

Hilka Rogers

Entwurf und Konstruktion Freier Formen

Entwurf und Konstruktion freier Formen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der
Universität der Künste Berlin
Studiengang Architektur

Dipl.-Ing. Hilka Rogers M.Sc.

Oktober 2008

Inhalt

	Seite
Vorwort	iii
Dank	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vi
Einleitung	1
Teil I Grundlagen	
1 Systematik der Formen	9
1.1 Untersuchung vorhandener Systematisierungen	
1.2 Formfamilien	
1.3 Systematisierung der Elemente	
1.4 Systematisierung der Tragsysteme nach ihrer Formfamilie	
1.5 Zusammenfassung und Ergebnis	
2 Historische Beziehung zwischen Form und Konstruktion	38
2.1 Formen bis ins 19. Jahrhundert	
2.2 Formen im 20. Jahrhundert	
2.3 Vom Entwurf zur Ausführung – Fallstudien	
2.4 Zusammenfassung und Ergebnis	

Teil II Die Entstehung der Form

3 Die architektonische Gestaltung 62

- 3.1 Formbestimmung durch Impulse
- 3.2 Einsatz des Computers beim Entwurf
- 3.3 Entwicklung einer Form
- 3.4 Zusammenfassung und Ergebnis

4 Die konstruktive Entwicklung des Entwurfs 82

- 4.1 Kreativität im Entwurfsprozess
- 4.2 Entwurfsentwicklung mit dem Modell
- 4.3 Formfindung durch konstruktive Optimierung
- 4.4 Zusammenfassung und Ergebnis

Teil III Umsetzung

5 Konstruktive Formbildung 110

- 5.1 Material und Form
- 5.2 Flexible Konstruktionen
- 5.3 Die Herstellung der komplexen Form – Aktuelle Fallstudien
- 5.4 Zusammenfassung und Ergebnis

6 Zusammenstellung der Bauten 152

Schlussfolgerungen 160

Abbildungsverzeichnis 167

Literatur 183

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von 2004-2006 während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Tragwerkslehre des Studiengangs Architektur an der Universität der Künste Berlin. Nach intensivem Studium der Schalenbauwerke seit 2001 und dem daraus folgenden Beitrag zu einem interdisziplinären Symposium über organische Formen an der UdK gelangte ich zu der Fragestellung, wie die heute häufig eingesetzten, fließenden Formen zu definieren seien, und welche konstruktiven Randbedingungen für sie gelten.

Dieses Thema ist sowohl aus dem Blickwinkel der Architektur als auch von Seiten der Ingenieurpraxis von Bedeutung und daher in meiner damaligen Position als eine im Studiengang Architektur tätige Bauingenieurin von größtem Reiz. Allein die polarisierenden Reaktionen verschiedener Gesprächspartner auf den Begriff „freie Form“ bestärkten mich in der Gewissheit, dass dieses Thema einer umfassenden Bearbeitung bedurfte. Die Untersuchungen historischer und aktueller Projekte, theoretische Fragestellungen zur Form aus ästhetischer und aus konstruktiver Sicht und Recherchen zu Material und Herstellung im Hinblick auf die freien Formen erfolgten stets an der Schnittstelle zwischen den Disziplinen.

Dank

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Franz-Josef Hilbers, Fachgebiet Entwerfen und Konstruktion an der Universität der Künste Berlin, für seinen Einsatz bei der Betreuung der Promotion, für seine kontinuierliche Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie für seine kompetenten fachlichen und formalen Ratschläge.

Herrn Professor Berthold Burkhardt, Fachgebiet Tragwerkslehre an der TU Braunschweig, danke ich ganz besonders für seine intensive, engagierte Betreuung und für die zahlreichen motivierenden Diskussionen, in denen er mir die Hinweise und Denkanstöße gab, die diese Arbeit prägten.

Herrn Professor Dr. Eddy Widjaja bin ich für seine andauernde Hilfsbereitschaft und fachkundige Beratung und für viele hilfreiche Anregungen in intensiven Fachgesprächen sehr dankbar.

Ich danke meinen Interviewpartnern Dr. Mike Cook, Peter Otto Grupp, Prof. Harald Kloft, Prof. Mike Schlaich und Dr. Volker Schmid für Ihre Bereitschaft, meine Fragen zur Praxis mit ebensoviel Geduld wie Enthusiasmus zu erörtern.

Zudem bin ich Bettina Hemme und Birgit Hirschmann, die das Manuskript zur Korrektur gelesen haben, zu Dank verpflichtet wie auch allen, die mich auf andere Weise unermüdlich unterstützt haben - insbesondere meinem Mann Paul, der mir durch seine Anerkennung für meine Arbeit immer wieder Mut machte.

Posthum danke ich an dieser Stelle Professor Gerhard Pichler (1939-2004), der mich über die Jahre der Zusammenarbeit am Fachgebiet durch seine Begeisterung an der Formgebung von Tragwerken zu diesem Thema hinführte.

Hilka Rogers
im Oktober 2008

Kurzfassung

Eine der wesentlichen gemeinsamen Interessen von Architekt und Ingenieur ist das Konzept der Form. Dem Architekten erlaubt eine Form nicht nur die Anordnung verschiedener Funktionen im Gebäude sondern ist auch Grundlage für seine künstlerische Ausdruckskraft. Für den Ingenieur hat die Form bedeutende Auswirkung auf die Tragwirkung einer Konstruktion. Beiden sind die Herstellung und die Funktionalität, die ebenfalls eng mit der gebauten Form verknüpft sind, grundsätzliches Anliegen.

Nach einleitender Untersuchung einer Systematisierung von Tragwerken nach ihrer Form folgt ein historischer Rückblick auf die Verwendung von Formen in der Architektur. Geometrische, physikalische und freie Formen gehören heute zum grundlegenden Repertoire der Architektur. Während die Verwendung elementarer geometrischer und auch physikalischer Formen in der Geschichte weit zurückverfolgt werden kann, entwickelte sich der bewusste Entwurf freier Formen erst im 20. Jahrhundert. Er gewann durch die Verwendung der digitalen Medien an Dynamik, da mit diesen die Darstellung und Kommunikation jeder simplen und komplexen Form deutlich vereinfacht ist.

Die Betrachtung des Entwurfsprozesses in der Architektur mit besonderer Berücksichtigung der freien Formen ist der Kern der Arbeit. Verschiedene Arbeitsmethoden und Entwurfsziele von Architekten und Ingenieuren werden beschrieben. Alle Entwerfenden arbeiten mit Impulsen, die zu einer Form führen und mit individuellen Methoden, um sie zu entwickeln. Abschließend werden gebaute Projekte und ihre Tragsysteme präsentiert. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Entstehung freier Formen in der Architektur und ihre Positionierung in der Ordnung der Formfamilien.

Abstract

One of the most intrinsic mutual interests of architect and engineer is the concept of form. For the architect, form does not only allow the arrangement of function but is also fundamental to his artistic expression. To the engineer, the form has a considerable impact on the load bearing behaviour of a structural system. For both, buildability and functionality are basic concerns affected by the shape of a building.

After an introduction into the systematisation of structural systems, an overview over the use of form in architectural history is given. Geometrical, physical, and free forms are part of today's architectural repertoire. Whereas the use of elementary geometrical and physical forms has a long history, the deliberate design of free forms has evolved only in the 20th century. It gained momentum with the use of the new digital medium, through which the depiction and communication of any simple or complex geometry is significantly facilitated.

At the core of this research lies the consideration of the design process in architecture with a focus on the design of free forms. Various working methods and design goals of architects and engineers are described. All designers have impulses for and individual methods of evolving a shape. Finally, a range of built projects and their chosen structural solutions gives an insight into the realisation of free forms. The objective of this work is the study of free forms in architecture and their positioning in the organisation of form families.

Einleitung

Die Form in der Architektur

In unserer Umwelt sind Formen allgegenwärtig. Frei Otto schreibt: „Der Makro- und Mikrokosmos besteht aus unzähligen Objekten. Jedes Objekt hat ausnahmslos eine Form.“ [Otto 1988, 68]. Dabei bezieht er sich auf materielle Objekte, nicht auf immaterielle Begriffe wie Musik oder Kunst, Rechtswesen oder Soziologie. In dieser Arbeit werden die Form und ihre Bedeutung in einem noch weiter eingeschränkten Rahmen betrachtet, nämlich die Form in der Architektur und insbesondere ihre Relevanz an der Schnittstelle zwischen der Architektur und dem Ingenieurwesen. Das Studium der so genannten „freien“ Formen ist in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse, da sie sowohl aus ästhetischer als auch aus technischer Sicht ganz besondere Anforderungen an die Entwerfer, d.h. sowohl die Architekten als auch die Ingenieure, stellen.

In der Geschichte der Architektur gab es vielfach Versuche, aus dem existierenden Formenkanon auszubrechen und neuartige Formen zu bauen, um Gebäuden eine hervorgehobene Präsenz und Individualität zu verschaffen. Dieser Effekt kann ebenso je nach der Gestaltung der umgebenden Bebauung durch eine besondere Höhe, Massivität oder Materialität erreicht werden. Die resultierenden Bauwerke sind häufig von kultureller oder wirtschaftlicher Bedeutung. Beim Entwurf freier Formen werden fließend und dynamisch wirkende, unregelmäßige Geometrien geschaffen, die sich von streng geradlinigen Formen deutlich unterscheiden. In ihrer dynamischen Wirkung überraschen sie den Betrachter, da diese Wirkung mit der Beschaffenheit und der Beständigkeit von Bauwerken nicht im Einklang steht.

Die Herausforderung an die Architekten ist es, die äußerlich so individuellen Formen in den vorhandenen Kontext einzupassen. Die innere Aufteilung muss neu erfahren werden und ist im Gegensatz zu einer im orthogonalen Raster

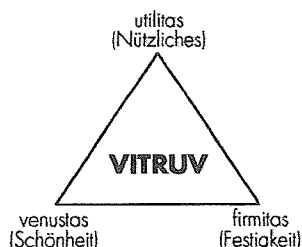


Abb. 0.1 Das Gleichgewicht im Bauwerksentwurf nach Vitruv.

entworfenen Form uneinheitlich. Von Seiten der Ingenieure ist die statische und geometrische Erfassung der Formen sehr aufwändig. Meist sind diese Formen statisch keine günstigen Formen, da sie in der Regel nicht mit einer optimalen Lastabtragung übereinstimmen. Aufgrund ihrer Unregelmäßigkeit sind sie so komplex, dass sie für den Herstellungsprozess mit großem Aufwand erarbeitet werden müssen, um wirtschaftlich produziert werden zu können. Dieses „Erarbeiten“ der Form in ästhetischer und konstruktiver Hinsicht erfordert die Auseinandersetzung des Planungsteams mit dem Entwurfsziel des Architekten ebenso wie mit der Tragwirkung der Form und den Prozessen der Herstellung. Die Darstellung der Beziehung zwischen diesen unterschiedlichen Anforderungen, die aus der Form resultieren, ist ein Ausgangspunkt für die Untersuchung der freien Formen.

Nach Vitruv ist im Bauwerk zwischen den drei Prinzipien Schönheit, Funktion und Festigkeit ein Gleichgewicht zu schaffen. Als Teil des Bauwerks unterliegt seine Form diesem Anspruch in gleichem Maße. Olaf Weber erweitert die Struktur Vitruvs und führt eine neue Unterteilung der Prinzipien in „Zweck“ und „Mittel“ ein [O. Weber 1994, 59]. Diese zwei Kategorien unterteilt er jeweils in „ideelle“ und „materielle“ Prinzipien. So entstehen nicht drei, sondern vier Komponenten, die praktischen Zwecke wie die Nutzung (materiell), die ästhetischen Zwecke wie die Schönheit (ideell) die technischen Mittel wie Baustoffe und Konstruktion (materiell) und die konzeptionellen Mittel wie Gestaltungsmittel (ideell).

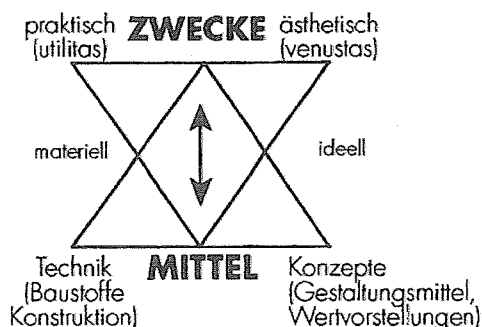


Abb. 0.2 Olaf Webers Interpretation des Gleichgewichts zwischen Zwecken und Mitteln sowie materiellen und ideellen Komponenten beim Bauen.

Dieser Unterteilung schreibt Weber allerdings kein Gleichgewicht zu, wie dies Vitruv forderte, sondern er ordnet sie hierarchisch. Der Zweck sei das wesentliche Element der Architektur, die Mittel hätten dienende Funktion, die aus den Zwecken abgeleitet sei und auf diese zurückwirke. „Worauf es aber ankommt, ist das Zurücknehmen der Technik zu einer voraussetzenden Bedingung, ist die Unterordnung dieser Mittel unter ein ganzheitliches architektonisches Konzept“ [O. Weber 1994, 59].

Wenn auch der Argumentation gefolgt werden kann, dass der Zweck des Bauens der Nutzen ist, so wird eine Unterordnung der Technik unter die Schönheit hier nicht eingeräumt. Die Funktion des Gebäudes ist vielmehr durch die Mittel Schönheit und Technik gleichermaßen bestimmt. Die ästhetische und die technische Komponente sind somit zwei Mittel zu einem gemeinsamen Zweck, einem durchdachten und abgestimmten Bauwerk für den Nutzer. Auf einer unteren Stufe stehen die Gestaltungsmittel, welche Grundlage für eine ästhetische Aussage sind, und die technischen Grundlagen, die zur Wahl einer Konstruktion führen.



Abb 0.3 Die historische Bedeutung der Form wird beispielsweise bereits an der kreisförmig angeordneten Anlage von Stonehenge deutlich.

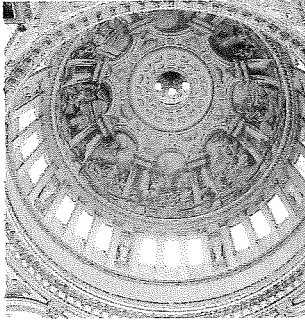


Abb 0.4 Blick in die innere Kuppel der St. Paul's Kathedrale von Christopher Wren, 1698.

Dies soll die beträchtliche Bedeutung der symbolischen und der ästhetischen Aussagekraft der Form in der Architektur nicht in Frage stellen. Formen dienen als Informationsträger und werden als solche bewusst eingesetzt, wie bereits am Beispiel des kreisförmigen Grundrisses der Anlage von Stonehenge deutlich wird. Ebenso wie der Kreis so galt auch die Kugel in der Architektur lange Zeit als „vollkommene“ und geometrische Form und wurde daher eingesetzt, um das Göttliche zu repräsentieren. Die sichtbaren Konturen der inneren und der äußeren Kuppel der St. Paul's Kathedrale in London von Sir Christopher Wren beispielsweise sind als Kugelabschnitte gewählt.

Die raumbildende Wirkung der Form nach innen und nach außen wird in der Architektur auch generell bewusst verwendet, um eine bestimmte Atmosphäre zu schaffen. Ein prägnantes Beispiel hierfür ist die zusammengesetzte Schalenform des Restaurants in Xochimilco in Mexiko von Felix Candela. Im Innenraum ergibt ihre Geometrie eine konvexe Kontur, die vom Nutzer als schützend wahrgenommen wird, während von außen die Dynamik der aufwärts strebenden Schalenränder dominant ist [J. Weber 1984].

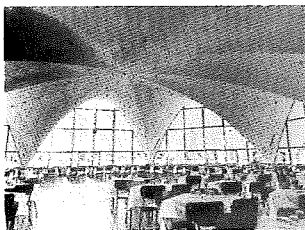


Abb 0.5 Innenansicht des Restaurants in Xochimilco von Felix Candela, 1958.

In der Designwissenschaft unterscheidet Rolf Küster [Küster 2001, 31] ebenfalls eine „innere“ von einer „äußeren“ Form, wobei er die innere Form ausschließlich als technische Funktion sieht, die äußere Form hingegen als Beziehung des Objekts zum Betrachter definiert. Während der Designer vornehmlich die äußere Form bestimme, schreibt Küster, präge der Ingenieur die innere Form. Diese Unterscheidung könnte als Trennung der Aufgabengebiete von Designer und Ingenieur ausgelegt werden, so wie auch in der Architektur der Architekt gerne für die Gestaltung verantwortlich gemacht wird, während der Ingenieur die Tragfähigkeit der Konstruktion sicherzustellen habe. In der Realität stellt sie die starke gegenseitige Abhängigkeit der beiden Planungsbeteiligten dar, wenn beide das Ziel verfolgen, ein abgestimmtes Objekt zu gestalten.

Diese Kooperation ist grundsätzlich unabhängig von der ästhetischen Präsenz der tragenden Konstruktion, wie mit dem Vergleich der St. Paul's Kathedrale mit dem Restaurant in Xochimilco verdeutlicht werden kann. Während die Form in Mexiko aus einer hauchdünnen Schicht Stahlbeton gebildet wird,



Abb 0.6 Die Konstruktion des Daches für den Lehrter Bahnhof in Berlin, 2006, ist Teil der ästhetischen Wirkung der Form.

deren Konstruktion von innen und außen sichtbar ist, besteht das Dach der St. Paul's Kathedrale aus drei einzelnen Kuppeln, einer sichtbaren und dekorierten inneren, sich selbst tragenden Kuppel und einer äußeren, repräsentativen Hülle mit einer schweren Laterne, die auf einer mittleren, nach statischen Gesichtspunkten geformten Kuppel aufliegt. Obwohl die tragende Konstruktion der St. Paul's Kathedrale versteckt ist, wogegen die Konstruktion der Betonschale als Gestaltungselement eingesetzt wird, war die konsequente Verbindung statisch-technischer und ästhetischer Aspekte für die Verwirklichung beider Projekte unverzichtbar.

Ziel und Systematik

Bei der Untersuchung der freien Formen ist die Entwicklung des Entwurfs und der gebauten Konstruktion in Abhängigkeit von der Beschreibbarkeit der Fläche von besonderer Relevanz. Daher werden in der vorliegenden Arbeit einerseits die geometrischen Grundlagen der Form erkundet und analysiert, andererseits die Konstruktion des Bauwerks dargestellt. Weniger der Zweck als die oben genannten Mittel sind hier thematisiert, so dass die Motivationen, die zu einer freien Form führen, und die Methoden, mit denen die Herstellung dieser Formen ermöglicht wird, den Kern der Arbeit bilden.

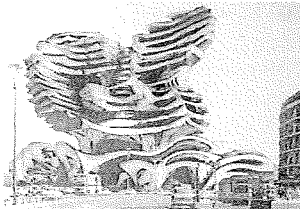


Abb 0.7 Entwurf für das Europacenter in Berlin von Engelbert Kremser, 1969.

Ziel ist es, ein Gerüst für die Einordnung der bisher undefinierten freien Formen zu schaffen. Die unregelmäßige Ästhetik der freien Formen könnte aufgrund der auf den ersten Blick nicht identifizierbaren Geometrie zu der Annahme führen, dass diese Formen willkürlich gewählt werden. Dies wird allerdings bei genauer Betrachtung der komplexen architektonischen und ingenieurtechnischen Entwurfsprozesse nicht bestätigt.

Die Analyse der freien Form erfordert eine Untersuchung sowohl der Gestaltung als auch des Tragverhaltens dieser geometrischen Figur. Diese Arbeit geht über eine rechnerische Betrachtung hinaus, denn während „die konstruktive Morphologie das Ziel verfolgt, die räumliche Anordnung von unter

statischem Gleichgewicht stehenden Strukturen (...) zu untersuchen und herzuleiten“ [Martins 1996, 2] ist es Ziel dieser Arbeit, die Entwurfs- und Herstellungsprozesse unterschiedlicher Formkategorien zu beleuchten, wobei die freien Formen einen besonderen Schwerpunkt der Ausführungen bilden. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen der architektonischen Form und der Tragwerksform untersucht. Eine Annäherung an dieses Ziel erfolgt anhand der folgenden Vorgehensweise.

Eine Übersicht über vorhandene Systematisierungen von Tragsystemen, die unter anderem in der Tragwerkslehre verwendet werden, in Kapitel 1 dient der Erkennung möglicher Einordnungskriterien. Die Verwendung dieser Grundlagen aus der Tragwerkslehre erfolgt aufgrund der engen Verknüpfung von Form und Tragwirkung. Die Betrachtung führt zu einer neuen Systematisierung der Tragsysteme mit dem Schwerpunkt der Formgebung unter Anwendung der Einteilung in geometrische, physikalische und freie Formen [Burkhardt 1988/1]. Projektbeispiele dienen der Veranschaulichung der Kriterien.

Die anschließende Betrachtung der historischen Zusammenhänge von Form und Konstruktion in Kapitel 2 thematisiert den Einfluss der wissenschaftlichen Kenntnisse auf die Formbildung von geometrischen, physikalischen und freien Formen in der Architektur. Die detaillierte Beschreibung von Beispielen der Architekturgeschichte zeigt, dass freie Formen bereits vor Anwendung der digitalen Entwurfswerkzeuge ausgeführt wurden und auf welche Weise diese Formen vom Entwurf in die Wirklichkeit umgesetzt werden konnten.

Entwurfsmethoden in der Architektur sind Thema des 3. Kapitels, wobei einerseits die Grundideen, die zu einem Entwurf führen, und andererseits die Entwurfswerkzeuge beschrieben werden. Die Anwendung von Computern beim Entwurf von Gebäuden eröffnet heute neue Methoden der geometrischen Formentwicklung und ihrer Verwirklichung. Aus der Gesamtheit der Entwicklung des Entwurfs leitet sich, abhängig von den verwendeten Arbeitsweisen, eine konsequente Unterscheidung freier Formen in verschiedene Kategorien ab.

Kapitel 4 zeigt eine weitere Stufe der Formbildung im Entwurf mit Schwerpunkt

auf der Arbeit des Ingenieurs. Es existieren seitens der Ingenieure individuelle Arbeitsweisen, die einen Entwurf bestimmen und zu einer schlüssigen Lösung führen. Aus schriftlichen Quellen, Gesprächen und Interviews wurden unterschiedliche Herangehensweisen von Ingenieuren bei der Entwurfsbearbeitung, die sich auf die Gestaltung des Gebäudes auswirken, zusammengetragen. Fragestellungen zu Motivation und Anforderungen, Zusammenarbeit mit den Architekten und verwendeten Hilfsmitteln führen näher an die Problemstellungen bei der Arbeit mit freien Formen heran.

In Kapitel 5 werden die technischen Grundlagen für die Konstruktion komplexer Formen näher beleuchtet. Hierfür sind das Material, seine spezifischen Eigenschaften und die Herstellung von Bauelementen mit unterschiedlicher Form von Bedeutung. In der Praxis verwendete Bauweisen werden anhand aktueller Beispiele beschrieben.

Eine systematische Aufführung von ausgewählten Gebäuden erfolgt chronologisch in Kapitel 6. Die in der Arbeit genannten Beispiele sind dort enthalten. Neben Baujahr, Architekt und Ingenieur sind die Formkategorien, die in Kapitel 3 aufgestellt wurden, und Details zur Konstruktionsweise mit den maßgeblichen Parametern genannt.

Bei der Auswahl der Projekte in der gesamten Arbeit ist ein Anspruch an Vollständigkeit nicht zu erfüllen, da in den letzten Jahren eine große Anzahl sehr interessanter Projekte, die als freie Formen eingestuft werden können, entstanden ist und da laufend neue Projekte hinzukommen. Es werden daher einige repräsentative Gebäude aufgeführt, die die theoretischen Ausführungen möglichst klar veranschaulichen und gleichzeitig einen Querschnitt durch die existierenden Lösungsansätze darstellen. Die Auswahl beinhaltet keine Wertung der Projekte. Eine Einschränkung hinsichtlich der betrachteten Gebäude besteht lediglich bezüglich ihres Maßstabes. Aus Sicht der konstruktiven Verwirklichung der Form sind mittlere Maßstäbe mit einer Spannweite zwischen etwa 6 m und 60 m von besonderem Interesse. Je größer die Spannweite der Konstruktion, umso effizienter muss diese hinsichtlich Form, Masse und Kraftfluss sein. Ausnahmen, die die Regel bestätigen, bestehen auch bei dieser vorgenommenen Begrenzung.

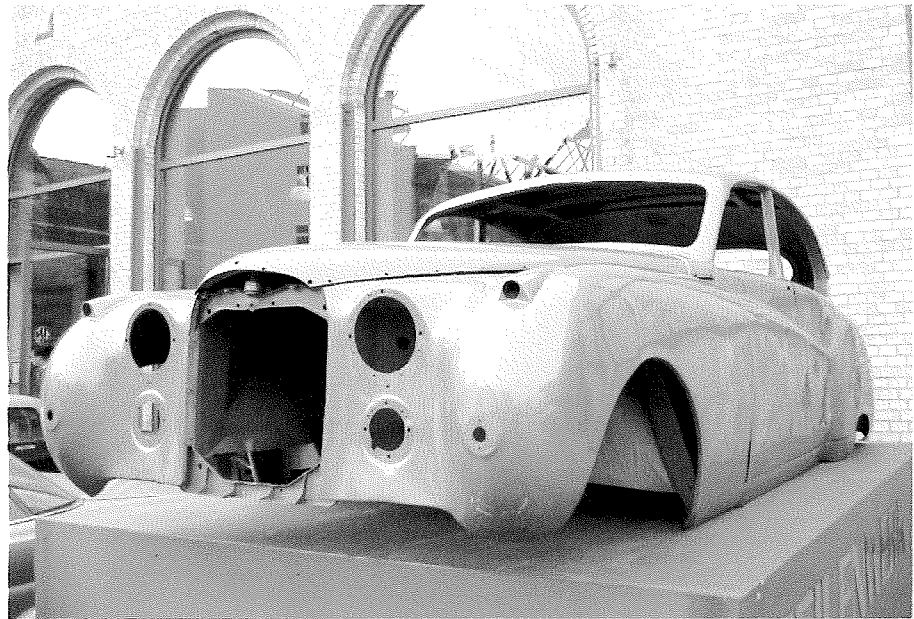


Abb 0.8 Die Formgebung im Automobilbau entsteht durch Kooperation von Designern und Ingenieuren.

„The development of new forms has (...) always been evolutionary rather than revolutionary“ („Die Entwicklung neuer Formen war immer eher evolutionär als revolutionär“) [Mainstone 1989, 283]. Die Kooperation der Planer, vor allem Architekt und Ingenieur, ist für die Entwicklung neuartiger Formen elementar, damit die „Schönheit“ und die „Technik“ so aufeinander abgestimmt werden, dass die Ausgewogenheit der beiden Komponenten beim Bauen für den Nutzer entstehen kann. Am Beispiel der freien Formen wird dies veranschaulicht.

Teil I Grundlagen

1 Systematik der Formen

Zwischen Form und Tragwerk besteht eine enge, wechselseitige Beziehung. Die gebaute Form wird einerseits mit einer tragenden Konstruktion hergestellt und aufrecht erhalten. Andererseits wird der Kraftfluss in der Konstruktion durch die Tragwerksform beeinflusst. Ein möglicher Ansatz, einer Definition der freien Formen näher zu kommen, besteht demzufolge über eine Einteilung der Tragsysteme. Eine Vielzahl von Beispielen für Tragwerkssystematisierungen ist in der Literatur enthalten. In diesem Kapitel wird eine Auswahl dieser Arbeiten und ihre Schwerpunkte bei der Unterscheidung verschiedener Merkmale vorgestellt.

- Nach der **Dimension** kann zwischen linearen, flächigen und räumlichen Konstruktionen unterschieden werden,
- nach dem **Aufbau** wird z.B. zwischen monolithischen Flächen oder Gitternetzen, isotropen oder anisotropen Konstruktionen unterschieden,
- nach der **Krümmung** können lineare Formen in gerade und gekrümmte, flächige Formen in ebene, einfach gekrümmte und doppelt gekrümmte Konstruktionen eingeteilt werden,
- nach ihrer **Formstabilität** werden biegesteife und biegeweiche Elemente eingeteilt,
- nach der **Beanspruchung** können Tragsysteme mit hauptsächlich Druck-, Zug- oder Biegebeanspruchungen unterschieden werden,

- und nach der **Formgebung** werden sie in geometrische, physikalische und freie Formen eingeteilt.

Diese Merkmale lassen sich so miteinander kombinieren, dass eine umfassende Systematisierung der Tragsysteme entsteht. Insbesondere ist die letztgenannte Kategorie, die Formgebung, von Interesse für diese Arbeit, da hier freie Formen bereits von anderen Formen abgegrenzt werden. Aus diesem Grund erfolgte eine Überprüfung ihrer Berücksichtigung in den aufgeführten Systematiken. Hierauf aufbauend wird eine eigene Systematisierung der Tragsysteme vorgeschlagen.



Abb 1.1 Die Form der linearen Bögen des Ludwig-Erhardt-Hauses in Berlin, 1988, an denen die Decken aufgehängt sind, prägt das Gebäude von Architekt Nicholas Grimshaw.

1.1 Untersuchung vorhandener Systematisierungen

Systematisierungen von Tragstrukturen finden sich in der Literatur insbesondere dort, wo der konzeptionelle Entwurf von Tragwerken behandelt wird, meist in Lehrbüchern für Architekten. Sie bieten eine Übersicht über das bekannte Repertoire von Tragsystemen, wobei die oben genannten Kategorien in unterschiedlicher Anordnung und Komplexität und mit verschiedenen Schwerpunkten miteinander kombiniert werden. Dabei können Systematisierungen des Gesamtsystems und der Teilsysteme, der Elemente, unterschieden werden.

Gesamtsysteme

Frei Otto präsentierte bereits 1962 eine allgemeine und damit sehr komplexe Systematik, die neben der Geometrie die Stofflichkeit, Formbeständigkeit sowie auch die ein- und mehrachsige Beanspruchung von gebauten und natürlichen Tragsystemen berücksichtigt [Otto 1962]. Neben der Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung nennt Otto die Drehung, Anziehung und Abstoßung als weitere Beanspruchungsarten. Er beschränkt sich nicht auf Systeme aus dem Bauwesen sondern nimmt u.a. Flugzeuge und Elektromotoren in seiner Systematik auf. Eine über diese Klassifizierung noch hinaus führende Betrachtung Ottos ist das Ergebnis der Untersuchungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL) in Stuttgart, aus denen auch die Serie „Form-Kraft-Masse“ hervorging. In der Veröffentlichung IL 24, „Prinzip Leichtbau“, werden Elemente und Tragsysteme mit dem Hauptunterscheidungsmerkmal der Effizienz klassifiziert, d.h. der Materialverbrauch für das Tragsystem wird der aufnehmbaren Belastung gegenübergestellt [Otto 1997].

Oskar Büttner und Erhard Hampe beschränkten sich auf die Tragwerke des Bauwesens, als sie in „Bauwerk, Tragwerk, Tragstruktur“ die Bildung

von Tragstrukturen mit Linien- und Flächenelementen [Büttner 1985] darstellten. Sie legen die Linien- und Flächenelemente als Grundeinheit fest und unterteilen sie in biegeeweiche und biegesteife sowie gerade und gekrümmte Einheiten. So ergibt sich eine Matrix mit einer Auswahl an Tragsystemen, die aus den Elementen aufgebaut sind. Weiterhin werden eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Tragstrukturen gebildet. Die Dimension, Formstabilität und die Krümmung der Elemente ist somit berücksichtigt, ebenso wie der Aufbau und die Dimension des Systems, nicht jedoch die Beanspruchung des Gesamtsystems.

		Tragstrukturelemente							
		Linienelemente				Flächenelemente			
		Biegeweich		Biegesteif		Biegeweich		Biegesteif	
		gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt
Tragstrukturen	1-Dimensionale Tragstrukturen								
	2-Dimensionale Tragstrukturen								
	3-Dimensionale Tragstrukturen								
		gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt	eben	gekrümmt	eben	gekrümmt

Abb 1.2 Die Matrix von Oskar Büttner und Erhard Hampe zeigt die Bildung von Tragstrukturen mit Linien- und Flächenelementen

Bei **Kurt Ackermann** erfolgt eine knappe aber übersichtliche Unterteilung der Tragwerke in linien- und flächenförmige, ebene und gekrümmte Tragsysteme, die entsprechend ihrer Beanspruchung systematisiert werden [Ackermann 1988]. In dieser Systematisierung liegt der Schwerpunkt auf den Systemen selbst und weniger auf den Elementen, aus denen die Systeme aufgebaut sind.

Dementsprechend unterscheidet Ackermann weder den Aufbau aus linearen oder flächigen Elementen noch die Steifigkeit der Elemente. Die Dimension und Krümmung der Tragsysteme dient als Unterscheidungskriterium. Die Beanspruchung des Tragwerks wird in Biegung mit Querkraft, Normalkraft und Hybrid unterschieden.

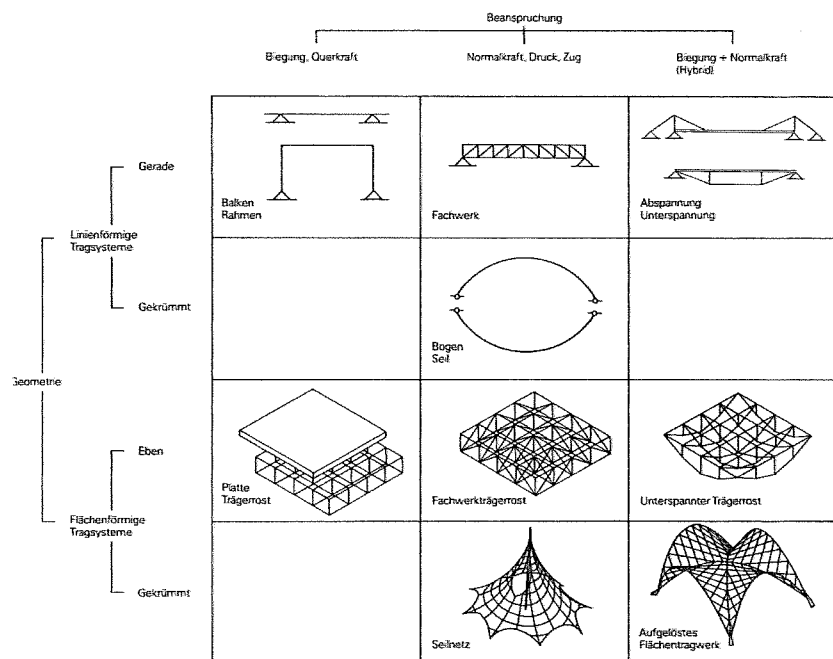


Abb 1.3 Die Matrix von Kurt Ackermann unterscheidet Dimension, Beanspruchung und Krümmung der Systeme.

Wilfried Führer zeigt in seiner sehr umfassenden Systematik neben den linien- und flächenförmigen Elementen die punkt- und raumförmigen Elemente. Er differenziert zusätzlich die innere und äußere Geometrie, wobei er die aus Linien aufgespannte von der homogenen Fläche und den Raum vom Körper unterscheidet [Führer 1995]. Aus den Elementen bildet er lineare, ebene und räumliche Tragwerke und schließt auch das Auflager und die Fügungen in seine Überlegungen mit ein. Zur

Beanspruchung nennt Führer zwei Krafrichtungen, eine in Richtung der Tragwerksdimension und eine senkrecht dazu, die Normalkraft bzw. Biegung verursachen, wobei er jedoch die Formstabilität der Elemente nicht unterscheidet.

GEOMETRIE			BEISPIELE VON TRAGELEMENTEN UND AUFNEHMBARE KRÄFTE				
FORM-DIMENSION	ÄUSSERE (FORM)	INNERE (STRUKTUR)	BEZUG DER TRAGELEMENTE	ANZAHL	KRAFTRICHTUNGEN SENKRECHT ZUR TRAGWERKS-DIMENSION (BIEGUNG)	KRAFTRICHTUNGEN IN TRAGWERKS-DIMENSION (NORMALKRAFT)	ANZAHL
0	PUNKT	-	0	-	 z.B. AUFLAGER, KNOTEN, GELENK	-	-
1	LEINIE	LEINIE	1	2	 BALKEN HEISST ALS HORIZONTALER STAB, STÜTZE HEISST ALS VERTIKALER STAB	1	
2.1	'FLÄCHE'	ANDERER WÄNDE	2	2	 ANDERER STÄBE, z.B. TRÄGERWERK	1	
		GERÄCHTETE WÄNDE			1	 'SCHEIBE' ALS STÄBE, z.B. TRÄGERWERK	2
		GERÄCHTETE WÄNDE			1	 'SCHEIBE' ALS GERÄCHTETEN STÄBE, z.B. RÄHREN	2
2.2	FLÄCHE	FLÄCHE	1	1	 PLATE, HEISST ALS DECKE, SCHEIBE, HEISST ALS WAND	2	
3.1	'RAUM'	ANDERER FLÄCHEN	0	0	 WÄNDE UND INNESEITIG PLATE, KOMBINATION ALS VERTIKALEN UND HORIZONTALEN SCHEIBEN	3	
		GERÄCHTETE FLÄCHEN			0	 GEFACETETE SCHEIBEN, z.B. PYRAMIDENARTIGES RAUMWERK	3
		GERÄCHTETE FLÄCHEN			0	 GERÄCHTETE SCHEIBEN, z.B. KREUZ-GEWÖLBE	3
3.2	KÖRPER	RAUM	0	0	 GESCHLOSSENER KÖRPER MIT DREI-SEITIGEN z.B. PYRAMIDE	3	

Abb 1.4 Die ausführliche und anschauliche Systematik von Wilfried Führer.

Stefan Polónyi präsentiert im Beton-Atlas eine Tragwerksübersicht, die als Verzweigungsstruktur aufgebaut ist [Kind-Barkausas 1995]. Mit jeder Verzweigungsstufe kommen Gliederungskriterien hinzu, wobei Polónyi allgemein von Tragwerken ausgeht, die entsprechend ihrer Dimension in Linien-, Flächen- und Körpertragwerke eingeteilt werden. Mit weiteren Kriterien werden gerade und gekrümmte Tragwerke unterteilt und dann die einzelnen Elemente eingefügt, aus denen die Tragsysteme bestehen. Mit der „vorwiegenden Beanspruchung“ legt Polónyi auch die Formstabilität der Elemente fest. Anschließend werden die Elemente wieder zu Tragsystemen mit unterschiedlicher Tragwirkung kombiniert.

Heino Engel systematisiert die Tragwerke hauptsächlich unter Berücksichtigung ihrer tragenden Eigenschaften in formaktive, vektoraktive, schnittaktive, flächenaktive und höhenaktive Tragsysteme [Engel 1999]. Bei diesem Ansatz werden Belastung und Geometrie in Zusammenhang gebracht. Die formaktiven und vektoraktiven Tragwerke beispielsweise tragen Lasten durch ihre Formgebung besonders effizient über Normalkräfte ab, während die schnittaktiven Tragsysteme das Gleichgewicht über die Aktivierung von Biegemomenten schaffen.

Teilsysteme

Die vorgenannte Auswahl von Systematisierungen ist hauptsächlich auf das Verständnis und die Analyse des Gesamttragwerks ausgerichtet. Weitere Untersuchungen gelten den Elementen selbst, aus denen die Tragsysteme gebildet werden.

Beispielhaft sei hier die Arbeit von **Gerd Becker** genannt, in dessen Systematik die Tragwerksteile und –elemente bauwerksunabhängig und materialbezogen [G. Becker 1983] eingeordnet sind. Die Elemente werden bei ihm in Einzelteile zerlegt und bezüglich der statischen Analyse differenziert.

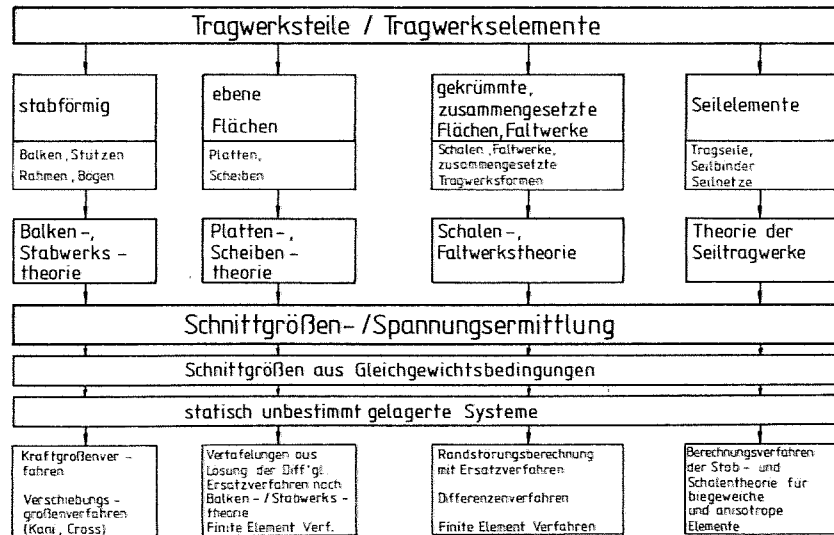


Abb 1.5 Einteilung der Elemente nach Gerd Becker.

Oskar Büttner und Erhard Hampe zeigen die Elemente ebenfalls in einer eigenen Systematik, wobei als Unterscheidungsmerkmal das Material und die Geometrie, d.h. sowohl Hauptgeometrie als auch Querschnittsgeometrie, genannt werden. Zudem werden Gefügeeigenschaften und Steifigkeit berücksichtigt [Büttner 1985].

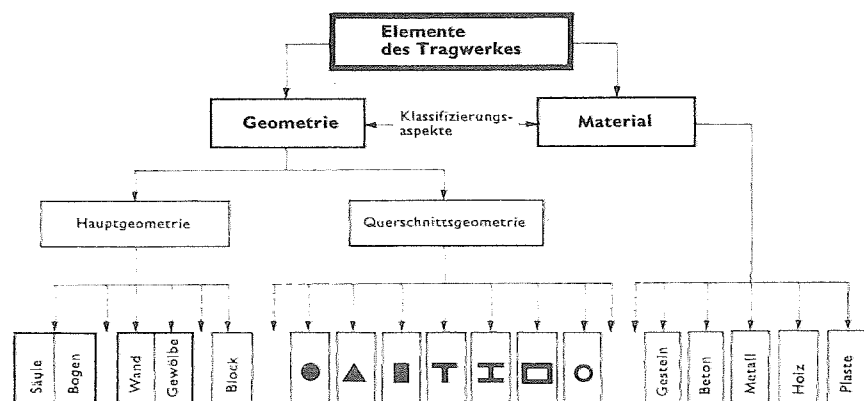


Abb 1.6 Einteilung der Elemente nach Büttner und Hampe.

Weitere Unterscheidungsmerkmale

Dimension, Formstabilität und die Unterscheidung von ebenen und gekrümmten Tragwerken sind die maßgeblichen Faktoren der gezeigten Beispiele für Systematisierungen. Die Beanspruchung und der Aufbau der Tragsysteme sind ebenfalls in mehreren der aufgeführten Beispiele berücksichtigt. Folgende Faktoren sind für die Tragsysteme nicht explizit einbezogen:

Baustoffe

Die Betrachtung des Materials ist für die Gesamtanalyse des Tragsystems insofern relevant, da jedes Material für eine bestimmte Geometrie oder Belastungsart tauglich oder weniger tauglich ist. So wird Holz aufgrund seiner Entstehungsweise primär stabförmig eingesetzt und kann parallel zur Faser Druck- und Zugkräfte übertragen. Als Holzwerkstoff wird das Holz außerdem zu Flächenelementen verarbeitet. Ebenso wird Stahl vorwiegend stabförmig und auch als zweidimensionaler Werkstoff zur Aufnahme von Zug- und Druckkräften gebraucht. Stahlbeton wird ebenfalls als Stab oder Fläche für die Übertragung von Zug und Druckkräften eingesetzt. Kunststoffe werden in dünnen Einzelfäden hergestellt und als stabförmige Profile analog zum Stahlbau eingesetzt, oder andernfalls verwoben und flächenförmig verarbeitet, wobei diese textilen Werkstoffe nur Zugkräfte aufnehmen. Mauerwerk aus natürlichen oder gefertigten Steinen wird aus kleinformatischen, in allen Dimensionen (Höhe, Breite, Länge) ähnlichen Elementen zu Pfeilern, Scheiben oder Gewölben zusammengesetzt und kann keine maßgeblichen Zugkräfte aufnehmen. Das Glas wird traditionell in Flächenelementen hergestellt, aber auch in stabförmiger Geometrie eingesetzt.

Eine Unterscheidung der Baustoffe in einer Tragwerkssystematik würde aufgrund der vielen Variationsmöglichkeiten zur Unübersichtlichkeit führen, so dass diese Differenzierung für die Form und Tragwirkung der Tragsysteme als untergeordnet betrachtet werden muss, allerdings separat in einer Betrachtung der Elemente wie bei Büttner und Hampe

sinnvoll ist.

Knotenausbildung

Die Auflagerbedingungen können einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragwirkung einer Struktur haben. Dies zeigt sich deutlich bei einem quer zu seiner Hauptachse belasteten, gekrümmten Stab auf zwei Stützen mit unterschiedlicher Auflagerung: Sind beide Auflager horizontal unverschieblich, so stellt sich im gekrümmten Stab eine Bogentragwirkung ein. Ist dagegen eines der Auflager horizontal verschieblich, so trägt der Stab als Balken. Eine auf vier Seiten gelagerte quadratische Platte trägt ihre Lasten zweiachsig ab, während sie einachsige Tragwirkung aufweist, wenn nur zwei gegenüberliegende Ränder gestützt sind. Der Lastabtrag ist wiederum anders, wenn die Platte punktgestützt ist. Auch bei den Schalen sind die Auflagerbedingungen maßgeblich für ihr Tragverhalten. Die Fügungen der Elemente untereinander können ebenfalls eine Differenzierung erfordern, da durch die Steifigkeit der Anschlüsse Kraftfluss und Tragverhalten des Systems mitbestimmt werden. Ein Vierendeelträger beispielsweise erhält seine Tragfähigkeit wegen fehlender Diagonalen erst über seine biegesteifen Knoten.

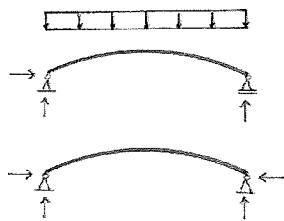


Abb 1.7 Der Balken (oben) trägt über Biegung, der Bogen unter symmetrischer Last über Normalkraft.

Da auch für diese Unterscheidung zahllose Variationen bestehen, ist es sinnvoll, die Randbedingungen als bekannt vorauszusetzen. Ein nach der Stützlinie geformter Bogen trägt nur dann als Bogen, wenn der Horizontalschub aufgenommen wird. Die nominelle Berücksichtigung von punktförmigen Elementen in der Systematik, ohne diese mit den Tragsystemen zu kombinieren, wie dies von Führer durchgeführt wurde, ist schlüssig.

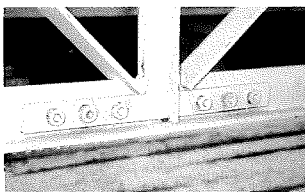


Abb 1.8 Die Ausbildung von Knoten und Auflagern hat Auswirkungen auf den Kraftfluss.

Vorspannung

Die Unterscheidung zwischen vorgespannten und schlaffen Systemen ist relevant, da auch biegeeweiche Elemente unter Vorspannung Druckkräfte aufnehmen können. Dies betrachtet beispielsweise Otto in „Zugbeanspruchte Konstruktionen“ bei seiner Erläuterung der Grundbegriffe und geht hier auch auf die Formbildung durch



Abb 1.9 Vorgespannte Seile der 1992 fertig gestellten Alamillo-Brücke in Sevilla, Spanien.

Vorspannung bei biegeweichen Elementen ein. „Das Einbringen einer Vorspannung, das „Vorspannen“ wird sinnvoll, wenn durch die Beanspruchung (durch Vorspannung, Anm. d. Autorin) im unbelasteten Zustand eine höhere Tragfähigkeit für den belasteten Zustand erreicht werden kann. Unsteife, nicht vorgespannte Konstruktionen, die im zugbeanspruchten Bereich als Seile, Seilnetze, Gewebe, Membranen und Raumnetze denkbar sind, haben im unbelasteten Zustand keine eindeutige Form. Die Konstruktionsform wird erst bei Belastung gebildet“ [Otto 1962, 14].

Folglich kann die Vorspannung als gegeben vorausgesetzt werden, wenn sie für den Lastabtrag oder die Formerhaltung des Tragsystems erforderlich ist.

Formgebung

Alle beschriebenen Systematisierungen zeigen die Tragstrukturen und ihre Elemente unter dem Aspekt ihrer unterschiedlichen Geometrien und Tragwirkungen. Die Formgebung selbst wird bei keiner der Systematiken berücksichtigt, vielmehr beschränkt sich die Unterscheidung der Krümmung auf die Begriffe „gerade“ und „gekrümmt“.

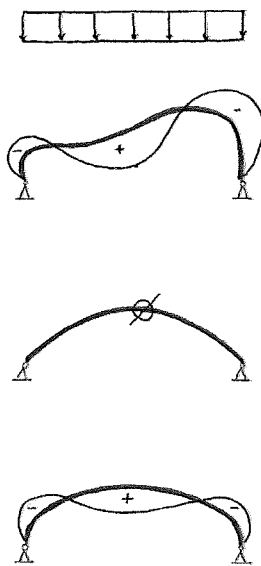


Abb 1.10 Unter Gleichlast erhält der Korbbogen (unten) Biegemomente ebenso wie der frei geformte Bogen (oben). Der Parabelbogen erhält nur Normalkräfte (Druck).

Es ist von Bedeutung, welchen Verlauf eine Krümmung nimmt, da sich die resultierenden Beanspruchungen deutlich unterscheiden können. Ein Parabelbogen beispielsweise, der nach der Stützlinie geformt ist, trägt eine konstante symmetrische Gleichlast über Druckkräfte ab. Ein Korbbogen mit gleicher Belastung und Spannweite erhält dagegen unter diesem Lastfall Biegemomente und erfordert eine größere Dimensionierung der Querschnitte. In einer beliebig, nicht der Belastung entsprechend gekrümmten Form werden ebenfalls Biegemomente hervorgerufen. Lediglich bei mehrachsiger lastabtragenden Flächen gilt, dass jede beliebige Krümmung effizienzsteigernd wirkt. Nur Formen mit flachen Bereichen oder Unstetigkeiten erhalten auch maßgebliche Biegemomente.

Die Aufnahme dieses Kriteriums ist demnach erforderlich, wenn eine qualitative Aussage zu den Tragsystemen erwünscht ist.

Hierfür ist eine Einteilung in geometrische, physikalische und freie Formen geeignet. Aufgrund der Fragestellung der vorliegenden Arbeit wurde diese Unterscheidung untersucht.

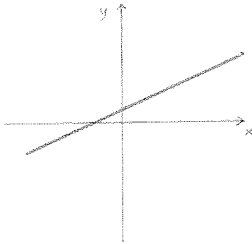


Abb 1.11 Darstellung einer Geraden mit $y=ax+b$ im kartesischen Koordinatensystem.

1.2 Formfamilien

Die Einteilung der Formen in drei Familien, also in geometrische, physikalische und freie Formen, ist in der Architektur gebräuchlich. Für die Unterscheidung von Formbildungsmethoden verwendet bereits Berthold Burkhardt diese Einteilung [Burkhardt 1988/1, 35]. Chris Williams unterscheidet ebenfalls „geometrische“, „physikalische“ und „skulpturale“ Formen [Williams 2000, 41] und Rainer Barthele „geometrisch definierte“, „aus statischen Gesetzmäßigkeiten generierte“ und „frei gestaltete“ Formen [Barthele 2002, 15].

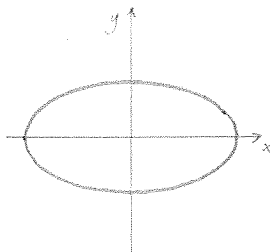


Abb 1.12 Darstellung einer Ellipse mit $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ im kartesischen Koordinatensystem.

Die geometrische Form ist eine grafische Darstellung mathematischer Funktionen. Einfache Funktionen sind z.B. die Gerade oder die Ellipse, die im kartesischen Koordinatensystem als Linien dargestellt werden. Durch Translation, Rotation oder Verzerrung von Punkten, Linien und Flächen im Raum oder einer Kombination dieser Algorithmen können unzählige Formen im Raum mathematisch beschrieben werden. Selbst simple Formeln können dabei zu sehr komplexen Figuren führen. Der Begriff „geometrisch“ wird umgangssprachlich vor allem für einfache Formen wie Kreise, Rechtecke oder Dreiecke, aber auch für komplexere Figuren wie beispielsweise die platonischen Körper oder die Sinuskurve verwendet.

Die physikalische Form ergibt sich aus der Forderung, einen kontinuierlichen Kraftfluss im Tragwerk zu ermöglichen, mit dem Ziel, Materialquerschnitte möglichst optimal auszunutzen und so effiziente, d.h. materialsparende Tragstrukturen zu errichten. Maßgeblich für die Definition als physikalische Form ist die Abhängigkeit der Gestalt von der eingprägten Belastung. Die Darstellung der Kraft als Vektor ist für diese



Abb 1.13 Bildung der physikalischen Form mit einer Gelenkkette.

Formen daher ein grundlegendes Prinzip. Zur Formfindung der physikalischen Formen kann die Stützlinie als Umkehrung der Seillinie dienen, da durch diese Umkehrung einer nur auf Zug beanspruchten, biegeweichen Konstruktion wie beispielsweise einer Kette ein Tragwerk entsteht, welches unter der gleichen äußeren Belastung nur auf Druck beansprucht wird. Möglich ist es auch, ein Tragwerk nach seinen inneren Beanspruchungen zu formen, so dass bei hoher Beanspruchung mehr, bei geringer Beanspruchung weniger Material eingesetzt wird. Der Begriff „physikalische Formen“ wird hauptsächlich in Fachkreisen verwendet, da dort die Grundlagen der Formentstehung aus Lasten und Tragen bekannt sind. Umgangssprachlich werden diese Formen hingegen mangels einer für den Laien erkennbaren Ordnung oder in Abgrenzung zu streng geometrischen Formen auch als freie Formen bezeichnet.

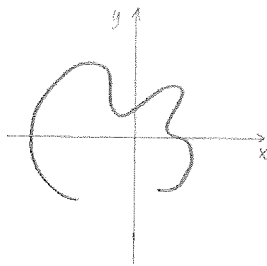


Abb 1.14 Darstellung einer nicht bestimmten Kurve im kartesischen Koordinatensystem.

Die freie Form weist in ihrer Geometrie zunächst keine erkennbare Ordnung auf. Sie kann aus komplex gekrümmten oder polygonalen, auch un stetigen Linien oder Flächen bestehen, die jedoch weder als geometrische Grundform noch aus statisch-/physikalischen Gesetzmäßigkeiten entstehen. Vielmehr ergeben sich die freien Formen aus einer dynamischen Formensprache, die sich von den bekannten, traditionellen Formen absetzen soll und sie erscheinen zunächst als undefinierte Form. Der umgangssprachliche Ausdruck ist für freie Formen sehr vielfältig: Die Bezeichnungen komplex, unregelmäßig oder irregulär gehen auf die geometrische Beschreibbarkeit ein, organische, fließende Formen oder einfach „Blob“ auf das äußere Erscheinungsbild und die Bezeichnung skulpturale oder freie Form bezieht sich auf eine so wahrgenommene intuitive Vorgehensweise des Entwerfenden.

Diese sehr generelle Definition der drei Formfamilien dient in diesem Abschnitt als Grundlage für eine neue Systematisierung und wird im Laufe der Arbeit überprüft und ergänzt.

In der folgenden Systematisierung wird die Formgebung der Tragsysteme sowie die Kriterien Dimension, Aufbau, Krümmung und Steifigkeit berücksichtigt. Vorab folgt eine Beschreibung und Definition der Begriffe

und eine Erläuterung der zugehörigen Grundlagen. Aufgrund der großen Komplexität des Themas ist es trotzdem erforderlich, gewisse Vereinfachungen und Verallgemeinerungen bei der Systematisierung der Tragsysteme zuzulassen.

1.3 Systematisierung der Elemente

Grundlage einer umfassenden und übersichtlichen Tragwerkssystematik ist die Unterscheidung der Elemente. Diese wird hier auf die Grundlagen, d.h. eine Einteilung nach Dimension und Steifigkeit, beschränkt.

Die Elemente unterscheiden sich entsprechend ihrer Ausdehnung im Raum als punktförmige, lineare, flächige oder räumliche Einheiten. Während für lineare Elemente gilt, dass eine der drei Dimensionen, die Länge, deutlich größer als die Breite und Höhe des Querschnitts ist, ist bei flächigen Elementen eine Dimension, beispielsweise die Höhe, deutlich kleiner als die Länge und die Breite. Räumliche Elemente haben eine ähnliche Ausdehnung in allen drei Dimensionen. Punktförmige Elemente sind hingegen als dimensionslos anzusehen. Elemente sind also die Einheiten, auf die ein System grundsätzlich zurückgeführt werden kann. Die weitere Zerlegung, wie ein Stab als I-Profil beispielsweise in Flansch und Steg oder eine Wandfläche in einzelne Mauersteine wird hier nicht weiter verfolgt.

Die **Formstabilität** stellt den Unterschied zwischen biegeweichen und biegesteifen Elementen her.

Biegeweiche Elemente wie beispielsweise das Seil haben eine sehr große Länge im Vergleich zu ihrer Dicke. Als „Seil“ kann auch ein Stahlprofil oder ein Holzbrett bezeichnet werden, wenn diese im Vergleich zu ihrer Länge ein geringes Trägheitsmoment aufweisen, also „weich“ sind. Bei Belastungen in Richtung der Systemachse sind biegeweiche Elemente grundsätzlich geeignet, Zugkräfte aufzunehmen. Eine Druckbeanspruchung können sie nur durch den Abbau vorhandener

Zugspannung im Lastfall Vorspannung aufnehmen. Im Fall einer nicht in Richtung der Systemachse wirkenden Belastung, welche Biegung hervorruft, nehmen biegeeweiche Elemente eine neue Form an, um die Last aufnehmen zu können, so dass sich über diese Form ein Kräftegleichgewicht einstellt. Ein Seil unter normal zur Systemlinie wirkender Einzellast weist unter jeder Einzellast einen Knick auf, unter Gleichlast nimmt es eine Parabelform an. Die Beanspruchbarkeit hat Auswirkungen auf die Form des Elementes und des Gesamtsystems, da die Form der biegeweichen Elemente nur bedingt festlegbar ist und durch Maßnahmen wie Vorspannung fixiert werden muss.

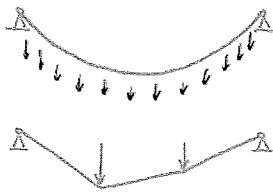


Abb 1.15 Das biegeeweiche Seil verändert unter Belastung seine Form. Unter Eigenlast bildet sich die so genannte Seil- oder Kettenlinie unter Einzellasten ein polygonaler Verlauf.

Biegesteife Elemente bestehen aus einem zug- und druckfesten Material und weisen Querschnittswerte auf, die eine Aufnahme von Biegemomenten möglich machen. Die Formänderung der biegesteifen Elemente unter Belastung ist relativ gering und wird in dieser Aufstellung vernachlässigt. Der Übergang zwischen den Kategorien biegeweich und biegesteif kann fließend sein.

Eine weitere Unterscheidung der **Beanspruchung** im Element zwischen Normalkraft und Biegemoment wird im Rahmen der Elementbetrachtung nicht vorgenommen, da die Beanspruchung ausschließlich von den äußeren Bedingungen und damit von der Lage des Elements im System abhängt. Da diese Belastungen allerdings unterschiedliche Reaktionen in den Tragelementen hervorrufen, ist hier eine kurze Erläuterung zum Kraftfluss im Element erforderlich.

Bei ausschließlicher Beanspruchung durch Normalkräfte ergibt sich eine gleichmäßige Spannungsverteilung, so dass eine höhere Ausnutzung des Materials bewirkt wird als bei einer Biegebeanspruchung. Hier ermöglicht die Spannungsverteilung im Querschnitt im elastischen Bereich zwischen den maximal beanspruchten Randfasern keine volle Ausnutzung des Querschnitts.



Abb 1.16 Der Spannungsverlauf im Balken bei mittiger Druckkraft und unter Biegemoment ohne Normalkraft. Alle Fasern sind bei mittiger Normalkraft gleichmäßig beansprucht. Unter Biegung sind nur die Randfasern extrem beansprucht.

Unter Normalkraftbeanspruchung ist weiterhin zwischen Zug- und Druckbeanspruchung zu unterscheiden, da die Beanspruchbarkeit des druckbelasteten Elementes aufgrund des Stabilitätsversagens auch von der Schlankheit abhängt, somit die volle Ausnutzung des Materials nur bei gedrunenen Elementen möglich ist. So kann ein mit Zugkraft belasteter Stab deutlich schlanker ausgeführt werden als ein Stab mit gleich großer Druckkraft. Als Biegestab wird die Dimension aufgrund der eingeschränkten Ausnutzung des Querschnitts noch größer.

Diese zunächst nur statisch relevanten Unterschiede zwischen einer Normalkraft- und einer Biegebeanspruchung führen zu einer Reaktion bei der Gestaltung. Um besonders schlanke und materialeffiziente Tragsysteme zu entwerfen, ist die Berücksichtigung des Kraftflusses in den Elementen wesentlich.

Die einfache Unterscheidung der Elemente führt zu einer Systematisierung, die in der folgenden Tafel dargestellt ist. Die einzelnen Felder werden anschließend erläutert.




	Punktförmige Elemente		Lineare Elemente		Flächige Elemente		Räumliche Elemente	
Grund- element	▪							
Steifigkeit	Weich	Steif	Biege- weich	Biege- steif	Biege- weich	Biege- steif	Weich	Steif
Beispiele	Gelenki- ges Lager	Einspa- nnung	Seil	Pendel- stab Balken Bogen Rahmen	Membran	Platte Scheibe Schale	Elastische Bettung	Funda- ment

Abb 1.17 Tafel der Elemente

1.3.1 Lineare biegeeweiche Elemente

Ein biegeweiches Element, z.B. ein Seil, kann im Tragsystem nur als Zugelement eingesetzt werden, wenn es nicht vorgespannt ist. Für die Aufnahme von Biegebeanspruchungen ist es ungeeignet. Es zeichnet sich durch große Materialeffizienz aus und wird daher besonders häufig im Leichtbau eingesetzt.

1.3.2 Lineare biegesteife Elemente

Biegesteife Elemente können Druckkräfte und Zugkräfte aufnehmen. Der Stab, der Balken und der Rahmen als gerade Elemente zählen ebenso zu dieser Kategorie wie der Bogen. Diese Elemente definieren sich im Gegensatz zu den biegeweichen Elementen über das Widerstandsmoment ihres Querschnitts. Elemente, die aus druck- aber nicht zugfesten Materialien bestehen, müssen vorgespannt werden, um eine Biegespannung übertragen zu können. Dies geschieht z.B. bei

Mauerwerkswänden, die durch Auflast unter Druckspannung stehen, welche dann als Zugkraft abgebaut werden kann.

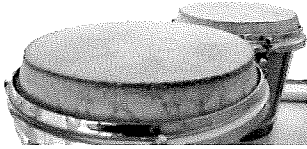


Abb 1.18 Das Trommelfell ist eine eben gespannte Membran.

Mit linearen Elementen können sowohl lineare Tragsysteme, Flächen- oder Raumtragwerke gebildet werden.

1.3.3 Flächige biegeeweiche Elemente

Biegeeweiche Flächenelemente werden als ebene Form im Bauwesen selten verwendet, da sie eine sehr große Vorspannung benötigen, um ihre Form erhalten zu können. Sie erhalten ihre Steifigkeit entweder durch die gegensinnige Krümmung und zusätzliche mechanische Vorspannung oder als meist gleichsinnig gekrümmter Pneu durch die Differenz zwischen Innen- und Außendruck.

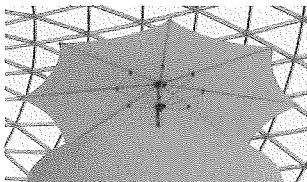


Abb 1.19 Eine Membran mit doppelt gegensinniger Krümmung als Schirmkonstruktion.

1.3.4 Flächige biegesteife Elemente

Die biegesteifen, ebenen Elemente werden je nach Belastung als Scheiben oder Platten bezeichnet, gekrümmte Elemente, die ihre Lasten räumlich abtragen, als Schalen oder Gewölbe. Der Lastabtrag erfolgt im Regelfall zweiachsig.

Mit einem Flächenelement können flächige und räumliche Konstruktionen gebildet werden.



Abb 1.20 Biegesteife flächige Elemente für eine Decke aus Stahlbeton, FU Berlin.

1.3.5 Punktförmige und räumliche Elemente

Punktförmige und räumliche Elemente – bei Führer als Punkt bzw. Körper bezeichnet [Führer 1995] – haben in allen Dimensionen ähnliche Abmessungen. Räumliche Elemente können wie im Mauerwerksbau zu Stäben und Flächen zusammengesetzt werden.

1.4 Systematisierung der Tragsysteme nach ihrer Formfamilie

Die Systematisierung der Tragsysteme erfolgt als Matrix. Der Einordnung in die Hauptkategorien „Geometrische Formen“, „Physikalische Formen“ und „Freie Formen“ folgt die jeweilige Differenzierung in „ebene“ und „gekrümmte“ Systeme. Durch die Trennung der ebenen und gekrümmten Systeme entsprechend der Hauptkategorien wird auf die unterschiedliche Ausbildung der Krümmungen bei der Formgebung Rücksicht genommen. Obwohl nach dem Kriterium Beanspruchung nicht explizit sortiert wird, ergibt sich diese teilweise durch die Formgebung, da die Krümmung sich wie beschrieben auf das Tragverhalten der Konstruktion auswirken kann. Eine Krümmung kann auch durch ein Polygon angenähert werden.

Die Begriffe „gerade“, „eben“ oder „gekrümmt“ beziehen sich auf die geplante Systemachse der Tragstruktur am unverformten Tragwerk. Mit der weiteren Unterscheidung in „lineare“ und „flächige“ Elemente wird auf die oben bereits durchgeführte Einteilung der Elemente Bezug genommen. Die Kategorien „Lineare Konstruktion“, „Flächige Konstruktion“ und „Räumliche Konstruktion“ verweisen hingegen auf die Unterschiede in der Geometrie und Ausdehnung, aber auch auf unterschiedliche Formen des Lastabtrags im System. Durch den mehrachsigen Lastabtrag wird die Effizienz des Tragwerks gesteigert, ebenso durch die räumliche Tragwirkung des Systems. Auf Biegung beanspruchte lineare und flächige Tragsysteme können eine physikalische Formgebung aufweisen, wenn beispielsweise ein Träger nach der Momentenlinie geformt ist, um das vorhandene Material möglichst effizient zu nutzen. Diese lokale Formgebung wird in der folgenden Einteilung nicht unterschieden.

Von den eingangs genannten Kriterien werden also Dimension, Aufbau, Krümmung und Entstehung in dieser Kategorisierung eingesetzt. Die Steifigkeit wird nur für die Elemente betrachtet. Es folgt die Beschreibung der Tabelle.

Abb. 1.21 Einordnung der Tragsysteme		1 Lineare Elemente			2 Flächige Elemente		
		1 Lineare Konstruktion	2 Flächige Konstruktion	3 Räumliche Konstruktion	1 Flächige Konstruktion	2 Räumliche Konstruktion	
1 Geometrische Formen	1 gerade/eben	1111 Vorgespanntes Seil, Stab, Balken, Rahmen	1112 Unterspannte Träger, Fachwerkträger, Trägerrost	1113 Raumfachwerk, Tensegrity, Unterspannter Trägerrost	1121 Eben gespannte Membran, Scheibe, Platte	1122 Faltwerk	
	2 gekrümmt	1211 Gekrümmte Balken, Rahmen, Bögen	1212 Fachwerkträger, Trägerrost	1213 Gekrümmtes Raumfachwerk oder Gitternetzkonstruktion	1221 Gekrümmte Platte oder Scheibe, Kurze Tonne	1222 Einfache Krümmung: Lange Tonnen Synklastische Krümmung: Kuppeln, Torus Antiklastische Krümmung: Sattelflächen, z.B. HP, Torus, Minimalflächen	
2 Physikalische Formen	1 gerade/eben	2111 Gespanntes Seil, Pendelstab, Bock	2112 Ebene Baumstrukturen	2113 Räumliche Baumstrukturen	2121 Eben gespannte Membran	2122 Faltwerk	
	2 gekrümmt	2211 Seil, Kette, Bogen nach Stützlinie	2212 Parallele Scharen von Seilen oder Bögen	2213 Gitterschalen aus Hängeform, Seilnetze	2221 Kurze Tonne	2222 Einfache Krümmung: Lange Tonnen und Gewölbe nach Kettenlinie Synklastische Krümmung: Hängeformen Antiklastische Krümmung: Sattelflächen, Membrane, Minimalflächen	
3 Freie Formen	1 gerade/eben	3111 Frei geformte Stabzüge und Rahmen	3112 Parallele Scharen von frei geformten Stabzügen und Rahmen	3113 Frei geformte Raumfachwerke	3121 Frei gefaltete Platte oder Scheibe	3122 Frei geformtes Faltwerk	
	2 gekrümmt	3211 Frei gekrümmter Balken, Bogen	3212 Frei gekrümmter Fachwerkträger oder Trägerrost	3213 Frei gekrümmtes Raumfachwerk oder Gitternetzkonstruktion	3221 Frei gebogene Platte oder Scheibe	3222 Fileßformen Frei geformte massive Platten mit einfacher, synklastischer und antiklastischer Krümmung	

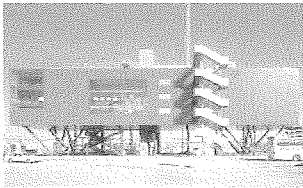


Abb 1.22 Eine ebene geometrische Form wurde für die Infobox am Potsdamer Platz gewählt.

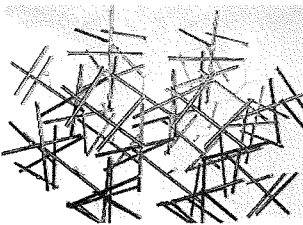


Abb 1.23 Tensegrity Systeme bestehen aus Druck- und Zugstäben, die im Raum zueinander so angeordnet sind, dass die Druckstäbe einander nicht berühren.

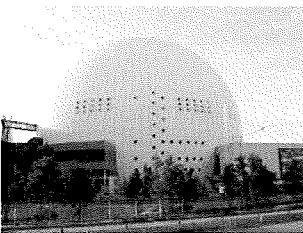


Abb 1.24 Die Kugelform wurde für die Globen Arena in Stockholm verwendet.

1.4.1 Gerade und ebene geometrische Formen (Zeile 1-1 der Tabelle)

Alle geraden und ebenen Tragsysteme können als geometrische Formen definiert werden. Gerade und lineare Elemente bilden gerade und lineare Systeme wie Stützen und Balken, ebenso wie ebene, flächige Konstruktionen, die ihre Last linienförmig, einachsig in die Auflager abtragen, wie z.B. Rahmen, unterspannte Träger oder Fachwerkträger. Eine Translation der linearen, geraden Elemente entlang einer geraden Leitlinie und orthogonal dazu bildet ebene horizontale Flächentragwerke wie z.B. den Trägerrost und führt zu einem Lastabtrag in zwei Richtungen. Eine Addition in die dritte Dimension ergibt z.B. das Raumfachwerk. Tensegrity Systeme sind beispielsweise räumliche Tragwerke aus linearen Elementen.

Aus ebenen Flächen gebildete Tragsysteme beinhalten ebene, gespannte Membranen, Wandscheiben, Platten und Plattensysteme, die als räumliche Konstruktion z.B. zu Faltenwerken zusammengesetzt sein können.

1.4.2 Gekrümmte geometrische Formen (Zeile 1-2)

Es existiert eine Vielzahl an gekrümmten Formen, deren Längsachse oder Fläche mit stetigen quadratischen Funktionen oder Polynomen höherer Ordnung beschrieben werden können.

Gekrümmte lineare Konstruktionen sind gekrümmte Balken, Bögen und Rahmen, deren Lastabtrag entlang einer eindimensionalen Systemachse erfolgt. Mit linearen Elementen entstehen als flächige Konstruktionen beispielsweise Fachwerke oder in der horizontalen Ebene Trägerroste. Stabzüge mit einer ausreichend kleinteiligen polygonalen Anordnung mehrerer Einzelelemente können als gekrümmte Systeme betrachtet werden.

Über definierte Bildungsgesetze, wie die Translation, die Rotation, die Streckung bzw. Kontraktion oder einer Kombination hieraus werden aus der Addition von geraden oder gekrümmten Linien auf mathematischem Weg gekrümmte Flächen gebildet, die aus linearen oder flächigen Elementen bestehen können. Nach ihrer Tragwirkung sind flächige und räumliche Konstruktionen zu unterscheiden.



Abb 1.25 Die einfach gekrümmte Tonne wird durch Translation einer gekrümmten Erzeugenden an einer geraden Leitlinie erzeugt.

Neben der Kugel lässt sich eine unendliche Vielfalt an Formen allein durch Translation oder Rotation bilden. Ein besonderes Unterscheidungsmerkmal bildet bei Flächen die Gaußsche Krümmung K , von Sören Stephan als „grundlegende Klassifizierung“ bezeichnet [Stephan 2004, 562]. In jedem Punkt der Fläche wird die Krümmung $\kappa = 1/r$ in zwei orthogonalen Richtungen bestimmt und mit der Gaußschen Krümmung mit $K = \kappa_1 \times \kappa_2$ aufeinander bezogen. Sind die Einzelkrümmungen gleichsinnig (synklastisch), ergibt sich eine positive Gaußsche Krümmung, bei gegensinnigen (antiklastischen) Einzelkrümmungen eine negative Gaußsche Krümmung. Ist die Fläche nur entlang einer Achse gekrümmt, so dass $\kappa_1 = 0$ und $\kappa_2 \neq 0$, entspricht das einer Gaußschen Krümmung $K = 0$. Einige Flächen wie der Torus weisen sowohl synklastische als auch antiklastische Krümmungen auf.

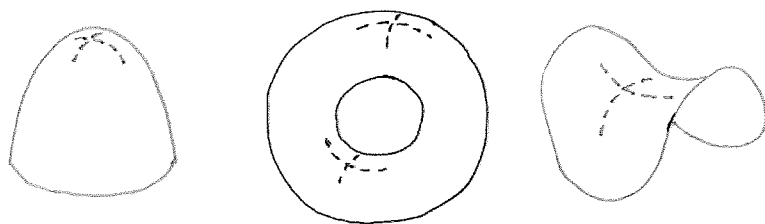


Abb 1.26 Doppelt gekrümmte Flächen: Die doppelt einsinnig gekrümmte Kuppel entsteht durch Rotation einer gekrümmten Linie um eine Achse. Der Torus ist eine Rotationsform und weist sowohl gleichsinnige als auch gegensinnige Krümmungen auf. Die Sattelform ist doppelt gegensinnig gekrümmt.

Auch doppelt gekrümmte Flächen können wie die Tonne durch Geraden erzeugt werden. Diese bilden die Gruppe der so genannten Regelflächen.

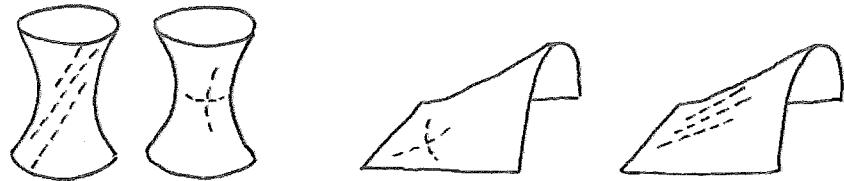


Abb 1.27 Hyperboloid und Konoid gehören zu den Regelflächen. Beide Flächen lassen sich durch Geraden generieren.

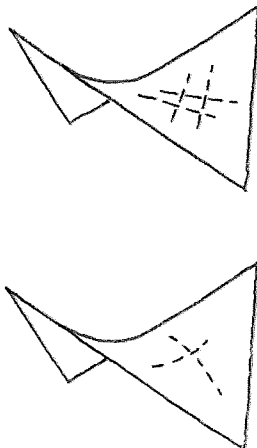


Abb 1.28 Das hyperbolische Paraboloid, kurz als Hypar oder HP bezeichnet, ist eine Sonderform des Konoids. Die doppelt gegensinnig oder antiklastisch gekrümmte Fläche lässt sich sowohl durch Geraden als auch mit Parabeln erzeugen.

Die drei markantesten Beispiele für diese Geometrie sind neben der Tonne das Hyperboloid, das Konoid und das hyperbolische Paraboloid. Das Hyperboloid wird gebildet, indem eine windschief zu einer Achse liegende Gerade um diese rotiert wird. Das Konoid entsteht durch Verschiebung einer geraden Erzeugenden auf zwei Leitlinien, wobei eine gerade, die zweite gekrümmt ist. Das hyperbolische Paraboloid (HP) ist eine Sonderform des Konoids mit zwei geraden, windschief zueinander liegenden Leitlinien. Gleichzeitig kann das HP durch die Translation einer Parabel entlang einer zweiten Parabel erzeugt werden. Aufgrund dieser Eigenschaft, aus geraden Stäben geformt werden zu können, haben die Regelflächen eine besondere Bedeutung im Bauwesen.

Wenn die Erzeugende während der Translation ihre Form ändert, ergibt dies eine komplexere Form, die jedoch mathematisch weiterhin beschreibbar ist. Hierzu gehören beispielsweise die Wellenformen, bei denen wiederum synklastische und antiklastische Krümmungen auftreten können.

Eine bemerkenswerte Eigenschaft der Translationsflächen ist, dass sie auch bei gekrümmten Leitlinien und Erzeugenden mit ebenen Scheiben belegt werden können, da durch den Generierungsprozess vier nebeneinander liegende Punkte der Fläche in einer Ebene liegen. Dies

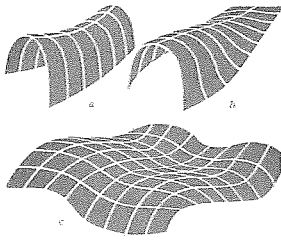


Abb 1.29 Erzeugung von Flächen durch Translation einer veränderlichen Erzeugenden.

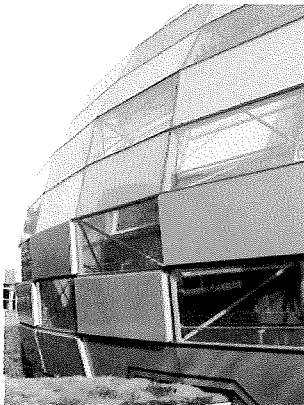


Abb. 1.30 Die Hülle der Philologischen Bibliothek als Translationsfläche mit ebenen Scheiben.

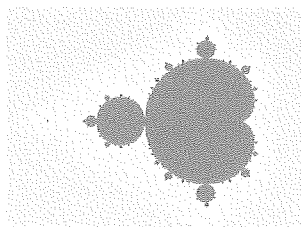


Abb 1.31 Benoît Mandelbaums so genanntes „Apfelmännchen“.

gilt für Translationsflächen mit konstanter Erzeugender sowie solchen, wo die Erzeugende ähnlich verzerrt wird. Bei frei geformten Flächen ist die Verwendung ebener Scheiben nur durch eine Aufteilung in Dreiecksmaschen möglich. Als Translationsflächen wurden beispielsweise die Überdachung des Hauptbahnhofs von gmp in Berlin und die Neue Philologischen Bibliothek von Foster, deren Schnitte ähnliche Korbbögen darstellen, entworfen. Die ebenen Scheiben bilden, wie auch bei einer Aufteilung in Dreiecksmaschen, eine facettenartige Oberfläche der gekrümmten Hülle.

Die Grundrissform eines Tragwerks wird mit der gewählten Funktion und dem Bildungsgesetz festgelegt und ist daher nicht frei wählbar. Umgekehrt lässt sich für eine festgelegte Grundrissform nicht jede beliebige geometrische Form als Erzeugende für die geplante Gebäudeform wählen, es sei denn, die Ränder der Form werden entsprechend des Grundrisses angeschnitten.

In der Mathematik können mit einfachen Algorithmen komplexe Formen entstehen, die weit über die bekannten Grundformen hinausgehen und deren Ordnung nicht mehr ohne weiteres verstanden oder erfasst werden kann. In der Wissenschaft wurde für solche Phänomene die Chaos-Theorie entwickelt, die sich unter anderem auch mit Formbildungen beschäftigt. Ein Beispiel hierfür sind die Fraktale, natürliche oder künstliche Gebilde mit einem hohen Grad an Selbstähnlichkeit [www.wikipedia.org 01/2007], was bedeutet, dass einzelne Abschnitte der Figur der Gesamtfigur ähneln. Besonders bekannt ist das „Apfelmännchen“ von Benoît Mandelbrot (*1924), der den Begriff „Fraktal“ auch prägte. Der Pythagoras-Baum entsteht aus einem rechtwinkligen Dreieck, dessen drei Seiten entsprechend des Satzes von Pythagoras quadriert werden. Jedem der Quadrate lässt sich ein weiteres rechtwinkliges Dreieck zuordnen, dessen übrige zwei Seiten wiederum quadriert werden, woraus sich dann eine baumartige Figur entwickelt, deren einzelne Äste dem Stamm ähnlich sind.

Auch Bäume in der Natur oder das System von Adern und Venen im

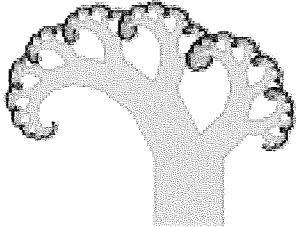


Abb 1.32 Der Pythagoras-Baum wird aus rechtwinkligen Dreiecken und Quadraten generiert.

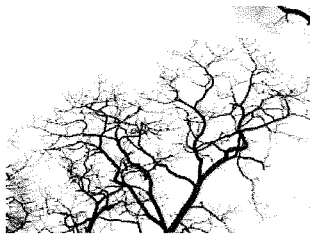


Abb 1.33 Die natürliche Verzweigung eines Baumes weist die fraktale Eigenschaft der Selbstähnlichkeit auf.

Körper weisen Eigenschaften der Selbstähnlichkeit auf. Eine Ordnung ist selbst bei streng auf mathematischen Grundlagen beruhenden Fraktalen nicht mehr notwendigerweise zu erkennen.

1.4.3 Gerade und ebene physikalische Formen (Zeile 2-1)

Gerade und ebene physikalische Formen werden hauptsächlich in Richtung ihrer Längsachse belastet, da in diesem Fall die Form dem Kraftfluss folgt, wie bei einem gespannten Seil oder einem Pendelstab.

Zweidimensionale Konstruktionen wie Fachwerke oder Raumtragwerke könnten zwar als physikalische Form gelten, da die einzelnen Elemente hauptsächlich auf Druck und Zug beansprucht werden. Sie sind allerdings nur begrenzt physikalisch bildbar und wurden vielmehr im Rahmen technischer Optimierungsansätze entwickelt.

1.4.4 Gekrümmte physikalische Formen (Zeile 2-2)

Die Steigerung der Effizienz eines Tragsystems, die durch die Krümmung erreicht werden kann, wird besonders mit den physikalischen Formen genutzt. Die Kettenlinie bzw. die Seillinie, deren Form über die gegebene Belastung bestimmt wird, ist ein Grundelement der physikalischen Form. Dementsprechend ergibt sich für lineare Elemente die günstigste Form für den Lastabtrag aus der Seillinie oder ihrer Spiegelung, der Stützlinie. Für flächige Elemente gelten ebenso aus der Hängeform erarbeitete Formen als statisch günstigste.

Die ideale physikalische Form ist so konstruiert, dass sie die entstehenden Lasten hauptsächlich über Normalkräfte abtragen kann. Daher richtet sich die Form auch grundsätzlich nach der auftretenden Belastung. Zwar lassen sich auch physikalische Formen mathematisch beschreiben, aber sie entstehen nicht aus den mathematischen Vorgaben sondern nach den physikalischen Gesetzen des Gleichgewichts. Im

Unterschied zu den elementaren geometrischen Formen lassen sich physikalische Formen aus unterschiedlichsten Grundrissformen generieren.

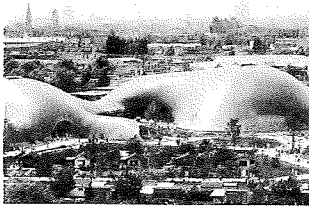


Abb 1.34 Die Form der Multihalle in Mannheim wurde über die Hängeform generiert.

Gekrümmte lineare Konstruktionen sind entsprechend der Zeile 1-2 Seile, und Bögen, die nach der auftretenden Belastung geformt sind. Ihre parallele Addition ergibt Flächen, die ihre Lasten weiterhin linear abtragen. Konstruktionen aus flächigen Elementen sind als physikalische Form gekrümmt und haben damit eine räumliche Tragwirkung. Eine Ausnahme bildet beispielsweise die kurze Tonne, die ihre Lasten ebenfalls in parallelen Schnitten linear abträgt.

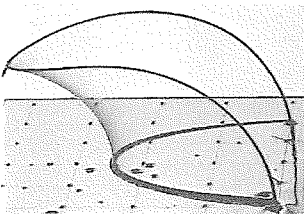


Abb 1.35 Seifenhäute nehmen die Form von Minimalflächen an.

Eine besondere Form der gekrümmten physikalischen Flächen stellen die Minimalflächen dar. Minimalflächen haben die mathematische Eigenschaft einer mittleren Krümmung von Null in jedem Punkt, d.h. es sind Sattelflächen mit gleich großen, entgegengesetzten Krümmungen. Gleichzeitig ist die Spannung in der Fläche in jedem Punkt in allen Richtungen gleich groß. Seifenhäute nehmen unter allen Randgeometrien die Minimalform an. Frei Otto experimentierte mit Seifenhäuten, um möglichst effiziente Formen zu finden. Wird nämlich das Material, aus dem die Haut gebildet wird, in alle Richtungen und an jedem Punkt gleich beansprucht, so folgt daraus eine sehr effiziente Nutzung des Materials. Aufgrund ihrer eindeutigen mathematischen Definition könnten die Minimalflächen auch zu den geometrischen Formen gehören, allerdings aufgrund ihrer Komplexität nicht zu den elementaren geometrischen Formen. Wegen ihrer überwiegenden Anwendung in der Architektur als effiziente Konstruktionsform im Membranbau wird sie als physikalische Form eingeordnet.

1.4.5 Gerade und ebene freie Formen (Zeile 3-1)

Freie Formen können aus ebenen Elementen, also Stäben oder Flächen, zusammengesetzt sein, die häufig schiefwinklig und asymmetrisch gestaltet sind. Für diese Formen gibt es keine Regeln. Sie können im

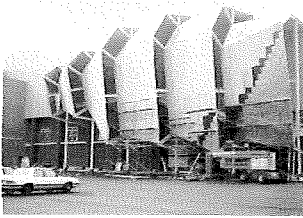


Abb 1.36 Die freie Form der Presbyterian Church in New York aus polygonal zusammengesetzten Flächenelementen.

Grundriss frei gestaltet sein und in der Höhe mathematischen Bildungsgesetzen folgen, oder auch eine insgesamt freie Gestaltung, wie z.B. bei unregelmäßig gefalteten Flächen, aufweisen.

Konstruktionen in den Feldern 3111 bis 3122 werden durch schiefwinklig zusammengesetzte Stäbe oder Flächen gebildet. Beispielsweise sind Konstruktionen wie Rahmen als freie Formen unregelmäßige polygonale Stabzüge.

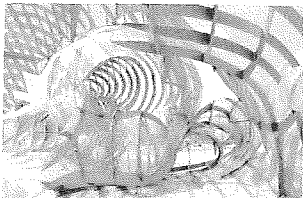


Abb 1.37 Die Konstruktion des Son-o-House ist eine gekrümmte freie Form.

1.4.6 Gekrümmte freie Formen (Zeile 3-2)

Für gekrümmte freie Formen lassen sich keine festgelegten Regeln oder Bildungsgesetze erkennen, sie zeichnen sich vielmehr durch eine gewollte Unregelmäßigkeit aus. In der Praxis entsteht die Form entweder über experimentelle Vorgänge, durch mathematische Simulationen oder durch künstlerische Intuition. Bei den experimentellen Formfindungen werden u.a. dieselben Methoden angewandt, die für die Generierung der physikalischen Formen üblich sind. Allerdings ist die Effizienz der Konstruktion oder die Beanspruchung im Endzustand des Gebäudes nicht formbildendes Merkmal.



Abb 1.38 Die Form des „BMW Bubble“ wurde aus einem simulierten physikalischen Effekt erstellt, gilt jedoch als freie Form.

Für die gekrümmten Systeme gelten die Voraussetzungen der geometrischen Formen bei einer frei gewählten, undefinierten Krümmung. Die verwendeten Tragwerkselemente sind linear und flächig und werden je nach der gewünschten Form zusammengesetzt und kombiniert. Dabei werden gerade und auch gekrümmte Elemente eingesetzt.

Kombinierte Formen werden in der Systematik nicht berücksichtigt, da die Komplexität der Tabelle hiermit zu sehr ansteigt. In den folgenden Abschnitten soll diese Kategorie jedoch weiterhin Teil der Untersuchungen bleiben.

1.5 Zusammenfassung und Ergebnis

Ziel dieses Kapitels ist die Erläuterung der freien Formen und ihrer Eigenschaften mit Hilfe der in der Architektur üblichen Einteilung der Formen in geometrische, physikalische und freie Formen und einer anschließenden Systematisierung von Tragsystemen nach dieser Einteilung.

Es wird mit der Systematik deutlich, dass die Differenzierung der drei Familien nicht unbedingt eindeutig ist. Es existieren beispielsweise Doppelbelegungen bestimmter Formen in Abhängigkeit von ihrer Entstehung. So kann eine Kugel als geometrische Form durch Rotation generiert werden und als physikalische Form mit einer Seifenblase als Minimalfläche. Das Katenoid kann geometrisch durch Translation einer Erzeugenden an zwei Leitlinien erzeugt werden oder physikalisch ebenfalls als Minimalfläche.

Die Tatsache, dass ein parabelförmiger Bogen geometrisch definiert werden kann, aber unter Gleichlast die Stützlinie darstellt und damit zugleich eine physikalische Form ist, führt ebenfalls auf die Frage der Entstehung des Bogens zurück. Sehr komplexe mathematische Funktionen sind von einer unregelmäßigen Linie oder Fläche und damit einer freien Form nicht immer ohne weiteres zu unterscheiden. Eine freie Form, die durch eine komplexe Funktion definiert ist, kann ebenso als geometrische Form bezeichnet werden.

Die aufgestellte Systematisierung ist also nicht ausreichend für die genaue Formulierung einer Definition der freien Form. Sie ist aber dennoch ein Instrument zur Darstellung der geometrischen, physikalischen und freien Formen und trägt damit zu einer Differenzierung der freien Formen bei. Dabei ist die Fragestellung der Entstehung von Formen als ein wichtiger Faktor bei der Einordnung in geometrische, physikalische oder freie Formen zu bewerten.

Bei der Beschreibung der freien Formen zeichnet sich ab, dass

insbesondere die genaue Benennung der Geometrie schwer fällt. Die elementaren geometrischen Figuren sind namentlich bezeichnet und können beispielsweise als Kugel, Quader oder Hyperboloid benannt werden. Selbst komplexere geometrische Formen können häufig umschrieben oder sogar wie bei den Fraktalen erkannt und benannt werden und gelten daher nicht als freie Formen.

Also grenzen sich freie Formen gerade dadurch ab, dass sie nicht identifiziert wurden, eine Einschätzung, die natürlich auch vom Wissensstand des Betrachters abhängt. Diese Identifizierbarkeit ist allerdings nicht mit der Möglichkeit einer mathematischen Definition der Fläche zu verwechseln.

2 Historische Beziehung zwischen Form und Konstruktion

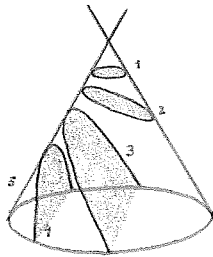


Abb. 2.1 Die mathematischen Figuren der Kegelschnitte: 1- Kreis, 2 - Ellipse, 3 - Parabel, 4 - Hyperbel, und 5 – Gerade.

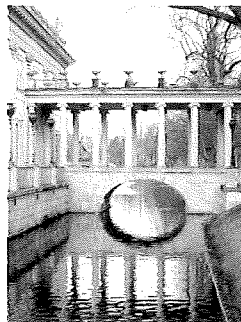


Abb. 2.2 Aus elementaren geometrischen Figuren zusammengesetzte Form.

Der Künstler und Architekt Herrmann Finsterlin teilt die Architektur in drei Abschnitte: die Epoche der Koordinate mit primären Formelementen in einem Proportional-Gitter, die geometrische Epoche mit Aufspaltung der Formelemente und die organische Epoche mit der Verschmelzung hybrider Formelemente [Borsi 1968, 46]. Die architektonische Gestalt von Bauwerken weist in jeder Epoche typische Merkmale auf, die von physikalischen bis zu gesellschaftlichen Faktoren geprägt sind. Die wissenschaftlichen Kenntnisse, d.h. theoretisches Grundwissen zu Mathematik, Physik und Werkstoffkunde, oder die technischen Möglichkeiten wie beispielsweise zur Verfügung stehende Arbeitsgeräte und Materialien hatten in jeder historischen Phase Einfluss auf die Formgebung. Auch wenn das Entstehen der ersten Entwürfe freier Formen nicht diesen Kenntnissen zugerechnet werden kann, so sind doch die Entwicklungen des theoretischen und konstruktiven Wissens in der Geschichte als Grundlage für die Möglichkeit der aktuellen Durchführung komplexer Formen im Bauwesen anzusehen.

2.1 Formen bis ins 19. Jahrhundert

Einfache geometrische Formen und rechte Winkel dominieren in der Architektur bis heute. Ideale, abstrahierte Formen, wie beispielsweise die Kegelschnitte, d.h. Kreis, Ellipse, Parabel, Hyperbel und Gerade oder die platonischen Körper waren schon in der frühen Baugeschichte von symbolischer und formaler Bedeutung. So galten seit den Griechen Kreis und die Kugel als besonders perfekte Formen. Auch Leon Battista Alberti lobt in „Zehn Bücher über die Baukunst“ in einem Abschnitt über den Tempelbau die Schönheit der Natur, die sich am Runden erfreue, welches aus den Gebilden hervorgehe, die sie selbst schaffe: „Der Erdball, die Gestirne, die Bäume, die Tiere, deren Nester (...) das alles wollte sie rund haben“ [Alberti 1485, 353]. Bei sechs- oder achteckigen Formen haben die

Ecken laut Alberti alle auf dem Umfang eines Kreises zu liegen, aus dem sie geometrisch gebildet werden können. Auch der rechte Winkel war aufgrund seiner „Perfektion“ von besonderer ästhetischer Relevanz.

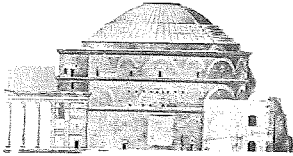


Abb. 2.3 Die ca 125 n. Chr. gebaute Kuppel des Pantheons in Rom hat eine Spannweite von etwa 43 m.

Bauwerke im Maßstab und mit der Genauigkeit der Pyramiden in Gizeh oder des Pantheons in Rom sind herausragende Beispiele für die Verwendung der aus der Mathematik herrührenden „idealen“ Formen. Neben der Theorie war genauso die Praxis bei der Gestaltung nach geometrisch definierten Formen von Bedeutung. Bei der Umsetzung einer Planung in ein Bauwerk wurden gerade Linien, Kreise und Kreisabschnitte eingesetzt, da sie mit einfachen Mitteln zu konstruieren waren. „Von Bedeutung und Einfluss auf die Gestalt von Bauwerken und Elementen waren mit Sicherheit das Meß- und Reißzeug wie Schnur, Lot, Winkel, Zirkel, Schablone und Schnurgerüst“, wobei von allen Winkeln der Rechte am häufigsten angewendet wurde [Otto 1989, 203]. In großen Bauprojekten konnten vorgefertigte Bauteile wie beispielsweise von den Steinmetzen in der Werkstatt gehauene Bogenabschnitte bei Festlegung einer kreisförmigen Geometrie mit konstantem Radius effizient hergestellt werden und waren austauschbar – innerhalb des Bogens wie auch von Gebäude zu Gebäude. Diese Überlegungen und Voraussetzungen galten auch im Mittelalter in der Romanik und der Gotik, wo Rund- und Spitzbögen aus Kreisabschnitten erstellt wurden.



Abb. 2.4 Die Formensprache der Gotik geht mit der Auflösung der Konstruktion in Stützen und Bögen einher.

Parallel zum Streben nach der Verwirklichung der idealen Geometrie am Bau existierte die konstruktionsbestimmte, handwerkliche Baukunst, mit der Formen geschaffen wurden, die möglichst tragfähig waren. Ohne theoretisches Grundlagenwissen der ausführenden Handwerker entstanden diese Formen weniger über formalästhetische Ansätze als durch einen „empirischen Formbildungsprozess“ [Graefe 1986, 50], d.h. sie wurden schrittweise entwickelt, um die tragenden Eigenschaften des Materials und eben auch der Form möglichst risikofrei einschätzen zu können. Das Wissen über Gestaltung und Umsetzung wurde von Generation zu Generation weitergegeben.

Mit dieser handwerklichen Baukunst fand in der Architekturgeschichte aus konstruktiver Sicht eine kontinuierliche Entwicklung statt. Nach den schweren Mauerwerksbauten des frühen Mittelalters wurden immer

schlankere und leistungsfähigere Konstruktionen gebaut, deren Leichtigkeit einen Höhepunkt in der Gotik fand, wo Wände durch Stützen ersetzt und damit großflächige Fenster möglich wurden und schlanke Strebepfeiler für die Aussteifung sorgten. Trotz der weiteren Verwendung einfacher geometrischer Formen war in der Gotik konstruktiv ein maßgeblicher Schritt von der Massivität zum gegliederten System erfolgt. So schreibt Mainstone: „Structure, construction, and visually-expressive form were (...) virtually indistinguishable.“ („Tragwerk, Konstruktion und ästhetisch-expressive Form [in der Gotik] waren praktisch nicht zu unterscheiden“) [Mainstone 1975, 26].



Abb. 2.5 Die Ponte S. Trinità in Florenz nach ihrem Wiederaufbau von 1569.

Weitere Beispiele dafür, dass auch aus konstruktiven Randbedingungen Formen entstanden, sind beispielsweise die Brückenentwürfe Andrea Palladios (1508-1580) für unterschiedliche Holzfachwerkbrücken oder die Dachkonstruktionen mit Bogenlamellenbindern von Philibert de l'Orme (1514-1570). Die Holzbögen de l'Ormes bestanden aus kurzen Bohlen oder Brettern, die hochkant überlappend aneinandergesetzt wurden, so dass selbst für größere Spannweiten keine langen Baumstämme erforderlich waren. De l'Orme wählte Konstruktionen mit vertikalem Bogenfuß aus dem Grund, dass sie im Gegensatz zu Konstruktionen mit schräg auf die Auflager treffender Systemlinie einen geringeren Bogenschub auf die Unterkonstruktion ausübten.

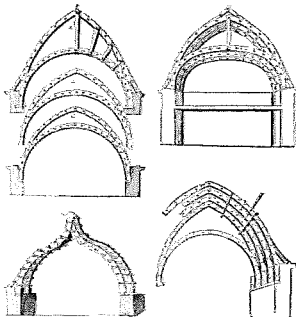


Abb. 2.6 Verschiedene Formen von Bohlenbindern nach Philibert de l'Orme.

Während man sich in der Renaissance noch an Formen und Bauweisen der Römer orientierte, wurde Ende des 16. Jahrhunderts der Halbkreis als Idealform des Bogens im Brückenbau hinterfragt und neue Formen wie Korbbogen, Ellipse oder auch Kettenlinie eingeführt [Kurrer 2002]. Diese neue Formensprache ist allerdings nicht auf aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zurückzuführen und diente auch nicht der Steigerung der Tragfähigkeit, sondern war eher an der Nutzung orientiert, da flachere Bögen eine geringere Steigung der Brückenfahrbahn ermöglichten.

Galileo Galilei (1564-1642) beschäftigte sich im 17. Jahrhundert in „Discorsi e Dimostrazioni matematiche“ (1634) ebenfalls mit der Form. Er abstrahierte reale Aufgaben zu theoretischen Modellen und untersuchte, welche Form ein Kragarm mit Einzellast haben müsste, um in jedem Querschnitt gerade den Bruchzustand zu erreichen. Er verglich zudem die

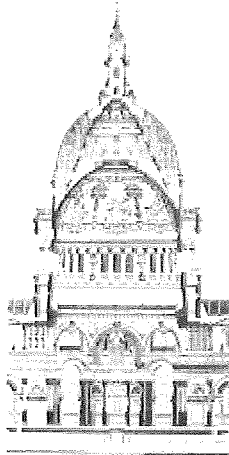


Abb. 2.7 Die mittlere Kuppel der St. Paul's Kathedrale ist nach dem Prinzip der Stützlinie entworfen.

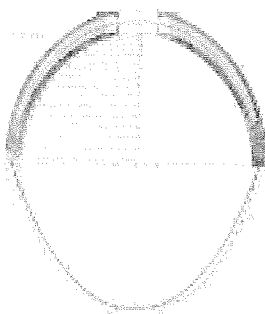


Abb. 2.8 Die Kettenlinie zur Beschreibung des Tragverhaltens der Kuppel von St. Peter nach dem Gutachten von Poleni.

Tragfähigkeit von Kragträgern mit Voll- und mit Hohlquerschnitten bei gleichem Eigengewicht. Dies waren frühe Optimierungsbetrachtungen, die noch heute von Relevanz sind. Die von Galilei beschriebenen Konstruktionsmethoden der Parabel für Bauhandwerker lassen auf erste direkte Auswirkungen der theoretischen Untersuchungen auf die Formbildung in der Praxis schließen.

Robert Hooke (1635-1703) formulierte das Phänomen der Stützlinie als umgekehrte Seillinie – „ut pendet continuum flexile sic stabit inversum rigidum“ [zitiert nach Graefe 1986, 53] - und überzeugte offensichtlich auch den mit ihm bekannten Architekten Sir Christopher Wren (1632-1723) von deren Vorteilen. Dies führte zum wohl ersten bekannten Einsatz der Stützlinie am Neubau der St. Pauls Kathedrale in London (1674-1711) [Graefe 1986] im 18. Jahrhundert. Zwar erstellte Wren die mittlere, tragende Kuppel entgegen einer Entwurfszeichnung, wo er diese als Parabelform darstellt, als Kegelform, diese Form kommt der Stützlinie durch die 85t schwere aufgesetzte Laterne jedoch sehr nahe, und auch der Tambour verbreitert sich nach unten hin und folgt so der Stützlinienform [Graefe 1986, Heinle 1996]. Auf die äußere Erscheinungsform der Kathedralenkuppel hatte diese Anwendung der Stützlinie keine Auswirkung: Aufgrund der ästhetischen Anforderungen der Kirche – dies hatte wiederum mit der damaligen Wahrnehmung der geometrischen Perfektion zu tun – wählte Wren für die sichtbare äußere und innere Kuppel die Kugelform.

Nur in Einzelfällen wie der St. Paul's Kathedrale beruhte die Formenwahl für Baukonstruktionen auf theoretischen Untersuchungen. Grundsätzlich dominierte noch die Empirie und das ästhetische Empfinden der Zeit. Die erste auf wissenschaftlicher Grundlage, also mit mathematischer Argumentation und als Standsicherheitsnachweis anzusehende Arbeit war das 1748 von Giovanni Poleni (1683-1761) veröffentlichte Gutachten zur Peterskirche in Rom, eine Untersuchung von Rissen in der Kuppel [Graefe 1986]. Poleni wies nach, dass in den unteren Bereichen der Kuppel in Ringrichtung Zugkräfte entstanden, die zu den beobachteten Rissen führten. In der Konsequenz wurden am Kuppelfuß Zugringe aus Eisen zur Sicherung der Standfestigkeit eingebaut. Diese Erkenntnisse führten aber nicht zu einer Neuorientierung in der Formgebung von Kuppeln, sondern

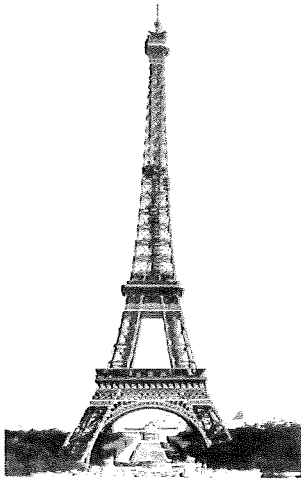


Abb. 2.9 Die Form des Eiffelturms, 1889, spiegelt den Kräfteverlauf wider.

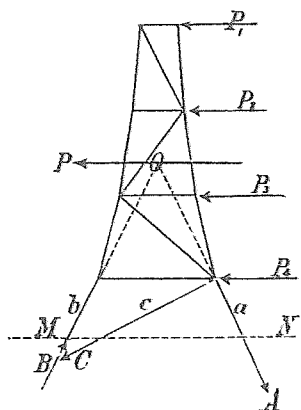


Abb. 2.10 Erläuterung der Formgebung des Eiffelturms von 1887.

eher dazu, dass bei kugelförmigen Kuppeln Zugringe zum Einsatz kamen.

Als Architekturform war die Form der Stützlinie lange nicht akzeptiert [Graefe 1986] und fand erst im 20. Jahrhundert breitere Anerkennung. Hierzu trug auch die Erkenntnis bei, dass mit einer Form, die dem Kräftefluss folgt, wirtschaftliche Tragwerke entstehen können. Dies wurde durch die Anwendung der Ende des 19. Jahrhunderts entwickelten graphischen Statik unterstützt.

Karl Culmann (1821-1881) bot im 19. Jahrhundert mit seinem Werk „Die Graphische Statik“ (1864) eine Lösung der Schnittkraftermittlung an statisch bestimmten geraden Balken mit Hilfe der Seilstatik an. Der Zusammenhang von Seil- und Kräftepolygonen war schon von Pierre Varignon (1654-1722) aufgezeigt worden. Von Culmann als Arbeitsmethode entwickelt, führte sie zur Rationalisierung der Arbeit des Ingenieurs, aber auch zur Kombination des statischen und konstruktiven Entwurfs. Die Definition des Fachwerks mit dreieckbildenden, geraden Stäben und gelenkigen Knoten war statische Grundlage und hatte gleichzeitig gestalterische Relevanz.

Mit der Industrialisierung gewannen im Eisenbau einfache Elementformen an Interesse, da sie sich am Fließband herstellen ließen, so dass vor allem gerade Bauteile verwendet wurden oder in Ausnahmefällen auch Kreisabschnitte. Die schnörkellose Ästhetik des Industriebaus in England mit schlanken Stützen und kubischen Formen war ein Resultat dieser Entwicklung [Strike 1991]. Andererseits entwickelte sich mit der Fachwerktheorie eine zunehmend eigene Formensprache trotz gerader Stabelemente durch die gegliederte Bauweise. Aufgrund der großen Nachfrage nach Eisen wurden ein sparsamer Materialverbrauch und damit eine zunehmende Schlankheit der Querschnitte erforderlich. Mit der graphischen Statik konnte sehr anschaulich der Einfluss der gewählten Form auf die Kräfte dargestellt und damit durch die Änderung der Form effiziente Tragwerke gestaltet werden.

Auch Gustave Eiffel (1832-1923) beispielsweise bediente sich der graphischen Statik, um die Form und Konstruktion seiner Projekte, die er in aller Welt baute, zu entwickeln. Der über 300 m hohe Eiffelturm zeigt mit der zunehmenden Spreizung der Stützen am Fußpunkt besonders

eindrücklich die Berücksichtigung des Kraftflusses im Entwurf [Burkhardt 1988/2]. Eine Skizze aus dem Jahr 1887 zeigt die Geometrie des Turmes im Zusammenhang mit den einwirkenden Windlasten und damit die bewusste Wahl der Form nach dem Kraftfluss.

Mit der Industriellen Revolution hatten die sich rasch entwickelnden Konstruktionen wiederum Rückwirkung auf die statischen Untersuchungen. Es war in Deutschland üblich, die Knoten zu nieten und somit biegesteif auszuführen [Kurrer 2002], wodurch das Fachwerk innerlich vielfach statisch unbestimmt war. Die auftretenden Neben- oder Sekundärspannungen wurden mit den graphischen Methoden nicht erfasst und daher vernachlässigt. Daneben tauchte auch das nach dem belgischen Ingenieur Arthur Vierendeel (1852-1940) benannte Pfostenfachwerk, der Vierendeelträger, auf, welches ohne Diagonalen gebaut wurde, so dass die Fachwerktheorie mit gelenkigen Anschlüssen und dreieckbildenden Stäben hierauf nicht anwendbar war. Es entstand das Bedürfnis, solche Träger genauer zu erfassen, die Nebenspannungen in Fachwerken zu quantifizieren und die Reserven im Tragwerk zu nutzen. Außerdem wurden die Tragstrukturen schlanker, so dass Verformungen von zunehmender Bedeutung waren. Heinrich Müller-Breslau (1851-1925), erarbeitete in dieser Zeit eine Theorie der statisch unbestimmten, linear-elastischen Stabwerke auf Grundlage des Kraftgrößenverfahrens und legte damit einen weiteren Grundstein für die wissenschaftliche Baustatik. Müller-Breslau gestaltete seine Bauten nach statischen Gesichtspunkten und bildete die Tragwerksform der Biegemomentenlinie nach, wie das Beispiel des Kaiserstegs Oberschöneweide zeigt, und Carlo Alberto Pio Castiliano (1847-1884) ergänzte die Grundlagen der klassischen Baustatik durch Synthese von Statik und Elastizitätstheorie.



Abb. 2.11 Der Kaisersteg in Oberschöneweide, von Heinrich Müller-Breslau nach der Biegemomentenlinie entworfen.

Die theoretischen Erkenntnisse und die Leistungsfähigkeit der neuen Materialien Eisen, Stahl und Beton führte zum Einsatz schlanker Konstruktionen und ermöglichte neue Gestaltungsmöglichkeiten. Im Stahl- und im Betonbau gab es materialspezifische Forschung und Entwicklung, die zu einem Teil der Baustatikgeschichte, aber auch der Formensprache und des Ausdrucks der Architektur wurde.

Mit Ausnahme einiger Beispiele der Verwendung der Kettenlinie, die keine

generelle ästhetische Akzeptanz fand, war der Einfluss der statischen Erkenntnisse und neuer Materialien auf die Formgebung hinsichtlich geometrischer, physikalischer oder freier Formen im Gesamtbild der Architektur gering. Freie Formen wurden auch in dieser Zeit nicht bewusst geplant. Die Grundlagen für eine Entwicklung neuartiger und nicht geometrischer Formen auch größerer Spannweiten waren aber bis Anfang des 20. Jahrhunderts mit den theoretischen Grundlagen in Statik und Konstruktion sowie den neuen Materialien Eisen und Beton geschaffen.



Abb. 2.12 Rudolf Steiners
zweites Goethenaum von
1925.

2.2 Formen im 20. Jahrhundert

Nachdem die freie Form als Entwurfsgedanke bis 1900 nicht eingesetzt wurde, wandelten sich Anfang des 20. Jahrhunderts die Randbedingungen in Kunst und Architektur und damit die Sichtweise auf die vitruvianisch geprägte Theorie, die bisher den Entwurf dominiert hatte.

2.2.1 1900 bis 1950

Zunächst führte dies zu einem neuen Umgang mit den bekannten geometrischen Formen. Unter Verwendung von Grundsätzen wie „Form follows Function“ von Louis Sullivan (1856-1924) oder „Weniger ist Mehr“ von Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969) wurden Gebäude mit einer zurückhaltenden, sehr rationalen, kubischen Formensprache geschaffen.

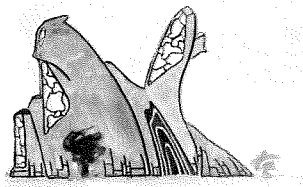


Abb. 2.13 Herrmann
Finsterlins Entwurf „Das Rote
Haus“ von 1922.

Gleichzeitig brachen verschiedene Architekten aus dem orthogonalen Raster aus und begründeten dies damit, dass natürliche, fließende Formen für das Wohlbefinden des Menschen notwendig seien. Neben Bauten von Hugo Häring (1882-1958) oder Erich Mendelsohn (1887-1953) gehörte hierzu auch das um 1925 gebaute zweite Goethenaum Rudolf Steiners (1861-1925), welches im Gegensatz zur halbkugelförmigen hölzernen Dachkonstruktion des ersten Goethenaums eine eher skulpturale Ausformung der Gebäudehülle zeigt. Herrmann Finsterlin (1887-1973) plante diverse Gebäude mit fließenden, nicht identifizierten Formen, die aber nicht zur Ausführung gelangten.

Ebenfalls mit fließenden Formen, aber auf Grundlage der Stützlinientheorie,

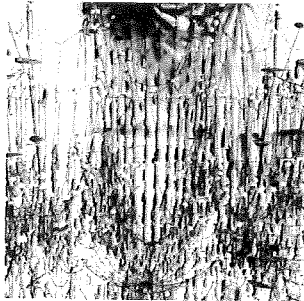


Abb. 2.14 Hängemodell für die Kirche der Kolonie Güell von Antonio Gaudí.

gestaltete der Katalane Antoni Gaudí (1852-1926) in Barcelona Anfang des 20. Jahrhunderts eine Anzahl von Gebäuden aus Mauerwerk. Für die Kapelle der Kolonie Güell baute er ein mit kleinen Gewichten beschwertes Hängemodell aus Fäden, die die Stützlinien im Gebäude darstellten und der Formfindung des Bauwerks dienten. Gaudís Entwurfszeichnungen entstanden aus übermalten Photographien. Das verschollene Hängemodell wurde Anfang der 1980er Jahre im Maßstab 1:10 nachgebaut [Tomlow 1989]. Die Sprache des Tragens und Lastens ist in Gaudís Entwürfen besonders ausgeprägt. Er beschränkte sich in seinen Werken nicht auf die rationale Anwendung der Stützlinie, sondern entwarf beispielsweise mit der Casa Batlló, deren Dach dem Rücken eines Drachen nachempfunden ist, mit dieser Methode auch Phantasieformen. Auch geometrische Formen verwendete Gaudí, wie das aus Konoiden geformte Dach für die Schule der Sagrada Familia zeigt. Dabei verwendete er das Mauerwerk in seinen Entwürfen stets gleichzeitig als tragendes und als formgebendes Element.

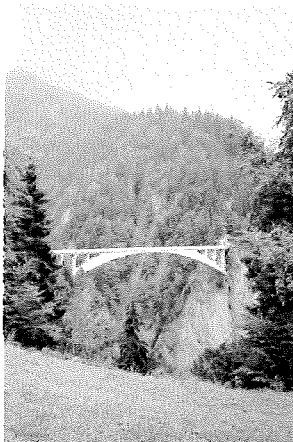


Abb. 2.15 Die Salginatobelbrücke von Robert Maillart in Graubünden von 1930.

Die Entwicklung des Stahlbetonbaus im beginnenden 20. Jahrhundert zeigte eine ähnliche, simultane Verwendung eines tragenden und formgebenden Materials. Der Schweizer Robert Maillart (1872-1940) verwendete mit Entwicklung der Pilzdecke und mit seinen Brückenentwürfen den Werkstoff Stahlbeton entsprechend seiner Eigenschaften und unter Beachtung des Kraftflusses im Bauwerk, woraus sich eine sehr spezifische Formensprache ergab.

Solche Fortschritte in der Entwicklung von Konstruktionen resultierten nicht nur aus neuen Berechnungsmethoden sondern auch aus dem persönlichen Einsatz der Ingenieure, der vom Konzept bis zur Ausführung reichte. Nicht zuletzt aufgrund des ersten Weltkrieges war in dieser Zeit die Materialersparnis ein Ziel, welches neben den Fachwerkkonstruktionen auch die Entwicklung der Betonschalen begünstigte. In dieser Zeit wurde im Wesentlichen die Schalentheorie erarbeitet, beispielsweise von Franz Dischinger (1887-1953), auf deren Grundlage die Entwicklung der Berechnungs- und Bemessungsmethoden für Flächentragwerke erfolgte.

Als Grundform dienten im Schalenbau weiterhin elementare mathematische Funktionen, weil die Berechnung der Konstruktion einerseits vereinfacht wurde und die Ausführung einer Form andererseits von der Technik des

Einmessens abhing. Die Konstruktion der Schalung und auch die statische Erfassung wurden durch die Verwendung regelmäßiger geometrischer Formen vereinfacht. Sehr häufig entstanden daher Regelflächen (Tonnen, Hyperboloide, Hyperbolische Paraboloiden oder Konoide), so dass die Schalung und auch die Bewehrung mit geraden Stäben gebaut werden konnte. Aber auch Kugelabschnitte oder andere Rotations- oder Translationsformen wurden angewendet.

Parallel zur Entwicklung in der Kunst, beispielsweise in der Malerei mit dem Expressionismus, in dem eine neue, abstrahierte Darstellung angewendet wurde, entstanden auch in der Architektur Projekte, bei denen der bewusste Ausbruch aus dem geometrischen Formenrepertoire versucht wurde, ohne aber dabei die physikalische Formgebung zu verwenden. Beispiele hierfür sind der Einsteinturm von Erich Mendelsohn (1887-1953) und das Glashaus von Bruno Taut (1880-1938). Dieses hatte Taut zwar, wie später beschrieben wird, aus einer geometrischen Form entwickelt, als solche war es allerdings nicht auf den ersten Blick erkennbar.

2.2.2 Von 1950 bis 2000

Mit dem Fortschritt der theoretischen Kenntnisse und neuen Methoden der Berechnung Anfang des 20. Jahrhunderts, z.B. zur Theorie der Flächentragwerke, der Theorie II. Ordnung oder bei der iterativen Ermittlung von Schnittkräften an hochgradig unbestimmten Systemen, war eine Systematisierung sinnvoll und vollzog sich über Matrizen- und Tabellenberechnungen. Sie erforderte eine hohe Abstraktion des Tragwerks in statischen Systemen mit großem Rechenaufwand, die weniger zum konstruktiven Entwerfen mit dem Denken in Alternativen als zum Nachweis einer festgelegten Konstruktion diente. Seit 1950 resultierte aus einer fortschreitend komplexer werdenden statischen Berechnung und zunehmender Spezialisierung von Statikern die weitere Abstraktion des Tragwerks und seine Erfassung im Rechner. Nach Erfindung des ersten Computers, einer Rechenmaschine, durch den Bauingenieur Konrad Zuse (1910-1995) und Adaption der ursprünglich im Flugzeugbau entwickelten Finitesimalrechnung konnte so nicht nur das komplexe und sehr

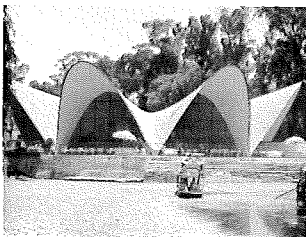


Abb. 2.16 Das Restaurant in Xochmilco von Felix Candela, Baujahr 1958, besteht aus vier HPs.

aufwändige Berechnen der Tragstrukturen automatisiert, sondern die Vorgänge im Rechner durch die graphische Wiedergabe und durch die Visualisierung von Ein- und Ausgabe der Parameter auch anschaulicher gemacht werden. Für die Formgestaltung bedeutet dies, dass der Entwurf heute kaum noch von der Rationalisierung der Berechnung abhängt, welche bis zur Entwicklung der sehr leistungsfähigen Visualisierungs- und Rechenprogramme erforderlich war, um den Nachweis der Standsicherheit erbringen zu können.

Bis zu diesen erst zum Ende des 20. Jahrhunderts erreichten Möglichkeiten waren einige Fortschritte in der Bautechnik bemerkenswert, die auf die Formgebung in der Architektur Auswirkungen zeigten.

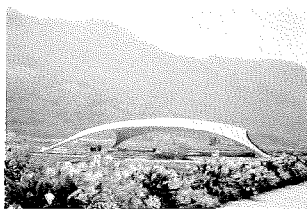


Abb. 2.17 Ein Beispiel der vielen von Heinz Isler ausgeführten Schalen, das Gartencenter Bürgi.

Die Betonschalen erlebten eine Blütezeit in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts. Ingenieure wie Eduardo Torroja (1899-1961) bauten bereits in den 30er Jahren Bauwerke mit Schalen, die einen Eindruck von Leichtigkeit erweckten, der dem massiven Baustoff Stahlbeton im Grunde entgegenstand. Auch Felix Candela (1910-1997), der Schalen aus hyperbolischen Paraboloiden (HPs) in großer Variation entwarf und ausführte, trug zu einer enormen Formenvielfalt bei Anwendung geometrischer Formen bei. Eine Ausnahme von der Formgebung nach mathematischen Bildungsprinzipien bildeten die Schalen Heinz Islers (*1926), der Formen durch die Umkehrung von durch Eis, Wachs oder Gips versteiften Geweben, sowie durch Fließvorgänge oder durch aufgeblasene Gummimembranen fand und in dieser Form Hunderte von Schalen baute [Ramm 1986]. Solche Ausnahmen waren nur möglich, wenn der Baumeister vor Ort die genauen Formen z.B. mit Schablonen vorgab, wie es auch Antonio Gaudí bei einigen seiner Bauten praktizierte, die dem Kraftfluss entsprechend geformt, also mathematisch für die Ausführung nicht immer eindeutig festlegbar waren.

In der Zeit der weiterhin sehr „geradlinigen“ Architektur der 1960er Jahre, die durch weitere Industrialisierung des Bauprozesses begünstigt wurde, konnten die geometrisch oder physikalisch geformten Schalen das Verlangen nach einer Gestaltung, die von der Geradlinigkeit und der Rechtwinkligkeit abweicht, befriedigen. Wie verschiedene Beispiele aus den 1960er Jahren zeigen, wurden auch andere Bauweisen hierfür genutzt.

Projekte wie die Sydney Opera Hall von Jørn Utzon oder die Philharmonie von Hans Scharoun sind keine Schalenbauten und bauten in ihrer Gestalt ebenfalls nicht auf der orthogonalen Geometrie mit geraden Linien und Flächen auf.

Mit den Kenntnissen zur Erfassung der Tragstrukturen bis hin zu hochgradig statisch unbestimmten Konstruktionen und der daraus entstehenden Möglichkeit, immer effizientere Konstruktionen zu bauen, wurden die Gebäude in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts höher und die Spannweiten der Brücken größer. Die Erfindung und die Nutzung der Vorspannung, hochfester Stähle und Betone und die Kombination des Profilstahls mit dem Beton im Verbundbau trug zu dieser Entwicklung bei. Durch neue Materialien wie den hochfesten Stählen, den immer leistungsfähigeren Kunststoffen und nicht zuletzt durch die Fortschritte im Computerwesen seit den 1970er Jahren konnte der Leichtbau, d.h. das Bauen mit Seilen und Membranen, vorangetrieben werden. Er ging in den 1960er Jahren aus dem Interesse an effizientem Einsatz von Material. Es entwickelte sich ein ganzer Wissenschaftszweig, in dem Ingenieure, Architekten und Biologen an den Bauprinzipien der Natur gemeinsam forschten. Eine führende Rolle spielte hierbei das Institut für Leichte Flächentragwerke (IL) um Frei Otto (*1925). Neben dem Leichtbau mit Pneus, Seilen und Membranen wurden Bögen und Schalen ebenso wie Verzweigungsstrukturen erforscht. Die Methoden erfuhren eine weite Verbreitung und einen internationalen Erfahrungsaustausch. Der Leichtbau führte eine neue Ästhetik und Formensprache in die Architektur ein.

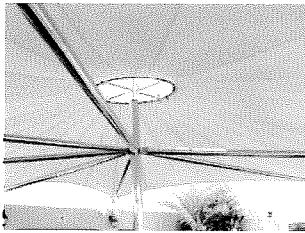


Abb. 2.18 Im Membranbau werden heute leistungsfähige Kunststoffe verwendet.

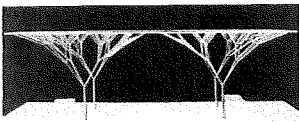


Abb. 2.19 Die Verzweigungsstrukturen gehören ebenfalls zum Leichtbau.

Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts tauchen vermehrt neue Gebäude mit einer Formensprache auf, die offenbar weder aus dem bekannten geometrischen Repertoire entlehnt noch mit physikalisch-experimentellen Methoden gefunden wurden. Diese als freie Formen bezeichneten Geometrien werden generell mit der verbreiteten Anwendung des Computers in der Architektur in Verbindung gebracht. Tatsächlich werden Darstellung und Berechnung mit dem Computer deutlich vereinfacht. Verschiedene Beispiele in der Geschichte belegen jedoch, dass sehr komplexe Formen schon früher „in Handarbeit“ entstanden sind. Dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.3 Vom Entwurf zur Ausführung – Fallstudien

Bereits die Beschreibung der freien Formen und die Festlegung ihrer Geometrien sind mit herkömmlichen Mitteln sehr kompliziert. Mit der Erfassung im Computer wird die Kommunikation der komplexen Form vereinfacht. Es wurden aber auch schon Gebäude mit freier Form hergestellt, bevor die großen Datenkapazitäten für ihre Beschreibung und Berechnung zur Verfügung standen. Für im Laufe der Entwicklung der Bautechnik seit dem 19. Jahrhundert entstandene Gebäude mit freien Formen soll daher aufgezeigt werden, wie die endgültige, gebaute Form entstand und mit welchen Mitteln sie umgesetzt wurde. Zwar konnte auf neue Möglichkeiten in der Technologie zurückgegriffen werden, trotzdem zeigt sich bei näherer Betrachtung der Gebäude, dass Technik und Ausführung häufig zu einer Geometrisierung, d.h. Rückführung auf mathematisch einfach beschreibbare Formen, führten.

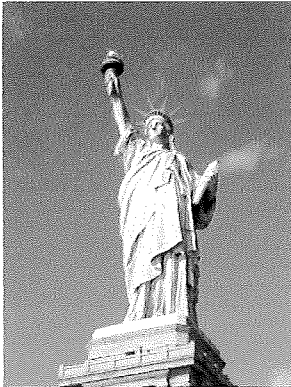


Abb. 2.20 Die Freiheitsstatue in New York von 1886.

Ein Beispiel, bei dem eine skulpturale Form in ein Bauwerk umgesetzt wurde, ist die **Freiheitsstatue** in New York, die 1886 fertig gestellt wurde. Obwohl die Nutzung als Aussichtsturm sie als Bauwerk identifiziert, hat die Freiheitsstatue hauptsächlich den Charakter einer Skulptur, so dass ihre Zugehörigkeit in dieser Aufstellung nur bedingt zutrifft. Trotzdem ist es in diesem Zusammenhang sinnvoll zu veranschaulichen, welche Möglichkeiten der Formherstellung in einem solch großen Maßstab bereits Ende des 19. Jahrhunderts bestanden und wie diese komplexe Form umgesetzt wurde.

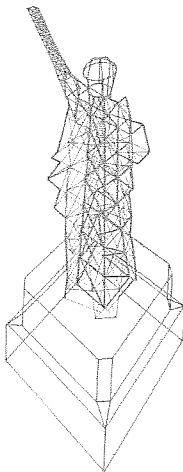


Abb. 2.21 Eine Skizze des Gerüsts der Freiheitsstatue.

Architekt der Freiheitsstatue war der Bildhauer Frédéric Auguste Bartholdi (1834-1904), als Ingenieur war zunächst Eugene Viollet-le-Duc (1814-1879) zuständig, nach dessen Tod dann Gustave Eiffel (1832-1923). Die Form einer weiblichen Figur mit Fackel folgt weder einfachen mathematischen noch physikalischen Formfindungsgesetzen. Die Übertragung der Geometrie vom Modell in den endgültigen Bau erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst bearbeitete Bartholdi seine Modelle aus Ton in wachsendem Maßstab, bis er zu einer endgültigen Gestalt kam. Dieser Prozess war noch rein bildhauerischer Natur. Dann wurden Modelle im Maßstab 1:3 gefertigt, mit Hilfe derer Handwerker einzelne Teile der Figur

als Gipsmodelle im Maßstab 1:1 formten [Lemoine 1988].

Das Tragwerk der Freiheitsstatue besteht aus einem Pylon als Hauptstütze, welcher durch ein Gerüst für den Arm verlängert ist. Der Pylon wird durch vier mit Auskreuzungen gekoppelten Hauptstützen gebildet und trägt ein Gittergerüst als Sekundärtragwerk, welches der Form der Statue grob folgt. Die Hülle besteht aus getriebenen, 2mm dicken Kupferplatten, die über weiche, gebogene Flacheisen an dem Gerüst befestigt sind, um differentielle Bewegungen aufzunehmen.

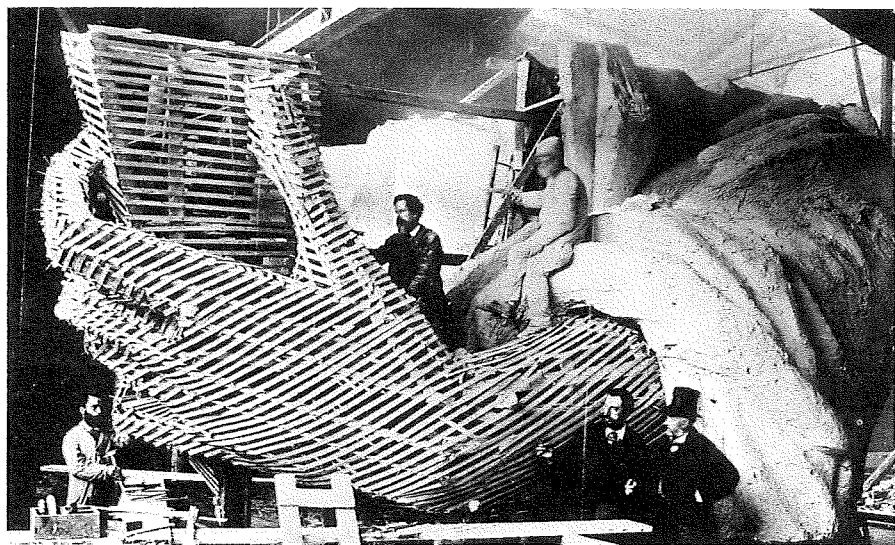


Abb. 2.22 In der Werkstatt wurden die Holzgerüste als Negativform hergestellt.

Die Anfertigung der einzelnen Kupferplatten erfolgte in einer Negativform aus Holzlatten, die wiederum auf den Gipsmodellen im Maßstab 1:1 hergestellt worden war.

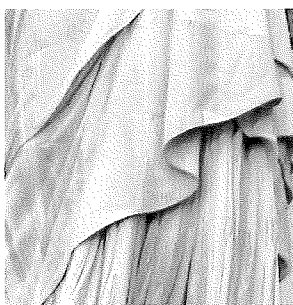


Abb. 2.23 Detail des Faltenwurfs der Freiheitsstatue.

Dieses Beispiel zeigt, dass es bereits vor 130 Jahren möglich war, eine mathematisch undefinierte Form herzustellen, wobei heute die Genauigkeit der Formübertragung vom verkleinerten Modell in den endgültigen Maßstab mit Hilfe von Scannern und Datenverarbeitung sehr viel genauer erfolgen kann. Das Haupttragwerk war als Fachwerk statisch einfach erfassbar, da die Form der Hülle durch das Sekundärtragwerk und die Fassade sichergestellt wurde.

Bei den folgenden zwei Projekten, die um 1920 entstanden, wurden die Entwürfe der Architekten mit unterschiedlichen Bauweisen umgesetzt.

2.3.1 Glashaus und Einsteinturm

1914 wurde von Bruno Taut (1880-1938) das **Glashaus** für die Werkbundausstellung in Köln unter Beratung der Allgemeine Beton und Eisen GmbH entworfen, die auch für Berechnung und Ausführung verantwortlich zeichneten. Die ursprüngliche Formfindung der Kuppel, die in frühen Skizzen einen flachen Spitzbogen vermutlich ohne geometrisch festgelegte Form aufwies [Burkhardt 1994], ergab sich aus verschiedenen Gesichtspunkten. Einerseits war sie, dem Thema des Pavillons gemäß, einem Kristall mit seinen geschliffenen Facetten nachempfunden, andererseits von der Struktur her durch die Taut bekannten Schwedlerkuppeln beeinflusst [Krausse 1993]. Die endgültige Geometrie der Kuppel mit 10,5 m Spannweite fand Taut über die Festlegung strenger geometrischer Randbedingungen. Ausgehend von senkrecht angeordneten Dreiecken in der untersten Reihe der Facetten ergibt sich mit der Anforderung ebener Glasscheiben die Schrägstellung der ersten Rhombe. Ihre Länge entspricht mit 3 m der Höhe des Stützgeschosses. Die weiteren Rhombenreihen wurden entsprechend konstruiert, wobei die Anordnung der Höhenlinien der Knoten mit den Stützenabständen korrespondiert. Die Spitze der Kuppel stellt mit lang gestreckten Rhomben einen sternförmigen Abschluss der Kuppel dar. Als Kontur der Kuppel ergab sich ein polygonaler Kreisbogen mit tangential anschließender Spitze [Burkhardt 1994]. Die Identifikation dieser Form erforderte eine genaue geometrische Untersuchung.

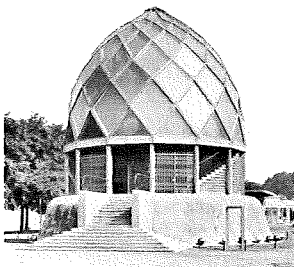


Abb. 2.24 Das Glashaus von Bruno Taut.

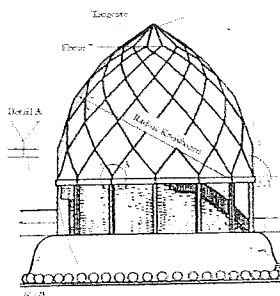


Abb. 2.25 Die Formbildung der Kuppel entstand aus strengen geometrischen Regeln.

Zunächst von Taut als Eisenkonstruktion geplant, wurde die Kuppel von der Allgemeinen Beton und Eisen GmbH in Eisenbeton angeboten und konstruiert. Die sehr schlanken Stäbe mit einem Querschnitt von 12 x 20 cm wurden in Beton hergestellt. Aufgrund der Ausführung mit biegesteifen Knoten des rautenförmigen Betongitters war eine Auskreuzung der Konstruktion nicht erforderlich.

Auch der etwa 16 m hohe **Einsteinturm** von Erich Mendelsohn (1887-1953), durch die Baufirma Bolle 1920-21 ausgeführt, war zunächst in Beton konzipiert. Die ersten Entwürfe des Turmes basierten auf präzisen technischen Vorgaben für ein Gebäude, welches für den Zweck der astrophysikalischen Forschung vorgesehen war.



Abb. 2.26 Der 1921 gebaute Einsteinturm in Potsdam von Erich Mendelsohn.

Die anfangs sehr geradlinige Linienführung wurde von einem Entwurf zum nächsten „gefälliger“, d.h. abgerundet. Unter Mitwirkung der Firma Carl Zeiss, Einschaltung des Hochbauamtes und Beratung durch die ausführende Firma entwickelte sich der Turm einerseits von den technischen und den Nutzungsanforderungen her in der inneren Aufteilung, andererseits zeigte er in seiner äußeren Form eine „fortschreitende Kurvenbildung“ mit der Plastizität als dynamischem Ausdruck [Hoh-Slodcyk 2000]. Bei jedem Entwurf wurde die Wirkung der Kontur mit Hilfe von Modellen untersucht.



Abb. 2.27 Die Form der Fenster ist nicht aus elementaren geometrischen Formen oder mit Hilfe physikalischer Formfindung entworfen.

Mendelsohn sah den neuen Baustoff Eisenbeton als besonders geeignet an, um den dynamischen Charakter der Turmgestalt herzustellen. Nach Kontakt mit der ausführenden Firma erwies sich jedoch der Baustoff

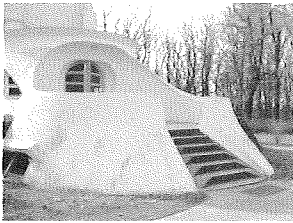


Abb. 2.28 Der Eingangsbereich des Einsteinturms ist in Beton ausgeführt.

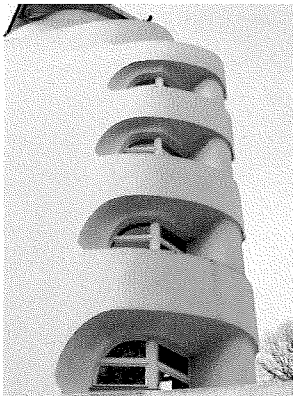


Abb. 2.29 Detail der Fensteröffnungen des Einsteinturms.

Mauerwerk als so deutlich günstiger, dass für den Bau größtenteils dieses Material verwendet wurde.

Nur in einigen Bereichen kam schwach bewehrter Beton zur Ausführung.

Die Decken sind als Stahlsteindecken ebenfalls in Mauerwerk zwischen Stahlträgern hergestellt. Im gesamten Gebäude dienen Stahlträger als Stürze und Abfangungen, wie es in der Bauweise dieser Zeit üblich war [Pichler 2000]. Die Form des Gebäudes wurde zunächst grob im Mauerwerk nach Plänen hergestellt und mit dem teilweise sehr dick aufgetragenen Putz verfeinert. Die plastische Formgebung mit großen Unterschieden in Material- und Putzdicken sowie auch die Verwendung unterschiedlicher Materialien nebeneinander führen allerdings zu Spannungen in der Konstruktion und zu maßgeblichen Rissen, die immer wieder saniert werden müssen.

Beide Projekte zeigen, wie mit konventionellen Bauweisen nicht-standardisierte Formen erzeugt werden können. Die Bedingung der ebenen Glasscheiben führte beim Glashaus zu einer streng geometrischen Form. Beim Einsteinturm wurde hingegen die Plastizität des Entwurfs durch formbare Materialien hergestellt.

2.3.2 Sydney Opera Hall und Philips Pavillon – Anwendung von Fertigteilen

Obwohl es seit den späten 50er Jahren die Möglichkeit der Berechnung mit Computern gab, war die Formfindung in dieser Zeit weiterhin rein manuell und die Berechnung als unterstützendes Hilfsmittel anzusehen. Ein prägnantes Beispiel für die Ausführung einer ausdrucksstarken, komplexen Form und für die großen Herausforderungen an das Planungsteam bei der Berechnung und Ausführung ist die **Sydney Opera Hall**, gebaut 1957-73.



Abb. 2.30 Ansicht der 1973 fertig gestellten Sydney Opera Hall.

Das Gebäude im Hafen von Sydney wurde von dem Dänen Jørn Utzon (*1918) entworfen und gemeinsam mit den Ingenieuren von Ove Arup entwickelt. Die zunächst für den Wettbewerb eingereichte, als Betonschale gedachte Form war zeichnerisch ohne geometrische Festlegung entstanden.



Abb. 2.31 Die Skizze des Wettbewerbsbeitrags von Jørn Utzon.

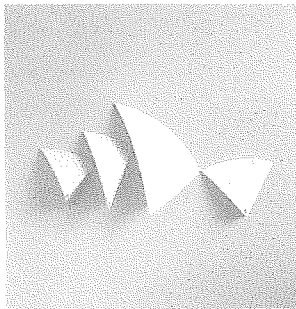


Abb. 2.32 Die Formfindung für das Dach führte zu Ausschnitten aus einer Kugel.

Es stellte sich heraus, dass durch die Geometrie und die punktförmige Auflagerung der Konstruktion mit bis zu 57 m Spannweite Biegebeanspruchungen in der Fläche entstanden, die eine schlanke Schalenkonstruktion nicht erlaubten. In jahrelangen, umfassenden analytischen und modellstatischen Untersuchungen erarbeiteten die Ingenieure vielfältige Vorschläge für die Form und auch die Konstruktion, wobei sie versuchten, Utzons Ursprungsidee und deren „essentielle skulpturale Qualität“ [Arup 1969] möglichst ohne Verluste umzusetzen und dabei geometrische wie auch konstruktive Anforderungen zu berücksichtigen.

Eine frühe Formvorgabe von Utzon entstand dadurch, dass er ein Lineal an einem Ende vertikal einspannte, und das freie Ende verbog [Liddell 2001]. Die hieraus resultierende vertikale Konstruktionsachse im Auflagerbereich führte zu großen Biegemomenten, so dass diese Form verworfen werden musste. Die Aufzeichnungen der über Jahre andauernden Suche nach einer baubaren und ästhetisch befriedigenden Form [Walker 1987] zeigen die vielen Schritte in einem langwierigen Prozess der Formfindung für dieses Projekt. Utzon hieß im Laufe des Planungsprozesses die Einführung einer geometrischen Disziplin letztendlich willkommen und war von der „Schönheit, Logik und Ordnung eines disziplinierten geometrischen Systems“ überzeugt [Arup 1969]. Mehrere Ausschnitte aus einer Kugel wurden zu dem markanten Ensemble zusammengefügt.

Die Flächen stehen auf zwei Spitzen und sind jeweils mit einer zweiten Fläche zusammengesetzt, so dass ein stabiler Bock entsteht. Im Gebäudequerschnitt bildet die Konstruktion eine Art gotischen Spitzbogen. Die Bögen bestehen aus fächerförmig angeordneten Stahlbetonfertigteilen mit konstantem Radius aber über die Höhe variierendem und nach oben hin breiter werdendem T- bzw. Y-Querschnitt und enden in einem gemeinsamen Gratträger. Die einzelnen Segmente sind 4,6 m lang und haben auf einer Höhe alle einen für die Vorfertigung günstigen, identischen Querschnitt. Die Fertigteile wurden auf einem Stahl-Lehrgerüst verlegt und anschließend zusammengespannt. Die Flächen sind außen mit Fliesen verkleidet.

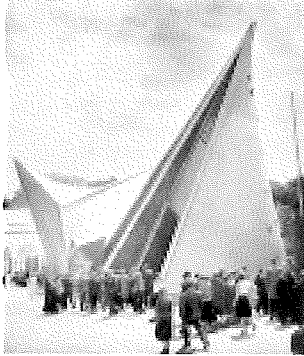


Abb. 2.33 Der Philips Pavillon von Iannis Xenakis und Le Corbusier.

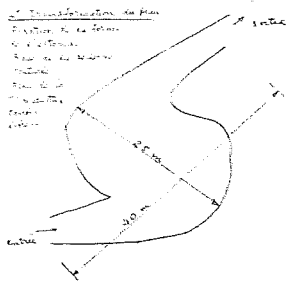


Abb. 2.34 Der in Form eines „Magens“ entworfene Grundriss.

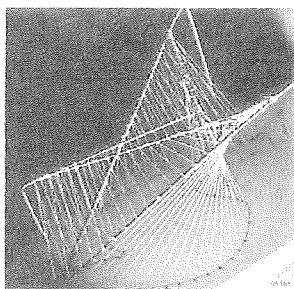


Abb. 2.35 Modell der Regelflächen aus Drähten und Klaviersaiten.

Der **Philips Pavillon** wurde von Le Corbusier (1887-1965) und Iannis Xenakis (1922-2001) für die Weltausstellung 1958 in Brüssel entworfen [Philips 1958]. Der Grundrissentwurf entwickelte sich von einem Kreis mit einander gegenüberliegenden Ein- und Ausgängen in eine „magenähnliche“ Form von etwa 22 x 40 m, die als Grundlage für den weiteren Entwurf diente. Zur Konstruktion bestand zunächst die Idee, ein an einem Gerüst aufgehängtes Netz mit Spritzbeton zu umhüllen. Die Wände sollten möglichst ungleichförmig gekrümmt sein, um einen speziellen Effekt der geplanten Projektion auf die Flächen zu erhalten und um akustische Anforderungen zu erfüllen. Echos aus parallel stehenden ebenen Wänden oder von Flächen mit gleichförmiger Krümmung sollten vermieden werden. Xenakis wählte aus diesem Grund doppelt gegensinnig gekrümmte Flächen, wobei er sich für Hyperbolische Paraboloiden entschied. Die so entstandene Hülle war zwar so mit mathematischen Formen entwickelt, entstand aber „aus Intuition und Formgefühl“ in einem Prozess „dem nicht mit logischer Argumentierung zu folgen ist“ [Philips 1958, 3].

Nach der Ausschreibung ergaben sich noch geringe Änderungen der Form: Die belgische Firma Strabed schlug eine Konstruktion aus vorgespanntem Stahlbeton vor. Die bisher im Gebäude noch vorhandenen Stützen konnten mit diesem System entfallen, und es wurden lediglich in den Verschneidungslinien der unterschiedlichen Flächen kräftige Rippen mit einem Durchmesser von 40 cm angeordnet. Zur Vergrößerung der Steifigkeit der Konstruktion war zudem eine geringfügige Änderung der Geometrie einiger Flächen erforderlich. Mit diesen Ergänzungen entstand die endgültige, später ausgeführte Form. Die Standsicherheit des Pavillons wurde, mit ergänzenden statischen Berechnungen, durch Modellversuche nachgewiesen.

Auf der Baustelle wurden zunächst die Ortbeton-Rippen auf einem Holzgerüst hergestellt. Als Lehre für die Fertigteileplatten entstand anschließend ein weiteres Holzgerüst. Nach der Vermörtelung der Fugen und Aufbringen der Vorspannung wurde das Gerüst entfernt.

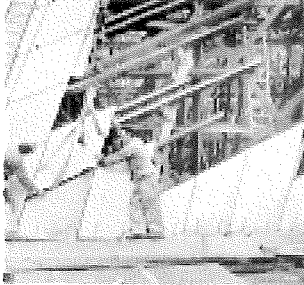


Abb. 2.36 Die Fertigteile werden auf dem Gerüst aneinandergesetzt und vorgespannt.

Beim Bau der Sydney Opera Hall und auch des Philips Pavillons ist die Verbindung von Architektur und Konstruktion bei der Formfindung und -verwirklichung deutlich geworden. Die ersten skizzenhaften Formgedanken des Architekten wurden unter Einbeziehung von Nutzeranforderungen, statischen Überlegungen und herstellungstechnischen Bedingungen kontinuierlich weiterentwickelt, bis eine für alle Seiten kompatible Lösung erarbeitet war. Dies führte nicht zu „akzeptablen“ Kompromissen, sondern zu einem umfassend durchdachten, ausgewogenen Ergebnis. Mit der Entwicklung der digitalen Technik wäre heute der Einsatz von Kugelausschnitten oder HPs aus Gründen der Berechenbarkeit nicht mehr erforderlich. Häufig bestimmen leistungsfähigere Materialien und vor allem höhere Lohnkosten die Konstruktionen. Die Verwendung von Fertigteilen für beide Projekte waren allerdings schon damals Ansätze, Materialqualität zu erhöhen und Baukosten zu senken.

2.3.3 Philharmonie Berlin und TWA Terminal – Ortbeton

Die **Philharmonie Berlin** des Architekten Hans Scharoun (1893-1972) wurde 1957-63 als neue Spielstätte für die Berliner Philharmoniker unter Herbert von Karajan erbaut.



Abb. 2.37 Die Philharmonie in Berlin.

Der zugrunde liegende Leitgedanke Scharouns für den Konzertraum war die Beobachtung, dass Menschen, die beispielsweise einen Straßenmusikanten hören wollen, spontan einen Kreis um ihn bilden.

Diesen Gedanken integrierte er in seinen Entwurf eines Zentralraums, in dem das Publikum um das Orchester herum gruppiert ist. Die Decke sollte über dem Podium einen Hochpunkt aufweisen. Eine Kuppel war jedoch aus akustischen Gründen nicht akzeptabel, so dass sich eine Zeltform ergab. Diese Grundform – Zentralraum mit zeltartiger Decke – hielt Scharoun in seine so genannten Urskizze fest [Wiesniewski 1993]. Als Dachtragwerk war zunächst eine Hängeschalenkonstruktion aus Stahlbeton vorgesehen, die sich aber schon aufgrund eines sehr hohen Schalungsaufwandes als ungeeignet erwies. Aus Gründen der Schallschutzanforderungen für den Saal, der vor Außenlärm bis hin zu überfliegenden Flugzeugen geschützt werden musste, war zudem eine zweischalige Konstruktion erforderlich. Die zweite biegeweichere Schale (Anm.: der Begriff Schale bezieht sich hier wie in der Akustik auf eine schalltechnisch unabhängig schwingende Schicht und ist nicht mit dem statischen Begriff Schale zu verwechseln, der ein gekrümmtes Flächentragwerk geringer Dicke beschreibt) hätte auf der Hängeschale aufgeständert werden müssen.

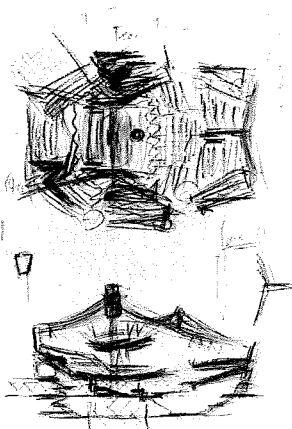


Abb. 2.38 Die Urskizze von Scharoun zeigt das Konzept für die Konzerthalle.

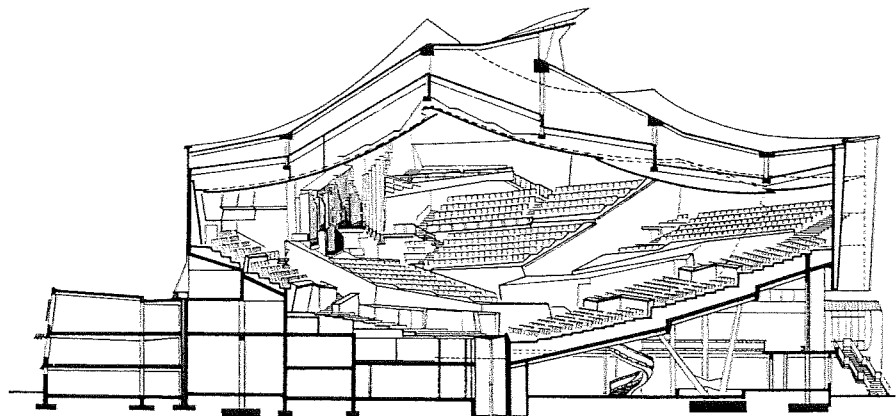


Abb. 2.39 Querschnitt der Philharmonie Berlin. Die nicht sichtbare zweischalige Deckenkonstruktion verläuft polygonal von Träger zu Träger, während die untergehängte Rabitzdecke einer geometrischen Form folgt.

Dies hätte zu hoher Belastung der Hängekonstruktion mit entsprechend großem Horizontalschub an den Auflagern geführt.

Nach diesen Überlegungen erfolgte die Dachkonstruktion mit einem recht konventionellen Tragsystem. Es wurden fünf parallele, fischbauchartig geformte Träger in Spannbetonbauweise mit variierender Querschnittshöhe vorgesehen, die mit einer maximalen Spannweite von 52 m ein zweischaliges Deckensystem aus Ortbeton tragen [Grupp 2006].

Diese zwei Deckenkonstruktionen folgen in ihrer Form grob der von Scharoun gewünschten Saaldeckenform und sind aus geknickten und verwundenen Flächen zusammengesetzt. Die Form der sichtbaren Saaldecke, eine abgehängte Rabitzdecke, kann als geometrisch eingestuft werden: „Die konkave Krümmung der zur akustischen Schallverteilung dienenden Rabitzdecke wird durch zwei Zylinderflächen und im Bereich des dritten Parketts durch Translationsflächen (verwundene Flächen) erzeugt.“ [Wisniewski 1993, 97].

Eine Modellstatik war für den Bau der Philharmonie aufgrund der somit recht klaren Konstruktion nicht erforderlich, allerdings gab es architektonische Modelle, anhand derer eine Übersicht über die komplexe Form erfolgte, da das Erkennen der Geometrie allein aus den Projektionen der Grundrisse und Schnitte nicht möglich war. Nachdem bereits beim Einmessen der Fundamente Fehler aufgetreten waren, fertigte Scharoun zusätzlich sehr nah beieinander liegende Schnitte zur Detaillierung der geometrischen Angaben [Evans 1995]. Gebaut wurde nach im kartesischen Koordinatensystem festgelegten Punkten, und ein wissenschaftliches Modell im Maßstab 1:9 zur Bestätigung der akustischen Funktion des Raumes diente als Referenz während der Bauphase.

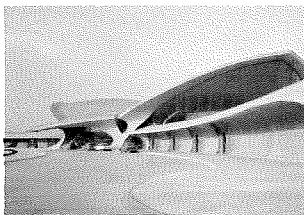


Abb. 2.40 Das TWA-Terminal
in New York von Eero
Saarinen.

Für das **TWA-Terminal**, gebaut 1956-62, war eine doppelt gekrümmte Fläche als dynamische Form Grundgedanke des Architekten Eero Saarinen (1910-1961), der das Projekt gemeinsam mit den Ingenieuren von Ammann & Whitney plante. Das Gebäude erinnert an einen seine Flügel ausbreitenden Vogel und wird auch als „Allegorie des Fliegens“ bezeichnet

[Serraino 2005, 61]. Saarinen berücksichtigte für den Entwurf die Wegbeziehungen der Passagierströme. Zur Geometrie und Herstellung des Gebäudes gibt es nur sehr begrenzte Informationen. Aufgrund seiner besonderen Form wird es in diese Aufstellung trotzdem eingeschlossen.

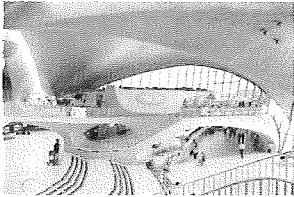


Abb. 2.41 Innenansicht des
TWA Terminals.

Das Gebäude besteht aus vier unterschiedlich großen, zu einer Achse symmetrisch angeordneten Abschnitten, die im Grundriss kleeblattartig angeordnet sind. Diese vier Gebäudeteile stehen jeweils auf zwei Stützen, sind zur Stabilisierung im Zentrum verbunden und kragen nach außen hin weit aus. Zwischen den Schalen ist jeweils ein Lichtspalt angeordnet. Die großen seitlichen Abschnitte haben eine Spannweite von ca. 40 m von Stütze zu Stütze.



Abb. 2.42 Detail einer Stütze
des TWA-Terminals. Die
Auflagerkräfte von zwei
Schalen laufen hier
zusammen.

Das Tragwerk war als Stahlbetonkonstruktion geplant und wurde auch als solche umgesetzt. Aufgrund der Formvorstellungen Saarinens waren für die Lastweiterleitung aus der eher flachen Schale kräftige Randelemente erforderlich, die in massive Stützen übergehen. Möglicherweise wollte Saarinen den Kraftfluss mit diesen Stützen veranschaulichen, formte sie jedoch zusätzlich skulptural aus. Es entstanden hierdurch komplex gekrümmte, fließende Konturen. Die Schalenbereiche selbst zeigen ebenso wie die äußeren Ränder der Schalen im Querschnitt eine Spitzbogenform. Dies weist zwar auf eine mögliche Kreisbogengeometrie der Schalenhälften hin, dagegen spricht jedoch, dass die Form der gebauten Konstruktion mit Hilfe der Modelle ermittelt werden musste. Diese wurden in Schnitte kurzer Abstände zerlegt, um die Geometrie abzulesen [Eero Saarinen 2006], woraus wiederum auf eine undefinierte Form geschlossen werden kann. Es wurden flächendeckend Gerüste aufgebaut und der Beton auf eine konventionelle Holzschalung gegossen. Mit diesem Beispiel wird nochmals deutlich, dass mit einfachen Mitteln durchaus komplexe Formen hergestellt werden konnten.

Das Dach der Philharmonie wurde als System von Stahlbetondecken mit Unterzügen recht traditionell umgesetzt und dabei mit dieser konstruktiven Lösung der ursprüngliche Formgedanke nur grob nachgezeichnet. Die tragende Deckenkonstruktion ist verdeckt durch eine abgehängte Decke, die in mehreren geometrisch geformten Teilen die vom Architekten gewünschte Form realisiert. Am TWA-Gebäude ist das Tragwerk hingegen

vollkommen sichtbar, so dass ähnliche Kompromisse an die ausgeführte Form der Schale wie im Fall der Philharmonie nicht möglich waren. Es ist allerdings anzunehmen, dass die Ausführung mit der geplanten Geometrie weniger genau übereinstimmt.

2.4 Zusammenfassung und Ergebnis

Erkenntnisse in der Wissenschaft hatten bis 1850 besonders hinsichtlich der Tragfähigkeit von Tragstrukturen noch wenig Einfluss auf die Formenwahl in der Architektur. Die handwerkliche Formgebung nach Leistungsfähigkeit wurde zwar praktiziert, aber nicht unbedingt als Teil der Architektursprache und konnte sich auch mit detaillierten Kenntnissen der Baumeister über die Kettenlinie ästhetisch lange Zeit nicht durchsetzen. Erst im 19. Jahrhundert erfolgte eine deutliche selbständige Entwicklung der Formensprache nach dem Kraftfluss, die sich in Industriebauten und Brücken ausdrückte, aber in der Architektur des Historismus weitgehend unberücksichtigt blieb. Die freien Formen wurden vor dem 20. Jahrhundert weder in der Architekturtheorie noch in ingenieurtechnischen Betrachtungen thematisiert.

Obwohl die kubische Rationalität im 20. Jahrhundert und noch bis heute dominiert, entwickelte sich parallel die Architektur der geschwungenen Linien, die einerseits aus dem organischen „Bauen für den Menschen“ herrührte, andererseits aus dem Streben, durch Form Materialeffizienz zu erreichen wie beispielsweise im Schalen- oder Membranbau. Die Entstehung und Herstellung der freien Formen wurden an mehreren Beispielen aus der Zeit um 1920 und um 1960 untersucht. Erst mit Zunahme der kubischen Formen Anfang des 20. Jahrhunderts und bei gleichzeitigem Auftauchen leistungsfähiger Materialien verknüpfte sich der Wunsch nach ausdrucksstarken Formen mit der Möglichkeit, diese auch zu verwirklichen. Durch die Verbreitung digitaler Darstellungs- und Berechnungsmethoden wurde diese Entwicklung unterstützt.

Die herangeführten Beispiele zeigen drei unterschiedliche Herangehensweisen bei der Herstellung von freien Formen. Beim Philips

Pavillon oder dem Opernhaus in Sydney erfolgte eine Annäherung der Tragwerksform durch eine Geometrisierung. Im Fall der Freiheitsstatue, dem Einsteinturm und der Philharmonie konnte mit einem mehrlagigen System die Form relativ genau hergestellt werden. Das TWA-Terminal folgte als Schalentragwerk auf Randträgern und plastisch ausgeformten Stützen seiner geplanten Form, wobei es möglich ist, dass Saarinen die Form der Schale selbst im Laufe der Planung geometrisierte.

Die Möglichkeiten, freie Formen herzustellen, sind also bereits seit längerer Zeit gegeben. Herrmann Finsterlin schrieb dazu, „Sind wir über die ersten Variationsreihen der Grundkörper hinausgekommen? Nicht etwa aus Konstruktions- oder Materialschwierigkeiten. Der Mensch, der die Monolithe der Inkas einschiffte oder die Steingiganten der Osterinseln meißelte, der die Stufenpyramiden haute und den Koloß von Rhodos goß, hätte die großartigste, formenreichste Riesenhohlplastik – denn eine solche hat ein Menschenbau doch zu sein – im ursprünglichsten, wie im weitesten Entwicklungssinne – auf die Erde stellen können, wenn es ihm eingefallen wäre!“ [Finsterlin in Borsi 1968]. Dieser Gedanke bestätigt sich im Bau der Freiheitsstatue, die als „Riesenhohlplastik“ schon zum Ende des 19. Jahrhunderts gebaut wurde.

Bei der Umsetzung komplexer Formen war zunächst die Annäherung an beschreibbare Geometrien erforderlich, wenn die Form kommuniziert werden sollte, oder aber es erfolgte eine direkte Übertragung vom Modell. Dies galt für freie, aber auch für die physikalischen Formen. Die Entwicklung auf dem Gebiet der digitalen Technologie führt heute dazu, dass mit dem Computer ein Werkzeug vorhanden ist, um auch die komplexesten Formen zu kommunizieren. Die Anwendung des Computers in Entwurf und Konstruktion von Gebäuden scheint somit neue Wege zu eröffnen. Im folgenden Kapitel werden Projekte der heutigen Zeit vorgestellt und die unterschiedlichen Methoden der Formentstehung und -generierung im Entwurf verglichen.

Teil II Die Entstehung der Form

3 Die architektonische Gestaltung

Die Diskussion um freie Formen ist hochaktuell. Definitionen werden formuliert, Sinn und Zweck erörtert, die Methoden der Herstellung beurteilt und über die Herkunft des „Blobs“ gemutmaßt. Beispielhaft für diesen Diskurs sei hier ein Symposium an der TU Delft genannt, „The First International Colloquium of Free Form Design“, welches im September 2006 stattfand. Die Teilnehmer, Wissenschaftler und Praktiker aus den Gebieten Design, Architektur und Ingenieurwesen, betrachteten die freie Form aus unterschiedlichen Blickwinkeln und mit vielfältigen Ergebnissen.

Kas Oosterhuis sieht die freie Form als eine nicht- standardisierte Architektur, die aus der intuitiven Skizze entstehe und nicht mehr auf die Anforderungen der Massenproduktion angewiesen sei [Oosterhuis 2006]. Axel Kilian proklamiert die freie Form als Form, die frei von formalen Richtlinien und Standards ist, so dass die Möglichkeit bestehe, auf die zunehmend ganzheitlichen Ansprüche des Bauens zu reagieren [Kilian 2006]. Die freie Form ist laut Branco Koralevic aus dem Umweltbewusstsein entstanden, und die gekrümmte Form sei als Annäherung an die Minimalfläche zu beurteilen [Koralevic 2006]. Für ein Oxymoron hält Larry Barrow den Begriff „Entwurf freier Formen“, da eine freie Form aus der Befreiung von allen Zwängen entstehe, der Entwurf jedoch grundsätzlich eine zielorientierte Aktivität sei, die bestimmte Randbedingungen zu erfüllen habe [Barrow 2006]. Diese unterschiedlichen Interpretationen deuten darauf hin, dass die Untersuchung des Entwurfsprozesses in der Architektur zu einer weiteren Klärung des Begriffes „Freie Form“ führen kann, da diese immer ein Produkt dieses Entwurfsprozesses ist.

Der historische Rückblick hat gezeigt, dass die Wahl der Formen in der Architektur von diversen externen Faktoren beeinflusst wird. Dennoch bleibt die Gestaltung von Gebäudeformen immer individuell bestimmt. Es

werden zunächst unabhängig von der Einteilung in geometrische, physikalische oder freie Formen Motive für die Auswahl von Formen behandelt, die aus einem architektonischen Verständnis herrühren.

Die Arbeitsweisen von Architekten sind von Überzeugungen geprägt, die zu einer Form führen und von Methoden, mit denen die Ausarbeitung und Festlegung der Gebäudeform erfolgt. Die Definition der Form ist ein langwieriger und komplizierter Prozess, in den eine Vielzahl von Randbedingungen einfließt. Wie im letzten Kapitel deutlich wurde, kann die endgültige Form sich schon aus konstruktiven und herstellungstechnischen Gründen bis zu ihrer Ausführung ändern. Die ursprüngliche Gestaltvorstellung des Entwerfenden ist aber immer konzeptionelle Grundlage für das gebaute Resultat.

3.1 Formbestimmung durch Impulse

Wesentliche Bedingungen in der Architektur sind die **Funktion** und der **Kontext**. Das Schaffen von Flächen und Räumen für festgelegte oder flexible Nutzungen, der Bezug von Innenraum und Außenraum, die Berücksichtigung technologischer Grundlagen und ästhetischer Wirkung sowie die Einbindung in die örtliche, die kulturelle und die soziale Umgebung können als Voraussetzung für jeden Entwurf zugrunde gelegt werden.

Neben der Funktion und dem Kontext leitet sich der Entwurf einer individuellen Form aus einer projektspezifischen Idee ab, die aus unterschiedlichen Impulsen gespeist wird. Es können vier wesentliche Impulse für die Gestaltung einer Form identifiziert werden. Diese sind nicht absolut voneinander abgrenzbar sondern stellen lediglich eine mögliche Tendenz im Entwurf dar, die auch nur bedingt ablesbar ist.

- **Theorie** – Formgebung aus einem theoretischen Ansatz heraus, mit dem die Geometrie und die Anordnung bestimmt werden.
- **Technik** – Formen werden aus technischen Randbedingungen

erarbeitet, neue Materialien und Technologien werden eingesetzt.

- **Organik** – „Bauen für den Menschen“ – Entwicklung der Formen nach individuellen Bedürfnissen der Nutzer
- **Analogie** – Formgebung spiegelt eine Figur oder einen Prozess wider, wobei im Gegensatz zur künstlerischen Skulptur die architektonische Funktion berücksichtigt ist.

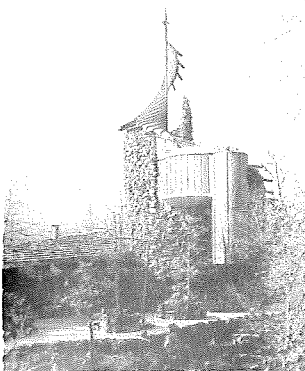


Abb. 3.1 Das Bavinger House von Bruce Goff mit spiralförmigem Grundriss.

Aus einer **Theorie** entstehen strenge geometrische Formen wie z.B. in der klassischen Moderne. Kugel und Quader, Kreisabschnitt und rechter Winkel herrschen bei diesen Entwürfen vor, aber auch scheinbar irrationale Formen können aus einer konsequenten theoretischen Analyse stammen. Peter Eisenman erarbeitet seine Projekte aus philosophisch-theoretischen Überlegungen. Er spielt mit Symbolen und Bedeutungen und thematisiert das „Verhältnis von Form und Bedeutung“ [Ciorra 1995, 44] durch das Verschieben und Verschneiden von Kuben. Der Entwurf des Max-Reinhardt-Hauses hingegen besteht aus unregelmäßig gefalteten, drei- und viereckigen Flächen und soll das Umfeld der Stadt widerspiegeln [Ciorra 1995]. Auch Daniel Libeskind entwarf das Jüdische Museum in Berlin unter Anwendung eines festgelegten Bildungsprinzips mit konkretem örtlichem Bezug, indem er auf dem Stadtplan Wohnorte jüdischer Bürger miteinander verband und daraus den Grundriss des Gebäudes entwickelte. Der theoretische Impuls bezieht sich auf die geometrische Grundlage des Entwurfs.

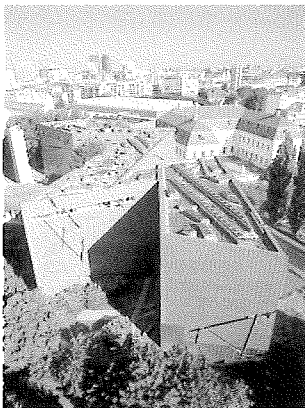


Abb. 3.2 Das Jüdische Museum in Berlin von Daniel Libeskind.

Dagegen ist die **Technik** eher auf die Ausführung ausgerichtet. Die so genannten Ingenieurarchitekten beispielsweise entwickeln Formen mit einer vorhandenen oder selbst entwickelten Technik. Frei Otto widmete sich insbesondere dem Leichtbau und experimentierte bei der physikalischen Formfindung mit Selbstbildungsprozessen. Seine Projekte wie die Multihalle in Mannheim mit Carlfried Mutschler und Arup, der noch ungebraute Hauptbahnhof in Stuttgart mit Christoph Ingenhoven und Büro Happold oder die Brücken in Mechtenberg mit den Ingenieurbüros Happold und Hilbers zeigen unterschiedliche Formen, die mit

Schwerpunkt auf die Effizienz der Konstruktion entstanden. Der Spanier Felix Candela entwarf in Mexiko HPs, wobei er durch die Kombination der Regelflächen eine große Vielfalt von Formen erreichte, vom seerosenartigen Restaurant in Xochimilco bis zur gotisch wirkenden Kirche Milagrosa.

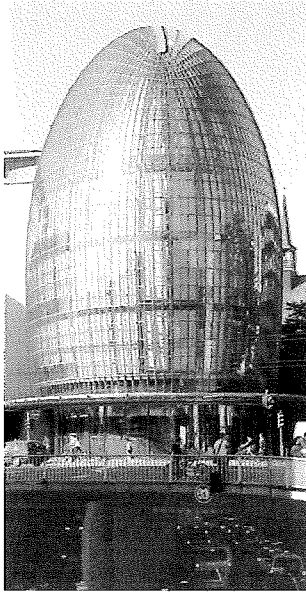


Abb. 3.3 Die Hülle für das Kaufhaus P&C von Piano wurde zur geometrischen Figur entwickelt.

Pier Luigi Nervi schuf eine ganz besondere Qualität seiner Bauwerke mit der Anwendung von Halbfertigteilen aus Ferrocement, die einerseits komplexe Strukturen wie bei der Decke der Wollspinnerei Gatti zuließen, andererseits die Wiederholung der Elemente gleicher Form erforderten, wodurch eine wirtschaftliche Herstellung möglich war. Heinz Isler hingegen erlangt die Form vieler hundert Schalen mit verschiedenen experimentellen Methoden als Hänge-, Pneu- oder Fließformen. Diese stellen keine Regelflächen dar, woraus sich ein großer Aufwand beim Bau der Schalung ergibt. Auch Isler strebte daher bisweilen eine Wiederholung der Formen und Wiederverwendung der Schalung an.

Eine Reihe von Architekten entwerfen Gebäude mit einer eher technischen Ästhetik, wobei neue Materialien und Technologien sichtbar gemacht werden. Dies geht häufig mit geometrisierten Formen einher, ein weiterer Hinweis auf die technische Ausrichtung der Architekten. Norman Fosters Entwurf für die Philologische Bibliothek in Berlin beispielsweise begann mit tropfenartiger Kontur und wurde in mehreren Schritten in eine geometrische Form aus parallelen Korbbögen überführt. Die Entwicklung des Entwurfs für das Britische Museum von Foster führte ebenfalls zu einer geometrisch definierten Fläche. Die Welle für Renzo Pianos Zentrum Paul Klee wurde durch geneigte, im Grundriss gekrümmte Parabelbögen hergestellt. Die Form der Holzlamellenbögen für das Kaufhaus Peek & Cloppenburg in Köln von Piano ist aus elliptischen und kreisförmigen Abschnitten zusammengesetzt.



Abb. 3.4 Das Endless House im Modell von Kiesler.

Der Schwerpunkt **Organik** wurde durch die Vertreter der organischen Architektur gesetzt. Durch die Suche nach der „Wesenheit des Objektes“ [Hugo Häring zitiert nach Van der Ree 2001, 38] und der Gestaltung von innen heraus entstanden häufig fließenden Bewegungsabläufen

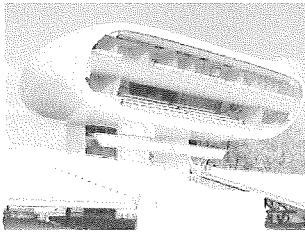


Abb. 3.5 Das Lord's Media Centre von Future Systems ist einer Kamera nachempfunden.

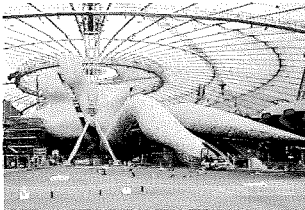


Abb. 3.6 Die Body Zone von Branson Coates Architecture, 1999, ist eines der Gebäude im Millennium Dome.



Abb. 3.7 NOX Architekten arbeiten mit realen Fadenversuchen und digitalisieren die Ergebnisse.

entsprechende oder auch höhlenartige, gekrümmte Formen. Friedrich Kiesler entwarf mit dem „Endless House“ 1950 eine Form, die „sich von der sozialen Dynamik“ der Bewohner ableitete. Er sieht das Haus nicht als „Lebensmaschine“ sondern als „lebender Organismus mit einem hochsensiblen Nervensystem“ [Kiesler zitiert nach Rothkirch 2000, 9]. Es entstehen nicht nur gekrümmte Formen bei der Formfindung, die sich auf das „Bauen für den Menschen“ bezieht. Der Architekt Peter Hübner beispielsweise arbeitet mit plus+ bauplanung an Gebäuden unter Einbezug der späteren Bewohner in den Bauprozess und entwirft hierfür sowohl gerade als auch gekrümmte Geometrien [Hübner 2006].

Die Bezeichnung einer Konstruktion als **Analogie** bezieht sich in der Architektur auf die assoziative Formgebung, muss aber von der bildhauerischen Arbeit unterschieden werden, da bestimmte Qualitäten wie „ Bauteilgliederung, Innenverhältnisse, umbauter Raum, Öffnung und Konstruktionsweise“ [Lynn 2004, 160] in der Architektur im Gegensatz zur Bildhauerei beachtet werden müssen. Mit der Analogie wird eine Assoziation geschaffen. Diese kann sich auf Figuren oder Objekte beziehen, wie beispielsweise das Media Centre in London vom Büro Future Systems. Das Medienzentrum für Sportreporter ist aus der Form einer Kamera entstanden. Ein weiteres beispielhaftes Projekt ist die Body Zone im Millennium Dome von Branson Coates Architecture als Analogie zweier Körper, die in einen Pavillon umgesetzt wurde. Bei Eero Saarinens TWA Terminal als Analogie des Fliegens bezieht sich diese eher auf einen Prozess, in diesem Fall einen Bewegungsprozess. Dieser Bezug ist auch bei den folgenden Entwürfen festzustellen.

Bei der Gestaltung des Einsteinturms versuchte Erich Mendelsohn Dynamik auszudrücken. Er hatte in Skizzen „eine eigene geschmeidige Formensprache geschaffen, die ihn befähigte, Bewegung zu suggerieren“ [Huse 2000, 23] und sich auch theoretisch mit dem Ausdruck der Form von Bewegung auseinandergesetzt. Bewegung drücken auch die Gebäude von Frank O. Gehry aus, die aus handgeformten Modellen wie zerknülltem Papier mit undefinierten Krümmungen entstehen. Lars

Spuybroeck gründet mit seinem Büro NOX Entwürfe auf Formfindungsmethoden entsprechend der Experimente Frei Ottos, jedoch so verfremdet, dass die Effizienz der Konstruktion und damit der Impuls der Technik nicht maßgeblich ist. Bernhard Frankens Projekte „Bubble“ und „Dynaform“ wurden aus simulierten „Effekten“ wie energetische Kraftfelder im Computer generiert. Die entstehenden Formen der Gebäude sind als Analogie auf Prozesse in der Natur anzusehen.

Hermann Finsterlin entwarf eine ganze Reihe skulpturaler, nicht gebauter „Traumhäuser“, „tolle Gebilde, außen und innen, die trotz gewagtester Dynamik das statische Gleichgewicht bewahrten“ [Finsterlin in Borsi 1968, 37]. Obwohl Finsterlin auch die Nutzung als Entwurfsimpuls nannte, kommt seine Motivation aus der Schaffung neuer, komplexer Formen, die zu Assoziationen mit lebendigen Wesen führen. „Auch die Naturformen sind ihrer unerbittlichen Oekonomie wegen noch äußerst einfach im Verhältnis zu dem, was sich unter unabhängigster, höchst gemodelter, als Ganzheit immer noch äußerst harmonisch möglicher Neuformung vorstellen und bilden lässt“ [Finsterlin in Borsi 1968, 43].

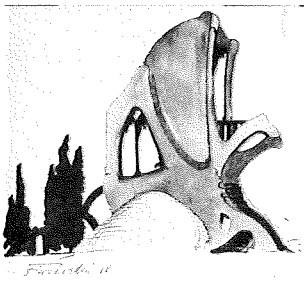


Abb. 3.8 Entwurf einer „Villa am See“ von Hermann Finsterlin.

Eine Festlegung dieser Impulse für einen Architekten oder auch nur ein einzelnes Projekt ist nicht möglich, da sich die Entwurfsidee gewöhnlich aus mehreren Impulsen zusammensetzt. Für Frei Otto ist neben der Technik die Kenntnis der Natur und die organische Logik des Entwurfs von großer Bedeutung. Le Corbusier stellte die aus dem mathematischen Prinzip des Goldenen Schnitts entwickelte Maßeinheit des Modulors als menschliches Maß, also mit dem Argument des Bauens für den Menschen, dar. Bei Santiago Calatrava, der Analogien zu bewegten Körpern bei der Gestaltung seiner Projekte verwendet, ist der theoretische Impuls bei der Formgebung vorhanden, da er mit Bewegungsalgorithmen auf mathematischer Grundlage arbeitet.

Umgekehrt wird deutlich, dass sich auch die Form eines Gebäudes selbst, ob geometrisch, physikalisch oder frei, nicht einem bestimmten Impuls zuordnen lässt. Eero Saarinens Flughafen Terminal der TWA ist einerseits aus der Nutzung, den Bewegungsabläufen der Menschen, entwickelt und

gleichzeitig eine Analogie. Candelas Restaurant in Xochimilco erinnert an eine Seerose, und hat ebenso eine technische Grundlage. Dennoch zeigt diese Aufstellung, dass alle Formen aus Lösungsansätzen stammen, die auf einem theoretischen und fachlichen Grundgerüst beruhen. Dies schränkt eine so genannte „Freiheit“ der Form von vornherein ein. Eine weitere Einschränkung erfährt die Form durch die Festlegung im Computer. Impulse sind nur begrenzt an die manuelle oder digitale Formfindung gekoppelt, und dennoch wird der Computer stets als ein Faktor genannt, der zum häufigen Entwurf freier Formen beitragen soll. Es wurde daher untersucht, inwiefern der Computer am Entwurf freier Formen beteiligt ist.

3.2 Einsatz des Computers beim Entwurf

Der Computer ist ein Werkzeug, welches als Rechen-, Zeichen- oder Entwurfshilfe verwendet werden kann. Seine hohe Datenkapazität gekoppelt mit der Eignung, Rechenoperationen durchzuführen, erlaubt es, Punkte im Raum zu definieren, darzustellen und ihre Beziehung zueinander unter zuvor festgelegten Randbedingungen zu erfassen und auszuwerten. Das bedeutet, dass statische und dynamische Situationen von der einfachen Darstellung eines Grundrisses bis hin zur komplexen Simulation eines hydraulischen Fließvorgangs am Rechner erstellt werden können. Eine Differenzierung zwischen dem „darstellenden“ und dem „erzeugenden“ Werkzeug [Lev 2002] ist daher nicht ganz zutreffend, denn im Computer werden ausschließlich Darstellungen abgebildet, die aus vorgegebenen Randbedingungen hervorgehen.

Der Unterschied besteht in der Kapazität der einzelnen Software-Programme, die räumliche Beziehung definierter Punkte im Raum zu erkennen und zu verändern. Bei der Anwendung elementarer Zeichenprogramme wie AutoCAD oder ArchiCAD beispielsweise gibt der Anwender den Ort der Punkte im Raum vor. Mit den Programmen MAYA oder FormZ hingegen werden die Punkte und ein Algorithmus definiert, so dass Formen zwar scheinbar selbständig generiert werden, tatsächlich

aber auf genauen Vorgaben des Anwenders beruhen. Auch die digitale Morphogenese, eine Art zufallsbedingter Wachstumsprozess im Computer, ist kein rein selbständiger Prozess sondern wird durch Vorgaben des Benutzers gesteuert [Leach 2006].

Eine Grundlage für die Darstellung komplexer Formen ist die Möglichkeit, Kurven im Raum beschreibbar zu machen. Dies erfolgt mit so genannten Splines und deren weiterentwickelten Formen, den Bézierkurven, B-Splinekurven und den NURBS (Non-uniform Rational B-Splines) [Glaeser 2004], die als Linien oder als Flächen erstellt werden können. Mit Splines können durch Interpolation und Gewichtung beliebige Flächen, die durch mathematische Gleichungen nicht mehr einheitlich darzustellen sind, eindeutig beschrieben werden. Während traditionell die Gerade ein Grundelement der Architekturzeichnung war, ist dieses mit den heute durch die große Rechenkapazität des Computers relativ einfach zu handhabenden Splines die Kurve geworden [Reeser 2004, 3].

Die Architektur profitiert hier von einem Wissenstransfer aus anderen Fachsparten. Traditionell wurden Technologien und Arbeitsweisen z.B. aus dem Schiffsbau in die Baukonstruktion übernommen, und noch heute findet hier ein Austausch statt. Die Konstruktion des Media Centres von Future Systems z.B. wurde mit Hilfe von Methoden und Technologien des Bootsbaus möglich [Lyall 2002]. Seit dem 20. Jahrhundert gibt es einen maßgeblichen Transfer von Entwurfstechniken und Rechneranwendungen aus der Automobilindustrie und aus der Luft- und Raumfahrttechnik. Beispielsweise wurde die Finite-Elemente-Methode ebenso wie das heute in der Architektur zur Generierung von Formen verwendete Programm CATIA ursprünglich für den Flugzeugbau entwickelt [Kurrer 2002]. Die Entwicklung der Splines stammt aus dem Automobilbau [Glaeser 2004]. Neu ist die Adaption von Methoden der Filmindustrie. Das dort entwickelte Programm MAYA für die Darstellung von Animationen wird heute von Architekten für die Formfindung verwendet.

Einfache Zeichenprogramme gehören heute zum Standard im Architekturbüro und die Anwendung der neuen Design-Software nimmt zu. Hiermit ist es möglich, alle denkbaren Formen auf das Genaueste

geometrisch festzulegen, diese Geometrie statisch zu evaluieren und zudem noch ohne Genauigkeitsverlust mit den Entwurfsdaten direkt über rechnergesteuerte Werkzeuge in reale Elemente umzusetzen, die vor Ort eingebaut werden können. Trotzdem sollte der Computer als Medium nicht überbewertet und ihm schon gar nicht ein Entwurf zugeschrieben werden. Er ist ein hoch entwickeltes Instrument, welches im Entwurf auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden kann.

Gebäude werden mit den modernen Entwurfstechniken nicht mehr nur aus Grundrissen und Schnitten entwickelt. Stattdessen kann die äußere Hülle des Entwurfs als Ausgangspunkt dienen und die Ausarbeitung der Innenräume folgt anschließend, so dass Grundrisse und Schnitte erst nachträglich als Dokumentation des Entwurfs erstellt werden [Reeser 2004]. Unverzichtbares Hilfsmittel eines jeden Entwurfes ist nach wie vor das Modell, an dem eine Idee visualisiert, entwickelt und letztlich auch kommuniziert wird. Modelle wurden von jeher zur Formfindung eingesetzt. Seit den 1980ern erfüllten mit steigender Kapazität der Rechner diese Aufgabe nach und nach auch die Computermodelle. Die Geometrie wurde so direkt ablesbar und auch berechenbar. Bei der Entwurfsentwicklung mit dem Computer beschreibt Harald Kloft drei unterschiedliche Ansätze [Kloft 2001] zur Arbeit mit dem realen oder dem digitalen Modell:

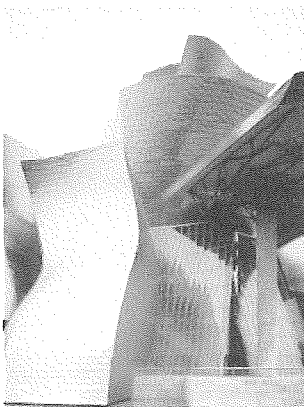


Abb. 3.9 Gehrys Guggenheim
Museum in Bilbao.

Die Arbeitsweise Frank O. Gehrys stützt sich auf reale Modelle aus verschiedenen Materialien, die nach Gehrys Vorstellungen geformt werden. Die Konturen des Modells werden in einen Computer eingelesen, verfeinert, und aus diesen Daten anschließend wieder ein physisches Modell erstellt. Dieses wird wiederum verfeinert und wieder eingescannt. Teils wird hierbei mit Geräten zur Vermessung der Modelle gearbeitet, teils mit 3-D Scannern. Es entsteht ein iterativer Prozess, der mit einem Computermodell endet, welches die geometrischen Grundlagen für die weitere Planung und Ausführung liefert, mit einer inneren und einer äußeren Kontur, deren Zwischenraum für Tragwerk, Ausbau und Fassade vorgesehen ist.

Bernhard Franken arbeitet bei der Entwurfsentwicklung direkt mit dem Computermodell, an dem er mit unterschiedlichen Randbedingungen und

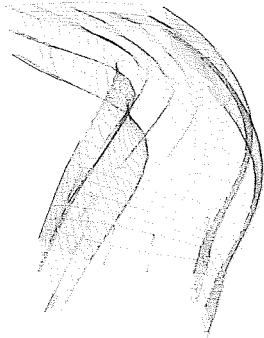


Abb. 3.10 Ein Computermodell der Dynaform von Bernhard Franken.

Gesetzmäßigkeiten „modelliert“. Das Projekt „Bubble“ mit BMW beispielsweise wurde aus zwei im Computer programmierten sich vereinigenden Tropfen erstellt. Der zweite BMW-Pavillon, genannt „Dynaform“, war als an den Enden offener Quader konzipiert, der im Rechner mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten verformt wurde. Eingesetzt wurden hierbei der Doppler-Effekt sowie Kraftfelder, die so definiert wurden, als gingen sie von umliegenden Gebäuden aus. Bei beiden Projekten wurde der Grad der Verformung während der Simulation vom Architekten bestimmt. Franken erstellt zwar zur Veranschaulichung aus den Computermodellen analoge Modelle [Franken 2001], aber die Daten aus den digitalen Modellen werden direkt zur statischen Analyse und zur Fertigung der Konstruktion verwendet.

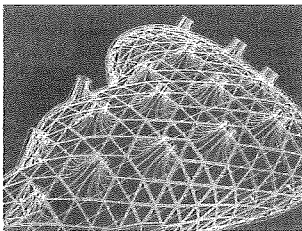


Abb. 3.11 Tragkonstruktion des Kunsthauses in Graz.

Den dritten Ansatz beobachtete Kloft in der Arbeitsweise von Peter Cook am Kunsthaus Graz, die eine Mischform der beiden zuvor beschriebenen Methoden darstellt. Zwar wurde das Modell manuell angefertigt, eine Annäherung der Form erfolgte dann ohne direkte Übertragung durch Einleseprozesse von den Ingenieuren mit Hilfe von Rechnermethoden. Die Verformung einer Kugel mit definierten Kraftfeldern führte zu einem Ergebnis, welches dem von ihm vorgegebenen Modell für den Architekten gestalterisch ausreichend ähnlich war.

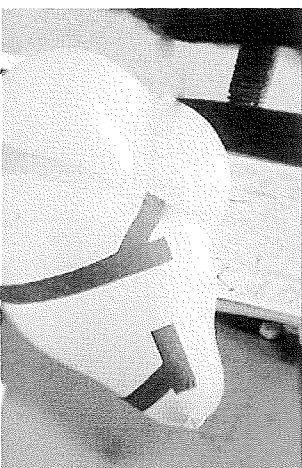


Abb. 3.12 Der mit Streifen beklebte Ballon von NOX.

Tatsächlich ist es üblich, im Wechsel zwischen digitalen und analogen Modellen zu arbeiten. „Eine Trennung und Unterscheidung beider Medien ist nicht mehr möglich und nötig. (...) Die Auswahl und Entwicklung der Schnittstellen zwischen beiden Medien wird damit ein wesentlicher Teil der Arbeit“ [M. Becker 2004, 53]. Eine Mischform wird auch von Lars Spuybroek mit seinem Büro NOX praktiziert. Er arbeitet mit physischen Modellen zur Gewinnung von Form-„ideen“ und zur Förderung des Verständnisses natürlicher Prozesse in enger Anlehnung an die Forschungen Frei Ottos. Das Beispiel des D-Towers zeigt, dass zunächst mit einem Ballon gearbeitet wurde, dessen Form durch Klebestreifen manipuliert wurde. Dieser Vorgang wiederholte sich dann an einem digitalen Modell als Animation. Anschließend formte Spuybroek die Beine als Umkehrung von hängenden „Henkeln“ und gestaltete diese durch Variation der Beinstellung und Umwandlung der linienartigen Stützen zu

Flächen, die mit dem Turmoberteil verschmolzen. Mit dem Entwurf des Softoffice war ebenfalls zunächst eine intensive experimentelle Phase verbunden, in der entsprechend Ottos Fadenversuchen Gummifäden in Lack getaucht wurden, wodurch eine dreidimensionale Form aus Linien und Flächen entstand. Diese wurden wiederum digitalisiert (wie genau wird nicht beschrieben, vermutlich durch Nachstellung der Versuche im digitalen Medium) und die Form am Rechner weiter bearbeitet. Im Unterschied zu der Arbeit von Frei Otto ist der Kraftfluss in der Form für NOX bei der Formfindung nebensächlich.

Die verschiedenen Ansätze zur analogen oder digitalen Formfindung haben heute gemeinsam, dass am Ende des Entwurfsprozesses eine Geometrie im Computer festgelegt ist, auf deren Basis die Ausführung der Konstruktion geplant werden kann. Sie unterscheiden sich damit von der traditionellen Arbeitsweise, bei der das Modell manuell gefertigt wird und die Festlegung der Geometrie durch zweidimensionale Planung erfolgt. Diese Darstellungsweise ist für komplexe Formen nicht eindeutig genug, weshalb diese vor dem Einsatz des Rechners entweder durch Geometrisierung weiterentwickelt oder durch graduelle maßstäbliche Vergrößerung umgesetzt werden musste.

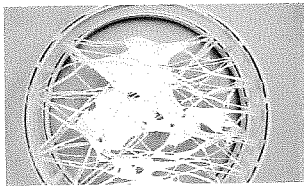


Abb. 3.13 Für das Soft Office experimentierte NOX mit Fäden.

Der Architektentwurf basiert auf unterschiedlichsten Arbeitsmethoden und Inspirationen. Dies hat sich auch mit dem Medium Computer nicht geändert. Es sind lediglich neue Möglichkeiten der Formmanipulation und der Formerfassung hinzugekommen, und die Definition komplexer Kurven, Falten und Flächen ist deutlich vereinfacht. Diese gekrümmte und gefaltete Formensprache des Computers wird dominanter, je mehr Architekten und Ingenieure die Bedienung des Computers beherrschen. „Wenn sich die Produktionsbedingungen der Architektur verändern, verändert sich auch die Architektur“ sagte schon in den 1960er Jahren Konrad Wachsmann [Ruby 2001, 206] und Greg Lynn konstatiert: „Es gibt eine Sprache der Gestaltung, die der Computer mit sich bringt, und zuerst macht man das, was der Computer gut kann“ [zitiert nach Zellner 2001, 38].

Während einige Architekten ihre Entwürfe noch von außerhalb des

Computers steuern, kann der kundige Anwender der neuesten Software eben mit der dort verfügbaren Formensprache operieren, die über die geraden Linien und rechten Winkel weit hinaus geht. Die Geschwindigkeit und die Präzision der Ausführung werden zusätzlich vergrößert [Reeser 2004]. Diese Entwicklung ist allerdings nicht als neue Entwurfsmöglichkeit anzusehen, sondern eben genau als Produktionsbedingung, wobei diese hier nicht nur in den Ausführungs- sondern schon in den Entwurfsprozess eingreift. Da also diverse Software-Programme die gekrümmte Linie als Standardeinstellung anbieten, ist es eine logische Entwicklung, dass in der Architektur mehr und mehr komplex gekrümmte Objekte entworfen werden. Die Kapazität der Software hat somit Auswirkungen auf die Entwurfentwicklung, da durch die neue Technologie die Bearbeitung der Form und ihre genaue geometrische Festlegung vereinfacht werden.



Abb. 3.14 Das Kantendreieck in Berlin.

3.3 Entwicklung einer Form

Die Differenzierung von Hugo Häring zwischen der objektiven, leistungsbezogenen „Gestaltfindung“ und der subjektiven, willkürlichen „Gestaltgebung“ [Kuhlmann 1998, 67] trifft nur begrenzt zu, vielmehr existieren die Gestaltfindung und die Gestaltgebung nebeneinander und miteinander. Hierbei ist grundsätzlich der Entwurfsprozess, den eine Form durchläuft, zu berücksichtigen, in dem das Willkürliche und das Leistungsbezogene verknüpft sein können. Es findet in diesem Prozess eine Entwicklung der Form statt, die von der ersten Skizze bis zur Ausführung reicht.

Die Formentwicklung bietet eine weitere mögliche Unterscheidung zwischen geometrischen, physikalischen und den freien Formen. Im Hinblick auf die freien Formen beschreibt Annette Bögle dies so: „Die Befreiung der Form und die Kreativität (liegen) darin, dass die Formen zu ihrer endgültigen Gestalt hin entwickelt werden und nicht mit der Formulierung der Flächenfunktion, wie im Fall der geschlossen beschreibbaren Flächen, festgelegt sind“ [Bögle 2005, 63].

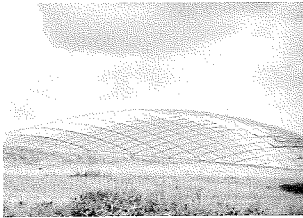


Abb. 3.15 Die Form des Großen Gewächshauses von Norman Foster ist ein Ausschnitt aus einem Torus.

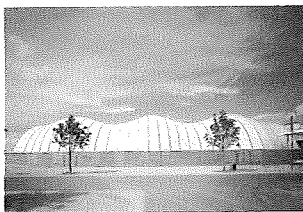


Abb. 3.16 Der Japanische Pavillon von Shigeru Ban wurde mit realen und digitalen Modellen entwickelt.



Abb. 3.17 Die 50 m weit spannende Dachkonstruktion aus Mauerwerk für eine Lagerhalle von Dieste.

Die Entwicklung der Form kann sowohl von einer „geschlossenen beschreibbaren Fläche“ wegführen, wie am Beispiel des aus einem Quader generierten Dynaform Pavillons von Bernhard Franken deutlich wird, als auch hin zu ihr, wie die Form der neuen Bibliothek für die FU Berlin von Norman Foster, die zu einer Korbbogengeometrie entwickelt wurde. Ein Vergleich mit der Einteilung in Formfamilien ergibt zudem, dass die physikalischen Formen nicht über eine Flächenfunktion festgelegt sind, aber auch nicht als freie Form gelten. Trotzdem führt eine Einteilung in elementare und in entwickelte Formen zu einer Unterscheidung, die auf den Entwurfsprozess zurückgreift. Auf Grundlage der bisher gewonnenen Erkenntnisse über die Entstehung der Formen und ihrer Entwicklung im Entwurfsprozess entsteht die folgende Unterteilung von Formen.

Elementare Formen

Elementare geometrische Formen werden direkt aus dem Repertoire der bekannten geometrischen Körper entnommen. Das Kantendreieck oder die Infobox in Berlin sind als Quader geplant und das Gewächshaus des National Botanic Garden in Wales stellt einen Ausschnitt aus einem Torus dar. Einfache Bildungsprinzipien wie die Translation oder Rotation führen zu weiteren elementaren geometrischen Formen.

Die Bearbeitung der Form erfolgt durch die Festlegung der vorgegebenden Parameter wie Radius, Länge oder Höhe oder auch eines Ausschnittes aus einer geometrischen Form. Durch diese sind die Geometrie der Oberfläche selbst und die Grundrissform, die einen Schnitt durch die Oberfläche in einem definierten Horizont darstellt, festgelegt. Dies gilt für alle mathematisch formulierten Flächen. Ist ein abweichender Grundriss gewünscht, muss die Form vertikal abgeschnitten oder anders „entwickelt“ werden.

Elementare physikalische Formen entstehen unmittelbar aus der maßgeblichen vorhersehbaren Belastung, wie bei der Salginatobelbrücke von Robert Maillart, deren Form aus der graphischen Statik entwickelt

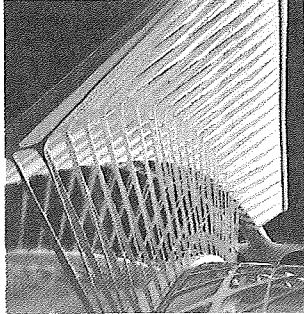


Abb. 3.18 Ein Modell des TGV-Bahnhofshalle in Lyon von Calatrava.

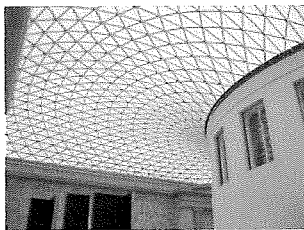


Abb. 3.19 Die Überdachung des Britischen Museums in London mit einer komplexen mathematischen Fläche.

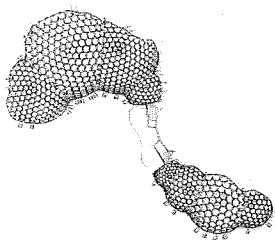


Abb. 3.20 Das Projekt Eden von Grimshaw kombiniert Kugelabschnitte.

wurde und damit auf dem Kraftverlauf im Tragwerk beruht, wie auch das Beispiel des Eiffelturms zeigte. Eladio Dieste plante das Dach der Lagerhalle Julio Herrera y Obes mit doppelt gekrümmten Bögen in Form der Kettenlinie.

Der Japanische Pavillon für die EXPO 2000 von Shigeru Ban in Gemeinschaftsarbeit mit Frei Otto wurde aus Modellen und am Computer entwickelt, um eine möglichst stabile, doppelt gekrümmte Fläche zu erhalten. Mit dem Festlegen der Randbedingungen stand die Form fest. Physikalische Formen lassen sich nur in begrenztem Umfang entwickeln, da die Form aus dem Kraftfluss entsteht und damit festen Regeln folgt. Allerdings können die Formen im Gegensatz zu den mathematischen Flächen auf unregelmäßigem Grundriss mit einem festgelegten Bildungsprinzip generiert werden. So entstehen komplexe räumliche Tragsysteme aus einem einfachen Regelkanon wie das Beispiel der Multihalle in Mannheim von Carlfried Mutschler und Frei Otto zeigt.

Komplexe Formen

Diese Formen ergeben sich nicht zwangsläufig aus einfachen und allgemein verwendeten Bildungsprinzipien, sondern müssen erarbeitet werden. Dabei werden unterschiedliche Mittel und Methoden eingesetzt, mit denen aus einer Ausgangsidee die gewünschte Gestalt entsteht. Für die folgende Einteilung sollen einige repräsentative Projekte als Beispiel dienen.

Komplexe geometrische Formen entstehen mit Hilfe der höheren Mathematik oder auch direkt am Computer. Calatrava verwendet mathematische Algorithmen für die Gestaltung seiner Gebäude wie dem TGV Bahnhof in Lyon. Für die Formfindung von Bernhard Franks Dynaform Pavillon oder dem BMW Bubble wurden, wie beschrieben, physikalische Algorithmen angewendet. Mit physikalischen Prinzipien im Computer entwickelte Formen sind ebenfalls mathematischer Natur, da die simulierten Situationen auf mathematischen Algorithmen basieren, d.h. häufig von konstruierten Randbedingungen abhängig sind, die mathematisch beschrieben werden. Im Gegensatz hierzu hängt das reale

Experiment von Schwerkraft und Atmosphäre ab. Der Dynaform Pavillon und der BMW Bubble sind daher komplexe geometrische Formen. Eine Ausnahme hiervon bilden die Computersimulationen, mit denen reale Experimente nachgebildet werden und die Schwerkraft in die Simulation mit einbezogen wird, wie dies beispielsweise bei der Formfindung im Membranbau praktiziert wird.

Auch durch die Kombination von elementaren geometrischen Flächen und Körpern lassen sich Formen erstellen, die durch die Art und Weise der Generation als Gesamtfläche komplex sind. Ein Beispiel für solche **kombinierten geometrischen Formen** sind die zusammengesetzten HP Schalen Felix Candelas wie das Restaurant in Xochimilco, welches durch rotationssymmetrische Anordnung von vier HP-Flächen um eine zentrale Achse entsteht. Das Eden Projekt von Nicholas Grimshaw ist aus mehreren verschiedenen großen Kugeln zusammengesetzt. Beim Jüdischen Museum in Berlin kombinierte Daniel Libeskind ebene Flächen aus dem elementaren mathematischen Formenkanon, allerdings mit einer für den uneingeweihten Betrachter nicht erkennbaren Regel. Auch die aus ebenen Flächen gebildeten Falwerke zählen zur Gruppe der kombinierten geometrischen Formen, bei denen die Gebäudeform durch Kombination von geometrischen Flächen zu einer Gesamtform entwickelt wird, nicht die Einzelform selbst.

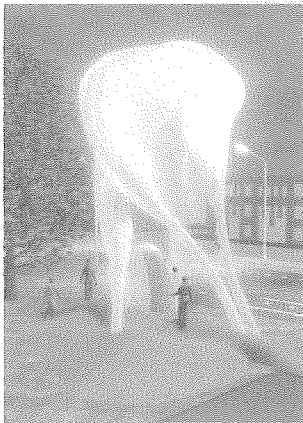


Abb. 3.21 Die Form des D-Tower von NOX ist experimentell entwickelt.

Die im realen Experiment gefundenen Formen, die im Unterschied zu den elementaren physikalischen Formen nicht streng nach den Gleichgewichtsbedingungen im gebauten Zustand verwendet werden, sind **verfremdete physikalische Formen**. Sie basieren nicht auf mathematischen sondern auf physikalischen Randbedingungen. Hierzu zählen die aus realen Experimenten entstandenen Formen von NOX, wie der D-Tower und das Soft Office, auch wenn diese im Computer überarbeitet wurden. Selbst die Fließformen Heinz Islers und die für Schalen verwendeten Pneufornen sind streng genommen als entfremdete physikalische Formen anzusehen, da sie nicht mit einer dem Endzustand entsprechenden Beanspruchung entstehen.

Eine weitere Kategorie ergibt sich aus dem Entwurf mit einer **formalen**

Analogie. Hier liegen keine wissenschaftlichen Bildungsprinzipien vor, mit Ausnahme der rein äußerlichen geometrischen Ähnlichkeit der Form mit einer Figur. Die Freiheitsstatue von Bartholdi und in abstrakterem Ausdruck die Body Zone von Branson Coates Architects dienen hier als Beispiele. Diese Formen weisen insofern eine gewisse Bildungsvorschrift auf, da sonst eine Ähnlichkeit nicht zu erkennen wäre. Dennoch müssen sie als „entwickelt“ gelten, da die Form nicht von vornherein festgelegt ist. Eine Umschreibung von Gebäuden, wie „Gürteltier“ für das Ludwig-Erhardt-Haus von Nicholas Grimshaw oder „Skarabäen“ für das Auditorium in Rom von Renzo Piano sind dann nicht als formale Analogien zu bezeichnen, wenn die Ähnlichkeit von den Architekten nicht unmittelbar beabsichtigt war.

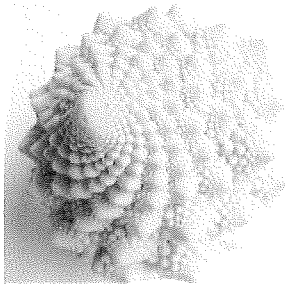


Abb. 3.22 Eine natürlich entwickelte, komplexe Form.

Die meisten komplexen, als frei bezeichneten Formen durchlaufen einen Entwicklungsprozess, in den mehrere Faktoren einfließen. Der Entwurf der Sydney Opera Hall begann als dynamische, undefinierte Skizze und entwickelte sich zu einer Kombination von Kugelausschnitten. Die Form der Überdachung für das Britische Museum von Norman Foster wurde den Vorstellungen des Architekten für ein über den Hof gewölbtes Dach entsprechend als Hängeform entworfen. Der unregelmäßige Grundriss und auch die Vordächer der Portiken, die von dem Dach nicht berührt werden durften, führten zu dieser Ausgangsgeometrie. Anschließend wurden drei geeignete mathematische Funktionen superponiert, die als Gesamtfläche die gewünschte Form des Daches als komplexe geometrische Fläche wiedergaben. Ein weiteres Beispiel für eine solche Entwicklung ist das Kunsthaus Graz, welches wie beschrieben als Plastilinmodell frei entworfen und anschließend im Computer mit physikalischen Randbedingungen als mathematisch komplexe Form neu gestaltet wurde.

Gänzlich ohne Bildungsprinzip, ob im Ausgangsentwurf oder in ihrer Entwicklung, können Gebäudeformen aufgrund der Komplexität der Aufgabe nicht festgelegt werden, so dass eine Definition als **willkürliche Form** nicht erfolgt.

3.4 Zusammenfassung und Ergebnis

Die Auflehnung gegen allzu starre und regelmäßige Formen, das Spiel mit dem Zufall, der Wunsch nach Überraschung und Unvorhersehbarkeit führt, gekoppelt mit dem neuen Werkzeug Computer, zur Aufschwung der komplex gekrümmten und gefalteten Formen, zu deren Gestaltung unterschiedlichste Impulse als Grundlage dienen. Eine Untersuchung der Entstehung von Formen in der Architektur, in der von vier verschiedenen Entwurfsimpulsen ausgegangen wird, ergibt, dass mit jedem dieser Impulse geometrische, physikalische oder freie Formen entstehen können und dass jeder Entwurf aus mehreren dieser Impulse gespeist sein kann. Eine klare Einteilung und Definition der freien Form ist daher über die Impulse nicht möglich. Es wird klar, dass die Form, auch wenn sie frei erscheint, aus Bildungsprinzipien entsteht, die von den Impulsen gesteuert werden.

Mit dem Entwurfswerkzeug Computer werden neue Bildungsprinzipien in Form von Splines eingeführt, mit denen die Darstellung und Kommunikation jeder simplen und komplexen Form deutlich vereinfacht ist. Ursprünglich frei entworfene Formen, sei es in Form einer Handskizze, eines Modells oder einer Computersimulation, entwickeln sich im Laufe des Entwurfsprozesses. Ein Teil der frei entworfenen Formen wird durch elementare geometrische oder physikalische Formen angenähert. Der Prozess der Definition findet bei

- komplexen geometrischen Formen durch Annäherung an eine Flächenfunktion,
- verfremdeten physikalischen Formen durch eine experimentelle Formfindung, die ohne Beachtung der Gesetze des Kraftflusses verwendet werden
- und generell bei allen Formen durch die Festlegung der Geometrie auf dem Papier oder im Computer statt.

Wie im Kapitel 1 festgestellt, weist die freie Form in ihrer Geometrie in der Regel zunächst keine erkennbare Ordnung auf. Am Ende des Entwurfsprozesses sind jedoch alle Formen eindeutig definiert, wenn ihre Geometrie im Computer erfasst oder gebildet ist.

Wissenschaftlich gesehen kann eine Form, die definiert ist, die also geometrisch bestimmt ist, nicht mehr als frei gelten. Somit scheint die Suche nach der Definition der freien Form ein Widerspruch in sich zu sein.

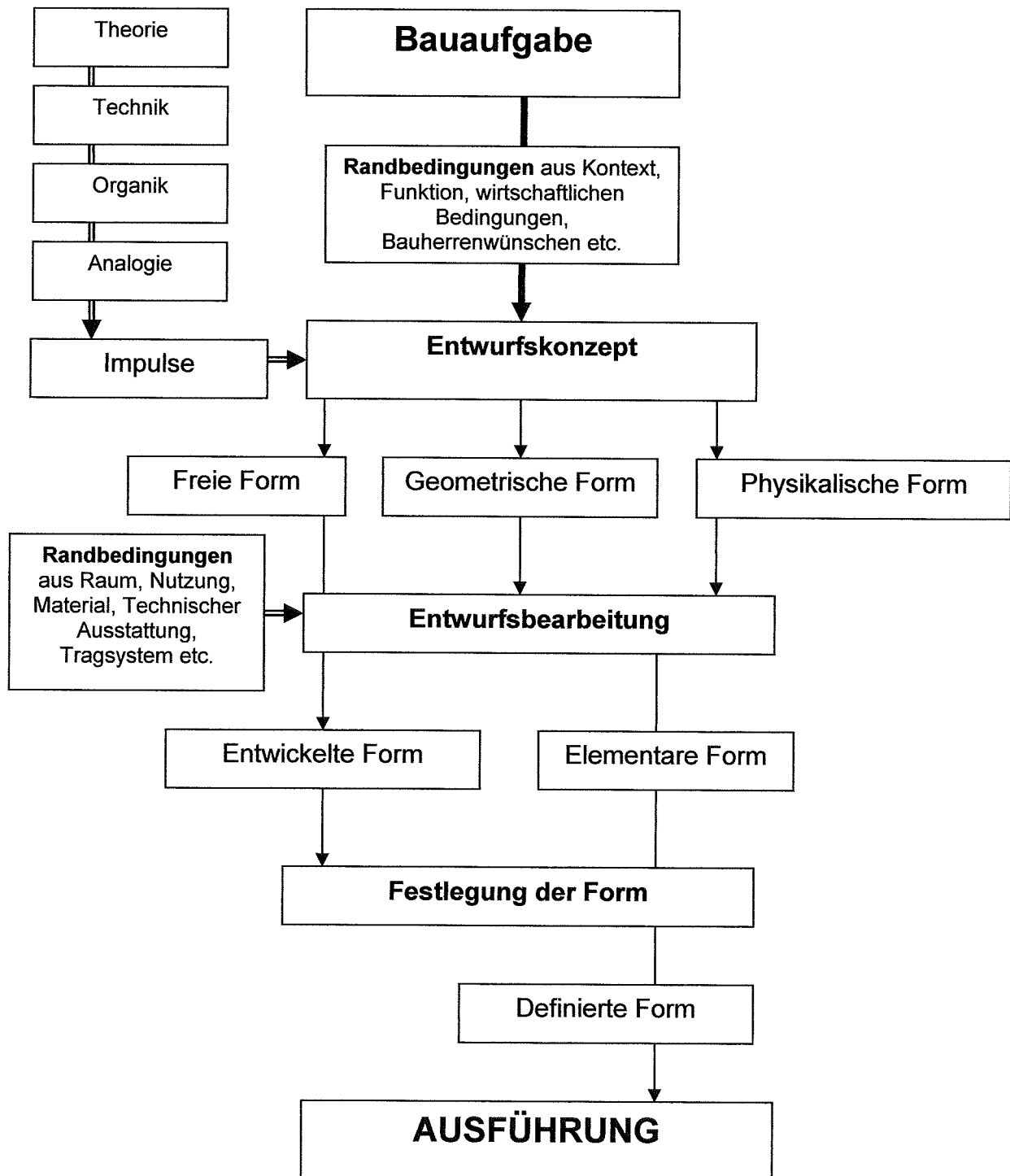
Die Lösung dieser zunächst unvereinbaren Situation liegt in der individuellen Erfassung der Form. Eine Form ist so lange als frei zu betrachten, wie sie nicht identifizierbar ist. Für einen Betrachter des Globen in Stockholm oder der Türme von Vladimir Suchow sind diese keine freien Formen, wenn er sie als Kugel- oder Hyperboloidform erkennen kann. Das Dach des Britischen Museums hingegen wird dem nicht eingeweihten Betrachter als freie Form erscheinen, da er sie nicht beschreiben kann, obwohl sie mathematisch eindeutig definiert und damit eine geometrische Form ist. Auch die Multihalle in Mannheim wird mitunter als freie Form bezeichnet, da ihre Entwurfsprinzipien als Hängeform oder physikalische Form nicht bekannt und nicht ablesbar sind. Das Kunsthaus in Graz ist als Form im Computer eindeutig festgelegt, jedoch als Figur schwer beschreibbar, so dass die Gebäudehülle als freie Form wahrgenommen wird. Die Bezeichnung einer Form als „frei“ ist also vom Kenntnisstand des Betrachters abhängig und wird daher verwendet, wenn die Form nicht erkennbar oder beschreibbar ist.

Der Verlauf des Entwurfs und die dabei erfolgende Festlegung der freien Entwurfsform zu einer definierten Konstruktionsform werden in dem folgenden Ablaufdiagramm skizziert. Die Komplexität des Entwurfsprozesses, der auch im vierten Kapitel thematisiert wird, kann hiermit nicht erfasst, sondern nur schematisch dargestellt werden.

In der heutigen Zeit sind die Mittel, um auch ungewöhnlichste Formen umzusetzen, vorhanden. Dennoch müssen auch jetzt noch Formen den technischen Möglichkeiten und den finanziellen Mitteln angepasst werden. Diese Kriterien werden zwar erst bei der Ausführung relevant, sind aber

schon im Entwurf zu berücksichtigen. Ein wichtiger Faktor ist hierbei die Arbeit des Ingenieurs. Im folgenden Abschnitt wird daher näher auf den Beitrag des Ingenieurs im Entwurf zur Formfindung und zur Verwirklichung außergewöhnlicher Formen eingegangen.

Abb. 3.23 Von der Entwurfsform zur ausgeführten Form



4 Die konstruktive Entwicklung des Entwurfs

Die Konstruktion ist ein unverzichtbarer Teil der Formgebung in der Architektur, unabhängig davon, ob sie sichtbar oder verdeckt ist. Dies geht aus der engen Beziehung zwischen Form und Tragwerk hervor, wie sie bereits beschrieben wurde. Verantwortlicher Partner des Architekten zur Entwicklung der Tragkonstruktion und damit auch Partner bei der Formfindung ist der Tragwerksplaner oder Ingenieur. In diesem Abschnitt geht es um seine kreative und formbildende Arbeit, die für die Entwicklung von Formen in der Architektur und gerade für die Konstruktion nicht-standardisierter Projekte wie den freien Formen mit komplexer Geometrie erforderlich ist.

4.1 Kreativität im Entwurfsprozess

Entwurfsprozesse wurden in den U.S.A. schon in den 1960er Jahren intensiv erforscht [Fuhrmann 1992]. Es sollte mit dem Wissenswachstum Schritt gehalten und die Erzeugung von Innovationen erhöht werden, um im Weltmarkt wettbewerbsfähig zu bleiben, wobei nicht gezielt Ingenieure angesprochen wurden, sondern Designer im weitesten Sinne in der gesamten Industrie.

Eine Standardisierung des Prozesses bis hin zum kreativen Entwurf mit dem Computer war damals angestrebt. Eine Gliederung des Entwurfsvorgangs in einzelne Schritte kam der Programmierung im Rechner entgegen. Diese Schritte wurden unterschiedlich definiert, lassen sich jedoch unter den Begriffen „Grundlagenermittlung“, „Ideenfindung“ und „Ausführung“ zusammenfassen. Ein Hindernis für eine erfolgreiche

Standardisierung war, dass ein elementarer Anteil des Entwurfs in der kreativen Leistung des Entwerfenden besteht.

Kreativität ist die Kombination der Fähigkeit, den Gedanken freien Lauf zu lassen, und einem umfassenden Grundwissen, welches sich aus erlernten Fakten und eigener Erfahrung zusammensetzt. Auch ein „willkürlich“ erscheinender Entwurf baut auf diesem umfassenden Grundwissen auf und ist nicht mit einer Kritzelei aus Kinderhand zu vergleichen. Die Kreativität ist dadurch ein Faktor im Entwurfsprozess, der unmittelbar vom Entwerfer abhängt, d.h. von der Ausbildung, von Erfahrungen und von einer gewissen spielerischen Herangehensweise an Problemstellungen, die die dogmatische Anwendung bekannter Lösungen umgeht. Eine Anregung der Kreativität kann durch verschiedene Verfahren wie dem Brainstorming oder anderen assoziativ wirkenden Methoden erfolgen [Fuhrmann 92]. Ein umfassendes Werk zu diesem Thema wurde von Alex F. Osborne geschrieben, in dem er das „Brainstorming“ als Begriff einführte. Er schlug vor, die Ideensuche durch Initialbegriffe zu unterstützen, um die Vorstellungskraft anzuregen. Eine Liste solcher Begriffe „maximieren, minimieren, multiplizieren, dividieren – adaptieren, modifizieren, substituieren – neu arrangieren, reversieren, kombinieren“ [Alex F. Osborn zitiert nach Fuhrmann 1992, 11] sollten zur Stimulation während der Ideensuche dienen.

Noch heute arbeiten Forschungsprogramme im Bereich der Artificial Intelligence daran, den kreativen Entwurf am Computer zu verwirklichen. Eines der führenden Einrichtungen bei der Erforschung des digitalen Werkzeugs und der damit verbundenen Mensch-Computer-Interaktion ist das Media-Lab am Massachusetts Institute of Technology unter der Leitung von Nicholas Negroponte. Aktuelle Projekte beinhalten unter anderem die Einrichtung von Computern, die Sprache in menschlicher Art anwenden, kommunizieren, menschliche Emotionen verstehen und wiedergeben oder menschliche Erfahrungen weiterverarbeiten können. „Unter anderem werden so genannte neuronale Netze eingesetzt, die den Lernvorgang des Gehirns nachahmen sollen. Auf diese Weise werden sich die Computerprogramme immer mehr der Leistungsfähigkeit der

menschlichen Kreativität annähern.“ [Junge 2002, 41]. Die Schwierigkeit einer Programmierung besteht darin, dass im Gehirn die Kombination des Grundwissens mit dem lateralen Denken und die damit verbundene Ideenfindung häufig assoziativ funktionieren. Das ist im Computer bisher noch schwer nachvollziehbar, auch wenn die Programmierung des Computers durchaus eine Art Lernfähigkeit beinhalten kann. Diese ist bisher mit Erfolg oder Misserfolg im bearbeiteten Aufgabenbereich verbunden, ohne sinnvolle laterale Assoziationen herzustellen. Der entwerfende Architekt oder Ingenieur ist daher durch den Rechner nicht zu ersetzen.

Im Bauwesen stellen sich mit jedem Projekt neue, verschiedenartige Probleme mit teils strengen Randbedingungen, die umsichtig und sorgfältig gelöst werden müssen. Die große Komplexität der Bauaufgaben lässt es in der Regel nicht zu, dass Entwurfsprozesse formelhaft angewendet werden. Eugene Ferguson kritisiert, dass der Entwurfsprozess sich nicht einmal in einem Blockdiagramm zusammenfassen ließe, da er „chaotischer“ Natur und voller unvorhersehbarer Ereignisse sei. Für ihn ist die Kreativität die Fähigkeit, neue Gedanken aus einer Kombination einzeln gemachter Erfahrungen entstehen zu lassen, die sich durch festgelegte Verfahren nicht erzwingen lässt [Ferguson 1993].

Nach Bruno Meyer besteht die Gestaltungsaufgabe des Ingenieurs darin zu „ordnen“, wofür aufgrund der komplexen Aufgabe ein „vernetztes“ Denken in Systemen erforderlich ist. Nicht die Elementanalyse, sondern die Auffassung der Projekte als entstehende Ordnung sei erforderlich. Dabei sieht Meyer im Gegensatz zu Ferguson die Notwendigkeit, den Gestaltungsprozess mitteilbar zu machen, wofür dieser in beherrschbare Schritte unterteilt wird. Diese Schritte dürfen allerdings nicht isoliert ausgeübt, sondern müssen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Das von Meyer beschriebene Prinzip, „Gestalten ist Ordnen auf der geistigen Ebene“ [Meyer 1994, XI], zeigt sich bei der Untersuchung der Arbeitsweisen von Ingenieuren sehr deutlich.

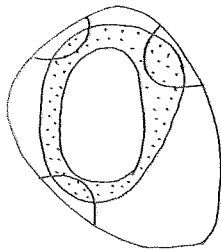


Abb. 4.1 Beim Entwurf des Stadions in Chemnitz beginnt Balmond mit liegenden Bögen im Bereich der drei Auflager.

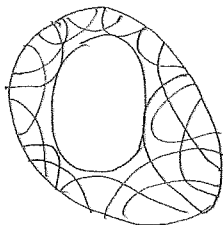


Abb. 4.2 Es entsteht ein ungeordnetes Tragwerk, welches Balmond anschließend ordnet.

Bei komplexen Formen ist ein solcher Ordnungsvorgang aufwändig, da die Ordnung möglichst nicht offensichtlich werden soll. Die Kreativität der Entwerfer ist also schon in dieser Hinsicht in jedem dieser geometrisch einmaligen Projekte neu gefordert. Wie die Architekten haben auch die Ingenieure eigene Gestaltungsprinzipien (oder –impulse), mit denen sie zum Entwurf beitragen. Cecil Balmond von Arup beschreibt den Entwurfsvorgang und die Methoden des Ingenieurs bei einigen seiner Projekte [Balmond 2002]. Gemeinsam mit dem Architekten versucht er, standardisierten Rastern zu entkommen und neue, „informelle“ Wege zu erschließen, mit dem Tragwerk umzugehen. Gleichzeitig sucht er nach einer statischen und geometrischen Ordnung, um die Konstruktion zu erfassen. Das „Informelle“ besteht für Balmond aus den Bausteinen „Lokales, Hybrides und Gegensatz“. „Lokales“ ist der Einfluss eines lokal auftretenden Ereignisses auf das Gesamtwerk wie eine Faltung oder ein Auflager und „Hybrides“ das Zusammenfügen unterschiedlicher Ereignisse zu einer Einheit wie zwei unterschiedliche Raster, die übereinander gelegt werden. „Gegensatz“ ist das Nebeneinander zweier unverträglicher Ereignisse wie zwei Stützen mit unterschiedlichem Querschnitt oder variierende Stützenabstände. „The informal is opportunistic, an approach to design that seizes a local moment and makes something of it“ („Das Informelle ist opportunistisch, ein Herangehen an den Entwurf, welches einen einzelnen Moment aufgreift und etwas daraus macht“) [Balmond 2002, 220/221].

Balmonds Gedankenprozess wird bei dem Wettbewerb für das Stadion in Chemnitz besonders deutlich. Die Architekten Peter Kulka und Ulrich Königs stellten sich zu Beginn das Stadion als metaphorische Darstellung der umgebenden Natur vor, das Dach als Wolke über Bäumen, dazwischen die Tribünen schwebend und die unteren Sitzreihen als Oval in einem Erdhügel. Bei anfänglichen Versuchen, das Dach mit dem Standardrepertoire von radial angeordneten Kragträgern zu konstruieren, fand das Team keine architektonisch befriedigende Lösung. Balmond entwickelte daraufhin nach weiterem Studium der Randbedingungen ein Netz aus irregulären, sich überschneidenden horizontalen Bögen,

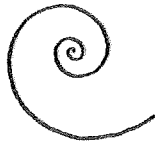


Abb. 4.3 Eine archimedische und eine logarithmische Spirale.

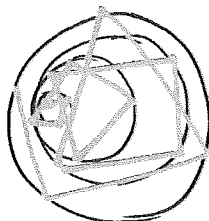
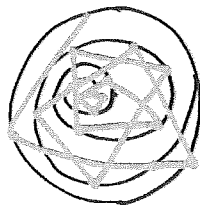
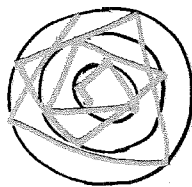


Abb. 4.4 Die Entwicklung des Grundrisses für das V&A.

wodurch die ringförmige Geometrie des Daches besser wiedergegeben war als durch eine rigide radiale Anordnung der Träger. Die „wolkige“ Erscheinung des Daches entstand durch Anheben und Absenken einzelner Bereiche. So wurde der Wettbewerbsbeitrag eingereicht.

Anschließend versuchte Balmond, in das irreguläre Netz wiederum Ordnung zu bringen, ohne die zufällig wirkende Anordnung zu zerstören. Er begann mit einer Studie, die an Osbornes Ideenstimulation erinnert: Um sich überschneidende Bögen zu formulieren, begann er mit einem einzelnen Kreis, verdoppelte diesen, verkleinerte einen der Kreise, verdrehte die entstandene Anordnung und verdoppelte wieder. Dieses Schema war noch zu begrenzt. Balmond betrachtete dann Zykloiden, die ihn schließlich zum Ziel führten. In Zusammenarbeit mit den Architekten wurde die Lösung gefunden, dass Punkte auf einer Kreisscheibe, die während des Rollens ihren Durchmesser verändert, die gewünschte Geometrie des Netzes beschreiben. Diese Anordnung erscheint irregulär, basiert aber auf einem festen geometrischen Prinzip.

Auch beim Entwurf der Konstruktion des Victoria & Albert Museums in London mit Daniel Libeskind suchte Balmond nach mathematischen Algorithmen, um eine strukturelle Logik herzustellen, die trotzdem chaotisch wirken sollte. Eine Spirale, logarithmisch oder archimedisch, sah er als zu rigide und auch als zu durchschaubar in ihrer Ordnung an. Eine polygonale Linie, die sich auf einem Grundraster konzentrischer Kreise spiralförmig entwickelt, war noch immer nicht ausreichend unregelmäßig. Erst eine Verschiebung der Kreismittelpunkte brachte den gewünschten Effekt der chaotischen Spirale. Diese wurde in der dritten Dimension auseinandergefaltet, um die Mittelachsen von Wänden darzustellen. Die resultierenden Wandflächen waren geometrisch genau beschreibbar, fassten aber in jedem Geschoss Räume mit jeweils neuen Geometrien ein.

Eine andere Arbeitsmethode der Formfindung auf geometrischer Grundlage wählte Santiago Calatrava, der als Architekt und als Ingenieur ausgebildet wurde. Als Mittel der dynamischen Ausdrucksform verwendet er faltbare Fachwerke als Lösungsthesaurus für seine Formfindung. Eine

Faltung von Systemen aus stabförmigen Elementen führt zu Bewegungsabläufen, die er in seinen Tragwerken darstellt. Calatravas statische Form als „eingefrorene Bewegung“ ist Ausdruck einer Dynamik, die an Fotografien von Bewegungsabläufen mit Belichtung hoher Frequenz erinnert.

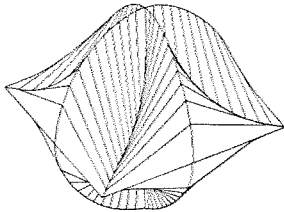


Abb. 4.5 Die Form entsteht beim Faltvorgang von Fachwerken durch den Bewegungsablauf.

Ein Beispiel der Projekte von Calatrava ist der TGV-Bahnhof in Lyon von 1994, der das Thema der Bewegung fahrender Züge aufgreift. Eine weitere Entwurfshaltung Calatravas, der Verwendung der Natur als „Leitlinie und Metapher“ [Calatrava zitiert nach Lyall 2002, 23] Das Hochhaus „Turning Torso“ in Malmö ist die Analogie eines sich verdrehenden Oberkörpers, das 3-D Kino L'Hemisfèric in Valencia erinnert an ein sich schließendes Augenlid. Diese Entwurfsformen entstehen anfangs aus einem architektonischen Impuls heraus, aber die ordnende Grundlage der Gestaltung ist bei Calatrava die Mathematik.

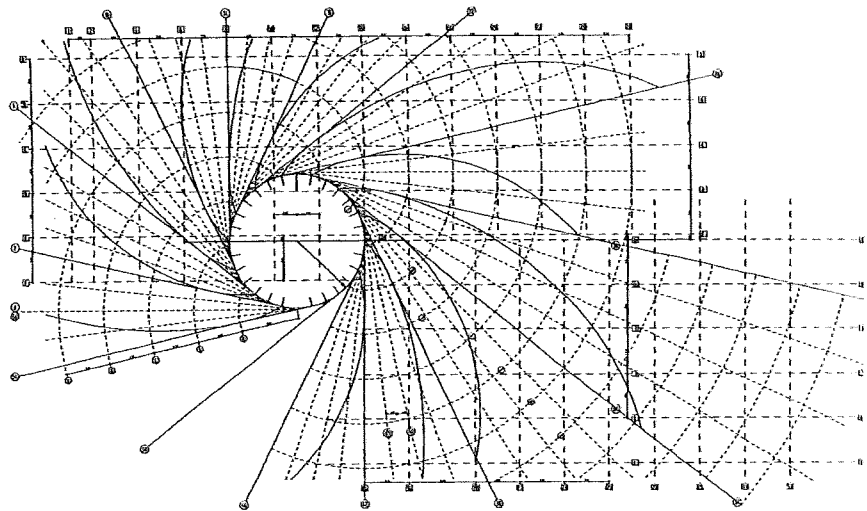


Abb. 4.6 Das Konstruktionsraster der Jüdischen Grundschule in Berlin.

Von einer Spiralform ging, wie auch das V&A von Libeskind und Balmond, auch das Projekt der Jüdischen Grundschule in Berlin des Architekten Zvi Hecker gemeinsam mit dem Ingenieur Gerhard Pichler aus.

Anstatt das „Chaotische“ zu suchen, entwickelte Pichler aus der zugrunde liegenden Geometrie einer Sonnenblume mit spiralförmig verlaufenden

Strahlen ein geometrisch präzises Konstruktionsraster, welches sich aus der Überlagerung eines orthogonalen und eines polaren Koordinatensystems ergibt. Dies entspricht wiederum Balmonds Baustein des „Hybriden“.

„Das Zusammenspiel von Einfallsreichtum und dem systematischen, fundierten Umgang mit Tragwirkungen führte zu wirklich einzigartigen Lösungen der während des Entwurfsprozesses auftretenden Fragen“ [Hecker 2000, 107]. Selbst die rechteckige Sporthalle wurde durch einen Balkenrost, in dem das Raster der Sonnenblumenstrahlen fortgeführt wird, in das restliche System integriert. Konstruktiv war diese Balkenanordnung von Vorteil, da die diagonalen Balken ihre Last trotz der länglichen Rechteckform der Halle zweidimensional abtragen und so statisch effizienter sind.

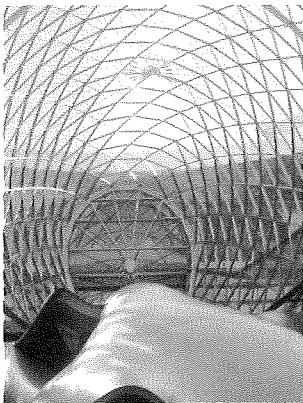


Abb. 4.7 Das Gitternetz über dem Atrium der DZ-Bank in Berlin.

Pichlers „Interesse an der inneren Ordnung organischer Formen“ [Eisenloffel 2000, 110] bezogen auf die jeweils zu entwerfende Konstruktion führte also zu einer Logik des Entwurfs, in der Architektur und Tragwerk im Einklang stehen, wobei dieses Vorgehen die Formen des Gebäudes beeinflusste. Prinzipiell wirkte Pichler in seiner Arbeit auf eine Minimierung der tragenden Konstruktion hin. Mit Durchlaufwirkungen, Überhöhung von Querschnitten durch Vouten oder Verwendung der Stützlinie, die er immer auf Grundlage der statischen Prinzipien vom Lasten und Tragen einsetzte, wendete er sich häufig von standardisierter, orthogonaler Formensprache ab.

Ebenso verfährt Büro Schlaich Bergermann und Partner (sbp) beim Entwurf komplexer Formen. Mike Schlaich berichtet in diesem Zusammenhang von der DZ-Bank (ehem. DG Bank) in Berlin, einer glasgedeckten Netzschale aus Stahlprofilen mit einer Anordnung in Dreieckselementen. Die anfängliche Form war vom Architekten Gehry als „zerknüllte“ Fläche vorgegeben und wurde in Zusammenarbeit mit den Ingenieuren zu einer Fläche umgearbeitet, deren Tragverhalten sich dem einer Schale annähert. Die aus formalen und finanziellen Gründen gewünschte Bildung möglichst gleicher Elementgrößen im Dreiecksnetz zu erreichen wurde durch die Verwendung des Computers vereinfacht.

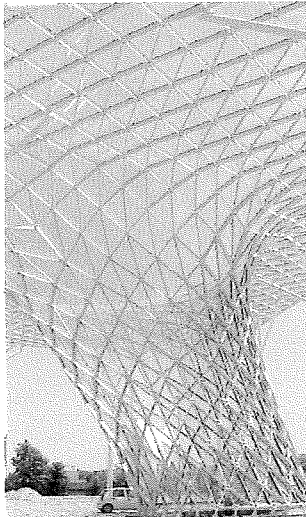


Abb. 4.8 Die Form der Überdachung für die Messe Mailand konnte zum Ende des Planungsprozesses nur noch geringfügig verändert werden.

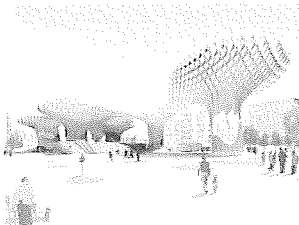


Abb. 4.9 Die Form des Metropol Parasol in Sevilla von Jürgen Mayer H. konnte den statischen Anforderungen angepasst werden.

Der Prozess des „Ordners“ der Geometrie wird vom Büro sbp häufig durch Verwendung von Translationsflächen oder auch einer kombinierten Streckung und Translation („Streck-Trans-Flächen“) realisiert. Diese Flächen sind geometrisch genau bestimmt und auch bei gekrümmten Formen stets mit ebenen, viereckigen Flächenelementen bedeckbar. Die Ingenieure von sbp versuchen zudem grundsätzlich, eine Schalentragwirkung von komplexen Flächen zu erreichen [M. Schlaich 2006], um eine effiziente Tragwirkung zu ermöglichen. Da die Grundrissform der Translationsflächen immer von der gewählten Leitlinie und der Erzeugenden abhängen ist die Translation nicht für jede Grundrissgeometrie geeignet. Stattdessen verwenden sbp auf unregelmäßigen Grundrissen Pneu- oder Hängeformen, wie beispielsweise beim Projekt Principe Pio in Madrid, einer Gitternetzkonstruktion mit einem glasgedeckten Dreiecksnetz aus Stahlprofilen, die als Überdachung für ein Einkaufszentrum eingesetzt wurde.

Formen mit geometrischen Algorithmen oder auch physikalischen Methoden zu finden und dabei freie Formen soweit möglich zu vermeiden ist nicht in jedem Fall möglich, wie das Beispiel der Messe Mailand zeigt. Die doppelt gekrümmte Fläche für das Dach wurde von Massimiliano Fuksas offensichtlich als freie Form entworfen. Das Büro sbp wurde erst spät im Entwurfsprozess von der ausführenden Firma hinzugezogen, so dass eine generelle Änderung der Form nicht mehr möglich war. Die Steigerung der Effizienz eines Flächentragwerks wird z.B. durch Einsatz größerer Krümmungen erreicht. Mit Hilfe des Computers wurde die Form so verändert, dass in einigen Bereichen ein günstigeres Tragverhalten mit Minimierung der Biegemomente und Lastabtrag durch Normalkräfte entstand. Ein echtes Schalentragverhalten, bei dem keine maßgeblichen Biegemomente auftreten, konnte allerdings bei diesem Projekt aufgrund der vorgegebenen geometrischen Randbedingungen nicht erzielt werden. Daraus folgte, dass die auf Biegung beanspruchten Profile teilweise sehr kräftig ausgeführt werden mussten. Ebene Glasscheiben konnten eingesetzt werden, da das Netz in gekrümmten Bereichen in Dreieckselemente unterteilt wurde.

Volker Schmid von Arup berichtet vom Projekt Metropol Parasol in Sevilla, dass die Form zwar vom Architekten vorgegeben wurde, dann aber ein kooperativer Prozess stattfand, um die konstruktiven Anforderungen einzuarbeiten. Dabei konnte die äußere Kontur angepasst werden, weil sie nicht von vornherein strikt definiert war. Schmid wies darauf hin, dass „Blobs so wenig definiert sind, dass sie geometrische Änderungen zulassen“. Im mm- oder sogar cm-Bereich sei für Außenstehende ein Unterschied nicht bemerkbar [Schmid 2006]. Das ästhetische Konzept des Architekten blieb trotz der konstruktiven Ergänzungen erhalten.



Abb. 4.10 Für die einfach gekrümmte Hülle der Dynaform wurde eine Membran gewählt.

Harald Kloft, Büro osd, hatte unterschiedliche Erfahrungen bei der Kooperation mit Architekten zur Formbestimmung [Kloft 2006]. Eine frühe Zusammenarbeit zur Formentwicklung zwischen Architekt und Ingenieur war beispielsweise bei der Bearbeitung des Projektes „Dynaform“ mit Bernhard Franken Architekten, welches Kloft noch als Mitarbeiter des Büros Bollinger & Grohmann durchführte, nicht gegeben. Die Form wurde, wie in Kapitel 3 beschrieben, nach funktionalen Anforderungen und festgelegten Parametern in einem Entwurfsprozess durch eine Simulation am Computer fixiert. Eine anschließende Änderung der Form nach statisch-konstruktiven Randbedingungen war vom Architekten nicht gewünscht. Die bestimmte Kontur des Pavillons war „unantastbar“. Die ingenieurtechnische Lösung der Aufgabe beschränkte sich daraufhin auf die Suche nach einer geeigneten Herstellung der Form und der konstruktiven Details gemeinsam mit dem Architekten. Das Team untersuchte unterschiedliche Bauweisen, wobei eine Ausführung als Pneu, eine komplette Blecheindeckung und eine selbsttragende Schale in Betracht gezogen wurde. Gewählt wurde für die Konstruktion der Hülle eine einsinnig gekrümmte Membran. In Versuchen im Maßstab 1:1 wurde diese Bauweise vor der Ausführung geprüft.

Kloft ist davon überzeugt, dass im Allgemeinen eine Geometrisierung, d.h. Rückführung der Form auf eine mathematisch einfache Funktion, wirtschaftlich sinnvoll ist. Dennoch hält er es letztendlich für den Sinn der Konstruktion, die Architektur darzustellen, wodurch eine solche Möglichkeit der Geometrisierung oder auch der Optimierung der Form in

Hinsicht auf das Tragverhalten nicht immer gegeben ist. Kloft hält Experimentalprojekte zwar für erstrebenswert, die Ausführung der „Dynaform“ stieß allerdings an die Grenzen des Machbaren.

Klaus Bollinger vom Büro Bollinger & Grohmann bestätigt, „Das Tragwerk muss als Bestandteil des Entwurfs helfen, die Architektur zu verwirklichen“ Das heißt, dass der Tragwerksplaner die Aufgabe hat, „für jede Architektur eine adäquate Tragkonstruktion zu entwickeln.“ [Bollinger 1999, 106]. Solches „Engineering ohne Ideologie“ wird am Beispiel Dynaform deutlich, wo das „Ordnen“ des Ingenieurs sich auf die Suche nach einem geeigneten Tragsystem, welches wirtschaftlich herstellbar ist, beschränkt. Die Formfindung nach einem geometrischen oder physikalischen Bildungsprinzip ist nicht Teil dieses Ansatzes.

„Im Zeitalter des Computer-Aided-Design, mit der Vereinfachung der Zeichnungsaufgabe, auch bei komplexen, unregelmäßigen Formen, wird zunehmend auf grundlegende Entwurfsraster verzichtet und vielfach die Suche nach innewohnenden Geometrien vernachlässigt“ [Eisenloffel 2000, 110]. Sofern dies beim architektonischen Entwurf aufgrund der neuen Werkzeuge zutrifft, besteht doch weiterhin, wie gezeigt, das Streben des Ingenieurs nach einer inneren Ordnung der Geometrie, welches bei den sehr irregulären Formen zunehmend diffiziler wird. Während der Künstler eine Form direkt und visuell gesteuert modellieren will, ist der Ingenieur darüber hinaus an der Definition der Fläche und ihrer strukturellen Erfassung interessiert. Eine Tendenz, die sich in verschiedenen Ingenieurbüros abzeichnet, ist daher die Erweiterung des Planungsteams um Spezialisten, die sich insbesondere mit der mathematischen Erfassung der zu bauenden Flächen auseinandersetzen. Um komplexe, undefinierte Flächen durch mathematische Algorithmen veranschaulichen zu können, ist eine intensive Auseinandersetzung mit den mathematischen Grundlagen erforderlich. „Generell können beliebig geformte Flächen bis zu einem gewissen Grad durch Teile von Standardflächen angenähert werden. Wegen der limitierten Anzahl der formgebenden Parameter wird das Ergebnis im Allgemeinen aber nicht befriedigend sein“ [Glaeser 2005, 231].

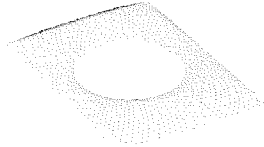


Abb. 4.11 Die Form der Überdachung über dem Great Court ist aus mathematischen Funktionen entwickelt.

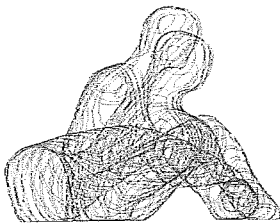


Abb. 4.12 Darstellung der parallelen Schnitte, in die das Realmodell zerlegt wurde, um die Form im Computer einzulesen.

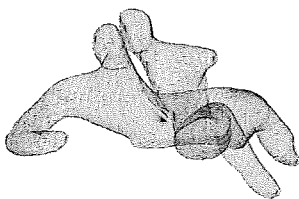


Abb. 4.13 Das resultierende FEM Modell der Body Zone.

Kurven, die mathematisch nicht mehr beschreibbar sind, können abschnittsweise aus Parabeln 3. Ordnung gebildet werden. Die Fachleute, die sich hauptsächlich mit der Geometrie als Sondergebiet der Mathematik befassen, versuchen, Formen so weit wie möglich durch mathematisch beschreibbare, stetige Flächen anzunähern, um die Beherrschung einer gegebenen Form zu ermöglichen. Dies wirkt sich sowohl auf die statische Erfassung als auch auf den Herstellungsprozess aus. Hierdurch wird der Zugang zu einem großen Wissensbereich erschlossen, der wiederum das kreative Potenzial des Planungsteams vergrößert. Das Lösungsrepertoire für komplex gekrümmte Flächen wird erweitert.

Laut Chris Williams, der als freier Berater für Büro Happold tätig ist, werden mit den im Computer für beliebig gekrümmte Flächen verwendeten Splines „Patchworks“ erzeugt, d.h. zusammengesetzte Flächen, die Unstetigkeiten aufweisen können [Williams 2006]. Solche Unstetigkeiten können wiederum bei der statischen Berechnung zu Fehlern führen. Erst mit einer stetigen mathematischen Funktion können wirklich glatte Formen erstellt werden. Für die Überdachung des Great Court vom Britischen Museum in London ermittelte Williams drei verschiedene mathematische Funktionen, die überlagert wurden, um die gewünschte Form zu erhalten. Durch rechnergesteuerte Gewichtung wurde die Knotenanordnung anschließend so arrangiert, dass die radialen und diagonalen Linien auf der ermittelten Oberfläche glatt verlaufen und möglichst ähnliche Dreiecke bilden. Lediglich in den geometrisch sehr komplexen Eckbereichen treten leichte Knicke in den Kurven auf, die sich nicht glätten ließen.

Bei der Planung der Body Zone von Branson Coates Architecture mit Büro Happold war es aufgrund der Komplexität der Oberfläche nicht mehr möglich, eine einheitliche mathematische Funktion zu formulieren. In diesem Fall diente ein eigens geschriebenes Programm zur Darstellung der Form, die als Skulptur entstanden war. Die Figur wurde zunächst in parallele Scheiben zerlegt, deren Umrisse in den Rechner eingelesen und digital wieder zusammengesetzt [Williams 2000]. Diese Methode ergibt

eine maßstäbliche Vergrößerung der Form ohne die Annäherung durch mathematische Algorithmen. Erst durch das Einlesen in den Computer erfolgte eine genaue Festlegung der Formkoordinaten.

Neben der mathematischen Erfassung der Form und der Tragwirkung eines Projektes ist von jeher die mechanische Untersuchung mit dem Modellbau Teil der Lösungsfindung des Ingenieurs. Nachdem die klassische Modellstatik und in begrenztem Umfang auch das Anschauungsmodell durch die Verwendung der digitalen Modelle verdrängt wurde, gewinnt das Realmodell heute für die komplexen Formen wieder an Relevanz. Eine kurze Beschreibung der Entwicklung des Modellbaus zeigt die historische Bedeutung der Modelle für den Entwurf.

4.2 Entwurfentwicklung mit dem Modell

Modelle im Bauwesen dienen dazu, Architektur oder Tragwerk in kleinerem Maßstab abzubilden, um sie erfassen zu können. Der Unterschied vom Präsentationsmodell zum exakten statischen Modell besteht in der Definition der Ähnlichkeit – während es beim Präsentationsmodell ausreicht, wenn das Modell dem Prototypen optisch und geometrisch ähnlich ist, also einen ästhetischen Eindruck vermittelt, gibt es bei statischen Modellen physikalische Faktoren, die eine simple geometrische Skalierung unmöglich machen. In seiner Präzision zwischen diesen beiden Extremen liegt das einfache statische Modell, das Tragwerksmodell, mit dem nur „Tendenzen“ der Tragwirkung einer Konstruktion untersucht werden sollen, so dass die experimentelle Formfindung durch diese Modelle unterstützt wird.

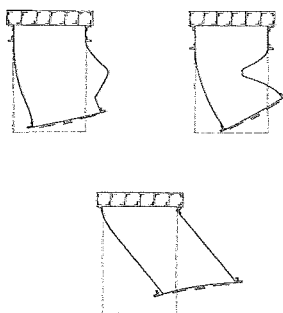


Abb. 4.14 Die von William Fairbairn am Modell gefundenen Ergebnisse zum Beulverhalten von Kastenträgern.

Baumeister und Ingenieure bedienten sich in der Vergangenheit verschiedenartigster Tragwerks- und statischer Modelle in allen Maßstäben, um ihr Wissen über das Tragverhalten bestimmter Systeme zu ergänzen oder zu bestätigen. Bereits Leonardo da Vinci (1452-1519) verwendete Modelle, um das Verhalten von Strukturen zu studieren. Auch

in der Gotik wurde das Gleichgewicht von Gewölbestructuren an Modellen untersucht. In den Anfängen des Eisenbaus stellte Thomas Telford (1757-1834) in England Versuche zur Tragfähigkeit von Hängebrücken an, und 1846 führte William Fairbairn (1789-1874) Modellversuche an verschiedenen Brückenmodellen zu genieteten Hohlkastenträgern durch. Auch die Hängemodelle von Antoni Gaudí (1852-1926), mit denen er um 1920 Versuche an invertierten Gewölben durchführte, dienten dem Erkennen des Tragverhaltens seiner Bauten aus Mauerwerk [Hossdorf 1971].

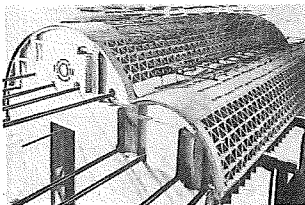


Abb. 4.15 Für die Ballspielhalle in Madrid fertigte Torroja ein Modell aus Mikrobeton, einem nach Übertragungsregeln gemischten Beton mit kleineren Zuschlägen, an.

Die Geschichte der Betonschalen war stets eng mit dem Modellbau verbunden. Franz Dischinger (1887-1953) stellte zwar bereits 1928 im „Handbuch für Eisenbeton“ die Grundlagen der Schalentheorie dar, dennoch waren weiterhin Maßstabsmodelle für die Schalen erforderlich, um die Theorie zu bestätigen. Obwohl im Lauf der Zeit international viele Veröffentlichungen über die Schalentheorie entstanden, gibt es in Deutschland bis heute keine genormten Vorschriften speziell zum Schalenbau. Natürlich förderte dieser Mangel an Festlegungen auch die Notwendigkeit, das Tragverhalten über Modelle nachzuweisen. Dischingers Versuchsschale von 1,5 cm Dicke bei einer Seitenlänge von 7,30 m besteht noch heute [Stiller 1987]. 1974 wurde sie vor dem Verfall und Abriss gerettet und in einem Stück zu ihrem derzeitigen Standort in Wiesbaden-Erbenheim überführt, wo sie weiterhin die Tragfähigkeit und Langlebigkeit der Schalenkonstruktionen mit einer extrem geringen Materialdicke demonstriert. Auch für Projekte wie der Großmarkthalle Frankfurt am Main wurde ein Modellversuch im Maßstab 1:3 von Dischinger durchgeführt [Bieger 1987]. Die Modelle dienten nicht nur dem Studium der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens, sondern auch der Verifizierung neuer Bauweisen.

Die Wissenschaftlichkeit und Präzision der Modellversuche nahm zwischen 1920 und 1940 zu. Methoden der Modellstatik wurden vor allem im Dammbau und im Flugzeugbau entwickelt [Cowan 1966]. Sicherlich hatte ein Versagen dieser beiden Bautypen besonders weit reichende Folgen, wodurch genauere Vorhersagen des Tragverhaltens

erstrebenswert waren. Aber auch im Gebäudebau wurden Modelle regelmäßig verwendet, um Bauweisen und neue Lösungen zu untersuchen. Dies galt insbesondere für die Anwendung gekrümmter Flächen, die mit ebenen Rechenmodellen nicht ausreichend genau beschrieben werden konnten. Robert Maillart (1872-1940) prüfte seine Theorien über Pilzdecken an maßstäblich verkleinerten Betonmodellen ebenso wie Eduardo Torroja (1899-1861) „Vater des modernen, nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführten Modellversuchs“ [Hossdorf 1971, 31] die Modelle zur Verifikation seiner Annahmen verwendete. Auch Pier-Luigi Nervi ergänzte mit Hilfe von Modellen aus Zelluloid die statischen Überlegungen und Berechnungen zu seinen Projekten.

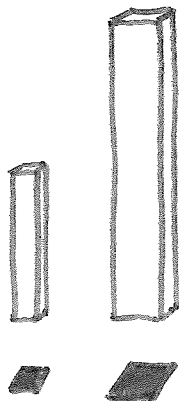


Abb. 4.16 Auf der vierfachen Aufstandsfläche des größeren Turms steht das achtfache Volumen.

Während in den 1930ern noch mechanische Dehnungsmesser verwendet wurden, gab es in den 1940er Jahren die Entwicklung der elektrischen Dehnungsmesser, womit die Genauigkeit der Messungen zunahm. Der Entwicklungsschub der Methoden zur Modellstatik fand dann vor allem in Südeuropa zwischen 1950 und 1960 statt. 1951 wurde in Italien die erste Organisation für Modellstatik gegründet [Hossdorf 1971]. Es entwickelte sich eine ausgefeilte und komplexe Technik, mit der Nachweise für konstruktiv besonders anspruchsvolle Bauten erarbeitet wurden. Seit den 1960ern wurden die Methoden dann durch den Einsatz des Computers ergänzt, um die Organisation, Berechnung und Auswertung von sehr großen Datenmengen zu vereinfachen. Die statische Auswertung der Ergebnisse aus Versuchen mit Realmodellen ist relativ aufwändig, vor allem wegen der Verkleinerung, aber auch durch die Anforderungen an das Messwesen.

Der Maßstab von Tragwerken spielt aus statischer Sicht eine bedeutende Rolle, wie ein sehr simples Beispiel verdeutlicht: Ein Turm mit 10 m Höhe und einer Aufstandsfläche von 3 x 3 m soll maßstäblich verdoppelt werden. Der neue Turm hat eine Höhe von 20 m und eine Aufstandsfläche von 6 x 6 m. Allein aus dem Eigengewicht ergibt sich für den größeren Turm eine höhere Belastung am Fuß, da das Gewicht über das Volumen in der dritten Potenz zunimmt ($20 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$), die

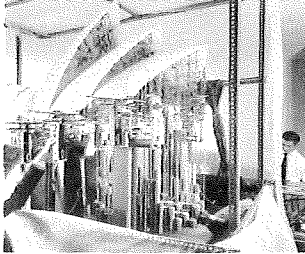


Abb. 4.17 Statisches Modell für das Opernhaus in Sydney.

Aufstandsfläche, die das Gewicht aufnehmen muss, jedoch nur im Quadrat ($6 \times 6 \text{ m}^2$). Bei achtfachem Gewicht hat aber der Turm nur eine viermal größere Aufstandsfläche. Solche Sachverhalte werden in der Modellstatik berücksichtigt, ebenso wie eine weitere große Anzahl von Faktoren. Materialkonstanten, Steifigkeit, Verformung, aber auch nicht-lineare Problemen wie das Knicken, das Beulen, das Fließen oder das Strömungsverhalten werden durch komplexe Übertragungsgesetze beschrieben. Auch bei den Messungen treten Ungenauigkeiten auf, die sich nicht vermeiden lassen, sondern bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Bei elastischen Modellversuchen werden auf Grundlage der allgemeinen Elastizitätstheorie Verformungen gemessen, die Rückschluss auf Spannungen zulassen. Diese am Modell im Vergleich zum Bauwerk noch kleineren Dehnungen ergeben eine große Streuung der Messwerte.

Weitere Fehler können bei der Konstruktion des Versuchsaufbaus auftreten. Die falsche Lagerung des Modells wie z.B. durch zu hohe Reibung in einem Gleitlager, schlecht gewählte Belastungseinrichtungen oder kleinste Verformungen des Unterbaus können die Ergebnisse verfälschen. Abweichungen von 10% liegen dabei noch im akzeptablen Bereich. So erstaunt es nicht, dass die Modellstatik „von theoretisierenden Akademikern nicht immer ganz ernst genommen“ wurde [Hossdorf 1971, 5]. Sie galt als ungenau, zeitaufwändig und teuer. Trotzdem war der Modellbau lange Zeit das einzige Mittel, um komplexe Formen dreidimensional abzubilden und geistig und physisch direkt zu „begreifen“.

Mit den Modellen verfolgt der Ingenieur meist nicht nur ein singuläres Ziel. Er ermittelt zwar einerseits die Verformung und daraus die Spannung in den Querschnitten. Gleichzeitig interessieren ihn aber die Baubarkeit, die Montageabläufe und die Verbindungen und vor allem das Verstehen der Konstruktion über die Sinne, wobei dann auch Präsentations- und Tragwerksmodelle zum Einsatz gelangen. Beim TWA-Terminal beispielsweise war die vom Architekten gewünschte Form so unregelmäßig, dass nur über das Modell die endgültige Gestalt festgelegt werden konnte. Bei der Sydney Opera Hall dienten Modellversuche der

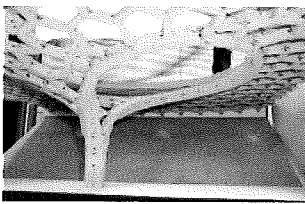
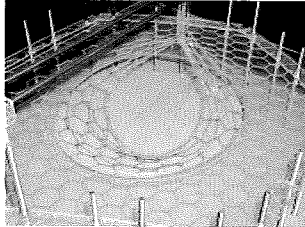


Abb. 4.18 Modelle für den neuen Bahnhof in Stuttgart von Frei Otto, ein Hängemodell und ein auf Druck tragendes Modell aus Holz mit sechseckigen Maschen.

Bestätigung des Tragverhaltens, wie auch der Formfindung und der Untersuchung zur Konstruktionsweise [Arup1969]. Ian Liddell berichtet, dass zum Bau der Multihalle in Mannheim mit Frei Otto mehrere Modelle hergestellt wurden, die der Formfindung dienten, die aber gleichzeitig Verformungen und den Bauablauf darstellen sollten [Liddell 2001]. Obwohl für die Ausführung der Baumaßnahme noch die Angaben aus den Realmodellen verwertet wurden, gab es für die Multihalle bereits ein geodätisches Computermodell von Klaus Linkwitz an der Universität Stuttgart, an welchem die Übereinstimmung der realen mit den digitalen Koordinaten überprüft wurde [Williams 2006].

Frei Otto arbeitete bei seiner Grundlagenforschung ausgiebig mit Modellen, um das Tragverhalten unterschiedlichster Systeme zu erkennen. Besondere Berühmtheit erlangten die Versuche mit Seifenhautmodellen, die die Form von Minimalflächen annehmen. Seilnetze, Pneus, Schalen, Verzweigungssysteme, Membrane, um nur einige Konstruktionen zu nennen, wurden von Otto in jahrelanger Arbeit am Institut für leichte Flächentragwerke experimentell untersucht und in Dokumentationen festgehalten. Das Hängemodell mit hexagonalen Maschen verdeutlicht die Anschaulichkeit der Modelle. Zug- und Druckkräfte lassen sich durch die Verformung der Maschen in der Fläche direkt ablesen.

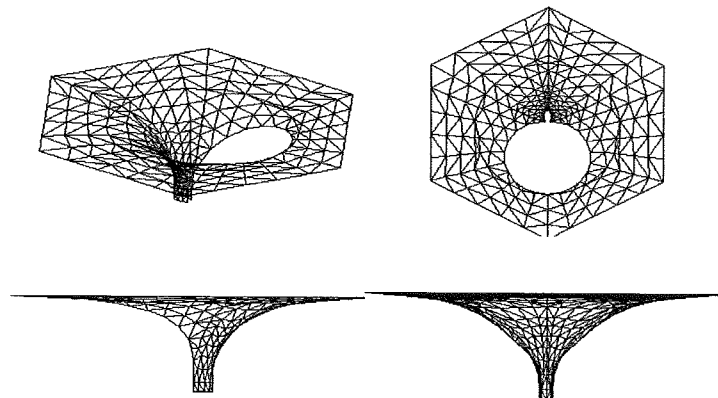


Abb. 4.19 Die Daten aus den Realmodellen wurden mit dem Computermodell abgeglichen.

Ein solches Modell baute Otto für den neuen Hauptbahnhof in Stuttgart. Neben Teilmodellen setzte er auch Kontinuumsmodelle ein, die das Tragverhalten und die Geometrie der Gesamtdecke darstellen sollten. Die Geometrie der Modelle wurde vermessen und in den Computer übertragen. Parallel zur Untersuchung der Realmodelle konnte der Entwurf so im Rechner bearbeitet, und mit digitalen Hängemodellen sowie Formvorstellungen des Architekten Ingenhoven verglichen werden.

Obwohl für dieses Projekt die modernste Computertechnik eingesetzt wurde, hielt Otto die Realmodelle zum Verständnis der entstehenden Form für unerlässlich. Auch wenn solche Tragwerksmodelle in der Auswertung nicht so aufwändig sind wie die mit Übertragungsgesetzen wissenschaftlich genau definierten Modelle der Modellstatik, steckt in ihrer Herstellung noch immer ein enormer Arbeitsaufwand. Die Genauigkeit ist auch bei den Tragwerksmodellen von großer Bedeutung.

Ralf Höller teilt die unterschiedlichen Modelltypen im Bauwesen in vier Gruppen ein: Vor-, Mess-, Sonder- und Demonstrationsmodelle [Höllner 1996, 108]. Die Vormodelle oder auch **Entwurfsmodelle** stellen eine Formvorstellung zur Weiterentwicklung dar. Sie geben eine erste gestalterische Idee wieder, die sich im Laufe des Entwurfsprozesses noch verändern kann.

Messmodelle oder auch **statische Modelle** dienen der Erfassung und Bestimmung von geometrischen und statischen Werten sowie von Verformungen.

Sondermodelle zeigen Details, Mechanik und Montageabläufe. Es werden häufig nur Ausschnitte aus dem Gesamtprojekt dargestellt. Die äußere Form wird beispielsweise bei der Untersuchung des Strömungsverhaltens von Modellen im Windkanal berücksichtigt.

Demonstrationsmodelle oder auch **Präsentationsmodelle** werden zur Veranschaulichung herangezogen und sind detaillierter als das

Entwurfsmodell.

Zusätzlich ist in dieser Einteilung das zuvor beschriebene **Tragwerksmodell** zu berücksichtigen, mit welchem sowohl Form als auch Tragverhalten dargestellt werden, ohne jedoch exakte quantitative Lösungen zu liefern. Das Tragwerksmodell dient aufgrund seiner Anschaulichkeit auch als Präsentationsmodell für das qualitative Verständnis des Kraftflusses.

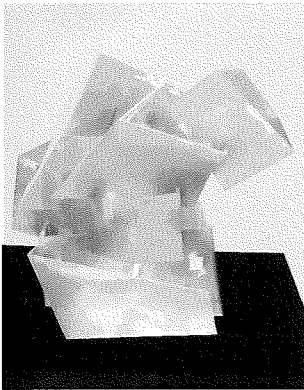


Abb. 4.20 Statisches Anschauungsmodell für die V&A Spirale mit Angabe der Spannungen in den Wandscheiben aus Beton.

Heute werden statische Modelle in der Praxis meist als digitale Modelle ausgeführt. Die aufwändige Modellstatik mit Hilfe des maßstäblichen Realmodells rückt in den Hintergrund, findet allerdings in der Forschung für Sondermodelle weiterhin Anwendung, denn auch die Technologie des digitalen Modells baut auf den Erkenntnissen des Realmodells auf. Als digitales Modell können komplizierte geometrische Formen selbst erzeugt oder durch Datenübertragung aus den CAD-Programmen der Architekten generiert werden. Aus diesen Daten lassen sich dann wiederum reale Modelle beispielsweise mittels CNC- Fräsen schaffen, die allerdings für statische Untersuchungen nur geeignet sind, wenn die Modellgesetze beachtet werden.

Mit Stabwerksmodellen können unter Vorgabe der Geometrie und der Materialeigenschaften vom Benutzer sehr genaue Ergebnisse erzielt werden. Bei Flächentragwerken, die mit der Finite-Elemente-Methode berechnet werden, sind jedoch die Ergebnisse abhängig von der Elementierung. Gerade in Bereichen von Momentenspitzen, die z.B. über Stützen oder im Fall von der Scheibenberechnung im Auflagerbereich vorkommen, können Singularitäten auftreten, die bewirken, dass die Spannungswerte bei sehr klein gewählten Elementierungen gegen Unendlich gehen. Hier sind, wie auch in der traditionellen Modellstatik, Vergleichsrechnungen erforderlich, um die wahren Spannungsverhältnisse richtig einschätzen zu können.

Auch Sondermodelle können heute teilweise im Computer erfasst werden. So können zum Beispiel die Rauch- und Hitzeentwicklung, die Beleuchtung, die Belüftung und auch akustische Phänomene in Räumen

am Computer simuliert werden. Für den Windkanal werden heute jedoch grundsätzlich noch Realmodelle eingesetzt.

Dass das fachliche Grundlagenwissen, welches in die Software einfließt, Lücken aufweisen kann, wird bei der Anwendung nicht unbedingt offensichtlich. Letztlich ist aber auch ein digitales Modell nur so gut, wie es vom Anwender verstanden wird. Hier ist einerseits die repräsentative Eingabe der Randbedingungen zu nennen, andererseits die Interpretation der Ergebnisse. Die weit verbreitete „Technikgläubigkeit“ führt dazu, dass Ergebnisse häufig unkritisch, ohne ihre Überprüfung durch Anschauungsmodelle und mathematische Vereinfachungen, übernommen werden. „Der elektronische Computer hat die schöne Eigenschaft, der Liebe zur Scheingenauigkeit des Ingenieurs wieder weit entgegenzukommen.“ [Hossdorf 1971, 14]. „Alle Ingenieure des ausgehenden zwanzigsten Jahrhunderts müssen sich gut mit dem Computer auskennen; alle Entwerfer müssen sich davor hüten, sich auf ihn als Basis ihrer Konstruktionserfahrung zu verlassen.“ [Billington zitiert nach Ferguson 1993, 46].

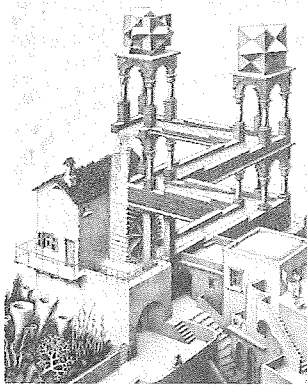


Abb. 4.21 In seinem Werk Wasserfall spielt Escher mit den Regeln der zweidimensional abgebildeten Perspektive.

Vor allem Präsentations- und Tragwerksmodelle sind also nach wie vor in der Praxis im Einsatz, wofür Harald Kloft einen Grund darin sieht, dass am Bildschirm immer nur eine zweidimensionale Abbildung entsteht, das räumliche Vorstellungsvermögen aber nur durch ein anfassbares, dreidimensionales Modell unterstützt werden kann [Kloft 2006]. Das menschliche Gehirn hat die Fähigkeit, aus mehreren Linien in zweidimensionaler Darstellung die Vorstellung einer dreidimensionalen Konstruktion zu entwickeln. Diese Fähigkeit ist jedoch nicht mathematisch genau, sondern lässt sich unter Umständen täuschen, wie sich in der Erforschung der Visuellen Fähigkeiten herausstellte. Diskrepanzen zwischen Darstellung und Realität zeigen sich beispielsweise in den Zeichnungen von M.C. Escher. Dort setzte er bekannte Regeln der perspektivischen Darstellung ein und verfälschte sie so, dass der Betrachter die Widersprüchlichkeit erst auf den zweiten Blick bemerkt. Diese Perspektiven basierten auf orthogonalen Strukturen. Bei der Darstellung von gekrümmten Linien erhöht sich die Wahrscheinlichkeit,

dass die Deutung der betrachteten Figur mit der tatsächlich abgebildeten nicht übereinstimmt [Motro 2006]. Deswegen sind Modelle zur Unterstützung des Verständnisses von komplexen Formen notwendig.

Dies zeigt sich auch bei der Arbeit mit Studenten, die „immer mehr Modelle bauen, um ein Gefühl für die Form (und deren Tragverhalten, Anm. d. Autorin) zu entwickeln“ [Kloft 2006]. In der Vorlesung Tragwerkslehre an der Universität der Künste Berlin wurde während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin von den Architekturstudenten in jedem Kurs ein Konstruktionsmodell ihres Entwurfs verlangt. Nicht selten erkennen die Studenten hierdurch die maßgeblichen Charakteristika ihres Tragwerksentwurfs. In den Vorlesungen werden diverse Modelle zur Erläuterung des Tragverhaltens in Ergänzung zum theoretischen Lehrstoff angewendet. Nicht nur für Architekturstudenten ist der Modellbau relevant, sondern auch für Bauingenieurstudenten, deren räumliche Phantasie in Vorbereitung auf das Berufsleben ebenso anzuregen ist und für die solche Modelle in der Praxis ebenfalls zum qualitativen Verständnis beitragen.

Auch Volker Schmid von Arup ist der Ansicht, dass „komplexe Formen am Computer nicht mehr erkennbar“ [Schmid 2006] seien, vor allem aber die Vorstellung des Krafftflusses beispielsweise bei sich verschneidenden Flächen am Realmodell deutlich besser ist. Rein geometrische Anschauungsmodelle, für die verschiedene Modellbaumethoden zum Einsatz kommen, werden häufig verwendet. Stand der Technik ist der maschinelle Modellbau, bei dem die Handarbeit soweit möglich vermieden wird. Wachsmodelle werden beispielsweise so hergestellt, dass im geplanten Luftraum Stäbchen eingebaut werden, die nach Fertigstellung herausgebrochen werden können. Die Lasertechnik erlaubt ein Schmelzverfahren, bei dem aus einem mit Kunststoffstaub gefüllten Gefäß die Form mit dem Laser durch Schmelzen des Materials hergestellt wird. Auch 3D-Fräsen kommen standardmäßig zum Einsatz, wobei mit dieser Methode die Herstellungsmöglichkeit von Formen begrenzt ist. Tragwerksmodelle, die mit der Intention gebaut werden, das Verformungs- und Tragverhalten der Struktur wiederzugeben, sind diesen Modellen in

der Anschaulichkeit des Kraftflusses weit überlegen.

Aber auch die Entwicklung der digitalen Modelle muss fortgeführt werden. Schmid sieht hierbei in der Vernetzung der unterschiedlichen Programme Entwicklungsbedarf. „Die Architekten modellieren mit einem anderen Hintergrund. Während das architektonische Modell vor allem ästhetischen Vorstellungen gerecht werden und visuell einen Eindruck der Realität vermitteln muss, erfordert das statische Modell eine genaue Definition jedes einzelnen Punktes“ [Schmid 2006]. Vor allem bei zusammengesetzten Flächen ist häufig eine aufwändige Nachbearbeitung der digitalen Modelle notwendig, die bei Änderungen der Geometrie im Originalmodell wiederholt werden müsse. Für diese Arbeiten sei eine Erweiterung des Planungsteams durch Spezialisten, in diesem Fall Computerspezialisten zur Formgenerierung, vorstellbar [Schmid 2006]. Um die Schnittstellen der zusammengesetzten Flächen zu vermeiden, ist eine Annäherung der Form durch stetige mathematische Funktionen zweckmäßig.

Mike Schlaich hält das Arbeitsmodell für ein fundamentales Werkzeug beim Tragwerksentwurf. Dennoch bestätigt er die Vorteile des Computermodells. Dadurch, dass die Auswertung mit dem Computer genauer erfolgen kann, sei ein materialsparenderes, ressourcenschonenderes Bauen möglich. „Es können Formen gefunden werden, deren Untersuchung mit dem Computer, beispielsweise durch Fallstudien mit einzelnen veränderlichen Parametern, vereinfacht wird“ [M. Schlaich 2006].

Die Methode, mit der Modellstatik eine Optimierung des Tragverhaltens von Bauten zu erreichen, ist empirisch im Vergleich zu mathematischen Optimierungsverfahren, bei denen Grenzwertprobleme und Minimal- oder Maximalbetrachtungen mit definierten Randbedingungen rechnerisch durchgeführt werden.

4.3 Formfindung durch konstruktive Optimierung

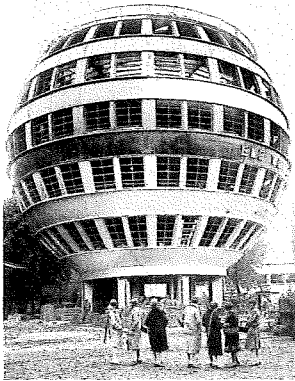


Abb. 4.22 Das Kugelhaus in Dresden, 1928, von Peter Birkenholz.

Eine effiziente äußere, tragende Form ist für bewegliche Objekte wie das Flugzeug und das Automobil ein bedeutender Leistungs- und Kostenfaktor, da Stromlinienform und Gewichtsreduzierung zur Einsparung von Energie über die Lebensdauer maßgeblich beitragen. Allein durch die doppelte Krümmung der Fläche können Steifigkeit und Tragfähigkeit um ein Vielfaches erhöht werden, so dass das Gewicht maßgeblich reduziert wird. Es wird ein mathematisch komplexes Formenrepertoire verwendet, welches als Typus erkennbar ist und daher nicht als freie Formen eingeordnet wird. Die Entwicklung der Optimierung von tragenden Konstruktionen in der Luftfahrt- und Automobilindustrie resultierte in Verfahren und Computerprogrammen, die jetzt ebenfalls in der Architektur und im Bauwesen zur Formfindung und -optimierung verwendet werden.

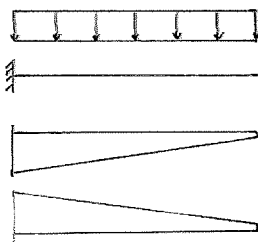
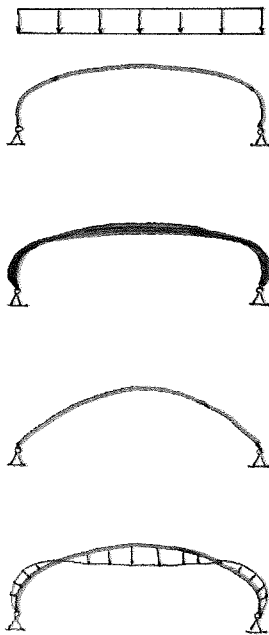


Abb. 4.23 System und Belastung des Kragarms mit zwei Möglichkeiten der Gestaltung nach Durchführung einer mathematischen Optimierung.

Ziele der Optimierung eines architektonischen Entwurfes können in drei Kategorien unterschieden werden. Physikalische Aspekte, numerische Aspekte und nicht-numerische Aspekte [Geyer 2005]. Dabei zählen zur ersten Gruppe beispielsweise die Materialmenge, Elementzahl, Oberfläche oder Steifigkeit, zur zweiten Gruppe Kosten, Ressourcen oder Bauzeit. Nicht-numerische Aspekte sind „weiche“, schwer quantifizierbare Faktoren wie Funktion, Nutzung, Ästhetik, Raum- oder Symbolwirkung. Häufig wird bei einer Optimierung ein Aspekt herausgegriffen und der Entwurf daraufhin bearbeitet. Beispielsweise ergibt die Minimierung der Oberfläche eines Gebäudes im Vergleich zum Volumen eine Kugelform. Diese ist aus Sicht der Nutzung nicht unbedingt optimal. Es sind also im Entwurf, und dies gilt besonders für die komplexen Ansprüche im Bauwesen, immer mehrere Aspekte zu berücksichtigen.

Die Durchführung der mathematischen Optimierung erfordert eine Formulierung einer Zielfunktion $f(x)$ mit der Variablen x , die das gewünschte Ziel genau definiert. Je nach gewählter Funktion ist mit lokalen und globalen Maxima und Minima zu rechnen, wobei es ein

Optimum oder mehrere Optima geben kann, von denen das Maßgebliche bestimmt wird. Zusätzlich sind Neben- oder Randbedingungen zu formulieren, um die Lösungsmenge in bestimmten Grenzen im zulässigen Bereich festzulegen [Kost 2003].



Mit dem Ziel, einen mit Gleichlast belasteten Kragarm mit Rechteckquerschnitt nach der Höhe h , die in einem vorgegebenen Rahmen liegt, zu optimieren, kann bei gleich bleibender Breite die Höhe des Balkens so berechnet werden, dass an jeder Stelle die maximale Biegespannung gleich groß ist. Schon Galilei beschäftigte sich mit dieser Aufgabenstellung. Das Ergebnis ist eine lineare Funktion, so dass der resultierende Kragarm eine linear verlaufende Höhe hat.

Die beschriebene mathematische Optimierung des Kragarms führt zu einer Gewichtsminimierung des Tragsystems unter einem einzigen gegebenen Lastfall bei maximaler Ausnutzung der zulässigen Spannung, wobei der Einfluss der Querkraft bereits vernachlässigt wurde. Je mehr Elemente in einem System vorhanden sind, und je mehr Lastfälle berücksichtigt werden, desto aufwändiger wird diese Berechnung. Der Rechner dient zur Durchführung der Iterationen und zur Auswertung der Berechnung als wertvolles Werkzeug, die Entwurfsentscheidungen sind von den Planern zu treffen. Beim einfachen Beispiel des Holzbalkens wird deutlich, dass mit der Optimierung nicht notwendigerweise alle entwurfsrelevanten Fragen geklärt sind. Die lineare Vergrößerung des Querschnitts kann ober- oder unterseitig oder als Kombination der beiden Flächen ausgeführt werden. Die Resultate müssen vielmehr als Grundlage für einen Entwurf angesehen werden, in dem weitere numerische und auch nicht-numerische Aspekte für ein funktionales Gebäude berücksichtigt werden.

Abb. 4.24 Die Geometrie des Korbogens führt unter Gleichlast zu großen Biegemomenten in Feldmitte und in den Stielen. Bei der Bemessungsoptimierung werden die Querschnitte angepasst, bei der Formoptimierung die Geometrie verändert (Parabelform) und bei der Topologieoptimierung neue Elemente hinzugefügt, hier eine Unter- und Überspannung.

Die Strukturoptimierung, d.h. die Optimierung der Tragkonstruktion, kann mit dem Ziel numerischer oder nicht-numerischer Aspekte der Optimierung eingesetzt werden. Die Leistungsfähigkeit der Konstruktion betrifft Steifigkeit und Gewichtsreduzierung ebenso wie Wirtschaftlichkeit, Ästhetik oder Nutzung. Kai-Uwe Bletzinger und Kurt Maute schlagen die

Unterscheidung der Strukturoptimierung in **Bemessungs-, Form- und Topologieoptimierung** vor. Sie bezeichnen die Strukturoptimierung als „mathematisch-mechanisch orientierte Methode für die Optimierung von mechanisch beanspruchten, technischen Konstruktionen“ und sehen darin eine „Umkehrung der Beziehung zwischen Tragwerksgestalt und Tragfähigkeitsnachweis“ [Bletzinger 1996, 131], d.h. dass die Formgebung durch den Spannungsnachweis beeinflusst ist. Der große Rechenaufwand der Optimierungsprobleme werde erst durch den Computer handhabbar. Als übliche Zielkriterien benennen sie minimales Gewicht, maximale Steifigkeit, homogene Spannungen, abgestimmte Eigenfrequenzen oder maximale Traglast, wobei Verformungen und Spannungen im Allgemeinen die Grenzen der Optimierung bestimmen.

Bei der **Bemessungsoptimierung** werden alle einzelnen Elemente für sich optimiert, wie anhand des Kragarmbeispiels dargestellt. Man kann dies auch als „lokale Formgebung“ bezeichnen [Rogers 2005, 169], da die in jedem Element auftretenden Beanspruchungen lokal berücksichtigt werden und nicht mit einer „globalen Formgebung“ das Gesamtsystem verändert wird, wie dies bei der Form- und Topologieoptimierung erfolgt. Die Querschnitte der Rahmenkonstruktion mit Korbbogenform würden im Bereich der großen Momentenbeanspruchungen lokal verstärkt werden.

Für die **Formoptimierung** wird die Form des Tragwerks, d.h. die Lage der Knoten bei gleich bleibender Anzahl von Stäben und Knoten und bei gleich bleibender Belastung so verändert, dass die Querschnitte der Elemente möglichst optimal ausgenutzt und Biegemomente weitestgehend vermieden werden können. So könnte eine Korbbogengeometrie bei konstanter symmetrischer Linienlast beispielsweise in eine Parabelgeometrie umgewandelt werden, da diese bei Gleichlast die Stützlinie darstellt, so dass der Bogen hauptsächlich auf Druck belastet ist.

Die Anordnung des Tragwerks ändert sich im Fall der **Topologieoptimierung** so grundlegend, dass dies eine neue Anzahl von Elementen und Knoten nach sich zieht. Am Beispiel der

Korbbogengeometrie könnte eine über- und gespannte Konstruktion als Topologieoptimierung dienen.

Eine Methode der Topologieoptimierung beinhaltet eine Einteilung des Entwurfsraums in endlich kleine Teile, denen die Eigenschaft „Material vorhanden“ oder „Material nicht vorhanden“ zugeteilt wird. Werden also nur belastete Elemente im Entwurfsraum als „vorhanden“ dargestellt, so erscheint ein Tragwerk, dessen unbelastete Teile entfernt wurden, welches dadurch mit minimiertem Materialaufwand die gegebene Last abträgt. Die Strukturoptimierung bietet so Möglichkeiten, Tragsysteme durch iterative Verfahren und mit Einsatz der hohen Rechenkapazität des Computers zu optimieren. Unter Vorgabe eines Entwurfsraums und relevanter Entwurfskriterien generiert das Programm ein konzeptionelles Tragwerk, welches als Ausgangspunkt für den endgültigen Entwurf dient. [Bletzinger 1996].

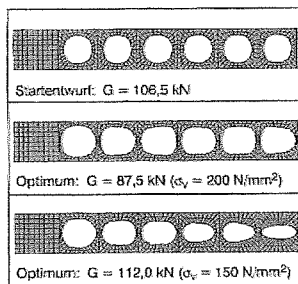


Abb. 4.25 Der Startentwurf und zwei Optima für den Träger.

Die Übergänge zwischen den drei Optimierungsarten sind fließend. Bletzinger nennt als Beispiel für eine Formoptimierung einen Rahmenträger für eine Eissporthalle. Dessen Optimierung ergab mit dem Ziel, bei konstanter Trägerhöhe das Gewicht des Trägers bei festgelegter maximaler Vergleichsspannung zu minimieren, eine dem Kraftfluss entsprechende Ausschnittform der Löcher. Dies könnte ebenso als Elementoptimierung betrachtet werden, wenn Ober-, Untergurt und die Vertikalen jeweils als Elemente aufgefasst werden, deren Querschnitte der Beanspruchung angepasst werden oder als Topologieoptimierung, wenn von einem Vollwandträger ausgegangen wurde, der zu einem Rahmenträger optimiert wird.

Die beschriebenen Verfahren sind in begrenztem Umfang auch ohne einschneidende Veränderung der architektonischen Gesamtform anwendbar. Dies ist gerade für die nach nicht-statischen Kriterien in ihrer Form festgelegten Gebäude von Bedeutung, da Ressourcen ohne Änderung der gestalterischen Idee eingespart werden können. Im Projekt Busbahnhof Wädenswil der Architekten Kuhn und Steinbächer mit osd wurde eine Formoptimierung der Träger angestrebt. Die geschwungene

Kontur des Daches lag zu Beginn der Zusammenarbeit fest, so dass eine globale Formgebung nicht möglich war. Lediglich eine lokale Formgebung des Tragwerks wurde von den Architekten akzeptiert. Kloft unterscheidet hier zwischen der „geometrischen“ (globalen) und der „materiellen“ (lokalen) Formoptimierung. Während er als geometrische Formoptimierung das Umbilden der Gesamtform eines Entwurfs erlaubt, wird bei der materiellen Formoptimierung nur die Gewichtsreduzierung oder Steifigkeitsoptimierung der Elemente selbst ohne Änderung der Gesamtkontur angestrebt. Entsprechend der auftretenden Belastungen wurde die Konstruktion in Wädenswil, die als Vierendeel-Trägerrost ausgebildet ist, so geplant, dass bei hoher Beanspruchung mehr Material eingesetzt wird.

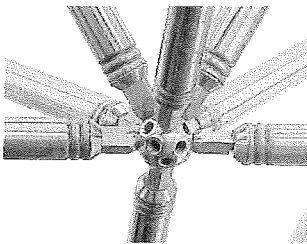


Abb. 4.26 Der geschmiedete Knoten von MERO ist Teil des modularen Systems.

Ein anderer Ansatz der Optimierung wird von Max Mengerlinghausen [Mengerlinghausen 1983] beschrieben, der ein System von Stab-Knotenverbindungen, genannt MERO, erfand. Ein solches System erfordert eine gut durchdachte Rationalisierung, um mit möglichst vielen gleichen Teilen eine große Anzahl verschiedener Gestaltungswünsche umsetzen zu können. Die Optimierung findet also gleichzeitig mit der Herstellung einer Ordnung, nämlich einer Normierung der Maße und der Module, statt. Neben der Effizienz der Konstruktion durch die Verwendung schlanker Rohrelemente wird die Wirtschaftlichkeit durch Einsatzflexibilität der gewählten Knoten und Module gewährleistet. Durch das polygonale Zusammensetzen von Stäben unterschiedlicher Länge können komplexe Gesamtformen entstehen.

4.4 Zusammenfassung und Ergebnis

Eine Spaltung von Kunst und Technik fand im Bauwesen nie tatsächlich statt: Technisches Wissen ist für den Architekten unumgänglich, kreatives Denken als Grundlage für den Ingenieursentwurf ebenso notwendig. Beide Berufssparten arbeiten zwar unter unterschiedlichen Aspekten an der Aufgabe, aber mit dem gemeinsamen Ziel, ein abgestimmtes,

funktionsfähiges Gebäude herzustellen, das technische und ästhetische Anforderungen erfüllen muss. Kreativität trägt zu allen Phasen der Planung bei, von der ersten Idee bis hin zur Ausführung.

Beim Entwurf komplexer Formen zeigt sich, dass Hilfsmittel wie der Modellbau und die Tragwerksoptimierung im Hinblick auf die Entwicklung der Formen neu bewertet werden müssen. Die Formfindung über digitale Modelle vereinfacht die Festlegung der Geometrie und die Visualisierung am Computer dient der Veranschaulichung. Dennoch ist die Anschauung am Realmodell so viel deutlicher, dass auf Präsentationsmodelle nicht verzichtet werden kann. Dies gilt insbesondere für Gebäude- und Tragwerksgeometrien, die in zweidimensionaler Darstellung nur schwer lesbar sind. Der Modellbau ist daher zur Formfindung, zur ersten statischen Erfassung, zum Begreifen der physikalischen Vorgänge in Ergänzung zu mathematischen und digitalen Modellen und zur Herstellung des Bauwerks für komplexe Formen unverzichtbarer Bestandteil des Entwurfsprozesses.

Die statische Optimierung des Tragwerks durch mathematische Methoden ist für einmal festgelegte Geometrien, seien dies geometrische oder auch freie Formen, nur bedingt einsetzbar. Wenn die Geometrie der betrachteten Form bereits im Entwurf feststeht, kann bei frei geformten Flächen die Strukturoptimierung durch „globale Formgebung“ nur in geringem Umfang erfolgen. Lediglich lokale Anpassungen von Tragfähigkeit und Steifigkeit der Einzelelemente sind dann noch möglich. Dies ist ebenso bei den elementaren geometrischen Formen wie der Kugel oder dem Quader der Fall, da diese als „starke Formen nicht modifizierbar sind“ [Schmid 2006]. Ist eine frühe Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur erwünscht, so sind es gerade die undefinierten und nicht ablesbaren Formen, die eine Optimierung auch aus tragwerkstechnischer Sicht zulassen.

Eine Optimierung hat nicht grundsätzlich auf mathematischer Grundlage zu erfolgen, sondern kann auch der Intuition oder dem Erfahrungsschatz des Ingenieurs entspringen. Gerade die globale Formgebung, bei der

beispielsweise aus der ebenen Geometrie eines Gitterrostes eine Hängeform entwickelt wird, ist ein so grundlegender Schritt, dass dazu weniger die Rechenkapazität als vielmehr die Kenntnis des Planers zum Kraftfluss und zum Verhalten der Tragsysteme führt. So schreibt auch Linkwitz, „In diesem Sinne, nämlich einem schrittweisen Herantasten an die endgültige Form in der interaktiven Verknüpfung von Formfindung und Materialisierung, spricht man von einer Formoptimierung, ohne damit die Optimierung im mathematischen Sinne zu meinen“ [Linkwitz 1996, 123].

Komplexe Formen – ob mathematisch, physikalisch oder frei – erfordern die besondere Aufmerksamkeit des Planungsteams, da Standardlösungen für die Komplexität der Aufgabe nicht ausreichen. Daher ist die intensive Auseinandersetzung des Ingenieurs mit der Formgebung unter Einsatz seiner kreativen Kapazität im Planungsprozess notwendig. Der sinnvolle Einsatz der Baustoffe und ihrer Verbindungsmittel mit dem ihnen eigenen Materialverhalten und unterschiedlichen Verarbeitungsmethoden ist für die endgültige Planung jedes erfolgreichen Projektes wesentlich. Dieser Aspekt des Bauens unter Berücksichtigung der freien Formgebung im Entwurf wird im folgenden Kapitel behandelt.

5 Konstruktive Formbildung

Das Tragwerk folgt der Form des Projektes soweit wie es notwendig ist, um die geplante Gebäudeform herzustellen, und hat die Aufgabe, alle auftretenden Lasten sicher abzuleiten. Die Umsetzung einer vorgegebenen Geometrie eines aus linearen oder flächigen Elementen bestehenden Tragsystems ist ein grundlegender Faktor bei der Herstellung komplex gekrümmter Formen. In der standardisierten orthogonalen Bauweise sind Stützen und Wände generell gleichmäßig über den Grundriss verteilt. Ein Repertoire von Bauweisen vom Stahlskelettbau bis hin zum massiven Ortbetonschottbau bestimmt den Großteil dieser Bauten.

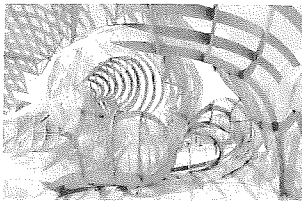


Abb. 5.1 Das Tragwerk des Son-O House von NOX ist aus linearen, gekrümmten Elementen geformt.

Eine Beschreibung der Formgebung für einzelne Baustoffe und der sich daraus ergebende Zusammenhang zwischen Material und Form mit einzelnen Beispielen aus der Praxis leitet die konstruktive Betrachtung der Herstellung von komplexen Formen ein. Sonderfälle dieser Formgebung durch die Verwendung flexibler Konstruktionen werden ebenfalls aufgeführt. Anschließend wird die Anwendung der Bauweisen anhand vier unterschiedlicher aktueller Projekte detailliert dargestellt.

5.1 Material und Form

Jeder Werkstoff erfordert unterschiedliche, auf die Eigenschaften des Materials abgestimmte Verfahren zur Herstellung von gekrümmten Bauteilen. Die maßgeblichen Eigenschaften und die Möglichkeiten der Formgebung von Stäben oder Flächen in den Materialien Holz, Metall, Kunststoff, Stahlbeton, Glas und Mauerwerk werden in einem Überblick dargestellt.

Holz

Holz ist ein natürlicher, anisotroper Werkstoff mit gerichteten Fasern. Es ist aufgebaut aus den Hauptbestandteilen Lignin und Cellulose. Verschiedene Holzarten können deutlich unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen und schon innerhalb eines Baumes treten Dichteunterschiede auf [Eggert 1995]. Dadurch wird die Bearbeitung dieses Werkstoffes beeinflusst. Automatische Prozesse werden hierdurch komplexer. Zur Betrachtung der statischen Eigenschaften sind die Holzwerkstoffe in Sorten unterteilt, in denen die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften und Qualitätsunterschiede des Holzes berücksichtigt sind. Vor allem beim Biegen von Vollholz und von Holzwerkstoffen ist der Erfolg des Vorgangs von der Holzqualität abhängig. Dies gilt für stabförmige wie auch für flächige Elemente. Die Umformung von Holzelementen geschieht in drei Schritten: dem Plastifizieren, dem Biegen und dem Stabilisieren.



Abb. 5.2 Charles und Ray Eames mit ihrem Team vor einer gebogenen Holzschale.

Beim Plastifizieren wird der E-Modul des Holzes verringert, so dass das Holz weicher wird und verformt werden kann. Der Querschnitt des Holzes bleibt beim Biegen weitgehend erhalten. Die Methoden des Plastifizierens sind chemisch, thermo-mechanisch und thermisch. Die chemische Methode ist heute aufgrund der giftigen Chemikalien wie Ammoniak, Harnstoff oder Hydrazin unüblich. Die thermo-mechanische Methode des Plastifizierens basiert auf einer Erwärmung und gleichzeitigen Erhöhung der Feuchte des Materials mit Wasserdampf. Durch eine zusätzliche Stauchung wird der Faserverbund gelockert. Rein thermische Vorgänge werden durch Kochen, Dämpfen oder dielektrische Methoden z.B. mit Hochfrequenz, auch mit Mikrowellen, erreicht [Eggert 1995].

Beim Umformen müssen hohe Zugspannungen vermieden werden, um ein Versagen des Materials auszuschließen. Das Biegen von Vollholzstäben, auch Bughölzer genannt, erfolgt daher mit Hilfe eines so genannten „Zugbands“ aus Metall, welches an dem zu formenden Holzquerschnitt befestigt ist. So nimmt es während des Biegevorgangs die Zugspannung im Querschnitt auf, während das Holz hauptsächlich in der Druckzone liegt, da die neutrale Faser des Gesamtquerschnitts aufgrund

des weit höheren E-Moduls des Metalls verschoben ist. Die Verbindung der beiden Elemente erfolgt durch die „Anlage“ an beiden Enden des Werkstücks. Eine zweiachsige Biegung kann in mehreren Schritten erfolgen.

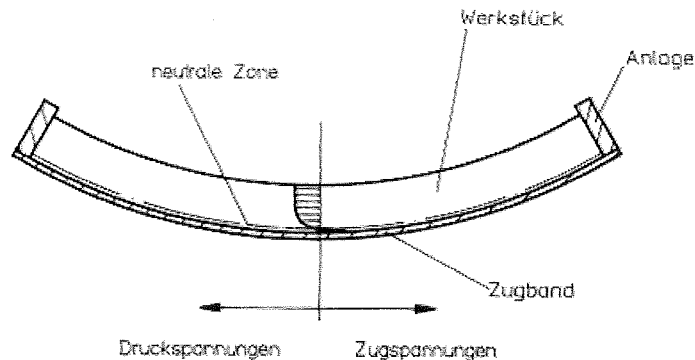


Abb. 5.3 Beim Biegen mit Zugband wird die neutrale Achse im Querschnitt verschoben, um eine hohe Zugbeanspruchung im Holz zu vermeiden.

Beim Stabilisieren wird das Holz gekühlt und getrocknet. Verformungen werden dabei festgehalten und auch elastische Anteile der Verformung plastisch abgebaut, was bedeutet, dass der gebogene Holzquerschnitt am Ende des Prozesses spannungsfrei ist.



Abb. 5.4 Eine Skulptur aus Schichtholz von Charles und Ray Eames.

Während Vollholz eher für stabförmige Bauteile verwendet wird, eignen sich Schicht- und Sperrholz auch für flächige Elemente. Diese Holzwerkstoffe werden aus einzelnen Lagen verleimt und in beheizte Formen gepresst. Mit der Richtung der Lagen kann auf den erwarteten Spannungszustand im Bauteil reagiert werden. Der Bootsbau kann als maßgeblicher Ursprung für die Technologie des Holzbiegens angesehen werden, aber auch im Möbelbau ist das Holzbiegen seit langer Zeit in Anwendung. Charles und Ray Eames experimentierten mit der Formgebung von Holzwerkstoffen wie Sperrholz und Schichtholz und entwarfen und bauten Möbel und Skulpturen. Während der 1940er Jahre entstanden sogar einzelne Teile für den Flugzeugbau (Abmessung einer Flugzeugnase ca. 4 x 4 m). In einer von ihnen selbst entwickelten Presse

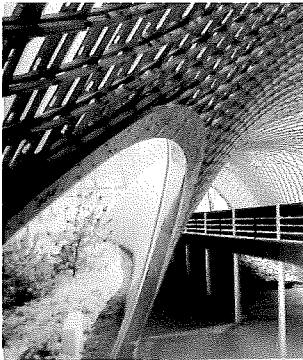


Abb. 5.5 Die Randträger der Multihalle in Mannheim bestehen aus gebogenem Brettschichtholz, das Gitter aus mehrlagigen Holzlatten.



Abb. 5.6 Innenansicht des Werkstattgebäudes der Hooke Park Schule.

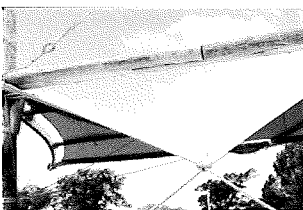


Abb. 5.7 Die gebogenen Hölzer für dieses Studentenprojekt der Hooke Park School sind ebenfalls aus frischem Holz.

für Schichtholz konnten verschiedenste Formen hergestellt werden, die zunächst als Negativ erarbeitet wurden. Dadurch wurde jede denkbare stetige Form möglich. Ein prägnantes Beispiel ist die Skulptur aus Formschichtholz (67 x 96 cm) [Koenig 2005].

Das Brettschichtholz, welches wiederum eher Einsatz als stabförmiges Element findet, wird vor dem Verleimen bereits in Form gebracht. Die Bretter werden einzeln gebogen und anschließend verleimt. Obwohl hauptsächlich einachsige Krümmungen der Binder verwendet werden, sind auch zweiachsige Krümmungen herstellbar.

Eine weitere Anwendung des Holzbiegens nutzt die inhärente hohe Elastizität frischen Holzes. Hierbei werden frisch geschlagene, ungetrocknete Holzstämmen verwendet, die direkt auf der Baustelle gebogen und fixiert werden. Die so entstehenden Spannungen können im Holz durch Kriechen abgebaut werden. Diese Methode ist geometrisch gesehen relativ ungenau, da die Krümmung von der Qualität jedes einzelnen Stammes abhängig ist.

Ein experimentelles Projekt, bei dem frisch geschnittene Rundhölzer zum Einsatz kamen, war der 1988 vollendete Bau des Werkstattgebäudes der Hooke Park School of Woodland Industries von ABK Architects mit Frei Otto und Büro Happold [Nerdinger 2005]. Die Baumstämmen wurden vor Ort in vorbereitete Fundamentstreifen eingespannt, anschließend mit Seilen zum First hin zusammen gezogen und dort verbunden, so dass ein bogenförmiges Dachtragwerk entstand. Das frische, ungetrocknete Holz ist aufgrund seines Feuchtegehaltes weicher und elastischer als das trockene Bauholz. Mit der Eigenschaft des Holzes, Spannung durch Kriechen abzubauen, entstand ein spannungsfreies, gekrümmtes Tragwerk. Bei dieser Konstruktionsweise, die dem ungebundenen freien Biegen im Stahlbau (s.u.) mit vereinfachten Bedingungen gleichkommt, ist zu beachten, dass nicht beliebige Formen hergestellt werden können, sondern die natürliche Biegeform der Baumstämmen mit den natürlich bedingten Ungleichmäßigkeiten die endgültige Kontur des Tragwerks mitbestimmt. Zudem wurden nur einfache Werkzeuge eingesetzt, die lediglich das Krümmen in eine Richtung zuließen.

Metall

Metall weist eine kristalline, isotrope Struktur auf. Es ist ein Material, welches als künstliche Legierung aus mehreren natürlich vorkommenden Stoffen hergestellt wird. Biegeverfahren für unterschiedliche Metalle wie Stahl, hochfesten Stahl, Aluminium, Titan oder Kupfer ähneln sich aufgrund ihrer ähnlichen Materialeigenschaften. Kalt- oder Warmverformungen sind üblich, wobei die Erwärmung eine größere Biegung ermöglicht. Metall wird im Bauwesen konstruktiv hauptsächlich stabförmig eingesetzt, während plattenartige Flächen meist in kleineren Elementen als nicht tragende oder nur sich selbst tragende Haut Verwendung finden.

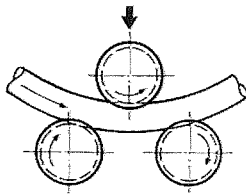


Abb. 5.8 Biegen durch Kaltwalzen – ein gebundenes Biegeverfahren mit geradliniger Werkzeugbewegung.

Es existieren verschiedene Biegeverfahren, die einerseits in Verfahren mit geradliniger und drehender Werkzeugbewegung eingeteilt werden, andererseits in Verfahren mit formgebundener und mit kinematischer oder ungebundener Gestalterzeugung [Bauer 2002, Ehresmann 1996].

Für **gebundene Verfahren** werden Schablonen verwendet, durch die eine definierte Form oder Krümmung vorgegeben ist, wobei sowohl mit geradliniger als auch mit drehender Werkzeugbewegung gearbeitet wird. Während des Biegevorgangs erfährt die Innenseite des Profils eine Stauchung, die Außenseite eine Dehnung. Dies muss beim Biegevorgang berücksichtigt werden, damit weder Beulen in der Druckzone noch eine zu große Materialdickenverringerung in der Zugzone auftritt. Daraus ergibt sich ein Grenzwert, der den minimalen Radius der Krümmung bestimmt. Bei den gebundenen Biegeverfahren können Querschnittsveränderungen durch die kontrollierte Führung des Profils minimiert werden.

Ungebundene Verfahren funktionieren hingegen durch das Einprägen eines Biegemoments, so dass die Form frei ausgebildet wird. [Ehresmann 1996]. Beim „freien endgesteuerten Biegen“ beispielsweise wird das Werkstück an den Enden eingespannt und von dort durch Drehung der Einspannung verformt. Auch hier kann die geradlinige sowie auch die drehende Werkzeugbewegung eingesetzt werden. Fast beliebige

Biegeformen können so entstehen, bevorzugt kreis- und spiralförmige Formen aber auch entgegengesetzte Krümmungen. Die herzustellende Form wird über die Differentialgleichung der Biegelinie mathematisch bestimmt und die Einspannungen entsprechend verschoben bzw. verdreht. Es sind hier ebene und räumliche Biegevorgänge möglich. [Thalmair 2002].

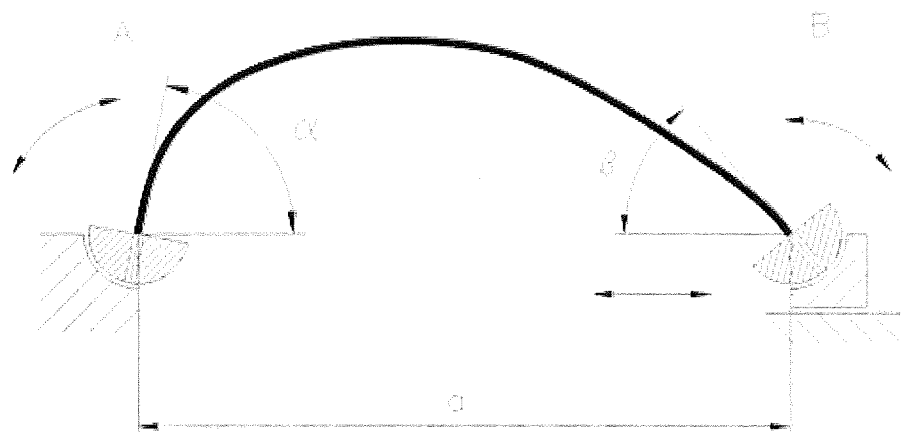


Abb. 5.9 Freies Biegen nach [Bauer 2002] hier in einer Prinzipskizze als ebene Umformung mit drei Freiheitsgraden.

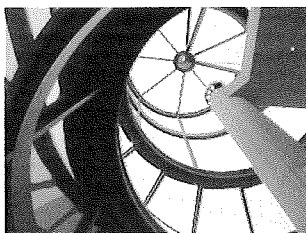


Abb. 5.10 Ein doppelt gekrümmter Stahlträger für das Deutsche Historische Museum von I.M. Pei.

Diese Verfahren wurden für den Maschinen- und Fahrzeugbau entwickelt und sind für das Bauwesen - mit kleineren Chargen aber generell größeren Profilabmessungen - adaptiert worden. Der Bedarf an komplexen Konturen und an dreidimensionaler Biegung nimmt im Bauwesen stetig zu. Interessant sind dabei vor allem Biegeverfahren die flexibel sind und auch geometrisch komplexe Formen zulassen. In der Forschung wird versucht, die Flexibilität der ungebundenen Biegeverfahren mit der Präzision der gebundenen zu vereinen [Ehresmann 1996].

Bei der Verformung von Profilen wird zwischen offenen und geschlossenen Querschnitten unterschieden. Bei **offenen Querschnitten** sind gebundene Verfahren eher geeignet als ungebundene, da diese während der Verformung für Verwerfungen und

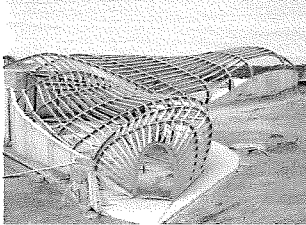


Abb. 5.11 Der Wasserpavillon von Nox besteht aus einer Unterkonstruktion aus gebogenen Stahlprofilen. Die Sparren wurden vor Ort gebogen.

Querschnittsveränderungen besonders anfällig sind. So sind diese Verfahren auch für komplizierte Querschnittsgeometrien der Profile möglich. Ein Sonderverfahren, welches für offene Profile eingesetzt werden kann, ist eine Krümmung durch Strecken der Außenseite und Stauchen der Innenseite des Profils. Auch das Aufschneiden durch Gehrungsschnitt und Verschweißen wird bei offenen Profilen angewendet, um unterschiedliche Geometrien zu erlangen. Dieses Verfahren ist streng gesehen kein Biegeverfahren, da das Werkstück nicht gekrümmt, sondern ohne Verformung des Materials polygonal zusammengesetzt wird.

Für den Wasserpavillon in Neeltje Jans von NOX fanden in Walzen verformte, offene Stahlprofile ihren Einsatz. Das von den Architekten verwendete Computerprogramm setzte die zunächst vorgesehenen Ellipsen in eine Korbbogengeometrie mit Kreissegmenten um. Für den Biegeprozess stellte sich dies als Vorteil heraus, da die Steuerungsprogramme der Walzen ebenfalls nur Kreisabschnitte lesen konnten. Die Sekundärkonstruktion besteht aus geraden I-Profilen und spannt so eine Regelfläche zwischen den Primärbögen auf, die allerdings über die Gesamtlänge des Pavillons keine stetige Fläche ergeben. Die zur Herstellung der Fläche erforderliche Verdrehung der Sekundärträger wurde in situ hergestellt und durch die Verschraubung der Träger an den Hauptrahmen fixiert. Dies war durch eine geringe Torsionssteifigkeit der Profile möglich, allerdings baut sich die Spannung im Material aufgrund der fehlenden Kriechverformung des Stahls unter Last mit der Zeit nicht ab. Ein flexibles Metallgewebe dient als äußere Haut des Pavillons [Spuybroek 2004].

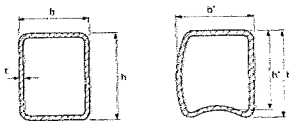


Abb. 5.12 Die mögliche Verformung des Querschnitts eines Rechteckhohlprofils beim Biegen mit kleinen Radien.

Für geschlossene **Rechteckhohlprofile** sind zwei unterschiedliche Methoden des Biegens zu unterscheiden: das Kaltbiegen mit drei Walzen und das Warmbiegen mit induktiver Erwärmung. Auch der Gehrungsschnitt mit anschließendem Verschweißen ist ein Verfahren, welches für Rechteckquerschnitte angewendet wird.

Der mögliche Krümmungsradius ist bei den Biegeverfahren der Rechteckhohlprofile dadurch begrenzt, dass bei zu großer Krümmung eine Verformung der Seitenflächen und der Fläche in der Druckzone

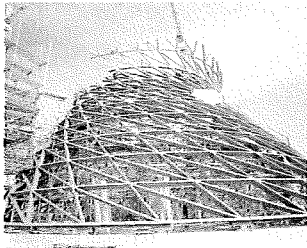


Abb. 5.13 Der Doppelkegel der BMW Welt München aus gebogenen Stahlhohlprofilen mit Rechteckquerschnitt.

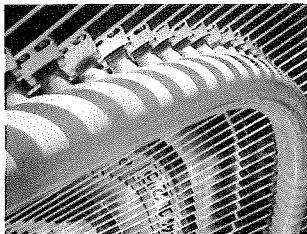


Abb. 5.14 Ein dreidimensional gekrümmtes Rohr für eine Skulptur am Flughafen München.

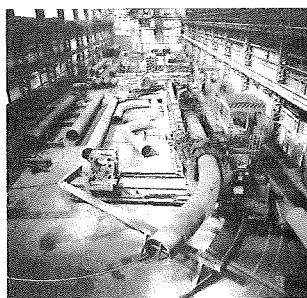


Abb. 5.15 Das Induktionsbiegen ermöglicht die Krümmung großer Rohrquerschnitte.

sowie eine Reduzierung der Profilhöhe auftreten [CIDECT 1996]. Beim Warmbiegen erfolgt daher eine radiale Führungsregelung der Krümmung.

Die Dachkonstruktion der BMW Welt in München von Coop Himmelb(l)au und Bollinger & Grohmann ist ein Raumfachwerk von bis zu mehreren Geschossen Höhe, welches fließend in die vertikale Struktur eines Doppelkegels übergeht, der das Dach gemeinsam mit acht Betonstützen und fünf Kernen trägt. Die Krümmung des Daches aus Doppel-T-Profilen wird durch Winkelsprünge in den Knoten hergestellt. Die Oberflächen des Doppelkegels aus Rechteckhohlprofilen hingegen sind gekrümmt hergestellt und eingebaut [Köppl 2005]. Die Profile müssen, um die Geometrie der Fläche zu generieren, eine doppelte Krümmung aufweisen.

Für geschlossene **Kreishohlprofile** gibt es weitere Verfahren des Warm- und des Kaltbiegens, wobei wiederum gebundene und ungebundene Verfahren zur Anwendung kommen. Eine Nutzung des Vorteils der Kreisgeometrie, die unter konstantem Innendruck stabil ist, wird durch ein traditionelles Verfahren erreicht. Die Profile werden mit verdichtetem Sand gefüllt, und anschließend bei einer Temperatur von 850°-1100° um eine Biegeplatte herum gebogen. Ebenso können Profile über einen konischen Innenrichtdorn geschoben werden. Dieser erweitert den Rohrdurchmesser während des Biegevorgangs, wodurch die Wanddickenverringerung in der Zugzone vermieden wird [CIDECT 1996]. Der Gehrungsschnitt mit anschließendem Verschweißen wird auch bei Kreisquerschnitten genutzt.

Das Biegeumformen von Profilen zu Parabeln, Ellipsen, gegenläufigen Krümmungen und nach digital vorgegebenen Koordinaten war vor wenigen Jahren im Bauwesen noch nicht selbstverständlich, wird aber heute immer üblicher. Auch für größere Profile (Rohre über etwa 500 mm bis etwa 1000 mm Durchmesser, Rechteckhohlprofile und offene Profile bis etwa 500 mm Profilhöhe) sind heute unterschiedlichste Krümmungsformen möglich. Durch das induktive Erwärmen in begrenzten Bereichen und bei präziser Kontrolle der Wärmezufuhr werden auch bei großen Rohrdurchmessern und Wanddicken sehr geringe Krümmungsradien erreicht. Auch offene Profile können mit engen Radien hergestellt werden. Dabei sind Krümmungen in alle Richtungen möglich,

auch dreidimensionale Formen wie Spiralen.

Das eindimensionale Biegen von **Flachstählen** ist einfacher als das Biegen von Profilen, da das Flächenträgheitsmoment in eine Richtung sehr gering ist. Bei der Herstellung von Profilen mit komplexen Krümmungen wird dieser Umstand genutzt, indem die Elemente nicht als fertiges Profil gebogen werden, sondern aus gebogenen Flachstählen als Ober- und Unterflansch und entsprechend ausgeschnittenen Flachstählen als Stegbleche erstellt sind. Dieses Verfahren ist vor allem bei mehrfach wechselnden Krümmungen in einer Richtung von Vorteil.

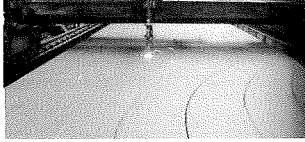


Abb. 5.16 Stegblech für den Dynaform Pavillon, welches nach den vorgegebenen Konturen CNC-geschnitten wurde.

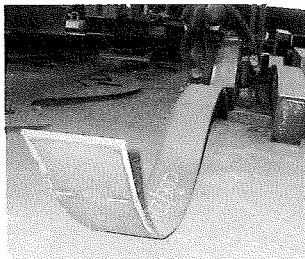


Abb. 5.17 Die Flansche wurden entsprechend gebogen und die Teile zusammengeschweißt.

Die Tragkonstruktion des BMW Pavillons „Dynaform“ von Bollinger & Grohmann und Franken Architekten wurde aus auf diese Weise verschweißten Rechteckhohlprofilen hergestellt. Ober- und Unterflansch der Profile wurden aus gebogenen Blechen hergestellt, während die Stege als gekrümmte Form ausgeschnitten wurden. Die so geformten Stahlbleche wurden zu Profilen zusammengeschweißt, die die parallelen, vierendeelartigen Rahmen mit gekrümmtem Obergurt bildeten. Auf diese Konstruktion wurde eine Haut aus textilem Gewebe gezogen. Aufgrund der vorgesehenen einfachen Krümmung der Membran war dies außerordentlich aufwändig [Kloft 2006].

Für den BMW Pavillon „Bubble“ von Bollinger & Grohmann gemeinsam mit Franken Architekten wurde eine Spantenkonstruktion aus je drei Lagen Aluminiumblech geschnitten, die in der Produktion günstiger waren als ein dickes Blech und auch den Vorteil hatten, dass die einzelnen Teile in der Haupttragrichtung entsprechend der Bohlenlamellenbauweise abschnittweise zusammengesetzt werden konnten. Quer dazu wurden die Elemente zwischen die Hauptträger geschraubt. Ein Biegeprozess war also zur Herstellung der komplexen Krümmung nicht erforderlich.

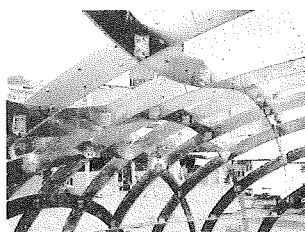


Abb. 5.18 Die Spanten des BMW-Bubbles aus drei Lagen Aluminiumblech.

Am Guggenheim Museum in Bilbao von Frank O. Gehry mit Skidmore Owings & Merrill wurden als Fassaden Stahlträger zu fachwerkartigen Strukturen zusammengesetzt. Jede 3 x 3 m große Masche der Konstruktion mit vertikalen I-Profilen und horizontalen Quadrathohlprofilen ist durch ein Rundrohr als Diagonale ausgesteift. Die doppelte Krümmung der Fläche, deren Form zunächst nur grob der endgültigen Oberfläche



Abb. 5.19 Die Gebäudekontur des Guggenheim Museums in Bilbao wurde mit Fachwerken hergestellt.

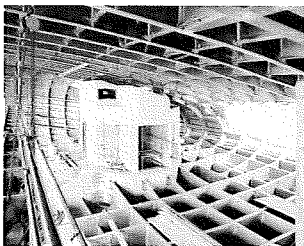


Abb. 5.20 Die Tragkonstruktion des Media Centre aus Aluminium.

folgt, entsteht durch Winkeländerungen in den Knotenverbindungen. Die einzelnen Stäbe sind gerade. Durch die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion, die aus der doppelten Krümmung und der diagonalen Aussteifung in der Fläche entsteht, waren beim Aufbau nur geringe Gerüstarbeiten erforderlich. Eine Sekundärkonstruktion aus gebogenen, horizontalen Rohren, die über verstellbare Tragelemente mit der Haupttragkonstruktion verbunden ist, gibt die genaue Geometrie der Fläche vor [Gehry 2001]. Eine Lage aus Stahlblech ist auf der Sekundärkonstruktion befestigt und darauf wiederum die sichtbare Haut aus Titanzinkblechen. Diese Bauweise ist ähnlich der Konstruktion der Freiheitsstatue, wo das Haupttragwerk ebenfalls aus geraden Elementen als Fachwerkkonstruktion hergestellt ist. Das in die gewünschte Form getriebene Kupferblech wurde an gebogenen Flacheisen befestigt, die wiederum an der Sekundärkonstruktion hängt.

Bei **plattenartigen Blechen** erfordert das Umformen in nicht abwickelbare Flächen wie auch bei den Profilen eine starke Steckung bzw. Stauchung des Materials. Hierfür sind Walzverfahren nicht geeignet, vielmehr kommen Pressen mit Schablonen bei der Verformung zum Einsatz.

Das Media Centre in London von Future Systems mit ARUP ist als „Monocoque“-Konstruktion aus Aluminium ausgeführt. Der Begriff Monocoque beschreibt eine Konstruktion aus tragenden Spanten, auf die eine aussteifende Haut aufgebracht wird und ist dem Bootsbau entlehnt. Das Tragwerk mit Abmessungen von 40m x 20m x 20m wurde in Zusammenarbeit mit einer Firma für Bootsbau entwickelt und auch durch sie gefertigt. Die 6 mm und 12 mm dicken Aluminiumplatten wurden mit CNC-Fräsen geschnitten und anschließend verformt. Die Rippen wurden ebenfalls aus Aluminium hergestellt und nach den digitalen Daten gefräst. Das Gebäude wurde vorgefertigt, dann in Abschnitte von 3 m Breite zerlegt und auf der Baustelle wieder zusammengefügt. Die glatte Außenfläche entstand durch Abschleifen der Schweißnähte und eine anschließende Lackierung [Lyall 2002].

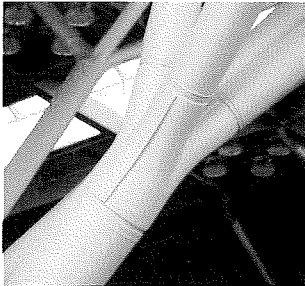


Abb. 5.21 Eine Verbindung mit Gussknoten.

Eine weitere Möglichkeit Metall zu formen liegt im **Gussverfahren**, welches beispielsweise für Gussknoten im Stahlbau eingesetzt wird. Für ganze Tragkonstruktionen größeren Maßstabs ist diese Methode nicht geeignet oder wirtschaftlich.

Kunststoff

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen ist zu beachten, dass es als chemische Ausgangsstoffe Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste, gibt, die einen unterschiedlichen Molekülaufbau und damit verschiedene chemische und thermische Eigenschaften aufweisen. Des Weiteren werden Kunststoffe mit natürlichen und synthetischen Fasern oder Geweben z.B. aus Glas oder aus Kohlenstoff zu Verbundwerkstoffen verarbeitet, wobei als Matrixwerkstoffe Duroplaste (Harze wie Epoxidharz, Phenolharz oder Polyurethan) und Thermoplaste (z.B. Polyamid, Polypropylen, Polycarbonat) dienen.

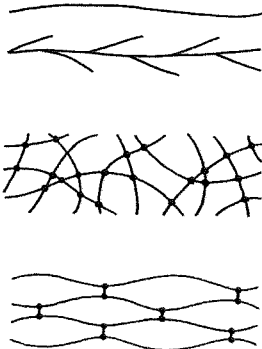


Abb. 5.22 Molekülaufbau der Kunststoffe: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere.

Im konstruktiven Textilbau kommen generell Verbundkunststoffe mit gewebten Fasern zum Einsatz. Aufgrund ihrer hohen Längssteifigkeit für Zugspannungen sind diese Materialien nur begrenzt dehnbar und sie weisen keine nennenswerte Biegesteifigkeit auf. Daher können die nicht abwickelbaren Flächen nur durch sehr genauen Zuschnitt analog zur Textil- und Kleidungsindustrie aus einem flächigen Element hergestellt werden. Die einzelnen Teile werden zusammengefügt. Unter Vorspannung ergibt sich eine stetig gekrümmte, im Idealfall faltenfreie Fläche, deren Form abhängig vom Krafftfluss ist, da im Material nur Zugkräfte aufgenommen werden können.

Sollen steife, d.h. rahmen-, bogen- oder schalenartige Bauteile hergestellt werden, sind die Ausgangswerkstoffe in eine definierte Form zu bringen. Bei stabförmigen Bauteilen aus Kunststoff erfolgt die Herstellung durch Strangziehen (Pultrusion), woraus offene oder geschlossene Profile mit gerichteten Fasern hervorgehen. Diese sind im Gegensatz zu Metallwerkstoffen anisotrop, d.h. sie haben wie das Holz sehr gute

Festigkeitseigenschaften parallel zur Faser aber eine sehr geringe Festigkeit senkrecht zur Faser. Die Krümmung solcher Profile erfolgt durch Herstellung des Elements in der entsprechenden Form.

Im Gegensatz zum Metallbau ist es bei der Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen möglich, Matrix und Fasern direkt im kalten Zustand auf eine Form aufzubringen. Karbon, Glas- oder Aramidfasern beispielsweise werden mit Epoxidharz oder dem feuerbeständigeren Phenolharz imprägniert und per Hand auf Formen aufgebracht. Anschließend werden die Teile ausgehärtet und mit CNC-Fräsen bearbeitet. Die Fasern liegen dann in mehreren Lagen und Richtungen, um isotrope Festigkeitseigenschaften sicherzustellen. Die Fasern können vermehrt dort angeordnet werden, wo große Beanspruchungen zu erwarten sind. Nach der Erhärtung entsteht ein stabiler Werkstoff. Auch hier sind schon früh Entwicklungen im Möbelbau zu verzeichnen. Charles und Ray Eames beispielsweise experimentierten nicht nur mit Holz und Metall für verschiedene Stuhlformen, sondern auch mit dem im zweiten Weltkrieg entwickelten Verbundwerkstoff, dem glasfaserverstärkten Polyester.

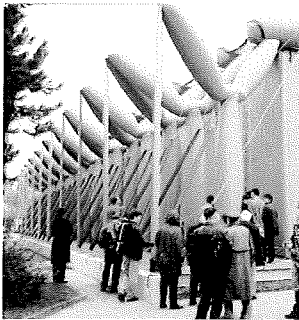


Abb. 5.23 Ein Versuchsbau der Firma Festo aus pneumatisch stabilisierter Membran als tragende Hülle.

Ein Beispiel aus dem Bootsbau [von der Linden 2004] zeigt, dass dort auch für Einzelanfertigungen aufwändige Positiv- oder Negativformen erstellt werden, auf denen mehrere Schichten des Laminats aus faserverstärktem Kunstharz aufgebracht werden. Die Form für das Boot Mirabella V wurde aus eigens hergestellten Holzspanen mit einer Schicht aus Spanplatten erstellt, diese noch ungenaue Oberfläche mit einer speziellen Formbaubeschichtung geglättet und anschließend mit einem Trennmittel versehen. Neuere Methoden machen Gebrauch von der Möglichkeit des computergestützten Zuschnitts beliebiger Formen aus Holzwerkstoffen oder aus Hartschaum mit CNC-Fräsen. Diese werden von beiden Seiten mit Kunststoff laminiert und können dann gleichzeitig als Kern einer Sandwichbauweise dienen. Mit zweischaligen, durch wabenförmige Elemente verbundenen Konstruktionen kann die Tragfähigkeit erhöht werden. [Billinger 2004].

Der faserverstärkte Kunststoff ist im Flugzeug- und Bootsbau

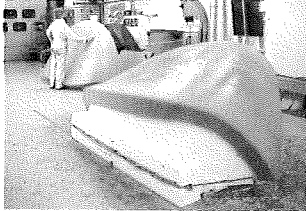


Abb. 5.24 Die Schale des D-Tower von NOX auf einer CNC-geschnittenen Schablone entsteht durch händisches Aufstreichen der Matrix.

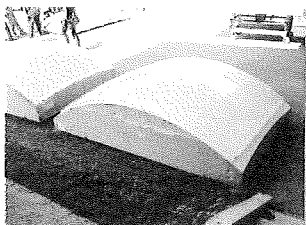


Abb. 5.25 Die Formgebung der doppelt gekrümmten Acrylglascheiben auf gefrästen Schablonen für den „Bubble“ erfolgt durch Erhitzen des Materials.

unentbehrlich als leichter Werkstoff mit sehr guten Festigkeitseigenschaften. Das arbeitsintensive Laminieren von Hand, welches im Bauwesen noch überwiegt, wird in der Luft- und Raumfahrt von neuen maschinellen Verfahren abgelöst, die allerdings für geringe Stückzahlen nicht wirtschaftlich sind. Sabine Einhäuser und Katharina Stelzer beschreiben ein neues Gerät, mit welchem alle Arbeitsschritte, vom Ausfräsen der Form aus einem Styroporblock über das Anordnen der Fasern, das Aufbringen der Matrix und das Polieren der Flächen, maschinell ausgeführt werden [Einhäuser 2004]. Diese Entwicklung scheint der der CAD/CAM-Technologie im Stahlbau zu entsprechen und ist in nicht allzu ferner Zukunft auch in der Bauwirtschaft vorstellbar.

Im Bauwesen wird Kunststoff bisher wenig als tragender Baustoff eingesetzt, da bisher noch nach geeigneten, werkstoffgerechten Verbindungsmitteln geforscht wird. Eine Entwicklungsbeschleunigung ist mit den häufiger geplanten komplexen Formen wünschenswert. Ein aktuelles Projekt als Schalenkonstruktion wurde durch NOX Architekten mit dem D-Tower in Doetinchem verwirklicht. Der ballonartig geformte Turmkopf auf drei Beinen aus Kunststoff ist etwa 8 m hoch. Der Turm wurde zuerst in etwa 20 Einzelteile mit Abmessungen zwischen 4 und 25 m² „zerlegt“. Für die Herstellung dieser Teile standen Negativformen aus Polystyrol, die mit CNC-Maschinen exakt nach den digital gespeicherten Daten bearbeitet waren, zur Verfügung. Mit per Hand aufgebrachtem, glasfaserverstärktem Epoxidharz entstand die komplexe Form. Jedes Einzelteil ist umlaufend mit Flanschen ausgestattet, welche einerseits die Steifigkeit der Schale erhöhen und andererseits zum Fügen der Teile mit Kleber dienen [Spuybroek 2004].

Für den BMW Pavillon „Bubble“ sollten zunächst tragende, doppelt gekrümmte Glasscheiben zum Einsatz gelangen, die aus Kostengründen verworfen wurden. Stattdessen wurden gebogene Acrylglascheiben verwendet, die allerdings nicht tragend ausgeführt wurden, da beim Zusammenbau festgestellt wurde, dass keine glatte Oberfläche erreicht werden konnte. Die Herstellung der Scheiben erfolgte auf einzeln mit CNC-Maschinen zugeschnittenen Formen aus Polyurethan. Die ebenen Acrylglascheiben wurden erhitzt und auf die vorgefertigten

Negativformen aufgebracht [Schmal 2004].



Abb. 5.26 Untersicht der geschwungenen Decke im Ort der Information des Denkmals für die Ermordeten Juden in Europa.

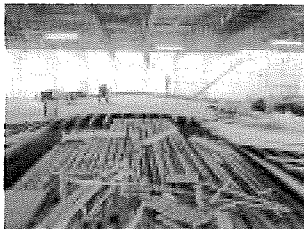


Abb. 5.27 Für die Decke wurden maschinell zugeschnittene Schalungsträger mit Brettern belegt.

Stahlbeton

In der Stahlbetonbauweise finden stabartige und flächige Bauteile gleichermaßen Anwendung. Als sprödes Material ist der Beton für die oben beschriebenen Biegeverfahren ungeeignet. Vielmehr wird er während des Herstellungsprozesses, wie auch der flächige, faserverstärkte Kunststoff, in noch weichem Zustand geformt, indem er in Schablonen, d.h. die zuvor angefertigte Schalung, eingebracht wird. Für die Formgebung der Betonkonstruktionen sind dementsprechend auch die Methoden der Formgebung von den verwendeten Schalungsmaterialien wie Holz, Stahl und Kunststoff relevant.

Traditionell wird für den Schalungsbau Holz eingesetzt. Auf eine der Form folgenden Unterkonstruktion werden schmale Schalbretter befestigt, die die gerade oder gekrümmte Kontur des geplanten Tragwerks als Negativform wiedergeben. Durch die direkte Datenübertragung bei der maschinellen Herstellung könne heute auch komplexe Geometrien sehr genau umgesetzt werden.

Im Projekt Denkmal für die ermordeten Juden Europas in Berlin von Eisenman Architekten mit Büro Happold beispielsweise wurden für den unterirdischen Ort der Information, dessen Deckenfläche der geschwungenen Form des Stelenfeldes folgt, die Decken in Stahlbeton mit bis zu 80 cm Dicke als Plattenbalkendecke mit sich kreuzenden Unterzügen ausgeführt, wobei die Hohlräume oder Kassetten den Grundriss der oberirdisch stehenden Stelen im Innenraum abbilden. Die Deckenkonstruktion wurde auf einer Holzschalung mit aufgesetzten, aus Holz gefertigten Hohlkörpern als Negativform für die Kassetten gegossen. Die Krümmung der Holzschalung wurde mit Hauptträgern aus Holz hergestellt, die gemäß der im Computer festgelegten Geometrie der Deckenunterkante ausgeschnitten wurden. Darauf wurden weitere Lagen verlegt, die mit einer wenige Millimeter dünnen Beschichtung bestrichen

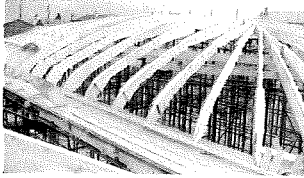


Abb. 5.28 Die Fabrikhalle Eschmann AG von Isler, deren Unterkonstruktion aus Holzbohlen entsprechend der Kontur der Fläche geschnitten wurde.

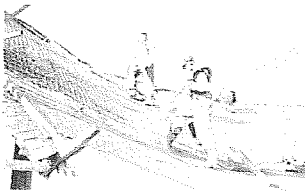


Abb. 5.29 Die aus dem Tunnelbau stammende Spritzbetonbauweise wurde beim Schalenbau häufig angewandt.

wurden, um auch an den Plattenübergängen eine glatte Deckenunterseite des Betons zu erhalten. Die Bewehrung der Plattenbalken wurde nicht im Werk vorgebogen, um der Kontur der Deckenunterkante zu folgen. Vielmehr wurden möglichst kleine Bewehrungsquerschnitte verwendet, so dass diese sich aufgrund ihrer geringen Steifigkeit der Schalungsform vor Ort anpassen. Diese Methode wurde aus wirtschaftlichen Gründen, aber auch wegen ihrer Robustheit in der Ausführungsqualität aufgrund der sehr unregelmäßigen Krümmungen gewählt.

Diese Vorgehensweise stellt eine sehr genaue Ausführung der komplexen Geometrie bei hoher Oberflächenqualität sicher, ist allerdings sehr aufwändig und erfordert einen großen Anteil von Handarbeit.

Wegen der hohen Anforderungen an Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit und vor allem wegen der hohen Lohnkosten sind neue Methoden der Formherstellung mit Schalungssystemen eingeführt worden. Aufgrund des hohen Schalungsdrucks von Frischbeton ist der Entwurf der Schalung nicht nur von ästhetischer sondern auch besonders von statischer Relevanz. Geformte Einsätze aus Holz, Metall oder Kunststoff wie GFK oder Hartschaum in großflächigen, dem hohen Druck widerstehenden Schalungen, wie es beispielsweise bereits beim Bau von Kassettendecken praktiziert wird, stellen eine Möglichkeit dar, auch komplexe Formen herzustellen. Dabei ist zu beachten, dass die gekrümmte Bewehrung nicht nur maßgenau verlegt werden muss, sondern dass sie in der Zugzone auch ihre statischen Aufgaben erfüllen können muss, wenn die Zugkraft zu einer Streckung der gekrümmten Bewehrungsform führt.

Heinz Isler entwarf Schalen als geometrisch komplexe Pneu-, Hänge- oder Fließform. Für diese Schalen waren ebenfalls genau zugeschnittene Unterkonstruktionen aus gekrümmten Holzbindern erforderlich, die er nach den Abmessungen des Modells durch maßstäbliche Übertragung der Kurvenform aus hochkant stehenden Brettern ausschneiden ließ. Darauf wurde eine Brettchenschalung aufgebracht und diese mit Dämmstoffplatten belegt. Die Außenseite der Schalen von Isler blieb unbeschichtet. Die Unterkonstruktionen aus Holz wurden als Einzelstücke

hergestellt, konnten allerdings zum Bau gleicher Schalen mehrfach eingesetzt werden. Die Form der Holzträger wurde durch Ausschneiden erlangt, nicht durch Biegen. Die Nachteile dieses Vorgehens, d.h. Anfälligkeit gegen Feuchte und eingeschränkte Tragfähigkeit des Holzes wegen angeschnittener Fasern sind aufgrund der kurzzeitigen Nutzung vertretbar und ermöglichen einen geringeren Arbeitsaufwand.

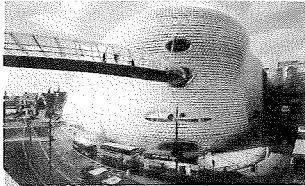


Abb. 5.30 Das Kaufhaus Selfridges in Birmingham.

Denkbar sind auch gekrümmte Schalbretter, die aber bei nicht abwickelbaren Flächen nur begrenzt einsetzbar sind. Die Eigenschaft gekrümmter Regelflächen, aus geraden Linien hergestellt werden zu können, kann auch für die Herstellung der Schalung genutzt werden. Komplexere Formen müssen, wie dies entsprechend beim Zuschnitt der textilen Baustoffe durchgeführt wird, mit einem hohen Arbeitsaufwand aus kleinteiligen Schalbrettern hergestellt werden.

Eine weitere Methode ist die Spritzbetonbauweise, bei der auf ein enges Netz, welches der Form des geplanten Tragwerks folgt, Beton aufgespritzt wird. Diese Bauweise, die aus dem Tunnelbau stammt, wurde auch im Schalenbau eingesetzt, um Geometrien zu verwirklichen, die eine aufwändige Schalung erfordert hätten. Auch pneumatische Schalungen sind für diese Anwendung möglich.

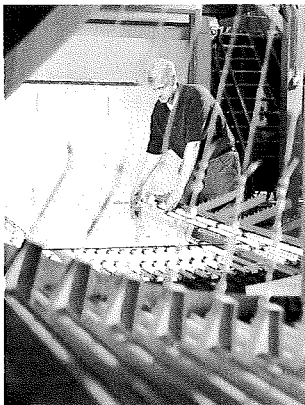


Abb. 5.31 Prozess des Glasbiegens im Werk.

Das Kaufhaus Selfridges in Birmingham wurde von Future Systems mit ARUP entworfen. Als Tragwerk eignete sich eine Stahlkonstruktion mit geschweißten Trägern, die im Verbund mit 15 cm dicken Stahlbetondecken bis zu 16 m weit spannen. An den Rändern wird die gekrümmte Fassade durch Auskragungen bis zu 4,5 m abgebildet, an der die vor Ort erstellten Betonfassadenstreifen geschossweise angehängt sind. Die gekrümmte Fassade ist aus Spritzbeton auf einem engmaschigen Netz aus Streckmetall hergestellt. Hierfür wurde das Metallnetz geformt, durch ein verstellbares Gerüstsystem fixiert und mit der statisch erforderlichen Bewehrung versehen. Der 17,5 cm dicke Spritzbeton trägt sich selbst und leitet die Windlasten in die Geschossdecken ab. Die äußere Schicht wurde aus einem Beton mit kleinen Zuschlägen hergestellt und mit der Hand geglättet, damit die verwendete Flüssigabdichtung direkt auf eine glatte Oberfläche

aufgetragen werden kann. Es folgten die Dämmung und eine Schicht glasfaserverstärkter Putz, darauf aufgesprüht eine äußere, blau eingefärbte Abdichtung. Die paillettenartige Struktur der Oberfläche ist mit Aluminiumtellern erzeugt [Clark 2005].



Abb. 5.32 Gebogenes Glas für das Treppenhaus des Deutschen Historischen Museums von I.M. Pei.

Der Stahlbeton-Fertigteilebau ist ebenso wie der Ortbetonbau abhängig von der Herstellung der Formen. Aufgrund der werkseitigen Produktion der Teile sind diese üblicherweise von einer Größe, die einen Transport auf der Straße zulassen. Zudem wird eine große Genauigkeit der Abmessungen sowie eine möglichst häufige Wiederverwendbarkeit der Formen verlangt. Bei Verwendung neuer Technologien entsprechend der Verfahren bei der Herstellung komplexer Formen mit Kunststoffen werden Schalungen aus Hartschaum eingesetzt. Im Gegensatz zu Stahlschalungen lassen sich diese mit CNC-Fräsen bearbeiten und ermöglichen sehr genau hergestellte, komplexe Oberflächen.

Glas

Glas ist ein kristallines, isotropes Material, welches sehr spröde ist und im kalten Zustand nicht maßgeblich verformt werden kann, auch wenn bei sehr großen Biegeradien auch schon kalt gebogene, elastisch verformte Gläser möglich sind. Glas kann nur unter Hitzeeinwirkung plastisch verformt werden.



Abb. 5.33 In dieser Form aus Holz werden Glasformen hergestellt.

Es bestehen zwei Biegeverfahren, das Tiefziehverfahren und das Gravitations-Hänge-Biegeverfahren. Beim Tiefziehverfahren wird die Glasscheibe auf eine Stahlblechform aufgelegt und beide zusammen im Ofen erhitzt, bis das Glas weich wird und sich der Form anpasst. Hierbei müssen vor allem Verunreinigungen des Glases vermieden werden. Herstellbar sind bei diesem Verfahren Einfachglas, aber auch Einscheibensicherheitsglas, Verbundgläser und Isolierglas. Das Gravitations-Hänge-Biegeverfahren wird in der Autoindustrie für Windschutzscheiben angewendet. Die Glasscheibe wird horizontal an den Rändern aufgehängt und an mehreren Punkten unterschiedlich hoch

erhitzt. Es eignet sich für die Herstellung doppelt gekrümmter Geometrien und wird bis zu einem minimalen Biegeradius von 2 m angewandt. Im Tiefziehverfahren sind Radien von minimal 10 cm möglich.

Für das Biegen von Glas sind generell Kreisbogenformen am günstigsten, weil bei der Herstellung unterschiedlicher Radien eine unerwünschte Variation der Glasdicke auftreten kann. Bei zu kleinen Biegeradien treten zudem optische Verzerrungen im Glas auf. Einfach gebogene Scheiben mit zylindrischer oder konischer Geometrie sind einfacher herstellbar als doppelt gekrümmte Formen. Aus wirtschaftlichen Gründen wird Glas meist als ebene Fläche eingesetzt, wodurch bei komplexen Formen, die nicht durch eine Translationsfläche angenähert werden können, Dreiecksnetze Anwendung finden.



Abb. 5.34 Eladio Dieste stellte gekrümmte Formen aus Mauerwerk her.

Die ursprüngliche Methode der Herstellung durch Glasblasen führte dazu, dass Glas zunächst nur gekrümmt hergestellt wurde. Noch heute besteht die Möglichkeit der Herstellung in Formen mit nahezu beliebiger Geometrie.

Mauerwerk

Mauerwerk ist aus vielen kleinformatischen Einzelementen zusammengesetzt, woraus folgt, dass eine Krümmung mit diesem Baustoff nicht durch eine Verformung des Materials selbst hergestellt wird, sondern durch die Anordnung der Mauersteine zueinander. Die Krümmung kann in jeder denkbaren Geometrie ausgeführt werden, solange das Mauerwerk nicht Zugbeanspruchungen ausgesetzt ist.

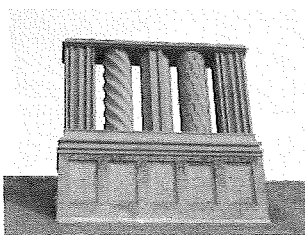


Abb. 3.35 Auch geformte Steine können eingesetzt werden, hier am Cecilienhof in Potsdam.

Der Ingenieur Eladio Dieste baute in Uruguay eine Vielzahl von Gebäuden mit gekrümmten Flächenelementen aus Mauerwerk. Die mathematisch oder physikalisch definierten Formen entstanden aus der Suche nach Effizienz in Konstruktion und Ausführung beim Einsatz eines traditionellen Materials. Die Tragfähigkeit des Mauerwerks gewährleistete Dieste durch eine Bewehrung in den Fugen. Aus dieser Anordnung ergibt sich die für Mauerwerk unübliche Oberfläche mit durchgehendem Fugenbild.

An der ETH Zürich fand eine Untersuchung neuer

Produktionsmöglichkeiten von Mauerwerk mit Hilfe eines programmierten Industrieroboters statt [Gramazio 2006]. Die Programmierung sollte eine Mauerwerkswand mit einer Länge von 3 m und einer Höhe von 2 m ergeben, bei der Anforderungen an Aufbau, Standfestigkeit und Verbundwirkung des Mauerwerks berücksichtigt werden sollten. Durch die Anordnung und Verdrehung der einzelnen Mauersteine ergaben sich verschiedenartig geschwungene und gewölbte Wände mit einer eigenen, dynamischen Formensprache.

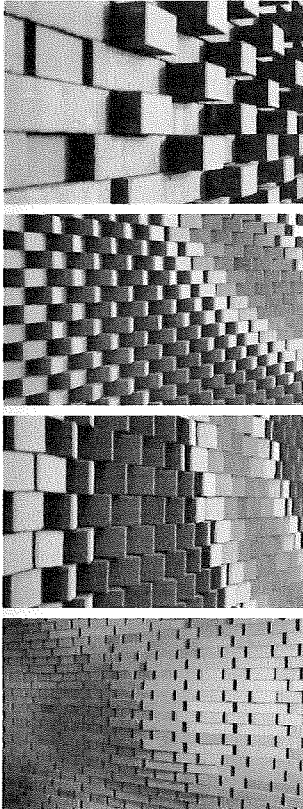


Abb. 5.36 Die Versuche an der ETH Zürich zeigen verschiedene Ergebnisse der Formbildung mit Mauerwerk.

Wenn das Mauerwerk in Handarbeit ausgeführt wird, ist für die maßgenaue Herstellung der geplanten Form eine Lehre aus Holz oder Stahl erforderlich. Der Einsatz von Robotern für solche Arbeiten ist in Deutschland auf der Baustelle noch keine gängige Praxis.

Die Aufstellung der Methoden für die Herstellung der Krümmung von verschiedenen Baustoffen zeigt, dass für alle Materialien maschinelle Verfahren eingesetzt werden können. Dies gilt auch für den Stahlbeton, der von der Herstellung der Schalung abhängt. Durch die Möglichkeit der Anwendung einer digitalen Datenübertragung sind daher alle aufgeführten Baustoffe unter Beachtung der Begrenzung der Biegeradien für die Herstellung komplex gekrümmter Formen geeignet.

Während Metall, Glas und Kunststoff ausschließlich im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle gefügt werden, lassen sich Holz, Mauerwerk und Stahlbeton zusätzlich in Handarbeit auf der Baustelle zu den vorgegebenen Formen verarbeiten.

Die bisher beschriebenen Konstruktionen entsprechen einem Grundrepertoire, welches dem traditionellen Bauen entstammt und auf die neuen komplexen Formen angewendet wird. Daneben existieren Bauweisen, mit denen die Form nicht stückweise zusammengesetzt, sondern auf der Baustelle durch Deformation von Materialien oder von kinematischen Konstruktionen hergestellt wird.

5.2 Flexible Konstruktionen

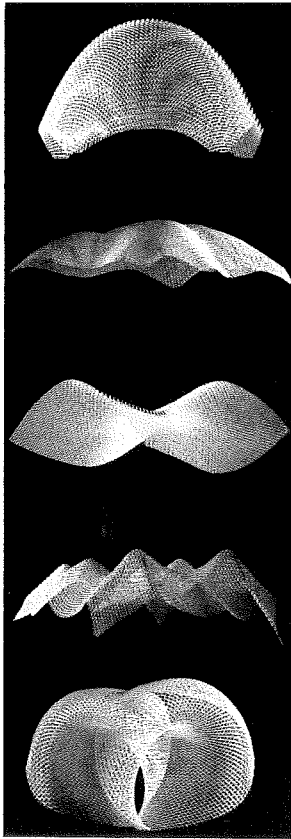


Abb. 5.37 Verschiedene aus flexiblen Gittern herstellbare Formen nach Frei Otto.

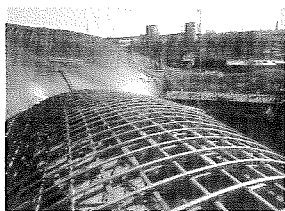


Abb. 5.38 Die Gitterstruktur der Multihalle in Mannheim.

Der Architekt nutzt beim Entwurf am Computer zunehmend die Möglichkeit der Animation, Linien, Flächen und Körper beliebig zu verformen oder auch Wachstumsprozesse im Rechner zu programmieren und zu simulieren. Solche Prozesse, auch „morphing“ oder „emergence“ genannt, zeigen sich auf dem Bildschirm als dynamische, flexible, bewegliche Bilder. Die Formentstehung auf der Baustelle hingegen erfolgt üblicherweise durch das stückweise Zusammensetzen einzelner Teile zum Gesamtbauwerk, egal ob geometrische, physikalische oder freie Formen gebaut werden. Friedrich Kiesler schrieb dazu: „Bauen in der Natur heißt Wachsen. Bauen des Menschen ist ein Hinzufügen. Die Natur baut durch Teilung und Vervielfältigung. Der Mensch baut durch Addition. Der Mensch verbindet durch Nieten, Schweißen, Sperren, Leimen und Nähen. Seine Bindeglieder sind künstlich. Sein Gebäude ist die Summe von Einzelteilen;“ [Rothkirch 2000, 10]. In diesem Sinne entspricht der Bauprozess heute zumeist dem von vor tausend Jahren, obwohl die Entwurfsprozesse in einer Änderung begriffen sind. Mark Goulthorpe bemerkt, „Wir bewegen uns von der Collage zum Morphing“ (We're moving from collage to morphing“) [Goulthorpe 2004, 37] und spricht hier vom Entwurfsprozess des Architekten, der sich die neuen Visualisierungs- und Generierungsmethoden aneignet, um seinen Ideenspielraum zu erweitern.

Das collagenartige Fügen der Elemente ist bei der Ausführung von komplex geformten Flächen nicht die einzig mögliche Bauweise. Die Verwendung „deformierbarer Flächen“, d.h. die Methode des Verformens einer zuvor definierten Fläche auf der Baustelle wird heute nur in Ausnahmefällen angewandt. Dabei sind drei verschiedene Ansätze zu beobachten.

Das **flexible Gitter** besteht aus einem Scherengitter orthogonal zueinander verlegter Stäbe, die eben aufeinander gelegt werden, so dass die jeweils durchlaufenden Stäbe Vierecksmaschen bilden. Deren Knoten sind in der Ebene verdrehbar, weshalb Dehnungen und Stauchungen in der Netzebene aufgrund der Verformung der Maschen möglich sind. Als

Stäbe werden flexible Elemente verwendet, die einer Krümmung der Fläche ohne Beschädigung folgen können. Das Netz wird auf der Baustelle bereichsweise angehoben bzw. abgesenkt, um die gewünschte Gebäudegeometrie zu erreichen [Roland 1965]. So können nahezu beliebig geformte Hüllflächen erstellt werden [Heinle 1996], die allerdings gegebenenfalls durch eine Stützkonstruktion getragen werden müssen.

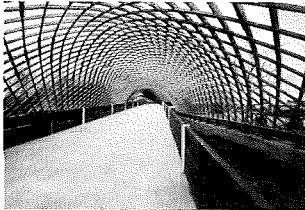


Abb. 5.39 Das Gitternetz mit Viereckmaschen während der Bauphase.

Zwei Gebäude, die in dieser Bauweise entstanden, wurden von Frei Otto betreut. Die Multihalle in Mannheim von Carlfried Mutschler mit Otto und den Ingenieuren von Arup wurde 1975 errichtet. Die Form auf einem sehr unregelmäßigen Grundriss ermittelten die Planer durch ein Hängemodell. Das Netz mit einer Maschenweite von 50cm besteht aus schmalen, durchlaufenden Holzlatten, die durch eine Bolzenverbindung miteinander verbunden sind. Diese war im Bauzustand noch verdrehbar und wurde nach Aufrichten des Gitternetzes in seiner endgültigen Form fixiert. Eine zusätzliche Aussteifung der Fläche stellen Diagonalseile sicher, die im Abstand von 3m über die Schale gespannt sind. In einzelnen Bereichen großer Spannweite und schwacher Krümmung wurden die Holzlatten aufgedoppelt. Die Verwendung der Holzlatten birgt – im Gegensatz zu Metall oder Kunststoff – den Vorteil, dass die bei der Krümmung entstehenden Biegespannungen durch Kriechen des Materials größtenteils abgebaut werden können und so nicht mit den Spannungen aus Eigengewicht und Nutzlast überlagert werden müssen. Eine transluzente anthrazitfarbene Kunststoffhaut bildet den Wetterschutz der Halle [Heinle 1996].

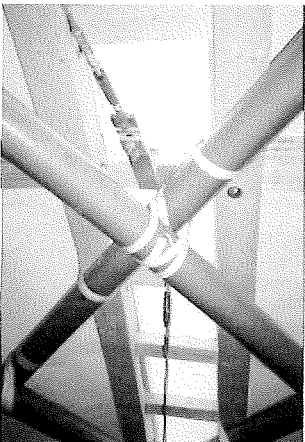


Abb. 5.40 Die Knoten des Japanischen Pavillons in Hannover.

Das zweite Projekt, der Japanische Pavillon für die EXPO 2000 in Hannover von Shigeru Ban mit Otto und Büro Happold, wies als Gitternetzschale eine Spannweite von bis zu 42 m auf. Die Gebäudeform mit drei Buckeln wurde ebenfalls über Modellversuche gefunden, wobei die Buckel unter anderem eingeführt wurden, um über die doppelte Krümmung eine größere Steifigkeit der Fläche zu erreichen. Wie schon bei der Multihalle Mannheim wurden biegsame Stäbe, in diesem Fall Papprollen mit einem Durchmesser von 120 mm und mit bis zu 68 m Länge, in zwei Ebenen kreuzweise übereinander gelegt, so dass sie ein Netz mit Viereckmaschen von 1m Maschenweite bildeten. Das Netz

wurde an definierten Punkten angehoben und an den Rändern abgesenkt. Die Streckung und Stauchung der Fläche innerhalb ihrer Ebene kann aufgrund der kinematischen Viereckmaschen spannungsfrei erfolgen. Die durch die Krümmung entstehende Spannung in den Papprohren baut sich wie auch beim Holz durch Kriechen nach kurzer Zeit ab. Da das Kriechverhalten des Papiers höher war, als nach ersten Versuchen ermittelt, war die Hüllfläche aus Papierrollen allein nicht in der Lage, die anfallenden Lasten in den Baugrund abzutragen. Nach Herstellung der geplanten Form wurden daher zur Unterstützung mit Seilen verspannte Holzbögen auf dem Netz befestigt. Die geplante biegegesteife Verbindung der Knoten war aufgrund der tragenden Holzbögen nicht mehr erforderlich, so dass die Knoten nur mit Schlaufen fixiert wurden und verdrehbar blieben. Als raumabschließendes Material wurde eine PVC-beschichtete Papiermembran aufgebracht [Lyall 2002, Herwig 2003].

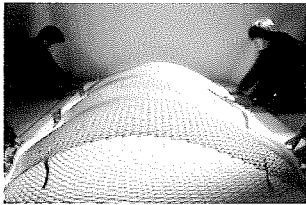


Abb. 5.41 Das Gitternetz des Modells für den Japanischen Pavillon wurde wie auch das Gebäude selbst eben hergestellt und dann verformt.

Bei diesen beiden Gebäuden wurde bei der Formfindung eine Geometrie gewählt, die zu einem Lastabtrag hauptsächlich über Normalkräfte (Schalentragverhalten) führt, so dass die Biegebeanspruchung in den Elementen minimiert ist. Dies ist aufgrund der Biegsamkeit der Stäbe sinnvoll und auch notwendig, um zu große Verformungen bis hin zum Versagen auszuschließen. Grundsätzlich haben alle gekrümmten Flächen ein in dieser Hinsicht günstiges Tragverhalten. Bei Formen ohne physikalisches Bildungsprinzip treten aber häufig auch bei gekrümmten Flächen in Bereichen mit geringer Krümmung oder un stetiger Geometrie große Biegemomente auf. Diese Gitternetze eignen sich als deformierbare Flächen somit zwar zur Herstellung einer großen Variation von Formen, allerdings müssen größere Biegebeanspruchungen vermieden oder die Tragfähigkeit bereichsweise erhöht werden. Dies erfolgte bei der Multihalle durch ein Aufdoppeln der Stäbe, beim Japanischen Pavillon durch eine tragende Unterkonstruktion. Zudem muss eine Hüllfläche über dem Gitternetz angeordnet werden, die wiederum aus einzelnen Teilen besteht. Sie kann daher nur begrenzt als fertige „deformierbare“ Fläche angesehen werden, da sie die Hinzufügung weiterer Trag- und Hüllelemente erfordert.

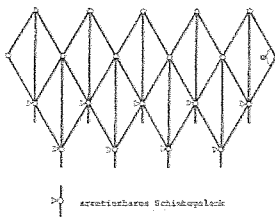


Abb. 5.42 Ebene Faltung eines regulären Rhomboiden Netzes.

Die **faltbare Struktur** verändert ihre Form nicht durch die Biegsamkeit der

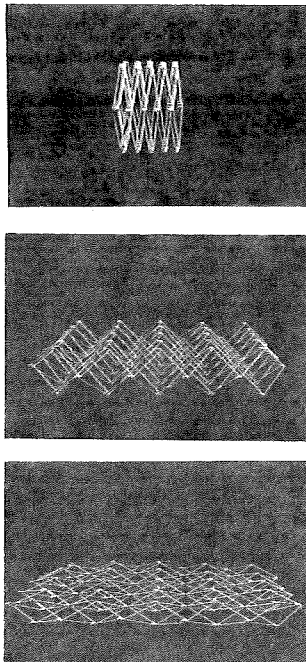


Abb. 5.43 Räumlicher
Faltvorgang.

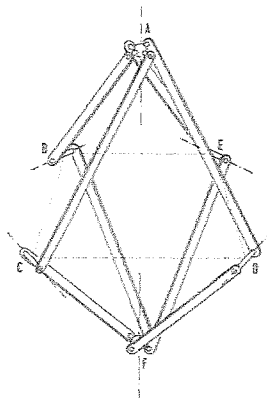


Abb. 5.44 Faltbarer räumlicher
Rombus.

Stäbe, sondern allein über die Kinematik der gelenkigen Verbindungen – punktuell bei Stabelementen oder linear bei Flächenelementen – und durch die genaue geometrische Festlegung eines Bewegungsalgorithmus.

Faltbare Stabsysteme entstehen durch gelenkig verbundene Einzelstäbe, die Maschen bilden. Im System müssen durch Vierecksmaschen oder durch Verschiebungsmöglichkeiten an einzelnen Knoten genügend Freiheitsgrade – Verdrehungs- oder Verschiebungsmöglichkeiten – eingebaut werden, so dass die Maschen sich verformen können. Das Fixieren der Form erfolgt über das Behindern der Verschiebung entweder an den Knoten selbst oder durch zusätzliche Stäbe, die das System triangulieren. Faltbare Strukturen finden insbesondere für temporäre Bauwerke Verwendung, aber auch für solche, die als Ganzes transportiert und möglichst schnell aufgebaut werden sollen. Da keine aufwändige Unterkonstruktion erforderlich ist, wurden faltbare Strukturen beispielsweise im Behelfsbrückenbau des Militärs häufig eingesetzt. Die älteste bekannte faltbare Struktur ist der Sonnen- oder Regenschirm, der bereits seit über 1000 Jahren Verwendung findet. Mitte des 20. Jahrhunderts wurden von Frei Otto gemeinsam mit Buro Happold und Bodo Rasch große wandelbare Gestängeschirme entwickelt, die ihren ersten Einsatz auf der Bundesgartenschau in Köln fanden. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für wandelbare Schirmkonstruktionen ist die Überdachung für die Innenhöfe der Moschee in Medina.

Grundlegende Beobachtungen zu Faltvorgängen und ihren geometrischen Voraussetzungen machte Santiago Calatrava, der sich mit den unterschiedlichen Knoten und Fachwerkssystemen im Hinblick auf die Prinzipien der Faltung auseinandersetzt. „Das Fachwerk bildet während der Faltung einen Mechanismus, der aus Stäben und Gelenken besteht, und der sich am Schluss des Faltvorgangs durch Arretieren der gelösten Verbindungen in ein stabiles Gebilde umwandeln lässt“. „Aus der Forderung, dass sich die Teile gegenseitig bewegen sollen, folgt, dass faltbare Fachwerke nicht nur nach statischen und konstruktiven, sondern auch nach kinematischen Gesichtspunkten ausgebildet sein müssen.“ [Calatrava 1981, II-6]. Dabei sind die ebene und die räumliche Faltbarkeit zu unterscheiden. Das einfache Scherengitter führt (da eine Krümmung

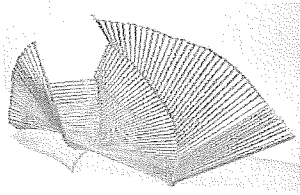


Abb. 5.45 Faltbare
Regelfläche aus einem
Experiment von J.S. Lebedew.

der Stäbe bei dieser Methode ausgeschlossen wird) eine ebene Faltung durch, während z.B. der dreidimensionale Rhombus seine Form auch aus der Ebene heraus ändert. Durch Addition verschiedener Grundkörper sind auch sphärische Fachwerke bildbar.

F. Escrig verwendete diese Bauweise für eine Überdachung von 30 x 60 m Grundfläche [Escrig 1996]. Die Form entsprach zwei aneinander gefügten Kugelausschnitten. Durch Integration einer textilen Dachhaut konnte die komplette Schutzhülle auf einem LKW transportiert und in sehr kurzer Zeit aufgebaut werden. Ein aktuelles Beispiel für die Verwendung von faltbaren Strukturen wurde von Chuck Hoberman mit Buro Happold zur Olympiade in Salt Lake City geplant. Dieses Tragwerk wurde als bewegliche Skulptur zur Eröffnungsveranstaltung aufgefalt.



Abb. 5.46 Faltbare Schirme auf der Biennale von 1998.

Mit faltbaren Strukturen ist eine Simulation des „morphings“ im Computer erreichbar, da die Fläche vor Ort in die gewünschte Form gebracht werden kann und ohne weitere Maßnahmen tragfähig ist. Die Beliebigkeit der Formen ist allerdings durch den streng geometrischen Bewegungsablauf sehr begrenzt. Ist die Form aufgefalt, so ist das

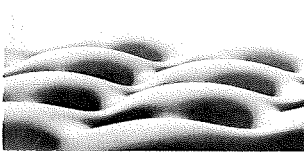


Abb. 5.47 Ein Pneu mit Tiefpunkten kann eine variantenreiche Fläche ergeben.

Tragwerk steif und kann im Gegensatz zu den vergleichsweise weichen flexiblen Gitternetzen bei zweilagiger Ausbildung als Raumfachwerk nicht nur Normalkräfte sondern auch Biegemomente aufnehmen. Ansatzweise kam diese Bauweise beim Bau verschiedener Großkuppeln wie beispielsweise beim 1996 vollendeten Namihaya Dome im Kadoma Sports Centre von Showa Sekkei unter Beratung von M. Kawaguchi zum Einsatz [Kawaguchi 1996]. Eine Hülle ist aufgrund der offenen Fachwerkstruktur, wie auch bei den flexiblen Gitternetzen, hinzuzufügen.

Ein dritter Ansatz für deformierbare Flächen liegt in der Verwendung von **formbarer Schalung**. Hierfür können biegsame Gewebe wie z.B. Textil- oder Drahtgewebe eingesetzt werden, die auf unterschiedliche Weise stabilisiert werden.

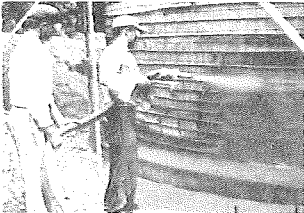


Abb. 5.48 Der Spritzbeton wird lagenweise auf den Pneu aufgebracht.

Die nach Schnittmustern vorgefertigten Pneus werden durch Innendruck gespannt. Anschließend wird die Form mit einem erhärtenden Material wie Beton oder Kunststoff beschichtet. Die so entstandene Schale ist selbsttragend, so dass der Innendruck nicht aufrechterhalten werden muss. In den 1940er Jahren entstanden die ersten auf diese Art hergestellten Gebäude. Wallace Neff baute im Jahr 1942 eine Schale aus Spritzbeton auf pneumatischer Schalung mit 45 m Spannweite. Die Bewehrung bestand aus Stab- oder Mattenstahl, teils auch aus Maschendraht. Sein Verfahren wurde vielfach aufgegriffen und weiterentwickelt. Eine abweichende Methode entwickelte Dante Bini, der den frischen Beton auf eine noch schlaffe Haut aufbrachte und mit einer zweiten bedeckte. Die untere Membran wurde mitsamt dem noch frischen Beton aufgeblasen, anschließend härtete der Beton aus [Sobeck 1987].

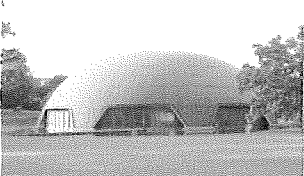


Abb. 5.49 Eine nach dem Prinzip von Dante Bini gebaute Kuppel in Malvern, GB.

Auch Frei Otto beschäftigte sich mit solchen Strukturen, den möglichen Formen und den Konstruktionsweisen der Versteifung [Roland 1965]. Pneus werden als doppelt gekrümmte Fläche, im Allgemeinen als synklastisch geformte Hülle hergestellt, in Einzelfällen ist auch eine antiklastische Krümmung möglich, wie beispielsweise der Torus – in der Praxis als Schwimmring verwendet. In jedem Fall müssen, damit eine Form pneumatisch bildbar ist, zwei Randbedingungen eingehalten werden [Sobek 1987]. Die Erfüllung der Gleichgewichtsbedingungen nur durch

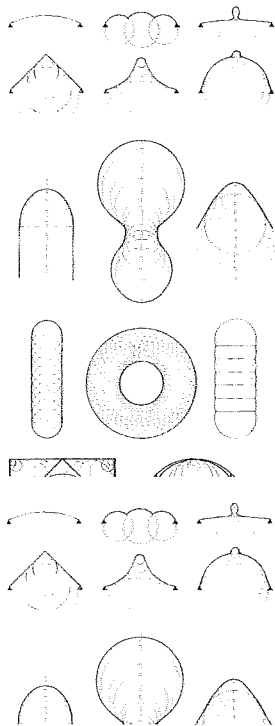


Abb. 5.50 Verschiedene mögliche Formen für Pneus nach Frei Otto.

Membrankräfte muss an jedem Punkt möglich sein, und die Spannung in der Membran muss immer größer Null sein, d.h. es können nur Zugspannungen auftreten. Solche Randbedingungen sind am Realmodell oder im Computer überprüfbar. Alle Formen, in deren Querschnitte Kreise mit konstantem oder variablem Radius einbeschrieben werden können, lassen sich herstellen. Eine antiklasische Krümmung lässt sich mit der Verwendung von Tiefpunkten oder durch lineare innere Verankerungen herstellen, wodurch der Formenreichtum erweitert wird [Roland 1965]. Es müssen geschlossene Formen verwendet werden, damit die Luft nicht entweichen kann. Grundsätzlich sind alle Pneus im aufgeblasenen Zustand physikalische Formen, da die Form direkt mit dem Kraftfluss in der Membran zusammenhängt. Im Endzustand ändern sich aber die Hauptbeanspruchung und das Tragverhalten der erhärteten Schale, so dass auch Biegespannungen auftreten können.

Für die Versteifung von Pneus schlug Otto eine Vielzahl von Verfahren vor, wie beispielsweise das Aufspritzen von Kunststoff oder Beton von innen oder außen, das Aufkleben fester Körper oder die Verwendung von Doppelhäuten, in deren Hohlräumen sich Materialien befinden, die durch chemische oder physikalische Vorgänge steif werden. Die Ausführung einer Versteifung durch aufgespritzte Kunststoffschichten erfolgte bei einem Projekt für die Deutsche Bauausstellung 1962, wo eine Pneukuppel von 8 m Durchmesser hergestellt wurde. Das Kunstharz wurde mit Düsen schichtweise in Ringen aufgespritzt [Roland 1965].

Das Beispiel des D-Towers von NOX zeigt, wie mit Pneus auch irreguläre Formen geschaffen werden können. Der Ballon als reine aufgeblasene Form wurde mit Klebestreifen so manipuliert, dass synklastische wie auch antiklastische Flächenbereiche entstanden. Dies entspricht einer linearen inneren Verankerung durch Seile. Eine entsprechende Ausführung im Maßstab 1:1 wäre ebenso möglich gewesen. Die Ausführung dieser Form erfolgte über den Umweg der Digitalisierung der Form und anschließend einzeln hergestellter und zusammengefügter Elemente. Die Rippen zwischen den Elementen führten zu einer erhöhten Steifigkeit der Konstruktion.

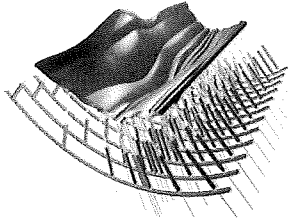


Abb. 5.51 Flexible Schalung
NOX mit Gummimembran...

Ein aktuelles Beispiel aus der Forschung mit formbaren Schalungen ist der Nachbau des Philips Pavillons in Eindhoven, Niederlande. Dabei führten innen durch Luftdruck gestützte Schalungen nicht zu der gewünschten Form. Die einzelnen Schalenabschnitte, die am Original aus zusammen gespannten Fertigteilen hergestellt wurden (Kapitel 2) sollten bei dem Versuch in Spritzbetonbauweise stattdessen auf einer vorgespannten Membran hergestellt werden. Die geringen Unterschiede in der Form, die sich daraus ergibt, dass die vorgespannte, aber unter dem Druck des Spritzbetons verformbare Membran nicht exakt ein hyperbolisches Paraboloid bildet, sind vernachlässigbar.

In einem ersten Versuch wurde auf eine ebene, vorgespannte Membran 120 mm Spritzbeton aufgebracht. Ein zweiter Versuch sollte die Verformung der Membran unter dem Gewicht des Betons sowie die Möglichkeit von einer Bewehrung der Schale an einer doppelt gekrümmten Membran verdeutlichen. Auch die Adhäsion des Betons an der Schalung war Teil der Untersuchungen.

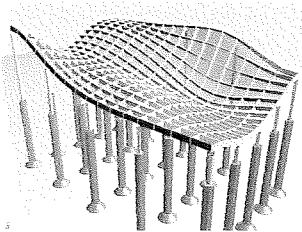


Abb. 5.52 ...und in
Kombination mit einem flexiblen
Gitter.

Das dritte Experiment wurde an einem aus der Geometrie des Pavillons hervorgehenden Element unternommen. Die im Original 18 m hohe Schale wurde im Maßstab 1:2,5 verkleinert und war damit 7 m hoch. Die Membran wurde zwischen zwei geraden und einem gekrümmten Stahlträgern befestigt und kräftig vorgespannt, um Vibrationen und Verformungen beim Betonieren zu minimieren. Das Aufbringen des 70 mm dicken Betons in drei Schichten trug ebenfalls zur Formstabilisierung bei. Statische Berechnungen der Schale am Computer zeigten, dass eine Bewehrung bei den angesetzten Lasten nicht erforderlich war. Zur Begrenzung der Risse wurde ein Drahtgewebe eingebaut. Im Ergebnis zeigte dieses Experiment, dass mit der methode der mechanisch vorgespannten Membran als Schalung weitere Formen im Schalenbau auf kostengünstige Weise hergestellt werden können [Pronk 2006].

Deutlich aufwändiger ist eine von Lars Spuybroek vorgeschlagene formbare Schalung, ebenfalls nicht luftgestützt, die mit justierbaren Kolben in Form gebracht wird. „Variabilität bedarf einer Nicht-Standard-

Herstellungstechnik. Das Haus wird mit individuellen Anforderungen im Internet bestellt und von Robotern hergestellt. Jedes Haus besteht aus Paneelen, die mit einem flexiblen Formsysteem hergestellt werden. Das Formmodell ist wie das Haus selbst: Mehrere Punkte sind durch flexible Linien verbunden, deren Variabilität eingeschränkt ist. Gummibänder sind mit justierbaren Kolben verbunden – wie klassische Splines. Zwischen jeweils zwei Splines befindet sich eine Gummibandfläche, die bis zu einem gewissen Grad durchhängen muss, da die Querschnitte des Hauses von unterschiedlicher Größe sind. Die Hausform kann so direkt über die Computerinformation bestimmt werden, bevor das stabile, warme und wasserfeste Polyurethan hinzukommt.“ [Spuybroek 2004, 124].

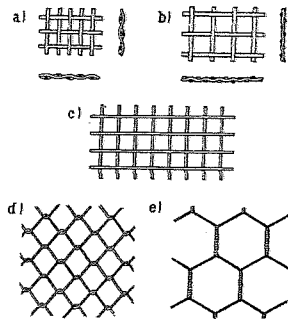


Abb. 5.53 Verschiedene Arten Maschendraht werden für Ferrocement eingesetzt.

Die hier beschriebene Schalung spiegelt den Aufbau der Splines wider, wo von einer polygonalen Grundlinie aus die Kontur der geplanten Form mit einer Gewichtung hergestellt wird. Die Grundlinie wird durch eine äußere Schalung dargestellt, an denen die Kolben befestigt sind. Die Gewichtung entspricht der Kolbenlänge. Es ist eine geometrische Einschränkung, dass die Form sich nur innerhalb der Grenzen der Grundform entwickeln kann. Die schlaffe, auf den Kolben befestigte Gummimembran ergibt eine unregelmäßig gewellte Oberfläche, die der Fläche Steifigkeit verleiht, jedoch nicht zwingend in der Richtung der auftretenden Hauptspannungen, so dass eine Unterkonstruktion erforderlich werden kann. Hier zeigt sich der Vorteil der Pneus als flexible Schalung, die keine geometrischen Begrenzungen aufweisen (lediglich statische Randbedingungen) und bei denen sich aufgrund der doppelten Krümmung der Form ein günstiger Kraftfluss einstellt. Jeder Pneu wird für das jeweilige Projekt angefertigt. Die spontanen Variationsmöglichkeiten der Form sind mit den justierbaren Kolben deutlich größer.

Eine weitere Vorgehensweise ist die Arbeit mit einem flexiblen Netz aus Maschendraht, welches frei tragend oder auf einer geformten Unterkonstruktion vor Ort hergestellt wird. Anschließend wird auf den Draht Mörtel aufgetragen. Unter dem Namen Ferrocement hat dieses Verfahren eine lange Tradition, beginnend mit Pier Luigi Nervi, der den Ferrocement als selbsttragende Schale oder als verlorene Schalung einsetzte. Eines der bekanntesten Beispiele für die Anwendung dieses

Verfahrens als verlorene Schalung ist der kleine Sportpalast in Rom.

Ferrocement ist ein mit Draht bewehrter Mörtel, der sich vom Stahlbeton durch kleinere Zuschläge und größeren Bewehrungsanteil unterscheidet. Er kann sehr dünnwandig, d.h. in 10-20 mm Dicke ausgeführt werden und wird im Bootsbau [Bayer 1982], sowie aufgrund seiner sehr frei wählbaren Form auch in der Bildhauerei vielfältig eingesetzt. Niki de St. Phalle verwendete diesen Werkstoff für ihre Skulpturen.



Abb. 5.54 Eine Skulptur aus Ferrocement von St. Phalle.

Im Gegensatz zur Verwendung von Pneus ist diese flexible „Schalung“ frei formbar. Allerdings muss aufgrund der großen Schlankheit des Materials bei steigender Spannweite eine Unterkonstruktion vorgesehen werden, die aber ebenfalls aus Ferrocement bestehen kann.

Noch weiter wird dieses Prinzip von den flexibel bleibenden Formen, nämlich solchen, die auch in der Nutzungsphase frei beweglich bleiben, getrieben. Die Oberfläche der Hyposurface von Mark Goulthorpe mit dECOi, verändert sich mit dem Umfeld, beispielsweise vorbeilaufenden Personen, oder die Fassade des Curtain House von Shigeru Ban ist als

Vorhang aus Stoffbahnen ausgebildet und bewegt sich im Wind. Diese Beispiele sind als experimentell anzusehen und werden daher hier nicht näher betrachtet.

Alle drei Methoden, die flexiblen Netze, die faltbaren Strukturen und die formbaren Schalungen, haben eine lange Tradition und sind von jeher in der Entwurfsfreiheit begrenzt. Mit leistungsfähigeren Materialien und damit einer Erweiterung des möglichen Formenspektrums ist eine Revitalisierung dieser Methoden denkbar.

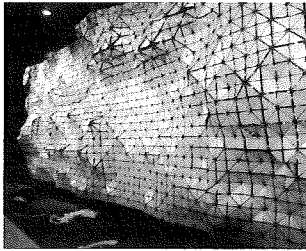


Abb. 5.55 Die Hyposurface
von dECOi.

5.3 Die Herstellung der komplexen Form – Aktuelle Fallstudien

Die beschriebenen Vorgehensweisen zur Formgebung der Baustoffe finden in der Praxis Anwendung, um komplex gekrümmte und polygonale Flächen herzustellen. Folgende Beispiele gebauter Projekte der letzten Jahre zeigen, wie die unterschiedlichen Bauweisen eingesetzt werden.

Bei allen Bauprojekten gibt es eine Vielzahl von Planungs- und Ausführungsbeteiligten. Im Rahmen dieser Arbeit können diese nicht einzeln genannt werden, sondern lediglich stellvertretend die Architekten und Ingenieure, die für den Entwurf oder die Ausführung verantwortlich zeichnen. Auch wenn die Ausführung eines jeden Projektes stark von der ausführenden Firma und ihrem Spezialwissen sowie von deren wirtschaftlichen Erwägungen geprägt ist, gibt der Architekt mit dem Tragwerksplaner grundsätzlich eine Bauart vor.

5.3.1 Beispiele aus dem Massivbau

Der neue Zollhof in Düsseldorf, 1999



Abb. 5.56 Ansicht Der drei Gebäudekomplexe am Hafen in Düsseldorf.

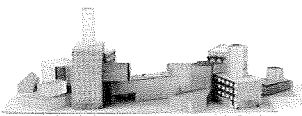
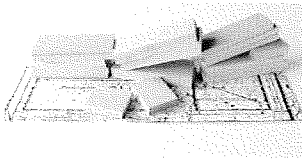


Abb. 5.56 Die Form des Ensembles entstand im Modell.

Der Neue Zollhof in Düsseldorf von Frank O. Gehry mit den Architekten Beucker Maschlanka und dem Technischen Büro der Philipp Holzmann AG besteht aus drei unterschiedlichen und räumlich getrennten Komplexen, den Häusern A, B und C, die um eine Plaza herum gruppiert sind. Die Form der Gebäude wurde von Gehry im Realmodell entwickelt und durch Scannen in den Computer übertragen, von wo aus die geometrischen Daten zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen.

Die Gebäude mit einer Höhe bis zu 55 m und einem gemeinsamen Untergeschoss unterhalb der Plaza weisen sowohl in ihrer Oberflächenerscheinung als auch konstruktiv deutliche Unterschiede auf. Das Haus A hat eine rote Klinkerfassade, das Haus B ist mit einer glänzenden Edelstahlhaut versehen und das Haus C weiß verputzt. Bemerkenswert ist, dass auch drei unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Herstellung der Gebäudeformen gewählt wurden.

Die Abwicklung der Fassade des Hauses A besteht aus ebenen, polygonal aneinander gesetzten Flächen mit bis zu $6,5^\circ$ Neigung in der

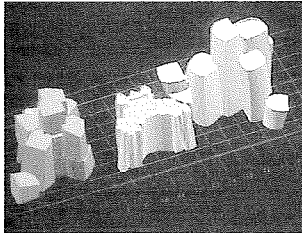


Abb. 5.57 Das Modell wurde dreidimensional eingescannt und weiter bearbeitet.

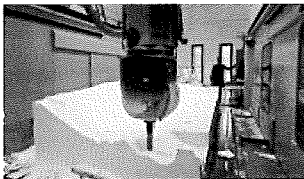


Abb. 5.58 Mit CNC-gesteuerten Fräsen wurde die Negativform aus Styroporblöcken ausgeschnitten.

Vertikalen. Dementsprechend konnte eine relativ konventionelle Konstruktionsweise eingesetzt werden. Das Tragwerk besteht aus Flachdecken auf ebenen, tragenden Stahlbeton-Fertigteilen, in einzelnen Bereichen an Fassadenversprüngen waren Ortbetonwände mit einbetonierten Stahlträgern zur Abfangung von Lasten erforderlich. Trotz der ebenen Flächen waren fast alle Fertigteile Unikate, so dass die digitale Übertragung der Geometrie direkt aus der Planung eine zweckmäßige Erleichterung darstellte. Die Stahlbetonkonstruktion ist mit einer vorgesetzten, hinterlüfteten Klinkerfassade verkleidet. Das Mauerwerk, dessen Fugen nicht sichtbar in den einspringenden Ecken angeordnet sind, ist teilweise bewehrt. Die einzelnen Mauersteine mussten an Ecken und Knicken zurechtgeschnitten werden.

Im Gegensatz zum Haus A wurden für die Fassaden der Häuser B und C, deren Grundrissform unregelmäßig gekrümmt ist, nicht tragende Fassaden eingesetzt, die an einer tragenden Konstruktion von Flachdecken auf Stahlbetonstützen befestigt sind.

Am Haus B kamen als Fassadenelemente Stahlbetonfertigteile zur Anwendung, deren Form ebenfalls direkt aus den Computerdaten gewonnen wurde. Mit CNC-Fräsen wurden die Schalfornen aus Polystyrolblöcken computergesteuert gefräst. Mit dieser Methode konnten die Stahlbetonfertigteile mit nur geringfügigen Maßabweichungen hergestellt und vor Ort mit Hilfe von Vermessungspunkten in jedem Geschoss sehr genau eingebaut werden. Auf den Fertigteilwänden ist eine Wärmedämmung befestigt, darauf eine Verkleidung aus Edelstahlblech. Diese Blechelemente von 50 x 100 cm Größe und 0,4 mm Dicke mussten einzeln nach den CAD-Daten angefertigt werden. Die unregelmäßige Krümmung erforderte ein genaues Schnittmuster für die Bleche, um die gewünschte vertikale und horizontale Fugenanordnung verwirklichen zu können [Schmal 2001]. Das Dach des Hauses B ist keine Ebene sondern besteht aus mehreren unterschiedlich geneigten Einzelflächen mit Knicken und Versprüngen. Diese wurde vor Ort geschalt und betoniert.

Die ebenfalls nicht tragende Fassade des Hauses C ist mit individuell



Abb. 5.59 Die Ausfachung aus Mauerwerk für Haus C wurde in einer Stahllehre hergestellt.

nach der aus den Computermodellen gewonnen Geometrie geschnittenen Stahlprofilen hergestellt. Die Stahlprofile, Stahlschwerter aus 10 mm dicken Blechen, wurden rechts und links der Fenster angeordnet und gaben so die Kontur der Fassade vor. Sie dienten als Lehre und Aussteifung für die Ausfachung aus 17,5 m dickem Mauerwerk aus bewehrtem Kalksandstein, welches zwischen die Stahlschwerter gemauert wurde. Durch einen Ausgleichsputz konnte eine glatte, gekrümmte Oberfläche der bis zu 17° geneigten Wände hergestellt werden. Ein Wärmedämmverbundsystem dient als bewitterte Schicht.

An allen drei Gebäuden wurden vorgefertigte, schiefwinklig in den Fassaden angeordnete Fensterboxen eingebaut, deren Geometrie und Einbauposition über digitale Daten bestimmt wurde.

Das Phaeno Science Center, Wolfsburg, 2005

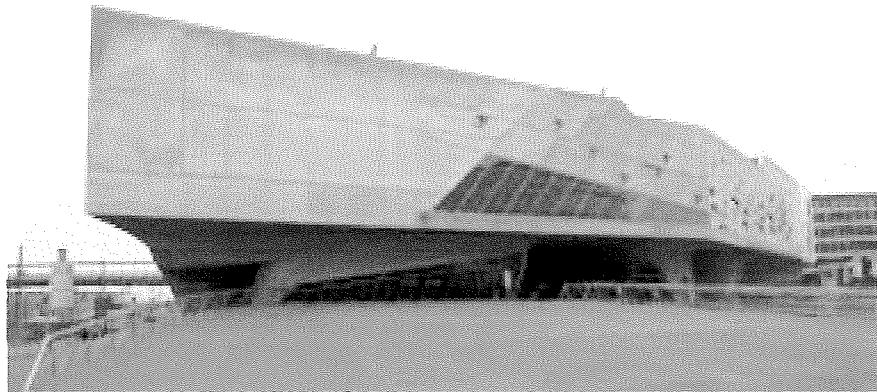


Abb. 5.60 Der Baukörper des Phaeno Science Center aus Stahlbeton.

Das Phaeno Science Center in Wolfsburg von Zaha Hadid mit den Ingenieuren Adams-Kara-Taylor und Tokarz-Frerichs-Leipold wurde 2005 fertig gestellt. Das Gebäude hat zwei bis vier Obergeschosse und ein

Untergeschoss auf einer trapezförmigen Grundfläche von ca. 150 x 100 m bei einer Höhe von 16 m.

Die Form des Gebäudes wurde vom Architekten im Computer entwickelt. Die geometrischen Daten wurden von den Ingenieuren verwendet um daraus die Vorgaben für die Herstellung der Schalung zu erarbeiten.

Das Gebäude steht auf zehn kegelförmigen Betonkernen, den so genannten „Cones“, von denen fünf bis unter das Dach reichen. Das Erdgeschoss ist Teil des Außenraums und als öffentlicher Raum konzipiert. Die Hauptebene darüber ist eine bis zu 90 cm dicke Decke aus Stahlbeton, die sich bereichsweise spaltet und so eine weitere Ebene schafft. Die Lasten von bis zu zwei Geschossen werden von der Hauptebene auf die Cones abgetragen. Die zur Stadt weisende Fassade ist aus großflächigen Stahlbetonfertigteilen mit bis zu 12 m Breite hergestellt. Die Dachkonstruktion des Science Centers besteht aus Stahl-Vierendeelträgern, die auf den fünf durchgehenden Cones auflagern.

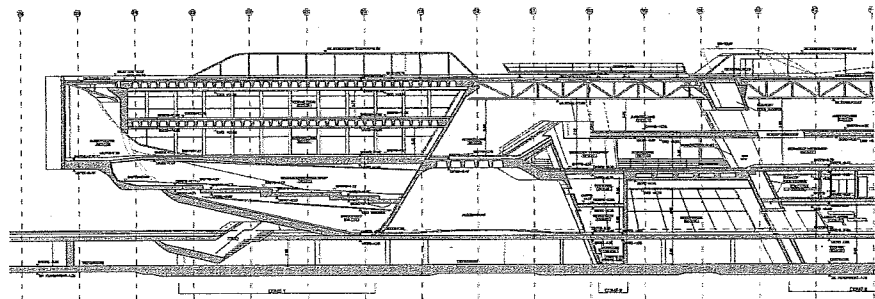


Abb. 5.61 Längsschnitt durch den westlichen Gebäudeteil.

Vor allem die „Cones“ waren als Herausforderung für die Ausführung anzusehen. Diese bestand einerseits in der genauen Herstellung der unregelmäßigen Geometrien dieser Elemente, andererseits in den stark geneigten, hoch bewehrten Wänden und deren fließendem Übergang in die Decken.

Aufgrund der schrägen Flächen, enger Bewehrung und zusätzlichen Einbauteilen und Leitungen in den Conewänden war das Verdichten mit Innenrüttlern bei diesem Projekt nicht möglich, ohne eine Beschädigung der Oberflächen, an die sehr hohe ästhetische Anforderungen gestellt

wurden, zu riskieren. Aus diesem Grund kam selbstverdichtender Beton (SVB), ein sehr fließfähiger Beton mit im Vergleich zum Normalbeton kleinen Zuschlagstoffen, zur Anwendung, da er sich ohne zusätzliches Rütteln im Bauteil gut verteilt. Die Verwendung dieses relativ neuen und noch nicht genormten Baustoffes erforderte einen hohen Grad an Kooperation zwischen allen Planungsbeteiligten. Oberflächen mit geringeren Anforderungen in den Untergeschossbereichen wurden zur Festlegung der gewünschten Qualität eingesetzt.



Abb. 5.62 Einer der Cones des Phaeno Science Center.

Die sichtbare Oberfläche der Konstruktion erforderte eine besondere Genauigkeit in der Ausführung, da Nachbesserungen nicht gewünscht waren. Die Fabrikation der Schalung als traditionelle „Brettchenschalung“ mit 12 cm breiten Latten erfolgte in Abschnitten von etwa 2 m Breite im Werk, um die komplizierte Form genau nach Planung ausbilden zu können. Diese Elemente wurden auf der Baustelle eingemessen und zusammengesetzt. Komplexe Fensterlaibungen mussten von den Zimmermännern vor Ort in Handarbeit ausgeführt werden. Den gerundeten Übergang zur Decke stellte die ausführende Firma mit GFK-Schalkörpern, deren Radius jeweils der vorhandenen Geometrie und der Neigung der Cones angepasst war, in Einzelanfertigung her.

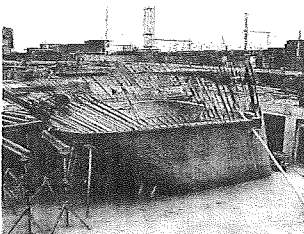


Abb. 5.63 Der ausgeschaltete Cone mit Anfängerbewehrung für den nächsten Bauabschnitt.

Der SVB ermöglichte nicht nur die Herstellung der Cones, sondern auch der bis zu 90 cm dicken und bis zu 22 m weit spannenden Erdgeschossdecke. Zur Gewichtsverringering sind in der Decke rautenförmige Füllkörper eingebaut, so dass eine Kassettendecke gebildet wird. Da einige Kassettenspiegel geschlossen wurden, aber auch aufgrund teils hoch bewehrter Tragelemente war der Einsatz des SVB aufgrund der beengten Platzverhältnisse in der Schalung auch für die Deckenkonstruktion sinnvoll.

Für die Herstellung der komplexen Geometrie beider Projekte kam die Massivbauweise zum Einsatz. Beim Phaeno Science Center wurde den Herausforderungen der ungewöhnlich gekrümmten und schrägen Flächen in Ortbeton durch die Verwendung von SVB begegnet. Die vorgefertigte Schalung erforderte eine händische Ergänzung vor Ort durch

Zimmerleute. Im Unterschied hierzu verwendete das Planungsteam des Zollhofs für die Häuser A und B Fertigteile, deren komplexe Geometrie mit Hilfe der CAD/CAM-Methode sehr genau hergestellt werden konnte. Diese Methode minimiert die aufwändige Handarbeit auf der Baustelle. Für das Haus C hingegen wurde die Kleinteiligkeit des Mauerwerks, welches zwischen Lehren aus Stahl verlegt wurde, zur Verwirklichung der Form genutzt, wodurch sich ein sehr hoher Anteil an Handarbeit ergab.

Man kann davon ausgehen, dass die Übereinstimmung der gebauten Form mit der Planung bei der maschinellen Vorfertigung größer ist als bei der händischen Bearbeitung auf der Baustelle. Während beim Phaeno Science Center die Konstruktion sichtbar ist, wurden beim Projekt Zollhof alle externen Oberflächen verkleidet. Es ist zu hinterfragen, ob nicht in diesem Fall eine weniger genaue Fertigung der Elemente zu einem ästhetisch gleichwertigen Ergebnis geführt hätte.

5.3.2 Beispiele aus dem Stahlbau

The Great Court, British Museum, London, 2000



Abb. 5.64 Blick auf das noch im Bau befindliche Dach in London.

Die Einweihung der Überdachung des Innenhofes vom British Museum in London von Norman Foster und Buro Happold fand im Jahr 2000 statt. Das Dach ist als glasgedeckte Gitterschale aus Stahl mit dreieckigen Maschen konzipiert, die auf den bestehenden Gebäuden aufliegt. Die Geometrie des Hofes mit 92 m Länge und 73 m Breite mit dem nicht exakt mittig stehenden runden „Reading Room“ mit 43 m Durchmesser resultierte in Spannweiten der Konstruktion von 14 bis 40 m.

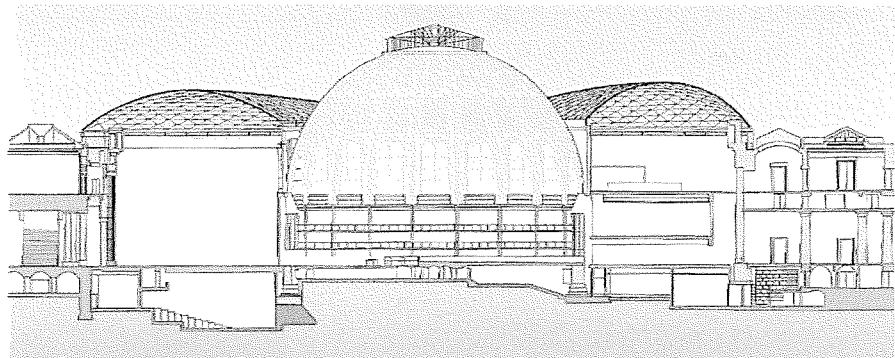


Abb. 5.65 Schnitt durch den Great Court mit Reading Room. Das Dach lagert auf dem bestehenden Gebäude auf.

Bei der Formfindung des Daches musste der unregelmäßige Grundriss, Vorgaben zu minimalen bzw. maximalen Höhen und die Auflagermöglichkeiten auf dem Bestand berücksichtigt werden. Eine vom Architekten anfänglich gedachte Hängeform wurde vom Ingenieur durch die Superposition dreier mathematischer Funktionen so angenähert und optimiert, dass die gegebenen Randbedingungen eingehalten werden konnten. In den Eckbereichen konnte aufgrund der geometrischen Vorgaben keine vollkommen stetige Netzführung erreicht werden.

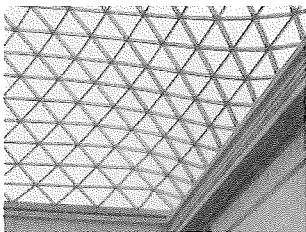


Abb. 5.66 Eckausbildung der Gitterschale.

Die radial und spiralförmig verlaufenden Stahlrippen der Schale bilden ein Dreiecksnetz, auf dem ebene Glasscheiben aufgelegt sind. Zwischen den Knoten sind die Rippen nicht gekrümmt, ihr Querschnitt verjüngt sich jedoch von 200 mm am äußeren Rand auf 80 mm am Reading Room bei einer konstanten Breite von 80 mm. Die Profile mit rechteckigem Querschnitt wurden einzeln aus Blechen zusammengeschweißt. Besonders bei schlanken und gleichsinnig gekrümmten Schalenflächen

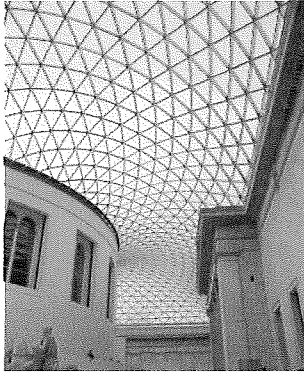


Abb. 5.67 Die Stabdicke des Gitternetzes über dem Great Court des Britischen Museums nimmt von innen nach außen zu.

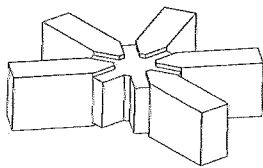


Abb. 5.68 Die Knoten des Netzes über dem Great Court wurden als verschweißte Stimflächenknoten ausgeführt,

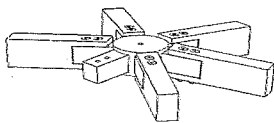


Abb. 5.69 die Knoten der DZ Bank in Berlin hingegen als verschraubte Laschenknoten.

mit geringem Stich kann schon eine geringe Abweichung von der vorgesehenen Geometrie zum Versagen führen. Die genaue Herstellung der komplexen Geometrie wurde daher mit Hilfe speziell entwickelter Knoten sichergestellt, die mit den Stäben durch Schweißen gefügt werden. Das Schneiden der Stabenden und der sternförmigen Knoten erfolgte in einem automatisierten Prozess, so dass die Toleranzen und Winkelsprünge von einem Stab zum nächsten durch die Schweißnaht aufgenommen werden konnten. Ein Zusammenbau größerer Elemente fand im Werk auf Schablonen statt, um die Anzahl der Baustellenschweißungen zu minimieren und die erforderliche Genauigkeit durch die Fügung im Werk garantieren zu können. Die Elemente wurden auf der Baustelle durch Einfügen der restlichen Stäbe zum Gesamttragwerk ergänzt [Cook 2006/2]. Das umgebende Gebäude durfte nur vertikale, keine horizontalen Lasten erhalten. Dies erforderte die Aktivierung einer Schalentragwirkung des Daches, die bei der Formfindung bereits berücksichtigt werden musste. Zur Vermeidung des Baustellenschweißens ist es möglich, die Knotenverbindungen zu schrauben, wie dies an der DZ Bank am Pariser Platz in Berlin von Frank O. Gehry und Schlaich Bergermann und Partner durchgeführt wurde. Beim Dach des Britischen Museums war jedoch aufgrund der Auflagerbedingungen eine Maximierung der Knotensteifigkeit erforderlich. Trotz einer optimierten Krümmung und einer biegesteifen Ausführung der Knoten waren die berechneten Verformungen der Schale aus Eigengewicht noch relativ groß. Die Netzkonstruktion musste daher um bis zu 150 mm überhöht werden, so dass die konstruierte Form der Überdachung von der geplanten Endform abwich. Die Durchbiegung der Decken, auf denen das Gerüst für die Überdachung stand, wurde zusätzlich durch wiederholtes Nachstellen der Gerüststützen ausgeglichen. Diese Randbedingungen der Ausführung mussten bei der Festlegung der Form für die Konstruktion ebenfalls mit eingeplant werden.

Kunsthhaus Graz, 2003

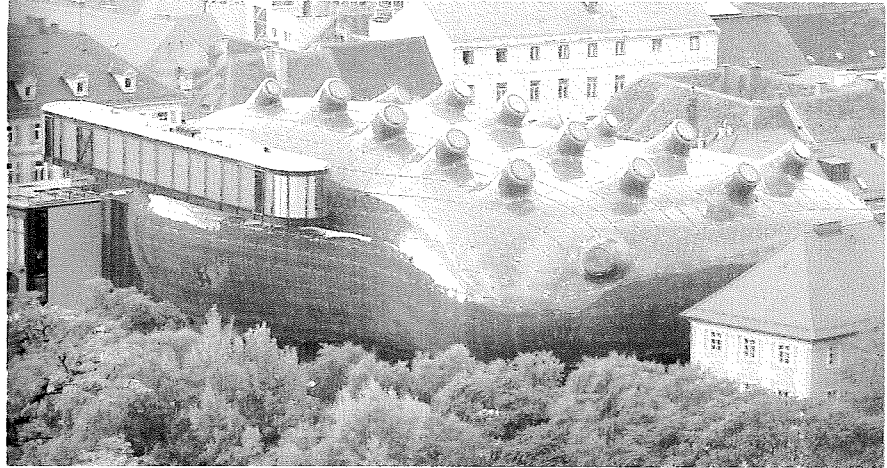


Abb. 5.70 Ansicht des Kunsthauses eingebettet in die bestehende Bebauung.

Das 2003 fertig gestellte Kunsthaus in Graz ist ein viergeschossiges Gebäude mit drei Untergeschossen, welches inmitten einer bestehenden, teils denkmalgeschützten Bebauung entstand. Das Planungsteam von Peter Cook und Colin Fournier mit den Ingenieuren Bollinger & Grohmann wählte für die Tragstruktur des Kunsthauses eine Stahlkonstruktion.

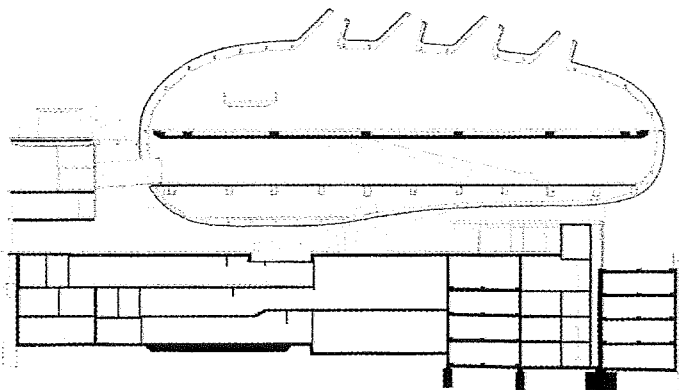


Abb. 5.71 Längsschnitt durch das Gebäude.

Die geometrischen Vorgaben für die Tragkonstruktion waren nach der Formfindung im Computer (siehe Kapitel 3) digital genau festgelegt und konnten in die Produktion übernommen werden.

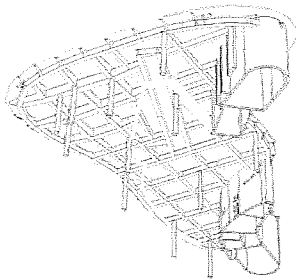


Abb. 5.72 Untersicht der Abfangebene über dem Erdgeschoss.

Über der verglasten Eingangsebene wird der blaue Hauptbaukörper, in dem sich die Ausstellungsräume befinden, von einer Abfangebene getragen, die auf Stützen und aussteifenden Kernen steht. Die Abfangebene ist als Gitterrost aus parallelen Stahlhohlprofilen mit Spannweiten bis zu 10 m gefertigt, der von der Erschließung durchstoßen wird. Darauf befindet sich eine weitere Ebene mit orthogonalem Raster mit nur fünf Stützen im Raum. Die Decke trägt nicht nur Nutz- und Eingenlasten aus dem 2. OG sondern dient auch der Aufnahme des Horizontalschubes aus der doppelt gekrümmten Hülle des Gebäudes.



Abb. 5.73 Das Tragwerk der Kunsthauses besteht aus parallelen Rahmen mit diagonalen Nebenträgern.

Das Tragwerk der Hülle mit einer Grundfläche von bis zu 60 x 40 m besteht aus parallelen Hauptträgern im Abstand von 3 m, die durch eine gelenkig angeschlossene, diagonal verlaufende Sekundärkonstruktion verbunden sind. Die Hauptträger aus Rechteckhohlprofilen mit Querschnitten von 120/400 mm wurden durch Gehrungsschnitt getrennt und verschweißt, so dass sich eine polygonale Form ergab, die der gewünschten konkaven und konvexen Krümmung nahe kommt. Die durch die Sekundärträger aus Quadrathohlprofilen gebildete Dreiecksstruktur führt zu einer günstigen Tragwirkung der Stahlkonstruktion, die die Lasten auch quer zur Hauptrichtung der parallelen Rahmen verteilen und so eine gewisse Schalentragwirkung aktivieren kann. Auf dieser Konstruktion sind Stahlblech-Sandwichpaneele befestigt, die eben auf den Dreiecksmaschen aufliegen und nach außen versiegelt sind. Die Acrylglasplatten der Außenhaut wurden einzeln thermisch nach der vorgegebenen Geometrie geformt. Hierfür kamen CNC-gefräste Formen aus Polyuretan-Schaum zum Einsatz [Kloft 2001].

Auch bei diesen Projekten wird deutlich, dass der mehrschichtige Aufbau der Konstruktion eine andere Herangehensweise bei der Ausführung erlaubt, als im Fall von sichtbaren Konstruktionen. Die polygonale Geometrie der Hauptrahmen, auf denen eine gekrümmte, nicht tragende

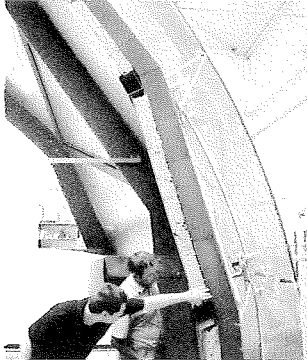


Abb. 5.74 Die Rahmen des Kunsthauses aus Stahl sind polygonal zusammengefügt und durch eine nicht-tragende Hülle ergänzt.

Hülle befestigt ist, weicht von der sichtbaren Form ab. Das Tragwerk der Gitterschale des Britischen Museums dagegen bleibt als einlagige Konstruktion sichtbar und hat damit sehr hohe ästhetische Anforderungen zu erfüllen, wodurch in der Ausführung ein erhöhter Aufwand zu erwarten ist.

Beide Lösungen eignen sich grundsätzlich für komplexe Geometrien. Zu beachten ist, dass für Formen, die eine hohe Belastung aus Biegemomenten erhalten, mehr Material für das Tragwerk erforderlich ist. Bei der einlagigen, sichtbaren Variante kann dies ästhetisch unbefriedigend sein.

5.4 Zusammenfassung und Ergebnis

Eine Übersicht über eine Reihe von Projekten zeigt die Vielfältigkeit der Verfahren, komplex gekrümmte Formen in den gängigen Werkstoffen der Bauindustrie herzustellen. Wie an Beispielen gezeigt wurde, muss im Vergleich mit den Fallstudien aus dem Kapitel 2 die Gebäudegeometrie in der Ausführungsphase heute nicht mehr zwingend angenähert werden, sondern kann durch die Übertragung der im Computer gespeicherten geometrischen Daten und die Vermessungstechnik unter Berücksichtigung der Tragfähigkeit und Baubarkeit auf der Baustelle millimetergenau umgesetzt werden. Die Kommunikation der komplexen Form ist so deutlich vereinfacht worden.

Eine Kombination von Baustoffen, wie sie in Sandwichbauweisen angewandt wird, kann als sinnvolle Ergänzung der traditionellen Bauweisen angesehen werden. Hierbei ist die Verwendung neuer Materialien in die Forschung zu integrieren.

Auch wenn der Einsatz traditioneller Konstruktionsmethoden zu erfolgreichen Ergebnissen führt, sollte überlegt werden, ob die komplexen Formen nicht neuartige und weiterentwickelte Bauverfahren erfordern [Coenders 2006]. Von Interesse sind daher bei der Betrachtung von Herstellungsmethoden komplexer Formen Konstruktionen, die auf der

Baustelle durch Deformation hergestellt werden, auch wenn hierbei die Genauigkeit der Ausführung im Millimeterbereich nicht erreicht wird. Diese Verfahren spiegeln ansatzweise die Arbeitsweise des Entwerfens im Computer wider, wo Flächen durch mathematische Algorithmen verformt werden. Da die Formgebung im Rechner nicht zwingend von der Schwerkraft abhängig ist und da ein fertiges Gebäude üblicherweise mehrschichtig ist, was bei der Formfindung im Rechner nicht zum Tragen kommt, kann eine tatsächliche Übereinstimmung nicht festgestellt werden. Die Suche der Architekten nach einem Material und einer Bauweise, die der Formgeneration im Computer entspricht [Goulthorpe 2004] ist dementsprechend nur bedingt sinnvoll.

Die Kluft zwischen digitaler Welt und Realität wird nur zu überbrücken sein, wenn sich die Herangehensweise im Computer der Realität annähert. Wenn es heißt, „Das Konzept effizienter Tragwerke wird ersetzt durch die Formel ‚Ingenieurtechnik ist die Kunst des Möglichen‘. Konstruktionen können jede Form annehmen und in jeder erdenklichen Weise ausgeführt werden“ [Saggio 2001, 24], entspricht dies eben nicht der Realität, in der die physikalischen Gesetze weiterhin gelten. Auch die Frage der Kosten ist in der Realität präsenter, als die formale Diskussion über die Machbarkeit komplexester Formen vermuten lässt. „Die Kenntnisse aus dem Schiffsbau, der Luftfahrt und des Industrial Design können für die Architektur genutzt werden, jedoch lediglich mit dem geringeren Budget der Bauwirtschaft“ [Eekhout 2006, 56]. Diese Einschränkung erfordert also den Einsatz von weiterer Forschung und Entwicklung, um neuartige Verfahren auf sinnvolle Art und Weise anwenden zu können.

6 Zusammenstellung von Projekten

Es folgt die Zusammenstellung von im Text angeführten Projekten in chronologischer Reihenfolge. Zu jedem Projekt ist neben dem Standort der Architekt und Ingenieur, soweit bekannt, die Formkategorie wie in Kapitel 3 festgelegt und eine kurze Beschreibung des Materials und der Konstruktion aufgeführt. Die Formkategorien sind wie folgt bezeichnet:

G... Elementar Geometrisch

P... Elementar Physikalisch

KG... Komplex Geometrisch

VP... Verfremdet Physikalisch

FA... Formale Analogie

NI... Nicht Identifiziert















Für einige Projekte lässt sich die Kategorie aufgrund von Überschneidungen nicht endgültig festlegen, bei wenigen Projekten ist der Formbildungsprozess unbekannt (nb... nicht bekannt).

Die neben dem Architekten und dem Ingenieur vielen weiteren Projektbeteiligten können im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, ebenso wie viele interessante und hochwertige Projekte.

III Umsetzung
6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht Identifiziert
















nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
1	Pyramiden in Gizeh, ET		um 2600 v. Chr.	nb		G	Räumliche Steinblockkonstruktion
2	Pantheon in Rom, I		125 n. Chr.	Apollodorus von Damaskus		G	Kuppelkonstruktion aus Mauerwerk und Opus Cementitum, D=43m, Kugelabschnitt
3	Hagia Sophia, Istanbul, TR		563	Isodorus der Jüngere		G	Rippenkuppel aus Ziegelmauerwerk, D=30m, Kugelabschnitt
4	Kölner Dom, Köln		1322	Gerhard von Rile		G	Rippenkonstruktion aus Mauerwerk, H=157m, Kressesegmente
5	St. Peter, Rom, I		1590	Donato Bramante, Antonio da Sangallo, Michelangelo, Giacomo della Porta u.a.		G?	Rippenkuppel aus Mauerwerk, D=42m, Überhöhte Kugelform
6	Taj Mahal, Agra, IND		1648	Isa Muhammad		G	Zweischalige Mauerwerkskuppel, D=18m, Rotationsform
7	St. Pauls Kathedrale, London, GB		1695	Christopher Wren		P	Tragende Konstruktion aus Mauerwerk, D=33m, leicht gewölbte Kegelform nach Stützlinie geformt
8	Iron Bridge, Coalbrookdale, GB		1779	Thomas Pritchard	John Wilkinson	G	Gusseisenkonstruktion, L=30m, Kressesegmente
9	Freiheitsstatue, NYC, USA		1875-1886	Frédéric Auguste Bartholdi	Gustave Eiffel	FA	Eisenfachwerkkonstruktion, Hülle Kupferblech auf Sekundärtragwerk, H=46,5m bzw 102m mit Sockel
10	Eiffelturm, Paris, F		1889	Gustave Eiffel/ Maurice Koechlin		P	Fachwerkkonstruktion aus Stahl, H=325m, Formentwurf mit Hilfe der grafischen Statik
11	Glashaus auf der Ausstellung d. Deutschen Werkbundes, Köln		1914	Bruno Taut	Fa, Allgemeine Beton und Eisen GmbH	KG	Kuppel aus Eisenbetonrippen, mit Glas gedeckt, D=10m, aus Rauten zusammengesetzte Kuppel mit Spitze
12	Sagrada Familia, Barcelona, E		Beg 1882	Antonio Gaudí		P	Türme aus Mauerwerk, H=115m, Form aus Hängemodell
13	Casa Batlló, Barcelona, E		1906	Antonio Gaudí		FA	Dachkonstruktion Rippengewölbe aus Mauerwerk, erscheint als Rücken eines Drachens
14	Einsteinturm, Potsdam		1920	Erich Mendelsohn	Fa. Bolle	NI	Turm: Mauerwerk mit Stahlträgern, H=16m. Anbauten, Turmkranz: Stahlbeton

III Umsetzung 6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht identifiziert
















nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
15	Zollinger Dach		Um 1920	—	Friedrich Zollinger	G	Typus, Gitternetz mit rauteförmigen Maschen aus Holzstäben gleicher Länge. L bis 37m
16	Das Rote Haus		1922	Hermann Finsterlin	—	NI	Nicht ausgeführt
17	Zeissplanetarium, Jena		1925	Hans Schlag, Johannes Schreiter	Franz Dischinger, Walter Bauersfeld	G	Spritzbeton auf Stahlnetzwerk aufgebracht, D=25m, Kugelabschnitt
18	Großmarkthalle, Frankfurt am Main		1927	Martin Elsässer	Dyckerhoff und Widmann KG	G	Stahlbetonschalen, L=37m, Kreissegmentzylindertonnen
19	Kugelhaus, Dresden		1928	Peter Birkenholz	M.A.N.	G	Stahlskelettkonstruktion, D=24m, Kugelform
20	Salginatobelbrücke, Graubünden, CH		1930	—	Robert Maillart	P	Stahlbeton, L=90m, Form aus Stützlinie
21	Versuchsschale, Wiesbaden		1931	—	Franz Dischinger, Ulrich Finsterwalder	G	Stahlbetonschale, L= 7,3m, Kugelabschnitt
22	Tribünendach La Zarzuela, E		1935	C. Arniches, L. Dominguez	Eduardo Torroja	G	Stahlbetonschale, Lk=12,5m, Abschnitte von liegenden Hyperboloiden
23	Endless House		1950	Friedrich Kiesler	—	NI	Nicht ausgeführt
24	Wallfahrtskirche, Ronchamp, F		1954	Le Corbusier	nb	G	Stahlbeton, Dachkonstruktion aus zwei Konoiden
25	Bavinger House, Norman, Oklahoma, USA		1955	Bruce Goff	nb	G	Mauerwerkkonstruktion mit zentralem Mast. Grundrissform nach logarithmischer Spirale
26	Palazzetto dello Sport, Rom, I		1957	Annibale Vitellozzi	Pier Luigi Nervi	G	Rippenkuppel aus Stahlbeton auf verlorener Ferrocementschalung, D=58,5m, Kugelabschnitt
27	Restaurant Las Manantiales, Xochimilco, MEX		1958	Joaquín Alvarez Ordóñez	Felix Candela	G	Stahlbetonschale, L=32,5m, kombinierte hyperbolische Paraboloid
28	Philips Pavillon, Weltausstellung Brüssel, B		1958	Yannis Xenakis, Le Corbusier	Fa. Strabed	G	Vorgespannte Stahlbetonfertigteile, H bis 21m, kombinierte hyperbolische Paraboloid
29	Fabrikhalle Eschmann, Thun, CH		1958	—	Heinz Isler	EP	Stahlbetonschale, L=40m, Formfindung mit Pneu

III Umsetzung 6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht Identifiziert





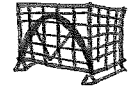

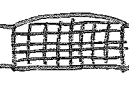








nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
30	Tensegrity		Um 1960	—	Buckminster Fuller	G/P	Typus, Kombination von Zug- und Druckelementen
31	Gryder House, Norman, Oklahoma, USA		1960	Bruce Goff	nb	G	Holzständerkonstruktion, Kombination geometrischer Figuren
32	TWA Terminal, N.Y., U.S.A.		1962/1970	Eero Saarinen	Ammann & Whitney	NI (nb)	Stahlbetonschale mit massiven, ausgeformten Stützen, L=40m
33	Philharmonie Berlin		1963	Hans Scharoun	Fa. Dywidag	G	Dachkonstruktion Spannbetonträger, L=52m, Rippendecken bilden Regeffläche zwischen Trägern
34	Nanas		ab 1964	Niki de St. Phalle	—	FA	Ferrozementschale, Form entsteht in Handarbeit.
35	Bini Schalen		ab 1966	---	Dante Bini	VP	Typus, Stahlbetonschale, L bis 40m, Form entsteht auf Pneu, Grundriss kreisförmig
36	EXPO Pavillon, Montreal, CDN		1967	Frei Otto, Rolf Gutbrod	Fritz Leonhardt	P	Vorgespannte Seilnetzkonstruktion mit Stahlmasten, 8000m ²
37	Seaside Bubbles		1968	Archigram	—	NI	Nicht ausgeführt
38	Rettungsstation, Binz		1968	Dietrich Otto	Ulrich Müther	NI (nb)	Ferrozementschale zum Kasten montiert, B ca 6x6m
39	Tankstelle Deitingen, CH		1968	---	Heinz Isler	P	Stahlbetonschale, L=31m, Entwurf aus Hängeform
40	Olympiastadion, München		1972	Behnisch & Partner, Frei Otto	Leonhardt und Andrá, Heinz Isler	P	Vorgespannte Seilnetzkonstruktion an Stahlmasten, 34.500m ²
41	Sydney Opera House, Sydney, AUS		1959-1973	Jorn Utzon	Ove Arup	G	Stahlbetonrippenkonstruktion aus Fertigteilen, L bis 57m, Kugelabschnitte
42	Gartencenter Bürgi, Camorino, CH		1973	—	Heinz Isler	EP	Stahlbetonschale, L=27m, Entwurf aus Fließform
43	Ahornblatt, Berlin		1973	---	Ulrich Müther	G	Stahlbetonschale, L ca. 18m, kombinierte hyperbolische Paraboloide
44	Multihalle Mannheim		1975	Karlfried Mutschler mit Frei Otto	Arup	P	Gitterschale aus Holzlamellen, L bis 85m, nach Hängeform entworfen

III Umsetzung 6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht Identifiziert










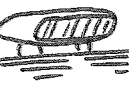





nb... nicht bekannt

Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
45 Hooke Park Workshop, Dorset, GB		Um 1988	Burton & Korelek mit Frei Otto	Buro Happold	P	Rippenkonstruktion aus vor Ort gebogenem Frischholz, L=18m
46 Lagerhalle Julio Herrera y Obes, Montevideo, ROU		1979	---	Eladio Dieste	P	Bewehrte Mauerwerksschale d=12cm, Parabelförmige Bögen mit S-Querschnitt, L=50m
47 Musikpavillon, Saßnitz		1987	Otto Patzelt	Ulrich Muther	G	Stahlbetonschale, D=21m, aus Hyperbolischen Paraboloiden zusammengesetzt
48 Globen Arena, Stockholm		1989	Berg Arkitektkontor AB	MERO	G	Stahl Raumfachwerk, H = 85 m, D = 110 m
49 Broadgate Exchange House, London, GB		1993	SOM	SOM	P	Stahlskelettbau, Parabelbogen aus Stahl, Kastenquerschnitt, L=78m, Parabelform
50 HQ für Nationale Niederlanden, Budapest, HU		1994	Erick van Egeraat	ABT Adviesburo voor Bouwtechniek	KG	Zinkblech und gebogene Glaspaneele auf Rippen- konstruktion aus gebogenen Leimholzbindern, L ca 10m
51 Fassade des Kempinski, München		1994	Helmut Jahn	Schlaich Bergemann & Partner	P	Vorgespanntes Seilnetz, Fläche 25x40m
52 TGV Bahnhof Lyon, F		1994	Santiago Calatrava	Santiago Calatrava	KG	Stahlbeton- und Stahlkonstruktion
53 Info Box, Berlin		1995	Schneider und Schumacher	Bollinger & Grohmann	G	Stahlverbundbauweise, Gebäuelänge 60m
54 "Heinz Galinski"- Grundschule, Berlin		1995	Zvi Hecker	Pichler Ingenieure	G	Stahlbetongeschossbau, Kreisabschnitte
55 Curtain Wall House, Tokyo, J		1995	Shigeru Ban	Shuichi Hoshino	P	Beweglicher textiler Vorhang als Fassade eines Stahlbetongebäudes
56 Sport Stadion Chemnitz		1995	Peter Kulka mit Ulrich Königs	Arup/ Cecil Balmond	KG	Nicht ausgeführt
57 ZDF Fernsehgarten, Mainz		1997	Albert Speer & P	Bollinger & Grohmann	KG	ETFE-Kissen auf Stahlgitterrahmen, 1200m², Form digital definiert
58 Kindertagesstätte, Gera		1997	Hoffman + Wilkowski	Hoffman + Wilkowski	G/FA	Elliptisch gebogene Brettschichholzträger, D ca. 50m, Grundriss nach logarithmischer Spirale
59 H2Oexpo, Neeltje Jans, NL		1997	NOX	Ingenieurs- bureau Zonneveld	KG	Gebogene Stahlrahmen, mit geraden Nebenträgern. L ca 10m, Physikalische Gesetze im Computer simuliert.

III Umsetzung 6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
 KG... Komplex Geometrisch
 EP... Entfremdet Physikalisch
 FA... Formale Analogie
 NI... Nicht identifiziert
















nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
60	Überdachung der Moschee in Medina, KSA		1992	Bodo Rasch	Buro Happold	P	Bewegliche Gerüstschirmkonstruktion, Kantenlänge 10m
61	UFA Palast, Dresden		1998	COOP Himmelb(l)au	Bollinger & Grohmann	KG	Stahlbeton- und Stahlglasskonstruktion, H ca. 30m, polygonal aneinander grenzende ebene Flächen
62	Industrie- und Handelskammer, Berlin		1998	Nicholas Grimshaw & Partner	Whitby & Bird	G	Teils mit Stahlbetonschalen ausgefachte Stahlbögen mit Kastenprofil, L bis 62m, Bögen ellipsenförmig
63	Guggenheim Museum, Bilbao, E		1999	Frank O. Gehry	SOM	KG	Polygonales Stahlfachwerk mit Sekundärstruktur, auf der die Hülle befestigt ist. H ca 50m. Formen digital definiert.
64	Der Neue Zollhof, Düsseldorf		1999	Frank O. Gehry	Büro Zimmerling/ Fa. Holzmann	KG	Stahlbetonfertigteil- und Stahlbetonskelettkonstruktionen. H bis 55m. Formen digital definiert.
65	Presbyterian Church, NYC, USA		1999	Garfolo Arch., LynnForm, McInturf	FTL Happold	KG	Stahlrahmen- und Stahlfachwerk- konstruktion, digital definiert.
66	Millenium Dome, London, GB		1999	Richard Rogers	Buro Happold	G	Mit ebenen Membranelementen bedeckte Seilnetzkonstruktion auf 12 Stahlmasten, D=320m, Kugelabschnitt.
67	Mind Zone, Millenium Dome, London, GB		1999	Zaha Hadid	ARUP	KG	Stahlfachwerkkonstruktion, Lk bis 23m, Form digital definiert
68	Body Zone, London, GB		1999	Branson Coates Architecture	Buro Happold	FA	Stahlskelett mit Sekundärkonstruktion, auf der die Hülle befestigt ist. H ca. 30m
69	Lord's Media Centre, London, GB		1999	Future Systems	Arup	KG	Spantenkonstruktion mit aussteifender Haut aus Aluminium. Gebäudelänge 40m.
70	BMW Bubble, Frankfurt a.M. und München		1999	Bernhard Franken, ABB	Bollinger & Grohmann	KG	Acrylglasscheiben auf Aluminiumrahmen, L=16m, Form digital definiert
71	Jüdisches Museum, Berlin		1999	Daniel Libeskind	GSE	KG	Stahlbetonbau, polygonal angeordnete, ebene Wandscheiben.
72	Hyposurface, Birmingham, GB		1999	dECOi, Mark Goulthorpe	Arup	VP	Metalplättchen auf beweglichen Zylinderkolben
73	National Botanic Garden of Wales, Carmarthenshire, GB		2000	Foster & Partners	Anthony Hunt Associates	G	Glasgedeckte Stahlkonstruktion, L=58m, Ausschnitt aus Torus.
74	British Museum, Great Court, London, GB		2000	Foster & Partners	Buro Happold	KG	Glasgedecktes Stahlgitternetz mit Dreiecksmaschen, L=14 bis 40m, Form aus mathematischen Funktionen superponiert

III Umsetzung 6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht Identifiziert













nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
75	L'Hemisfèric, Valencia, E		2000	Santiago Calatrava	Santiago Calatrava	G	Stahlbeton- und Stahlkonstruktion
76	EXPODACH, EXPO 2000, Hannover		2000	Thomas Herzog	Natterer, Bertsche, Kgs Kessel	KG (nb)	Holzrippenschale, Kantenlänge 40m
77	Japanischer Pavillon, EXPO 2000, Hannover		2000	Shigeru Ban, Frei Otto	Buro Happold	KG	Mit Holzrahmen verstärkte Papprollengitterschale, L=42m, Tonne mit drei Buckeln, Form digital definiert
78	Eden Project, Cornwall, GB		2001	Nicholas Grimshaw	Anthony Hunt Associates	G	Zweilagiges Raumfachwerk in Stahl mit ETFE-Folienkissen, D bis 65m, Kombination von Halbkugeln
79	BMW Pavillon Dynaform, Frankfurt am Main		2001	Bernhard Franken, ABB	Bollinger & Grohmann	KG	Membranbespannte Stahlrahmenkonstruktion, L ca. 30m, Form digital definiert
80	DZ Bank, Berlin		2001	Frank O. Gehry	Schlaich, Bergemann und Partner	KG	Glasgedecktes Stahlgitternetz mit Dreiecksmaschen, L=20m, Form digital definiert
81	Soft Office, Stratford-upon-Avon, GB		2001	NOX	—	VP	Nicht ausgeführt
82	Selfridges Centre, Birmingham, GB		2003	Future Systems	Arup	KG (nb)	Stahlskelettbau mit selbsttragender Spritzbetonhaut, Geschosshöhe ca. 4m, Form digital definiert.
83	Kunsthau Graz, A		2003	Peter Cook & Colin Fournier	Bollinger & Grohmann	KG	Acrylglas und Dämmung auf Stahlrahmenkonstruktion, Gebäudelänge 60m, Form digital definiert
84	Brücken in Mechtenberg		2003	Frei Otto	Buro Happold / Büro Hilbers	P	Stabwerk aus Stahlrundvollstäben, Spannweite L=30m
85	MARTa Museum, Herford		2004	Frank O. Gehry, ARCHIMEDES	Bollinger & Grohmann	KG	Wände Stahlbeton, Dachkonstruktion Stahlvoll- und Fachwerkträger, Form digital definiert
86	Victoria and Albert Museum, London, GB		2004	Studio Daniel Libeskind	Arup	KG	nicht ausgeführt -Wandscheiben aus Stahlbeton, polygonal angeordnet
87	Son-O-House, Son en Breugel, NL		2004	NOX	—	VP	Drahtgeflecht auf Edelstahlrahmen, Form digital definiert
88	D-Tower, Doetinchem, NL		2004	NOX	—	VP	Kunststoffschale, H ca. 10m, Form digital definiert
89	Hangar 8, Salzburg, A		2004	Atelier Volkmar Burgstaller	Bollinger & Grohmann	G	Isolierglaspaneele auf Stahlspannten mit Rundrohren als Ausfachung, maxL=63m, Abschnitt eines Ellipsoids

III Umsetzung
6 Zusammenstellung von Projekten

G... Geometrisch P... Physikalisch
KG... Komplex Geometrisch
EP... Entfremdet Physikalisch
FA... Formale Analogie
NI... Nicht Identifiziert

nb... nicht bekannt

	Projekt	Icon	Baujahr	Architekt	Ingenieur	Form	Beschreibung
90	Principe Pio, Madrid, E		2004	RTKL	Schlaich Bergemann & Partner	EP	Dreiecksgitternetzschale verglast, aus Pneuform generiert
91	Lehrter Bahnhof, Hauptbahnhof, Berlin		2005	gmp	Schlaich Bergemann & Partner	G/P	Über- und unterspannte Stahlrahmenkonstruktion, maxL=68m, Korbbogenform
92	Denkmal für die Ermordeten Juden Europas, Berlin		2005	Peter Eisenman	Buro Happold	KG	Stahlbeton, Stahlbetonfertigteile, Form digital definiert
93	Philologische Bibliothek, Berlin		2005	Foster & Partners	Pichler Ingenieure	G	Raumtragwerk aus Rundstahl, L=55m, Korbbogen
94	Turning Torso, Malmö, S		2005	Santiago Calatrava	Santiago Calatrava	KG	Stahlbetonkonstruktion mit außenliegendem Stahlfachwerk, H=190m, Form digital definiert
95	Messe Mailand, I		2005	Massimiliano Fuksas	Schlaich Bergemann & Partner	KG	Verglasung auf Stahlprofilen, Viereck-, in stark gekrümmten Bereichen Dreiecksmaschen. Form digital definiert.
96	Phaeno Science Center, Wolfsburg		2005	Zaha Hadid	Tokarz, Frerichs, Leipold	KG	Stahlbeton, Gebäudehöhe ca 20m, Form digital definiert
97	Zentrum Paul Klee		2005	Renzo Piano	Arup	G	Stahlkonstruktion, Parabelbögen, H ca 12m
98	Busbahnhof Wädenswil		2005	Kuhn und Steinbächer	osd	KG	nicht ausgeführt - Stahlträger mit gekrümmten Ober- und Untergurten
99	Mercedes-Benz Museum Stuttgart		2006	UN Studio	Werner Sobek Ingenieure	KG	Stahlbeton, Gebäudehöhe ca 47m, Form digital definiert
100	BMW-Welt, München		2006	COOP Himmelb(l)au	Bollinger & Grohmann	KG	Polygonale Stahl-Raumfachwerkkonstruktion, Doppelkegel aus gekrümmten Profilen. Form digital definiert.
101	Parasol, Sevilla, E		im Bau	Jürgen Mayer H.	Arup	KG	Orthogonales Gitter aus Schichtholzbindern
102	Mumuth		im Bau	UN Studio	Arup	KG	Stahlkonstruktion, Form digital definiert, H ca 12m
103	Hauptbahnhof Stuttgart		geplant	Christoph Ingenhoven	Buro Happold mit Frei Otto und LAP	P/KG	Stahlbetonschale/ -platte

Schlussfolgerungen

Eine maßgebliche Grundlage zur Durchführung komplexer Bauaufgaben ist die Kommunikation. Architektur ist nicht mehr das Werk von Individuen sondern von Planungsteams, die mit Fachleuten verschiedener Disziplinen besetzt sind, die miteinander kommunizieren müssen. Freie Formen haben eine schwer erfassbare, unregelmäßige Geometrie und sind daher in sowohl in der Planung als auch in der Ausführung mit einem besonderen Aufwand verbunden. Umso bedeutsamer ist es, dass alle Planungsbeteiligten ein Verständnis für die Herausforderung haben, die der Entwurf und die Umsetzung dieser Formen mit sich bringen. Als Beitrag zum aktuellen Architekturdiskurs, wo eine Festlegung des Begriffs der freien Form bisher fehlt, wurde in dieser Arbeit eine Untersuchung der Entstehung der freien Formen und ihrer Charakteristika unter Berücksichtigung des integrierten Entwurfs vorgenommen und die aktuellen Methoden der Ausführung aufgezeigt.

Anhand einer Untersuchung verschiedener Systematisierungen in der Literatur zeigte sich, dass dort eine Unterscheidung von geometrischen, physikalischen und freien Formen nicht erfolgte. Mit einer unter diesem Gesichtspunkt neu aufgestellten Systematisierung konnte eine klare Abgrenzung der freien Formen ebenfalls nicht erreicht werden, da bei der Definition der Formfamilien Überschneidungen bestehen. Dennoch ist die Einteilung für die weiteren Betrachtungen relevant, da sich aus der Tragwerkssystematik eine Ordnung ergibt, mit der die Grundlage für eine Kommunikation zur Form geschaffen wird. Sie ist daher als Einführung in die Zusammenhänge von Geometrie und Tragverhalten der verschiedenen Formfamilien von Bedeutung und trägt zur Verständigung über die Form bei.

Neben den Überschneidungen bei der Einordnung in Formfamilien bestehen bei der Bezeichnung „Freie Formen“ auch Ungenauigkeiten, die aus der individuellen Wahrnehmung einer Form resultieren. Formen, die nicht

identifiziert werden können, werden als freie Formen bezeichnet, auch wenn es sich um elementare geometrische Formen wie die Philologische Bibliothek der FU in Berlin oder um physikalische Formen wie die Multihalle in Mannheim handelt. Umgekehrt werden geometrisch hoch komplexe, und mathematisch nicht mehr geschlossen beschreibbare Formen nicht als frei bezeichnet, wenn sie als bekannte Figur erkannt werden können, wie das Beispiel der Freiheitsstatue zeigt. Der Begriff der „freien Form“ entsteht damit aus zwei unterschiedlichen Zusammenhängen. Die eine, subjektive Bezeichnung als freie Form folgt daraus, dass eine Identifizierung der gegebenen Form mit den Kenntnissen des jeweiligen Betrachters nicht möglich ist. Hiermit werden alle Formen als frei bezeichnet, die dem Betrachter nicht bekannt sind, auch wenn es sich um elementare geometrische oder physikalische Formen handelt.

Die andere, objektive Bezeichnung, die in dieser Arbeit untersucht wurde, spiegelt den Prozess der Formgebung selbst wider. Dieser Entwurfsprozess ist vielschichtig und individuell abhängig von den Entwurfsbeteiligten. Obwohl die zugrunde liegende Motivation zur Formgebung, die durch Formulierung der Impulse *Theorie*, *Technik*, *Organik* und *Analogie* beschrieben wurde, keine eindeutige Beziehung zwischen diesen und dem Entwurf freier Formen ergibt, wird die Erarbeitung der freien Form beim Entwurf komplexer Formen mit dem Aufstellen individueller Regeln der Formgebung deutlich.

Der Einsatz geometrischer, physikalischer und freier Formen in der Bau- und Architekturgeschichte wurde unter Berücksichtigung der Entwicklung der wissenschaftlichen Baustatik untersucht, um Hinweise zum Entwurf der Form in Abhängigkeit von den vorhandenen technischen Mitteln und wissenschaftlichen Kenntnissen zu erhalten.

Die bewusst entworfenen freien Formen existierten bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts nicht. Erst in den letzten etwa 100 Jahren vollzogen sich mehrere Entwicklungen parallel. Während sich in der Kunst und auch in der Architektur eine Befreiung von formalen geometrischen Vorgaben durchsetzte, wurden gleichzeitig in Materialwissenschaft und Bautechnik

große Fortschritte erzielt, die allerdings durch Normung und erhöhte Sicherheitsanforderungen bei immer komplizierter werdenden rechnerischen Nachweisen eingeschränkt waren. So wie beispielsweise der um 1900 verbreitete unterspannte Träger aus dem Repertoire der Bauelemente verschwand, da die statischen Nachweise mit den bekannten Methoden nicht erbracht werden konnten [Polónyi 1989], so musste auch die zu dieser Zeit aufkeimende Lust an neuen Formen fast unweigerlich in erfassbaren Geometrien münden. Die in Kapitel 2 beschriebenen Projekte wie der Einsteinturm oder das TWA Terminal und auch die ungewöhnlichen Geometrien der Bauten von Frei Otto oder Heinz Isler blieben bemerkenswerte Ausnahmen. Nochmals deutlich wurde bei dieser Betrachtung, dass die Kooperation der Planungspartner bei der Entwicklung und Ausführung der freien Formen einen besonderen Stellenwert hat.

Die fortschreitende Abstraktion der Tragsysteme und Materialien in den Rechenansätzen nach 1900 war eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung und den Einsatz der maschinellen Berechnung und der Erfindung des Computers. Mit diesem Werkzeug konnten Ende des 20. Jahrhunderts die hohen Anforderungen der komplexen Formen an Rechenaufwand und geometrischer Darstellung deutlich einfacher erfüllt werden. Der Computer ist somit wenn auch nicht als Motor, so doch als Katalysator für die jüngste Entwicklung der komplexen Formen anzusehen.

Ausgangspunkt für den Entwurf freier Formen ist die Anwendung veränderter Entwurfsmethoden bei der Formfindung, die sich vom Repertoire der elementaren Geometrie und den strengen Regeln der physikalischen Form losgelöst haben. Die Regeln der Formfindung werden individuell aufgestellt. So werden beispielsweise definierte Formen wie Quader oder Kugeln über implementierte Bedingungen verzerrt, bis sie eine gewünschte Gestalt erreichen. Die Nutzung des Werkzeugs Computer erlaubt die genaue Definition sehr komplexer Flächen und auch die Anwendung physikalischer Vorgänge ohne Beachtung der Schwerkraft. Es muss noch einmal betont werden, dass die Existenz der daraus hervorgehenden Formen nicht vom Computer abhängt. Es wird lediglich die Darstellung und damit die Kommunikation und die Übertragung der Form in die Wirklichkeit vereinfacht.

Architekten wie auch Ingenieure setzen eigene Gestaltungsmittel ein, um Projekte zu verwirklichen. Bei der Arbeit mit der freien Form scheinen ihre Strategien zunächst entgegengesetzt: Während die freie Form Inbegriff des Ausbruchs aus der gegebenen euklidischen Ordnung ist, begegnet der Ingenieur jeder Entwurfsaufgabe mit seinem grundsätzlichen Bedürfnis, eine Ordnung herzustellen, um die Geometrie der Form und ihr Tragverhalten erfassen zu können. Mit unterschiedlichsten Methoden wird so durch Formulierung von geometrischen oder physikalischen Randbedingungen, die zwar komplex sein können, aber dennoch logisch und begreifbar bleiben, die Form wiederum definierbar.

Bemerkenswert ist, dass auch mit Methoden des Ordners, die auf einfache Algorithmen ohne Einsatz der Datenkapazität des Computers zurückzuführen sind, komplexe Formen entstehen können, deren Ordnung nicht mehr zu erkennen ist. In diesem Prozess wird die erforderliche Kreativität bei der Bearbeitung der freien Form besonders deutlich.

Eine solche Bearbeitung durch interdisziplinäre Kooperation simplifiziert sowohl die Entwicklung des Entwurfs als auch dessen Ausführung. Sie führt zu einem Verständnis der Geometrie und damit zu einer Vereinfachung der Kommunikation über die erarbeitete Form. Der Computer eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, die Bearbeitung einer Form auf das elektronische Erfassen der geometrischen Daten zu beschränken, wenn eine vom Architekten vorgegebene Form nicht veränderbar ist, da sie beispielsweise bereits einer formalen Ordnung folgt. Durch die eindeutige Festlegung der Punkte im Raum und die systemübergreifende Lesbarkeit der Daten ist die Verarbeitung der Angaben zwischen den Beteiligten in Planung und Ausführung möglich. Die interdisziplinäre Kommunikation ist bei diesen Formen ebenso wichtig.



Abb.7.1 Die Mathematical Bridge in Cambridge, GB, wurde nach einer strengen geometrischen Ordnung entworfen.

Die meisten als frei bezeichneten Formen sind also ebenso definiert wie die geometrischen Formen. Der Unterschied resultiert aus der Anzahl der veränderbaren Variablen und damit in der Komplexität der Flächenfunktion. Bei so genannten starken Formen lassen sich nur einzelne Parameter verändern, die die gesamte Form bestimmen, beim Quader beispielsweise die Seitenlänge, bei der Stütze die Stützlinie der Stütze. Freie Formen hingegen, deren Flächenfunktion aus einer Vielzahl von Variablen entsteht, können deutlich flexibler gehandhabt werden. Gerade hierin liegt die Chance für diese Formen, wenn sie als solche erkannt wird.

Trotz Herstellung einer gewissen geometrischen Ordnung im Entwurfsprozess sind die freien Formen weder mathematisch einfach wie die geometrischen Formen, noch tragen sie Lasten so effizient ab wie die physikalischen Formen. Die Betrachtung der Optimierungsverfahren hat indessen gezeigt, dass eine Optimierung, die nur nach einer Variablen durchgeführt wird, nicht unbedingt insgesamt zum besten Ergebnis führen

muss. Stattdessen sind Kompromisse zwischen den Optima verschiedener Parameter in der Praxis üblich und nicht zu vermeiden. Ist also die physikalische Form nach dem Kraftfluss optimiert und die geometrische Form nach der Flächenfunktion, so kann mit der Flexibilität der Parameter freier Formen in gewissen Grenzen die Optimierung der Gesamtform angestrebt werden. Bei den physikalischen Formen ist Flexibilität dadurch vorhanden, dass der Grundriss frei wählbar ist, mit dem die Form dann grundsätzlich feststeht.

Freie Formen sind durch individuell bestimmte Regeln festgelegt. Wenn diese Regeln so angepasst werden, dass eine Änderung der Form möglich ist, so können Architekt und Ingenieur gemeinsam die Gestaltung einer Form verwirklichen, die möglichst viele Variablen zur Optimierung berücksichtigt und sich damit einer optimalen Form im Sinne des Gesamtkonzeptes annähert.

Eine weitere Chance besteht in der Ausführung der freien Formen. Bisher wurden hauptsächlich modulare Bauweisen, d.h. das stückweise Zusammenfügen kleinteiliger Elemente angewendet, um komplex gekrümmte Formen zu bauen. Selbst bei Ortbetonkonstruktionen muss beim Bau der Schalung auf diese Methoden zurückgegriffen werden. Die deformierbaren Flächen zeigen jedoch einen Weg auf, die Bauausführung dem Entwurfskonzept der fließenden Konturen anzupassen. Besonders geeignet erscheinen hierfür die flexiblen Gitternetze, obwohl sie auf der Grundlage der physikalischen Formgebung entwickelt wurden und sich daher nicht für die Beanspruchung durch große Biegemomente eignen.

Eine Entwicklung dieser Formen würde die Flexibilität im Bauzustand mit einer ausreichenden Steifigkeit im Endzustand kombinieren, wie dies beispielsweise bei der flexiblen Schalung durchgeführt wird. Das Füllen von Rohrquerschnitten, die das Gitternetz bilden, ist hierfür ein möglicher Ansatz.

Auch die Anwendung des Spritzbetons auf pneumatischen Schalungen zeigt Wege auf, diverse gekrümmte Formen herzustellen. Eine Untersuchung der unterschiedlichen Variation von Formen unter Einsatz der geometrischen Randbedingungen der Pneus oder einer Kombination von Pneus ist ein

weiteres Feld der Forschung.

Ebenso ist auch der Ferrozement zum Einsatz für freie Formen denkbar. Dieser ist bisher für kleinere Konstruktionen wie die Kunstobjekte Niki de St. Phalles oder auch für die nicht tragenden Fassaden des Selfridges Centre in Birmingham eingesetzt worden. Die Standsicherheit dieses Verbundbaustoffes kann für größere Spannweiten nur garantiert werden, wenn eine gleich bleibende Qualität bei der Ausführung sichergestellt ist. Dies erfordert Bauweisen, mit denen beispielsweise eine definierte Geometrie der Form, der Wanddicke und der Lage der Bewehrung erreicht wird. Nervi erlangte diese Sicherheit durch die Verwendung des Ferrozements in vorgefertigten Elementen, die er als verlorene Schalung einsetzte. Möglicherweise kann der Einsatz maschineller Bauweisen, wie er bei Versuchen zum Mauerwerksbau an der ETH Zürich demonstriert wurde, zu exakten, vor Ort entstehenden Formen mit definierter Tragfähigkeit führen.

Grundlage aller Forschung und Entwicklung ist die Kreativität und die Kommunikation unter den Beteiligten. So kann gerade bei komplexen Formen unter Einsatz innovativer geometrischer Ordnung die Kombination bekannter Bauweisen mit neuen Materialien oder neuer Bauweisen mit herkömmlichen Materialien zu einem neuen Spektrum an spannenden Projekten führen.

Abbildungsverzeichnis

Einleitung

- Abb. 0.1** Das Gleichgewicht im Bauwerksentwurf nach Vitruv aus Olaf Weber, *Die Funktion der Form*. Hamburg 1994, 59.
- Abb. 0.2** Olaf Webers Interpretation des Gleichgewichts zwischen Zwecken und Mitteln sowie materiellen und ideellen Komponenten beim Bauen aus Olaf Weber, *Die Funktion der Form*. Hamburg 1994, 59.
- Abb. 0.3** Die Anlage von Stonehenge, errichtet zwischen 3100 und 2000 v. Chr., Bild Hilka Rogers.
- Abb. 0.4** Untersicht der inneren Kuppel der St. Pauls Kathedrale von Christopher Wren, London, Baujahr 1698, aus Erwin Heinle, und Jörg Schlaich, *Kuppeln – aller Zeiten, aller Kulturen*. Stuttgart 1996, 120.
- Abb 0.5** Innenansicht des Restaurants in Xochimilco, Mexiko, von Felix Candela, Baujahr 1958, aus Jürgen Joedicke, *Schalenbau, Dokumente der Modernen Architektur*. Stuttgart 1962, 184.
- Abb 0.6** Überdachung Lehrter Bahnhof/ Hauptbahnhof, Berlin, Architekt von Gerkan, Marg und Partner, Ingenieure Schlaich Bergermann und Partner, Baujahr 2006, Bild Hilka Rogers.
- Abb 0.7** Entwurf für das Europacenter Berlin von 1969, Architekt Engelbert Kremser, aus *Stadtbauwelt* 169.
- Abb 0.8** Automobilkarosserie, Bild Hilka Rogers.

Kapitel 1

- Abb. 1.1** Das Ludwig-Erhardt-Haus, Berlin, Architekt Nicholas Grimshaw mit Ingenieuren Whitby & Byrd, Baujahr 1998, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.2** Bildung von Tragstrukturen aus Oskar Büttner und Erhard Hampe, *Bauwerk Tragwerk Tragstruktur*, Berlin, 1985, 15.
- Abb. 1.3** Matrix der Tragsysteme aus Kurt Ackermann, *Tragwerke in der konstruktiven Architektur*, Stuttgart 1988, 29.

- Abb. 1.4** Systematik der Tragwerke aus Wilfried Führer, Susanne Ingendaaij und Friedhelm Stein, *Der Entwurf von Tragwerken*, Köln 1995, 34/35.
- Abb 1.5** Einteilung der Elemente aus Gerd Becker, *Tragkonstruktionen des Hochbaus Teil 1*, Düsseldorf 1983.
- Abb 1.6** Einteilung der Elemente aus Oskar Büttner und Erhard Hampe, *Bauwerk Tragwerk Tragstruktur*, Berlin 1985.
- Abb. 1.7** Vergleich des Tragverhaltens Balken und Bogen, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.8** Knoten eines Fachwerkbinders, Neues Bildhaueratelier der UdK Berlin, Architekten Büro 1:1, Ingenieure Lehrstuhl Tragwerksplanung, Gerhard Pichler & Hilka Rogers, Baujahr 2002, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.9** Alamillo-Brücke, Sevilla, Architekt und Ingenieur Santiago Calatrava, Baujahr 1992, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.10** Vergleich der Biegemomente unterschiedlich geformter Bögen, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.11** Darstellung einer Geraden im kartesischen Koordinatensystem, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.12** Darstellung einer Ellipse im kartesischen Koordinatensystem, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.13** Bildung der physikalischen Form mit einer Gelenkkette, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.14** Darstellung einer nicht bestimmten Kurve im kartesischen Koordinatensystem, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.15** Seilformen unter Belastung, Bild Hilka Rogers.
- Abb.1.16** Der Spannungsverlauf im Balken bei mittiger Druckkraft und unter Biegemoment ohne Normalkraft, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.17** Tafel der Elemente.
- Abb. 1.18** Das eben gespannte Trommelfell, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.19** Eine Membrankonstruktion, British Museum, London. Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.20** Decke aus Stahlbeton, Neue Philologische Bibliothek der FU Berlin, Berlin, Architekt Norman Foster, Ingenieure Pichler GmbH, Baujahr 2005, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.21** Einordnung der Tragsysteme.

- Abb. 1.22** Infobox am Potsdamer Platz, Berlin, Architekten Schneider und Schumacher, Ingenieure Bollinger & Grohmann, Baujahr 1995, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow*, Basel 2004, 24.
- Abb. 1.23** Tensegrity System aus Klaus Teichmann and Joachim Wilke, Hg, *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Berlin 1996, 107.
- Abb. 1.24** Die Globen Arena, Stockholm, S, Architekt Berg Arkitektkontor AB, Ingenieur MERO, Baujahr 1989, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.25** Form der Tonne, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.26** Doppelt gekrümmte Flächen, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.27** Form des Hyperboloids und des Konoids, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.28** Form des Hyperbolischen Paraboloids, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.29** Translationsflächen, aus Michailenko, W.I. und Kaschtschenko, A.W., *Natur - Geometrie - Architektur*, Berlin, 1986, 46.
- Abb. 1.30** Neue Philologische Bibliothek der FU Berlin, Berlin, Architekt Foster und Partner, Ingenieure Pichler GmbH, Baujahr 2005, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.31** Fraktal, Benoît Mandelbaums „Apfelmännchen“, aus www.wikipedia.org 10/2007.
- Abb. 1.32** Fraktal, Der „Pythagorasbaum“, aus www.wikipedia.org 10/2007.
- Abb. 1.33** Aststrukturen, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 1.34** Multihalle, Mannheim, von Carlfried Mutschler mit Frei Otto, Ingenieure Arup, Baujahr 1975, aus Oliver Herwig, *Featherweights*, München, 2003, 75.
- Abb. 1.35** Seifenhäute, aus Klaus Bach, Berthold Burkhardt und Frei Otto, *Seifenblasen*, IL 18, Stuttgart, 1987, 99.
- Abb. 1.36** Presbyterian Church, New York, von Garfalo Architects/ LynnForm/ McInturf und FTL Happold, Baujahr 1999, aus Peter Cachola Schmal, *Digital, real: Blobmeister*, Basel, 2001, 121.
- Abb. 1.37** Son-o-House, Son en Breugel, NL, NOX Architekten, Baujahr 2004, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 195.
- Abb. 1.38** BMW "Bubble", Frankfurt am Main und München, Franken Architekten, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 1999, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 76.

Kapitel 2

- Abb. 2.1** Die Pyramiden, um 2600 v. Chr., aus Baumgart, Fritz, *Sachlexikon der Architektur*, Köln, 1977, 10.
- Abb. 2.2** Die Kegelschnitte, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.3** Schlösschen im Lazienkowski Park, Warschau, Architekt und Baujahr nicht bekannt, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.4** Ansicht des Pantheons, 125 n.Chr., aus Jürgen Rasch, „Die Kuppel in der römischen Architektur“, in R. Graefe, *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart, 1989, 17.
- Abb. 2.5** Marienkirche, Lübeck, gebaut um 1300, aus Mainstone, Rowland, *Developments in Structural Form*, Harmondsworth, Middlesex, 1975, 216.
- Abb. 2.6** Pont du Gard, Provence, Wiederaufbau 1569., aus Mainstone, Rowland, *Developments in Structural Form*, Harmondsworth, Middlesex, 1975, 68.
- Abb. 2.7** Ponte St. Trinitá, gebaut um 1300, aus Mainstone, Rowland, *Developments in Structural Form*, Harmondsworth, Middlesex, 1975, 242.
- Abb. 2.8** Brückenentwürfe von Andrea Palladio, aus Paulgerd Jesberg, *Die Geschichte der Ingenieurbaukunst*, Stuttgart, 1996.
- Abb. 2.9** Entwürfe für Bohlenbinder von Philibert de L'Orme, aus Rainer Graefe, „Die Bogendächer von Philibert de l'Orme“, Stuttgart, 1989, 101.
- Abb. 2.10** Seillinie nach Simon Stevin, aus Martin Trautz, "Die Anfänge der Gewölbestatik und der Wölbkunst nach statischen Gesetzen", Berlin, 1996.
- Abb. 2.11** Kragbalken nach Galileo Galilei, aus Hans Straub, *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*, Berlin, 1992.
- Abb. 2.12** Schnitt durch die St. Paul's Kathedrale, aus Frei Otto, *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, 1985.
- Abb. 2.13** Kettenlinie nach Poleni, aus Martin Trautz, "Die Anfänge der Gewölbestatik und der Wölbkunst nach statischen Gesetzen", Berlin, 1996, 93.
- Abb. 2.14** Mathematisch generierte Form eines Blattes, aus W.I. Michailenko und A.W. Kaschtschenko, *Natur - Geometrie - Architektur*, Berlin, 1986, 37.
- Abb. 2.15** Die Coalbrookdale Brücke, „Iron Bridge“, Coalbrookdale, GB, Baujahr 1779, Bild Hilka Rogers.

- Abb. 2.16** Eifelturm, Baujahr 1889, aus Frei Otto, *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, 1985.
- Abb. 2.17** Kräfte diagramm des Eiffelturms, aus Berthold Burkhardt, "Eiserne Rohrkonstruktionen im 19. Jahrhundert", 1988, 159.
- Abb. 2.18** Aus Hyperboloiden zusammengesetzte NIGRES-Stromleitungsmasten an der Oka von Vladimir Suchov, Baujahr 1930, aus Winfried Nerdinger, *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München, 2002, 74.
- Abb. 2.19** Stahlbrücke von Tervueren, Versuchsbrücke von 1898 von Artur Vierendeel, aus Patricia Radelet-de Grave, "(Jules) Artur Vierendeel", 2003, 86.
- Abb. 2.20** Der Kaisersteg in Oberschöne weide, Berlin, von Heinrich Müller-Breslau, Baujahr 1898, aus wikimedia.org.
- Abb. 2.21** Jahrhunderthalle in Wroclaw (Breslau) von Max Berg, Baujahr 1913, aus Winfried Nerdinger, *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München, 2002, 52.
- Abb. 2.22** Das Zweite Goethenäum, Dornach bei Basel, von Rudolf Steiner, Baujahr 1925, aus Pieter Van der Ree, "Organische Architektur," Stuttgart, 2001, 55.
- Abb. 2.23** Das Rote Haus, Zeichnung von Herrmann Finsterlin, 1922, aus Franco Borsi, *Herrmann Finsterlin, Architektur in seiner Idee*, Florenz, 1968, 77.
- Abb. 2.24** Originalfoto des Hängemodells für die Kirche der Kolonie Güell von Antonio Gaudí., aus Jos Tomlow, *Das Modell*, Stuttgart, 1989, 65.
- Abb. 2.25** Salginatobelbrücke, Graubünden, CH, Ingenieur Robert Maillart, Baujahr 1930, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.26** Stahlgerüst für die Kuppel in Jena von Franz Dischinger und Walter Bauersfeld, Baujahr 1923, aus Jürgen Joedicke, *Schalenbau, Dokumente der Modernen Architektur*, Stuttgart, 1962, 14.
- Abb. 2.27** Dach in Rautenlamellenbauweise nach Friedrich Zollinger, Halle des Straßenbahndepots in Stuttgart, Baujahr 1928, Bild Berthold Burkhardt.
- Abb. 2.28** Schale des Gartencenters Bürgi, Camorino, CH, von Heinz Isler, Baujahr 1973, aus Eckehard Ramm und Eberhard Schunck, *Heinz Isler Schalen*, Stuttgart, 1986.
- Abb. 2.29** Schale des Restaurants in Xochimilco, Mexiko, von Felix Candela, Baujahr 1958, aus Jürgen Joedicke, *Schalenbau, Dokumente der Modernen Architektur*, Stuttgart, 1962, 219.
- Abb. 2.30** Eine Membrankonstruktion, Intercontinental Hotel, Dubai, Architekt und Baujahr nicht bekannt, Bild Hilka Rogers.

- Abb. 2.31** Verzweigungsstruktur, Versuche für die Magnetbahn, aus Frei Otto, *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, 1985.
- Abb. 2.32** Freiheitsstatue, New York, Frédéric Auguste Bartholdi und Gustave Eiffel, gebaut um 1880, Bild Paul Rogers.
- Abb. 2.33** Gerüst der Freiheitsstatue, New York, aus Nigel Hawkes, *Wunderwerke*, Augsburg, 1994, 27.
- Abb. 2.34** Herstellung der Freiheitsstatue, Paris, um 1880, aus Nigel Hawkes, *Wunderwerke*, Augsburg, 1994, 26.
- Abb. 2.35** Detail der Freiheitsstatue, New York, Bild Paul Rogers
- Abb. 2.36** Das Glashaus für die Werkbundaustellung in Köln, Bruno Taut, Baujahr 1914, aus Oliver Herwig, *Featherweights*, München: Prestel Verlag, 2003, 24.
- Abb. 2.37** Geometrische Untersuchung der Kuppel des Glashauses, Bruno Taut, Baujahr 1914, aus Berthold Burkhardt und Bojan Velikanje, "Konstruktion der Kuppel des Glashauses in Köln", Berlin, 1994, S. 135
- Abb. 2.38** Einsteinturm, Potsdam, Erich Mendelsohn, Baujahr 1921, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.39 bis 2.41** Detail Einsteinturm, Potsdam, Erich Mendelsohn, Baujahr 1921, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.42** Sydney Opera Hall, Sydney, Australien, Architekt Jorn Utzon, Ingenieur Ove Arup, Baujahr 1973, aus Nigel Hawkes, *Wunderwerke*, Augsburg, 1994, 98.
- Abb. 2.43** Skizze der Sydney Opera Hall, Australien, Architekt Jorn Utzon, Ingenieur Ove Arup, Baujahr 1973, aus Ove Arup, und Jack Zunz, "Sydney Opera House", 1969.
- Abb. 2.44** Modell der Sydney Opera Hall, Australien, Architekt Jorn Utzon, Ingenieur Ove Arup, Baujahr 1973, aus Derek Walker, *Great Engineers*, London, 1987, 144.
- Abb. 2.45** Philips Pavillon, Brüssel, B, von Yannis Xenakis und Le Corbusier, Baujahr 1958, aus Allgemeine Deutsche Philips Industrie, *Der Philips Pavillon auf der Brüsseler Weltausstellung 1958*, Sonderausgabe, 35.
- Abb. 2.46** Grundrisskizze des Philips Pavillon, Brüssel; B, von Yannis Xenakis und Le Corbusier, Baujahr 1958, aus Allgemeine Deutsche Philips Industrie, *Der Philips Pavillon auf der Brüsseler Weltausstellung 1958*, Sonderausgabe, Abb. 4.
- Abb. 2.47** Modell des Philips Pavillon, Brüssel, B, von Yannis Xenakis und Le Corbusier, Baujahr 1958, aus Allgemeine Deutsche Philips Industrie, *Der Philips Pavillon auf der Brüsseler Weltausstellung 1958*, Sonderausgabe, 4.

- Abb. 2.48** Bau des Philips Pavillon, Brüssel; B, von Yannis Xenakis und Le Corbusier, Baujahr 1958 aus Allgemeine Deutsche Philips Industrie, *Der Philips Pavillon auf der Brüsseler Weltausstellung 1958*, Sonderausgabe, 31.
- Abb. 2.49** Philharmonie, Berlin, von Hans Scharoun, Baujahr 1963, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 2.50** Urskizze der Philharmonie, von Hans Scharoun, Baujahr 1963, aus Edgar Wisniewski, *Die Berliner Philharmonie und ihr Kammermusiksaal*, Berlin, 1993.
- Abb. 2.51** Schnitt der Philharmonie, von Hans Scharoun, Baujahr 1963, aus Edgar Wisniewski, *Die Berliner Philharmonie und ihr Kammermusiksaal*, Berlin, 1993.
- Abb. 2.52** TWA Terminal, New York, von Eero Saarinen, Baujahr 1962, aus Pierluigi Serraino, *Eero Saarinen*, Köln, 2005, 60.
- Abb. 2.53** TWA Terminal, Innenansicht, von Eero Saarinen, Baujahr 1962, aus Oliver Herwig, *Featherweights*, München, 2003, 32.
- Abb. 2.52** TWA Terminal, Detail, von Eero Saarinen, Baujahr 1962, aus Pierluigi Serraino, *Eero Saarinen*, Köln, 2005, 66.

Kapitel 3

- Abb. 3.1** Bavinger House von Bruce Goff, Baujahr 1955, aus Jeffrey Cook, *The Architecture of Bruce Goff*, London, 1978.
- Abb. 3.2** Jüdisches Museum, Berlin, Architekt Daniel Libeskind, Ingenieure gse, Baujahr 1999, aus Christiane Borgelt und Regina Jost, *Konstruktion und Kreativität, Die Ingenieure der GSE*, Berlin, 2005.
- Abb. 3.3** Kaufhaus P&C, Köln, Architekt Renzo Piano, Ingenieure Knippers Helbig, Baujahr 2005, aus Jan Akkermann und Thorsten Helbig, "Das neue „Weltstadthaus“ von Peek & Cloppenburg", 2005.
- Abb. 3.4** Modell des Endless House von Friedrich Kiesler, um 1950, aus Silke Rothkirch, "Rothkirch spricht Kiesler", 2000, 7.
- Abb. 3.5** Das Lord's Media Centre von Future Systems, Ingenieure Arup Baujahr 1999, aus David Taylor, "Howzat!", 1999.
- Abb. 3.6** Body Zone im Millennium Dome, London, Branson Coates Architekten, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 1999, aus Oliver Herwig, *Featherweights*, München, 2003, 82.

- Abb. 3.7** Fadenmodell zur Formfindung, oblique WTC, Entwurf, NOX Architekten, Baujahr 2001, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 261.
- Abb. 3.8** Villa am See Zeichnung von Herrmann Finsterlin, 1922, aus Franco Borsi, *Herrmann Finsterlin, Architektur in seiner Idee*, Florenz, 1968, 63.
- Abb. 3.9** Guggenheim Museum, Bilbao, Spanien, von Frank Gehry, Ingenieure SOM, Baujahr 1999, aus Sutherland Lyall, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart, 2002, 149.
- Abb. 3.10** Computermodell des Dynaform BMW-Pavillons, Franken Architekten, Ingenieure Bollinger & Grohmann, Baujahr 2001, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 78.
- Abb. 3.11** Kunsthaus Graz, Modell der tragenden Konstruktion, Architekten Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger & Grohmann, Baujahr 2003, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 90.
- Abb. 3.12** Formfindung am Ballon, D-Tower, Doetinchem, NL, NOX Architekten, Baujahr 2004, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 161.
- Abb. 3.13** Fadenmodell zur Formfindung, Soft Office, Entwurf, NOX Architekten, Baujahr 2001, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 221.
- Abb. 3.14** Kant-Dreieck, Berlin, Architekt Josef Paul Kleihues, Ingenieure Fink, Baujahr 1994, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 3.15** Großes Gewächshaus, National Botanical Garden, Wales, Architekten Foster und Partner, Ingenieure Anthony Hunt, Baujahr 2000, aus Sutherland Lyall, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart, 2002, 66.
- Abb. 3.16** Japanischer Pavillon, EXPO 2000 Hannover, Wales, Architekten Shigeru Ban mit Frei Otto, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, aus Sutherland Lyall, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart, 2002, 46.
- Abb. 3.17** Lagerhalle Julio Herrera y Obes, Montevideo, Uruguay, von Eladio Dieste, Baujahr 1979, aus Eladio Dieste, "Works and Projects", Sevilla, 2001, 77.
- Abb. 3.18** Modell des TGV-Bahnhofs in Lyon, F, von Santiago Calatrava, Baujahr 1989, aus Dennis Sharp, *Santiago Calatrava*, London, 1992, 45.
- Abb. 3.19** Netz über dem Great Court des Britischen Museums, Architekten Foster und Partner, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 3.20** Eden Project, Cornwall, GB, Architekt Nicholas Grimshaw, Ingenieure Anthony Hunt, Baujahr 2001, aus Sutherland Lyall, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart, 2002, 56.

- Abb. 3.21** Computeranimation des D-Tower, Baujahr 2004, NOX Architekten, 2001, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 166.
- Abb. 3.22** Kohlkopf, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 3.23** Von der Entwurfsform zur ausgeführten Form, Hilka Rogers.

Kapitel 4

- Abb. 4.1 und 4.2** Entwurfsskizze vom Stadion in Chemnitz von Cecil Balmond, Wettbewerb 2002, aus Cecil Balmond, *informal*, München, 2002, 139.
- Abb. 4.3** Archimedische und logarithmische Spirale, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 4.4** Entwurfsskizze vom Victoria & Albert Museum London, von Cecil Balmond, Architekt Daniel Libeskind, Wettbewerb 2005, aus Cecil Balmond, *informal*, München, 2002, 202.
- Abb. 4.5** Umhüllende eines Faltvorgangs, aus Santiago Calatrava Valls, *Zur Faltbarkeit von Fachwerken*, Zürich, 1981, IV 10.
- Abb. 4.6** Jüdische Grundschule Berlin, Konstruktionszeichnung, Architekt Zvi Hecker, Ingenieure Pichler, Baujahr 1995, aus Karen Eisenloffel und Ingeborg Ermer, *Tragwerkstatt Gerhard Pichler*, Berlin, 2000, 108.
- Abb. 4.7** DZ-Bank am Pariser Platz, Berlin, Atriumdach, Architekt Frank O. Gehry, Ingenieure Schlaich Bergermann und Partner, Baujahr 2001, Bild Eddy Widjaja.
- Abb. 4.8** Messedach, Mailand, I, Architekt Massimiliano Fuksas, Ingenieure Schlaich Bergermann und Partner, Baujahr 2005, aus www.mero.de, 2007.
- Abb. 4.9** Metropol Parasol, Sevilla, E, Architekt Jürgen Mayer H., Ingenieure Arup, im Bau, aus www.jmeyerh.de, 2007.
- Abb. 4.10** BMW-Pavillon Dynaform, Frankfurt am Main, Architekt Bernhard Franken, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2001, aus Gernot Brauer, *Architektur als Markenkommunikation*, Basel, 2002, 118.
- Abb. 4.11** Mathematische Fläche der Überdachung des Great Court, British Museum, London, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, aus Chris Williams, "The Definition of Curved Geometry for Widespan Structures", London, 2000.

- Abb. 4.12** Body Zone, Parallele Schnitte, London, Architekten Branson Coates, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 1999, aus Chris Williams, "The Definition of Curved Geometry for Widespan Structures", London, 2000.
- Abb. 4.13** Body Zone, FEM-Modell, London, Architekten Branson Coates, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 1999, aus Chris Williams, "The Definition of Curved Geometry for Widespan Structures", London, 2000.
- Abb. 4.14** Schnitte gebeulter Träger, William Fairbairn, aus Heinz Hossdorf, *Modellstatik*, Wiesbaden und Berlin, 1971, 30.
- Abb. 4.15** Ballspielhalle, Modell aus Mikrobeton, Madrid, Spanien, Architekt Secundino de Zuazo, Ingenieur Eduardo Torroja, Baujahr 1935, aus Heinz Hossdorf, *Modellstatik*, Wiesbaden und Berlin, 1971, 36.
- Abb. 4.16** Darstellung eines Maßstabgesetzes, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 4.17** Sydney Opera Hall, Statisches Modell aus Mikrobeton, Architekt Jorn Utzon, Ingenieure Arup, um 1965, aus Winfried Nerdinger, *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München, 2002, 57.
- Abb. 4.18** Bahnhof Stuttgart 21, Statisches Modell von Frei Otto, Architekt Christoph Ingenhoven mit Frei Otto, Ingenieure Buro Happold, Bild Frei Otto/Buro Happold.
- Abb. 4.19** Bahnhof Stuttgart 21, Statisches Computermodell, Architekt Christoph Ingenhoven mit Frei Otto, Ingenieure Buro Happold, Bild Buro Happold.
- Abb. 4.20** Victoria & Albert Museum, Anschauungsmodell, Architekt Daniel Libeskind, Ingenieure Arup, aus Winfried Nerdinger, *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München, 2002, 169.
- Abb. 4.21** Wasserfall, M.C. Escher, aus Bruno Ernst, *Der Zauberspiegel des M.C. Escher*, Berlin, 1986, 89.
- Abb. 4.22** Kugelhaus, Dresden, Architekt Peter Birkenholz, Ingenieure M.A.N, Baujahr 1928, aus Winfried Nerdinger, *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München, 2002, 142.
- Abb. 4.23** Optimierung eines Kragarms, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 4.24** Optimierung eines Bogens, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 4.25** Optimierung eines Einfeldträgers, aus Kai-Uwe Bletzinger and Kurt Maute, "Strukturoptimierung", Berlin, 1996, 133.
- Abb. 4.26** Mero Knoten, aus Mick Eekhout, *Hohlprofile in der Architektur*, Delft, 1996, 116.

Kapitel 5

- Abb. 5.1** Son-O-House, Son en Breugel, NL, 2004, Architekten NOX, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 195
- Abb. 5.2** Gebogene Holzfläche von Charles und Ray Eames, aus Gloria Koenig, *Eames*, Köln, 2005, 20.
- Abb. 5.3** Darstellung des Biegevorgangs eines Holzstabes, aus Otto Eggert, *Untersuchung der Einflußgrößen beim Biegen von Vollholz*, Stuttgart, 1995.
- Abb. 5.4** Gebogene Fläche als Skulptur aus Formschichtholz von Charles und Ray Eames, aus Gloria Koenig, *Eames*, Köln, 2005, 23.
- Abb. 5.5** Detail der Multihalle in Mannheim von Carlfried Mutschler und Frei Otto, Ingenieure Arup, Baujahr 1975, aus Winfried Nerdinger., *Frei Otto, Das Gesamtwerk*, Berlin, 2005, 289
- Abb. 5.6** Werkstatt der Hooke Park School of Woodland Industries, Dorset, GB, Architekten Burton & Korelek mit Frei Otto, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 1988, Bild Frei Otto
- Abb. 5.7** Royal Show Canopy von Studenten der Hooke Park School of Woodland Industries, Stoneleigh, GB, 1993, Bild Hilka Rogers
- Abb. 5.8** Darstellung des Kaltwalzens, aus Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT), *Anwendung von Hohlprofilen im Maschinenbau*, Köln, 1996.
- Abb. 5.9** Darstellung des freien Biegens aus Wolfgang Bauer, *Freies Biegen von Aluminium-Profilen*, Paderborn, 2002.
- Abb. 5.10** Detail der Treppe des Wechsausstellungsgebäudes zum Deutschen Historischen Museum in Berlin, Architekt I.M. Pei, Ingenieure LERA, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.11** Wasserpavillon H₂Oexpo, Neeltje Jans, NL, Architekten NOX, Baujahr 1997 aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 23.
- Abb. 5.12** Querschnittsverformung von Rechteckhohlprofilen, aus Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT), *Anwendung von Hohlprofilen im Maschinenbau*, Köln, 1996.
- Abb. 5.13** BMW-Welt, München, Coop Himmelb(l)au, Ingenieure Bollinger & Grohmann, Baujahr 2006, aus Johann Köppl et al , "BMW-Welt München", 2005.
- Abb. 5.14** BMW Take-Off Skulptur, Flughafen München, Architekten Bernhard Franken, Ingenieure Bollinger & Grohmann, Baujahr 2003, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 85.

- Abb. 5.15** Induktionsbiegen, aus Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT), *Anwendung von Hohlprofilen im Maschinenbau*, Köln, 1996.
- Abb. 5.16 und 5.17** Herstellung gekrümmter Formen für den BMW-Pavillon Dynaform, Frankfurt am Main, Architekt Bernhard Franken, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2001, aus Gernot Brauer, *Architektur als Markenkommunikation*, Basel, 2002, 110.
- Abb. 5.18** BMW-Pavillon Bubble, Frankfurt am Main und München, Baujahr 1999, Architekt Bernhard Franken, Ingenieure Bollinger und Grohmann, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 75.
- Abb. 5.19** Guggenheim Museum, Bilbao, E, Architekt Frank O. Gehry, Ingenieure SOM, Baujahr 1999, aus Sutherland Lyall, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart, 2004, 151.
- Abb. 5.20** Lord's Media Centre, London, GB, Architekt Future Systems, Ingenieure Arup, Baujahr 1999, aus Broschüre der Imagination Awards, 1999.
- Abb. 5.21** Gussknoten, aus Mick Eekhout, *Hohlprofile in der Architektur*, Delft, 1996, 115.
- Abb. 5.22** Molekülaufbau der Kunststoffe, aus Roland Burgard, "Kunststoffe – vom Imitat zum Werkstoff", Wien, 2004, 22.
- Abb. 5.23** Membranbau der Firma FESTO, 1996, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.24** Herstellung der Kunststoffschale für den D-Tower, Architekten NOX, Baujahr 2004, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 165.
- Abb. 5.25** Herstellung der Kunststoffscheiben für den BMW-Pavillon Bubble, Frankfurt am Main und München, Architekt Bernhard Franken, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 1999, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 74.
- Abb. 5.26** Ort der Information, Denkmal für die Ermordeten Juden Europas, Berlin, Architekt Peter Eisenman, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2006, Bild Buro Happold.
- Abb. 5.27** Ort der Information, Bau der Schalung, Denkmal für die Ermordeten Juden Europas, Berlin, Architekt Peter Eisenman, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2006, Bild Buro Happold.
- Abb. 5.28** Fabrikhalle Eschmann, Bau der Schalung, Thun, CH, Ingenieur Heinz Isler, Baujahr 1958, aus Jürgen Joedicke, *Schalenbau*, Stuttgart, 1962, 173.
- Abb. 5.29** Aufbringen von Spritzbeton, aus Friedbert Kind-Barkausas et al., *Beton-Atlas*, Bundesverband der Deutschen Zement-Industrie e.V., Köln, 1995.

- Abb. 5.30** Kaufhaus Selfridges, Birmingham, GB, Architekt Future Systems, Ingenieure Arup, Baujahr 2003, aus Ed Clark, und David Gilpin, "Selfridges, Birmingham", 2005.
- Abb. 5.31** Glasbiegevorgang, aus Katalog der Fa. Tambest.
- Abb. 5.32** Treppe des Wechselausstellungsgebäudes zum Deutschen Historischen Museum in Berlin, Architekt I.M. Pei, Ingenieure LERA, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.33** Form zur Glasherstellung, Skansen Park, Stockholm, S, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.34** Iglesia de Atlántida, Atlántida, Uruguay, Ingenieur Eladio Dieste, Baujahr 1960, aus Eladio Dieste, "Works and Projects", Sevilla, 2001, 150.
- Abb. 5.35** Detail der Schornsteine, Cecilienhof Potsdam, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.36** Versuche mit Robotern zur Herstellung gekrümmter Flächen in Mauerwerk, aus Fabio Gramazio, und Matthias Kohler, "Die Informierung von Architektur", 2006.
- Abb. 5.37** Formen aus flexiblen Gittern, aus Conrad Roland, *Frei Otto - Spannweiten*, Berlin, 1965, 123.
- Abb. 5.38** Multihalle in Mannheim im Bau, Architekten Carlfried Mutschler mit Frei Otto, Ingenieure Arup, Baujahr 1975, aus Michael Weinstock, "Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group," 2004.
- Abb. 5.39** Multihalle in Mannheim im Bau, Architekten Carlfried Mutschler mit Frei Otto, Ingenieure Arup, Baujahr 1975, aus Oliver Herwig, *Featherweights*, München, 2003, 75
- Abb. 5.40** Knotendetail, Japanischer Pavillon, EXPO 2000, Hannover, Architekt Shigeru Ban, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, Bild Buro Happold.
- Abb. 5.41** Modellbau für den Japanischen Pavillon, Bild Shigeru Ban/Buro Happold.
- Abb. 5.42** Ebene Faltung eines regulären Rhomboiden Netzes, aus Santiago Calatrava Valls, *Zur Faltbarkeit von Fachwerken*, Zürich, 1981, III 9.
- Abb. 5.43** Räumlicher Faltvorgang, aus Santiago Calatrava Valls, *Zur Faltbarkeit von Fachwerken*, Zürich, 1981, III 39-40.
- Abb. 5.44** Räumlicher Faltvorgang, aus Santiago Calatrava Valls, *Zur Faltbarkeit von Fachwerken*, Zürich, 1981, III 30.
- Abb. 5.45** Experimente mit beweglichen Strukturen von J.S. Lebedew, aus J.S. Lebedew, *Architektur und Bionik*, Moskau und Berlin, 1983, 166.

- Abb. 5.46** Schirme, Frei Otto und Bodo Rasch mit Buro Happold, hier auf der Biennale in Venedig, Bild Hilka Rogers, 1998.
- Abb. 5.47** Pneuforn von Frei Otto, aus Conrad Roland, *Frei Otto - Spannweiten*, Berlin, 1965, 95.
- Abb. 5.48** Spritzbeton für eine Schale von W. Neff, aus Werner Sobek, *Auf Pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen*, Stuttgart, 1987, 10.
- Abb. 5.49** Edinburgh Dome, Malvern Girl's College, Malvern, GB, Architekten Godwin Cowper, Bauverfahren Dante Bini, Baujahr 1978, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.50** Mögliche Pneufornen von Frei Otto, aus Conrad Roland, *Frei Otto - Spannweiten*, Berlin, 1965, 87.
- Abb. 5.51 und 5.52** Flexible Schalung, aus Lars Spuybroek, *NOX. Machining Architecture*, München, 2004, 164.
- Abb. 5.53** Maschendraht für Ferrocement, aus Edwin Bayer, "Ferrocement – Eigenschaften und Anwendungsgebiete", 1982.
- Abb. 5.54** Skulptur, Niki de St. Phalle, hier am Kunstmuseum Stockholm, S, Bild Hilka Rogers, 2007.
- Abb. 5.55** Hyposurface, flexible Struktur von Mark Goulthorpe, aus Mark Goulthorpe, "Precise Indeterminacy", 2004.
- Abb. 5.56** Entwurfsmodell für den Zollhof, Düsseldorf, von Frank O. Gehry, Ingenieure Zimmerling/Holzmann, Baujahr 1999, aus Peter Cachola Schmal, *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 98.
- Abb. 5.57** Digitales Modell für den Zollhof, Düsseldorf, aus Peter Cachola Schmal, *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 99.
- Abb. 5.58** Herstellung der Styroporschalung für den Zollhof, von Frank O. Gehry, Ingenieure Zimmerling/Holzmann, Baujahr 1999, Düsseldorf, aus Peter Cachola Schmal, *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 102.
- Abb. 5.59** Fassade Haus C, Zollhof, Düsseldorf, von Frank O. Gehry, Ingenieure Zimmerling/Holzmann, Baujahr 1999, aus Peter Cachola Schmal, *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 104.
- Abb. 5.60** Phaeno Schience Centre, Wolfsburg, Architekt Zaha Hadid, Ingenieure Adams Kara Taylor und Tokarz Frerichs Leipold, Baujahr 2005, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.61** Längsschnitt, Phaeno Schience Centre, Wolfsburg, Ausschnitt aus der Planung Architekt Zaha Hadid, Ingenieure Adams Kara Taylor und Tokarz Frerichs Leipold, Baujahr 2005, Bild Hilka Rogers.

- Abb. 5.62** Detail, Phaeno Science Centre, Wolfsburg, Architekt Zaha Hadid, Ingenieure Adams Kara Taylor und Tokarz Frerichs Leipold, Baujahr 2005, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.63** Herstellung der Cones, Phaeno Science Centre, Wolfsburg, Architekt Zaha Hadid, Ingenieure Adams Kara Taylor und Tokarz Frerichs Leipold, Baujahr 2005, aus Peter Bährle und Roland Mayer, "Visionen in Beton", März, 2002.
- Abb. 5.64** Überdachung des Great Court, British Museum, London, GB, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, aus Spencer de Grey, "A Project Diary", München, 2001, 38.
- Abb. 5.65** Schnitt des Great Court, British Museum, London, GB, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, aus Diarmaid Fleming, "British Museum Great Court", 2001.
- Abb. 5.66** Eckdetail, Überdachung des Great Court, British Museum, London, GB, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.67** Untersicht, Überdachung des Great Court, British Museum, London, GB, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, Bild Hilka Rogers.
- Abb. 5.68** Knotendetail, Überdachung des Great Court, Architekt Norman Foster, Ingenieure Buro Happold, Baujahr 2000, aus Sören Stephan et al., "Stabwerke auf Freiformflächen", 2004.
- Abb. 5.69** Knotendetail, Überdachung der Hofes der DZ-Bank Am Pariser Platz, Berlin, Architekt Frank O. Gehry, Ingenieure Schlaich Bergermann und Partner, Baujahr 2001, aus Sören Stephan et al., "Stabwerke auf Freiformflächen", 2004.
- Abb. 5.70** Kunsthaus Graz, A, Architekt Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2003, aus Jeremy Melvin, "The Kunsthaus at Graz", 2004, 101.
- Abb. 5.71** Längsschnitt, Kunsthaus Graz, A, Architekt Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2003, aus Jeremy Melvin, "The Kunsthaus at Graz", 2004, 103.
- Abb. 5.72** Tragwerk der Abfangebene, Kunsthaus Graz, A, Architekt Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2003, aus Kristin Freireiss, *curves and spikes*, Katalog zur Ausstellung, 2003, 23.
- Abb. 5.73** Bau der Hülle, Kunsthaus Graz, A, Architekt Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2003, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 91.

Abb. 5.74

1:1-Modell der Hülle, Kunsthaus Graz, A, Architekt Peter Cook und Colin Fournier, Ingenieure Bollinger und Grohmann, Baujahr 2003, aus Peter Cachola Schmal, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel, 2004, 92.

Kapitel 6

Alle Abbildungen

Hilka Rogers, 2006

Schlussfolgerungen

Abb. 7.1

Mathematical Bridge, Cambridge, GB, von William Etheridge, Baujahr im Original 1749, Nachbauten 1866 und 1905, Bild Hilka Rogers, 2006

Literatur

- [Ackermann 1988] **Ackermann, Kurt**, *Tragwerke in der konstruktiven Architektur, Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1988.
- [Akkermann 2005] **Akkermann, Jan und Helbig, Thorsten**, "Das neue „Weltstadthaus“ von Peek & Cloppenburg", *Beratende Ingenieure*, November-Dezember, 2005.
- [Addis 1994] **Addis, Bill**, *The Art of the Structural Engineer*, London: Artemis London Ltd., 1994.
- [Alberti 1485] **Alberti, Leon Battista**, *Zehn Bücher über die Baukunst*, erste Drucklegung 1485, Ausgabe Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1975.
- [Andrews 1989] **Andrews, Peter A.**, „Zwiebelkuppel und Gitterzelt“, in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989, 48-69.
- [Angerer 1960] **Angerer, Fred**, *Bauen mit tragenden Flächen*, München: Verlag Georg D.W. Callwey, 1960.
- [Arup 1969] **Arup, Ove and Zunz, Jack**, "Sydney Opera House", *The Structural Engineer*, 1969.
- [Bach 1987] **Bach, Klaus; Burkhardt, Berthold und Otto, Frei**, *Seifenblasen*, IL 18, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1987.
- [Bährle 2002] **Bährle, Peter und Mayer, Roland**, "Visionen in Beton", *beton-informationen spezial*, März, 2002.
- [Balmond 2002] **Balmond, Cecil**, *informal*, München: Prestel Verlag, 2002.
- [Baltensperger 1996] **Baltensperger, André**, *Iannis Xenakis und die Stochastische Musik, Komposition im Spannungsfeld von Architektur und Mathematik*, Bern: Verlag Paul Haupt, 1996.
- [Barrow 2006] **Barrow, Larry**, "Free form Design – The Pursuit of Beauty", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 27-32.
- [Barthel 2001] **Barthel, Rainer**, "Die Schalen Eladio Diestes, Form – Konstruktion - Tragwirkung" in R. Barthel, Hrsg., *Eladio Dieste, Form und Konstruktion*, Darmstadt: Verlag Das Beispiel GmbH, 2001, 17-40.

- [Barthel 2002] **Barthel, Rainer**, „Form der Konstruktion – Konstruktion der Form“, in W. Nerdinger, Hrsg., *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München: Prestel Verlag, 2002, 14-26.
- [Bauer 2002] **Bauer, Wolfgang**, *Freies Biegen von Aluminium-Profilen*, Paderborn: Universität-Gesamthochschule Paderborn, 2002.
- [Baumgart 1977] **Baumgart, Fritz**, *Sachlexikon der Architektur*, Köln: DuMont Buchverlag, 1977.
- [Bayer 1982] **Bayer, Edwin**, "Ferrocement – Eigenschaften und Anwendungsgebiete", *Beton- und Stahlbetonbau*, Nr. 9, 1982.
- [G. Becker 1983] **Becker, Gerd**, *Tragkonstruktionen des Hochbaus Teil 1, Konstruktionsgrundlagen*, Düsseldorf: Werner Verlag GmbH, 1983.
- [G. Becker 1987] **Becker, Gerd**, *Tragkonstruktionen des Hochbaus Teil 2, Tragwerkselemente und Tragwerksformen*, Düsseldorf: Werner Verlag GmbH, 1987.
- [M. Becker 2004] **Becker, Mirko, Tessmann, Oliver**, "ephemeralMATTER", in R. Burgard, Hrsg., *Kunststoffe und Freie Formen*, Wien: Springer Verlag, 2004, 53-56.
- [W. Becker 2004] **Becker, Wieland**, "Heitere Beschwingtheit", *db*, Heft 2, 2004, 61-66.
- [Bieger 1987] **Bieger, Klaus-Wolfgang**, "Dischingers Leistungen bei der Entwicklung der Schalenbauweise", in M. Specht, Hrsg., *Spannweite der Gedanken*, Berlin: Springer Verlag, 1987, 67-80.
- [Billinger 2004] **Billinger, Wolfgang**, "Composite Components im Flugzeugbau", in R. Burgard, Hrsg., *Kunststoffe und Freie Formen*, Wien: Springer Verlag, 2004, 90-92.
- [Bletzinger 1996] **Bletzinger, Kai-Uwe and Maute, Kurt**, "Strukturoptimierung", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 131-147.
- [Bögle 2005] **Bögle, Annette**, *Zur Morphologie Komplexer Formen im Bauwesen*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2005.
- [Bögle 2006] **Bögle, Annette**, "Free Form Design – Challenge and Chance for Educating Structural Engineering", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 146-148.
- [Böhm 2002] **Böhm, Florian**, "Evolutionäres Entwerfen?", *Arch+ 159, Formfindungen*, Mai, 2002, 128-133.
- [Bollinger 1999] **Bollinger, Klaus**, "Auch ein Rohbau muss schön sein", *db*, Heft 12, 1999, 104-106.

- [Bollinger 2005] **Bollinger, Klaus; Grohmann, Manfred; Pfanner, Daniel und Schneider, Jörg**, "Tragkonstruktion der BMW-Welt in München", *Stahlbau*, Jahrgang 74, Nr. 7, 2005, 483-491.
- [Borgelt 2005] **Borgelt, Christiane und Jost, Regina**, *Konstruktion und Kreativität, Die Ingenieure der GSE*, Berlin: Jovis Verlag, 2005.
- [Borsi 1968] **Borsi, Franco**, *Herrmann Finsterlin, Architektur in seiner Idee*, Florenz: Libreria Editrice, 1968.
- [Brauer 2002] **Brauer, Gernot**, Hrsg., *Architektur als Markenkommunikation*, Basel: Birkhäuser Verlag, 2002.
- [Brinkmann 1990] **Brinkmann, Günther**, *Leicht und Weit, Zur Konstruktion weitgespannter Tragwerke*, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1990.
- [Burgard 2004] **Burgard, Roland**, "Kunststoffe – vom Imitat zum Werkstoff", in R. Burgard, Hrsg., *Kunststoffe und Freie Formen*, Wien: Springer Verlag, 2004, 19-26.
- [Burkhardt 1988/1] **Burkhardt, Berthold et al.**, "Die schwierige Konstruktion einfacher Formen", *Festschrift zum 60. Geburtstag von Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Krauss*, 1988, 36-45.
- [Burkhardt 1988/2] **Burkhardt, Berthold**, "Eiserne Rohrkonstruktionen im 19. Jahrhundert", in *Proceedings of the 1. International Symposium of SFB 230 Natürliche Konstruktionen*, 1988, 152-164.
- [Burkhardt 1994] **Burkhardt, Berthold und Velikanje, Bojan**, "Konstruktion der Kuppel des Glashauses in Köln", in Speidel, M., Hrsg., *Bruno Taut, Natur und Fantasie 1880-1938*, Berlin: Ernst und Sohn, 1994, S. 134-136.
- [Burkhardt 2000] **Burkhardt, Berthold**, „Kurze Geschichte der Betonschalen“, in W. Dechau, Hrsg., *Kühne Solitäre*, Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 2000.
- [Burkhardt 2005] **Burkhardt, Berthold**, „Das Institut für leichte Flächentragwerke, Universitätsinstitut und Spinnerzentrum“, in W. Nerdinger, Hrsg., *Frei Otto, Das Gesamtwerk*, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2005.
- [Büttner 1977] **Büttner, Oskar und Hampe, Erhard**, *Bauwerk Tragwerk Tragstruktur, Band 1*, Stuttgart: Hatje-Verlag, 1977.
- [Büttner 1985] **Büttner, Oskar und Hampe, Erhard**, *Bauwerk Tragwerk Tragstruktur, Band 2*, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1985.
- [Calatrava 1981] **Calatrava Valls, Santiago**, *Zur Fallbarkeit von Fachwerken*, Zürich: ETH Zürich, 1981.
- [CIDECT 1996] **Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT)**, Hrsg., *Anwendung von Hohlprofilen im Maschinenbau*, Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1996.

- [Ciorra 1995] **Ciorra, Pippo**, *Peter Eisenman. Bauten und Projekte*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1995.
- [Clark 2005] **Clark, Ed and Gilpin, David**, "Selfridges, Birmingham", *The Arup Journal*, Heft 1, 2005, 3-10.
- [J. Cook 1978] **Cook, Jeffrey**, *The Architecture of Bruce Goff*, London: Granada Publishing Ltd., 1978.
- [M. Cook 2006/1] **Cook, Michael**, "Designing - Naturally", Vortrag auf dem AA Symposium am 17.03.2006, *Differentiated Structures in Nature and Design*, London, 2006.
- [M. Cook 2006/2] **Cook, Michael**, *Gespräch mit der Autorin am 17.03.2006*, British Museum, London, 2006.
- [Cowan 1966] **Cowan, Henry J.**, *An Historical Outline of Architectural Science*, London: Elsevier Publishing Company, Elsevier Architectural Science Series, 1966.
- [de Grey 2001] **de Grey, Spencer**, "A Project Diary", in N. Foster, D. Sudjic, S. de Grey, Hrsg., *Norman Foster and the British Museum*, München: Prestel Verlag, 2001, 38-65.
- [Dieste 2001] **Dieste, Eladio**, "Works and Projects", in C. Gutiérrez, Hg., *Eladio Dieste 1943-1996*, Sevilla: Junta de Andalucía, 2001.
- [Eekhout 1996] **Eekhout, Mick**, *Hohlprofile in der Architektur*, Delft: Meinema, 1996.
- [Eekhout 2006] **Eekhout, Mick**, "GRP Sandwich Roof Structures for 'Liquid Design' Architecture", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 56-78.
- [Eggert 1995] **Eggert, Otto**, *Untersuchung der Einflußgrößen beim Biegen von Vollholz*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 1995.
- [Ehresmann 1996] **Ehresmann, Jens**, *Automatisiertes Biegen von Profilen zu Konstruktionsteilen von nichtkreisförmiger, flexibel vorgebarter Kontur*, Hamburg: TU Hamburg-Harburg, 2002.
- [Einhäuser 2004] **Einhäuser, Sabine und Stelzer, Katharina**, "Faserverstärkte Kunststoffe", *arch+ 172, Material*, Dezember, 2004, 34-37.
- [Eisenloffel 2000] **Eisenloffel, Karen und Ermer, Ingeborg**, Hrsg., *Tragwerkstatt Gerhard Pichler*, Berlin: Gebr. Mann Verlag, 2000.
- [Eisenman 2004] **Eisenman, Peter**, "Memorial to the Murdered Jews of Europe", in P. Noever, Hrsg., *Peter Eisenman. Barfuß auf weiß glühenden Mauern*, Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz Verlag, 2004.
- [Emam 2005] **Emam, Khaled Hassan**, *Entwurf von Tragkonstruktionen im Einklang von Nutzung, Konstruktion und Gestalt*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2005.

- [Engel 1997] **Engel, Heino**, *Tragsysteme, Structure Systems*, Ostfildern-Ruit: Gerd Hatje Verlag, 1997.
- [Ernst 1986] **Ernst, Bruno**, *Der Zauberspiegel des M.C. Escher*, Berlin: TACO Verlagsgesellschaft, 1986.
- [Escrig 1996] **Escrig, F.; Sanchez, J. and Valcárcel, P.**, "Recent Realizations in Deployable Structures", in IASS Proceedings *Conceptual Design of Structures Vol. II*, 1996, 994-1002.
- [Evans 1995] **Evans, Robin**, *The Projective Cast*, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [Fischer 1990] **Fischer, Manfred**, "Ingenieurentwurf und Architektenentwurf", in W. Walochnik, E. Reyer, E. Kleinschmidt, Hrsg., *Bauwerksplanung*, Köln: Rudolf Müller Verlag, 1990, 163-172.
- [Fitchen 1988] **Fitchen, John**, *Mit Leiter, Strick und Winde, Bauen vor dem Maschinenzeitalter*, Basel: Birkhäuser Verlag, 1988.
- [Fleming 2001] **Fleming, Diarmaid**, "British Museum Great Court," *New Civil Engineer*, Sonderdruck, 26.04.2001.
- [Flury 2002] **Flury, Pius**, "Die Suche nach der perfekten Schale", *tec 21*, Heft 49-50, 2002, 13-17.
- [Freireiss 2003] **Freireiss, Kristin**, Hg., *curves and spikes, Katalog zur Ausstellung, Aedes Galerie*, 2003.
- [Fritz 2006] **Fritz, Oliver**, "Handwerk im Computerzeitalter", *archithese*, Heft 4, 2006, 26-31.
- [Führer 1995] **Führer, Wilfried; Ingendaaij, Susanne und Stein, Friedhelm**, *Der Entwurf von Tragwerken*, Köln: Rudolf Müller Verlag, 1995.
- [Fuhrmann 1992] **Fuhrmann, Hilka**, *Engineering Design in Research, Education and Practice*, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [Gabriel 2006] **Gabriel, Andreas**, "Eine andere Art von Raum. Ein Gespräch mit Zaha Hadid" *Detail*, Band 1/2, 2006, 6-11.
- [Gaß 1990] **Gaß, Siegfried**, *Experimente*, IL 25, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1990.
- [Gehry 2001] **Gehry, Frank. O. & Associates; Beucker Maschlanka & Partner**, "Jedes Bauwerk ist eine Skulptur", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser Verlag, 2001, 92-109.
- [Geyer 2005] **Geyer, Phillipp**, *Optimierung von Tragwerken*, Vortrag an der Universität der Künste, Berlin, 2005.

- [Giedion 1965] **Giedion, Siegfried**, *Raum Zeit Architektur*, Ravensburg: Otto Maier Verlag, 1965.
- [Glaeser 2004] **Glaeser, Georg**, "Die Theorie der Freiformflächen", in R. Burgard, Hrsg., *Kunststoffe und Freie Formen*, Wien: Springer Verlag, 2004, 45-52.
- [Glaeser 2005] **Glaeser, Georg**, *Geometrie und ihre Anwendungen in Kunst, Natur und Technik*, München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 2005.
- [Glück 1983] **Glück, J.; Jungbluth, O. und König, G.**, "Kreativität im Tragwerksentwurf", *Baukultur*, Band 1, 1983, 14-16.
- [Goulthorpe 2004] **Goulthorpe, Mark**, "Precise Indeterminacy", *Praxis*, Heft 6, 2004, 28-45.
- [Graefe 1986] **Graefe, Rainer**, "Zur Formgebung von Bögen und Gewölben", *architektura*, 16. Jahrgang, Heft 1, 1986, 50-67.
- [Graefe 1989] **Graefe, Rainer**, „Die Bogendächer von Philibert de l'Orme“, in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989, 99-116.
- [Graefe 1996] **Graefe, Rainer**, "Aspekte der Geschichte des Konstruierens", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 74-77.
- [Gramazio 2006] **Gramazio, Fabio und Kohler, Matthias**, "Die Informierung von Architektur", *archithese*, Heft 4, 2006, 32-33.
- [Grupp 2006] **Grupp, Peter Otto**, *Gespräch mit der Autorin am 31.01.2006*, Büro GSE, Berlin, 2006.
- [N. Hawkes 1994] **Hawkes, Nigel**, *Wunderwerke*, Augsburg: Weltbild Verlag GmbH, 1994.
- [D. Hawkes 1999] **Hawkes, Dean**, "Court Circular", *the architect's journal*, 23.09.1999, 22-32.
- [Hecker 2000] **Hecker, Zvi**, „Die Grundschule der Jüdischen Gemeinde zu Berlin“, in Eisenloffel, K. und Ermer, I., Hrsg., *Tragwerkstatt Gerhard Pichler*, Berlin: Gebr. Mann Verlag, 2000.
- [Heinle 1996] **Heinle, Erwin und Schlaich, Jörg**, *Kuppeln – aller Zeiten, aller Kulturen*, Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 1996.
- [Heise 2004] **Heise, Karin**, "Friedrich Reinhardt Balthasar Zollinger“, *db*, Heft 2, 2004, 68-75.
- [Herwig 2003] **Herwig, Oliver**, *Featherweights*, München: Prestel Verlag, 2003.
- [Hildebrandt 1996] **Hildebrandt, Stefan und Tromba, Anthony**, *Kugel, Kreis und Seifenblasen*, Basel: Birkhäuser Verlag, 1996.

- [Hoh-Slodczyk 2000]** Hoh-Slodczyk, Christine, "Von der Skizze zum Turm - vom Skizzieren zum Bauen", in Wüstenrot Stiftung Ludwigsburg, Hrsg., *Mendelsohn. Der Einsteinturm*, Stuttgart + Zürich: Karl Krämer Verlag, 2000, 28-51.
- [Höller 1996]** Höller, Ralf, "Experimentelle Formfindung", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 106-111.
- [Höller 1999]** Höller, Ralf, *FormFindung*, Mähringen: Dr. Thomas Balistier, 1999.
- [Hossdorf 1971]** Hossdorf, Heinz, *Modellstatik*, Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1971.
- [Hovestadt 2006]** Hovestadt, Ludger, "Strategien zur Überwindung des Rasters", *archithese*, Heft 4, 2006, 76-85.
- [Hübner 2006]** Hübner, Peter, „Bauen für den Menschen“, Vortrag an der Universität der Künste am 30.11.2006, Berlin, 2006.
- [Huse 2000]** Huse, Norbert, "Facetten eines Baudenkmals," in Wüstenrot Stiftung Ludwigsburg, Hrsg., *Mendelsohn. Der Einsteinturm*, Stuttgart + Zürich: Karl Krämer Verlag, 2000, 14-27.
- [Iyengar 1993]** Iyengar, H.; Baker, W. and Sinn, R., "The Broadgate Exchange House, London, UK", *Structural Engineering International*, Heft 4, 1993, 214-216.
- [Jaeger 2005]** Jaeger, Falk, "Frei Otto", *db*, Nr. 6, 2005, 72-77.
- [Jesberg 1996]** Jesberg, Paulgerd, *Die Geschichte der Ingenieurbaukunst*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1996.
- [Joedicke 1962]** Joedicke, Jürgen, *Schalenbau*, Dokumente der Modernen Architektur Band 2, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1962.
- [Junge 2002]** Junge, Richard und Göttig, Roland, „Entwurf und Computer“, in W. Nerdinger, Hrsg., *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München: Prestel Verlag, 2002, 38-41.
- [Kaltenbrunner 2002]** Kaltenbrunner, Robert, "Die Ästhetik des Unterzugs", *archithese*, Heft 6, 2002, 8-13.
- [Kawaguchi 1996]** Kawaguchi, M. and Okude, H., "Construction of "Kadoma Sports Center" by Pantadome System", in IASS Proceedings *Conceptual Design of Structures Vol. II*, 1996, 1044-1051.
- [Kempf 2005]** Kempf, Christin, "Das Prinzip Unschuld", in A. Geiger, S. Hennecke and C. Kempf, Hrsg., *Spielarten des Organischen*, Berlin: Dietrich Reimer Verlag, 2005, 182-199.

- [Khaidukov 1996] **Khaidukov, G.**, "Conceptual Design of Concrete Shells using Pneumatic Formworks", in IASS Proceedings *Conceptual Design of Structures Vol. II*, 1996, 1060-1065.
- [Kilian 2006] **Kilian, Axel**, "Informed Form", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, TU Delft, September 28-29, 2006, 13-23.
- [Kind-Barkausas 1995] **Kind-Barkausas, Friedbert; Kauhsen, Bruno; Polónyi, Stefan und Brandt, Jörg**, *Beton-Atlas*, Bundesverband der Deutschen Zement-Industrie e.V., Köln: Rudolf Müller Verlag, 1995.
- [Klein 2005] **Klein, Dietmar**, "Das neue Mercedes-Benz Museum in Stuttgart", *Beton- und Stahlbetonbau*, 100. Jahrgang, Nr. 4, 2005, 325-331.
- [Kloft 2001] **Kloft, Harald**, "Tragwerksplanung im Digitalen Workflow", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 198-205.
- [Kloft 2005] **Kloft, Harald**, "Non-Standard Structural Design for Non-Standard Architecture", in B. Kolarevic and A. Malkawi, Hg., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, New York: Spon Press, 2005, 135-148.
- [Kloft 2006] **Kloft, Harald**, *Interview mit der Autorin am 17.02.2006*, Büro osd, Frankfurt, 2006.
- [Koenig 2005] **Koenig, Gloria**, *Eames*, Köln: Taschen Verlag, 2005.
- [Köppl 2005] **Köppl, Johann; Ludwig, Josef; Schidzig, Rüdiger und Wagner, Stefan**, "BMW-Welt München", *Stahlbau*, 74. Jahrgang, Heft 7, 2005, 492-498.
- [Kollár 1990] **Kollár, Lajos**, "Entwurf von Tragwerken: Wissenschaft oder Kunst?", in W. Walochnik, E. Reyer, E. Kleinschmidt, Hrsg., *Bauwerksplanung*, Köln: Rudolf Müller Verlag, 1990, 203-211.
- [Kolarevic 2005/1] **Kolarevic, Branko**, "Towards the Performative in Architecture", in B. Kolarevic and A. Malkawi, Hrsg., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, New York: Spon Press, 2005, 205-213.
- [Kolarevic 2005/2] **Kolarevic, Branko**, "Computing the Performative", in B. Kolarevic and A. Malkawi, Hrsg., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, New York: Spon Press, 2005, 195-201.
- [Kolarevic 2006] **Kolarevic, Branko**, "Blobs amidst Boxes", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, TU Delft, September 28-29, 2006, 6-12.
- [Kost 2003] **Kost, Bernd**, *Optimierung mit Evolutionsstrategien*, Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch GmbH, 2003.
- [Kraft 2004] **Kraft, Sabine**, "Werkstoffe – Eigenschaften als Variablen", *Arch+ 172, Material*, Dezember, 2004, 24-28.

- [Krausse 1993] Krausse, Joachim, "Kosmisches Haus in Leichtbauweise", in A. Thiekötter u.a., Hrsg., *Kristallisationen, Splitterungen*, Basel: Birkhäuser Verlag, 1993, 95-107.
- [Krausse 2002] Krausse, Joachim; Ropohl, Dietmar und Scheiffele, Walter, *Vom großen Refraktor zum Einsteinturm*, Dessau: Anhalt Edition, 2002.
- [Kudless 2006] Kudless, Andrew, "The Material Intelligence of Cellular Structures", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 141-145.
- [Kuhlmann 1998] Kuhlmann, Dörte, *Lebendige Architektur*, Weimar: Universitätsverlag Weimar, 1998.
- [Kurrer 2000] Kurrer, Karl-Eugen, "Baustatik und Ästhetik", *Baukultur*, Band 3, 2000, 38-44.
- [Kurrer 2002] Kurrer, Karl-Eugen, *Geschichte der Baustatik*, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2002.
- [Küster 2001] Küster, Rolf, *Phänomenologie der Form*, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2001.
- [Leach 2006] Leach, Neil, "Digital Morphogenesis", *archithese*, Heft 4, 2006, 44-49.
- [Lebedew 1983] Lebedew, J.S., *Architektur und Bionik*, Moskau und Berlin: MIR und VEB Verlag für Bauwesen, 1983.
- [Lemoine 1988] Lemoine, Bertrand, *Gustave Eiffel*, Basel: Birkhäuser Verlag, 1988.
- [Lev 2002] Lev, Sara, *Computing Buildings*, www.stanford.edu/group/STS/techne/Fall, 2002.
- [Liddell 2001] Liddell, Ian, "Creating Engineers", *The Structural Engineer*, Jahrgang 79, Heft 7, 2001, 27-32.
- [Linkwitz 1996] Linkwitz, Klaus; Ströbel, Dieter und Singer, Peter, "Die Analytische Formfindung", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 118-131.
- [Loomis] Loomis, John A., *Revolution of Forms, Cuba's Forgotten Art Schools*, New York: Princeton Architectural Press, 1999.
- [Loriers 2005] Loriers, Marie Christine, "Conquering the dimensions", *Techniques & architecture*, No 479, 2005, 22-27.
- [Lyll 2002] Lyll, Sutherland, *Ingenieur-Bau-Kunst*, Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2002.

- [Lynn 2004] **Lynn, Greg**, "Architektur versus Skulptur", in P. Noever, Hrsg., *Peter Eisenman. Barfuß auf weiß glühenden Mauern*, Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz Verlag, 2004.
- [Mainstone 1975] **Mainstone, Rowland**, *Developments in Structural Form*, Harmondsworth, Middlesex: Penguin Books Ltd., 1975.
- [Mainstone 1989] **Mainstone, Rowland**, "Einflüsse der Konstruktion auf die Form von Kuppeln und Gewölben", in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989.
- [Mark 1995] **Mark, Robert**, *Architectural Technology up to the Scientific Revolution*, Cambridge, MA: First MIT Press, Second Printing, 1995.
- [Martins 1998] **Martins, Luis Cândia**, "Morphologische Überlegungen zur Konstruktion", *Bauingenieur*, Jahrgang 73 Heft 7/8, 1998, 325-332.
- [Martins 1996] **Martins, Luis Cândia**, *Morphologie der gekrümmten Flächentragwerke*, Zürich: ETH Zürich, 1996.
- [Melvin 2004] **Melvin, Jeremy**, "The Kunsthhaus at Graz", *AD*, Emergence: Morphogenetic Design Strategies, Vol 74 No 3 May/June 2004, 101-104.
- [Meyer 1994] **Meyer, Bruno Hans**, *Zur Gestaltungsaufgabe des Bauingenieurs*, Zürich: ETH Zürich, 1994.
- [Michailenko 1986] **Michailenko, W.I. und Kaschtschenko, A.W.**, *Natur - Geometrie - Architektur*, Kleine Reihe Architektur, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1986.
- [Motro 2006] **Motro, René and Dresp, Birgitta**, "Human Perception, visual art and free-form structural design", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 33-37.
- [Müller 1989] **Müller, Werner**, "Von der Norm zur Form – die Konstruktion spätgotischer Zierkonsolen", in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989.
- [Nerdinger 2002] **Nerdinger, Winfried**, Hrsg., *Exemplarisch. Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*, München: Prestel Verlag, 2002.
- [Nerdinger 2005] **Nerdinger, Winfried**, Hrsg., *Frei Otto, Das Gesamtwerk*, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2005.
- [Noever 2004] **Noever, Peter**, Hrsg., *Peter Eisenman. Barfuß auf weiß glühenden Mauern*, Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz Verlag, 2004.
- [Novak 2001] **Novak, Marcos**, "Fließende-. Trans-. Unsichtbare-: Der Aufstieg und die Ardentstehung des Digitalen in der Architektur. Eine Geschichte", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 214-247.

- [Oosterhuis 2006] **Oosterhuis, Kas**, "Interview", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 46-55.
- [Osborn 1963] **Osborn, Alex**, *Applied Imagination*, New York: Charles Scribner's Sons, 1963.
- [Otto 1954] **Otto, Frei**, *Das Hängende Dach*, Berlin: Bauwelt Verlag, 1954.
- [Otto 1962] **Otto, Frei**, *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Berlin: Ullstein Fachverlag, 1962.
- [Otto 1985] **Otto, Frei**, *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1985.
- [Otto 1988] **Otto, Frei**, *Form*, IL 22, Form-Kraft-Masse 2, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1988.
- [Otto 1989] **Otto, Frei**, „Was können die alten Steinbaumeister gewusst haben, um entwerfen und bauen zu können?“, in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989.
- [Otto 1992] **Otto, Frei**, *Konstruktion*, IL 23, Form-Kraft-Masse 3, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1992.
- [Otto 1994] **Otto, Frei**, *Alte Baumeister*, IL 37, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1994.
- [Otto 1997] **Otto, Frei**, *Prinzip Leichtbau*, IL 24 Form-Kraft-Masse 4, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1997.
- [Palladio 1570] **Palladio, Andrea**, *Die vier Bücher zur Architektur*, nach der Ausgabe Venedig 1570, Zürich: Artemis, 1983.
- [Patzelt 1974] **Patzelt, Otto**, *Wachsen und Bauen. Konstruktionen in Natur und Technik*, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1974.
- [Pearson 2000] **Pearson, Andy**, "21st-century classic", *building*, Jahrgang 23, Juni, 2000, 47-53.
- [Peters 2002] **Peters, Tom**, "Berührungspunkte", *archithese*, Heft 6, 2002, 14-19.
- [Philips 1958] **Allgemeine Deutsche Philips Industrie**, *Der Philips Pavillon auf der Brüsseler Weltausstellung 1958*, Sonderausgabe.
- [Pichler 2000] **Pichler, Gerhard**, "Die Baukonstruktion, oder: Warum bleibt der Einsteinturm ein Pflegefall?", in Wüstenrot Stiftung Ludwigsburg, Hrsg., *Mendelsohn. Der Einsteinturm*, Stuttgart + Zürich: Karl Krämer Verlag, 2000, 90-101.

- [Pichler 2004]** Pichler, Gerhard und Rogers, Hilka, "Die Konstruktion des Ahornblatts", in H. Schmidt mit Denkmalamt Berlin, Hrsg., *Das Ahornblatt*, bisher nicht veröffentlicht.
- [Polónyi 1970]** Polónyi, Stefan, Hrsg., *Schalen in Beton und Kunststoff*, Wiesbaden: Bauverlag GmbH, 1970.
- [Polónyi 1987]** Polónyi, Stefan, *...mit zaghafter Konsequenz. Aufsätze und Vorträge zum Tragwerksentwurf 1961-1987*, Ulrich Konrads, Hg., Bauwelt Fundamente Band 81, Braunschweig: Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, 1987.
- [Polónyi 1989]** Polónyi, Stefan, „Der Einfluß des Wissenschaftsverständnisses auf das Konstruieren“, in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989, 237-245.
- [Polónyi 1999]** Polónyi, Stefan, "Von der Statik- und Festigkeitslehre zur Tragwerkslehre", *db*, Heft 12, 1999, 96-98.
- [Pronk 2006]** Pronk, Arno; Houtman, Rogier and Afink, Menno, "The 2 million Euro Philips Pavilion", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 102-109.
- [Radelet-de Grave 2003]** Radelet-de Grave, Patricia, "(Jules) Artur Vierendeel", *db*, Heft 8/03, 2003, 84-87.
- [Ramm 1986]** Ramm, Eckehard und Schunck, Eberhard, *Heinz Isler Schalen*, Stuttgart: 1986.
- [Ramm 1996]** Ramm, Eckehard, „'Force follows Form' oder 'Form follows Force'?“, in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 68-73.
- [Rasch 1989]** Rasch, Jürgen, „Die Kuppel in der römischen Architektur“, in R. Graefe, Hrsg., *Zur Geschichte des Konstruierens*, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1989, 17-37.
- [Reeser 2004]** Reeser, Amanda and Schafer, Ashley, "Scratching the Surface", *Praxis*, Heft 6, 2004, 3-4.
- [Rice 1994]** Rice, Peter, *An Engineer Imagines*, London: Artemis London Ltd., 1994.
- [Rogers 2005]** Rogers, Hilka, "Organisch Konstruieren", in A. Geiger, S. Hennecke and C. Kempf, Hrsg., *Spielarten des Organischen*, Berlin: Dietrich Reimer Verlag, 2005, 164-181.
- [Roland 1965]** Roland, Conrad, *Frei Otto - Spannweiten*, Berlin: Verlag Ullstein GmbH, 1965.

- [Rothkirch 2000] **Rothkirch, Silke**, "Rothkirch spricht Kiesler", *form + zweck, Morphologie / Neobiologie*, 32. Jahrgang, Heft 17, 2000, 6-11.
- [Ruby 2001] **Ruby, Andreas**, "Beyond Form. Architektur im Zeitalter ihrer digitalen Reproduzierbarkeit", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 206-213.
- [Eiel Saarinen 1985] **Saarinen, Eiel**, *The Search for Form in Art and Architecture*, New York: Dover Publications Inc., 1985.
- [Eero Saarinen 2006] **Saarinen, Eero**, *Shaping the Future*, New Haven: Yale University Press, 2006.
- [Saggio 2001] **Saggio, Antonio**, "Neue Subjektivität. Architektur zwischen Kommunikation und Information", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001, 20-29.
- [Salvadori 1977] **Salvadori, Mario und Heller, Robert**, *Tragwerk & Architektur*, Braunschweig: Verlag Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1977.
- [Sanchez 2006] **Sanchez-Alvarez, Jaime**, "The form designer in the context of a supplier of free-form constructions", in Proceedings: *The First International Colloquium of Free Form Design*, Delft, September 28-29, 2006, 115-119.
- [J. Schlaich 1982] **Schlaich, Jörg**, "Haben Betonschalen eine Zukunft?", *beton*, Heft 9, 1982, 327-332.
- [J. Schlaich 1999] **Schlaich, Jörg**, "Vom Olympiastadion zu Aufwindkraftwerken", *db*, Heft 12, 1999, 92-94.
- [M. Schlaich 2004] **Schlaich, Mike**, "Let's twist again", *db*, Heft 2, 2004, 27-31.
- [M. Schlaich 2006] **Schlaich, Mike**, *Interview mit der Autorin am 27.02.2006*, TU Berlin, Berlin, 2006.
- [Schmal 2001] **Schmal, Peter Cachola**, *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser, 2001.
- [Schmal 2004] **Schmal, Peter Cachola**, *Workflow: Struktur - Architektur*, Basel: Birkhäuser Verlag, 2004.
- [Schmid 2004] **Schmid, Volker**, "Der Entwurf frei geformter Raumtragwerke am Beispiel des MUMUTH-Twist", *Bauingenieur*, Jahrgang 79, März 2005, 111-116.
- [Schmid 2006] **Schmid, Volker**, *Interview mit der Autorin am 05.04.2006*, Büro Arup, Berlin, 2006.
- [G. Schmidt 2003] **Schmidt, Gunnar**, *Splashes & Flashes. Über High-Speed-Visualisierungen und Wissensformen*, www.medienaesthetik.de/medien/splashes, 2003.

- [H. Schmidt 2005] **Schmidt, Hartwig**, "Von der Steinkuppel zur Zeiss-Dywidag-Schalenbauweise", *Beton- und Stahlbetonbau*, Jahrgang 100, Heft 1, 2005, 79-92.
- [Schober 1994] **Schober, Hans**, "Die Masche mit der Glas-Kuppel", *db 10/94*, 1994, 152-163.
- [Schober 2004] **Schober, Hans; Kürschner, Kai und Jungjohann, Hauke**, "Neue Messe Mailand – Netzstruktur und Tragverhalten einer Freiformfläche", *Stahlbau*, Jahrgang 73, Heft 8, 2004, 541-551.
- [Schönemann 1987] **Schönemann, Uli**, "Die Schalenbauwerke und –entwürfe von Franz Dischinger", in M. Specht, Hrsg., *Spannweite der Gedanken*, Berlin: Springer Verlag, 1987, 7-34.
- [Schwitter 2005] **Schwitter, Craig**, "Engineering Complexity", in B. Kolarevic and A. Malkawi, Hrsg., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, New York: Spon Press, 2005, 111-122.
- [Serraino 2005] **Serraino, Pierluigi**, *Eero Saarinen. Bauten und Projekte 1910-1961*, Köln: Taschen Verlag, 2005.
- [Sharp 1992] **Sharp, Dennis**, Hrsg., *Santiago Calatrava*, London: Book Art, 1992.
- [Siegel 1960] **Siegel, Curt**, *Strukturformen der modernen Architektur*, München: Callwey Verlag, 1960.
- [Sobek 1987] **Sobek, Werner**, *Auf Pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 1987.
- [Sobek 1999] **Sobek, Werner**, "Wer das Leichtbauen beherrscht kann auch schwer bauen", *db*, Heft 12, 1999, 96-98.
- [Spuybroek 2004] **Spuybroek, Lars**, *NOX. Machining Architecture*, München: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 2004.
- [Spuybroek 2005] **Spuybroek, Lars**, "The Structure of Vagueness", in B. Kolarevic and A. Malkawi, Hrsg., *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, New York: Spon Press, 2005, 161-176.
- [Stephan 2004] **Stephan, Sören; Sanchez-Alvarez, Jaime und Knebel, Klaus**, "Stabwerke auf Freiformflächen", *Stahlbau*, Jahrgang 73, Nr. 8, 2004.
- [Stiller 1987] **Stiller, Manfred**, "Entstehung und Rettung der Dischinger-Versuchsschale", in M. Specht, Hrsg., *Spannweite der Gedanken*, Berlin: Springer Verlag, 1987, 81-90.
- [Straub 1992] **Straub, Hans**, *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*, Berlin: Birkhäuser Verlag, 1992.

- [Strewinski 2006] **Strewinski, Martin**, *Buro Happold Berlin: Gebaute Projekte*, Vortrag an der Universität der Künste am 29.06.2006, Berlin, 2006.
- [Strike 1991] **Strike, James**, *Construction into Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [Szalapaj 2006] **Szalapaj, Peter**, "Digital Reality", *archithese*, Heft 4, 2006, 56-61.
- [Taraz-Breinholdt 2004] **Taraz-Breinholdt, Schirin**, "Geschäumte Materialien", *Arch+ 172, Material*, Dezember, 2004, 50-53.
- [Taut 1979] **Taut, Bruno**, *Die neue Baukunst*, Stuttgart: Julius Hoffmann Verlag, 2. Auflage, 1979.
- [Taylor 1999] **Taylor, David**, "Howzat!", *the architect's journal*, 29.04.1999, 20-29.
- [Thalmair 2002] **Thalmair, Michael**, "Freie räumliche Umformung schlanker Werkstücke", Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002.
- [Thomas 2006] **Thomas, Neil**, *The Liquid Threshold between Order and Chaos*, Vortrag an der Technischen Universität Berlin am 30.06.2006, Berlin: 2006.
- [Thompson 1942] **Thompson, D'Arcy Wentworth**, *On Growth and Form*, Neuauflage der Ausgabe von 1942, New York: Dover Publications Inc., 1942.
- [Tomlow 1989] **Tomlow, Jos**, *Das Modell*, IL 34, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1989.
- [Tomlow 1996] **Tomlow, Jos**, "Der geometrische Faktor beim Konstruieren", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 78-83.
- [Tomlow 2001] **Tomlow, Jos**, "Eladio Dieste und das katalanische Gewölbe", in R. Barthel, Hrsg., *Eladio Dieste, Form und Konstruktion*, Darmstadt: Verlag Das Beispiel GmbH, 2001, 11-16.
- [Torroja 1961] **Torroja, Eduardo**, *Logik der Form*, München: Callwey Verlag, 1961.
- [Trautz 1996] **Trautz, Martin**, "Die Anfänge der Gewölbestatik und der Wölbkunst nach statischen Gesetzen", in K. Teichmann and J. Wilke, Hrsg., *Prozeß und Form 'Natürlicher Konstruktionen'*, Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1996, 90-95.
- [Trautz 2004] **Trautz, Martin**, "Formfindung versus Formgebung", *Bauwelt*, Heft 21, 2004, 12-16.
- [Trenkamp 2006] **Trenkamp, Oliver**, "Formeln zum Leben erwecken", *Der Tagesspiegel*, 18.11.2006, S. B6.

- [Tzonis 2002] **Tzonis, Alexander**, "Santiago Calatravas kreativer Prozeß", *Arch+ 159, Formfindungen*, Mai, 2002, 94-99.
- [Van der Ree 2001] **Van der Ree, Pieter**, "Organische Architektur", Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben, 2001.
- [Vidler 2002] **Vidler, Anthony**, "Digitaler Animismus?", *Arch+ 159, Formfindungen*, Mai, 2002, 114-117.
- [Vincent 2006] **Vincent, Julian**, "Imperfection as a Design Parameter", Vortrag auf dem AA Symposium am 17.03.2006, *Differentiated Structures in Nature and Design*, London, 2006.
- [von der Linden 2004] **von der Linden, Helge**, "Synergien aus Spitzentechnologien am Beispiel des High-Performance-Bootsbaus", in R. Burgard, Hrsg., *Kunststoffe und Freie Formen*, Wien: Springer Verlag, 2004, 97-101.
- [Walker 1987] **Walker, Derek**, *Great Engineers*, London: Academy Editions, 1987.
- [J. Weber 1984] **Weber, Jürgen**, *Gestalt Bewegung Farbe*, Braunschweig: Georg Westermann Verlag, 1984.
- [O. Weber 1994] **Weber, Olaf**, *Die Funktion der Form. Architektur und Design im Wandel*, Hamburg: Verlag Dr. Kovac, 1994.
- [Weinstock 2004] **Weinstock, Michael**, "Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group", *AD, Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, Vol 74 No 3 May/June 2004, 18-25.
- [Weinstock 2006] **Weinstock, Michael**, "Differentiation and Hierarchy in Natural Systems", Vortrag auf dem AA Symposium am 17.03.2006, *Differentiated Structures in Nature and Design*, London, 2006.
- [Widjaja 2002] **Widjaja, Eddy und Pascha, Khaled Saleh**, "Doppelt gekrümmte, verglaste Dachtragwerke", *DAB*, Heft 8, 2002, 54-58.
- [Widjaja 2005] **Widjaja, Eddy und Grunwald, Gregor**, "Seil- und Membrantragwerke für Stadionüberdachungen", *Dokumentation Arena*, 2005.
- [Widjaja 2007] **Widjaja, Eddy**, Hrsg., *Baustatik, einfach und anschaulich*, Berlin: Bauwerkverlag, 2007.
- [Williams 1996] **Williams, Chris**, "The Analytical and Numerical Generation of Smooth Curves and Surfaces", in IASS Proceedings *Conceptual Design of Structures Vol. I*, 1996, 360-367.
- [Williams 2000] **Williams, Chris**, "The Definition of Curved Geometry for Widespan Structures", in M. Barnes and M. Dickson, Hrsg., *Widespan Roof Structures*, London: Thomas Telford Ltd., 2000, 41-49.

- [Williams 2006]** Williams, Chris, "From Mimisation to Emergence", Vortrag auf dem AA Symposium am 17.03.2006, *Differentiated Structures in Nature and Design*, London, 2006.
- [Wisniewski 1993]** Wisniewski, Edgar, *Die Berliner Philharmonie und ihr Kammermusiksaal*, Berlin: Gebr. Mann Verlag, 1993.
- [Zellner 2001]** Zellner, Peter, "Grübelei über den trügerischen Zauber einer soften digitalen Architektur", in P. Schmal, Hrsg., *Digital, real: Blobmeister*, Basel: Birkhäuser Verlag, 2001.
- [Züger 2002]** Züger, Roland, "Beton, der sich selbst verdichtet", *Bauwelt*, Heft 30, 2003.
- Sowie**
- Seminare der UdK** Referatesammlungen des Fachgebiets Tragwerkslehre der Universität der Künste Berlin, Seminare Glasbau, Membranbau und Freie Formen, 2003-2006.
- Internet** www.wikipedia.org und www.wikimedia.org, 2007.