüßchen angepasst ist und zudem an von außen einwirkende ungerichtete Belastungen. Die Schale zeigt keine Schwachstellen. Wie aber bildet sie sich und wie schafft sie es, bereits beim Bildungsprozess statisch-funktionell zu sein?

Zu dieser Frage kann die obengenannte Plattensichtweise Denkanstöße geben. Auch sie erklärt aber nicht vollständig das Sosein von Seeigelschalen; möglicherweise gehören auch sie zu technischen Mischformen, die man erst versteht, wenn man „rein technische“ Gebilde verstanden hat und kombiniert: wahrscheinlich verhält sich der Seeigelpanzer gleichzeitig wie eine Plattenkonstruktion (Scherkräfte) und wie eine Schalenkonstruktion (Biegung induzierende Kräfte). Während des Wachstums ist auch eine solche Konstruktion nicht vollständig stabil, sondern ist Scherkräften unterworfen, welche die Platten ein wenig gegeneinander zu verschieben trachten, sowie „Biegekräften“, die über die Fugen hinweg übertragen werden. Diese Kräfte werden aber – wie bei den Glasschwämmen angedeutet – funktionell benutzt: Als Plattenkonstruktion könnte die Seeigelschale die für einen solchen Bautyp zu erwartenden Scherkräfte an den verzahnten Plattenrändern zur Anlagerung von Kalzitkristallen nutzen, als Schalenkonstruktion die durch die nachschiebenden Platten hervorgerufenen Verformungen zum Aufbau eines regelmäßigen Gebäudes. Bei einem solchen Bauprozess könnte die biologische Schale sowohl in Längen- wie in Breitenkreisen wachsen. Damit böte sie eine interessante Lösung für ein schwieriges technisches Problem, nämlich eine Volumenvergrö-

berung oder -reduzierung, die immer mit Spannungsspitzen in der einen oder anderen Richtung der Oberfläche verbunden ist. Kombiniertes Linearwachstum und Volumenwachstum könnte in der Technik vielleicht für Montageprozesse genutzt werden.

Die Verwendung zweier scheinbar widersprüchlicher Konstruktionsprinzipien in einem biologischen Bauwerk deutet darauf hin, dass diese Form sich nicht in einem statischen, sondern in einem dynamischen Gleichgewichtszustand befindet.

Die zugrundeliegende Modellvorstellung könnte man also wie folgt formulieren:

Bei bestimmten biologischen Bauprozessen werden Oszillationen genutzt, um in jedem Augenblick einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Die aus diesem dynamischen Prozess resultierende Form enthält die Charakteristika zweier antagonistischer Konstruktionsprinzipien.

Die beiden Autoren des Artikels, aus dem hier zitiert worden ist, haben in vielfältigen Diskussionen beim Ringen um die möglichst „systemangemessene“ Sichtweise gemerkt, dass damit ein ganz typisches Charakteristikum beim Vergleich zwischen Biologie und Technik angesprochen worden ist.

Sie fanden in der Quintessenz: „Techniker und Biologen sollten sich Argumente und Gegenargumente wie einen Spielball zuwerfen. Beim fairen Spiel ist das Spielen selbst das wichtigste – beim Ballaustausch zwischen Biologen und Technikern sollte das wechselseitige voneinander Lernen Selbstzweck sein. Ganz allgemein ist bei wissenschaftlichen Ergebnissen ebenso bei technischen Errungenschaften ein Resultat – der Spielausgang – sowieso immer nur vorläufig: das Match ist nie gewonnen, es wird nur immer weiter vertagt: der Weg ist das Ziel“.

## 2.7 Faltkonstruktionen

Aus Papier kann man bekanntlich komplexe Gebilde falten; die japanische Technik des Papierfaltens („Origami“) zeigt das. Der japanische Physiker K. Miura hat solche Faltkonstruktionen,

die in zahlreichen biologischen Systemen wie Laubbaumblättern, Blütenblättern, faltbaren Insektenflügeln ihr Analogon haben, vielleicht auch in Bienenwaben oder Pflanzenzellen, in neuartiger Weise technisch eingesetzt. Angepeilt wurde und wird die Raumfahrt und ein extremes Leichtbau-Design.

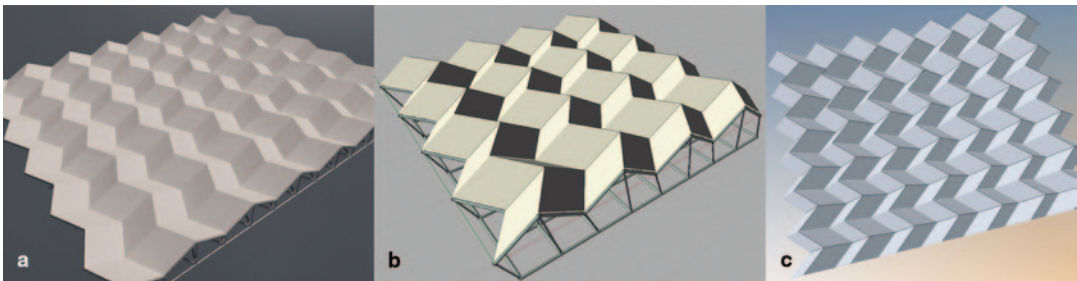
Die bereits beschriebenen Platten und Miura's Faltkonstruktionen kann man vergleichen. In beiden Fällen treten nur tangential Scherkräfte in den Falzrändern auf. Eine Fläche lässt sich entlang einer Falte (oder generell gesprochen, entlang der Erzeugungsgeraden eines Zylinders oder Kegelmantels) nicht mehr krümmen. Dies gilt für isotrope dünnwandige Materialien, beispielsweise Papier, aufgrund ihres nichtelastischen Verformungsverhaltens. Das formale Charakteristikum für eine stabile Plattenkonstruktion ist, wie gesagt, die Anordnung von nicht mehr als drei Platten um einen Scheitelpunkt. Die als lineare Gelenke wirkenden Plattenränder bilden dabei eine Y-Falt-Konstruktion. Da sie leicht und dabei steif sein sollen, müssen sie aus ebenen und möglichst dünnwandigen Flächen hergestellt und platzsparend zusammengefasst werden können.

Bauliche Anwendungen erfordern zum Beispiel eine große Spannweite der Platten eines Faltwerkes oder zusätzliche Eigenschaften wie etwa Wärmedämmung. Hierfür ist der Aufbau von dickeren Faltelementen notwendig, die in der Zusammenfaltbarkeit eingeschränkt sind, aber dennoch das wesentliche Charakteristikum von Faltwerken, d. h. die Lastabtragung in der dritten Dimension, behalten. Aufgrund ihrer komplexen Geometrie sind gefaltete Bauwerke bislang schwer herzustellen. An der Eidgenössischen Hochschule, der EPFL in Lausanne, beschäftigen sich Forscherteams mit der Erstellung von Faltbauten in Holz (Abb. 2.6). Als Resultat von Forschungsergebnissen im LEICHTBAUINSTITUT Jena (Abb. 2.7) wurde von dem Architekten team SteinmetzdeMeyer/Pohl eine Faltkonstruktion für die Neue Messe in Luxemburg entwickelt, die von einer leichten und hochgedämmten Holzkonstruktion getragen wird und – wie bei natürlichen Multifunktionseigenschaften von Blättern beispielsweise – Solarenergie gewinnt und in Teilen lichtdurchlässig ist. Dieser Bau ist





**Abb. 2.6 a,b** Starres Faltwerk für eine Kapelle in St. Loup, CH, EPFL Lausanne, Schweiz (MFB Architekten) (Pohl Architekten)



**Abb. 2.7 a–c** Geometrie- und Faltstudien LEICHTBAUINSTITUT Jena, (Abb. J. Pohl, J.- R. Fischer) (Pohl Architekten)

als Null-Emissions-Messehalle geplant und kann die benötigte Energie vorwiegend selbst erzeugen (Abb. 2.8). An der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes forschen Architekten um G. P. an vergleichbaren Faltkonstruktionen mit der Zielstellung, diese mit einfachen Handwerksmaschinen des Zimmereihandwerks erstellen zu können.

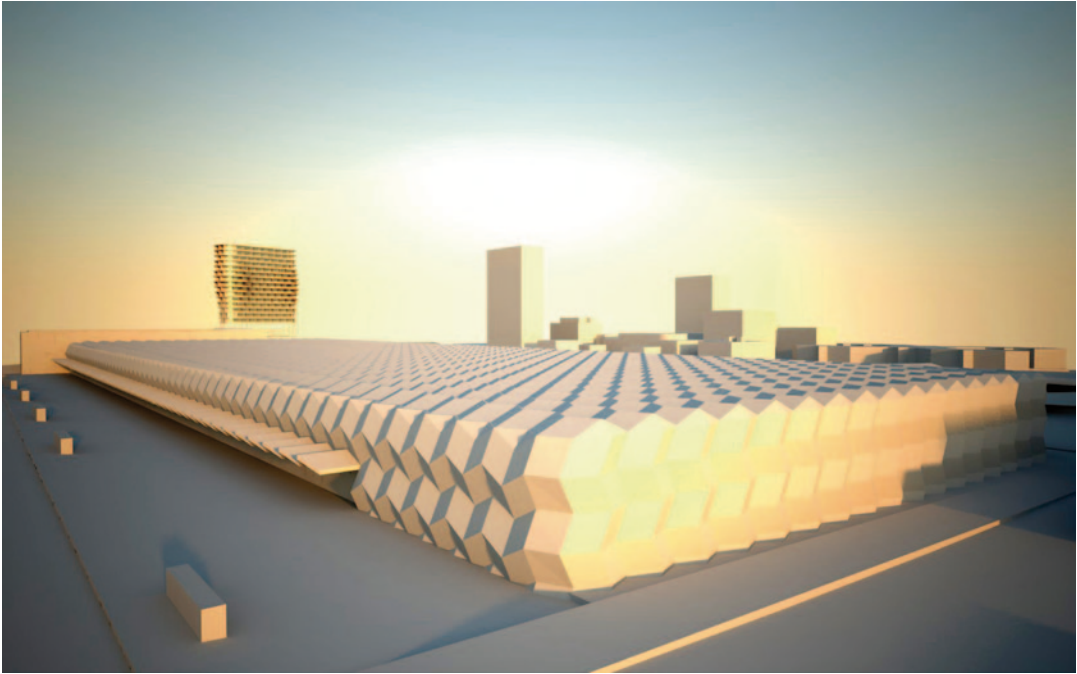
Die formale Charakteristik für solche Anforderungen sind X-förmige Falze, die auch die Rolle von linearen Gelenken übernehmen, eine spiegelsymmetrische Anordnung der Flächen um einen Falz und eine ausschließlich in den Ebenen der Fläche wirkende Belastung.

Wenn das mechanische Verhalten von Faltstrukturen kontrollierbar bleiben soll, werden die Faltflächen am besten so kombiniert, dass Nachbarflächen automatisch antagonistische Bewegungen ausführen und somit wie steife Rahmen funktionieren. Bei einer solchen Konstruktion werden die Flächen dann nur in ihrer eigenen Ebene belastet – was ideal ist –, und Verformungen werden vermieden.

Miura's Vorschlag für den Faltmechanismus von Sonnenkollektoren einer japanischen Raumstation mutet zunächst simpel an, denn er lässt sich mit einem Blatt Papier und einigen Falthinweisen ohne Schwierigkeiten nachvollziehen. Er bietet jedoch auf ganz neuartige und sehr elegante Weise durch eine repetitive Anordnung gefalteter Flächenelemente die technische Möglichkeit, die ganze Konstruktion auf einmal in den drei Raumrichtungen zu öffnen und auch wieder zu einem Faltpaket zusammenzuschieben (beim „klassischen“ Falten von Briefen oder Plänen, wie wir es praktizieren, geschieht das in einem zeitlichen Nacheinander). Die Flächen sind als kinematische Ketten zwangsgekoppelt. Im Raum ohne Schwerkraft, in dem die Masse der Faltstruktur selbst keine Rolle mehr spielt, lässt sich eine solche Faltfläche durch einfachen Zug oder Druck entlang zweier Diagonalen pannenfrei auffalten und wieder zusammenfallen.

Jedes System der beiden Scharen von zickzackförmigen Faltlinien dieser Faltstruktur kann als virtuell gekrümmt definiert werden, denn eine gekrümmte Falte zieht die eine angrenzende

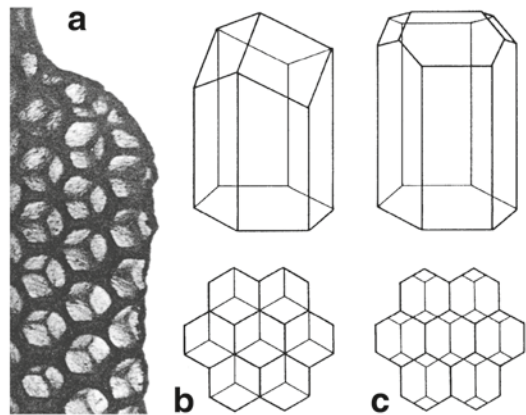




**Abb. 2.8** Messe Luxembourg, Modell Bahnhof, Pohl Architekten (Pohl Architekten)

Fläche in konkave, die andere aber in konvexe Form. Obwohl im Prinzip als Faltfläche unendlich geringer Dicke entworfen, spielt die tatsächliche Dicke der Flächenelemente in diesen Fällen keine Rolle: Die Falze werden durch Scharniere ersetzt, deren Drehachsen virtuell und nicht unbedingt materiell in der Schnittlinie zweier Ebenen liegen.

Beim fächerförmig gefalteten Feld des Hinterflügels vieler Insekten übertragen gekrümmte Adern eine muskelinduzierte Bewegung der Flügelbasis über die ganze Faltfläche. Durch diese Vorspannung sind die Felder zwangsgekoppelt. Der Flügel kann sich automatisch öffnen, obwohl er in der Faltfläche selbst keine Muskeln hat (!).



**Abb. 2.9** Honigwaben – „technisch“ noch zu verbessernde (?) natürliche Optimalstruktur; vgl. den Text. (nach Nachtigall, Kresling 1992b). **a** Original wabe, Ausschnitt. **b,c** Rheombische Dodekaedres

## 2.8 Waben der Honigbiene – noch ein wenig rätselhaft

Es mag verblüffen, dass man auch Bienenwaben unter dem Gesichtspunkt von Faltstrukturen betrachten kann. Die sechseckigen Bienenwaben (Abb. 2.9a) sind keineswegs von Haus aus stabil. Als eine Gelenkkette mit mehr als drei Gliedern

können die Wände weder seitliche Druck- noch Zugkräfte aufnehmen. Beim Bau werden zwei Schichten von zur Horizontalen leicht geneigten Wabenzellen beidseitig um eine gemeinsame senkrechte Mittellamelle angeordnet. Aus Randwülsten von Wachs ausgewalkt, entsteht

diese Mittellamelle als rautenförmige Faltenfläche, auf der die Wände der sechseckigen Zellen auf beiden Seiten hochgezogen werden. Diese gewaffelte Mittellamelle versteift jedoch nicht die Wabenstruktur in derselben Weise wie die flache Deckschicht einer technischen Sandwich-Struktur. Geometrisch gesehen besteht diese Faltenfläche aus Teilen von rhombischen Dodekaedern (Abb. 2.9b, c), auf deren Eckpunkte die Kanten dreier Flächen abwechselnd Y-förmig (stabile Plattenkonstruktion) und vier Kanten X-förmig (nicht stabile Faltkonstruktion) zulaufen.

Der ungarische Mathematiker Fejes Tóth hat in einem humorvoll betitelten Artikel („What the bees know and what they don't know“) eine von den Bienenwaben abweichende Anordnung der Zellen um die Mittelebene beschrieben, die theoretisch 0,35% Fläche sparen würde. Diese „idealen“ Bienenwaben von Fejes Tóth zeigen unter mechanischen Gesichtspunkten mit ihren symmetrisch in Form eines Y aufeinandertreffenden Flächenrändern die Charakteristika einer reinen, das heißt stabilen Plattenkonstruktion. Das bedeutet nun aber, dass ein Wabengebäude, wie es Honigbienen bauen, und das zum Teil als Faltkonstruktion ausgebildet ist, nicht stabil sein kann. Wenn es andererseits aber auch nicht kollabiert, muss das an Mechanismen liegen, die sich aus dem Bauprozess und statischen Bedingungen in der vertikal aufgehängten Position ergeben und die auch mit der vergleichbar sehr großen Nutzlast vereinbar sind. Das perfekte Gleichgewicht folgt allein schon aus der Tatsache, dass die von den Bienen zu feinen Lamellen abgehobelten und polierten Zellwände nicht ausbeulen. Bei einem so plastischen Baumaterial wäre das sofort der Fall, wenn sie auch nur den geringsten Biegekräften ausgesetzt wären. Vermutlich handelt es sich hier um einen dynamischen Gleichgewichtszustand, der sich aus komplexen Symmetrieverhältnissen und bistabilem Ausformen ergibt.

Die Bienenforscher H. Martin und M. Lindauer haben berichtet, dass die Bienen durch Eindrückungen bei Hobelbewegungen der Mandibeln und Betasten mit den Fühlern wegen des „aperiodischen Schwingungsverhaltens“ Informationen über die Dicke der Wachswände erhalten und sie dann in Feinarbeit entsprechend modellieren

können. Dies erscheint jedoch nur dann als möglich, wenn die hervorgerufenen Verformungen sich nicht von jeder Zelle, in der die einzelnen Bienen ganz unabhängig voneinander arbeiten, als sinusoidale Schwingungen störend über das ganze Gebäude verteilen. Modifiziert muss diese Sichtweise wohl durch neuere Ergebnisse werden, nach denen es in der Wabe Stellen gibt, die in Phase schwingen und andere, die gegenphasisch schwingen (vgl. Tautz 2007).

Hier liegt ein schwer zu lösender Widerspruch vor, denn in einem stabilen Bauwerk müsste jede lokale Verformung durch einen Momentenausgleich „aufgefangen“ werden, und es müsste erklärt werden, wieso die Bienenwaben bereits im groben „Rohbau“ mit den dicken Wänden und Rundwülsten ihre perfekte geometrische, ganz offensichtlich bereits im Gleichgewicht befindliche Form erreicht haben. Weiter müsste die Frage beantwortet werden, warum die Bienen – wenn Materialersparnis nicht der Zweck, sondern das Ergebnis irgendwelcher mechanischer Notwendigkeiten ist – die Zellenwände überhaupt auf ein Minimum reduzieren. Vielleicht gibt gerade das Paradoxon einer Mischform zweier antagonistischer Konstruktionstypen im Gleichgewicht darauf eine Antwort. Aus diesen Überlegungen kann man eine weitere Modellvorstellung abstrahieren:

Bei biologischen Faltkonstruktionen gibt es keine starren Zwangsführungen. Aus der Elastizität der Strukturen ergeben sich für ortsgebundene Organismen Möglichkeiten der Anpassung an tatsächlich auftretende Belastungen, für sich bewegende Organismen Möglichkeiten der Anpassung an mehrere Funktionen.

Die Überlegungen zeigen sehr deutlich, wie vorsichtig man beim Übertragen technischen Know-hows zum Verständnis biologischer Strukturen vorgehen muss. Die „Konstruktionsabsichten“ können durchaus unterschiedlich sein.

Die Biologie mit ihrer Ontogenese, die ja Systeme baut, die auch während des Baus funktionell sein müssen, besitzt hier eine Eigengesetzlichkeit, die man nicht versteht, wenn technische Gesichtspunkte „übergestülpt“ werden.

Die Technik kann allerdings ganz wesentlich helfen, Fragestellungen klarzustellen. Bio-

Bau-Bionik

Natur - Analogien - Technik

Nachtigall, W.; Pohl, G.

2013, XXXIX, 289 S. 403 Abb., 102 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-540-88994-6