Formoptimierende Prozesse in biologischen Strukturen – selbsterzeugende Strukturen in der Natur auf Basis von Pneumatik

E. Stach
Universität von Tennessee, Hochschule für Architektur und Design, USA

Abstrakt

"Wenn Architekten ein Gebäude wie einen Körper entwerfen würden, hätte es ein System aus Knochen, Muskeln und Sehnen und ein Gehirn, das weiß, wie es reagieren muss. Wenn ein Gebäude seine Haltung ändern, seine Muskeln anspannen und sich gegen den Wind stemmen könnte, könnte seine strukturelle Masse buchstäblich halbiert werden."

Guy Nordenson, Ove Arup und Partner

Bei dieser Fallstudie handelt es sich um eine Untersuchung von selbsterzeugenden Formen in der Natur, die auf pneumatischen Strukturen basieren, und deren Verwendung in der Architekturtheorie. Es konzentriert sich auf das Konzept der Selbstorganisation als bestimmendes Prinzip in der Natur und insbesondere auf die mathematischen, geometrischen und physikalischen Eigenschaften von Blasenclustern und zeigt Beispiele aus der Natur, der Biologie und den Ingenieurwissenschaften. Ein Teil der Forschung führte zu einer Reihe von digitalen Modellen und Renderings verschiedener Blasencluster und ihrer polyedrischen Konfiguration. Fortschrittliche Methoden des Strukturentwurfs verwenden bereits Systeme, die auf selbst erstellten Modellen basieren, die in biologischen und genetischen Formen verwurzelt sind. Ingenieure sind in der Lage, eine Reihe von Variablen in ein Computerprogramm einzugeben, das wiederum mit Hilfe eines agenetischen Algorithmus eine Struktur ableitet, die zu einer möglichst effizienten Materialnutzung usw. führt. Zahlreiche Beispiele für solche Verfahren gibt es bereits heute in der Natur, insbesondere in der Biologie. Baupläne für diese Formen sind im genetischen Code der DNA aller Lebensformen gespeichert. Bis zu den jüngsten Fortschritten in der Computertechnologie war es nicht möglich, solche genetischen Algorithmen zu verwenden. Schlüsselwörter: Formoptimierung, Membranleichtbau, Radiolarien, genetische Algorithmus-Polyeder.

Design und Natur II, M. W. Collins & C. A. Brebbia
(Herausgeber) © 2004 WIT Press, www.witpress.com, ISBN 1-

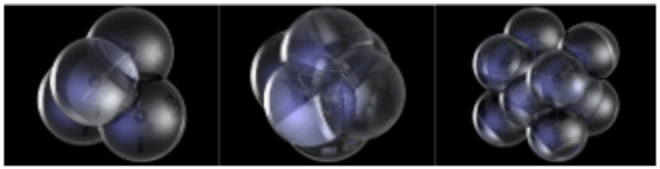
1 Einleitung

Die Erforschung formoptimierender Prozesse in biologischen Strukturen hat eine lange Geschichte, beginnend mit Frei Otto, Werner Nachtigall und gefolgt von vielen Forschern [2,3,4,10]. Diese Forscher haben in einer Reihe von Formen die mathematischen Beziehungen skizziert, die die Gesamtgeometrie polyedrischer inbiologischer Strukturen steuern [12]. Im Mittelpunkt der Forschung steht die Untersuchung, wie Optimierungsprozesse in biologischen Strukturen mögliche Ansatzpunkte sind, um optimierte architektonische Formen und Strukturen zu generieren. Für diese spezielle Studie wurde der Blasencluster basierend auf dem Pneus ausgewählt. Der Pneu ist ein Konstruktionssystem, das aus einer nicht starren Hülle mit einer bestimmten Zugfestigkeit und einer inneren Füllung besteht, die in den meisten Fällen unter Druck steht. Dieses Konstruktionssystem kann in Form von pneumatischen Strukturen in die Welt der Architektur übertragen werden. Dieses Struktursystem, das heute in vielen Leichtbaukonstruktionen zu finden ist, basiert auf den Prinzipien der in der Natur vorkommenden pneumatischen Strukturen.

2 Pneumatische Strukturen in der Natur

Ein Beispiel für eine pneumatische Struktur in der Natur ist die Seifenblase. In Seifenblasen wird Wachstum durch ein System der Teilung und Inflation erreicht. Dieser erhöhte Innendruck, der von einer verstärkten Membran umschlossen ist, die einer Zugspannung ausgesetzt ist, bewirkt, dass die Blase in einem Prozess wächst, der als Isomorphismus oder Selbsterzeugung bekannt ist.

Frei schwebende Blasen sammeln sich und bilden dichte Cluster, die als Schaum bekannt sind. Wenn drei Blasen auf eine Glasoberfläche gelegt werden und eine vierte hinzugefügt wird, verschiebt sich die vierte Blase an die Spitze der drei Blasen und bildet den einfachsten dreidimensionalen Cluster, der aus vier Blasen besteht. Kommen weitere Blasen hinzu, bilden diese automatisch eine Schaumstruktur. Sind die Blasen gleich groß, so sind die flüssigen Ränder des Schaums gerade und gleich lang, und die Einfallswinkel an den Knotenpunkten sind gleich. Die Gesamtstruktur bildet ein Netz gleicher Maschenweite, das als "Basisnetz" bezeichnet wird (Abb. 2h).



ein) b) c)

Abbildung 1: Gerendertes Computermodell: (a) Tetraeder-Blasenstruktur; (b) Struktur der Oktaederblase; (c) Struktur der Würfelblase.

3 2D-Blasencluster

Netzstrukturen werden durch die Erstarrung eines 2-D-Blasenclusters gebildet. Blasencluster entstehen, wenn Blasen frei in einer Zelle verteilt sind, ohne sich gegenseitig zu berühren. In der nächsten Phase werden die Blasen durch Kontaktpunkte aneinander herangeführt und bilden durch Agglomeration Muster (Abb. 2a-2g). Diese Muster basieren auf geometrischen Formen wie Würfeln, Tetraedern und Oktaedern (Abb. 1). Mit der Erstarrung bildet sich die Membran der Blasen heraus und das Fasernetz härtet aus (Abb. 2g). Die Blasenmembran dann

löst sich auf und die Netzstruktur bleibt bestehen (2h).

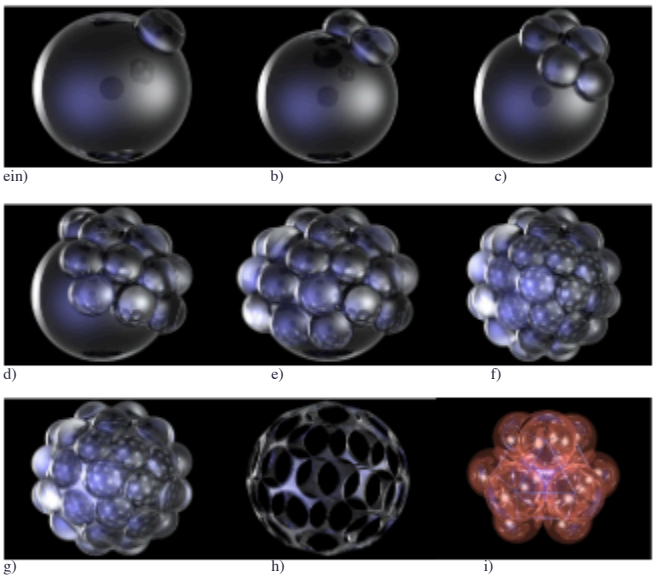


Abbildung 2: Computermodell: (i) ist die engste Packung von Kugeln.

4 Mathematik/Geometrie

4.1 Engste PackungEines der grundlegenden geometrischen Prinzipien, das die sich wiederholenden, sich selbst erzeugenden Formen in der Natur antreibt, ist die Vorstellung der engsten Packung [1] von Kugeln. Es ist

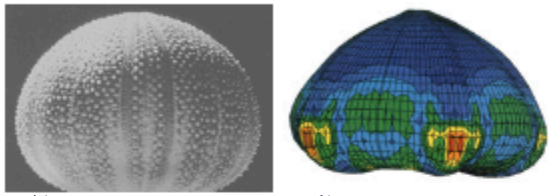
Diese definiert die Krümmung des Facettenauges eines Insekts oder bildet die Schalung, um die Skelettstruktur eines Radiolariers zu formen. Da Kugeln dicht beieinander liegen, führen bestimmte physikalische Gesetze dazu, dass geometrische Formen entstehen, wie z. B. Sechsecke. Diese Polygone erzeugen sich wiederholende Oberflächen zwischen und um die Kugeln. In einigen Fällen sind diese Oberflächen für eine Reihe von Funktionen nützlich, z. B. im Auge eines Insekts. In anderen Fällen greifen diese Flächen ineinander und erzeugen Volumen, Polygone erzeugen Polyeder. Diese Bände können für einen bestimmten Zweck verwendet werden.

Oft ist es nicht die Oberfläche oder das Volumen, die in diesen Systemen zum Einsatz kommen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass es die Kanten sind, an denen sich diese Kugeln treffen, die für den Organismus von Nutzen sind. Auch hier sammeln das Radiolarium und die Kieselalge Silikatablagerungen an den Rändern, an denen sich die Kugeln um die Außenfläche treffen. Entlang dieser Kanten bildet sich ein Skelettsystem.
Einer der größten Vorteile von geometrischen Systemen, die auf dem Modell des engsten Packens basieren, ist die große Vielfalt an Konfigurationen, aus denen man wählen kann. Sich wiederholende, sich selbst erzeugende Formen können in Form von Sechsecken, Fünfecken und sogar Dreiecken abgeleitet werden (Abb. 1). Diese können unabhängig voneinander oder zwischen verschiedenen Typen angeordnet werden [1]. Nachdem eine bestimmte Form geschaffen wurde, kann sie auch mit anderen ähnlichen Formen arrangiert werden, um noch mehr Formen oder, in Bezug auf die Architektur, Räume zu schaffen.

5 Strukturoptimierung im Ingenieurwesen

5.1 Genetische AlgorithmenIn technischen Bereichen ist das Erreichen eines Ziels mit minimalem Aufwand, sei es in Bezug auf Material, Zeit oder andere Kosten, eine grundlegende Tätigkeit (Abb. 7a). Aus diesem Grund ist es leicht zu verstehen, welches Interesse Designer an verschiedenen Optimierungstechniken haben. Für eine solche Optimierung werden traditionell sowohl mathematische als auch modellbasierte Werkzeuge eingesetzt. In jüngster Zeit sind mathematische Methoden, die auf Computern ausgeführt werden, vorherrschend geworden. Leider verdecken computergestützte Lösungen oft die Bandbreite der möglichen Lösungen des Designers, indem sie nur eine endgültige, "beste" Lösung präsentieren. Natürlich können Optimierungsmethoden nur auf die objektiven Parameter reagieren, die in das Problem kodiert sind, und infolgedessen werden nicht codierte Parameter, wie z. B. Ästhetik oder Kontext, aus dem Optimierungsprozess und schließlich aus der endgültigen Designlösung ausgeschlossen. Die Tragwerksoptimierung im Ingenieurwesen nimmt natürliche Konstruktionen als Beispiel Abb. 3). Ähnlich wie in der Natur selbst können computergenerierte genetische Algorithmen anhand von erklärten Zielen berechnet werden, um eine globale Optimierung zu erreichen - die Suchstrategie ist, wie in der Natur, zielorientiert. Ein evolutionärer Algorithmus erhält eine Population von Strukturen (in der Regel zufällig generiert), die sich nach Regeln der Selektion, Rekombination, Mutation und des Überlebens entwickeln, die als genetische Operatoren bezeichnet werden. Eine gemeinsame "Umgebung" bestimmt die Fitness oder Leistungsfähigkeit jedes Einzelnen in der Bevölkerung. Die fittesten Individuen werden mit größerer Wahrscheinlichkeit für die Fortpflanzung (Retention oder Duplikation) ausgewählt, während

Rekombination und Mutation modifizieren diese Individuen und führen zu potenziell überlegenen Individuen. Durch die Verwendung von Algorithmen, mechanischer Selektion, Mutation und Rekombination verbessert sich die Generation mit einer festen Parametergröße und -qualität.



ein) b)

Abbildung 3: (a) Strukturoptimierung in der Schalenstruktur eines Seeigels. (b) Finite-Elemente-Analyse der Seeigelschale, farbcodierte Stressanalyse [15].

6 Computerkomprimierte Evolution

6.1 Designraum und finite ElementeDie computerkomprimierte Evolution wie die SKO-Methode (Soft Kill Option) (Abb. 4) folgt dem gleichen Konstruktionsprinzip, das die Natur anwendet, um z.B. das Schalenwachstum eines Seeigels (Abb. 3) oder die Kieselsäurestruktur des Radiolariums (Abb. 7d/8b) zu fördern. Baumaterial kann überall dort entfernt werden, wo keine Spannungen vorhanden sind, aber bei größeren Spannungen muss zusätzliches Material verwendet werden. Dies ist das einfache Prinzip, das die Evolution seit Millionen von Jahren nutzt, um gewichtsoptimierte "Bauteile" herzustellen. Mit Hilfe von Computerprogrammen, die auf computergenerierten genetischen Algorithmen basieren, wie z.B. der SKO-Methode, sind Wissenschaftler nun in der Lage, diese Evolution zu simulieren und in eine kurze Zeitspanne zu komprimieren. [9]Um die Leichtbaustrategie nach den Vorgaben der Natur zu simulieren, müssen Wissenschaftler mit der SKO-Methode zunächst einen virtuellen Designspace definieren, der die äußersten Parameter des zu entwickelnden Bauteils darstellt (Abb. 4). Um diesen Gestaltungsraum in viele kleine Einzelteile, die finiten Elemente, zu unterteilen, wird ein Raster verwendet. Wird nun eine quasi externe Last aufgebracht, berechnet der Computer die resultierende Kraft, die auf jedes der finiten Elemente ausgeübt wird. Das FE-Modell zeigt genau, wo an einem Bauteil keine Lastbelastung entsteht und zeigt wiederum, wo Einsparungen bei den eingesetzten Materialien möglich sind. Auf der anderen Seite zeigt das Simulationsprogramm für stark beanspruchte Bereiche die Notwendigkeit an, das Baumaterial zu verstärken. Wie die Natur wiederholt auch der Computer diesen "Finite-Elemente-Zyklus" mehrmals. Dadurch können sie ein Bauteil so lange immer wieder verfeinern, bis die optimale Form gefunden ist, die die Spannungen innerhalb eines Bauteils gleichmäßig verteilt.

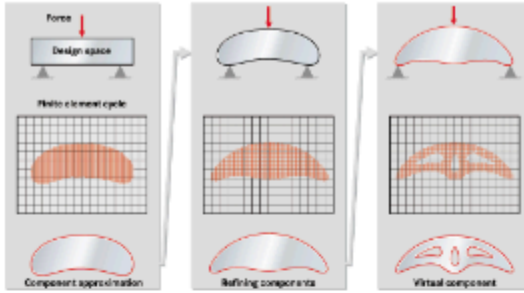
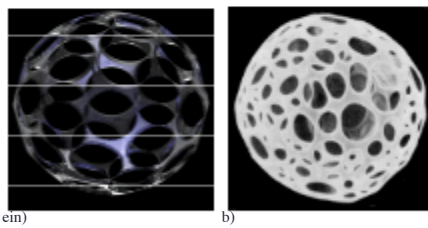


Abbildung 4: SKO-Methode (Soft Kill Option). Das DaimlerChrysler Research Center Ulm und die Uni Karlsruhe, Prof. Claus Mattheck, haben in Deutschland die SKO-Methode (Soft Kill Option) entwickelt [9].

7 Biologische Modelle

7.1 Radiolarien und KieselalgenEs gibt eine Reihe von selbst erzeugten, biologischen Modellen, die auf der Blasenclustertheorie basieren. Eines der besten Beispiele dafür ist der Radiolarian. Radiolarien sind einzellige Meeresorganismen. Diese mikroskopisch kleinen Lebewesen extrahieren Kieselsäure aus ihrer Umgebung, um ein Skelett zu bilden. Hoch gegliederte geometrische Muster bestimmen die meist kugelförmigen Strukturen. Die resultierende Form ähnelt der einer Kuppel.



ein) b)

Abbildung 5: (a) Computergeneriertes sphärisches Cluster-Skelett basierend auf der Blasenhaufen-Theorie (siehe Abb. 2a-2h) (b) versteinertes SkelettRadiolarium [6].

Der Prozess, der durchgeführt wird, um eine solche resultierende Struktur herzustellen, ist relativ einfach. Es entsteht eine große Anzahl von Vesikel, winzige Säckchen mit Flüssigkeit. Diese Blasen sind im Wesentlichen winzige Versionen der größeren zukünftigen Zelle (Abb. 2c-2i, 3a).

Sie sind die gemeinsamen Module für die Zelle. Wenn die Vesikel beginnen, sich in einem strahlenden Muster dicht aneinander zu drängen, ist die resultierende Form eine kugelförmige Masse, die Zelle. Die einzigartige Geometrie der Zelloberfläche, wie sie durch die dicht gedrängten Blasen erzeugt wird, ist die Schalung für ein Skelett [4].
In den Gletscherspalten, die sich an den Rändern bilden, an denen die Blasen aufeinander treffen, setzen sich Kieselsäurepartikel ab und verbinden sich. Die Geometrie, die durch die Blasenverbindungen erzeugt wird, ermöglicht es der Kieselsäure, eine Reihe miteinander verbundener Elemente ähnlicher Größe und Form zu bilden. Das Ergebnis ist eine komplex aussehende Skelettstruktur, die aus einer Vielzahl einfacher, relativ ähnlicher Elemente besteht. Um ein so scheinbar komplexes System für einen so einfachen Organismus zu schaffen, ist es notwendig, auf hocheffizienten mathematischen und geometrischen Prinzipien aufzubauen. Diese Prinzipien sind im genetischen Code des Radiolariers und ähnlicher Lebensformen verankert.

Eine Reihe von Kieselalgen haben ähnliche Eigenschaften wie ihr einzelliger Cousin, der Radiolarier. Einige davon sind: radiale Form und eine geriffelte Skelettstruktur. Die Skelettstruktur einer Kieselalge ist nicht notwendigerweise kugelförmig, aber sie ist radial. Winzige Bläschen strahlen in dicht gepackter Form, um die Zellform zu erzeugen. Diese Blasenform wird als "Schaumfloß" entschlüsselt. Sobald dies geschieht, treffen Silikatablagerungen entlang der Blasenränder aufeinander und bilden das Skelett. Dieses Material bildet das, was man eigentlich als "Glas"-Skelett bezeichnen kann.
Die Variationen der Kieselalgen sind zahlreich. Nicht alle Kieselalgen sind perfekt rund, inkonfiguriert. Zum Beispiel haben einige tatsächlich eine dreieckige Form. Diese Kieselalgen halten sich immer noch an die engsten Packungsprinzipien, nur in einer anderen Version als die meisten. Andere Arten von Kieselalgen haben eine längliche Form. Anstelle einer Wiederholung ähnlich geformter Kugeln oder Blasen packen diese Anpassungen größere, röhrenförmige Formen zusammen, um ihre Skelette zu schaffen.

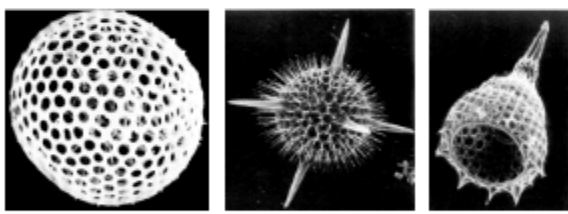


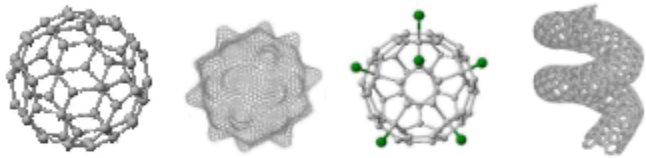
Abbildung 6: Radiolarium und versteinertes Skelett [5,6].

Kieselalgen und Radiolarien sind Paradebeispiele für hocheffiziente Struktursysteme mit ausreichend einfachen Geometrien für Organismen mit begrenzten genetischen Informationsspeicherfähigkeiten.

7.2 FullerenDie kleinsten bekannten und erst kürzlich entdeckten Strukturen, die auf den Prinzipien der Selbsterzeugung, der engsten Verpackung und des Polyeders beruhen, sind die Fullerene.

Design und Natur II, M. W. Collins & C. A. Brebbia (Herausgeber)
© 2004 WIT Press, www.witpress.com, ISBN 1-85312-721-3

Fullerene (Abb. 7), eine Klasse von käfigartigen Kohlenstoffverbindungen, die aus geschmolzenen, fünfeckigen und/oder hexagonalen sp2-Kohlenstoffringen bestehen, wurden erstmals 1985 entdeckt, als das fußballförmige C60 (Buckminsterfulleren) synthetisiert wurde. Die neuartige Phase des Kohlenstoffs wurde nach dem Ingenieur und Architekten Richard BuckminsterFuller (1895-1985) benannt, da die Moleküle die Architektur seiner Geodätendome teilen. Fullerene haben eine Größe von 20 bis über 500 Kohlenstoffatomen.



ein) b) c) d)

Abbildung 7: Verschiedene Modelle von Fullerenen. Forschungszentrum Fulleren [14]. Von links nach rechts: C60, C60-, exoedrische Fullerenverbindungen C60, Cl6, Nanoröhren.

Die Kohlenstoffatome in C60 sind in einer geometrischen Form angeordnet, die aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken besteht. Andere kugelförmige Fullerene (zusammenfassend als Buckyballs bekannt) wurden anschließend mit einer anderen Anzahl von hexagonalen Flächen synthetisiert. Das kleinstmögliche Fulleren ist das dodekaedrische C20, eine Form, die aus 12 fünfeckigen Flächen und keinen sechseckigen Flächen besteht [7]. Größere Fullerene wurden in der Natur nachgewiesen [8]. Nanoröhren, Nanohörner und Buckybowls sind weitere Beispiele für Fullerene [14].

8 Architektonische Anwendungen

Gesunder Menschenverstand - maximale Wirkung mit minimalen Ressourcen erzielen.

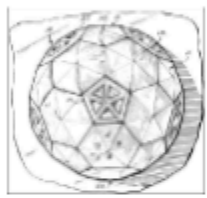
8.1 Strukturelle KonfigurationenSo wie volumetrische und formale Konfigurationen sehr unterschiedlich sind, so sind es auch die strukturellen Konfigurationen der engsten zusammengedrängten Organisationen. Konstruktionen mit den Qualitäten von Kuppeln sind nicht die einzigen Formen, die genutzt und in ein Gebäude verwandelt werden können. Variationen in der Art und Weise, wie die Polygone zusammenpassen, können zu langgespannten röhrenförmigen Strukturen und Volumen führen. Die grundlegende Methode zur Ableitung dieser Strukturschemata besteht darin, relativ dünne, tragende Elemente entlang der Kanten zu platzieren, an denen sich die Polygone treffen. Bei richtiger Konfiguration sind dies die Punkte, an denen Kräfte auf natürliche Weise auftreten. Basierend auf den Geometrien dieser Form ist es wahrscheinlich, dass ein hocheffizientes System das Ergebnis ist. Einer der größten Vorteile dieser Art der Tragwerksplanung ist die relativ geringe Anzahl von Bauteilgrößen. Wenn mehrere Polygongeometrien beteiligt sind,

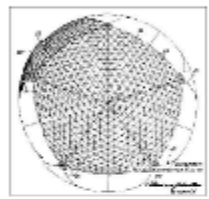
Design und Natur II, M. W. Collins & C. A. Brebbia (Herausgeber)
© 2004 WIT Press, www.witpress.com, ISBN 1-85312-721-3

Andere Stäbe und Verbindungsarten sind erforderlich, aber alle können in der ursprünglichen Bemessung berücksichtigt werden.

8.2 Fullers geodätisches PatentDie Anwendung der Wissenschaft der Selbsterzeugung auf die Architektur ist noch nicht vollständig verwirklicht. Attribute biologischer Beispiele, wie der Radiolarien, existieren derzeit in Strukturen wie der geodätischen Kuppel von Buckminster Fuller. Fuller erkannte die Phänomene der engsten Packung von Kugeln in der Natur und benutzte sie als Modell für seine Kuppel, die auf diesen mathematischen Prinzipien basierte. Eine der revolutionärsten Innovationen, die Fuller mit seinem geodätischen System entwickelte, war die wiederholte Verwendung von hocheffizienten, ähnlichen Bauteilen. Dies ermöglichte die sich selbst erzeugende/wiederholende Bauweise – die von der Natur bereits verwendet wird.

ein)b)





c)

Abbildung 8: (a) Geodätische Sphäre (b und c) Fullers geodätische Patentzeichnung.

Um Fullers Entdeckungen mit der heutigen Technologie einen Schritt weiter zu führen, ist es möglich, strukturoptimierte Strukturen in einem Computer zu erzeugen, indem man beispielsweise die SKO-Methode verwendet, um nicht nur eine Darstellung einer biologischen Form zu erstellen, sondern auch die evolutionären Schritte zu reproduzieren, die unternommen wurden, um ein strukturelles System am effizientesten zu machen.

8.3 Eden Project, Cornwall, GB, Nicholas Grimshaw architectsEin aktuelles Beispiel für polyedrische Strukturen in der Architektur ist das Eden-Projekt, das 2001 von Nicholas Grimshaw fertiggestellt wurde. Das Eden-Projekt ist ein botanischer Garten und ein Bildungszentrum in einem ehemaligen Steinbruch aus Porzellanerde. Der Bau riesiger Gewächshäuser (Biome) schuf ein geschütztes Mikroklima und ermöglichte es, eine große Anzahl der tropischen und mediterranen Arten der Welt in den Pflanzungen zu vertreten. Die Gebäudefundamente folgen den komplexen Konturen der Grube und tragen die leichten geodätischen Kuppeln aus Stahlrohr, die mit Bögen verbunden sind. Die größte dieser Kuppeln hat einen Durchmesser von 100 m und eine Höhe von 45 m im Inneren. Die leichten ETFE-Folienkissen bilden das Verkleidungssystem zwischen den Kuppelelementen mit Paneelen mit einem Durchmesser von bis zu 11 m, die ein Maximum an Licht und Licht bieten.

Design und Natur II, M. W. Collins & C. A. Brebbia (Herausgeber)
© 2004 WIT Press, www.witpress.com, ISBN 1-85312-721-3

UV-Durchlässigkeit. Diese sechseckigen Blasen wurden verwendet, da sie sich perfekt auf jeder geformten Oberfläche absetzen können.

Abbildung 9: *Eden Project, Cornwall, GB, Nicholas Grimshaw Architects, Anthony Hunt Associates Ingenieure, Struktur: MERO MembranETFE-Kissen Durchmesser 9 m, Abmessungen: 15 590 m2, 100 m x 220 m Höhe 55 (www.anthonyhuntassociates.co.uk).*

Die Stahlkonstruktion des Biomes ist extrem leicht und wird mit 12 Meter langen Stahlankern in den Fundamenten verankert. Das Design bestand aus einem zweilagigen, gebogenen Gitterrohrrahmen aus Stahl, dem Sechskant-Tri-Sechskant, mit einer äußeren Schicht aus Sechsecken (die größte mit einem Durchmesser von 11 m) sowie gelegentlichen Fünfecken und einer inneren Schicht aus Sechsecken und Dreiecken (die riesigen Sternen ähneln), die alle wie ein riesiger Meccano-Bausatz zusammengeschraubt waren. Jedes Bauteil war einzeln nummeriert und passte an seinen Platz in der Struktur und nirgendwo sonst.

8.4 National Swimming Centre Beijing Olympics 2008, Peking (CN), PTW, Sydney & C S C Eg Corporation, Peking & Ove Arup Pty Ltd., LondonDas Siegerprojekt des internationalen Designwettbewerbs "NationalSwimming Centre Beijing Olympics 2008" des australischen Architekturbüros PTW ist ein weiteres Beispiel für die effiziente Kombination von Polyederstrukturen mit ETFE-Kissen. Das Design mit dem Namen "Watercube" ist eine einfache und prägnante quadratische Form, die letztendlich die Wasserblasentheorie, die natürliche Bildung von Seifenblasen, verwendet, um die Struktur und die Gebäudeverkleidung zu schaffen. Das Struktursystem, ein Raumrahmen, basiert auf polyedrischen Zellen in verschiedenen Dimensionen, der effektivsten Unterteilung dreidimensionaler Strukturen. Es basiert auch auf der Art und Weise, wie die Struktur in der Natur Räume vergleicht. Die aus ETFE gefertigte Gebäudehülle wurde so konzipiert, dass sie spezifisch auf Licht und Projektion reagiert.

9 Intelligente Strukturen und Materialien

9.1 Selbstorganisation als bestimmendes Prinzip der NaturDie Belastungsstrukturen in der Natur verdichten sich entsprechend den strukturellen Erfordernissen. Dieses Phänomen zeigt sich zum Beispiel am menschlichen Oberschenkelknochen und der Anordnung der schwammartigen Knochensubstanz. Durch eine funktionale und

Hochgeordnetes Design Unzählige unregelmäßige Hohlräume sind mit kleinen Trabekeln durchsetzt. Die feinen Trabekel sind räumlich so angeordnet, dass sie exakt den Kraftlinien der im Knochen auftretenden Zug- und Druckspannungen folgen. Das gleiche Strukturprinzip, dass eine Struktur dort wachsen muss, wo sie strukturell benötigt wird, kann auch in anderen Strukturformen wie Baumstrukturen, Schalen, Gitterschalen und zuvor gezeigten Radiolarienstrukturen auf Basis von Blasenclustern gesehen werden (Abb.2a-2g). Radiolarien verdichten die Struktur entsprechend dem Fluss der Kräfte, den sie über den Durchmesser der einzelnen Blase steuern. Blasencluster mit einem hohen Anteil an Blasen mit kleinem Durchmesser haben eine größere Menge an Membranoberfläche, was schließlich zu einer dichteren Skelettstruktur führt. Der gehärtete Blasencluster spiegelt die Menge an Spannungen innerhalb der gesamten Struktur wider.

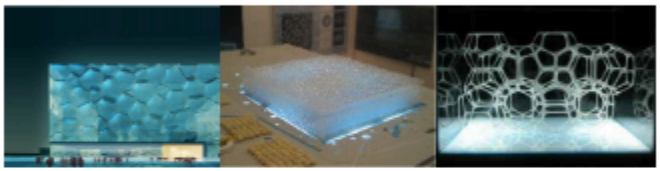


Abbildung 10: Die Stäbe bestehen aus drei Platten mit kreisförmigen Endplatten. Die Knoten sind einfache Stahlkonstruktionen mit kreisförmigen Platten für die Stirnplatten an den Stäben und entsprechenden Löchern zur Aufnahme der Schrauben. Diese beiden Elemente werden einfach miteinander verschraubt, um eine Baugruppe zu bilden. Die Baugruppen werden miteinander verschraubt, um den Gitterrohrrahmen zu bilden (Ove Arup Pty Ltd).

Die geodätischen Kuppeln von Buckminster Fuller und Nicholas Grimshaw basieren auf repetitiven Polyedern. Bei den Abmessungen dieser Polyeder werden die in den einzelnen Stäben auftretenden Kräfte nicht berücksichtigt. Das erste gebaute Gebäude, das auf einem polyedrischen Raumrahmen basiert, der den tatsächlichen Kraftfluss berücksichtigt, wird das Nationale Schwimmzentrum für die Olympischen Spiele 2008 in Peking sein, das von PTW, State Construction Engineering Corporation, Peking & OveArup Pty Ltd. entworfen wurde. Wie im Radiolarienskelett verdichtet sich die Struktur, wenn die Kräfte in der Struktur zunehmen.

Polyedrische Strukturen, die auf dem Blasenprinzip basieren, sind aufgrund ihrer relativ einfachen physikalischen und morphologischen Prinzipien und Geometrien perfekte Studienmodelle für selbsterzeugende Strukturen in der Natur. Selbstorganisation ist das bestimmende Prinzip der Natur. Sie definiert Dinge, die so einfach sind wie ein Regentropfen oder so komplex wie eine lebende Zelle - einfach ein Ergebnis physikalischer Gesetze oder Anweisungen, die im Material selbst implizit sind. Es handelt sich um einen Prozess, bei dem Atome, Moleküle, Molekülstrukturen und Konstruktionselemente geordnete und funktionale Einheiten bilden. Im besten Fall beeinflussen intelligente Strukturen und Materialien die gesamte Philosophie des Bauens. Ingenieure werden die Sicherheit nicht mehr durch Materialmenge und Kosten gewährleisten. Eine einfache statische Berechnung reicht nicht mehr aus. Stattdessen werden selbstorganisierende Strukturen die neuen Bauprinzipien bestimmen.

Bestätigungen

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Christian Nobel, John Falko, Universität von Tennessee
Universität von Tennessee, Forschungsstipendium des College für Architektur und Design.

Referenz

[1]Makishima, Shoji. Musterdynamik: Eine Theorie der Selbstorganisation.Kodansha Scientific, Ltd.: Japan. 2001.[2]Otto, Frei. Kieselalgen I: Schalen in Natur und Technik. Institut für Leichte

Flachentragwerke: Westdeutschland. 1984[3]Otto, Frei. Radiolarien: Muscheln in Natur und Technik II. Institut für
Leichte Flachentragwerke: Deutschland. 1990.[4]Pearce, Peter. Struktur in der Natur ist eine Strategie für das Design. MIT Presse:
Massachusetts, 1978. [5]"Die verrückte Seite." http://radpage.univ-lyon1.fr/rad_en.html#Introduction.
Juni 2001, [September 2001]. [6]"Radiolarien."
http://oceanlink.island.net/oinfo/radiolarians/radiolarian.
html[7]H. Prinzbach, A. Weiler, P. Landenberger, F. Wahl, J. Wšrth, L. T. Scott,

M. Gelmont, D. Olevano & B. V. Issendorff, "Gasphasenproduktion und *Photoelektronenspektroskopie des kleinsten Fulleren, C20", (2000)Nature, 407, 60 - 63. [8]L. Becker, R.J. Poreda, T. E. "Fullerene: Ein extraterrestrischer Kohlenstoff*

Trägerphase für Edelgase", (2000) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 97, 7,2979-2983. [9]HIGHTECH REPORT 1/2003, 60-63[10]D'Arcy Wentworth Thompson, Über Wachstum und Form, Dover

Publications, Inc., 1992[11]Tomaso Aste und Denis Weaire. Das Streben nach perfekter Verpackung / Bristol,
PA: Institut für Physik Pub., um 2000. [12] J. François Willey Gabrie. Jenseits des Kubus: die Architektur des Raumes,
frames and
polyhedra[13]http://www.arup.com.au/beijing.php[14]University of Sussex, www.susx.ac.uk[15]K. Teichmann, Prozess und Form, Ernst und Sohn