Forschungsberichte itke

aus dem Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen,
Universität Stuttgart

Herausgeber:
Professor Dr.-Ing. Jan Knippers

Mohammad-Reza Matini:
Biegsame Konstruktionen in der Architektur
auf der Basis bionischer Prinzipien

Stuttgart, Dezember 2007

ISBN 978 3-922302-29-2

D 93

© Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
D-70174 Stuttgart

Alle Rechte, insbesondere der Übersetzung, bleiben
vorbehalten. Vervielfältigung jeglicher Art,
auch auszugsweise, ist nicht gestattet.

Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien

Dissertationsschrift

Von der Fakultät für Architektur und Stadtplanung
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Mohammad-Reza Matini
aus Maschhad, Iran

Tag der mündlichen Prüfung:
7. Dezember 2007

Hauptberichter:
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers

Mitberichter:
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Speck
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Schäfer

2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Stipendiat am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart. An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein sehr großer Dank gilt meinem „Doktorvater", Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, der sich meiner Arbeit angenommen und mich zielgerichtet geleitet hat. Ohne seine aktive Unterstützung und Ermutigung über die Jahre wäre diese Arbeit sicherlich nicht zustande gekommen.

Weiterhin danke ich ganz besonders Herrn Prof. Dr. Thomas Speck (Uni Freiburg) und Prof. Stefan Schäfer (TU Darmstadt) für ihr Interesse, ihre hilfreichen Vorschläge, die Übernahme des Mitberichtes und die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ludger Hovestadt (CAAD, ETH Zürich) und Frau Prof. Dr. Susanna Labisch (FH Bremen, FB Bionik) für ihre Anregungen und ihre Hilfsbereitschaft.

Allen Mitarbeitern des ITKE danke ich für die angenehme Atmosphäre und ein großer Dank für Frau Dipl.-Ing.(FH) Petra Heim für die unermüdliche Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei sprachlichen Problemen.

Besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Nina Kummer für die sorgfältige Korrektur des Manuskriptes.

Bei meiner Mutter möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir mit ihrer moralischen Unterstützung immer viel Kraft gegeben hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Elham für ihre Ermutigungen und Hilfe, vor allem aber für ihre langjährige Geduld, Unterstützung und Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit.

Abstract

The deformation capability of the new materials such as Glass- or Carbon fibre reinforced plastics provides new possibilities for convertible structures in architecture: the structures which can be deformed through using the flexibility of their components. This research tries to represent how to develop these elastic structures. We concentrate on mechanisms, deformations and possible applications of this type of convertible structures that consist especially of flexible rods.

In present work, the principles of nature are implemented as models of the appropriate mechanisms for flexible structures. The research process starts with survey and selection of eight suitable examples from nature such as an organ or a body of a plant or an animal. Then a geometric method is proposed for transfer of the natural principles into architecture. In this method eight principles which are derived from natural mechanisms are abstracted by geometric models. Later through gradual modification process eight basic patterns are defined. Each pattern presents a mechanism for deformation of a flexible structure in architecture.

In the next step, the basic patterns are developed to show various possibilities of deformations by application of their convertible mechanisms. For this reason we demonstrate different variants of the basic patterns through their manipulations, combinations and arrangements. These variants represent different design categories for flexible structures that stem from the eight basic patterns.

Various proposals for the application of these developed basic patterns in architecture are the last step. In this part we demonstrated three purposes for applications of these flexible structures, i.e. structures that can be deployed, structures that can be created in different shapes using a similar component, and structures that can adjust their form based on different functions. These applications are demonstrated through various examples.

Kurzfassung

Die Verformungsfähigkeiten der neuen Baumaterialien wie zum Beispiel Glas- oder kohlefaserverstärkter Kunststoffe zeigen neue Möglichkeiten für wandelbare Konstruktionen in der Architektur: Konstruktionen, die sich mit Hilfe von Biegsamkeit ihrer Komponenten verformen lassen. Diese Arbeit versucht zu zeigen, wie man diese biegsamen Konstruktionen entwickeln kann. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Verformungsmechanismen, Verformungsmöglichkeiten und Anwendungsmöglichkeiten dieser Art von wandelbaren Konstruktionen, die besonders aus biegsamen Stäben bestehen.

Natürliche Prinzipien werden in der vorliegenden Arbeit als Vorbild geeigneter Mechanismen von biegsamen Konstruktionen betrachtet. Zuerst werden acht passende Vorbilder aus der Natur ausgewählt, die einen Körperteil oder den gesamten Körper eines Tieres oder einer Pflanze betreffen. Für die Übertragung ihrer Prinzipien auf die Architektur wird eine geometrische Methode angewandt. Acht Prinzipien, die von natürlichen Mechanismen hergeleitet sind, werden durch geometrische Modelle abstrahiert. Durch eine schrittweise Modifikation werden acht Grundmuster definiert. Jedes Muster beschreibt einen Mechanismus für die Verformung einer biegsamen Konstruktion in der Architektur.

Im nächsten Schritt werden die Grundmuster weiterentwikkelt, um verschiedene Möglichkeiten der Verformung durch Anwendung dieser Mechanismen studieren zu können. Damit haben wir verschiedene Varianten der Grundmuster durch ihre Manipulationen, Kombinationen und Anordnungen dargestellt. Diese Varianten präsentieren unterschiedliche Entwurfskategorien für biegsame Konstruktionen, die von acht ursprünglichen Grundmustern abstammen.

Die Umsetzung entwickelter Grundmuster in der Architektur wird im letzten Schritt vorgestellt. In dieser Phase haben wir gezeigt, dass drei Gruppen der Anwendungszwecke für diese biegsamen Konstruktionen vorstellbar sind, die sich entweder erweitern können oder mit gleichen Elementen verschiedene Räume kreieren oder sich zur Anpassung an verschiedene Forderungen variieren können. Sie werden durch verschiedene Beispiele demonstriert.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Abstract VI

Kurzfassung VII

Inhaltsverzeichnis IX

Begriffe XIII

Einführung 1

1 Biegsame Konstruktionen 3

1. 1 Einführung . . . 3
1. 2 Wandelbarkeit von Konstruktionen . . . 5
1. 2. 1 Innere Wandelbarkeit . . . 6
1. 2. 2 Äußere Wandelbarkeit . . . 7
1. 2. 3 Mobile Wandelbarkeit . . . 8
1. 3 Mechanismen und Materialien . . . 9
1. 4 Geometrie der Bewegung . . . 10
1. 5 Biegsamkeit . . . 11
1. 5. 1 Niederkomplexität (geringe Anzahl an Bestandteilen) . . . 11
1. 5. 2 Vielfalt an Verformungsmöglichkeiten . . . 12
1. 6 Anwendungsgebiete . . . 14
1. 6. 1 Industriedesign . . . 14
1. 6. 2 Raumfahrttechnik . . . 14
1. 6. 3 Architektur . . . 15
1. 7 Geeignete Werkstoffe . . . 17
1. 7. 1 Glasfaserverstärkter Kunststoff . . . 17
1. 7. 2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff . . . 19
1. 8 Fragestellungen . . . 20

2 Vorbilder aus der Natur 23

2. 1 Einführung . . . 23
2. 2 Bionik . . . 24
2. 3 Vorgehensweise . . . 25
2. 4 Auswahlgebiete . . . 27
2. 4. 1 Tiere . . . 27
2. 4. 2 Pflanzen . . . 27
2. 5 Geometrische Kriterien . . . 28
2. 6 Vorbilder . . . 29
2. 6. 1 Gruppe A/ Vorbild 1: 9+2-Muster; Cilien und Flagellen . . . 30
2. 6. 2 Gruppe A/ Vorbild 2: Hygroskopische Bewegung; Laubmoose, Reiherschnabel. . . 31
2. 6. 3 Gruppe A/ Vorbild 3: Kohäsionsbewegung; Farnsporangien . . . 32
2. 6. 4 Gruppe A/ Vorbild 4:„Fin Ray Effect“,; Schwanzflosse . . . 33

2. 6. 5 Gruppe AB/ Vorbild 5: Hautmuskelschlauch; Regenwurm 34
2. 6. 6 Gruppe AB/ Vorbild 6: Ring- und Radialmuskulatur; Quallen 35
2. 6. 7 Gruppe AB/ Vorbild 7: Konvex-Konkav-Effekt; Venusfliegenfalle 36
2. 6. 8 Gruppe AB/ Vorbild 8: Krümmungsfalten-Effekt; Löwenmaul 37
2. 7 Zusammenfassung. 38

3 Bewegungsprinzipien 41

3. 1 Einführung. 41
3. 2 Übertragungsmethode 42
3. 2. 1 Form und Struktur. 43
3. 2. 2 Formänderung 43
3. 2. 3 Modifikation der Form und Struktur 44
3. 2. 4 Farbenbestimmung. 49
3. 2. 5 Modifikationssequenz 50
3. 3 Natürliche Prinzipien 51
3. 3. 1 Prinzip 1 52
3. 3. 2 Prinzip 2 53
3. 3. 3 Prinzip 3 53
3. 3. 4 Prinzip 4 54
3. 3. 5 Prinzip 5 55
3. 3. 6 Prinzip 6 55
3. 3. 7 Prinzip 7 56
3. 3. 8 Prinzip 8 57
3. 4 Grundmuster 57
3. 4. 1 Grundmuster 1 59
3. 4. 2 Grundmuster 2 63
3. 4. 3 Grundmuster 3 66
3. 4. 4 Grundmuster 4 69
3. 4. 5 Grundmuster 5 72
3. 4. 6 Grundmuster 6 76
3. 4. 7 Grundmuster 7 80
3. 4. 8 Grundmuster 8 83
3. 5 Zusammenfassung. 86

4 Möglichkeiten der Verformung 89

4. 1 Einführung. 89
4. 2 Modifikation der Grundmuster. 90
4. 2. 1 Manipulation 91
4. 2. 2 Kombination. 92
4. 2. 3 Anordnung 94
4. 3 Beispiele 95
4. 3. 1 Beispiel für M1(G4). 97
4. 3. 2 Beispiel für M1(G5). 98
4. 3. 3 Beispiel für M2(G3). 99
4. 3. 4 Beispiel für M2(G4). 100
4. 3. 5 Beispiel für M2(G5)-1 101
4. 3. 6 Beispiel für M2(G5)-2 102
4. 3. 7 Beispiel für K1(G1) 103
4. 3. 8 Beispiel für K1(G8) 104
4. 3. 9 Beispiel für K1(M1(G4)) 105
4. 3. 10 Beispiel für K2(G2, M2(G5)). 106
4. 3. 11 Beispiel für A1(G5) 107
4. 3. 12 Beispiel für A1(K1(G1)) 108
4. 3. 13 Beispiel für A2(G2) 109
4. 3. 14 Beispiel für A2(M1(G7)) 110
4. 3. 15 Beispiel für A2(M2(G8)) 111
4. 3. 16 Beispiel für A2(M2(G3)) 112

4. 3. 17 Beispiel für A2(M2(G4)) 113
4. 3. 18 Beispiel für A2(K1(M1(G4))) 114
4. 4 Zusammenfassung. 115

5 Anwendungsbeispiele 117

6 Zusammenfassung und Ausblick 145
6. 1 Fragestellungen der Arbeit. 145
6. 2 Arbeitsprozess und Ergebnisse 146
6. 3 Ausblick auf zukünftige Arbeit 147

7 Literaturverzeichnis 149

Abbildungsverzeichnis 155

Lebenslauf 159

Begriffe

Biegeweiche Konstruktionen:
Wandelbare Konstruktionen in der Architektur, deren Hauptkomponenten aus biegeweichen Materialien (wie textile Membrane) bestehen.

Biegesteife Konstruktionen:
Wandelbare Konstruktionen in der Architektur, deren Hauptkomponenten aus biegesteifen Materialien bestehen.

Biegsame Konstruktionen:
Wandelbare Konstruktionen in der Architektur, die sich durch die reversible Nachgiebigkeit ihrer Bauteile verformen.

Geometrisches Modell:
Eine geometrische Darstellung (2D oder 3D), die durch Punkte, Verbundlinien, Flächen und Farben definiert wird.

Formänderung:
Variation der Formparameter (Winkel, Länge, Krümmung) eines geometrischen Modells, die durch zwei Zustände des Modells dargestellt wird, heißt Formänderung. Der Zustand vor der Änderung steht auf der linken Seite und der Zustand nach der Änderung steht auf der rechten Seite. Zwischen der linken und rechten Seite steht ein Pfeil, der die Richtung der Änderung zeigt.

Modifikationssequenz:
Eine geordnete Folge von Modifikationen, die mit einer Eingabe in Form einer Anfangsform beginnt, welche aufgrund bestimmter Voraussetzungen schrittweise modifiziert wird, und in Form einer Ausgabe endet. Jede Stufe der Modifikationssequenz besteht aus einer Formänderung. Zwischen jeweils zwei Stufen einer Modifikationssequenz steht ein Pfeil, der die Richtung der Modifikation zeigt.

Formmodifikation:
Variation der Formparameter (Winkel zwischen den Verbindungslinien oder Krümmung der Linien) geometrischer Modelle in verschiedenen Stufen einer Modifikationssequenz.

Strukturmodifikation:
Variation der Strukturparameter (Anzahl der Verbindungslinien und Punkte sowie die Nachbarschaft der Verbindungslinien) geometrischer Modelle in verschiedenen Stufen einer Modifikationssequenz.

Transformation:
Modifikation der Struktur geometrischer Modelle durch Spiegelung oder Translation in einer Modifikationssequenz.

Grundmuster:
Das Ergebnis einer Modifikationssequenz, das mit Hilfe einer Formänderung einen Mechanismus für biegsame Konstruktionen darstellt, ist ein Grundmuster.

Manipulation des Musters:
Variation der Form- oder Strukturparameter eines Grundmusters zur Definition einer neuen Verformungsmöglichkeit für eine biegsame Konstruktion.

Kombination des Musters:
Verbindung von zwei ähnlichen oder unterschiedlichen Mustern (Grundmuster/ manipulierte Muster) zur Definition einer neuen Verformungsmöglichkeit für eine biegsame Konstruktion.

Anordnung des Musters:
Rechteckige oder polare Verbindung der Muster (Grundmuster/ manipulierte Muster/ kombinierte Muster) zur Definition einer neuen Verformungsmöglichkeit für eine biegsame Konstruktion.

Einführung

Alle Gruppen wandelbarer Konstruktionen, groß oder klein, einfach oder komplex, allgemein oder speziell, können nach ihren Materialien in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1. Konstruktionen, die hauptsächlich aus steifen Materialen bestehen und deren Komponenten mit Hilfe von Knoten, Gelenken oder Rollen Verformbar sind.

2. Konstruktionen, die hauptsächlich aus weichen Materialen bestehen und deren Hauptbestandteil ein weicher Stoff ist und zur Aussteifung und Bewegung die Unterstützung zusätzlicher Elemente benötigt.

Zwischen weichen und steifen Materialien gibt es viele elastische Werkstoffe, die sich ohne zusätzliche Elemente biegen können. Obwohl nicht jedes biegsame Material für eine wandelbare Konstruktion in Gebäuden geeignet ist, können neue Werkstoffe mit ihren programmierbaren Eigenschaften viele Anforderungen zur Wandelbarkeit in unseren Gebäuden erfüllen, die bei der Verwendung herkömmlicher Baustoffe nicht umsetzbar sind.

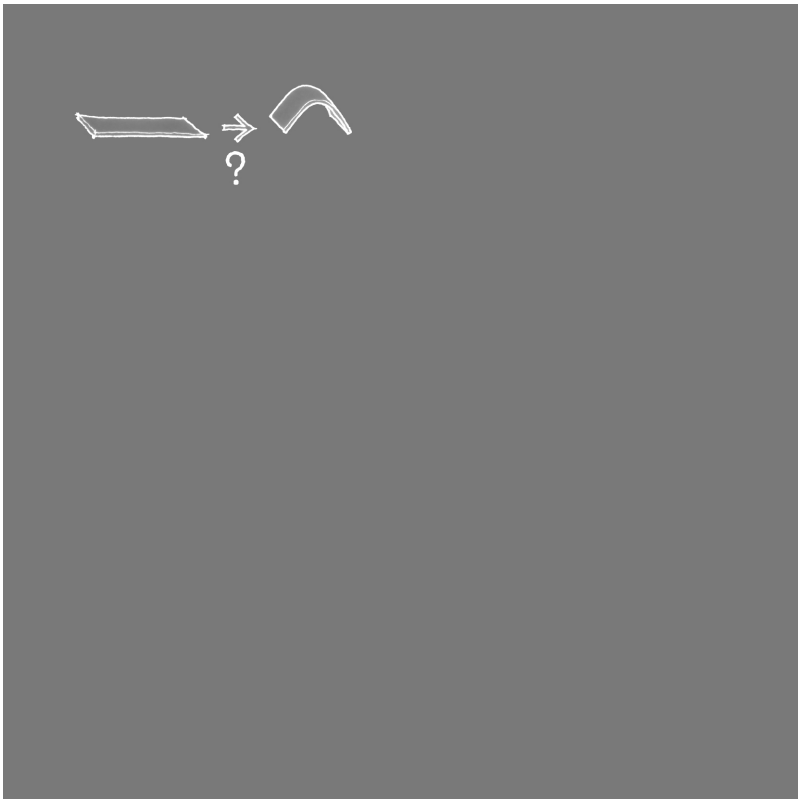
Bei der Entwicklung neuer wandelbarer Konstruktionen in der Architektur mit Hilfe biegsamer Materialien stellen sich zwei voneinander getrennt zu betrachtende Fragen: einerseits die nach den Eigenschaften und Besonderheiten geeigneter Baustoffe, die biegsame Konstruktionen in Gebäuden realisierbar machen, andererseits die nach geeigneten Verformungsmechanismen für biegsame Elemente, die Möglichkeiten der Verformung und die Anwendungsgebiete dieser Art von wandelbaren Konstruktionen. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf dem zweite Themenbereich.

Biegsame Stäbe, die aus neuartigen Werkstoffen gebaut sind, müssen sich mit Hilfe bestimmter Mechanismen auf verschiedene Art und Weise deformieren lassen, um für wandelbare Konstruktionen nutzbar zu sein. Die erste und wichtigste Frage, der sich diese Arbeit widmet, gilt dem Thema geeigneter Verformungsmechanismen für biegsame Konstruktionen aus biegsamen Stäben. Die darauf folgenden Fragen gelten den Verformungs- und Anwendungsmöglichkeiten biegsamer Konstruktionen in der Architektur und können erst in Angriff genommen werden, nachdem die erste Frage geklärt wurde.

Bionik, als eine Brücke von der Biologie zur Technik, versucht zu zeigen, dass die Lösung auf technische Fragestellungen oft aus den vielfältigen Vorbildern der Natur gewonnen werden kann. Wandelbarkeit und besonders Biegsamkeit sind keine unbekannte Eigenschaften in der Natur. Es gibt viele biologische Vorbilder, die interessante und vielseitige Konzepte für die Verformungsmechanismen biegsamer Konstruktionen in der Architektur präsentieren. Diese natürlichen Prinzipien sollen in der vorliegenden Arbeit genutzt werden, um die Ausgangsfrage nach geeigneten Verformungsmechanismen zu beantworten. Wenn wir wissen, wie ein Lebewesen seinen gesamten Körper oder einen Teil seines Körpers biegt und welches Prinzip dahinter steckt, können wir dieses Prinzip in die Architektur übertragen und als technische Lösung anwenden. Durch die Kombination der aus den Vorbildern gewonnenen Prinzipien versuchen wir, unsere Ergebnisse zu erweitern und für unterschiedliche Verwendungszwecke nutzbar zu machen.

Für die Auswahl natürlicher Vorbilder, die Darstellung ihrer Prinzipien, die Übertragung dieser Prinzipien auf die Architektur und die Weiterentwicklung der Ergebnisse benutzen wir in dieser Arbeit eine geometrische Methode. Verschiedene Themen werden mit Hilfe abstrahierter geometrischen Modelle mit bestimmten Parametern beschrieben. Die ausschlaggebenden Schritte unseres Arbeitsprozesses werden durch Änderung und Modifikation der Parameter wie Linien und Punkte dargestellt. Durch Vergleich der Parameteränderungen der geometrischen Modelle mit der Deformation im Körper der Lebewesen suchen wir nach passenden Vorbildern in der Natur. Die Abstrahierung natürlicher Prinzipien mit Hilfe geometrischer Modelle hilft dabei, sich auf die wichtigsten Punkte in Hinsicht auf die Lösung der technischen Fragestellungen zu konzentrieren. Über eine schrittweise Modifikation der geometrischen Modelle übertragen wir natürliche Prinzipien in die Architektur und entwickeln anschließend durch Manipulationen, Kombination und Anordnungsvariationen dieser Modelle unsere Ergebnisse zu vielen verschiedenen und vielseitigen Beispielen weiter, die für biegsame Konstruktionen in der Architektur anwendbar sind.

1 Biegsame Konstruktionen



1.1 Einführung

"Die Welt, in der wir leben, ist in permanenter Veränderung begriffen. Tag und Nacht, Sommer und Winter, Jahr für Jahr, von unserer Geburt bis zu unserem Tod, läuft unser Leben in einem zeitlosen Zyklus, befindet sich in einem immerwährenden Status der Veränderung und Wandlung, der Zu- oder Abnahme, im Aufstieg oder Fall. Nichts in der Natur ist am Ende des Tages dasselbe, was es am Anfang des Tages war"[1] [1].

Wandelbarkeit ist eine der wichtigsten Fähigkeiten der Le-

1. Übersetzung aus dem Englischen

bewesen. (Ver-)Wandlung zum Zwecke der Anpassung an die Umwelt, Veränderung zum Zwecke der Fortbewegung, (Ver-)Wandlung bei Gefahr, usw., sind nur einige Beispiele. Die vielfältigen Formen der Körperbewegungen von Tieren und Pflanzen bilden dabei nur eine kleine Untergruppe von Wandelbarkeit in der Natur.

Obwohl Architektur häufig als gefrorene Musik bezeichnet wird, spielen aber Veränderungen in Gebäuden eine wichtige Rolle. Durch Wandelbarkeit können sich Gebäude an verschiedene Aufgaben anpassen. Die Idee, wandelbar zu bauen und damit eine Anpassung der Gebäude an wechselnde Bedingungen zu ermöglichen, ist nicht neu. So haben sich in den vergangenen Jahrhunderten bereits unterschiedliche Arten wandelbarer Konstruktionen entwickelt [2].

Veränderung war immer Teil des menschlichen Lebens. In der Vergangenheit ging sie langsam vonstatten und machte keinen prominenten Teil unseres Lebens aus. Im Informationszeitalter jedoch ist Änderung der dominierende Faktor. Sie beeinflusst jeden Teil unseres Lebens und bringt somit auch neue Anforderungen an die Architektur mit sich. Das ist der wichtigste Grund für die steigende Tendenz zu Wandelbarkeit, Anpassungsfähigkeit, Nachhaltigkeit und Wiederverwendbarkeit im Vergleich zur Dauerhaftigkeit und Stabilität in der modernen Architektur [3].

Obwohl sich heutige wandelbare Konstruktionen an vielfältige Bedingungen anpassen können, bieten neue Baumaterialien, und vor allem Kunststoffe, neue Möglichkeiten für Architekten, neuartige Anforderungen in Hinsicht auf Wandelbarkeit zu meistern. Die Verformungsfähigkeit von Baumaterialien wie zum Beispiel glas- oder kohlefaserverstärkter Kunststoffe ist sehr umfassend und war mit herkömmlichen Materialen nicht zu erreichen. Wandelbare Konstruktionen, die aus diesen Materialien bestehen, unterliegen deshalb nur wenigen Verformungsbeschränkungen. Die Bauteile dieser Konstruktionen können sich unabhängig von zusätzlichen Elementen und nur mit Hilfe der Elastizität ihrer Materialien biegen. Dank dieser Biegsamkeit wird eine Vielzahl neuer Verformungen in der Architektur realisierbar.

Diese neue Gruppe kann „biegsame Konstruktionen“ genannt werden. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den Verformungseigenschaften wandelbarer Konstruktionen sowie möglichen Anwendungen dieser Art von Wandelbarkeit in der Architektur. In diesem Kapitel wird zu Beginn ein kurzer Ueberblick über allgemeine Eigenschaften wandelbarer Konstruktionen gegeben. Anschließend sollen Besonderheiten, Vor- und Nachteile sowie heute bereits realisierte Anwendungen biegsamer Materialien in der Architektur beschrieben

werden.

Im Anschluss wird die Fragestellung, auf der diese Arbeit aufbaut, entwickelt und definiert. Am Ende des Kapitels wird in kurzer Form dargestellt, mit welcher Methodik die Fragestellungen dieser Arbeit beantwortet werden.

1.2 Wandelbarkeit von Konstruktionen

Wie reagieren Gebäude auf ständige und verschiedenartige Veränderungen?

Die erste Möglichkeit ist eine physikalische Umgestaltung in Reaktion auf unerwartete technische oder soziale Änderungen, die nicht zur ursprünglichen Form und Funktion des Gebäudes passen.

Die zweite Möglichkeit ist Mies van der Rohes Prinzip „*universal space*“. Ziel des “universal space” ist es, einen Raum zu entwerfen, der sich an jedes potentielle Funktionsbedürfnis und jede vorstellbare Veränderung anpassen kann. Es ist jedoch wenig realistisch, anzunehmen, dass das Konzept für alle Änderungen und unter allen Bedingungen geeignet ist.

Die dritte Möglichkeit der Anpassung ist die Anwendung von Kinetik in Gebäuden - eine Tendenz, die offensichtlich unvermeidlich ist. Heute wird bei nahezu jedem Gebäude eine gewisse Anzahl beweglicher Elemente wie z. B. eingehängte Türen oder Schiebetüren, Schiebefenster, Jalousien, Aufzüge und Rolltreppen angewendet. In manchen Gebäuden finden sich größere bewegliche Elemente, wie Dächer oder drehbare Böden, und es gibt sogar mobile Architektur, bei welcher der Standort oder die Ausrichtung des Gesamtg ebäudes oder einiger Gebäudeteile veränderbar ist [4].

Die Basis für eine Studie über Wandelbarkeit von Konstruktionen in der Architektur ist eine Klassifizierung und Definition der grundlegenden Eigenschaften dieser Wandelbarkeit. Die Einteilung der Wandelbarkeit auf innere und äußere Wandelbarkeit ist vielleicht eine der wichtigsten Klassifizierungen auf diesem Gebiet. Innere Wandelbarkeit betrifft die Veränderbarkeit des Gebäudeinneren, während äußere Wandelbarkeit die Veränderbarkeit der Außenhülle des Gebäudes beschreibt [2]. Es lässt sich aber auch eine dritte Gruppe von mobiler Wandelbarkeit definieren, die auf Veränderbarkeit der Konstruktionen mobiler Gebäude oder von Gebäudeteilen Bezug nimmt.

Im Folgenden werden diese drei Gruppen genauer beschrieben und mit Hilfe von Beispielen verdeutlicht.

1.2.1 Innere Wandelbarkeit

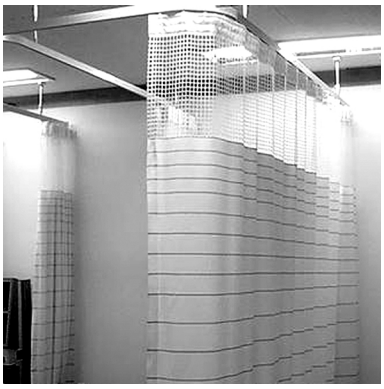


Abb. 1-1 Weiche Elemente für die Einteilung des Raumes

Innere Wandelbarkeit ermöglicht die Anpassung an notwendig werdende Änderungen und unterschiedliche Anforderungen an innere Räume. Die wichtigste Gründe für innere Wandelbarkeit werden hier aufgelistet:

- **Raumeinteilung**

Ein flexibler Raum lässt sich mit Hilfe beweglicher Schiebewände, Faltwände, Vorhänge und ähnlicher Elemente beliebig in verschiedene Zonen unterteilen. Die Raumeinteilung, die zum Zwecke des Sichtschutzes, der Bewegung, der Ruhe, oder der Kontrolle von Licht, Lärm, Geruch, usw. erstellt wurde, lässt sich problemlos verändern oder in ihren Ausgangszustand zurückverwandeln [5] &[7].

Bei den beweglichen Elemente handelt es sich entweder um steife Elemente, die sich für die Verformung klappen oder verschieben lassen, oder um weiche Elemente, die zum Zwecke der Raumeinteilung gerafft oder gerollt werden können (Abb. 1-1).

Abb. 1-2 Eine einziehbare Treppe [6]

- **Raumverbindungen**

Eine andere Gruppe innerer Wandelbarkeit entsteht durch die Verbindung unterschiedlicher Punkte einer Ebene oder einiger Ebenen der Gebäude miteinander. Diese Verbindung kann provisorisch sein, wie z.B. im Falle einer einziehbaren Treppe (Abb. 1-2). Auch Anlagen für den Personen- oder Lastentransport wie Aufzüge, Fahrtreppen und Fahrsteige zählen zu den Raumverbindungen.

- **Variable Belichtung und Beleuchtung**

Um nicht nur eine ausreichende Belichtung aller Bereiche des Gebäudes sowie eine gleichmäßige Ausleuchtung zu gewährleisten, sondern darüber hinaus auch störende Einflüsse des Tageslichtes zu minimieren, sorgen bewegliche Lamellensysteme, Vorhänge, Membranen und ähnliche Elemente für eine variable Belichtung [68].

Wandelbare Lichtinstallationen und bewegliche Lichtreflektoren beeinflussen die Beleuchtung innerer Räume und sorgen für eine angenehme Helligkeit. Sie können auch spannende Licht und Schattenspiele im Raum erzeugen [7].

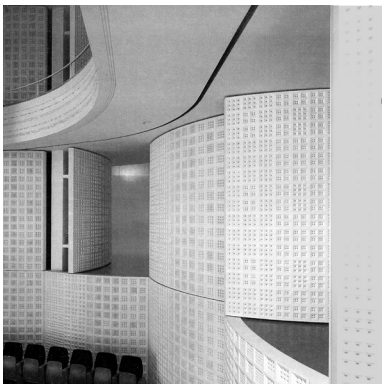


Abb. 1-3 Variable akustische Elemente, Konzerthaus Luzern, Schweiz [8]

- **Variable Akustik**

Die akustischen Eigenschaften eines Raumes können auf unterschiedliche Weise verändert werden. Die Methoden reichen von einem einfachen Vorhang bis zu vollständig computergesteuerten Umgebungen.

Heutige Konzerthallen besitzen oft komplexe, bewegliche Decken oder Wandelemente (Abb. 1-3), welche das Luftvolumen in der Halle sowie ihre Geometrie, Absorptions-, Reflexions- und Diffusionseigenschaften verändern können.

Einfachere Anwendungen derselben Prinzipien werden seit vielen Jahren in Studios und Vorführungsstätten genutzt. Notwendige Überlegungen sind hierbei Durchführbarkeit und Einfachheit bzw. Komplexität der Instalallation sowie die zusätzlich erforderliche Übungs- und Gewöhnungszeit für die Nutzer [9].

- **Veränderung der Raumeinrichtungselemente**

Fahrbare Regalsysteme, bewegliche Bildschirme und Leinwände, klappbare Theaterstühle usw. sind Beispiele für Einrichtungselemente, die oft durch Rollen, Klappen oder Verschieben eine flexible Anpassung und damit eine platzsparende und effektive Nutzung des Raumes ermöglichen.

1.2.2 Äußere Wandelbarkeit

Zur wichtigsten Wandelbarkeit der Außenhüllen des Gebäudes gehören wandelbare Dächer und wandelbare Fassaden, die in der Architektur als Grenze zwischen inneren und äußeren Räumen eine bedeutende Rolle spielen.

- **Wandelbare Dächer**

Zu den wichtigsten Aufgaben von Gebäudehüllen gehört der Schutz vor Witterungseinflüssen wie Kälte, Hitze, Regen und Wind. Die ständige Veränderung des Wetters zeigt die Wichtigkeit äußerer Wandelbarkeit, besonders von wandelbaren Dächern, in in der Architektur.

Das bekannteste Gliederungsprinzip wandelbarer Dächer ist die Gliederung nach Bauart , Bewegungsart und Bewegungsrichtung.

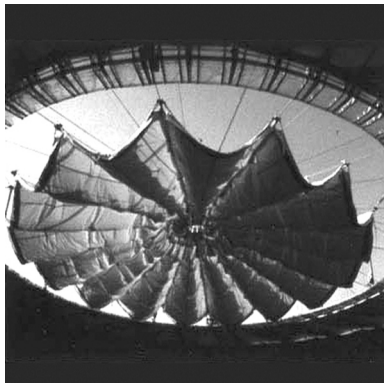


Abb. 1-4 Stierkampfarena, Saragossa, Spanien; Schlaich, Bergermann& Partner, Wandelbares Membrandach[10]

Abb. 1-5 Das Big Eye-Stadion, Oita, Japan; Kisho Kurokawa, Steifes verschiebbares Dach [11]

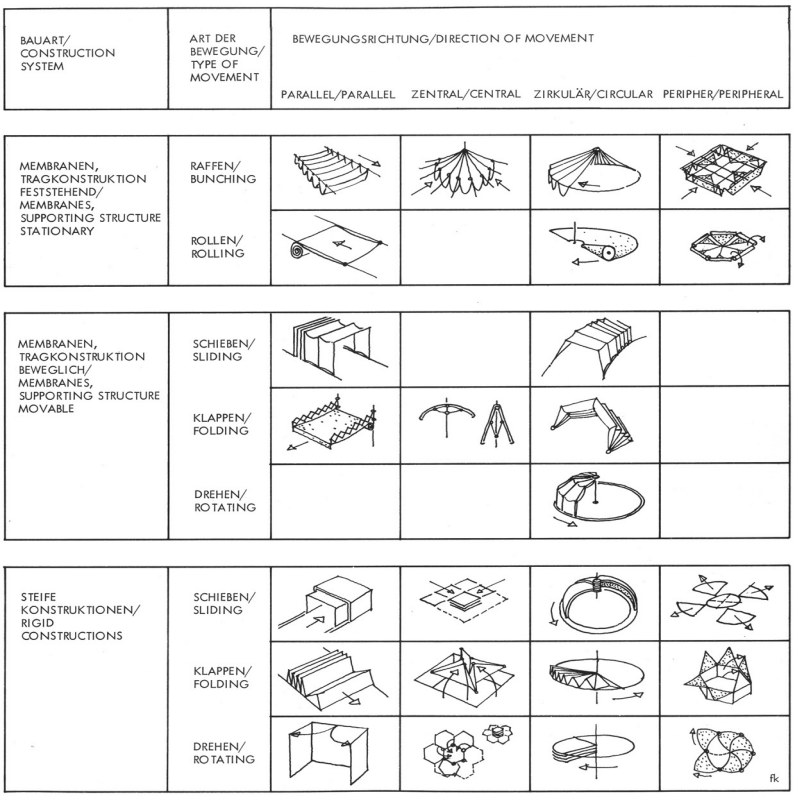


Abb. 1-6 Bewegungsmatrix
Hier werden die Bewegungsarten und Bewegungsrichtungen miteinander kombiniert [2].

Abb. 1-7 Polizei- und Feuerwache, Berlin; Matthias Sauerbruch, wandelbare äußere Glaslamellen [64]

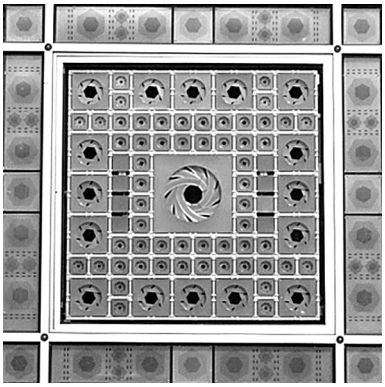


Abb. 1-8 „Institut du Monde Arabe", Paris; Jean Nouvel. Die Öffnungen der Südfassade sind mit Aluminiumlamellen überzogen, die sich computergesteuert dem Stand der Sonne anpassen [12].

Nach Bauart unterscheidet man zwischen zwei unterschiedlichen Gruppen: Membrankonstruktionen und steife Konstruktionen.

Nach Bewegungsart kann man Raffen und Rollen (bei wandelbaren Membrandächern), und Schieben, Drehen und Klappen (bei biegsteifen Konstruktionen) unterschieden.

Nach Bewegungsrichtung lassen sich vier Gruppen unterscheiden: Parallel, Zentral, Zirkulär und Peripher [2] ().

- **Wandelbare Fassaden**

Visuelle Aufgaben der Gebäudefassaden, wie die Repräsentation von Zeit und Entstehungsgrund eines Gebäudes, die Vermittlung des Inhalts, über die bautechnischen Zwecke hin zur Einpassung des Bauwerkes in ein vorhandenes Stadtbild und nicht zuletzt die, dem Auge eine „Freude" zu bereiten, machen diese Bauteile zu einem sehr attraktiven Thema für Architekten sowie auch für Betrachter der Gebäude.

Um eine dynamische Wirkung auf einer statischen Fläche zu erreichen, wendet man verschiedene Techniken an, wie z.B. Projektionsfassaden, Rückprojektionsfassaden, Displayfassaden, Fensterrasteranimationen, Leuchtmittelfassaden, passive mediale Fassaden und mechanische Fassaden [60].

Darunter können nur mechanische Fassaden als eine Art von wandelbaren Konstruktionen mit unserem Thema in Verbindung gebracht werden. Mechanische Fassaden können aktiv auf Umweltbedingungen reagieren. Klappläden, Rolläden, Jalousien etc. steuern den Lichteinfall (Abb. 1-7). Diese Regelelemente können durch Sensoren für Licht, Klima und Wind gesteuert und mit der üblichen Haustechnik (Heizung, Kühlung etc.) vernetzt werden [67] (Abb. 1-8).

1.2.3 Mobile Wandelbarkeit

Veränderbarkeit des Standorts oder der Lage des Gebäudes oder von Gebäudeteilen wird "Mobilität" genannt [2].

Temporäre Gebäudesysteme können in drei spezifische Artenu nterteilt werden:

Mobile Gebäude, die vollständig transportiert werden können.

Relokatierbare Gebäude, die teilweise transportiert und am Aufstellungsort zusammengebaut werden können.

Zerlegbare Gebäude, die in mehreren Bauteilen transportiert und am Aufstellungsort montiert werden können [14].

Für jede dieser Mobilitätsarten in der Architektur gibt es Beispiele von wandelbaren Konstruktionen, die die Gebäude teilweise oder vollständig verändern (Abb. 1-9).

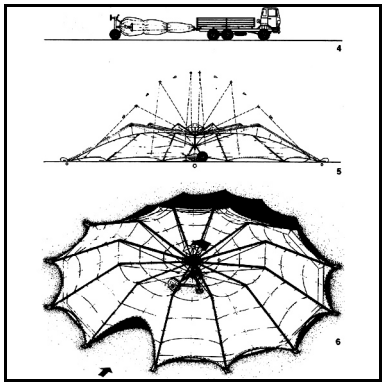


Abb. 1-9 Ein wandelbares Dach als Zelt, das besonders schnell zu transportieren und aufzubauen ist [69].

Der ausschlaggebende Grund für die Anwendung wandelbarer Konstruktionen für mobile Architektur ist der Bedarf nach

leichteren und schneller zu errichtenden Konstruktionen für bestimmte Anwendungen wie die Bereitstellung von Notunterkünften für Erdbeben und Flutopfer im Katastrophenschutz oder militärische Nutzungen.

1.3 Mechanismen und Materialien

"Ein Mechanismus ist ein Komplex von Bauelementen, die so konstruiert sind, dass jede Bewegung eines Elementes eine Bewegung anderer Elemente bewirkt" [15].

Jede verformbare Konstruktion in der Architektur hat einen Mechanismus, der ihr ermöglicht, sich zu verformen. Obwohl es viele verschiedene Beispiele für die Wandelbarkeit der Form, Bewegungsart, Bewegungsrichtung, des Maßstabes usw. in Gebäuden gibt, bestehen die beweglichen Bauelemente häufig aus weichen oder steifen Materialien. Mit anderen Worten: Die Bauelemente, die ihre Bewegung durch Anwendung eines technischen Verfahrens aufeinander übertragen können, sind oft steif oder weich.

Wir greifen hier als Beispiel wandelbare Dächer heraus, die mit anderen wandelbaren Bauteilen viele Ähnlichkeiten aufweisen. Wandelbare Dächer werden im Allgemeinen auf Schienen oder an Seilen bewegt. Wie vorher beschrieben, bestehen wandelbare Dächer entweder aus Membrankonstruktionen (weiche Konstruktionen) oder steifen Konstruktionen. Tragkonstruktionen der Membranen sind entweder feststehend, wobei zum Öffnen des Daches nur die Membran bewegt wird (Abb. 1-4, Abb. 1-10) oder beweglich, wobei die Tragkonstruktion mit der Dachhaut bewegt wird (Abb. 1-11). Tragkonstruktion und raumabschließende Teile steifer Konstruktionen bestehen aus steifen Elementen wie Stäben, Balken, Trägern, Rahmen, Platten oder Scheiben. Zum Öffnen und Schließen des Daches werden größere Teile bewegt, ohne dass diese Teile bei der Bewegung ihre Form ändern [2] (Abb. 1-5).

Auch innere wandelbare Bauteile, mechanische wandelbare Fassaden und mobile wandelbare Konstruktionen benötigen zur Verformung den Einfluss weicher oder steifer Elemente oder auch beider in Kombination. Weiche Zugelemente und steife klappbare, drehbare oder verschiebbare Bauelemente, die durch Elektromotoren oder per Hand bewegt werden können, machen viele Verwandlungen des Gebäudes möglich (Abb. 1-12).

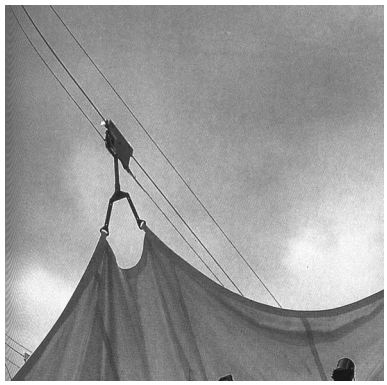


Abb. 1-10 Freilichtspieldach, Wiltz, Luxemburg; Bodo Rasch [70]

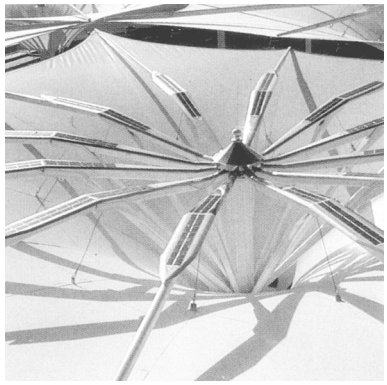


Abb. 1-11 Prototypen der Schirme für die großen Moscheebauten in Saudi Arabien;
Bodo Rasch [13]

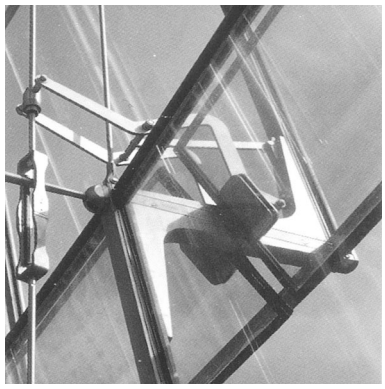


Abb. 1-12 Post Tower, Bonn; Murphy/Jahn Architects, Chicago
Lüftungsklappen der Sekundärfassade [65].

1.4 Geometrie der Bewegung

Die Geometrie der Bewegung von Gebäudeflächen ist abhängig von ihrem Zweck (z.B. Dach, Fassade, etc.), ihrer Ausrichtung (horizontal, vertikal oder schräg) und ihrem Material. Die Bewegungsmatrix in Abb. 1-6 beschreibt z.B. die möglichen Bewegsgeometrien für eine horizontale Fläche in Form eines Daches, je nachdem, ob dieses aus weichen oder steifen Materialien besteht .

Geometrische Eigenschaften der Bewegungsarten von wandelbaren Dächern können auch für andere aus weichen oder steifen Materialien bestehende Bauteile genutzt werden, z.B. für wandelbare Fassaden (Abb. 1-13).

Abb. 1-13 Wandelbare Fassaden;
1. Schieben; Wohnanlage in Dornbirn; B&E Baumschlager-Eberle, Lochau [63]
2. Klappen; Pinnasberg 45 - 47, Hamburg St. Pauli; Spengler. Wiescholek, Hamburg [72]
3. Drehen; Herz Jesu Kirche in München; Allmann Sattler Wappner, München [71]
4. Raffen; Luxuswohnungen in Zürich; agps architecture, Zürich [66]

Doch wegen des andersartigen Zweckes und der anders gelagerten Ausrichtung sind die Bewegungsrichtungen eines Daches in anderen Bauteilen praktisch kaum übertragbar (Abb. 1-14).

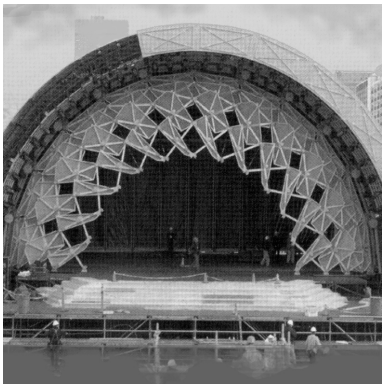


Abb. 1-14 Hoberman Arch, Ein Beispiel für eine periphere Bewegungsrichtung [62]

Verschiebbare weiche und steife wandelbare Konstruktionen werden im Allgemeinen auf Schienen oder an Seilen bewegt. Bei weichen Elementen können die Fahrschienen in Raffrichtung zusammenlaufend angeordnet weden, bei biegesteifen Konstruktionen sollten die Fahrschienen jedoch immer parallel sein. Bei klappbaren und drehbaren Konstruktionen dreht sich ein biegesteifes Element um eine Achse oder mehrere Elemente um parallele Achsen.

1.5 Biegsamkeit

Wie vorher beschrieben, bestehen heutige wandelbare Konstruktionen häufig aus biegesteifen oder druckschlaffen Materialien. Wegen der Qualität der Materialien sind biegeweiche Konstruktionen sehr frei verformbar und benötigen meistens Unterstützung durch zugbeanspruchte Baukomponenten. Im Gegensatz zu weichen Konstruktionen sind biegesteife Konstruktionen unabhängig von unterstützenden Komponenten und brauchen lediglich zusätzliche Elemente wie Gelenke und Knoten oder Rollen und Schienen, um eine Verformung möglich zu machen.

Die elastische Verformungsfähigkeit der neuen Baumaterialien bietet Architekten jedoch eine neue Klasse von Gestaltungsmöglichkeiten: Konstruktionen, die sich mit Hilfe der Elastizität ihrer Materialien biegen können und dabei große Verformungen erreichen. Wir können diese Gruppe „biegsame Konstruktionen“ nennen.

„Jede durch äußere Kräfte oder auch Temperatureinflüsse hervorgerufene Beanspruchung von biegesteifen Länglichen oder flächenhaften Körpern und Bauteilen, die zum Auftreten von äußeren Biegemomenten in deren Querschnitten führt, wodurch die ursprüngliche Geradheit oder Krümmung der Stab- oder Balkenachse bzw. Wölbung der Platten- oder Schalenmittelfläche elastisch oder bleibend geändert wird, heißt Biegung"[16]. Diese Arbeit beschäftigt sich mit biegsamen Konstruktionen, deren innere Eigenschaften vor und nach der Biegung gleich sind, und deren Verformung reversibel ist. Sie geben dank der Flexibilität ihrer Materialien bei Druck relativ leicht nach, ermöglichen so große Verformungen und erlangen bei Nachlassen des Druckes ihre ursprüngliche Form wieder vollständig zurück.

Zwei Vorteile biegsamer Konstruktionen im Vergleich zu anderen wandelbaren Konstruktionen sind ein Minimum an Einzelbestandteilen sowie vielfache Verformungsmöglichkeiten. Diese Eigenschaften werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

1.5.1 Niederkomplexität (geringe Anzahl an Bestandteilen)

Steife wandelbare Konstruktionen bestehen aus Elementen, die jedes für sich gering verformbar sind und die Verformung über eine Starrkörperverschiebung erreichen. Die einfachste verformbare Komponente besteht aus zwei Elementen, die sich mit Hilfe bestimmter Verfahren entweder verschieben, klappen oder drehen lässt. Das heißt, im einfachsten Fall benötigt man mindestens zwei Elemente, um eine Verfor-

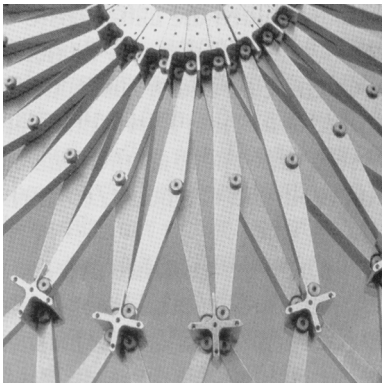


Abb. 1-15 Technisches Detail, „Retractable Dome“, Expo 2000; Chuck Hoberman [61]

Abb. 1-16 Die Dachhaut hängt an Rollen, die auf einem Tragseil laufen. Freilichtspieldach, Wiltz, Luxemburg; Bodo Rasch[70]

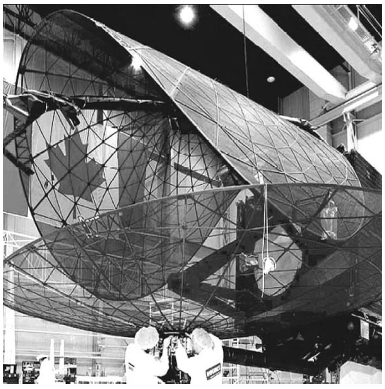


Abb. 1-17 „Spring-Back Reflector", entfalteter und verpackter Zustand, Courtesy of the Canadian Space Agency; [18]

mung zu erreichen. Im Allgemeinen gibt es auch ein drittes Element, wie ein Gelenk oder eine Rolle, um zwei steife Elemente zu verbinden und sie so beweglich zu machen. Komplexe Konstruktionen bestehen aus vielen Elementen und Verbindungen (Abb. 1-15). Bedingung für die Verwandlung ganzer Konstruktionen ist ein gutes Funktionieren aller Verbindungen. Ist ein Gelenk oder eine Rolle defekt, so gerät das ganze System außer Kontrolle.

Biegeweiche Materialien sind im Gegensatz zu steifen Materialien verformbar. Damit ist potentiell jeder Punkt frei für jede Art von Bewegung. Deshalb ist es in diesem Fall nötig, dass viele Punkte einer weichen Konstruktion durch Zugelemente wie Seile oder durch steife Tragwerke unterstützt werden. Weiche Konstruktionen können sich nicht unabhängig von Rollen, Traktoren, Seilen oder Schienen verformen, um sich an verschiedene Aufgaben anzupassen. Das bedeutet, dass weiche Konstruktionen im einfachsten Fall immer aus mehr als einer weichen Membran oder einem weichen Stoff bestehen (Abb. 1-16).

Biegsame Komponenten sind dagegen nicht zu steif, so dass sie für die Verformung ohne Knoten und Gelenke auskommen, und auch nicht zu weich, so dass sie sich ohne die Hilfe weiterer Aufhängungspunkte und die Unterstützung zusätzlicher Elemente bewegen können. Biegsame Komponenten können sich dank der Elastizität ihrer Materialien bei Krafteinwirkung biegen. Sie speichern im gekrümmten Zustand Federenergie, die während der Rückverformung genutzt werden kann.

Biegsame Konstruktionen kommen also für die Verformung mit nur wenigen Zusatzelementen sowie auch mit einfacheren Mechanismen für die Verformung und Rückformung aus (Abb. 1-17).

1.5.2 Vielfalt an Verformungsmöglichkeiten

Wie im Abschnitt „Geometrie der Bewegung" dargelegt, lassen sich Bewegungsarten und Bewegungsrichtungen beweglicher Dächer trotz gewisser Unterschiede auch auf die Verformung anderer Bauelemente uebertragen. Der folgende Abschnitt widmet sich der Frage, welche Möglichkeiten es für die Verformung biegsamer Konstruktionen gibt und ob sich überhaupt Unterschiede zwischen dieser Gruppe und anderen wandelbaren Konstruktionen feststellen lassen.

Dieses Thema kann unter zwei Aspekten betrachtet werden: Veränderung der Größe und Veränderung der geometrischen Eigenschaften.

- **Veränderung der Größe**

  Die Veränderbarkeit der Größe ist eine wichtige Eigen-

schaft wandelbarer Konstruktionen und kann z.B. auch das Öffnen oder Schließen eines Bauteils (z. B. ein Daches) ermöglichen.

Weiche Konstruktionen werden durch Raffen und Rollen, steife Konstruktionen durch Drehen, Klappen und Schieben vergrößt oder verkleint.

Die Größe biegsamer Konstruktionen dagegen lässt sich durch Biegen oder Rollen der Komponenten verändern. Biegsame Komponenten können auch mit Hilfe von Knoten und Rollen geklappt, gedreht und geschoben werden. Aus diesem Grund bietet diese Gruppe weitaus vielfältigere Verformungsmöglichkeiten als die Konstruktionen aus herkömmlichen Materialien (Abb. 1-18).

- **Veränderung der Geometrie**

Die Komponenten[2] wandelbarer Konstruktionen können durch die gezielte Bewegung bestimmter Punkte auf spezifische Art und Weise ihre Geometrie verändern. Durch die Veränderung der Geometrie der Komponenten verändert sich auch die Geometrie der Gesamtkonstruktion.

Für jede Konstruktion, aus einem weichen oder steifen Material, ist eine charakteristische Änderung der Geometrie vorstellbar, die häufig rechteckig oder rund ist.

Die Veränderung der Geometrie biegsamer Komponenten hat aber den Vorteil, mit Hilfe der Bewegung einer minimalen Anzahl von Punkten verschiedene freie Formen kreierbar und wandelbar zu machen (Abb. 1-19). Bei anderen Konstruktionen benötigen wir viele Punkte (weichen Konstruktionen) oder viele kleine Elemente (steifen Konstruktionen), um eine ähnlich freie Form zu gestalten.

Durch die Elastizität der Komponenten können bei biegsamen Konstruktionen viele freie Formen in der Architektur einfacher und mit weniger Beschränkungen umgesetzt werden, die mit andere Konstruktionen kaum realisierbar sind.

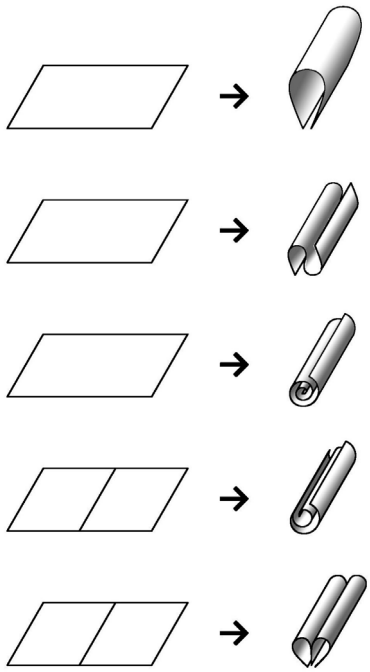


Abb. 1-18 Größenveränderung einer biegsamen Fläche durch parallele Bewegung

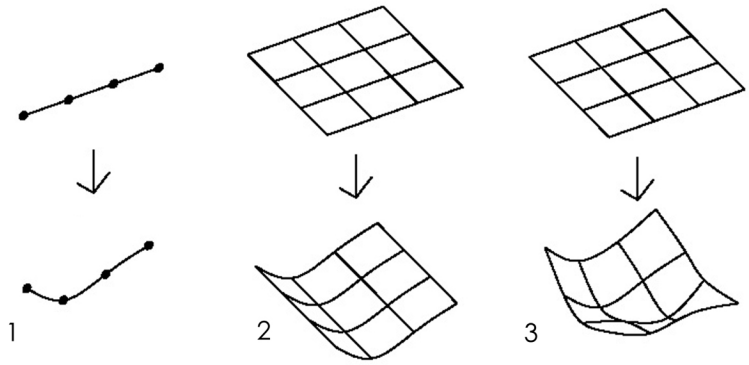


Abb. 1-19 Veränderung der Geometrie;
1. Biegung einer linearen Komponente durch Bewegung einiger Punkte.
2. Veränderung einer ebenen Fläche zur einer einfach-gekrümmten Fläche durch Biegung ihrer linearen Komponente
3. Veränderung einer ebenen Fläche zur einer doppelt-gekrümmten Fläche durch Biegung ihrer linearen Komponente

2. Mit "Komponente" wird hier einfachste Bestandteil einer Konstruktion bezeichnet, der aus einem oder mehreren Elementen besteht, und durch dessen Bewegung (z.B. Schieben) oder Verformung (z.B. Klappen oder Rollen) die ganze Konstruktion verändert werden kann.

1.6 Anwendungsgebiete

Neue Produkte, Entwürfe, Ideen und Konzepte im Industriedesign, in der Raumfahrttechnik und in der Architektur zeugen von einer neuen Tendenz und einem starken Interesse dieser Entwicklungsbereiche an elastischen Konstruktionen.

Vielleicht sind die Anforderungen dieser drei Gebiete nicht miteinander vergleichbar, doch sie alle suchen nach neuen Möglichkeiten für Wandelbarkeit, die einfacher und leistungsfähiger sind und sich mit wenigen Beschränkungen verformen lassen.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, inwiefern Erfahrungen aus anderen Geieten wie der Raumfahrt und dem Industriedesign Architekten in Hinsicht auf Materialien, Form und Wandelbarkeit Anregungen geben können.

Abb. 1-20 Flexible Philips-Display. Das Display lässt sich in alle Richtungen biegen. [17]

1.6.1 Industriedesign

Eine biegsame Solarzelle aus flexiblen Polymeren, biegsame Batterien , biegsame Bildschirme (Abb. 1-20), zusammenrollbare Gummitastaturen und Taschenrechner [6] sowie viele andere Beispiele, die sich derzeit in der Forschungsphase befinden oder bereits auf dem Markt erhältlich sind, zeugen davon, wie Hersteller versuchen, ihre Produkte durch diese Art von Wandelbarkeit leistungsfähiger zu machen, ihre Mobilität zu verbessern oder sogar manchmal auch ihre Attraktivität zu steigern.

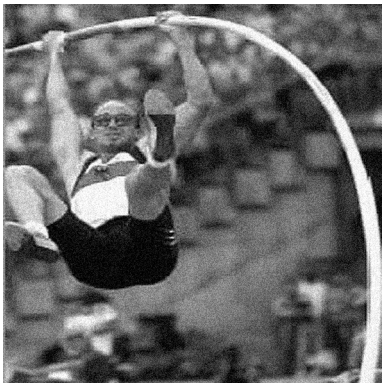


Abb. 1-21 Biegsame Sprungstäbe aus GFK

Darunter für die Architektur interessant sind Beispiele wie aus faserverstärkten Kunststoffen wie GFK[3] entwickelte Produkte. Das geringe Eigengewicht, die hohe mechanische Festigkeit sowie große Flexibilität des GFK als Wekstoff sind für die Herstellung biegsamer Elemente enorm von Vorteil. (Abb. 1-21).

1.6.2 Raumfahrttechnik

Im letzten Jahrzehnt gab es in der Luft- und Raumfahrttechnik einen Trend zu einfacheren, preiswerteren und zuverlässigeren „deployable structures“ [19]. So wurden einige Projekte in die Wege geleitet, in welchen es darum ging, durch Anwendung neuer Materialien und neuer Konzepte das Niveau der Funktionalität im Vergleich zu früheren Designs verbessern zu können. Ziel war es, die Anzahl der Bauteile zu vermindern und damit die Komplexität der unterschiedlichen Elemente zu verringern.

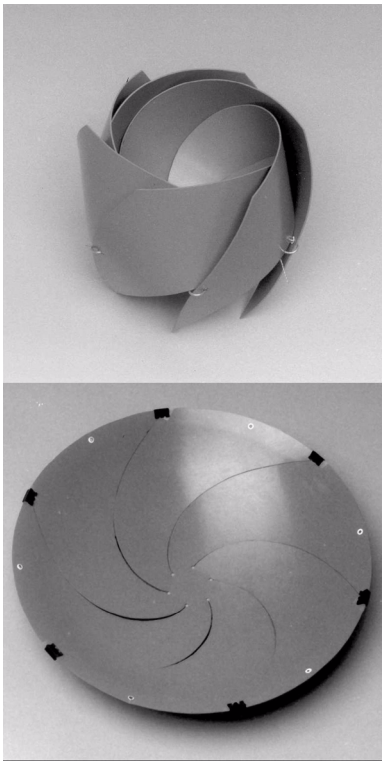


Abb. 1-22 Ein kleines Modell von einem CFK-Reflektor [23]

Die so entstandenen einfachen und wirksamen Faltungskonzepte für neue faltbare Reflektoren z.B., die vollständig aus

3. Glasfaserverstärkter Kunststoff

einheitlichen Elementen bestehen, ist nur mit Hilfe der Biegsamkeit ihrer neuen Materialien möglich (Abb. 1-22). Die Hauptelemente oder auch alle Elemente sind flexibel und benötigen zur Verfogrmun keine extra Teile wie z.B. Knoten[20].

Das von der ESA und DLR gemeinsam entwickelte Solar Sail Konzept funktioniert mit Hilfe elastischer und rollbarer CFK[4] Masten[5], die ein quadratisches Segel aufspannen können. Das Design der entfaltbaren Booms sieht vor, dass sie flachgedrückt und aufgerollt innerhalb eines sehr kleinen Volumens gelagert und transportiert werden können [21] (Abb. 1-23).

Obwohl es viele Ähnlichkeiten zwischen elastischen Konstruktionen in der Architektur und Raumfahrt gibt, darf man aber nicht vergessen, dass manche Unterschiede auch sehr groß sind. Geringe oder fehlende Schwerkraft etwa spielt in der Raumfahrt eine wichtige Rolle. Dagegen sind in der Architektur Materialkosten und Budget von großer Bedeutung.

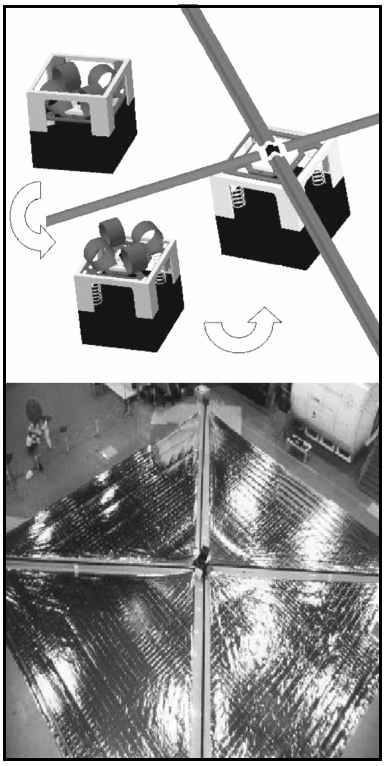


Abb. 1-23 ESA-DLR Solar Sail Technologieträger 1999/2000 [22]

1.6.3 Architektur

In der Architektur hat die Anwendung von Kurven und gekrümmten Flächen eine lange Geschichte. Stabilität gekrümmter Formen war in der Vergangenheit der Hauptgrund für ihren Einsatz, vor allem in Form tragender Elemente. Heute dagegen haben sie in der Gebäuden eine andere Bedeutung.

In der heutigen Architektur bringt die Digitalisierung neue Möglichkeiten für eine junge Architektengeneration mit sich. Sie setzt sich mit expressiven und geometrisch hoch komplexen Formen auseinander, die nicht mehr der herkömmlichen cartesianischen Geometrie entstammen. Diese komplexen Formen haben viel mit den programmierbaren Eigenschaften der Kunststoffe aus der Luftfahrt, dem Automobilbau und dem Schiffbau gemeinsam [24].

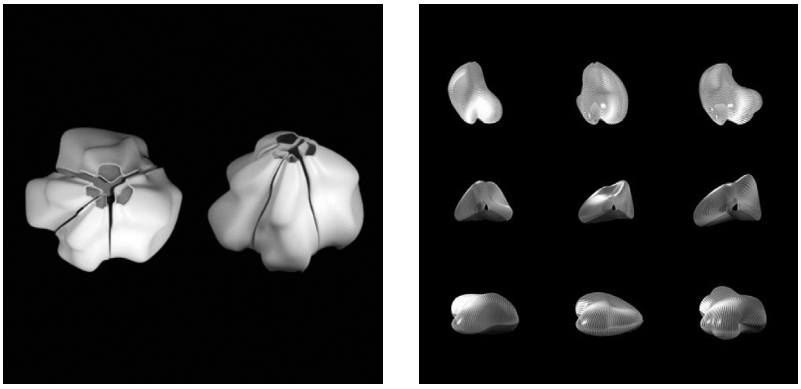


Abb. 1-24 „BLOB"-Architektur;
Links: Alessi Tea & Coffee towers, Geg Lynn, 2003
Rechts: Embryological House; Geg Lynn, 1999 [59]

Die zunehmend multimorphe Tendenz in der Architektur,

4. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
5. CFRP Booms

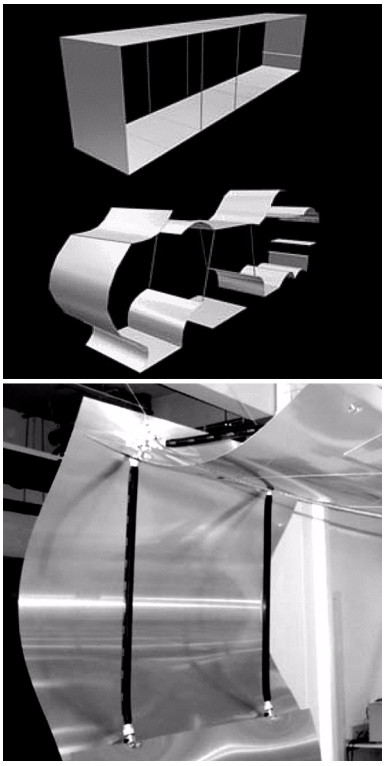


Abb. 1-25 „The Muscle Reconfigured", „Hyperbody research group" Die HYLITE Platten können sich durch pneumatische Muskeln von FESTO biegen und diesem Raum unendlich viele freie Formen geben[73]

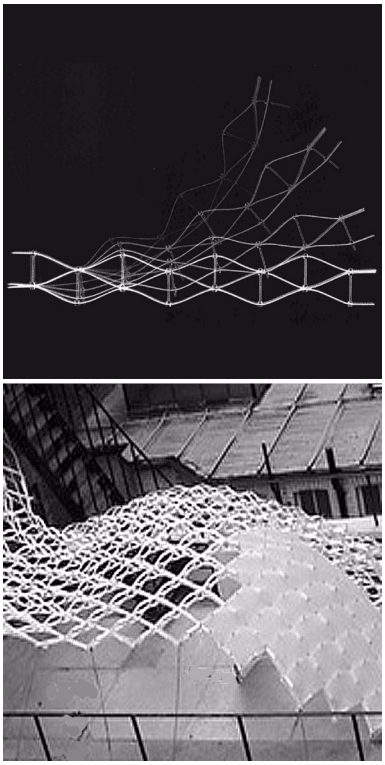


Abb. 1-26 „hybgrid" MA Dissertationsprojekt AA
Sylvia Felipe, Jordi Truco, Achim Menges; 2003 [58]

wie beispielsweise die „BLOB"-Architektur, zeugt von neuen Geometrieüberlegungen zur Bewertung von Raum und seinen definierenden Elementen (Abb. 1-24). Neue Räume, die mit Hilfe des Computers generiert oder wie in einem Entwicklungsprozess von Autosdesign oder Produktdesign geplant werden, sind nicht auf vertikale oder horizontale ebene Flächen begrenzt und bestehen oft aus Freiformflächen [74], [75].

Wandelbarkeit in der neuen Architektur kann durch vollständig computer-programmierte Bewegungen der Bauteile einen gänzlich anderen Charakter bekommen. Es wäre z.B. ein Raum vorstellbar, der mit Hilfe von Sensoren, Prozessoren und Antriebselementen auf die Anforderungen seines Besitzers reagiert. In dieser Art von Wandelbarkeit ist ein Raum wie ein lebender Organismus, der sich im Laufe der Zeit und gemäß der Wünsche seiner Bewohner umverwandeln und an neue Anforderungen anpassen kann. Es gibt dafür noch kein tatsächlich umgesetztes Beispiel, doch versuchen Architekten immer wieder diese Vision experimentell zu verwirklichen. „The Muscle Reconfigured" ist z.B. eine architektonische Forschung der „Hyperbody research group" unter Betreuung von Prof. ir. K. Oosterhuis [73] (Abb. 1-25). Dieses Projekt bietet eine intelligente Umgebung aus Sensoren und computergesteuerten Flächen in Form eines Raumes, der aktiv auf die Menschen reagieren können soll. Die HYLITE Platten, die sich durch pneumatische Muskeln von FESTO entlang einer Achse biegen können, spielen in diesem Projekt eine wichtige Rolle, weil nur biegsame Konstruktionen die Fähigkeit besitzen, unendlich viele freie Raumgeometrien zu ermöglichen. Trotz der Vielzahl an Verformungsmöglichkeiten dieser Flächen beschränken sich die Verformungen auf nur eine Achse.

Zwei axiale Biegungen durch biegsame Konstruktionen benötigen aber eine spezielle Kombinationsgeometrie der Elemente, da sich nicht nur die Komponenten biegen sollen, sondern auch die Länge dieser Komponenten variabel sein muss. „Hybgrid" ist ein Beispiel für eine Biegung entlang zweier Achsen (Abb. 1-26). Hier lässt sich die Form der Gesamtkonstruktion durch Anziehen und Lockern von Schrauben beeinflussen, welche drei aufeinanderliegende, wellenförmige und elastische Elemente miteinander verbinden. Es lassen sich so sowohl die Krümmung als auch die Länge der Komponenten verändern.

Obwohl sich Architekten heute dank der Entwicklung neuer dreidimensionaler Darstellungsmöglichkeiten und Formfindungsprogramme viele neue Möglickeiten für Experimente mit neuen oder wiederentdeckten Formen bieten, gibt es allerdings noch keine klare Vorstellung von geeigneten Mechanismen, die diese Formen wandeln und an verschiedene

Bedingungen anpassen können.

Heutige steife oder weiche wandelbare Konstruktionen sind nicht immer für diese Aufgabe geeignet, und vielleicht können biegsame Konstruktionen mit ihren vielfältigen Verformungsfähigkeiten diese Aufgabe übernehmen, um auch komplexe Formen wandelbar zu machen.

1.7 Geeignete Werkstoffe

Wie in Abschnitt 1. 6 beschrieben, werden manche faserverstärkter Kunststoffe als geeignete biegsame Materialien für neue Produkte, Entwürfe und Experimente benutzt. Ein faserverstärkter Kunststoff (FVK)[6] ist ein Werkstoff, der aus Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix besteht. Die Matrix umgibt die Fasern, die durch Adhäsiv- oder Kohäsivkräfte an sie gebunden werden. Gegenüber anderen klassischen Konstruktionswerkstoffen, wie z.B. Metallen, besitzen die FVK vor allem den Vorteil hoher Festigkeit bei gleichzeitig sehr niedriger Dichte (Abb. 1-27). Dies sind die Charakteristika eines idealen Leichtbau-Werkstoffs. Neben dem Leichtbau eignet sich FVK für die freie Formgestaltung [25],[30].

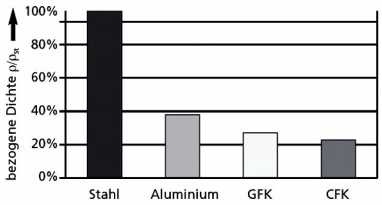


Abb. 1-27 Abschätzung des Gewichtsvorteils von FVK anhand eines Dichtevergleichs [26]

Ein anderer Vorteil der FVK besteht in der gezielten Einstellbarkeit der elastischen Eigenschaften.

„Prinzipiell lassen sich die elastischen Eigenschaften auf dreierlei Weise einstellen:

- durch Wahl des Faseranteils im Verbund
- durch die Auswahl des Fasertyps
- durch die geschickte Kombination verschiedener Faserorientierungen “[26]

Es gibt verschiedene Gruppen von Fasern wie Naturfasern, organische Fasern, anorganische Fasern und Metallfasern. Einen nennenswerten Marktanteil bei faserverstärkten Kunststoffen haben nur die Glas-[7], die Kohlenstoff-[8] und die Aramidfasern [9][25]. Unter diesen drei Arten von FVK sind glas- und kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe als geeignete Werkstoffe für biegsame Konstruktionen anerkannt. In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigen Eigenschaften dieser Werkstoffe für die Anwendung in biegsamen Konstruktionen beschrieben werden.

1.7.1 Glasfaserverstärkter Kunststoff

Glasfaserverstärkter Kunststoff besteht aus einem Kunststoff

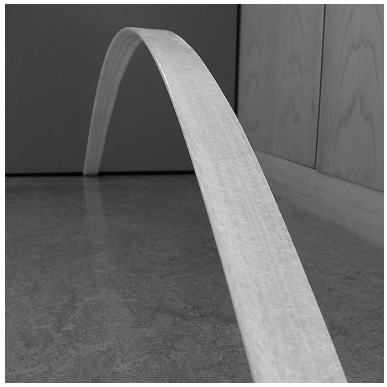


Abb. 1-28 Biegsamkeit der Stäbe aus GFK

6. auch: Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)
7. Glasfasern sind als Anorganische Fasern
8. Kohlenstofffasern sind als organische Fasern
9. Aramidfasern sind als organische Fasern

Abb. 1-29 Prototyp - GFK Pavillon, ITKE, 2003/2004, Don-U Park, Alexander Hub [33]

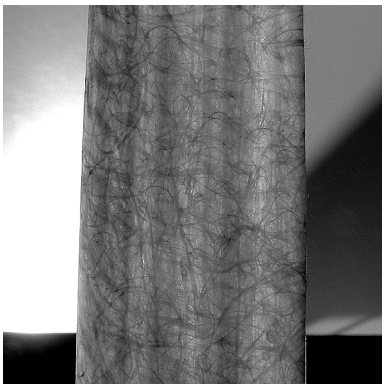


Abb. 1-30 Handlaminieren von GFK-Stäben

(z.B. Polyesterharz, Epoxidharz oder Vinylesterharz) und Galsfasern. Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind ein kostengünstiger Faser-Kunststoff-Verbund. Im Vergleich zu Faser-Kunststoff-Verbunden aus anderen Verstärkungsfasern hat der glasfaserverstärkte Kunststoff ein relativ niedriges Elastizitätsmodul, das selbst in Faserrichtung unter dem von Aluminium liegt. Deshalb ist dieser Werkstoff elastisch und biegsam und bei hohen Steifigkeitsanforderungen nicht geeignet. Glasfaser im Verbund mit einer Kunststoffmatrix hat eine hohe Bruchdehnung, weshalb der Glasfaserverbund besonders in Blattfedern und ähnlichen Bauteilen genutzt werden kann. Glasfaserverstärkter Kunststoff zeigt bei Einsatz einer geeigneten Matrix auch ein ausgezeichnetes Korrosionsverhalten [28], [29].

Wegen seiner elastischen Eigenschaft ist der GFK ein geeigneter Werkstoff für biegsame Konstruktionen. Lineare Elemente aus GFK, wie GFK-Stäbe, können in den unterschiedlichsten Formen benutzt werden. Durch die Kombinationsmöglichkeiten lineare Elemente sind viele freie Formen kreierbar. Die linearen Elemente können gitterförmig angeordnet werden, um komplexe Formen zu schaffen. Ein praktisches Experiment mit linearen GFK- Elementen ist der GFK-Pavillon, der im Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Uni Stuttgart, als Prototyp entwickelt und realisiert wurde (Abb. 1-29).

Dieser mobile Pavillon, der für eine temporäre Nutzung konzipiert wurde und in wenigen Stunden auf- und abbaubar ist, wird aus handlichen Modulen aus pultrudierten GFK-Flachstäben (b x t = 50 x 10 mm) zu zwei Bögen zusammengesetzt. Diese zwei Bögen bilden die Haupttragkonstruktion, die mit einer Membran überspannt und stabilisiert wird. Der extrem kleine Radius der Bogenform am Bogenscheitelpunkt wird mit Hilfe von Flachstäben aus GFK realisiert. Mit anderen Baustoffen wie Stahl oder Aluminium können solche Krümmungen nur durch plastische Verformungen oder eine deutliche Reduzierung der Blechdicke erreicht werden [32].

Aufgrund ihrer einfachen Form und der Möglichkeit zur vielfältigen Verformung lassen sich mit linearen GFK-Elementen in viele komplexe architektonische Formen umsetzen. Die Herstellungstechniken der GFK-Stäbe reichen von der manuellen Einzelanfertigung bis zum automatisierten Fertigungsprozess. so dass GFK-Stäbe je nach Budget und Fabrikationsmöglichkeiten auf die jeweiligen Voraussetzungen zugeschnitten beschafft werden können (Abb. 1-30). Die Kombination von GFK-Stäben mit einem Baustoff wie einer Textilmembran bietet der Architektur neue Möglichkeiten für temporäre oder langfristige, mobile oder stabile, einfache oder komplexe Räume, deren Elemente sich dank ihrer Wandelbarkeit an verschiede-

ne Anforderungen anpassen können.

1.7.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff - CFK - ist ein Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoff. Beim CFK werden zur Verstärkung Kohlenstofffasern in eine Matrix eingebettet. Meist geschieht dies in mehreren Lagen. Kohlenstofffasern sind sehr leicht, und ihre Dichte liegt deutlich unter derjenigen von Glasfasern. Sie besitzen extrem hohe Festigkeiten und sehr hohe Elastizitätsmoduln [25].

In Faserrichtung ist die Festigkeit und Steifigkeit des CFK wie bei allen Faserverbunden wesentlich höher als quer zur Faserrichtung, deshalb werden unterschiedliche Faserlagen in verschiedenen Richtungen verlegt [27]. CFK wird eingesetzt, wenn hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei geringem Gewicht gefordert sind, z. B. in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau oder für Sportgeräte. Trotz der hohe Steifigkeit von CFK gibt es Beispiele für rollbare CFK-Elemente, die in der Architektur eingesetzt werden können, wenn eine spezielle Biegsamkeit gefordert ist. Das Institut für Strukturmechanik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelt z.B. ultraleichte, rollbare Maststrukturen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK-Booms) (Abb. 1-31). Obwohl das Konzept der CFK-Booms für eine Reihe von Aufgaben geeignet ist, wird es hier nur als Haupttragelemente eines Sonnensegels (Solar Sail) benutzt. Die CFK-Booms besitzen sehr hohe Biege- und Torsionssteifigkeiten, doch durch das Entfaltungskonzept sind sie rollbar und damit auf sehr kleinem Raum transportierbar. Die quadratische Segelfläche wird durch einen Rollmechanismus aufgespannt. Vier ultraleichte Masten (Booms) dienen als tragende Struktur des Solar Sail (Abb. 1-32). Die Masten bestehen aus zwei Halbschalen, die über Fügeflächen miteinander verbunden sind. Das Entfaltungskonzept der CFK-Booms sieht vor, dass die Masten flachgedrückt und auf einer Trommel aufgerollt werden und gespeicherte Formänderungsenergie zur Selbstentrollung nutzen können [34], [35], [36].

Neben der vielen Vorteile des CFK ist der hohe Faserpreis jedoch ein großer und schwer akzeptabler Nachteil für viele Anwendungsfälle. Aus diesem Grund, werden viele Strukturbauteile weiterhin konventionell in Stahl oder Aluminium gefertigt. CFK ist deutlich teurer als Glasfaser, wobei der Preis mit dem Elastizitätsmodul der Faser sowie mit der Feinheit des Grans steigt [25].

Auch wenn CFK aufgrund seines hohen Preises in nur wenigen architektonischen Projekten zum Einsatz kommt, so bieten diese rollbaren, linearen Elemente, trotz alledem viel Potenzial v.a. für die mobile Architektur, weil sie extrem leicht

Abb. 1-31 Rollbare Maststrukturen aus CFK [38]

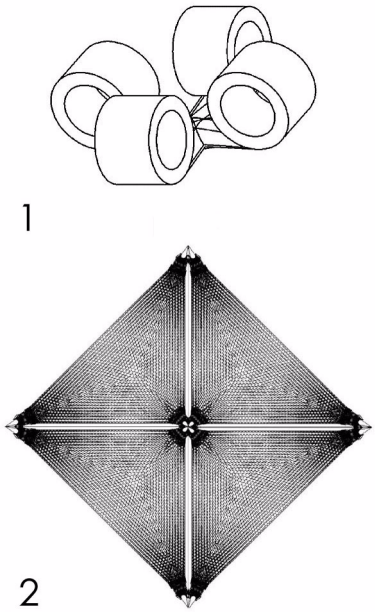


Abb. 1-32 Solar Sail;
1.Vier rollbare Masten als tragende Struktur des Solar Sail [37]
2. Quadratische Segelfläche [21],

und einfach einzupacken sind und ihre gespeicherte Federenergie beim Entpacken genutzt werden kann.

1.8 Fragestellungen

In diesem Kapitel wurde über Anwendungsszenarien, Verformungsmöglichkeiten und Verformungsmechanismen verschiedener wandelbarer Konstruktionen berichtet. Die wandelbaren Konstruktionen und ihre Verformungsmöglichkeiten wurden nach Materialien gegliedert vorgestellt.

Herkömmliche Materialien können Wandelbarkeit nur durch steife oder weiche Konstruktionen ermöglichen. Mit einer Gruppe neuer Baustoffe, besonders faserverstärkter Kunststoffe, bieten sich aber neue Möglichkeiten für biegsame Konstruktionen.

Obwohl biegsame Konstruktionen speziell für die Architektur noch nicht entwickelt wurden und es auch auf anderen Gebieten bisher nur wenige praktische Beispiele gibt, bieten sie dennoch aufgrund ihrer speziellen Charakteristika ein großes Potenzial für bisher nicht dagewesene Dimensionen der Wandelbarkeit oder der Verformung von Gebäuden.

Bei der Entwicklung biegsamer Konstruktionen in der Architektur müssen zu Beginn einige grundlegende Fragen geklärt werden. Diese Ausgangsfragen werden hier in zwei Gruppen zusammengefasst:

1. Fragen über technische Eigenschaften geeigneter Werkstoffen für biegsame Konstruktionen
2. Fragen über geeignete Mechanismen, Verformungsmöglichkeiten und Anwendungen dieser Konstruktionen in der Architektur

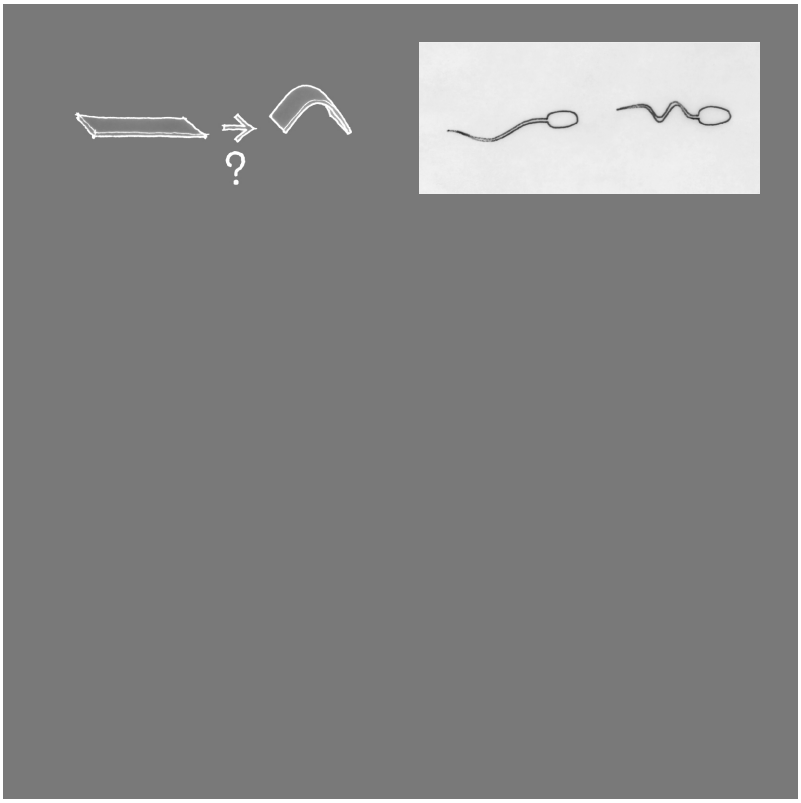
Leichtigkeit und Programmierbarkeit der Kunststoffe sind wichtige Gründe dafür, dass diese Werkstoffe im Zusammenhang mit biegsamen Konstruktionen intensiver studiert werden als andere, herkömmliche Baustoffe. In dieser Forschungsarbeit liegt der Schwerpunkt allerdings auf dem zweiten Fragenkomplex. Die zentrale Rolle spielt die Frage bezüglich der Verformungsmechanismen und der geeigneten Geometrie für die Kombination der biegsamen Elemente.

Der zweite Fragenkomplex betrift folgende wichtige Themen:

1. Durch welche Mechanismen können sich biegsame Konstruktionen verformen?
2. Welche Verformungen sind durch diese Mechanismen möglich?
3. Welche Anwendungsmöglichkeiten sind für diese Konstruktionen in der Architektur vorstellbar?

In dieser Arbeit wird versucht, diese Fragen zu beantworten. Die Antwort jeder Frage stellt die Basis für die Beschäftigung mit der nächsten Frage dar. Frage eins, als Ausgangspunkt, bildet die unverzichtbare Grundlage. Zur Lösung der ersten Frage kann man verschiedene Verfahren heranziehen. Diese Arbeit stützt sich in dieser Frage auf die Nutzung natürlicher Vorbilder für Verformungsmechanismen biegsamer Konstruktionen. Die Natur und ihre unerschöpflichen Beispiele für Wandelbarkeit bieten zahlreiche Lösungen, die sich im Laufe der Evolution entwickelt haben. Diese Lösungen können auch in der Architektur umgesetzt werden. Deshalb suchen wir in einem weiteren Schritt nach Analogien in der Natur, die verschiedene Arten von Biegsamkeit darstellen, um aus der Analyse dieser Vorbilder Ideen für das zu lösende Problem zu sammeln.

2 Vorbilder aus der Natur



2.1 Einführung

Die Natur ist seit Urzeiten eine unerschöpfliche Inspirationsquelle für die verschiedensten Fachgebiete, von der Kunst bis zur Technik. Auch die Adaption natürlicher Vorbilder in der Architektur hat eine lange Geschichte. Aus der persischen und ägyptischen Architektur beispielsweise sind viele abstrahierte und mit Bedeutung versehene Symbole, Muster und geometrische Figuren von Weltruhm überliefert, die aus natürlichen Vorbildern (der Form von Tieren oder Pflanzen) entstanden sind.

In der Architektur spielen ästhetische, funktionelle und technische Aspekte eine zentrale Rolle und wurden die seit Vitruv immer wieder thematisiert. Alle drei komplexen Themen sind

im Laufe der Zeit und in verschiedenen Architekturströmungen auf verschiedene Art und Weise durch natürliche Vorbilder beeinflusst worden. Im technischen Bereich stehen natürliche Konstruktionen etwa als Symbol für Leichtigkeit und Optimierung, und seit einigen Jahrzenten finden Konstruktionsprinzipien aus der Natur besonders in leichten Tragwerken Anwendung [41], [42].

Eine weitere Besonderheit vieler natürlicher Konstruktionen, die in der Architektur allerdings weniger studiert worden ist, ist ihre Wandelbarkeit - besonders ihre Biegsamkeit. In diesem Kapitel wird nach passenden Beispielen aus der Natur gesucht, welche helfen können, die in dieser Arbeit gestellten Fragen bezüglich Bewegungsmechanismen für biegsame Konstruktionen zu beantworten.

Bionik als eine interdisziplinäre Wissenschaft schlägt eine Brücke zwischen natürlichen Prinzipien und Problemstellungen der Technik. In dieser Arbeit versuchen wir, mit Hilfe bionischer Verfahren biegsame Konstruktionen in der Architektur beweglich zu machen.

2.2 Bionik

Der Begriff „**BIONIK“**, der aus den Begriffen **BIO**logie und tech**NIK** zusammengesetzt ist, bedeutet Lernen von der Natur für die Technik. Dies ist jedoch nur eine Seite. Vor der Übertragung der Daten aus der Natur in die Technik muss man die Natur zuerst erforscht haben. Dieses Forschungsfeld wurde von Prof. Werner Nachtigall als „Technische Biologie“ bezeichnet. Die beiden Unterdisziplinen bilden eine Einheit [43].

„Bionik als Wissenschaftsdisziplin befasst sich systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme“ [44]. Die „Bionik“ versucht, Konstruktionen, Verfahrensweisen und Evolutionsprinzipien der belebten Welt zu nutzen, um Anregungen für technisches Gestalten zu finden. „Sie sichtet und überträgt zwar die Vorbilder der Natur, kopiert sie aber nicht. Die Natur bietet dem Techniker keine fertigen Blaupausen. Die Natur zu kopieren wäre unwissenschaftlich“ [44].

In der Bionik werden entweder Lösungen für technische Probleme in der Biologie gesucht (Bionik als *top-down*-Prozess), oder Prinzipien von biologischen Modellsystemen produktunabhängig abstrahiert (vom biologischen Vorbild losgelöst), die dann als Ideenvorlage für vorher nicht festgelegte technische Problemlösungen dienen können (Bionik als *bottom-up*-Prozess) [46].

In dieser Arbeit gehen wir gemäß dem *top-down*-Prozess vor, um unsere Frage über Bewegungsmechanismen biegsamer Konstruktionen zu beantworten. Dieser Prozess besteht aus den folgenden Schritten:

1. Definition des Problems
2. Suche nach Analogien in der Natur
3. Identifizierung entsprechender Prinzipien
4. Abstraktion (Loslösung von biologischen Vorbildern)
5. Prüfung der technischen Umsetzbarkeit & Prototyping [47]

In den folgenden Abschnitten werden die Methodik deiser Arbeit, sowie die Gliederung und Hauptthemen dieses und der folgenden Kapitel vorgestellt.

2.3 Vorgehensweise

Wie im Kapitel 1 dargestellt, ist es Ziel dieser Arbeit, drei Fragen zu beantworten. Die erste Frage, nach möglichen Mechanismen für biegsame Konstruktionen, soll durch den Rückgriff auf natürliche Prinzipien beantwortet werden. Hierauf kann die zweite Frage nach der Verformungsmöglichkeiten beantwortet werden. Im Anschluss daran können wir uns der Frage widmen, welche Anwendungen letztendlich für biegsame Konstruktionen in der Architektur sinnvoll und vorstellbar sind.

- **Frage 1: Durch welche Mechanismen können sich biegsame Konstruktionen verformen?**

Die erste Frage, die diese Arbeit zu beantworten sucht, ist hier ein definiertes technisches Problem (erster Schritt eines *top-down*-Prozesses). Das Ziel des vorliegenden Kapitels (und der zweite Schritt) ist die Suche nach Analogien in der Natur. Hierbei gibt es jedoch zwei wichtige Voraussetzungen:

1. Eingrenzung des Suchumfangs
2. Definition der Kriterien für die Auswahl der Vorbilder

In diesem Kapitel sollen einige ausgewählte Beispiele vorgestellt werden, die aufgrund ihrer Eigenschaften bestimmte Biegungsmechanismen darstellen können.

Der dritte, vierte und fünfte Schritt des *top-down*-Prozesses werden in Kapitel 3 vorgestellt. Die zugrundeliegenden Prinzipien der natürlichen Vorbilder werden mit Hilfe geometrischer Modelle abstrahiert. Für die Loslösung von den biologischen Vorbildern sowie die Übertragung der Prinzipien in die Architektur benutzen wir eine Methode, die auf Formengrammatiken basiert. Nach einer schrittweisen Modifikation von Form und Struktur der geometrischen Modelle definieren wir schließlich ein Grundmuster. Die Grundmuster stellen jeweils einen geometrisch abstrahierten natürlichen Mechanismus

dar, der direkt in der Architektur anwendbar ist. Diese Grundmuster werden im Kapitel 4 entwickelt und erweitert.

- **Frage 2: Welche Verformungen sind durch diese Mechanismen möglich?**

  Im Kapitel 4 wird die Weiterentwicklung der Grundmuster erklärt und beschrieben, wie durch Manipulation, Kombination und Anordnung dieser acht Grundmuster vielerlei verformbare Konstruktionen entwickelt werden.

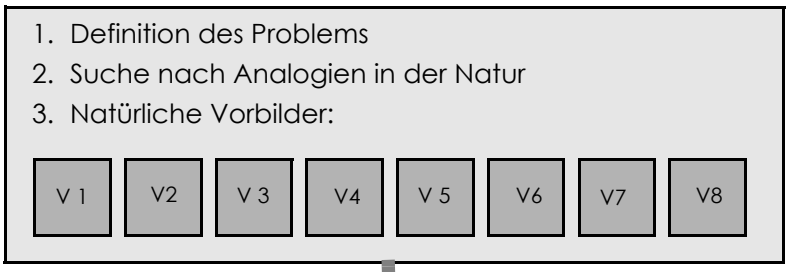
- **Frage 3: Welche Anwendungsmöglichkeiten sind für diese Konstruktionen in der Architektur vorstellbar?**

  In Kapitel 5 werden geeignete Verwendungsmöglichkeiten für Konstruktionen in der Architektur vorgeschlagen, die mit Variationen der gefundenen Grundmuster umgesetzt werden können.

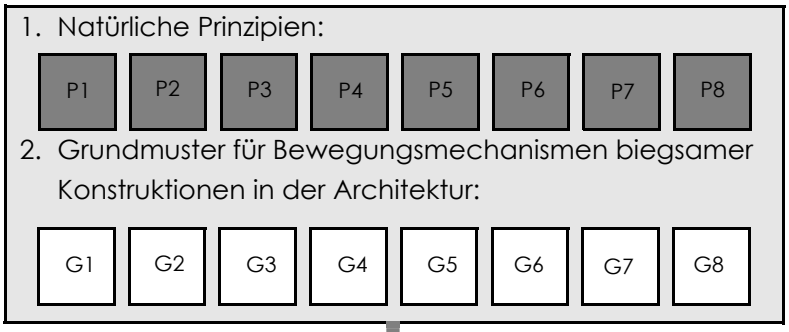
Die folgende Abbildung fasst die Schritte dieses Arbeitsprozesses nochmals zusammen:

Abb. 2-1 Vorgehensweise;

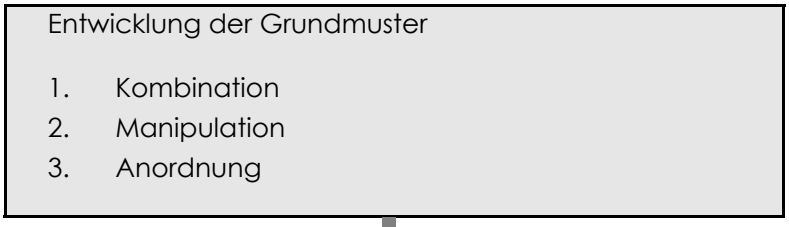
Frage 1, Teil 1 / Kapitel 1, 2:



Frage 1, Teil 2 / Kapitel 3:



Frage 2 / Kapitel 4:



Frage 3 / Kapitel 5:

2.4 Auswahlgebiete

Unsere Vorbilder werden vorwiegend unter den mehrzelligen Lebewesen, besonders den Tieren und Pflanzen, ausgewählt. Die Beispiele betreffen entweder den ganzen Körper oder nur ein Körperteil.

Da die Verformung des Körpers unserer Beispiele meist durch der Bewegung ausgelöst wird, soll zuerst kurz auf Bewegung von Tieren und Pflanzen allgemein eingegangen werden.

2.4.1 Tiere

Es gibt verschiedene Arten von Bewegungen im Körper von Tieren, wobei Fortbewegung eine der wichtigsten darstellt. In der Biologie bezeichnet Fortbewegung „die aktive Bewegung eines Individuums von Ort zu Ort, angetrieben durch geeignete Bewegung von Gliedmaßen oder anderer anatomischer Teile. Formen der Fortbewegung sind beispielsweise: Laufen, Gehen, Kriechen, Schwimmen und Fliegen“ [76].

Da sich die Bewegungsmechanismen der Wirbeltiere und der Wirbellosen stark unterscheidet, wollen wir diese beiden Gruppen hier getrennt darstellen.

Ein wichtiges Merkmal der Wirbeltiere (Vertebrata) ist die Tatsache, dass Ihr Skelett aus knorpeligen oder knöchrigen Elementen besteht [81]. Bewegung durch Knochen und Gelenke lässt sich sehr gut mit der Bewegung steifer Konstruktionen in der Architektur vergleichen. Deshalb eignen sich Wirbeltiere nicht unbedingt für unsere Zwecke.

Alle Tiere ohne Wirbelsäule zählen zu den Wirbellosen (Invertebrata). Die Mehrzahl aller bekannten Tierarten ist wirbellos [80]. Unter den Wirbellosen lassen sich viele Beispiele finden, die ihren Körper frei und elastisch bewegen können. Aus diesem Grund ist die Wahrscheinlichkeit, geeignete Vorbilder zu finden, in dieser Gruppe größer.

2.4.2 Pflanzen

Obwohl in der botanischen Literatur seit dem Altertum von pflanzlicher Bewegung gesprochen wird, sind alle mehrzelligen und auch viele einzellige Pflanzen im Unterschied zu den meisten tierischen Organismen ortsgebunden. Im Zusammenhang mit Wachstum, Turgorveränderungen, Kohäsionszug und Quellungsunterschieden treten allerdings Krümmungsbewegungen von Pflanzen auf [40].

Aus diesen Krümmungsbewegungen lassen sich zahlreiche physiologische Mechanismen gewinnen, die Anregungen für die Definition besonderer Bewegungsmechanismen in der Architektur liefern.

2.5 Geometrische Kriterien

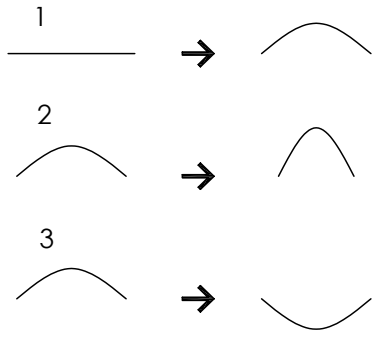


Abb. 2-2 Die geometrischen Veränderungen biegsamer Konstruktionen (2D);
1: Verformung 1
2: Verformung 2
3: Verformung 3

Die geometrischen Veränderungen biegsamer Konstruktionen (2D) werden hier in drei Arten der Verformung unterteilt:

Verformung 1: Von einer Geraden zur Kurve (und umgekehrt)

Verformung 2: Veränderung der Krümmungsstärke der Kurve

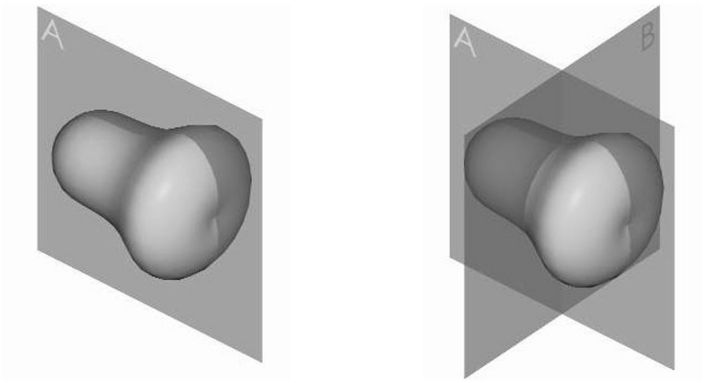
Verformung 3: Veränderung der Krümmungsrichtung der Kurve

(Abb. 2-2)

Durch diese drei Verformungskategorien können Veränderungen abstrakt beschrieben werden, die aufgrund von Bewegung im Körper oder einem Körperteil eines Lebewesen stattfinden. Kriterium für die Auswahl eines natürlichen Vorbilds ist die Ähnlichkeit zwischen der Deformation eines Körpers (oder Körperteils) und einem dieser drei Muster.

Die Körper oder Körperteile müssen diese Bedingungen auf einer oder zwei Achsen erfüllen, je nachdem, ob die Veränderung selbst in nur in einer Achse oder in zwei Achsen stattfindet. Die Vorbilder werden deshalb in zwei Gruppen eingeteilt (Abb. 2-3).

Abb. 2-3 Gruppen der Vorbilder;
Links: Gruppe A, Querschnitt A
Rechts: Gruppe AB, Querschnitte A und B



Gruppe A: Die erste Gruppe enthält die Beispiele, in welchen die Veränderung nach geometrischen Kriterien auf einer Achse stattfindet und deren Wandlung damit in einem Querschnitt studierbar ist (Querschnitt A) (Abb. 2-4-oben).

Gruppe AB: Die zweite Gruppe umfasst die Beispiele, deren Veränderung, geometrisch beschrieben, auf zwei zueinander senkrecht stehenden Achsen stattfindet (Querschnitt A und B) (Abb. 2-4-unten).

Zur Reduzierung der Komplexität wird angenommen, dass Torsionsbewegungen eindimensional auf einer Ebene stattfinden.

Für diese Auswahl ist nur die Verformung von Bedeutung. Der dafür zuständige Mechanismus wird in den folgenden Kapiteln näher untersucht. In den folgenden Abschnitten

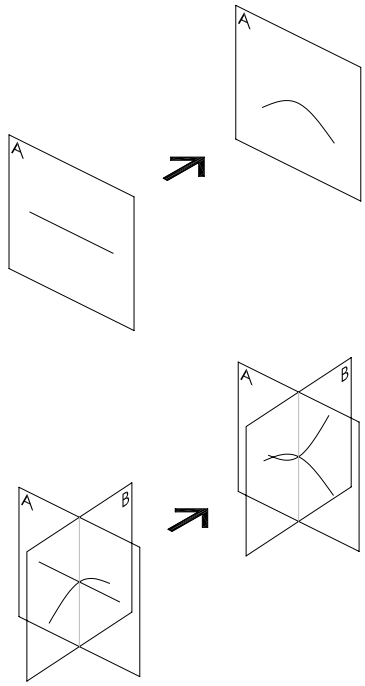


Abb. 2-4 Gruppen der Veränderungen;
Oben: Veränderung in einer Achse
Unten: Veränderungen in zwei Achsen

werden die nach unseren Kriterien ausgewählten Beispiele aus der Natur vorgestellt.

2.6 Vorbilder

Wir stellen hier acht unterschiedliche Beispiele vor, die aus Tieren und Pflanzen nach festgelegten geometrischen Kriterien ausgewählt wurden. Jedes Beispiel zeigt eine Art natürlichen Mechanismus. Die Anzahl der berücksichtigten Vorbilder muss aufgrund der Limitationen dieser Dissertation beschränkt bleiben, auch wenn die Natur weitaus mehr faszinierende Beispiele bietet, die als Vorbild für diese Art von Wandelbarkeit dienen könnten.

In jedem Abschnitt wird zu Beginn der Grund für die Auswahl geometrisch dargestellt. Hierauf folgt eine kurze Beschreibung wichtiger Eigenschaften und Besonderheiten des jeweiligen Mechanismus.

Zur Jede Gruppe (Gruppe A und Gruppe AB) zählt insgesamt vier Vorbilder.

Die Informationen, die zu jedem Beispiels angeführt werden, dienen vor allem dem Ziel, Aspekte des spezifischen Verformungsmechanismus verständlich zu machen. Darüberhinaus soll nicht übermäßig ins Detail gegangen werden.

2.6.1 Gruppe A/ Vorbild 1: 9+2-Muster; Cilien und Flagellen

Abb. 2-5 Gruppe A/ Vorbild 1

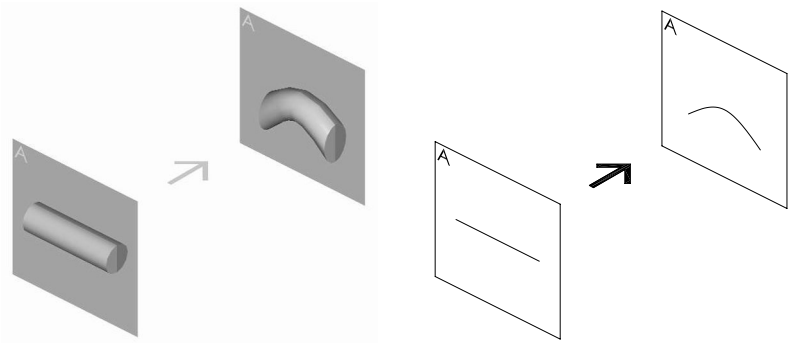


Abb. 2-6 Flagellum [82]

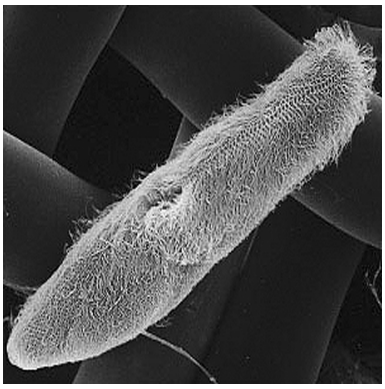


Abb. 2-7 Cilie [82]

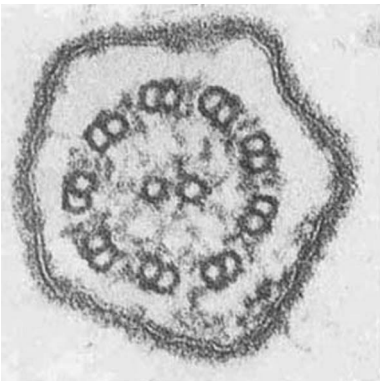


Abb. 2-8 Cilienquerschnitt im elektronenmikroskopischen Bild, [31]

Flagellen (Geißeln) sind von der Zelloberfläche abstehende, schwanz- oder peitschenartige Fortbewegungsorganellen bei einzelligen Lebewesen, die im Gegensatz zu Cilien (Wimpern) meist nur einfach oder doppelt ausgebildet werden (Abb. 2-6, Abb. 2-7). Cilien und Flagellen sind gleich aufgebaut. Kürzere Strukturen werden i. d. Regel als Cilien bezeichnet, längere als Flagellen [82].

Das Schlagen von Cilien und Flagellen ist eine der speziellen Formen von zellulär Bewegung. Die Bewegung erfolgt mit Hilfe von Wellen, welche eine Bewegung mit einer Frequenz zwischen 10 und 40 Hz induzieren. Im Inneren finden wir eine charakteristische 9+2 Struktur (Abb. 2-8). Die Struktur des 9+2-Musters besteht aus neun Doppelmikrotubuli (=Dubletts), die in einem Ring um zwei Zentralmikrotubuli angeordnet sind. Für die Bewegung von Cilien und Flagellen sind sogenannte Motorproteine verantwortlich, welche mit Microtubuli verbunden sind. Motorproteine können die Mikrotubuli unter ATP-Verbrauch gegeneinander verschieben, dadurch verbiegt sich das Flagellum oder die Cilie und führt einen „Schlag“ aus [31], [82] (Abb. 2-9).

Die quasisinusförmige Welle des Flagellenschlags und die Windung des Cilienschlags sind zwei Beispiele für eine einfache Biegung eines linearen Körpers.

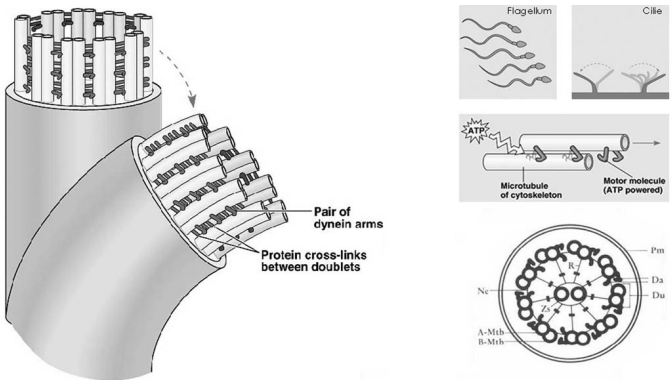


Abb. 2-9 Verformungsmechanismus der Cilien und Flagellen, [82]

2.6.2 Gruppe A/ Vorbild 2: Hygroskopische Bewegung; Laubmoose, Reiherschnabel

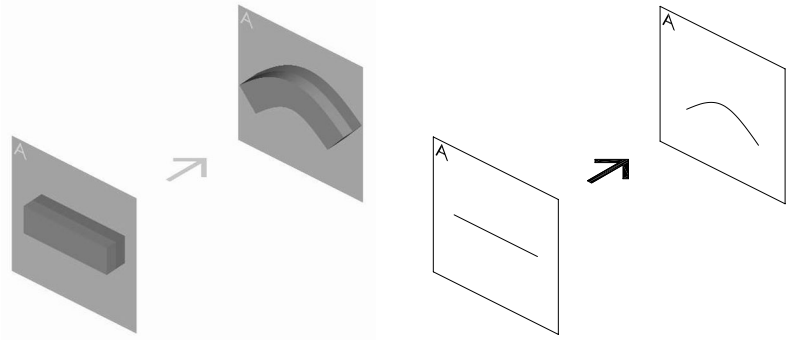


Abb. 2-10 Gruppe A/ Vorbild 2

Bei vielen pflanzlichen Bewegungen handelt es sich um Krümmungsbewegungen. Bei den hygroskopischen Bewegungen sind keine lebenden Pflanzenzellen direkt beteiligt. Vielmehr findet Bewegung aufgrund wiederholbarer physikalischer Prozesse der Quellung bzw. Entquellung toter Zellwände statt. Da die Mikrofibrillen der Zellwände sich bei der Quellung zwar relativ leicht voneinander entfernen, sich jedoch kaum in ihrer Längenausdehnung verändern können, kommt es im Falle einer parallelen Anordnung der Mikrofibrillen bei Quellung zu einer Dehnung fast ausschließlich senkrecht zur Richtung der Mikrofibrillen. Besteht ein Gewebeverband aus zwei Lagen von Zellen, in deren Wänden der Mikrofibrillenverlauf um 90° wechselt, so verläuft die Längenausdehnung der beiden Schichten bei Wasseraufnahme in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen, wobei für jede Richtung die eine als Quell- (bzw. bei Wasserentzug Schrumpf-), die andere als Widerstandsschicht dient. Ist die Ausdehnung einer dieser Schichten bevorzugt, kommt es zur Krümmung. Bilden die Fibrillenlängsachsen in den Wänden benachbarter Zellschichten spitze Winkel miteinander, so entstehen bei Quellung oder Entquellung Torsionen [39].

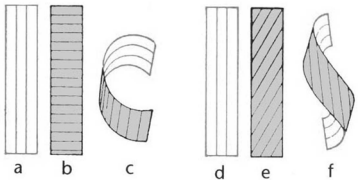
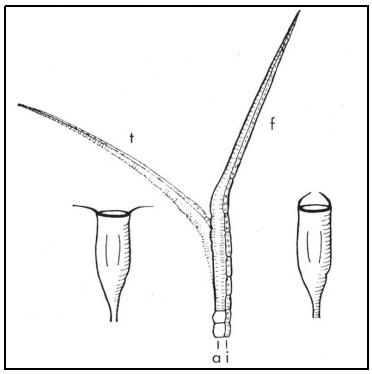


Abb. 2-11 Krümmung von Papierstreifen c und f, die aus je zwei in verschiedenen Richtungen herausgeschnittenen Streifen a und b bzw. d und e zusammengeklebt und dann angefeuchtet wurden. [39]

Die Öffnung der Sporenkapseln von Laubmoosen (Orthotrichum diaphanum) ist von zwei als inneres und äußeres Peristom bezeichneten Zahnkränzen umgeben, von denen der äußere die Kapsel öffnet und schließt. Meist besteht jeder der 16 Zähne aus zwei fest verbundenen, verdickten Tangential-Wandschichten. Ist die außen liegende Wandschicht quer, die innere längs strukturiert, so führt Trockenheit zu einer Krümmung der Zähne nach aussen, und damit zur Öffnung der Kapsel. Besitzt die äußere Schicht eine Längs-, und die innere eine Querstruktur, so erfolgt bei Feuchtigkeit eine Kapselöffnung [40] (Abb. 2-12-oben).



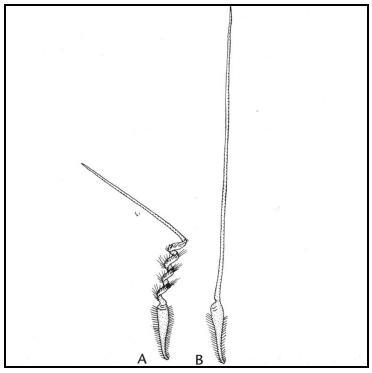


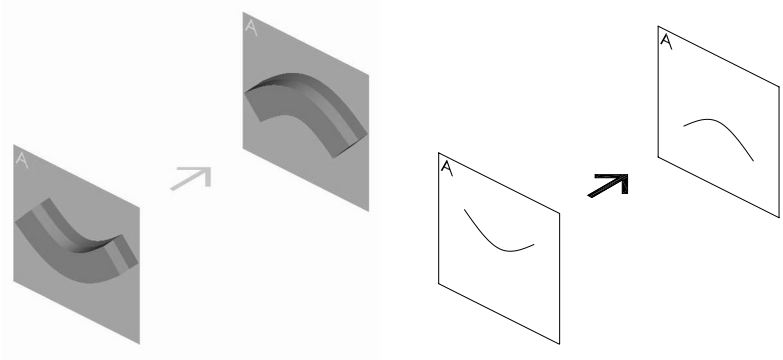
Abb. 2-12 Hygroskopische Bewegung;
Oben: Zahnkränze von Laubmoosen
Unten: Fruchtschnäbel nach der Trockenheit, [39]

Bei dem Reiherschnabel (Erodium gruinum) führt Trockenheit nach der Lösung der Fruchtschnäbel von der Mittelachse zu deren gewundener Einrollung, einer Torsion, und damit zum Abspringen der Teilfrüchte. Diese Torsion ist auf schräg zuein-

ander verlaufende Wandtexturen von inneren und äußeren Zellschichten zurückzuführen [40] (Abb. 2-12-unten).

2.6.3 Gruppe A/ Vorbild 3: Kohäsionsbewegung; Farnsporangien

Abb. 2-13 Gruppe A/ Vorbild 3



Austrocknung kann noch auf eine weitere Art mechanische Effekte hervorrufen, und zwar, indem die Kohäsionskräfte im Füllwasser wasserabgebender Zellen eine Krümmung toter, manchmal auch lebender Gewebeteile veranlassen [39].

Die Kohäsionsbewegungen der Farnsporangien beruhen auf der Wasserabgabe aus noch lebenden Zellen. Über den Scheitel eines kugelförmigen Sporangiums läuft eine Zellschicht (auch Anulus genannt) mit verdickten inneren und Radialwänden, vergleichbar mit einem Irokesenhaarschnitt. Nach der Reifung der durch Mitose gebildeten Sporen verdunstet das Wasser aus den Anuluszellen, und es baut sich ein Zug über den ganzen Scheitel aus, solange, bis die dünnwandigen Zellen an der präformierten Aufrissstelle, dem Stomium, aufreißen. Dadurch schnellt die einschichtige Sporangienwand nach hinten und schleudert im elastischen Gegenschlag die Sporen in den Wind [40] (Abb. 2-14).

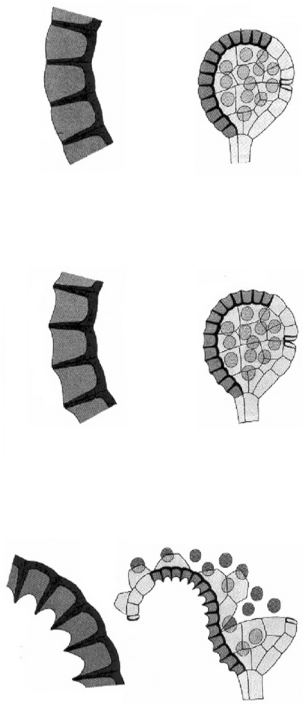


Abb. 2-14 Öffnungsmechanismus eines Sporangiums [79]

2.6.4 Gruppe A/ Vorbild 4:„Fin Ray Effect“®[1]; Schwanzflosse

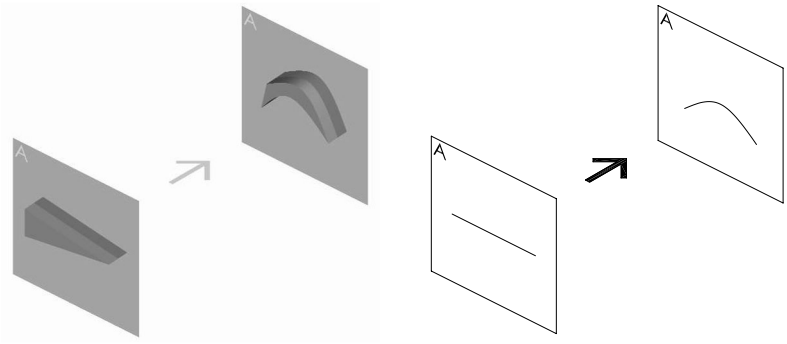


Abb. 2-15 Gruppe A/ Vorbild 4

Im Sommer 1997 wurde der Tischler Leif Kniese darauf aufmerksam, dass, wenn man mit dem Finger gegen die Schwanzflosse einer toten Flunder drückt, diese sich seltsam nach oben krümmt.

Eine Schwanzflosse besteht aus zahlreichen strahlenförmigen Skelettelementen, den Flossenstrahlen. Sie geben der Flosse ihre Festigkeit. Jeder Flossenstrahl besteht aus zwei aufeinander zulaufenden parallelen Strahlen. Dazwischen befindet sich elastisches Gewebe. Die Strahlen sind dadurch gegeneinander verschiebbar. Drückt man seitlich gegen eine der beiden Strahlen, verteilen sich die Kräfte so, dass sich der Flossenstrahl um den Finger wölbt.

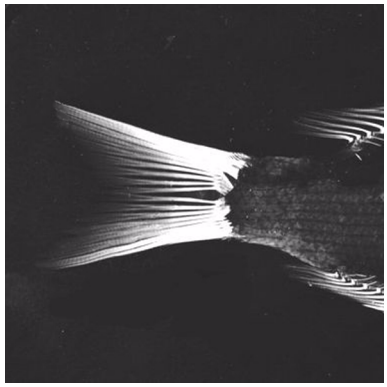


Abb. 2-16 Ein Flossenstrahl besteht aus zwei Strahlen, die aufeinander zulaufen.

Kniese setzte das Prinzip technisch um: In ein längliches Dreieck aus einer dünnen, elastischen Kunststoff-Platte sägte er Löcher, so dass zwei Seitenstrahlen mit Querverbindungen in regelmäßigen Abständen entstanden. Bei seitlichem Druck wölbt sich das Modell genauso wie ein Flossenstrahl [48] (Abb. 2-17).

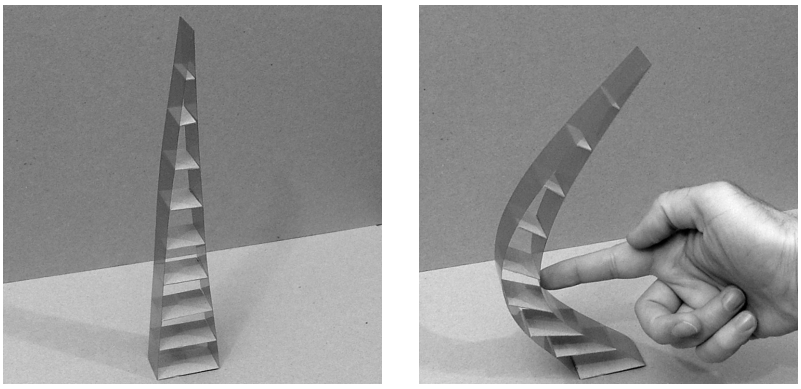
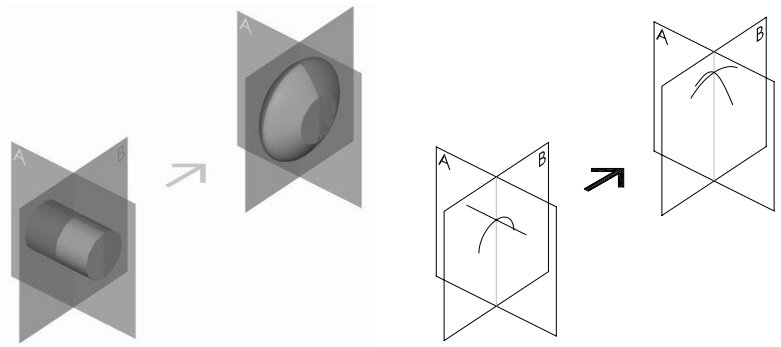


Abb. 2-17 Technisches Modell eines Flossenstrahls. Die Querbalken sind beweglich und entsprechen dem elastischen Gewebe. Seitlicher Druck bewirkt, dass das Modell sich zum Finger hin wölbt.

1. (Flossen-Strahl-Effekt), Leif Kniese, Evologics GmbH, Berlin

2.6.5 Gruppe AB/ Vorbild 5: Hautmuskelschlauch; Regenwurm

Abb. 2-18 Gruppe AB/ Vorbild 5



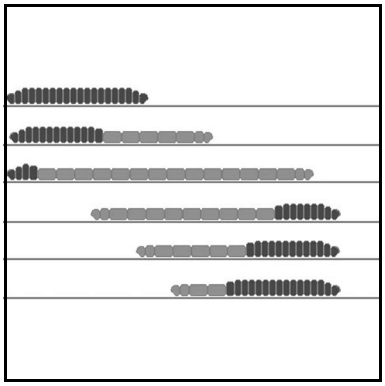


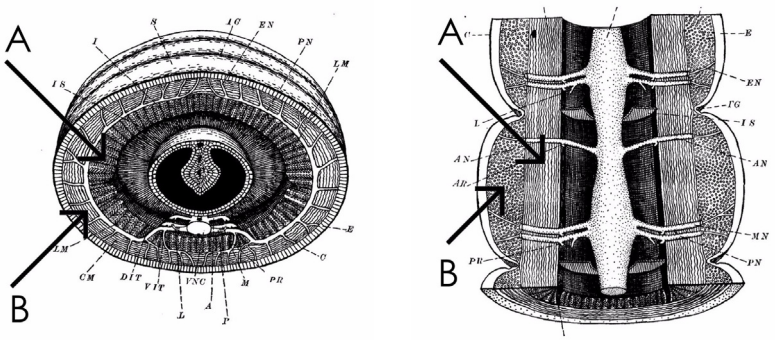
Abb. 2-19 Fortbewegung des Regenwurmes

Entlang der Körperwand eines Regenwurmes erstrecken sich zwei Muskulaturschichten: die dünnere äußere Ringmuskulatur, und die aus mehreren Strängen bestehende, dickere innere Längsmuskulatur. Die Kontraktion dieser zum Hautmuskelschlauch gehörenden Muskelschichten ermöglicht die peristaltische Fortbewegung des Regenwurmes (Abb. 2-20).

Durch das Zusammenziehen der inneren Längsmuskelschicht kann sich der Wurm verkürzen - der Körper wird dicker. Zieht sich die äußere Ringmuskelschicht zusammen, wird er lang und dünn. Beide Bewegungen erfolgen abwechselnd. Dabei verankern die Chitinborsten das Tier im Boden oder auf der Unterlage und verhindern somit das Zurückrutschen des Wurms [77].

Jeder Ring des Hautmuskelschlauches ist ein Beispiel für eine zweiaxiale Biegung. Durch Veränderungen der Ringmuskulatur und Längsmuskulatur entsteht in jedem Ring eine Biegung in zwei Achsen.

Abb. 2-20 Anatomie eines Regenwurmes;
A: Längsmuskulatur
B: Ringmuskulatur [78]



2.6.6 Gruppe AB/ Vorbild 6: Ring- und Radialmuskulatur; Quallen

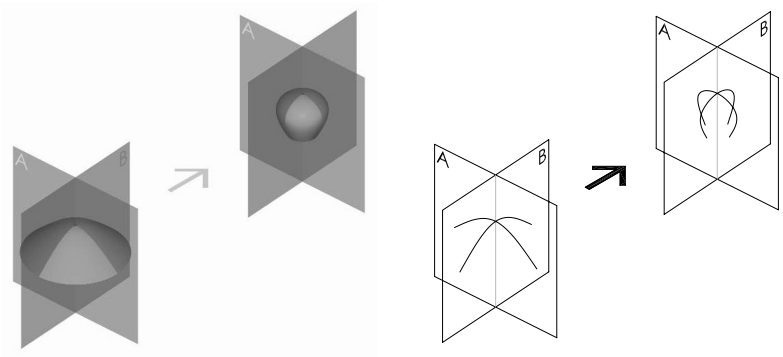


Abb. 2-21 Gruppe AB/ Vorbild 6

Als Qualle oder Meduse bezeichnet man ein Lebensstadium von Nesseltieren. Sie besitzen eine schirmartige Gestalt und bestehen aus zwei einzelnen Schichten, der Außenhaut und Innenhaut. Zwischen Aussen- und Innenhaut befindet sich eine zellfreie Schicht, die Mesogloea (Abb. 2-22). Diese dient als hydrostatisches Stützskelett.

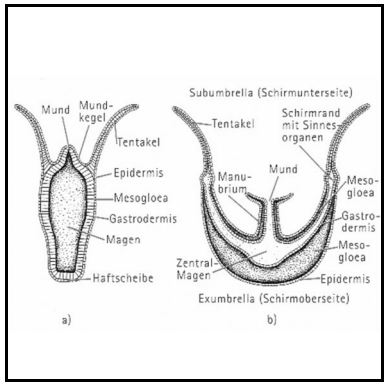


Abb. 2-22 Aufbau von Quallen [49]

Scypho- und Hydromedusen sind mit einer kräftigen Ring- und Radialmuskulatur in der Subumbrella ausgestattet. Die Cubomedusen haben ausschließlich radial verlaufende Muskulatur in der Subumbrella. Ihr „Hautfältchen", das Velarium, ist mit ringförmig angelegten Muskelfasern ausgestattet (Abb. 2-23).

Die meisten Quallen befinden sich in konstanter Bewegung. Die Quallen schwimmen nach dem Rückstoßprinzip. Beim Zusammenziehen des Schirms wird das Wasser unter der Subumbrella herausgedrückt und so Vortrieb erzeugt. Die Randlappen können die Bewegung zusätzlich unterstützen. Widerlager für die kräftigen Muskelkontraktionen ist die Mesogloea. Sie bringt den Schirm wieder „in Form", bevor die nächste Kontraktion einsetzt [49].

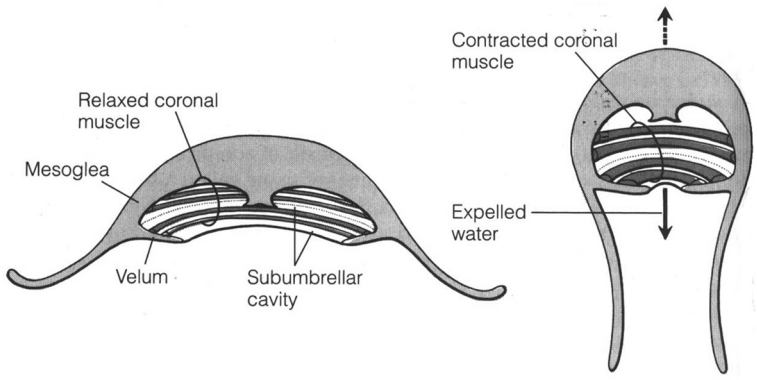
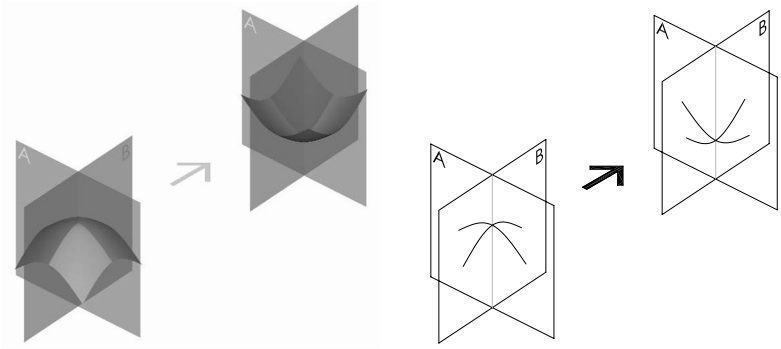


Abb. 2-23 Fortbewegung der Quallen [50]

2.6.7 Gruppe AB/ Vorbild 7: Konvex-Konkav-Effekt; Venusfliegenfalle

Abb. 2-24 Gruppe AB/ Vorbild 7



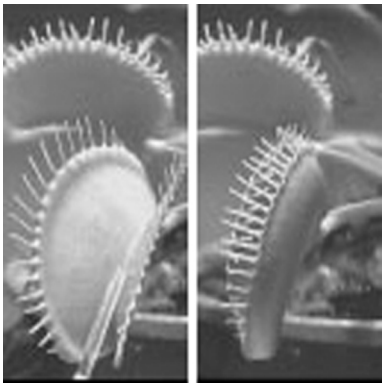
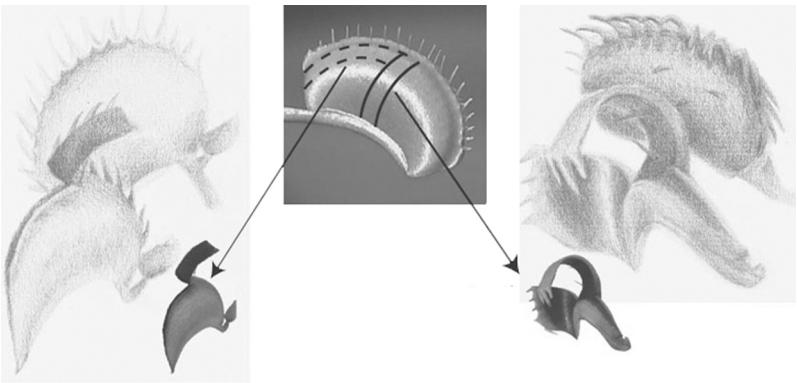


Abb. 2-25 Venusfliegenfalle im geöffneten und geschlossenen Zustand [51]

Die Venusfliegenfalle ist eine außergewöhnliche Pflanze, die bei Reizung ihr aufwändig gebautes Fangblatt extrem schnell zusammenklappen kann, um Insekten und Spinnen zu fangen (Abb. 2-25). Der Fangmechanismus ist mit einer Dauer von bis zu 100 Millisekunden eine der schnellsten bekannten Bewegungen im Pflanzenreich.

Lange Zeit wurde diskutiert, wie der eigentliche Verschluss ausgelöst wird. Favorisiert wurde eine Erklärung aufgrund rascher Abgabe von Zellflüssigkeit. 2004 wurde jedoch die Mechanik experimentell belegt: im offenen Zustand sind die Blatthälften konvex gekrümmt. Dies geschieht durch ein Zusammenziehen der Außenseite der Blatthälften quer zum Gelenk um etwa 10%. Im so gespannten Zustand wartet die Falle auf das Auslösesignal. Mittels noch unbekannter physiologischer Prozesse veranlasst dies eine geringfügige Änderung der Krümmung, woraufhin die Falle schlagartig von einer konvexen in eine konkave Form umschlägt (ähnlich einer umschnappenden Kontaktlinse) und wie ein gespanntes Tellereisen zusammenklappt. Das Zusammenschnappen der Falle selbst ist also kein aktiver Prozess, sondern das Ergebnis der Entladung einer Energie, die von der Pflanze bereits im vorhinein aufgebaut wurde [51] (Abb. 2-26).

Abb. 2-26 Dehnungsverteilung und natürliche Krümmung [51]



2.6.8 Gruppe AB/ Vorbild 8: Krümmungsfalten-Effekt; Löwenmaul

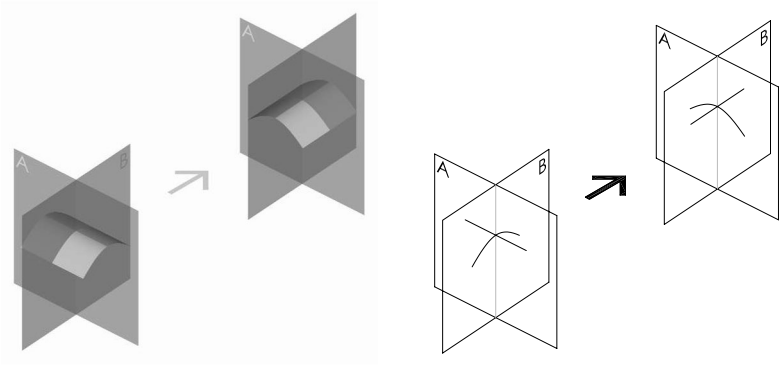


Abb. 2-27 Gruppe AB/ Vorbild 8

Das Löwenmaul (Antirrhinum majus) ist ein besonderes Beispiel für biegsame Flächen mit Falten. Seine charakteristische Verformbarkeit hat es der gekrümmten Faltenlinie seiner Blütenblätter zu verdanken.

Die Blütenblätter des Löwenmaules bestehen aus zwei Teilen: einem oberen und einem unteren. Beide Teile bilden zusammen eine Einheit, die in ihrer Gestalt einem Mund ähnelt (Abb. 2-28). Wird dieser Mund an beiden Seiten zusammengedrückt, so öffnet er sich. Eine genaue Betrachtung zeigt, dass tatsächlich nur der untere Teil des Mundes beweglich ist.

Das Bewegungsprinzip besteht darin, dass die gefalteten Raumkurven der Blütenblätter die Druckrichtung umlenken können. Die Raumkurven besitzen gekrümmte Falten, wegen derer die Unterfläche entlang der Blumenkronröhre gekrümmt wird. Durch den Druck wechselt die Krümmungsrichtung, so dass sich die Unterfläche senkrecht zur ursprünglichen Krümmungsachse biegt. Der Unterteil bewegt sich aufgrund dieser Biegung nach unten (Abb. 2-29). Bei Nachlassen des Druckes kehrt der Unterteil des Mundes wieder zu seiner ursprünglichen Form zurück, weil die Spannung der gekrümmten Falten wieder in Richtung der Krümmung der Unterfläche zurückkehren kann.

Abb. 2-28 Wird eine Einzelblüte der Pflanze leicht zusammengedrückt, so öffnet sich die Blüte zu einem Mäulchen.

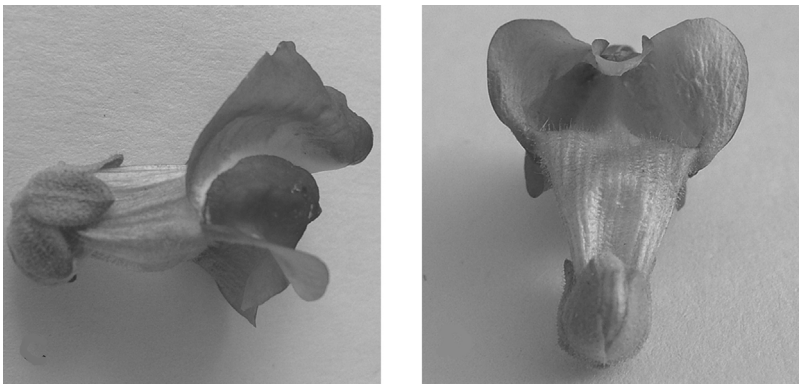
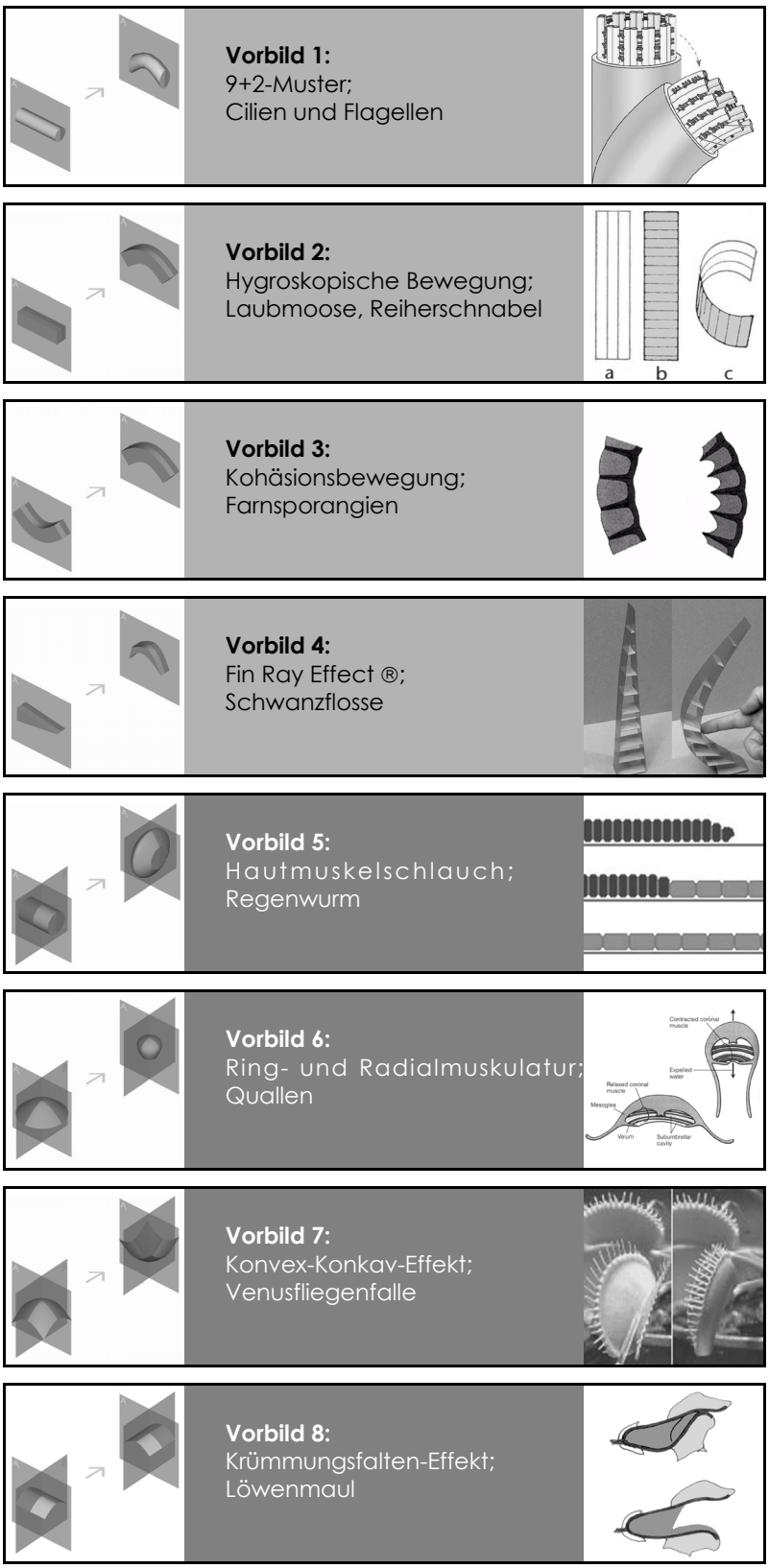


Abb. 2-29 Löwenmaul (Antirrhinum majus);
Links: Seitenansicht der Blume
Rechts: Unterfläche der Blume

2.7 Zusammenfassung

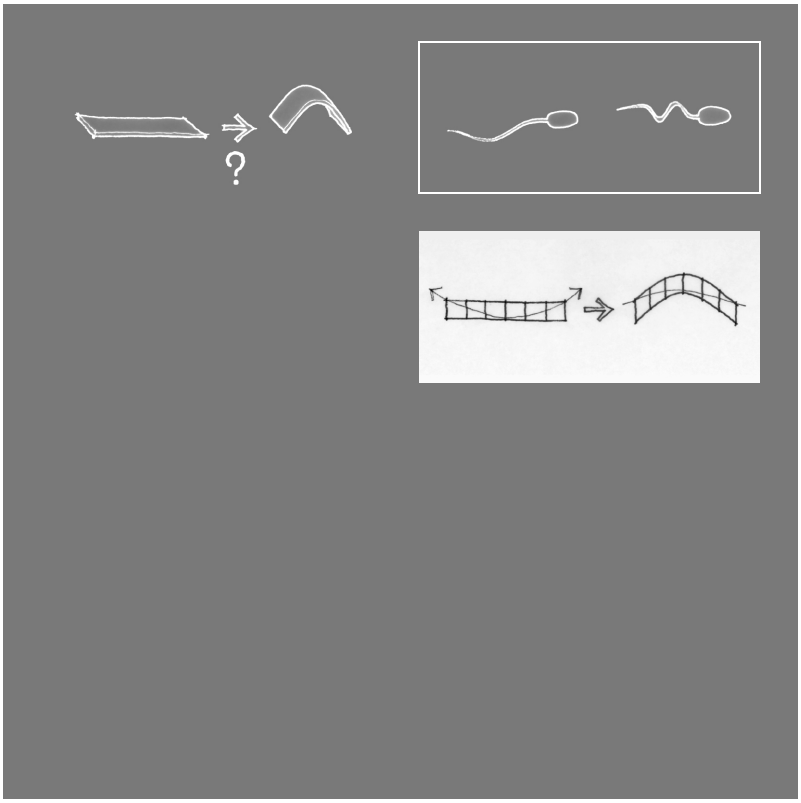
Abb. 2-30 Anordnung der natürlichen Vorbilder



Jedes in diesem Kapitel vorgestellte Vorbild zeigt einen spezifischen Mechanismus, der einen natürlichen Körper oder ein Körperteil biegen kann. Im nächsten Kapitel wird versucht, auf Basis der diesen Mechanismen zugrundeliegenden Prinzipien und mit Hilfe geometrischer Methoden einige Grundmuster zu entwickeln. Die Grundmuster sollen direkt in der Architektur anwendbar sein.

Im Folgenden werden die natürlichen Vorbilder entsprechend ihrer Verformungsgruppe angeordnet dargestellt.

3 Bewegungsprinzipien



3.1 Einführung

In diesem Kapitel sollen aus natürlichen Vorbildern abgeleitete Prinzipien in der Architektur anwendbar gemacht werden. Aus jedem Prinzip lässt sich ein Mechanismus herleiten, der allerdings erst abstrahiert und angepasst werden muss, um für die Architektur nutzbar zu sein.

Hier wird versucht, die Prinzipien zuerst in einer geometrischen Form zu beschreiben, um anschließend über schrittweise Veränderungen nutzbare Formen zu finden und diese als Grundmuster zu definieren. Die Grundmuster stellen biegsame Konstruktionen dar, die sich mit Hilfe bestimmter Mechanismen biegen können. Diese Muster können in der Architektur auf verschiedene Art und Weise, einfach oder in

kombinierter Form, angewendet werden. Mit anderen Worten: ein Grundmuster ist das einfachste architektonische Beispiel eines natürlichen Prinzips.

Ein besonderer Fokus in diesem Kapitel liegt auf der Form und Struktur der Ergebnisse, die auf Basis natürlicher Prinzipien gefunden werden können. In dieser Arbeit möchten wir nur mit linearen Elementen arbeiten, die aus biegsamen, weichen und steifen Werkstoffen bestehen und miteinander vernetzt wurden, und deren Biegung durch lediglich die Verkürzung eines einzelnen Elements möglich ist. Diese Vorgaben limitieren auf eine gewisse Art die Anzahl möglicher Ergebnisse. Außerdem versuchen wir, für jedes Prinzip nur ein Ergebnis als Grundmuster zu präsentieren, was aber nicht bedeutet, dass unser Ergebnis für das jeweilige Prinzip die einzige Möglichkeit darstellt, dieses in der Architektur umsetzen.

Für die Übertragung natürlicher Prinzipien auf Grundmuster wird eine auf Form basierende Methode angewendet, die wie Formengrammatiken[1] [52],[53],[54] aus einer Eingabe, einer Reihe schrittweiser Änderungen und einer Ausgabe besteht. Die Bedeutung und Anwendung der Regeln[2] sowie das Endziel sind in dieser Arbeit allerdings andere. Formengrammatiken zielen auf Entwurfsgenerierung und Entwurfanalyse ab [55], hier dagegen wird diese Methode nur benutzt, um zu zeigen, wie in verschiedenen Schritten, die aus einer begrenzten Anzahl von Modifikationsregeln ausgewählt werden, ein Prinzip in ein anwendbares Muster umgewandelt werden kann. In unserer Methode benutzen wir die Sprache der Formen und Farben, statt der Worte und Sätze, für die Beschreibung jedes einzelnen Schrittes. Dadurch wird der Prozess der Übertragung der Prinzipien in die Architektur nicht nur einfacher und schneller vorstellbar, sondern es lassen sich auch einfacher ähnliche Schritte feststellen und in ähnlichen Fällen nutzen.

In den folgenden Abschnitten stellen wir diese Methode mit ihren wichtigen Grundparametern und Bestandteilen vor.

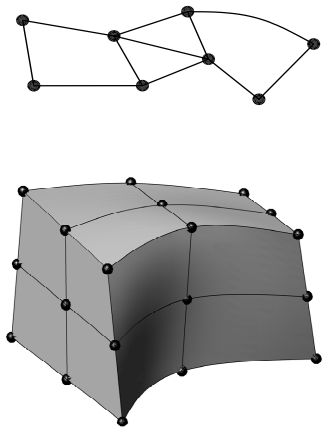


Abb. 3-1 Jedes 2D- oder 3D-Modell wird durch Punkte und ihre Verbindungslinien dargestellt.

3.2 Übertragungsmethode

Für die Übertragung der Prinzipien in die Architektur benutzen wir in dieser Arbeit eine geometrische Methode. Wir versuchen, durch Änderungen an einem abstrahierten Modell jedes Vorbilds geeignete Grundmuster zur Anwendung in der Architektur zu finden.

Wie bei den Formengrammatiken beginnt diese Methode

1. Shape Grammar
2. Rules

mit einer urspruenglichen Form (Eingabe), die schrittweise verändert wird (Modifikationssequenz) und schließlich mit einem Ergebnis (Ausgabe) endet. Die ursprüngliche Form ist ein Prinzip aus der Natur, das Ergebnis ist ein Grundmuster in der Architektur. Anstelle der Regeln in den Formengrammatiken benutzen wir hier „Formänderung“, „Formmodifikation" und „Strukturmodifikation“. Jede Änderung und Modifikation hat eine spezielle Bedeutung und definiert in einem 2D- oder 3D-Modell durch ein bestimmtes Formverfahren oder eine bestimmte Formtransformation.

Das Ziel dieses Prozesses ist es, einige bestimmte Mechanismen zur Wandlung biegsamer Konstruktionen zu definieren.

Für die Anwendung dieser Methode müssen zuerst folgende Begriffe definiert werden: Form, Struktur, Formänderung, Formmodifikation, Strukturmodifikation, Farbenbestimmung und Modifikationssequenz.

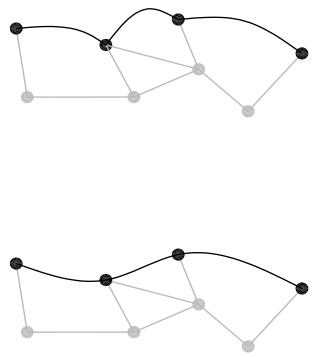


Abb. 3-2 Die Punkte können nicht nur auf beiden Enden der Kurve, sondern auch auf der Kurve selbst liegen;
Oben: Die Punkte liegen auf beidem Ende der Kurven
Unten: Die Punkte liegen auch auf der Kurve

3.2.1 Form und Struktur

In dieser Methode wird jedes Vorbild zuerst abstrahiert und anschließend sein Prinzip mit Hilfe geometrischer Elemente dargestellt. Geometrisch dargestellte Modelle werden in verschiedenen Schritten modifiziert, um die Grundmuster zu bestimmen.

Jedes 2D- oder 3D-Modell besteht aus Punkten und ihren Verbindungslinien[3] (Abb. 3-1).

Die Verbindungslinien können Geraden oder Kurven[4] sein. Dabei können die Punkte nicht nur auf beiden Enden der Kurve, sondern auch auf der Kurve selbst liegen (Abb. 3-2).

Ebene und gekrümmte Flächen werden durch Linien und Punkte dargestellt und definiert (Abb. 3-3).

Da Form und Struktur der Modelle Informationen über zweierlei Eigenschaften enthalten, müssen zwei Arten der Veränderung unterschieden werden.

„Form“ steht für die geometrischen Eigenschaften eines Modells, wie Länge, Winkel und Krümmung.

„Struktur“ beschreibt die topologischen Eigenschaften eines Modells, wie Anzahl der Verbindungslinien und Punkte, Nachbarschaft und Zusammenhang der Linien.

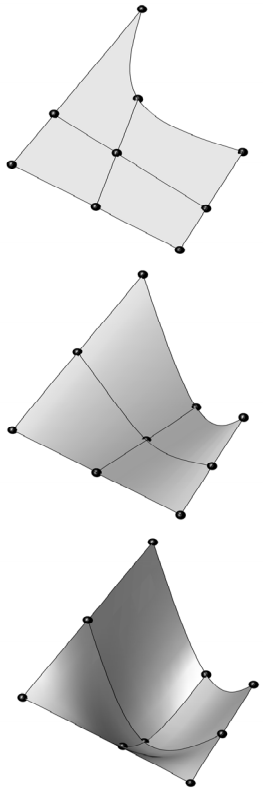


Abb. 3-3 Die Kanten und die Krümmung der Flächen werden hier durch Geraden und Kurven definiert;
Oben: Ebene Fläche
Mitte: Einfach gekrümmte Fläche
Unten: Doppelt gekrümmte Fläche

3.2.2 Formänderung

Eine „Formänderung" zeigt die Änderungen eines geometrischen Modells, die durch Variation von Formparametern (Winkel, Länge, Krümmung) stattfindet. Die Struktur vor und

3. Eine Verbindungslinie (oder kurz nur Linie) ist in dieser Arbeit entweder eine Gerade oder eine Kurve, die zwischen zwei Punkten aufgespannt ist.
4. Die Kurven können abhängig von der Struktur des Modells entweder einen Kreisbogen oder ein Spline darstellen.

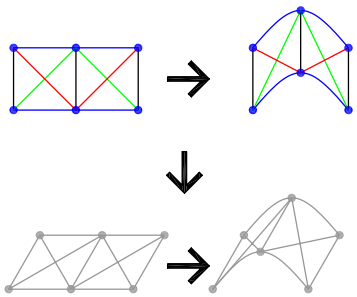


Abb. 3-4 Formänderung und Formmodifikation;
Links nach rechts: Formänderung
Oben nach unten: Formmodifikation

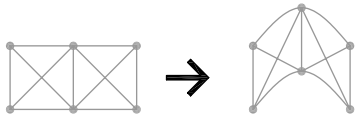


Abb. 3-5 Graue Markierung zeigt noch nicht definierte Änderungen.

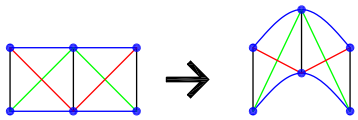
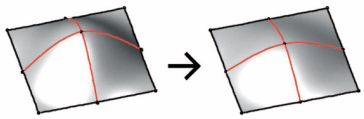


Abb. 3-6 Jede Farbe hat eine bestimmte Bedeutung in Bezug auf Formänderung.



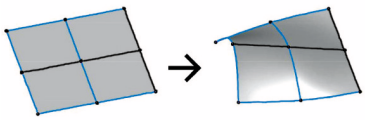


Abb. 3-7 Darstellung der Änderungen der Flächen durch ihre definierenden farbigen Linien.

nach der Formänderung ist dieselbe. In einer Formänderung, gibt es eine linke und eine rechte Seite. Die linke Seite zeigt das Modell vor der Änderung. Die rechte Seite zeigt das Modell nach der Änderung. Die linke und die rechte Seite sind durch einen Pfeil (→) verbunden (Abb. 3-4).

Eine Formänderung wird entweder direkt aus einem natürlichen Prinzip (der Eingabe) hergeleitet oder findet in verschiedenen Schritten in einer bestimmten Modifikationssequenz statt.

Die Änderungen der Parameter innerhalb einer Formänderung werden farblich dargestellt. Die Farben haben folgende Bedeutungen (Abb. 3-6):

Grau: Nach den Formmodifikationen oder der Erstellung neuer Elemente (Strukturmodifikation/Addition) benutzen wir Grau. Dies soll zeigen, dass die Art der Änderung der dargestellten Elemente noch nicht definiert ist und im nächsten Schritt erfolgt (Abb. 3-5).

Blau: Die Änderung von einer Geraden zur Kurve oder umgekehrt, und die Änderung der Krümmung einer Kurve, werden blau dargestellt (die Länge verändert sich nicht).

Blaue Punkte zeigen auch die Winkeländerung zwischen den Elementen an (Wenn einige Linien in einem Punkt miteinander verbunden werden, ist die Winkeländerung zwischen mindestens zwei Linien ausreichend für die Verwendung blauer Farbe).

Rot: Rot zeigt die Verkürzung der Linien.

Grün: Grün zeigt die Verlängerung der Linien.

Schwarz: Schwarze Linien zeigen, dass diese Linien nach der Formänderung des Modells keine Längen- und Krümmungsänderung aufweisen. Schwarze Punkte zeigen, dass die Winkel zwischen den Linien in diesen Punkten nach der Formänderung gleich sind.

Änderungen der Flächen sind aus den Farben der sie definierenden Linien ersichtlich (Abb. 3-7).

Da eine Formänderung nicht numerisch dargestellt wird, zeigt das Bild auf der rechten Seite nur eine Variante der Änderungen. Zum Beispiel kann sich eine blaue Gerade nach oben oder unten, stark oder schwach biegen. Eine Variante ist jedoch ausreichend für die Darstellung des Änderungsmechanismus.

3.2.3 Modifikation[5] der Form und Struktur

Die meisten Formänderungen sind nicht direkt in der Architektur umsetzbar. Eine Formänderung, die aus einem natürlichen Prinzip hergeleitet wird, muss durch eine schrittweise Modifikationen (Modifikationssequenz) an das jeweilige Ziel

angepasst werden. Unseres Ziel ist es, am Ende jedes Prozesses eine wandelbare Konstruktion zu definieren, die durch ein einfaches Antriebssystem veränderbar ist. Diese Konstruktion muss aus linearen Elementen bestehen. Die wichtigsten Bestandteile sind elastische Elemente. Wir benötigen jedoch auch weiche und steife Elemente. Was hier als biegsame Konstruktion bezeichnet wird, muss sich entweder biegen oder durch Biegung seiner Komponenten verformen lassen. Um dieses Ziel zu erreichen, modifizieren wir die Form- oder Strukturparameter der Modelle.

In einem Modifikationsschritt (Form- oder Strukturmodifikation) gibt es eine obere und eine untere Seite, wobei diese zwei Stufen der Modifikationssequenz durch einen Senkrechtpfeil (↓) verbunden sind (Abb. 3-4,Abb. 3-8).

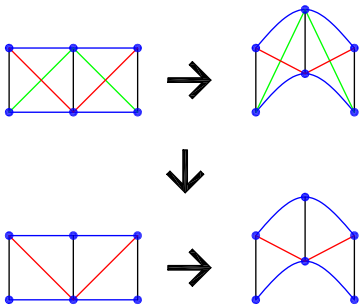


Abb. 3-8 Oben nach unten: Strukturmodifikation

- **Formmodifikation**

Eine „Formmodifikation" bedeutet hier die „Variation der Formparameter (Winkel zwischen den Verbindungslinien oder Krümmung der Linien) geometrischer Modelle im nächsten Schritt einer Modifikationssequenz".

Die Formmodifikationen werden hier mit Hilfe eines abgekürzten Namens bezeichnet, der aus einem Präfix (F: **F**ormmodifikation) und einem Suffix (D: **D**rehung/ K: **K**rümmungsänderung) besteht. Zum Beispiel FD: F= Formmodifikation, D= Drehung.

Die folgende Liste stellt verschiedene Formmodifikationen vor:

FD/ Drehung: In diesem Schritt verändert sich die Form durch Drehung eines oder mehrerer Elemente (Linie/Linien oder Fläche/Flächen) (Abb. 3-9)

FK/ Krümmungsänderung: In diesem Schritt wird die Krümmung der Linien oder Flächen verändert. Durch Krümmungsänderung können einige miteinander verbundene Geraden durch eine Kurve beschrieben werden und umgekehrt. Eine doppelt gekrümmte Fläche kann auch durch eine einfach gekrümmte Fläche und die Änderung ihrer Krümmung beschrieben werden (Abb. 3-10).

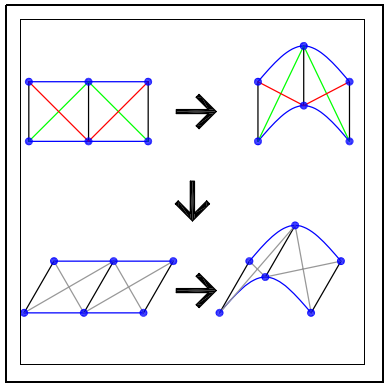


Abb. 3-9 Formmodifikationen, Beispiel für FD
Formänderung durch Drehung

5. Hier muss auf Unterschiede zwischen der Verwendung der Begriffe "Änderung" und "Modifikation" in dieser Arbeit aufmerksam gemacht werden:
Wir benutzen das Wort „Änderung" (in „Formänderung"), wenn wir beschreiben möchten, welche Verformungen in Gesamtsystem durch die Wirkung bestimmter Parametervariationen verursacht werden.
Wir benutzen das Wort „Modifikation" (in „Form"- oder „Strukturmodifikation"), wenn wir die Form- oder Strukturparameter eines Modells bewusst variieren, um aus abstrahierten natürlichen Prinzipien im Laufe einer Modifikationssequenz geeignete Grundmuster herzuleiten, die direkt in der Architektur umsetzbar sind.

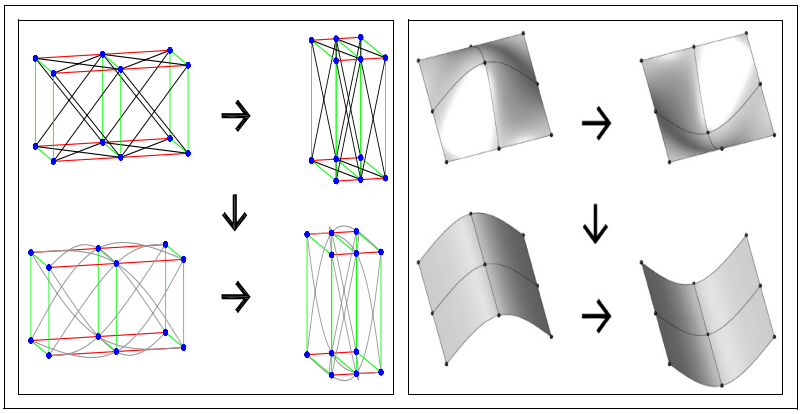


Abb. 3-10 Formmodifikationen, Beispiele für FK
Formänderung durch Änderung der Krümmung

- **Strukturmodifikation**

Eine „Strukturmodifikation" bedeutet hier die „Variation der Strukturparameter (Anzahl der Verbindungslinien und Punkte sowie die Nachbarschaft der Verbindungslinien) geometrischer Modelle im nächsten Schritt einer Modifikationssequenz".

Jede Strukturmodifikation wird hier mit Hilfe eines abgekürzten Namens beschrieben, der aus einem Präfix (S: **S**trukturmodifikation), einem Infix (A: **A**ddition/ S: **S**ubtraktion/ SA: **S**ubtraktion & **A**ddition/ T: **T**ransformation) und einer Nummer als Suffix besteht. Zum Beispiel SA2: S= Strukturmodifikation, A= Addition, 2= zweite Gruppe der Addition.

Addition: „Addition" bedeutet, dass eine oder einige Linien zur Struktur der vorherigen Stufe einer Modifikationssequenz hinzugefügt werden. In der Strukturmodifikation benutzen wir drei Arten der Addition (Abb. 3-11):

SA1/ Einfach: Wir addieren eine gerade Linie zur Verbindung zwei Punkte miteinander.

SA2/ Diagonal: Wir addieren eine Gerade/ zwei Geraden zur diagonalen Verbindung in einem Viereck.

SA3/ Teilung: Nach der Teilung der zweier Linien in gleichmäßigen Abständen (bei identischer Anzahl von Teilungspunkten auf beiden Linien), addieren wir die Linien, die die gegenüber positionierten Teilungspunkte miteinander verbinden.

Die Verbindung kann auch zwischen den Teilungspunkten und nur einem einzigen gegenüberliegenden Punkt hergestellt werden (in diesem Fall ergibt sich eine fächerförmige Linienstruktur).

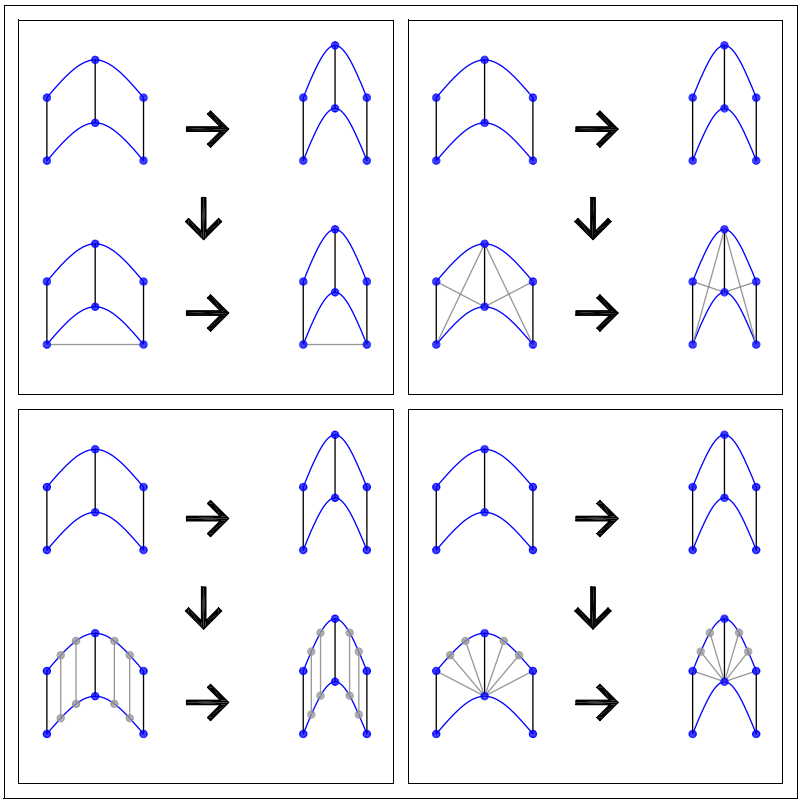


Abb. 3-11 Strukturmodifikationen/ Addition;
Oben Links: Beispiel für SA1
Oben Rechts: Beispiel für SA2
Unten: Beispiele für SA3

Subtraktion: „Subtraktion" bedeutet, dass eine oder einige Linien oder auch Flächen des Modells der letzten Stufe einer Modifikationssequenz gelöscht werden. Es gibt hier vier Arten von Subtraktion, die für die Strukturmodifikation angewandt werden (Abb. 3-12):

SS1/ Schwarze Linien: Zusätzliche Linien, deren Länge sich aufgrund der Formänderung nicht verändert, werden subtrahiert.

SS2/ Grüne Linien: Alle Linien, deren Länge sich aufgrund der Formänderung verlängert, werden subtrahiert.

SS3/ Rote Linien: Zusätzliche Linien, deren Länge sich aufgrund der Formänderung verkürzt, werden subtrahiert.

SS4/ Flächen: Überflüssig gewordene Flächen werden subtrahiert.

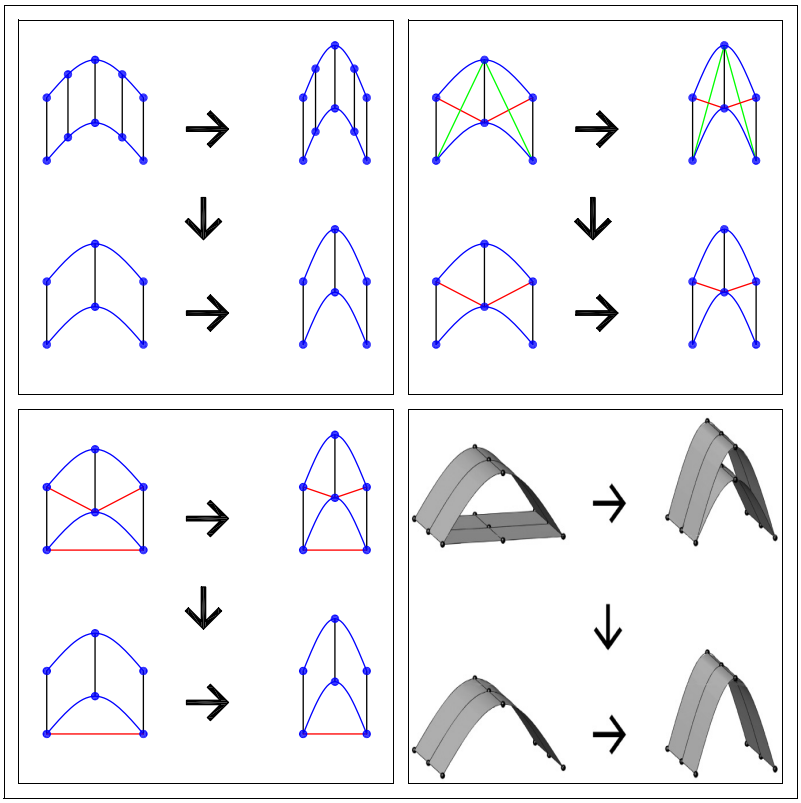


Abb. 3-12 Strukturmodifikationen/ Subtraktion;
Oben Links: Beispiel für SS1
Oben Rechts: Beispiel für SS2
Unten Links: Beispiel für SS3
Unten Rechts: Beispiel für SS4

Subtraktion & Addition: Hier werden einige Linien oder Flächen gelöscht, und statt dessen einige andere Linien hinzugefügt. Es gibt zwei Arten der SA (Abb. 3-13):

SSA1/ Gerade: Ersetzen von Geraden durch andere Geraden, die andere Punkte miteinander verbinden.

SSA2/ Fläche zu Linien: Ersetzen einer gekrümmten Fläche durch die sie definierenden Linien.

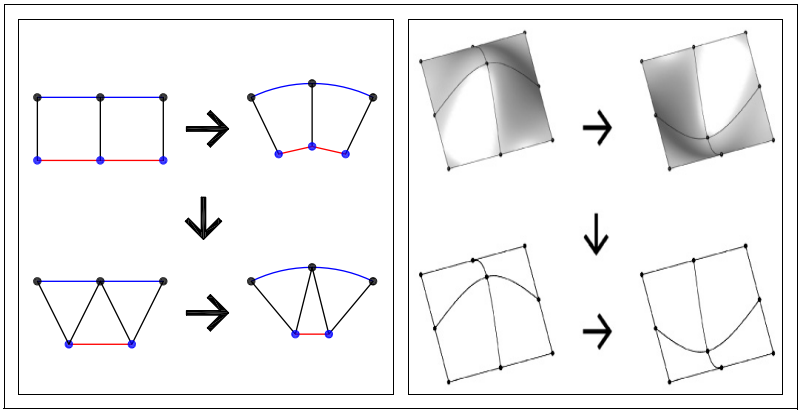


Abb. 3-13 Strukturmodifikationen/ Subtraktion & Addition;
Links: Beispiel für SSA1
Rechts: Beispiel für SSA2

Transformation: „Transformation“ bedeutet hier, dass die Struktur der letzten Stufe einer Modifikationssequenz durch Anwendung von Transformationen wie Spiegelung oder Translation modifiziert wird. Zwei Arten von Formtransformationen werden hier angewendet (Abb. 3-14):

ST1/ Spiegelung: Ein Teil des Modells wird gespiegelt, ohne

dass der ursprüngliche Teil subtrahiert wird.

ST2/ Translation: Ein Teil des Modells wird verschoben, und die Nachbarschaftsverhältnisse ändern sich durch diese Verschiebung.

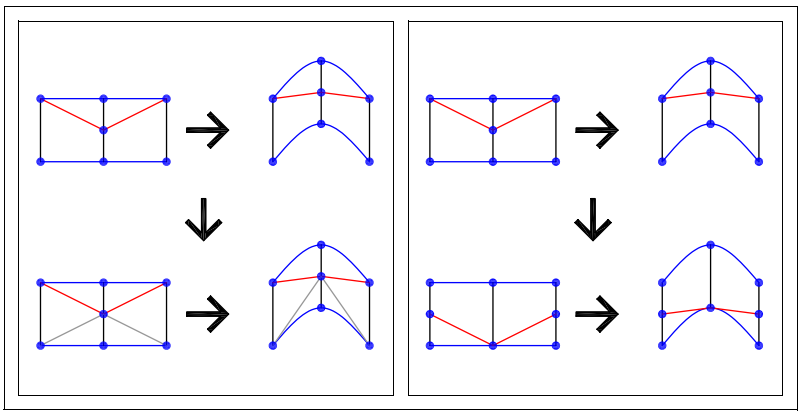


Abb. 3-14 Strukturmodifikationen/ Transformation;
Links: Beispiel für ST1
Rechts: Beispiel für ST2

3.2.4 Farbenbestimmung

Eine „Farbenbestimmung" erfolgt entweder zur Definition oder zum Wechseln der Farben innerhalb einer Formänderung oder für eine Modifikation des Modells in einer Stufe einer Modifikationssequenz.

In einer Farbenbestimmung gibt es, wie auch in der Form- oder Strukturmodifikation, eine obere und eine untere Seite. Auch hier sind diese beiden Stufen der Modifikationssequenz durch einen Senkrechtpfeil (↓) verbunden.

Jede Farbenbestimmung wird hier mit Hilfe eines abgekürzten Namens beschrieben, der aus einem Präfix (FD: **F**arbenbestimmung) und einem Suffix (Fd: **F**arbben**d**efinition/ Fw: **F**arb**w**echsel) besteht.

FFd/ Farbbendefinition: In diesem Schritt definieren wir die Änderungen jedes Elements und stellen diese farblich dar (Abb. 3-15-links).

FFw/ Farbwechsel: In diesem Schritt muss die Farbe ausgewählter und anderer betroffener Elemente modifiziert werden (Abb. 3-15-rechts).

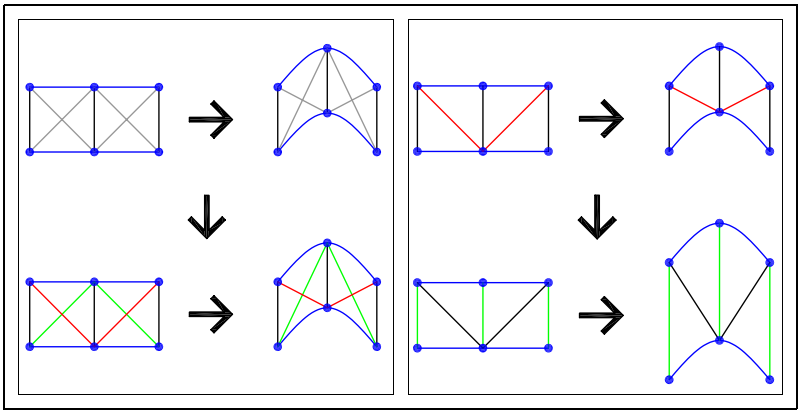


Abb. 3-15 Farbenbestimmung;
Links: Beispiel für FFd/ Farbendefinition
Rechts: Beispiel für FFw/ Farbenwechsel

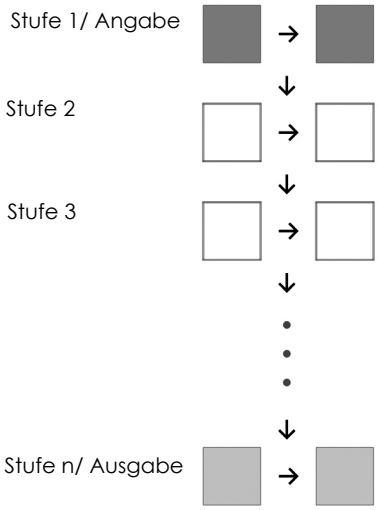


Abb. 3-16 Reihenfolge der Änderungen

3.2.5 Modifikationssequenz

Eine Modifikationssequenz wird hier als eine geordnete Folge von Modifikationen definiert, die mit einer Eingabe in Form einer Anfangsform beginnt, welche aufgrund bestimmter Voraussetzungen schrittweise modifiziert wird, und in Form einer Ausgabe endet.

Eingabe, Ausgabe und jede Stufe einer Modifikationssequenz sind jeweils eine „Formänderung" (von links nach rechts). Die Stufen sind von oben nach unten notiert. Die oberste Stufe beschreibt die Eingabe, die unterste Stufe die Ausgabe. Jedes Stufenpaar definiert eine Form- oder eine Strukturmodifikation (Abb. 3-16).

In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten Aspekte einer Modifikationssequenz vorgestellt werden.

- **Eingabe**

Die Eingabe einer Modifikationssequenz ist eine abstrahierte geometrische Form, die durch Punkte und Verbindungslinien dargestellt wird. Diese geometrische Form ist ein 2D- oder 3D-Modell eines natürlichen Prinzips. Die abstrahierten Modelle werden in Abschnitt 3. 3 definiert.

- **Modifikationsziele**

In jedem Modell werden die Wandlungsmöglichkeiten, die durch Änderungen ihrer Parameter zustande kommen, mit Hilfe von Farben dargestellt (siehe Abschnitt „Formänderung"). In dem Abschnitt „Modifikation der Form und Struktur" wurde über Änderungen gesprochen, die gezielt auf die Modelle angewendet werden. Jetzt muss bestimmt werden, wie geeignete Vorschläge für diese Modifikationen gefunden werden können, und wann der Prozess einer Modifikationssequenz beendet werden soll.

Die Niederkomplexität des Gesamtsystems spielt hier eine zentrale Rolle. Wir wollen nicht jede Konstruktion durch aufwändige, hochkomplexe, computergesteuerte Systeme verformen müssen. Ausschlaggebend für die Änderung vieler wandelbarer Konstruktionen ist oft bereits allein die Änderung der Länge (Verkürzung oder Verlängerung) mancher einzelner Elemente. Dies soll auch in dieser Arbeit das Ziel sein. Die Biegung von Konstruktionen soll nur aufgrund der Änderung der Länge von Elementen möglich sein. Um dieses Ziel zu erreichen, wenden wir verschiedene Arten von Modifikationen auf geometrische Modelle an.

Wenn jedes Element eines geometrischen Modells als ein Teil einer Konstruktion betrachtet wird, haben farbige Linien und Punkte folgende Bedeutungen:

Blaue Linie: biegsame Elemente

Blaue Punkte: Verbindung (gelenkig)
Rot: Elemente, die verkürzt werden können (Seile)
Grün: Elemente, die verlängert werden können
Schwarze Linie: steife Elemente
Schwarze Punkte: Verbindung (eingespannt)

Alle Form- und Strukturmodifikationen kommen dadurch zustande, dass die Krümmung blauer Linien (oder mit blauen Linien gekennzeichneter Flächen) durch Verkürzung einer roten Linie (oder einiger miteinander verbundener roter Linien) verändert wird. Wenn dieses Ziel erreicht ist, ist eine Modifikationssequenz abgeschlossen. In diesem Prozess sind folgende Gesichtspunkte wichtig:

1. Grüne Linien müssen subtrahiert werden.
2. Rote Linien mit gleichen Aufgaben müssen subtrahiert werden (SS3).
3. Rote Linien, die miteinander keine Verbindung haben, müssen durch Strukturmodifikationen miteinander verknüpft werden.

Natürlich erreicht man mit anderen Kriterien andere Ergebnisse. Wir behaupten keineswegs, dass unsere Ergebnisse die einzigen aus jedem Prinzip herzuleitenden sind.

- **Ausgabe**

Unsere Prinzipien lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. Prinzipien zur Formänderung auf einer Achse
2. Prinzipien zur Formänderung auf zwei Achsen.

In uniaxialen Prinzipien versuchen wir, durch eine rote Linie oder einige miteinander verbundene rote Linien die Krümmung einer oder einiger blauer Linien zu verändern. Blaue Linien sind die Hauptelemente, jedoch können schwarze Linien als Nebenelemente benutzt werden.

In biaxialen Prinzipien versuchen wir, durch eine rote Linie oder einige miteinander verbundene rote Linien, die Krümmung einer Fläche oder einiger miteinander verbundener Flächen zu verändern. Diese Veränderung ist durch eine Änderung der Krümmung ihrer blauen Bestandteile möglich.

Die geometrischen Ergebnisse müssen anhand von Modellen aus geeigneten Materialien geprüft werden. Wenn ein Ergebnis durch ein Modell bestätigt wird, ist dieses als ein Grundmuster für direkte oder indirekte Anwendungen in der Architektur akzeptabel.

3.3 Natürliche Prinzipien

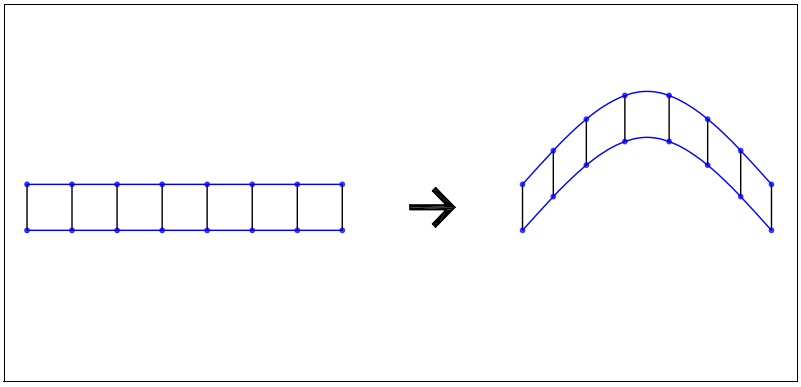
Wie im letzten Kapitel beschrieben, zeigt jedes Vorbild jeweils einen charakteristischen Biegemechanismus. Die Vorbilder sind jedoch jeweils von gänzlich unterschiedlichem

Charakter. Aufgrund der gewählten geometrischen Darstellungsmethode müssen die Prinzipien zunächst in eine geometrische Form übertragen werden.

In diesem Abschnitt werden einaxiale Prinzipien durch 2D-Modelle und zweiaxiale Prinzipien durch 3D-Modelle dargestellt und erklärt.

3.3.1 Prinzip 1

Abb. 3-17 Prinzip 1



Das erste Prinzip basiert auf dem 9+2-Muster von Cilien und Flagellen. Cilien und Flagellen können sich mit Hilfe von Mikrotubuli verformen. Motorproteine können die Mikrotubuli gegeneinander verschieben. Dadurch verbiegt sich das Flagellum oder die Cilie [31].

Dieses einaxiale Prinzip wird hier (Abb. 3-17) geometrisch abstrahiert. Zwei parallele blaue Linien sind die Hauptelemente (biegsame Elemente). Dazwischen stehen parallele schwarze Verbindungslinien in Form von Nebenelementen (steifen Elementen). Die blauen und schwarzen Linien werden in blauen Punkten (gelenkigen Verbindungen) miteinander verbunden. Wenn die Winkel zwischen den blauen und schwarzen Linien ungleichmäßig verändert werden, formen sich die blauen Geraden zu Kurven[6].

6. Alle Modelle werden zum Zwecke der Komplexitätsvermeidung symmetrisch dargestellt.

3.3.2 Prinzip 2

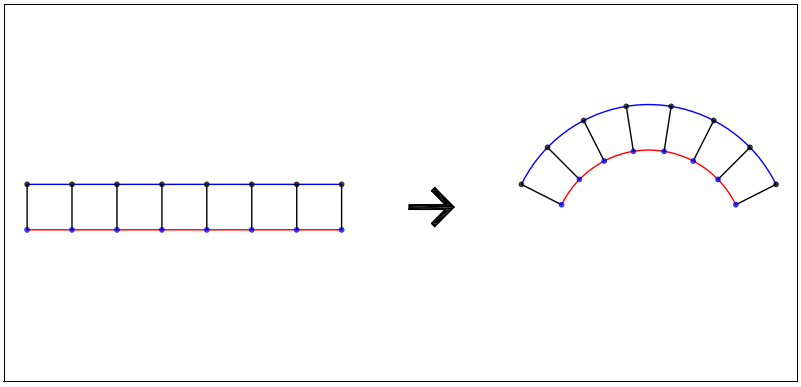


Abb. 3-18 Prinzip 2

Das zweite Prinzip basiert auf hygroskopischen Bewegungen von Pflanzen. Die Mikrofibrillen der Zellwände entfernen sich bei der Quellung voneinander, verändern dabei jedoch kaum ihre Länge. Ein Gewebeverband besteht aus zwei Lagen von Zellen. Die Fibrillenlängsachsen sind in den Wänden benachbarter Zellschichten nicht gleich, weshalb die Längenausdehnung der beiden Schichten bei Wasseraufnahme in zwei unterschiedlichen Richtungen verläuft. Ist die Ausdehnung einer dieser Schichten bevorzugt, kommt es zur Krümmung oder Torsion [39].

Das abstrahierte Modell dieses einaxialen Prinzips wird in Abb. 3-18 dargestellt. Eine blaue Linie, als Hauptelement, liegt parallel zu einer roten (verkürzbaren) Linie. Dazwischen stehen parallele schwarze Verbindungslinien in Form von Nebenelementen. Die schwarzen Linien sind in schwarzen Punkten mit blauer Line und in blauen Punkten mit roten Linien verbunden. Werden die roten Linien verkürzt, formt sich die blaue Gerade zur Kurve.

3.3.3 Prinzip 3

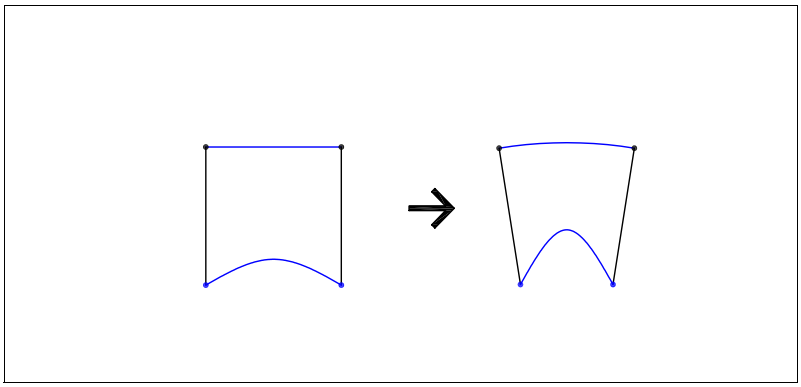


Abb. 3-19 Prinzip 3

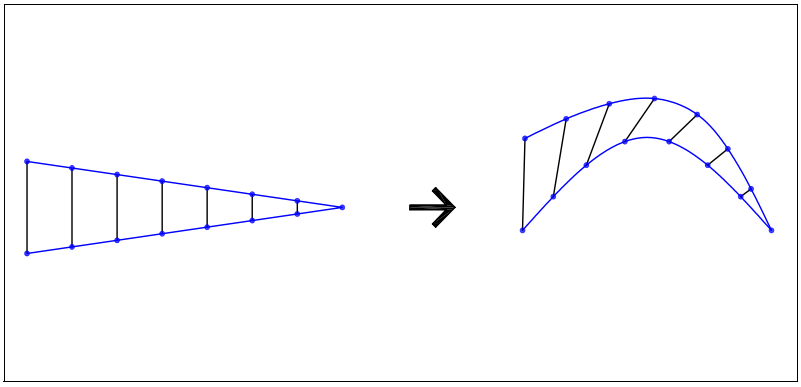
Das dritte Prinzip basiert auf den Kohäsionsbewegungen der Pflanzen. Die Kohäsionsbewegungen der Farnsporangien beruhen auf der Wasserabgabe aus noch lebenden Zellen.

Wenn das Wasser aus den Zellen verdunstet, werden alle Zellwände nach innen gezogen. Durch diesen Sog biegt sich die obere dünne Schicht jeder Zelle nach innen, so dass eine Biegung im ganzen Körper entsteht [39].

Hier ist nur ein Teil der nebeneinander angeordneten Zellen als ein einaxiales Prinzip dargestellt (Abb. 3-19). Zwei Enden von zwei parallelen schwarzen Geraden werden durch eine blaue Gerade (in schwarzen Punkten) und eine blaue Kurve (in blauen Punkten) miteinander verbunden. Wenn der Abstand zwischen den Mittelpunkten der blauen Linien geringer wird, ändert sich ihre Krümmung.

3.3.4 Prinzip 4

Abb. 3-20 Prinzip 4



Der „Fin Ray Effect"' ist das Vorbild für das vierte präsentierte Prinzip. Beim Druck gegen die Schwanzflosse eines Fisches krümmt sich diese entgegen der Druckrichtung. Die Gräten der Flossen bestehen aus jeweils zwei knorpeligen Längsstrahlen, die durch ein elastisches Bindegewebe zusammengehalten werden, so dass sie sich gegeneinander verschieben können [57].

Dieser Effekt ist ein einaxiales Prinzip. Hier wird dieser patentierte Effekt von Leif Kniese mit geometrischen Elementen dargestellt (Abb. 3-20). Zwei blaue Linien werden in einer Seite in einem blauen Punkt miteinander verbunden. Dazwischen stehen parallele schwarze Verbindungslinien als Nebenelemente. Alle Linien sind in blauen Punkten miteinander verbunden. Wenn sich der Winkel zwischen einer schwarzen und einer blauen Linie ändert, so formen sich die blauen Geraden zu Kurven.

3.3.5 Prinzip 5

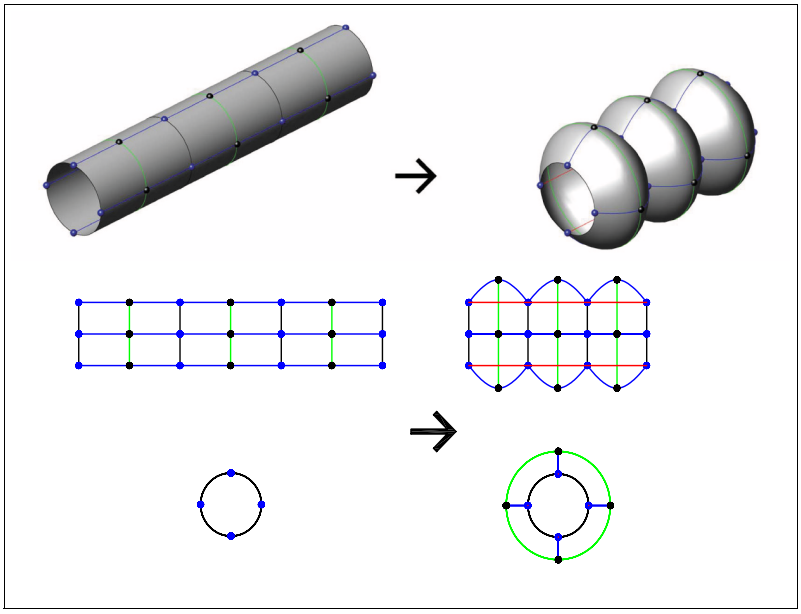


Abb. 3-21 Prinzip 5

Der Hautmuskelschlauch der Regenwürmer dient als Vorbild für das fünfte Prinzip. Jeder Ring des Hautmuskelschlauches besitzt zwei übereinanderliegende Schichten von Muskeln, die in zueinander senkrechten Richtungen abwechselnd kontrahieren und sich wieder entspannen. Dadurch ändert sich die Krümmung der Außenfläche jedes Ringes [77].

Hier werden drei nebeneinander liegende Ringe geometrisch abstrahiert. Die definierenden Linien jedes Rings zeigen die Art und Weise der Verformung (Abb. 3-21).

3.3.6 Prinzip 6

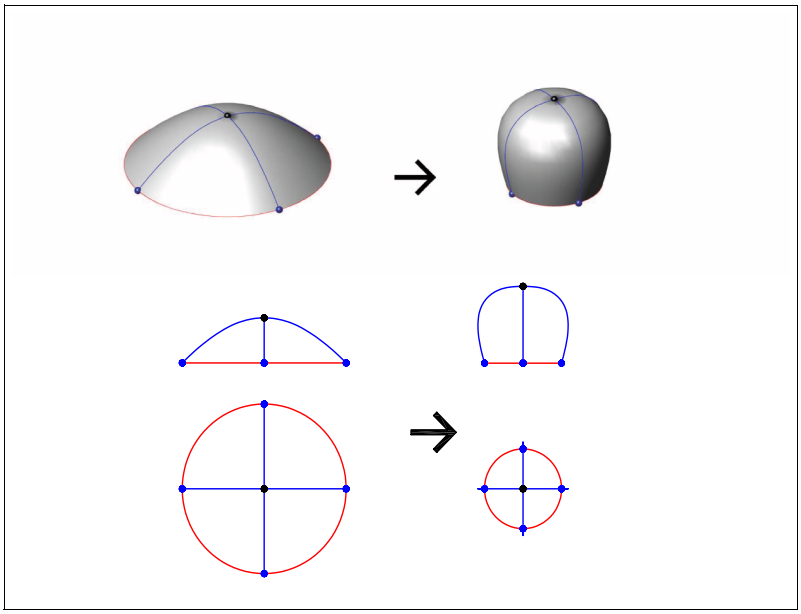


Abb. 3-22 Prinzip 6

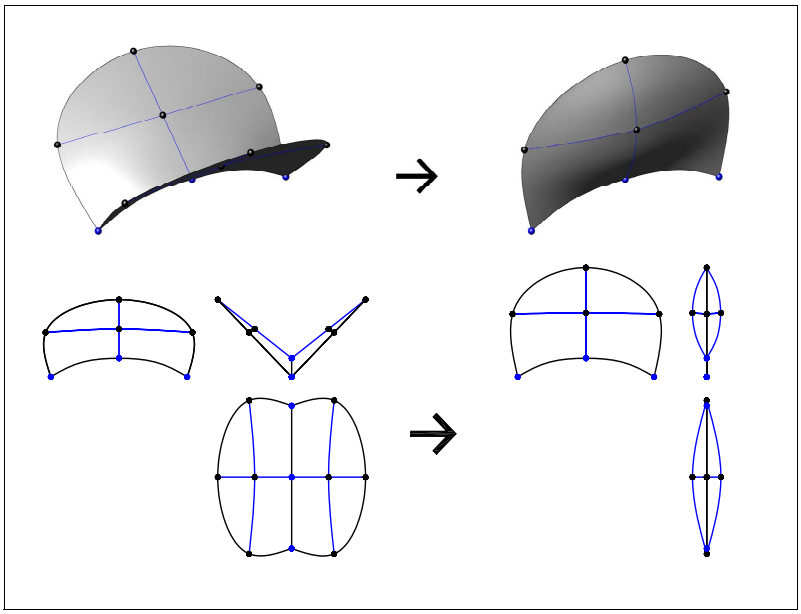
Die Ring- und Radialmuskulatur der Quallen ist das Vorbild

für das sechste Prinzip. Die schirmartige Gestalt der Quallen verformt sich durch Kontrahieren der Ring- und Radialmuskulatur. Dadurch schwimmen die Quallen nach dem Rückstoßprinzip. Widerlager für die kräftigen Muskelkontraktionen ist die Mesogloea. Sie bringt den Schirm wieder „in Form", bevor die nächste Kontraktion einsetzt [49].

Hier wird eine abstrahierte Form von Quallen dargestellt, die sich nur durch Änderung des Kreisumfangs in der Kante einer Rotationsfläche verformen kann[7] (Abb. 3-22).

3.3.7 Prinzip 7

Abb. 3-23 Prinzip 7



Das siebte Prinzip basiert auf der Veränderung der Blatthälften der Venusfliegenfalle von einer konvexen in eine konkave Form. Im offenen Zustand sind die Blatthälften konvex gekrümmt. Dies geschieht durch eine Kontraktion der Außenseite der Blatthälften quer zum Gelenk. Mittels noch unbekannter physiologischer Prozesse veranlasst dies eine geringfügige Änderung der Krümmung, woraufhin die Falle schlagartig von der konvexen in eine konkave Form umschlägt und wie ein gespanntes Tellereisen zusammenklappt [51].

Im obenstehenden Bild (Abb. 3-23) werden die Blätter der Venusfliegenfalle durch zwei doppelt gekrümmte Flächen dargestellt. Jede Fläche wird von zwei Kurven begrenzt. Beide Flächen werden in einer gekrümmten Linie miteinander verbunden. Die Krümmung der Flächen ist im geschlossenen und geöffneten Zustand genau umgekehrt. Die Kanten der Flächen bleiben in beiden Zuständen unverändert.

7. Auf eine Änderung der Länge der Radiallinien wird hier verzichtet.

3.3.8 Prinzip 8

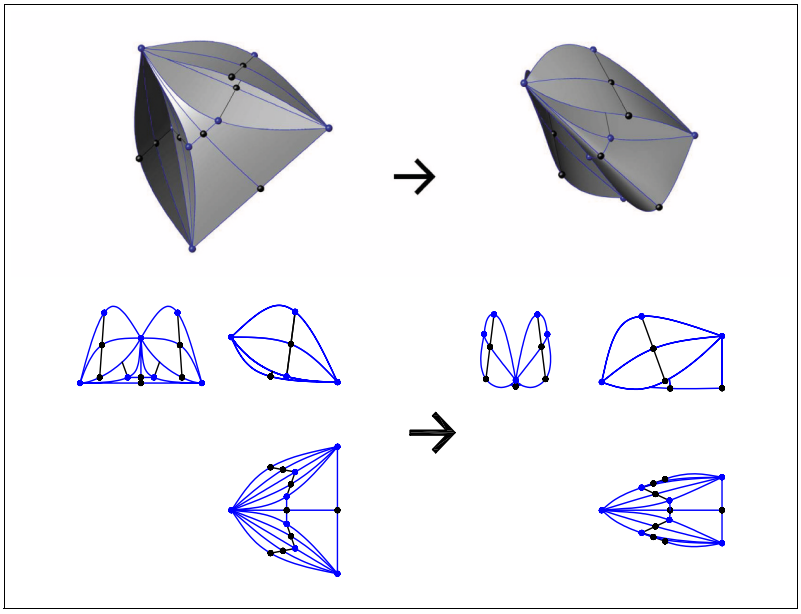


Abb. 3-24 Prinzip 8

Die gekrümmte Faltenlinie der Blütenblätter des Löwenmauls dient als Vorbild für das achte Prinzip. Wenn beide Seiten dieser Blätter zusammengedrückt werden, wird die Druckrichtung durch die gekrümmte Faltlinie der Flächen umgelenkt und die Unterfläche entlang der Blumenkronröhre gedreht. Durch den Druck wechselt die Krümmung senkrecht zur Druckrichtung.

Dieses Prinzip wird durch fünf einfach gekrümmte Flächen dargestellt. Jede Fläche wird mit der benachbarten Fläche in einer Kurve verbunden (Abb. 3-24). Die Verformung wird hauptsächlich durch den Mittelteil beeinflusst. Dieser Teil biegt sich bei Druck auf beiden Seiten senkrecht zur Druckrichtung.

3.4 Grundmuster

Die Prinzipien müssen durch schrittweise Änderungen (Form- und Strukturmodifikationen) in ein anwendbares Muster überführt werden.

In Abschnitt 3.2.5 wurde zum Thema Modifikationsziele beschrieben, welche Besonderheiten die gewünschten Konstruktionen aufweisen sollen. Die Ergebnisse unserer Modifikationssequenzen sollen durch Versuche bestätigt werden. Wir benutzen Modelle aus geeigneten Materialien für diese Versuche. Die Modelle werden den geometrischen Ergebnissen im kleinen Maßstab nachgebaut. Lassen sich die Ergebnisse durch diese Modelle bestätigten, so sind sie auch im großen Maßstab akzeptabel.

Die Modelle bestehen aus elastischen oder aus elastischen

und steifen Flachstäben, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Sie sollen durch Ziehen eines Seils verformt werden, wobei das Seil durch Ringe gezogen wird, die an bestimmten Stellen des Modells befestigt sind.

Ein Modell wird entweder direkt dem Ergebnis einer Modifikationssequenz oder dessen vereinfachter Form nachgebaut.

Die vier ersten Muster basieren auf 2D-Prinzipien. Sie sollen sich durch Ziehen eines Seils biegen.

Die anderen vier Muster basieren auf 3D-Prinzipien. Durch Ziehen eines Seils sollen sich die elastischen Komponenten biegen und dadurch der Gesamtkörper verformt wird.

Folgende Punkte müssen bei den behandelten Modifikationssequenzen beachtet werden:

1. In jeder Stufe wird eine Modifikation der Form oder Strukur beschrieben. Diese Änderung kann pro Stufe ein- oder mehrmals angewendet werden.
2. Das Ergebnis jeder Modifikationssequenz wird mit „En“ oder „En-m“ bezeichnet. „N“ ist die Prinzipsnummer, falls es nur ein Ergebnis gibt, und „m“ ist die Nummer von En, wenn es für ein Prinzip mehrere Ergebnisse gibt. Im Umkehrfall wird jedes Ergebnis mit „UEn“ oder „UEn-m“ bezeichnet. Die roten Linien von En/ En-m werden bei der Anwendung UEn/ UEn-m in grüne Linien umgewandelt (und umgekehrt). Das heißt, dass in umgekehrter Weise verkürzbare Elemente verlängert werden müssen (und umgekehrt).
3. Für manche Ergebnisse, deren Rückformung und Stabilisierung durch Zugelemente möglich ist, werden die umgekehrten Ergebnisse ebenfalls dargestellt. Diese Maßnahme dient der Verbesserung des Rückformungsprozesses, da dieser allein über die elastischen Elemente gesteuert wird.

3.4.1 Grundmuster 1

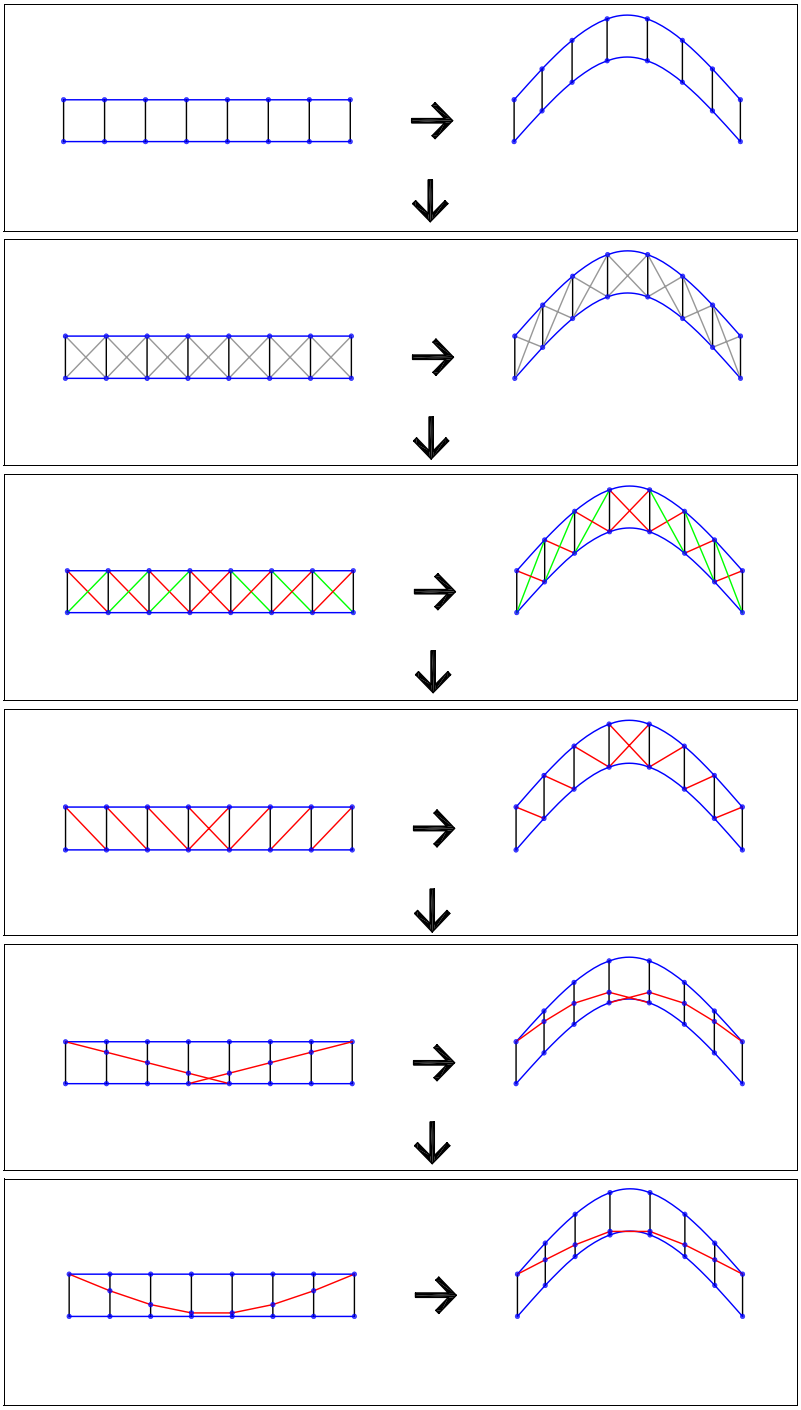


Abb. 3-25 Modifikationssequenz 1-1

Stufe 1: Prinzip 1

Stufe 2: SA2

Stufe 3: FFd

Stufe 4: SS2

Stufe 5: SSA1

Stufe 6: SSA1/ E1-1

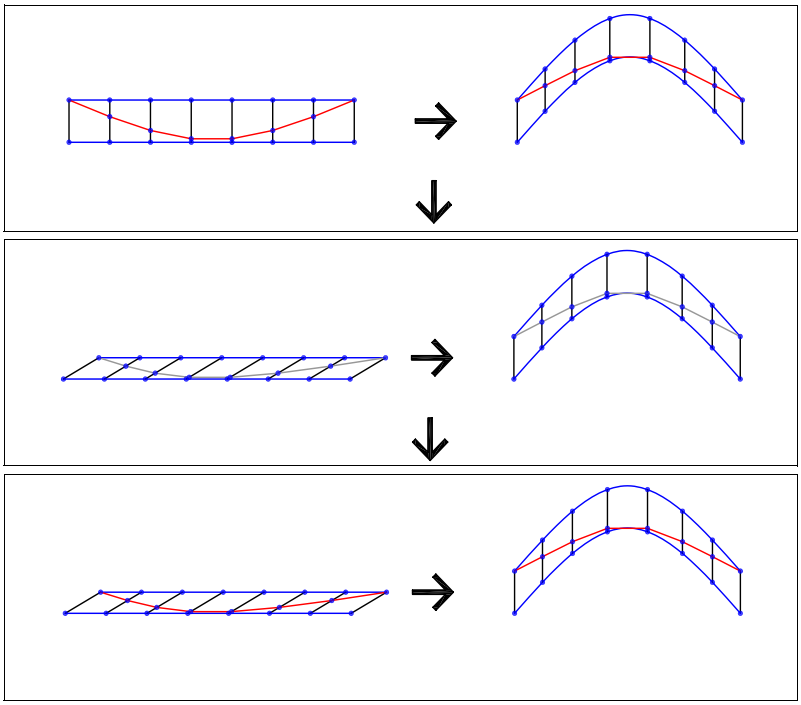
In dieser Modifikationssequenz sind die Stufen 5 und 6 besonders wichtig. In Stufe 5 wird die Anzahl der unverbundenen roten Linien verringert. In Stufe 6 sind schließlich alle roten Linien miteinander verbunden. Dank dieser kurvigen Form können alle roten Linien durch ein einheitliches Element repräsentiert werden. In unserem Modell benutzen wir ein Seil anstelle dieser miteinander verbundenen roten Linien. Das Seil muss steife Elemente in verschiedenen Höhen und mit ver-

schieden Winkeln miteinander verbinden.

Im Folgenden wird E1 nochmals durch eine neue Modifikationssequenz bearbeitet. Wenn sich der Winkel zwischen der schwarzen und blauen Linie verändert, ist eine erneute Formänderung durch die Verkürzung der dazwischen-liegenden Kurve möglich.

Die Kurve besteht aus einigen miteinander verbundenen Linien. Wegen der Formänderung werden manche Linien verlängert und andere verkürzt. Als Endergebnis wird die Kurve verkürzt. Sogar mit einem Winkel von 0 Grad zwischen den schwarzen und blauen Linien funktioniert E1-2 .

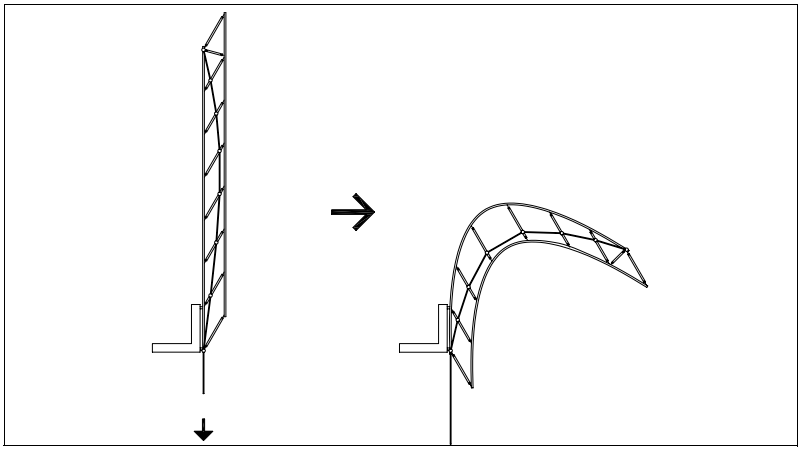
Abb. 3-26 Modifikationssequenz 1-2

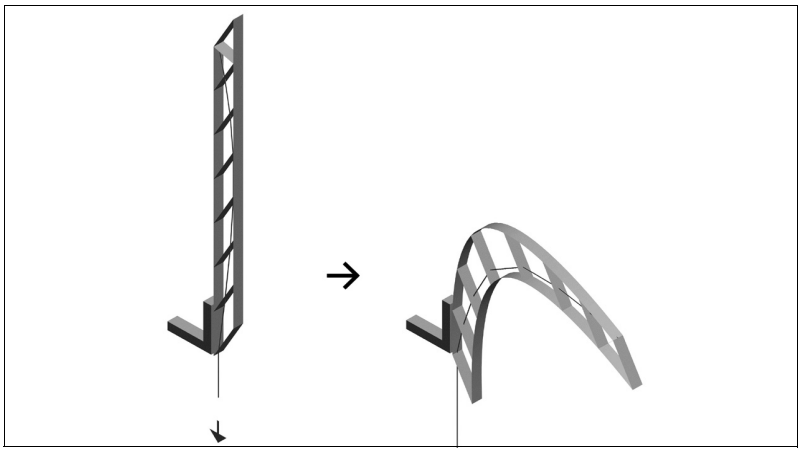


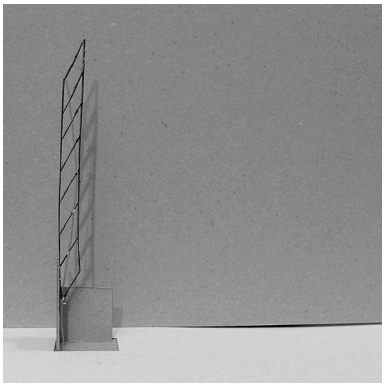
E1-2 wurde hier durch ein realistisches Modell geprüft. Die folgenden Bilder bestätigen dieses Ergebnis.

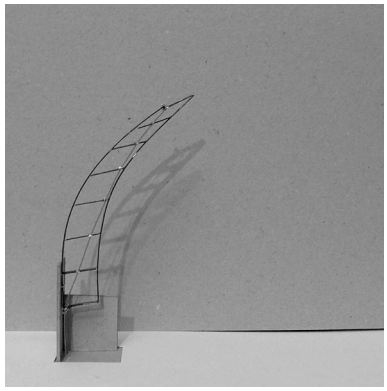
Das Versuchsmodell wird am einen Ende eingespannt. Zur Aussteifung des Modells vor dem Ziehen des Seils brauchen wir ein diagonales Element (steifes Element) am anderen Ende (Abb. 3-27).

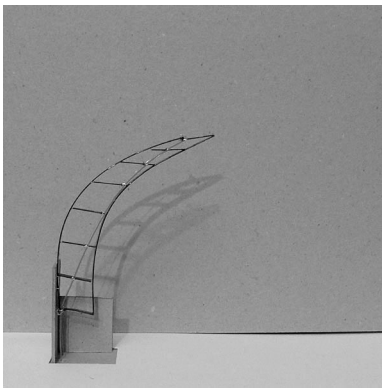
Abb. 3-27 Grundmuster 1

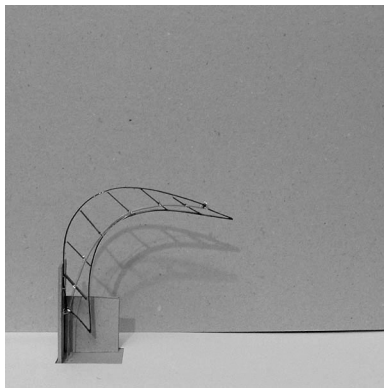


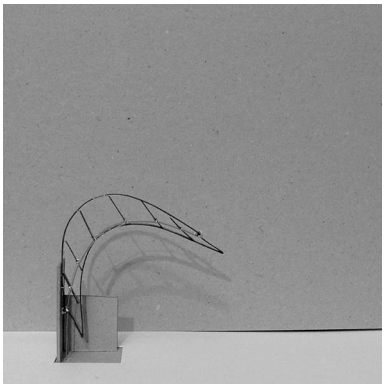


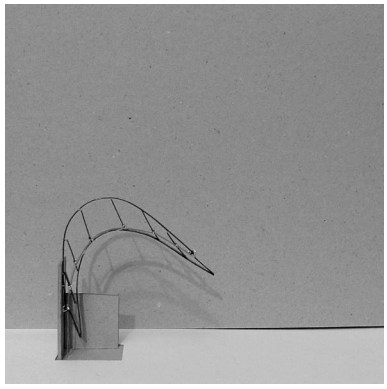












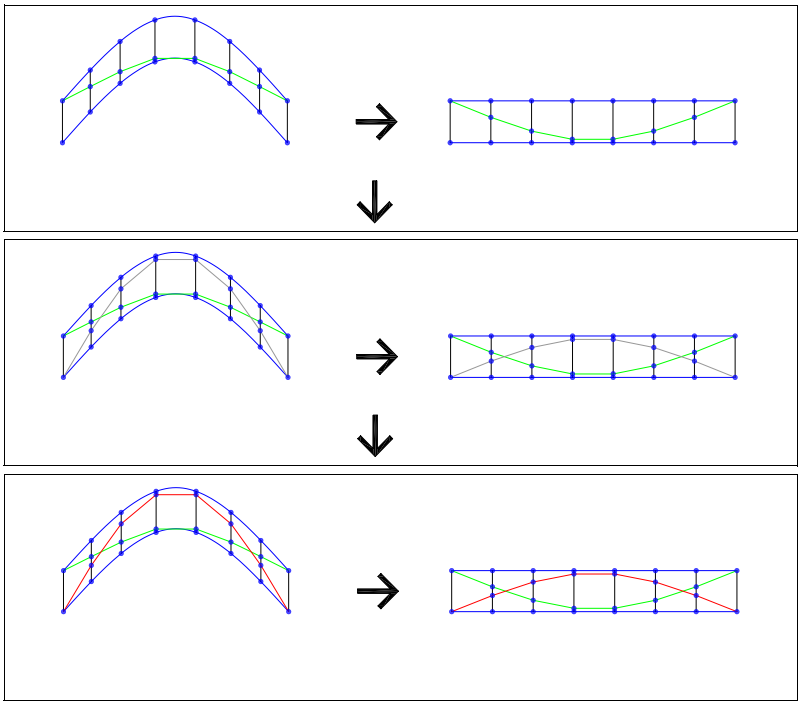
Für den umgekehrten Fall verwandelt sich die rote Linie in eine grüne Linie. Durch die Spiegelung dieser Kurve entsteht eine neue Kurve. Diese gespiegelte Kurve wird durch die Formänderung verkürzt. Deshalb kann man mit Hilfe eines Seils das gekrümmte Systm wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückführen oder es in einer beliebigen Form stabilisieren.

Abb. 3-28 Modifikationssequenz 1-3

Stufe 1: UE1-1

Stufe 2: St1

Stufe 3: FFd/ E1-3



3.4.2 Grundmuster 2

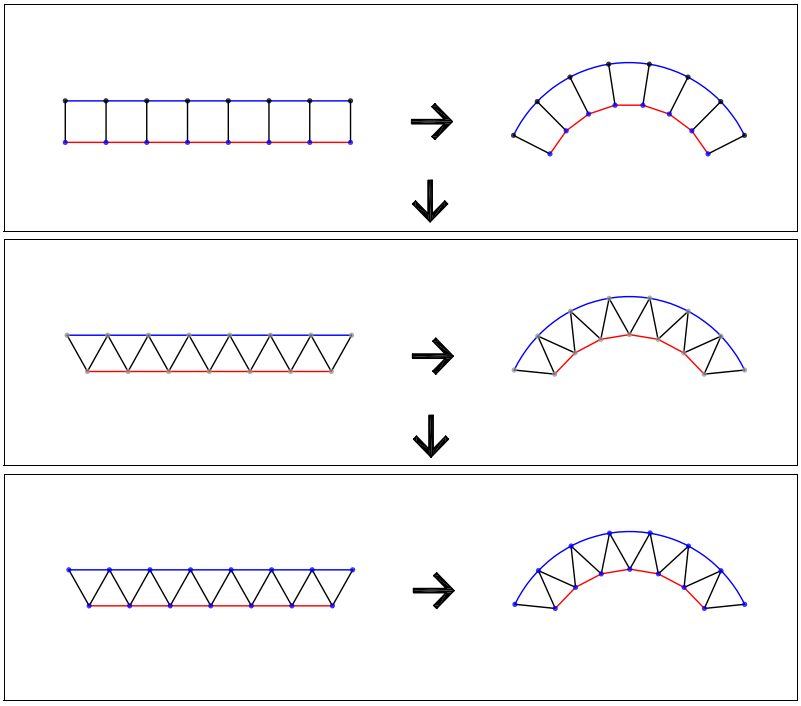


Abb. 3-29 Modifikationssequenz 2-1

Die Ersetzung der schwarzen Linien durch neue Linien (Stufe 2) kommt durch die Ersetzung der schwarzen Punkte durch blaue Punkte zustande. Unser Ziel ist es, eingespannte Verbindungen durch gelenkige Verbindungen zu ersetzen, so dass steife Stäbe (schwarze Linien) nur auf Druck oder Zug reagieren.

E2-1 wird in der folgenden Abbildung als Grundmuster 2 bezeichnet. Das Versuchsmodell wird auch hier an einem Ende eingespannt. Wenn die Reibung zwischen dem Seil und den Ringen gering wird, biegt sich das Modell wie ein Kreisbogen (Abb. 3-30).

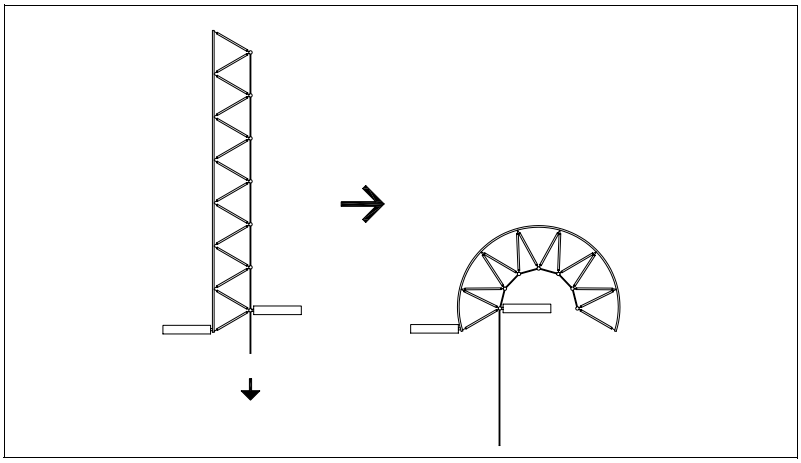
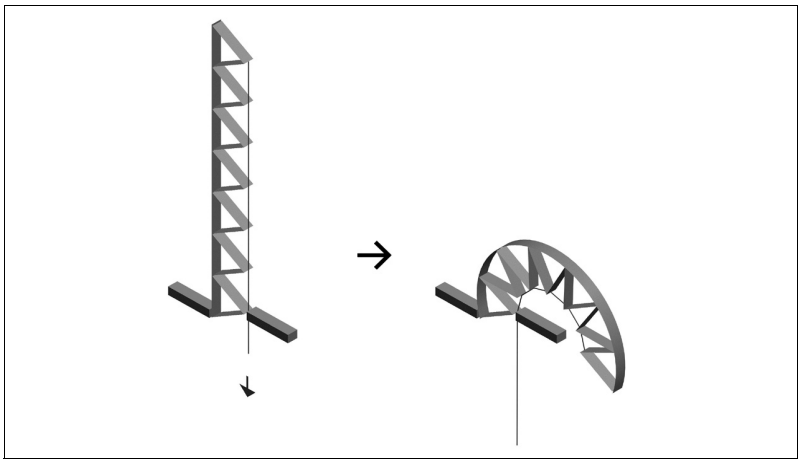
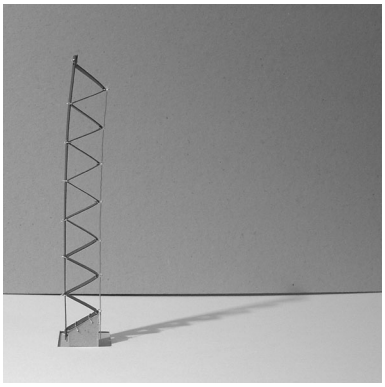
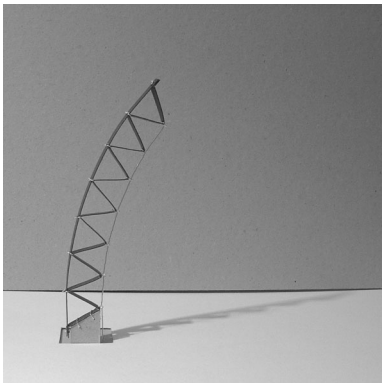
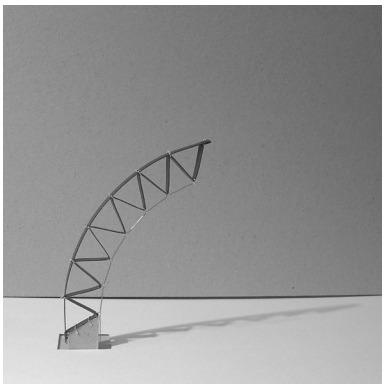


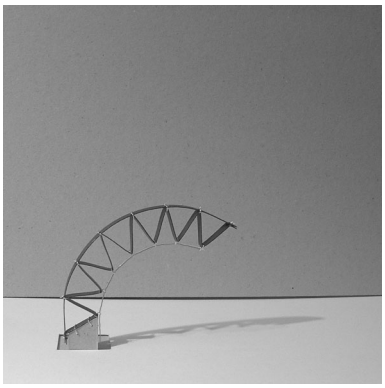
Abb. 3-30 Grundmuster 2

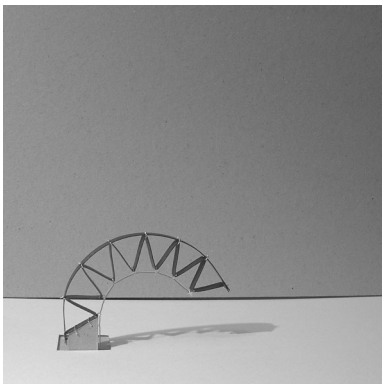


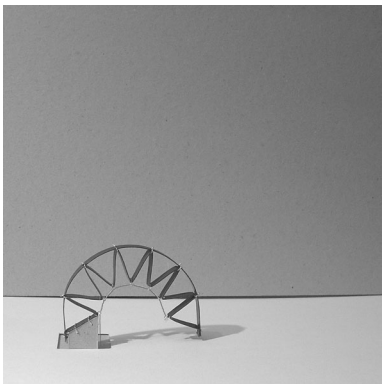












Im nächsten Schritt soll die Rückverformung von E2-1 vorgestellt werden. Die verkürzten Linien von E2-1 müssen in UE2-1 verlängert werden. Durch die Spiegelung des Modells an der blauen Linie lässt sich als Spiegelbild der grünen Linie eine rote Linie finden. Durch Ziehen eines Seils an dieser Stelle lässt sich das gekrümmte System stabilisieren oder zurückverformen.

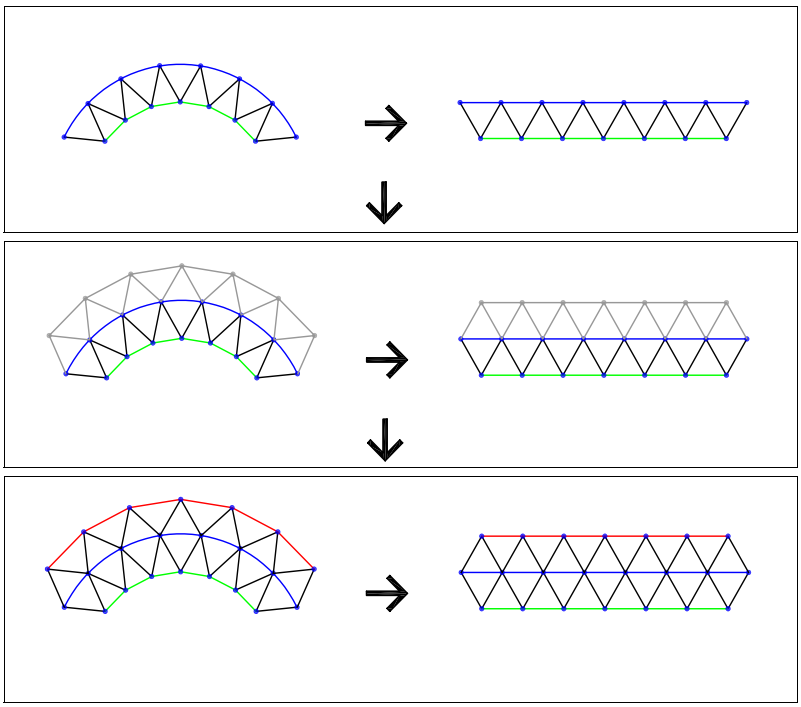


Abb. 3-31 Modifikationssequenz 2-2

Stufe 1: UE2-1

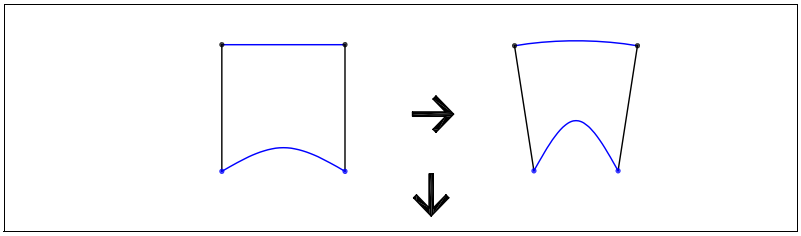
Stufe 2: St1

Stufe 3: FFd/ E2-2

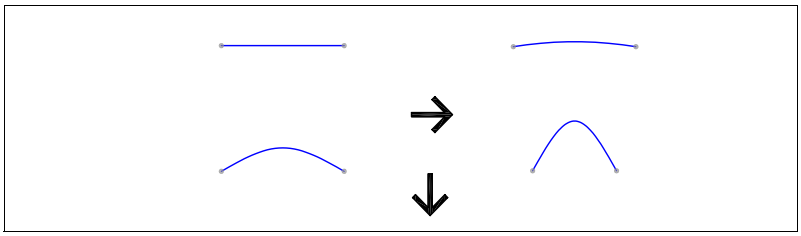
3.4.3 Grundmuster 3

Abb. 3-32 Modifikationssequenz 3

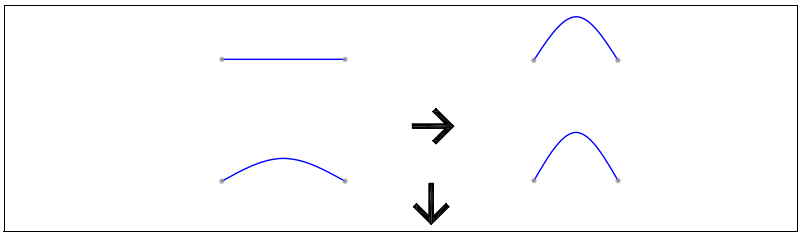
Stufe 1: Prinzip 3



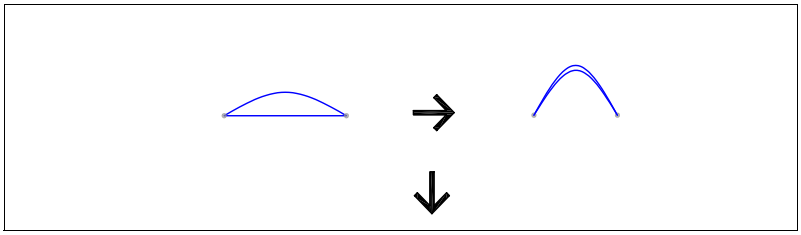
Stufe 2: SS1



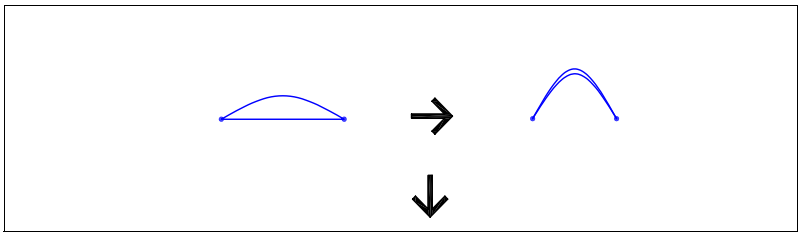
Stufe 3: FK



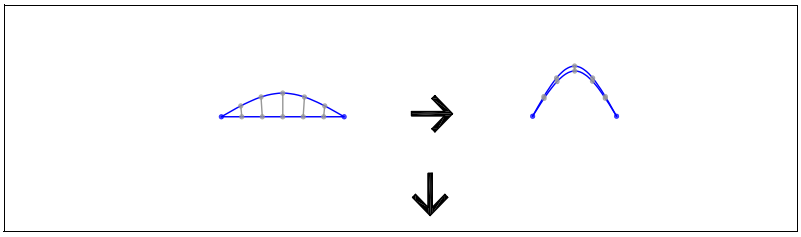
Stufe 4: ST2



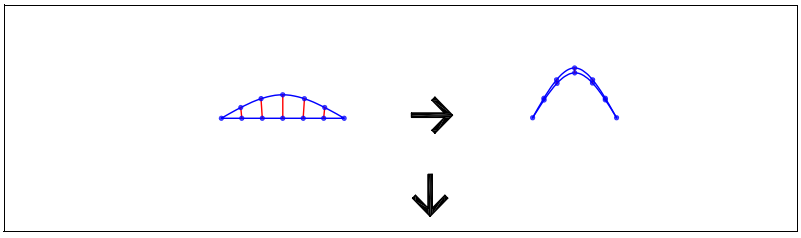
Stufe 5: FFd

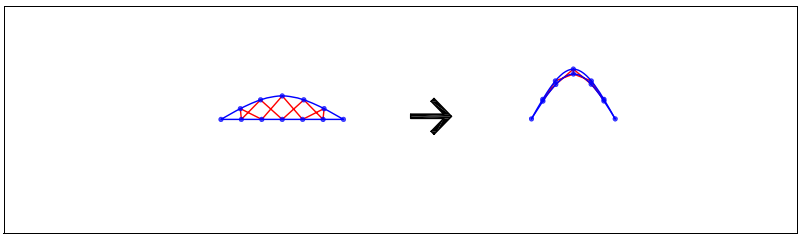


Stufe 6: SA3



Stufe 7: FFd





Stufe 8: SSA1/ E3

Wie in Abschnitt 3.3.3 gesagt, wird hier nur ein Teil der nebeneinander angeordneten Zellen dargestellt. Aufgrund der Änderung dieser Teile biegt sich der Gesamtkörper. Aus dem vollständigen Körper lassen sich auch andere Ergebnisse extrahieren. Hier soll jedoch nur ein Teil dieses Körpers betrachtet werden.

Dieses Prinzip zeigt das Zusammenspiel der Verformung zweier Kurven. Die Krümmungsänderung der einer Kurve beeinflusst die andere. Das heißt, wenn sich die Krümmung einer Kurve ändert, ändert sich auch die Krümmung der anderen Kurve. Man kann dieses Prinzip auch anders beschreiben. Wenn sich die Mittelpunkte zweier Kurven zueinander bewegen, verändert sich die Krümmung beider Kurven. Aus diesem Grund subtrahieren wir (Stufe 2) die beiden schwarzen Linien, stimmen beide Endpunkte der Kurven miteinander ab (Stufe 3) und legen sie übereinander (Stufe 4).

Durch die Verbindung einiger Punkte aus beiden Kurven miteinander soll der Zusammenhang zwischen der Verkürzung dieser Verbindungslinien und der Krümmung beider Kurven gezeigt werden (Stufe 7).

Am Ende der Modifikationssequenz werden die roten Linien miteinander verknüpft (Stufe 8).

Hier wird E3 anhand eines Versuchsmodells geprüft. Wegen der Reibung zwischen dem Seil und den Ringen ist die Verformung des Modells nicht symmetrisch, wie in der Zeichnung (Abb. 3-33). In diesem Modell ist die Rückformung des Systems nicht einfach durch Ziehen eines Seils möglich.

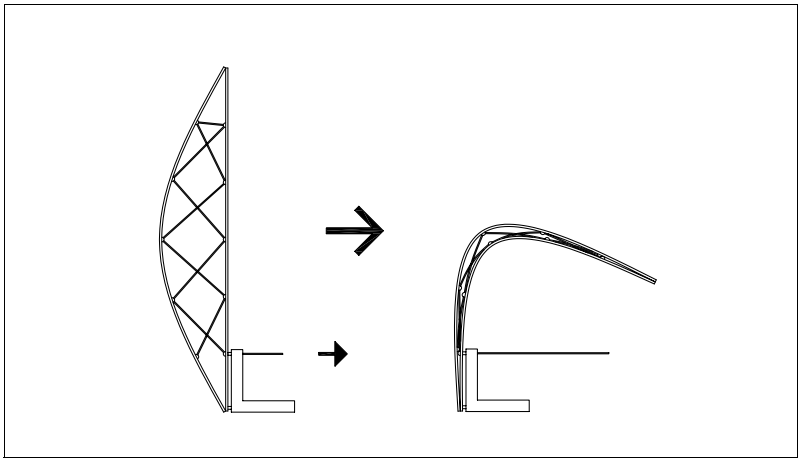
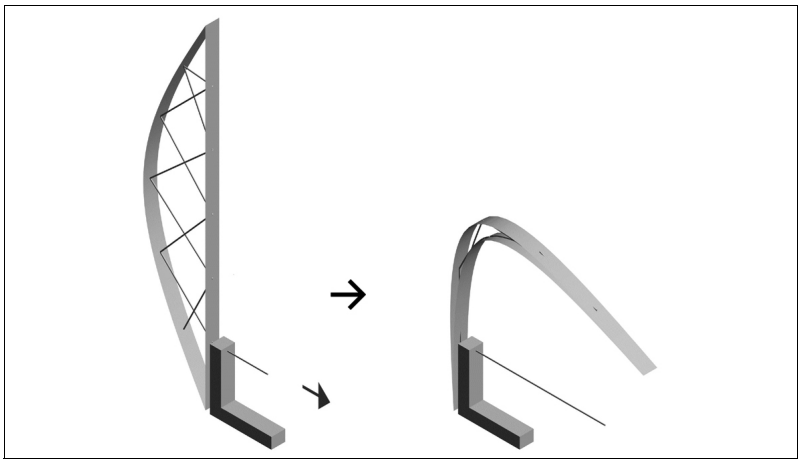
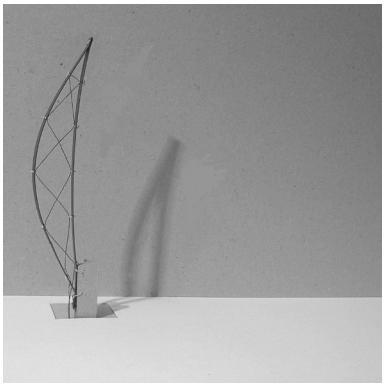
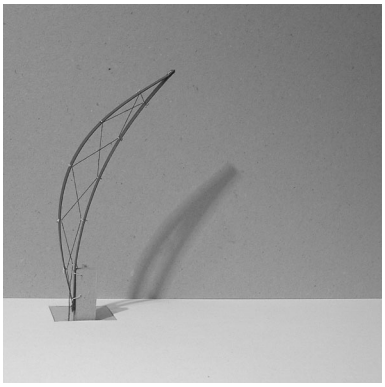
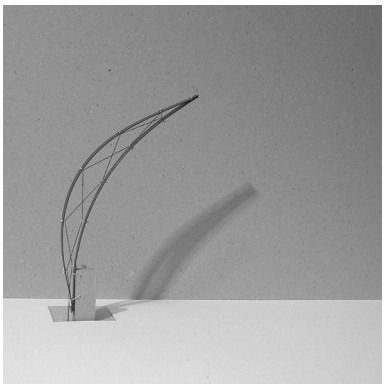


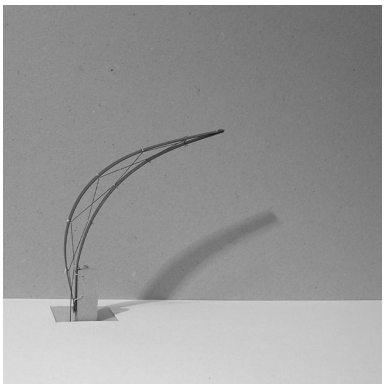
Abb. 3-33 Grundmuster 3

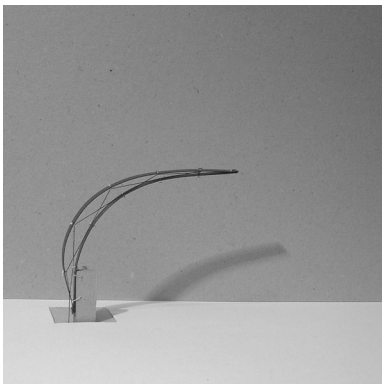


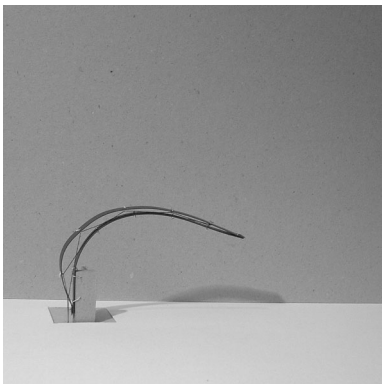












3.4.4 Grundmuster 4

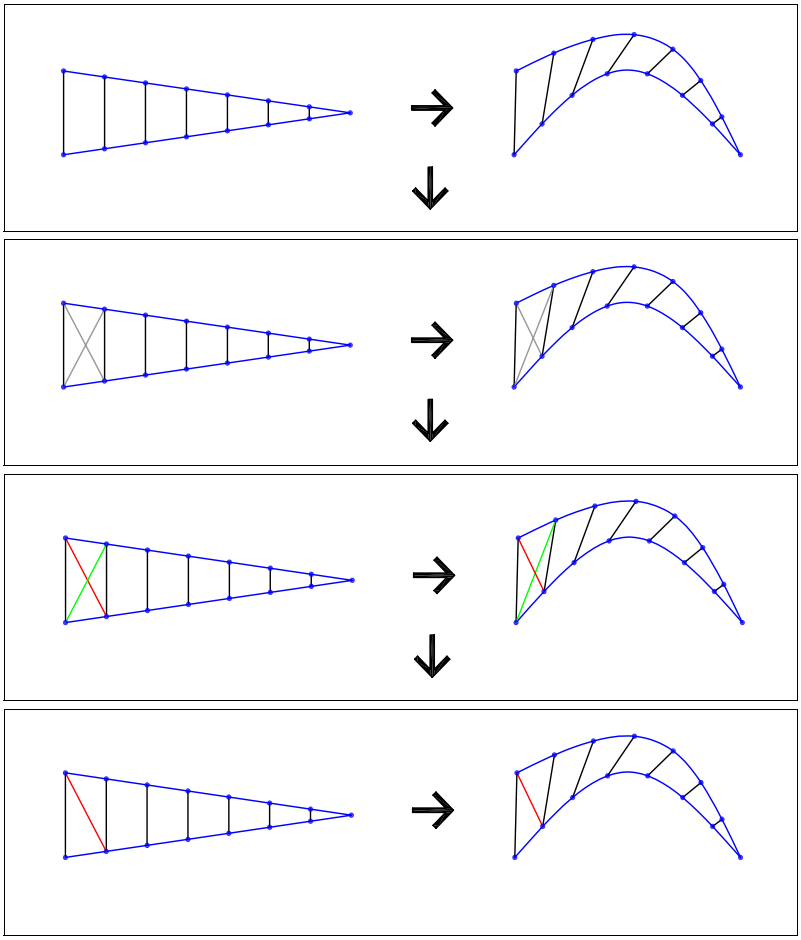


Abb. 3-34 Modifikationssequenz 4-1

Stufe 1: Prinzip 4

Stufe 2: SA2

Stufe 3: FFd

Stufe 4: SS2/ E4-1

In diesem Prinzip biegt sich das Gesamtsystem durch die Bewegung eines inneren Punktes auf jeder blauen Linie. Dieses Prinzip ist auch durch Zusammenziehen diagonaler Punkte in jeder Komponente möglich. Hier haben wir die letzte Komponente ausgewählt und deren diagonale Linien addiert (Stufe 2).

Als Grundmuster 4 versuchen wir, ein komplettes System durch Ziehen eines Seils in der letzten Komponente zu biegen (Abb. 3-35). Auch hier wird das Versuchsmodell an einem Ende eingespannt.

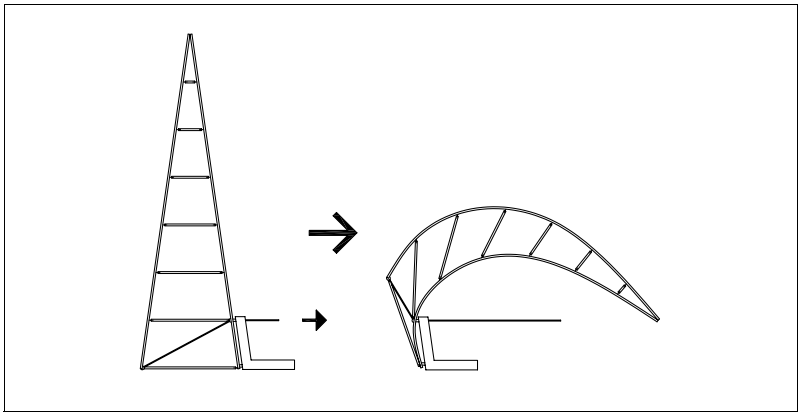
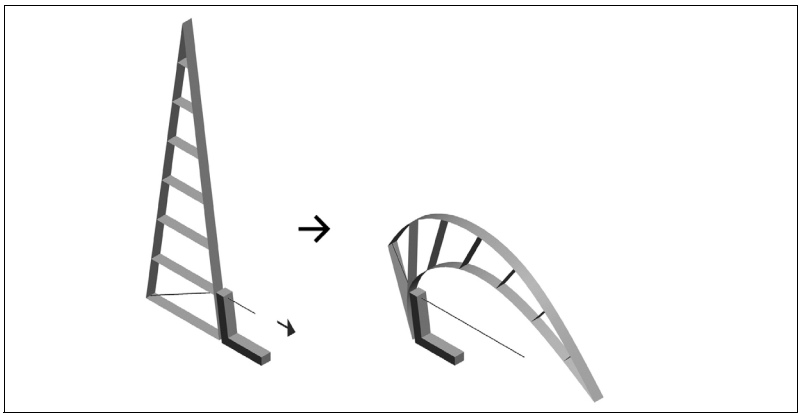
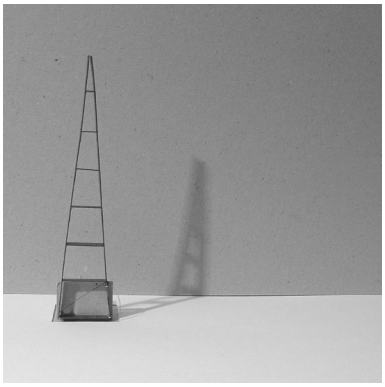
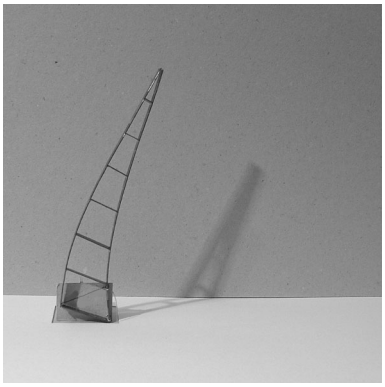
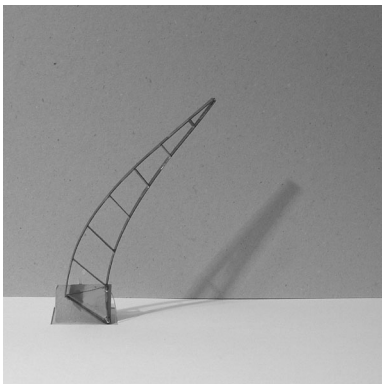


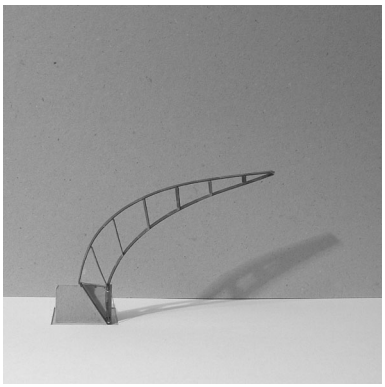
Abb. 3-35 Grundmuster 4

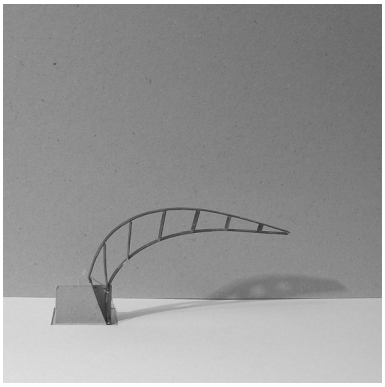


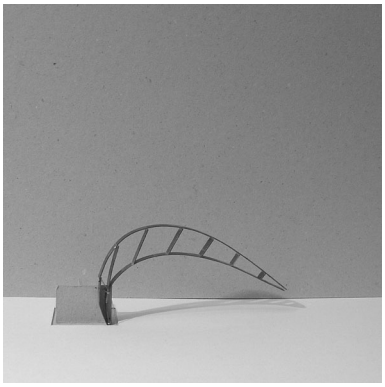












Im Umkehrfall wurde die rote Linie durch eine grüne Linie ersetzt. Durch die Spiegelung der grünen Line erhält man eine rote Linie. Durch Ziehen eines Seils entlang dieser roten Linie lässt sich das gekrümmte System wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückführen oder in einer beliebigen Stellung stabilisieren.

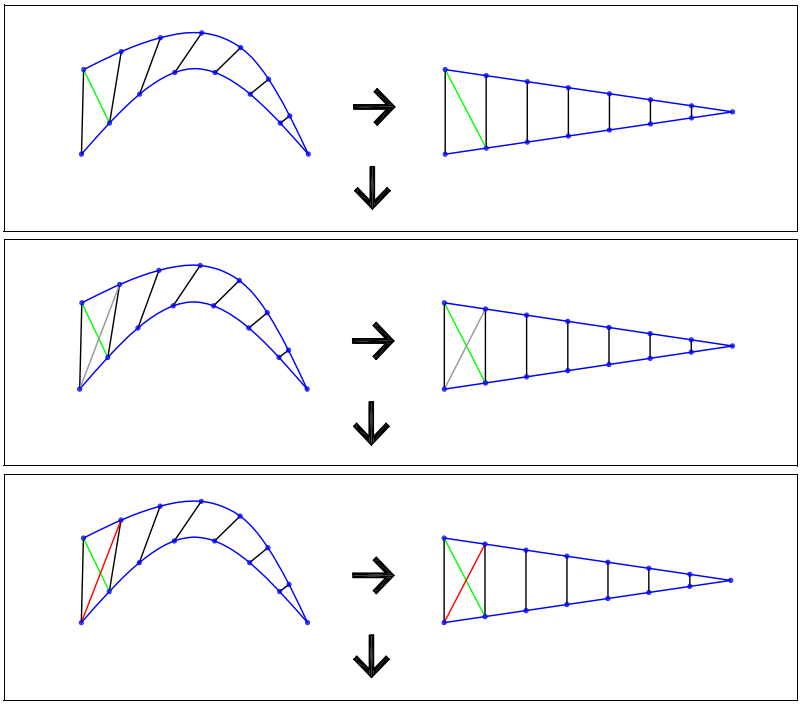


Abb. 3-36 Modifikationssequenz 4-2

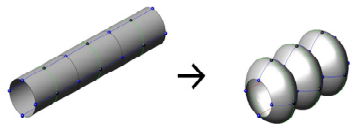
Stufe 1: UE4-1

Stufe 2: SA2

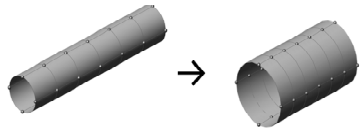
Stufe 3: FFd/ E4-2

3.4.5 Grundmuster 5

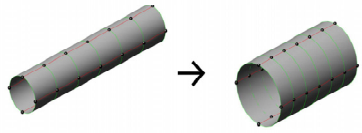
Abb. 3-37 Modifikationssequenz 5-1



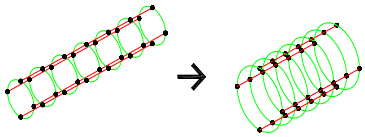
Stufe 1: Prinzip 5



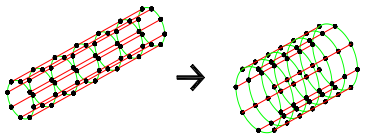
Stufe 2: FK



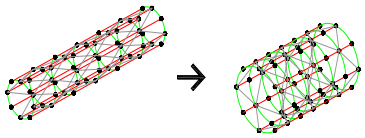
Stufe 3: FFd



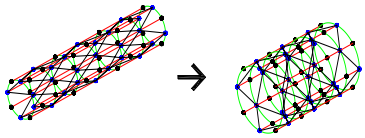
Stufe 4: SSA2



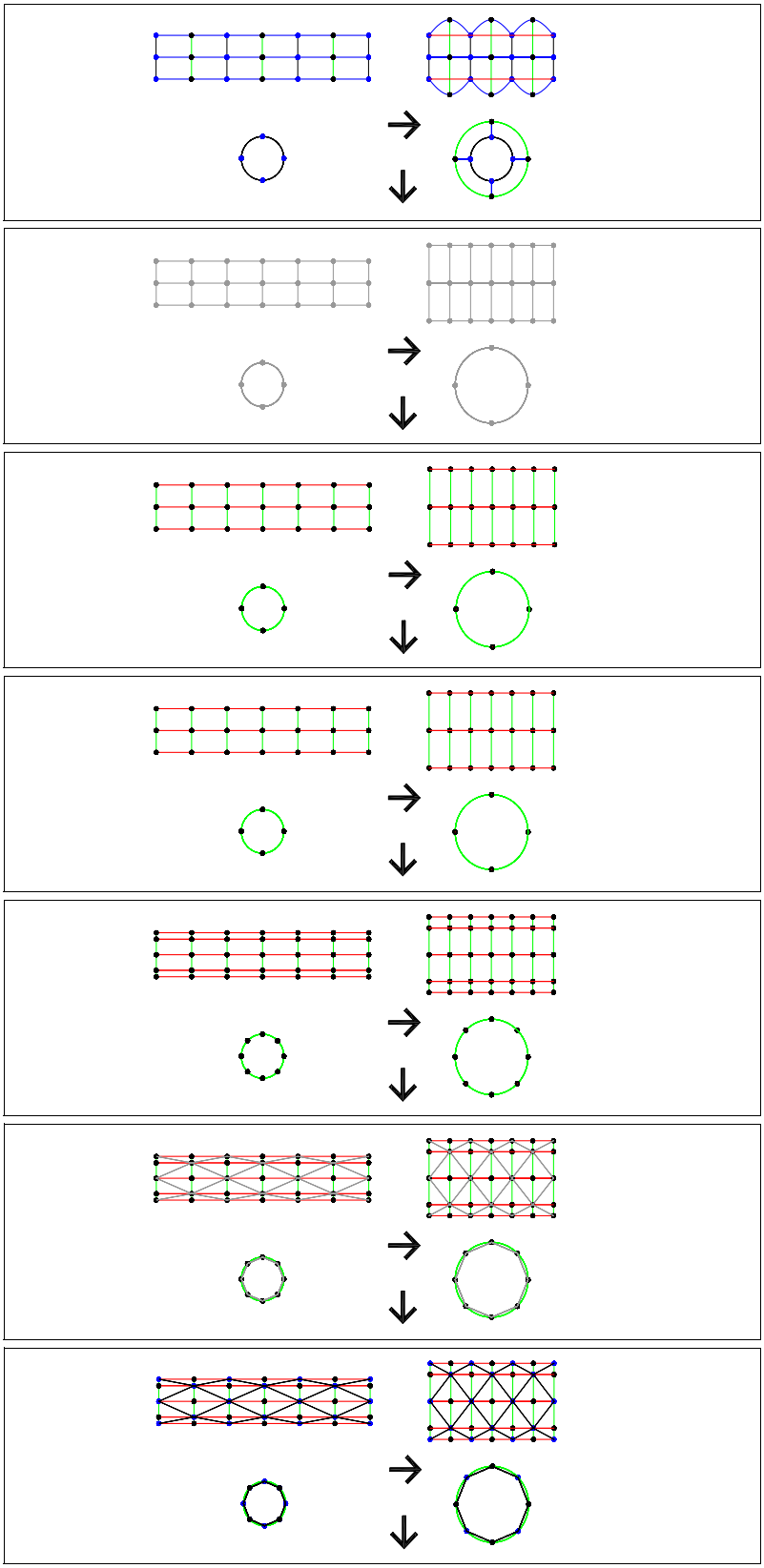
Stufe 5: SA3

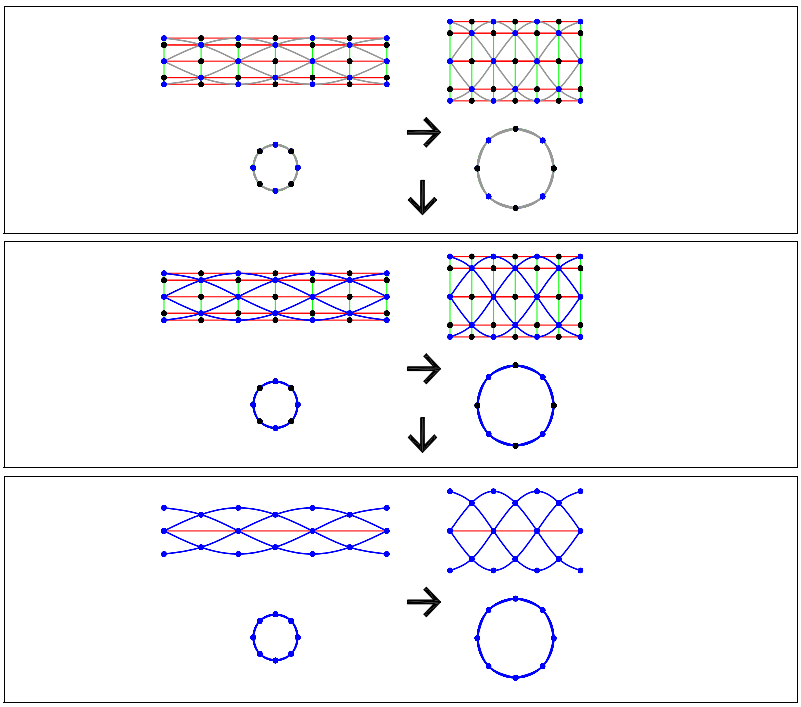


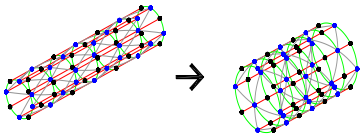
Stufe 6: SA2



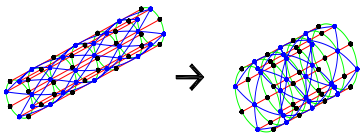
Stufe 7: FFd



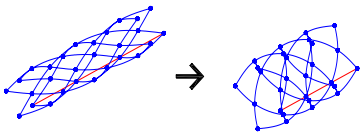




Stufe 8: FK



Stufe 9: FFd



Stufe 10: SS2 & SS3/ E5-1

In dieser Modifikationssequenz wird zu Beginn jeder gewölbte Ring (doppelt gekrümmte Fläche) durch einen einfachen Zylinder (einfach gekrümmte Fläche) ersetzt (Stufe 2). So erhalten wir einen langen, schmalen Zylinder, der nach der Formänderung zu einem kurzen, breiten Zylinder deformiert wird. Nach der Teilung der Ringe und der Addition der zusätzlichen geraden Linien in Längsrichtung zur Verbindung der Ringe (Stufe 5), addieren wir diagonale Linien (Stufe 6). Je vier diagonale Elemente können ein Parallelogramm bilden, dessen Seitenlänge unveränderlich sein soll. Wird das Parallelogramm in Längsrichtung verkürzt, muss es sich daher im selben Maße in Querrichtung verlängern. (Stufe 7). So verformt sich der Zylinder, der aus diesen Parallelogrammen besteht. Wenn man je alle einzelnen, aufeinanderfolgenden Geraden durch eine Kurve ersetzt (Stufe 8), führt die Verkürzung einer Geraden in Längsrichtung zur Biegung aller miteinander verbundener Kurven und damit zur Verformung des gesamten Zylinders.

Die folgende Abbildung zeigt das entstandene Grundmuster (Abb. 3-38).

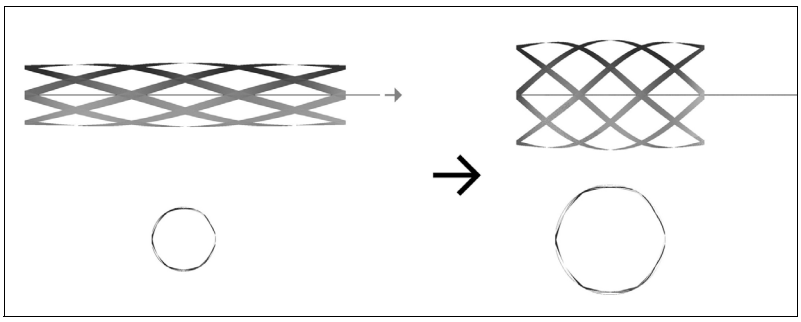
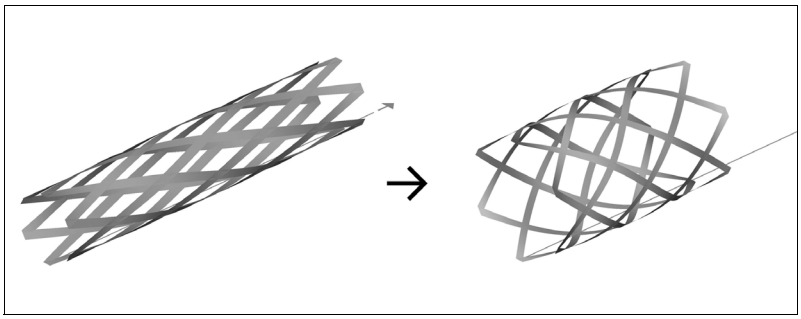
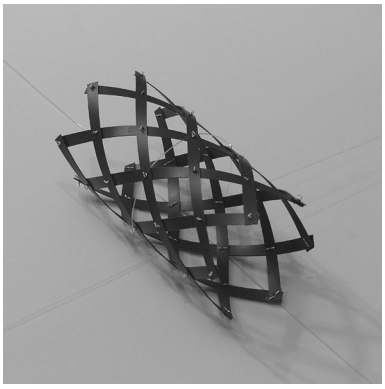
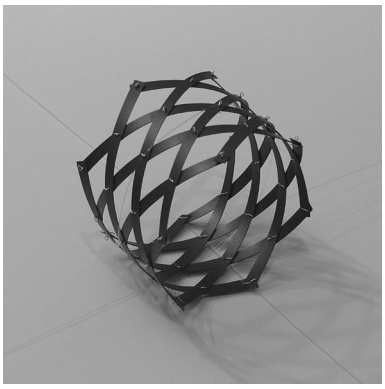


Abb. 3-38 Grundmuster 5







Die folgende Abbildung stellt die Umkehrung von E5-1 dar. Diagonale Linien senkrecht zur grünen Linie werden bei der Formänderung verkürzt. Durch Ziehen eines Seils entlang dieser miteinander verbundenen roten Linien lässt sich der Gesamtkörper zurückverformen.

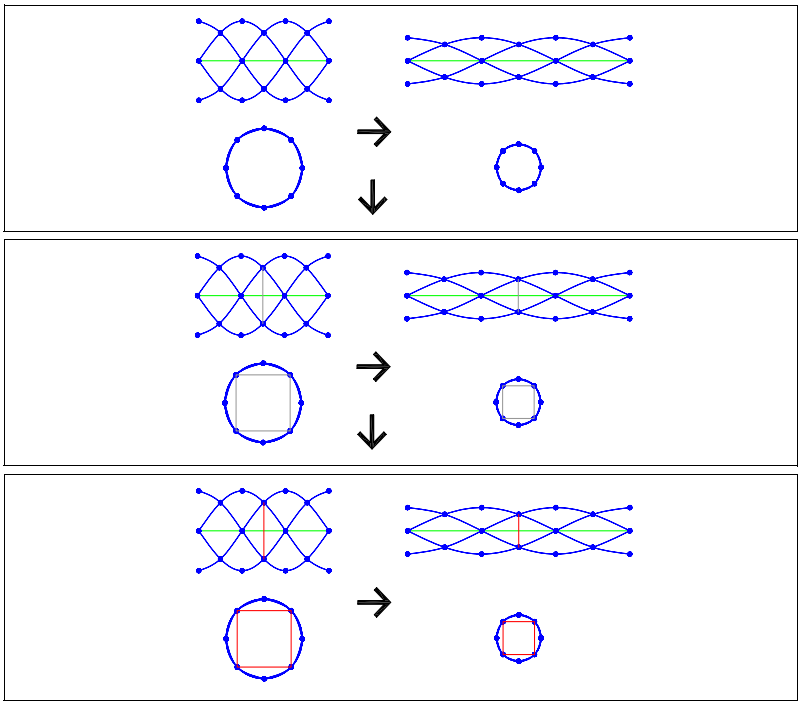
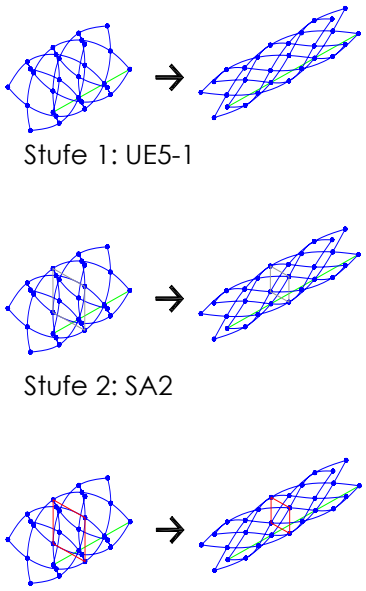
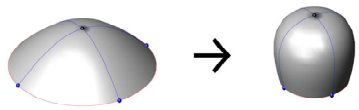


Abb. 3-39 Modifikationssequenz 5-2

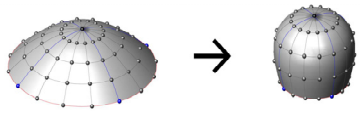


3.4.6 Grundmuster 6

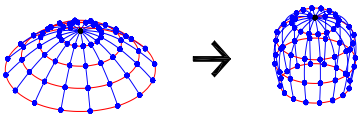
Abb. 3-40 Modifikationssequenz 6-1



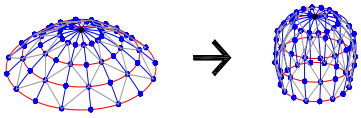
Stufe 1: Prinzip 6



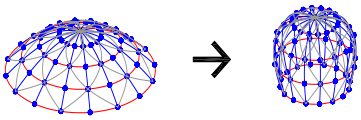
Stufe 2: SA3



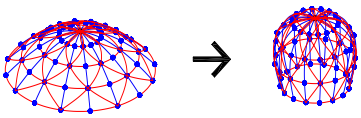
Stufe 3: SSA2 & FFd



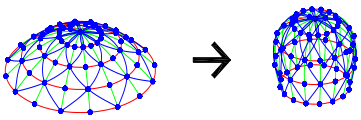
Stufe 4: SA2



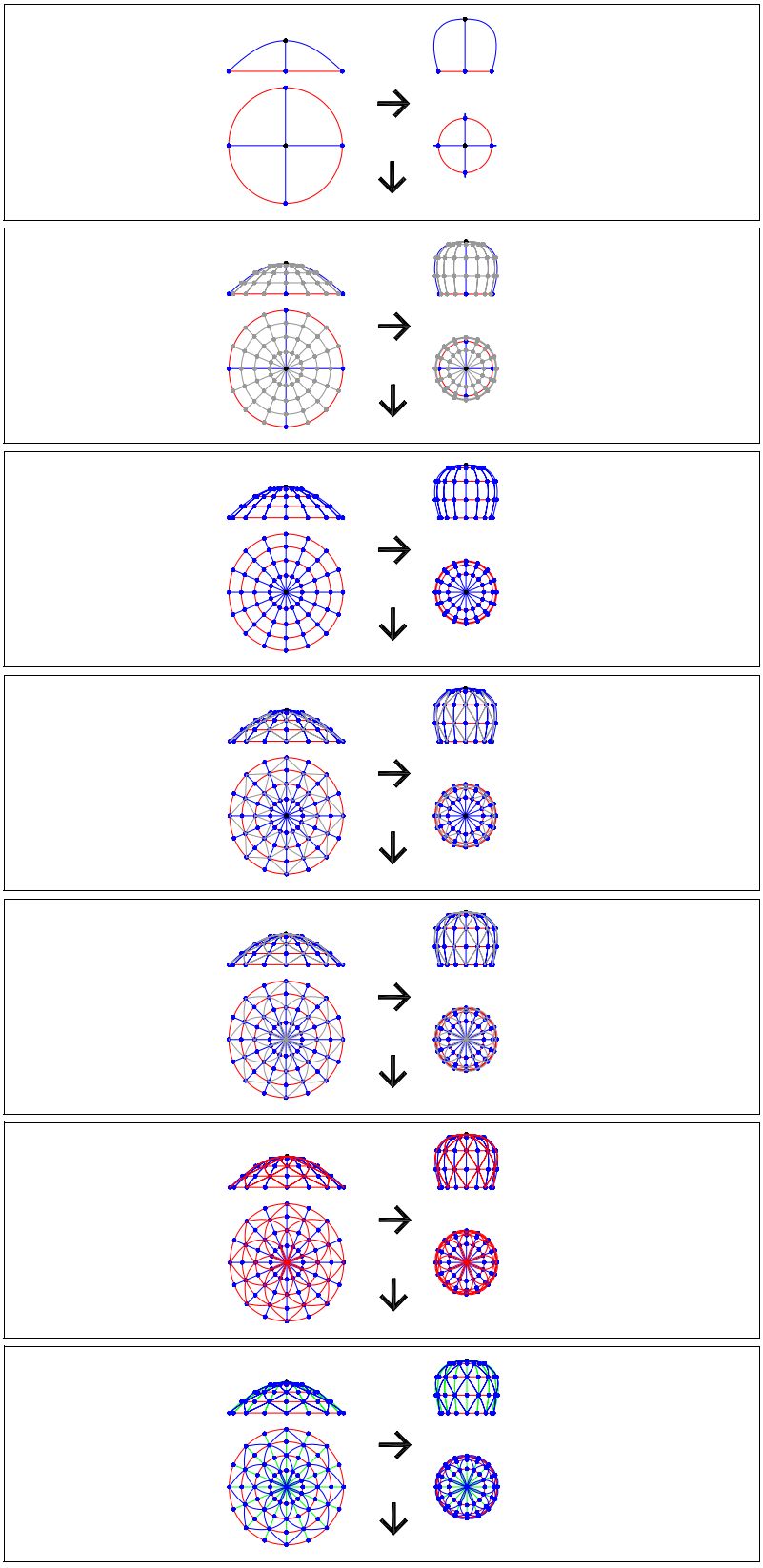
Stufe 5: FK

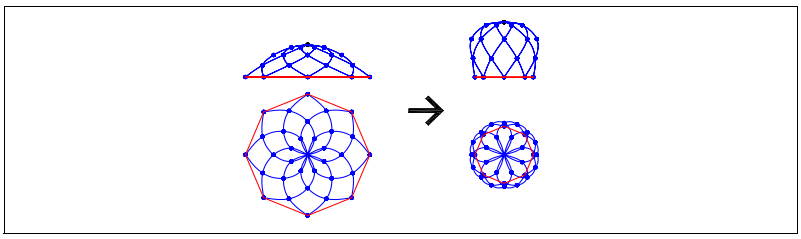


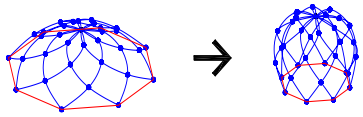
Stufe 6: FFd



Stufe 7: FFw







Stufe 8: SS2& SS3& FK/ E6-1

In der ersten Stufe sieht man, dass sich die radialen Kurven durch Verkleinerung des Kreisumfangs biegen lassen. Es besteht jedoch keine Verbindung zwischen den radialen Kurven, weshalb man ihre Biegung nicht als Flächenänderung bezeichnen kann. Das Ergebnis dieser Modifikationssequenz entsteht aufgrund der Verbindung der Kurven. Nach der Teilung der Kurven, der Addition neuer Kreise und Kurven und der Addition diagonaler Verbindungen (Stufen 2 & 4) ersetzen wir aufeinanderfolgende Linien durch jeweils eine diagonale Kurve (Stufe 5). Diese diagonalen Kurven verkürzen sich bei der Formänderung (Stufe 6). Wenn wir die Länge diagonaler Kurven als invariabel annehmen, müssen sich radiale Kurven bei der Formänderung verlängern (Stufe 7). Nach der Subtrahierung aller grünen und der zusätzlichen roten Linien kann E6-1 definiert werden (Stufe 8).

Im folgenden Versuchsmodell ist die Form auf der linken Seite ganz flach (in dem Extremfall) dargestellt (Abb. 3-41). Die Flachstäbe werden in Knotenpunkten miteinander verbunden. Die Stäbe mit derselben Krümmungsrichtung sind an einem Ende gelenkig (F=1) miteinander verbunden. Es gibt zwei Schichten von Stäben. Die Stäbe einer Schicht haben jeweils eine ähnliche Krümmungsrichtung, die im Vergleich zur anderen Schicht umgekehrt ist. Dieses Modell wurde aus geraden Stäben gebaut, die nach der Verbindung gekrümmt wurden.

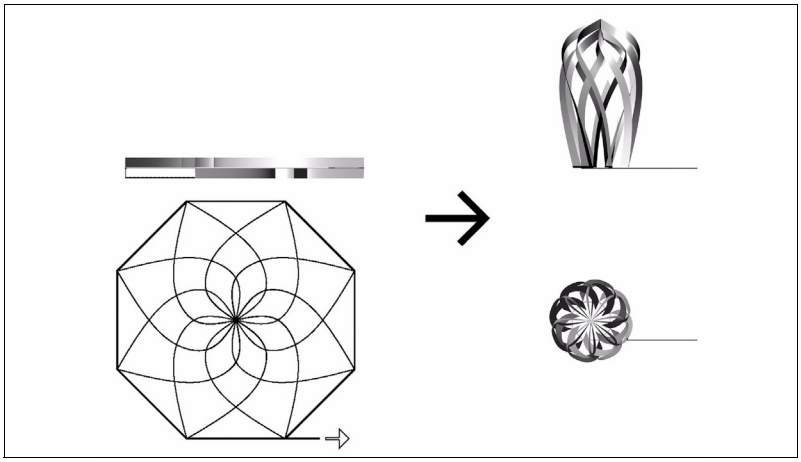
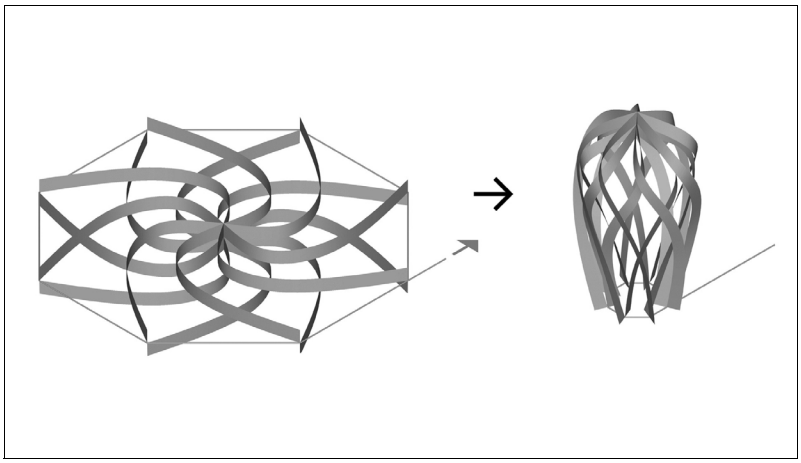
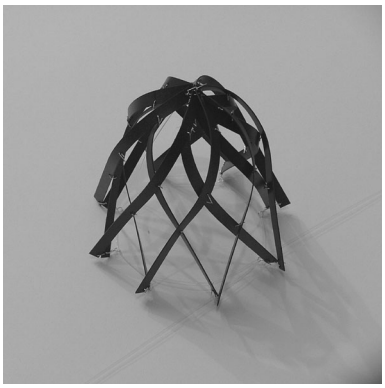


Abb. 3-41 Grundmuster 6





In der umgekehrten Formänderung werden radiale Verbindungslinien verkürzt.

In diesem Fall kann man nicht einfach (wie bei E5-2) durch nur ein Seil den gesamten Körper zurückverformen, weil dieser dadurch unsymmetrisch deformiert würde. Es werden deshalb Zugelemente in verschiedenen radialen Richtungen benötigt, die durch den zentralen Punkt gezogen werden können.

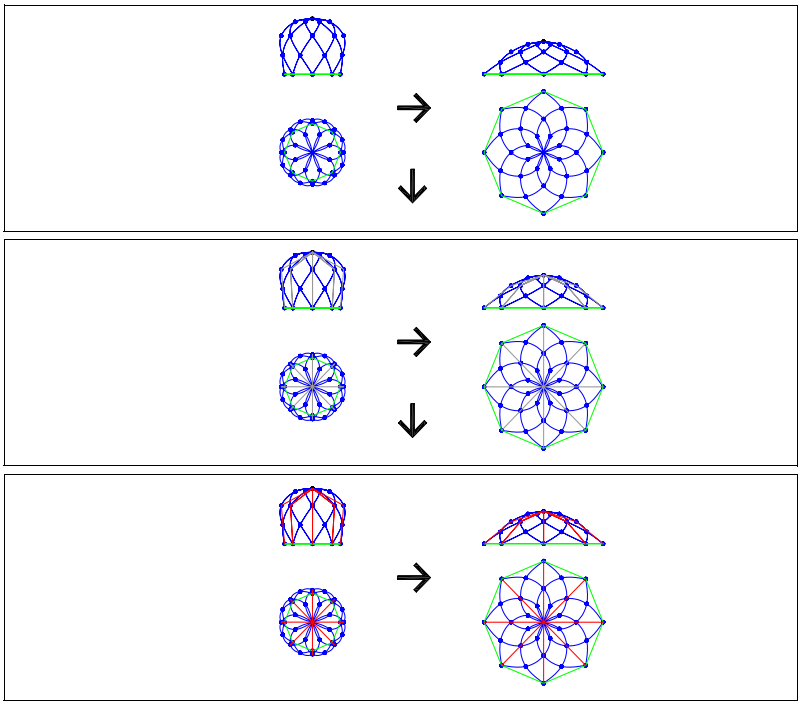
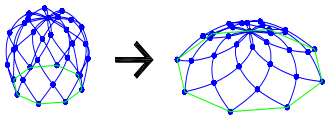
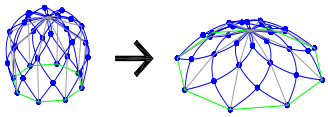


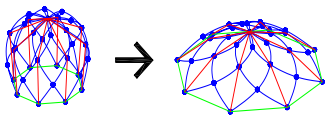
Abb. 3-42 Modifikationssequenz 6-2



Stufe 1: UE6-1



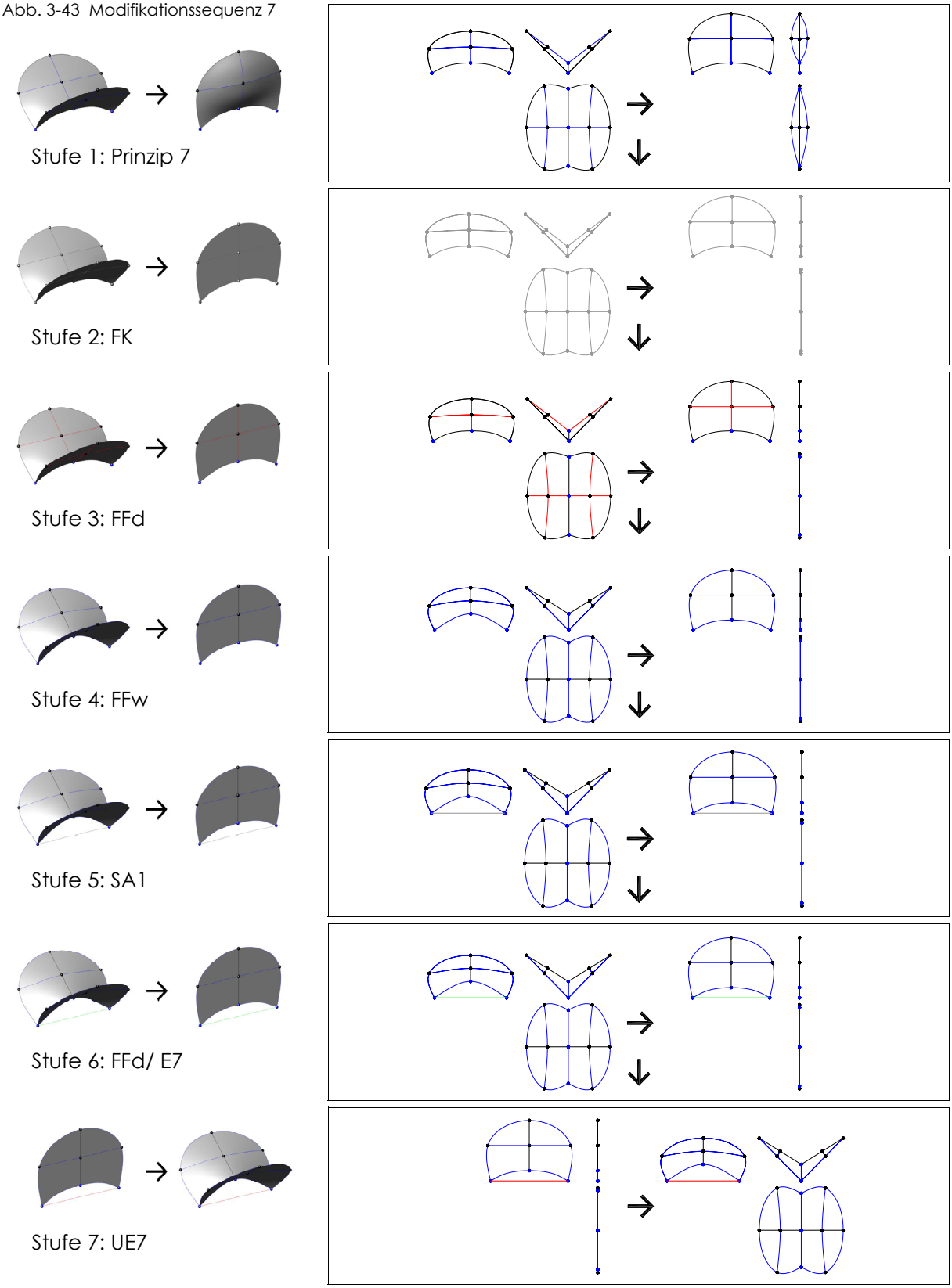
Stufe 2: SA2



Stufe 3: FFd/ E6-2

3.4.7 Grundmuster 7

Abb. 3-43 Modifikationssequenz 7



In dieser Modifikationssequenz sind nur die Änderungen der Flächen von Bedeutung. Die Flächen werden nicht durch lineare Elemente ersetzt. In der Natur ist dieses Prinzip wegen seiner schlagartigen Bewegung von Nutzen. Eine schnelle Bewegung spielt hier allerdings keine Rolle. Wichtig ist die Änderung des Winkels zwischen beiden Flächen durch die Änderung ihrer Krümmung.

Die Formänderung in der ersten Stufe ist durch eine spezielle Deformation der blauen Linien möglich. In Stufe 2 ändern wir die Krümmung der Flächen. Durch diese Modifikation werden beide einfach gekrümmten Flächen eben. Wenn die Kanten der Flächen invariabel sind, müssen sich die Flächen in beiden Achsen verkürzen (Stufe 3). Wenn sich die Länge beider Achsen nicht ändert, muss sich die Krümmung der Kanten verängern (Stufe 4). Deshalb kann man den Winkel zwischen beiden Flächen durch eine Modifikation der Krümmung ihrer gemeinsamen Kante verändern. In Stufe 5 wird eine Gerade addiert, um beide Enden dieser Kante zu verbinden. Wenn diese Linie verlängert wird, wird der Winkel zwischen den Flächen verkürzt (Stufe 6). Wenn sich diese Linie dagegen verkürzt, wird der Winkel dadurch vergrößert.

Die folgende Abbildung (Abb. 3-44) zeigt ein Versuchsmodell für UE7. Dieses Modell besteht aus zwei rechteckigen Flächen, deren eine Kante kurvig geschnitten ist. Beide Flächen sind durch diese Kurve miteinander verbunden. Mit Hilfe eines Seils, das beide Enden der Kurve zusammenzieht, kann der Winkel zwischen den Flächen durch die Änderung ihrer Krümmung vergrößert werden.

Die Flächen bestehen aus Stäben, die aufeinander gelegt und verbunden werden.

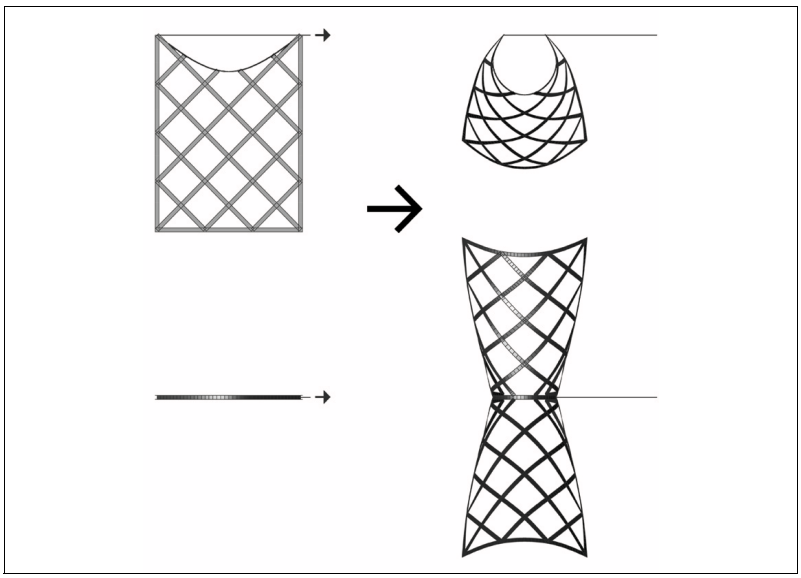
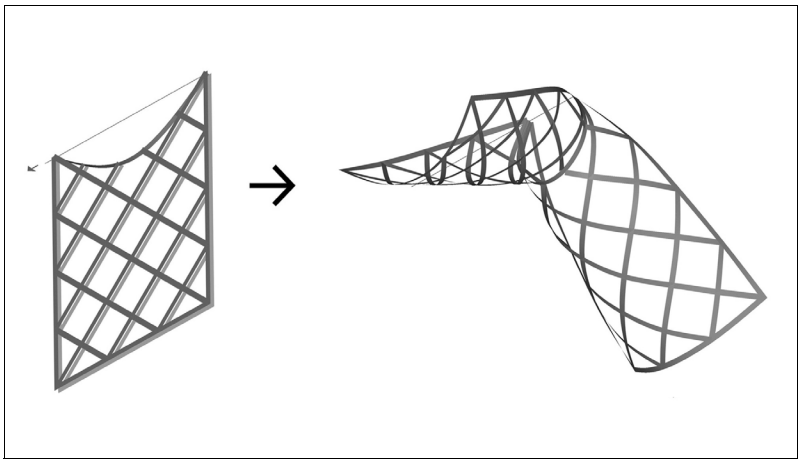
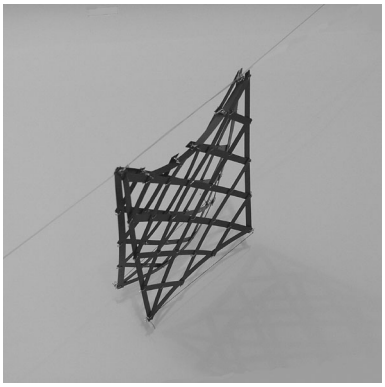
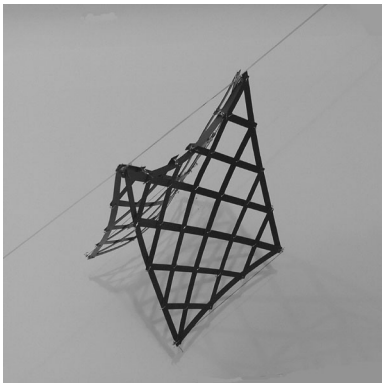
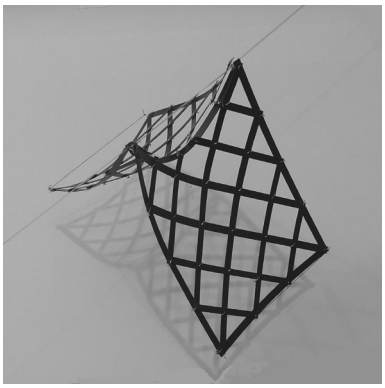


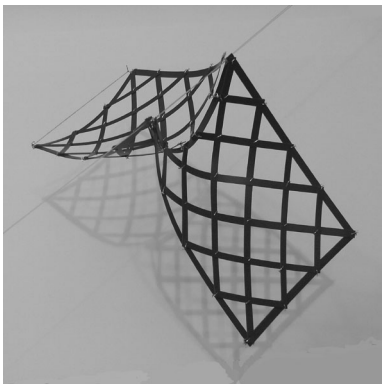
Abb. 3-44 Grundmuster 7

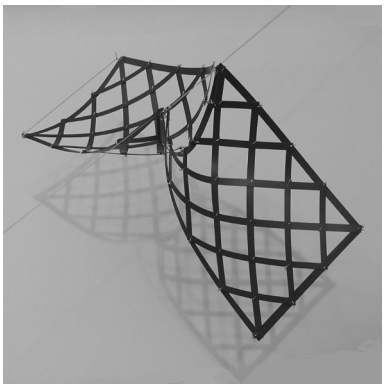


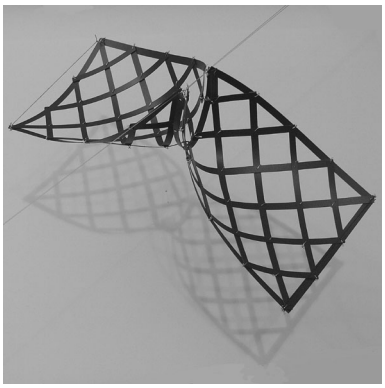












3.4.8 Grundmuster 8

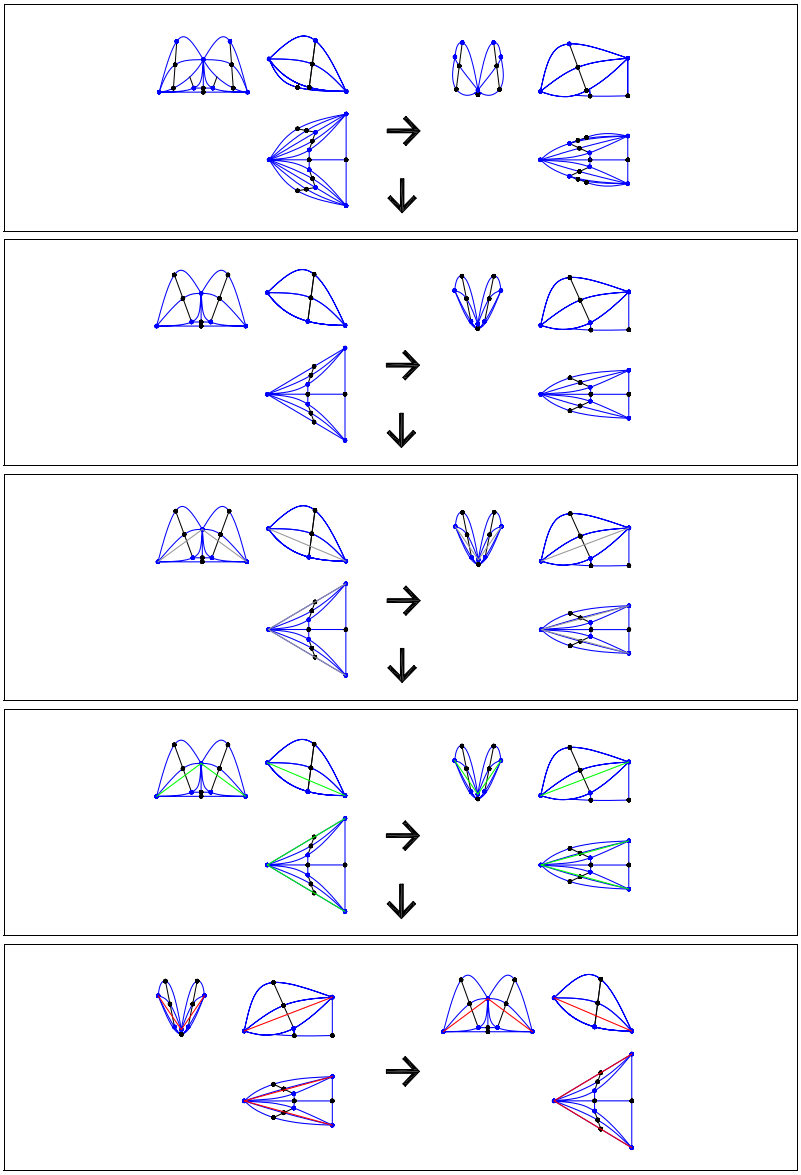
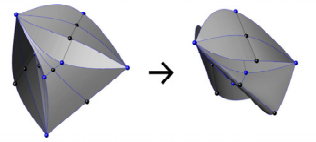
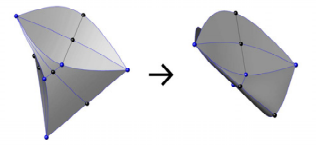


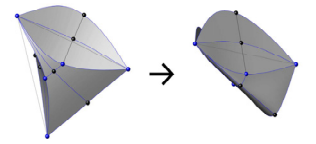
Abb. 3-45 Modifikationssequenz 8



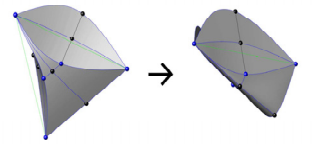
Stufe 1: Prinzip 8



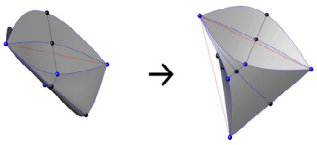
Stufe 2: SS4



Stufe 3: SA1



Stufe 4: FFd/ E8



Stufe 5: UE8

In diesem Prinzip werden fünf (einfach gekrümmte) Flächen nebeneinander verbunden. Ihre Verbindungskanten sind Kurven. Das Prinzip zeigt, dass, wenn beide Seite der mittleren Fläche zusammengedrückt werden, eine Krümmungsänderung senkrecht zur ursprünglichen Krümmungsachse eintritt. Dies kann direkt als Ergebnis herangezogen werden. Man könnte aber aus dieser komplexen Form auch ein anderes Ergebnis erzielen. Durch Änderung der Krümmung der mittleren Fläche werden die Winkel zwischen den Flächen verändert. Dies funktioniert genau umgekehrt zu Prinzip 7. Wenn in Prinzip 7 die Krümmung der Verbindungskurve vergrößert wird, vergrößert sich auch der Winkel zwischen den Flächen. Hier dagegen verkleinert sich der Winkel zwischen den Flächen, wenn die Krümmung der Verbindungskurve verstärkt

wird.

Zu Beginn dieser Modifikationssequenz werden zwei Flächen, die auf beiden Seiten positioniert sind, abstrahiert (Stufe 2). Daraufhin werden zwei Geraden addiert, um die beiden Enden der Verbundkurven zu verbinden (Stufe 3). Wenn die Geraden verlängert werden, werden die Winkel zwischen den Flächen vergrößert (Stufe 4). Umgekehrt werden die Winkel verkleinert, wenn sich diese Linien verkürzen (Stufe 5).

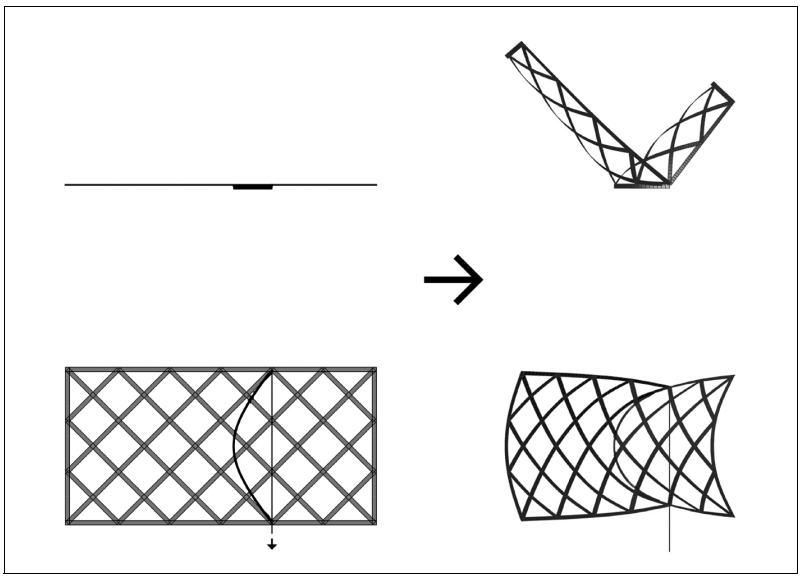
Man kann das Ergebnis auch durch nur zwei verbundene Flächen nachweisen.

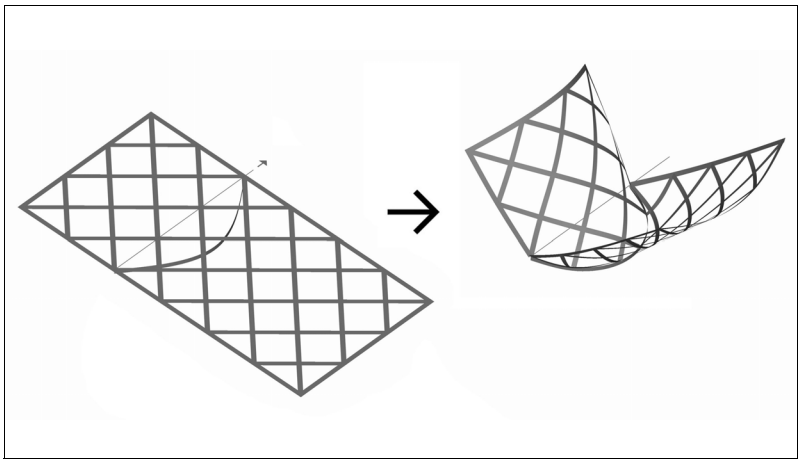
Für die Bestätigung des UE8 benutzen wir hier zwei miteinander verbundene Flächen (Abb. 3-46). Der Unterschied zwischen Versuchsmodell 7 und Versuchsmodell 8 liegt in der Verbundkurve beider Flächen. Hier sind die Kurven in den beiden Flächen umgekehrt zueinander. Im letzten Muster waren jedoch beide Kurven gleich und zur inneren Seite der Fläche hin gekrümmt. Hier können die beiden Flächen in geöffnetem Zustand sogar eine ebene Fläche bilden. Durch ein Seil, das beide Enden der Verbundkurve zusammenziehen kann, können die beiden Flächen zueinander bewegt werden. So wird der Winkel zwischen beiden Flächen verkleinert.

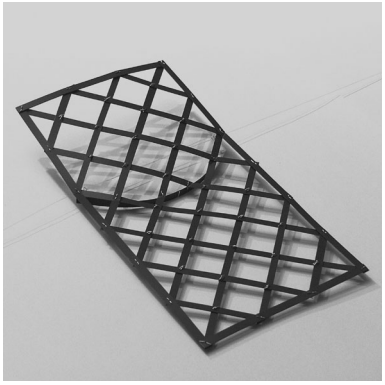
In diesem Modell besteht jede Fläche aus aufeinanderliegenden Stäben, die durch bestimmte Kombinationen ausgesteift werden.

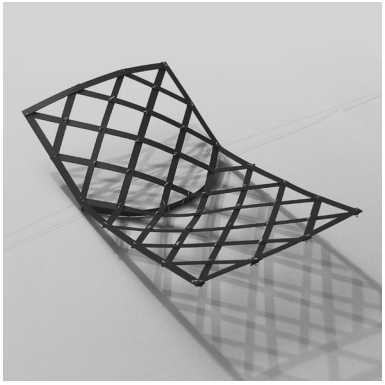
Hier muss beachtet werden, dass beide Flächen in diesem und auch im letzten Muster elastisch sind, und ihre Biegung um die mittlere Achse Anlass für eine ungleichmäßige Krümmung mit konischer Form ist.

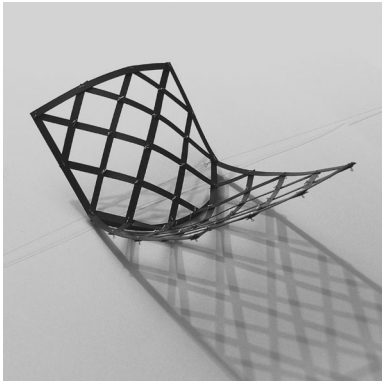
Abb. 3-46 Grundmuster 8

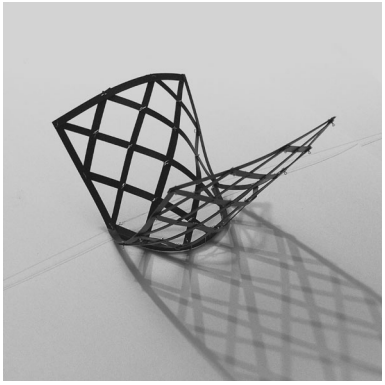


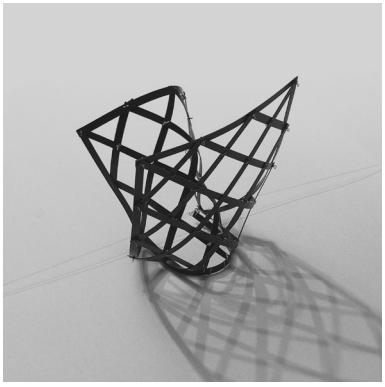


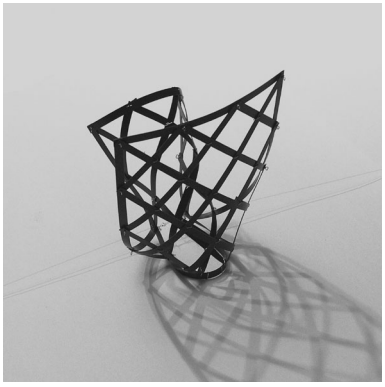






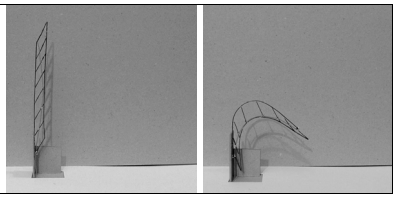
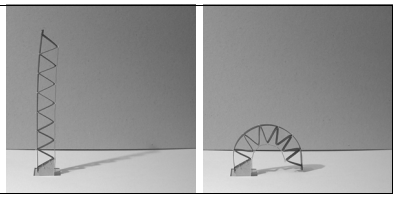
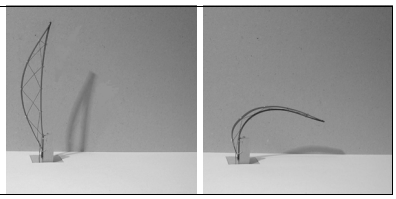
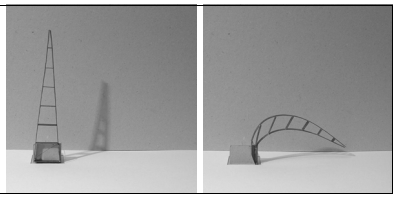
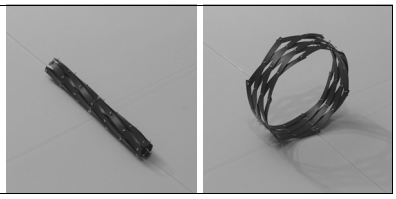
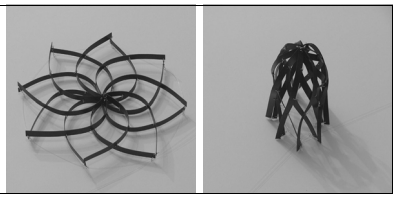
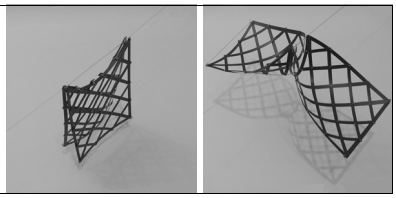
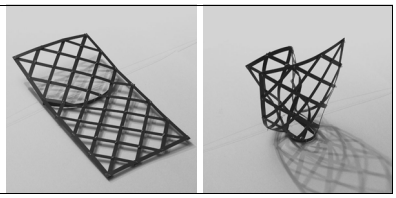






3.5 Zusammenfassung

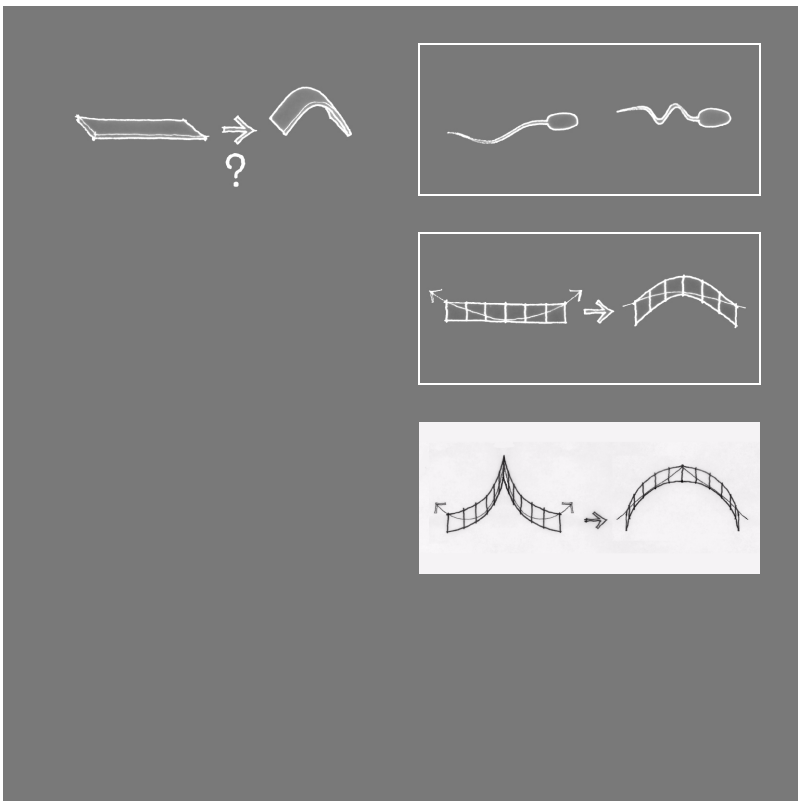
Abb. 3-47 Vergleichende Übersichtstabelle für die verschiedenen Grundmuster

Grundmuster 1 Auf der Basis von Prinzip 1/ 2D-Prinzip 9+2-Muster; Cilien und Flagellen	
Grundmuster 2 Auf der Basis von Prinzip 2/ 2D-Prinzip Hygroskopische Bewegung; Laubmoose, Reiherschnabel	
Grundmuster 3 Auf der Basis von Prinzip 3/ 2D-Prinzip Kohäsionsbewegung; Farnsporangien	
Grundmuster 4 Auf der Basis von Prinzip 4/ 2D-Prinzip Fin Ray Effect®; Schwanzflosse	
Grundmuster 5 Auf der Basis von Prinzip 5/ 3D-Prinzip Hautmuskelschlauch; Regenwurm	
Grundmuster 6 Auf der Basis von Prinzip 6/ 3D-Prinzip Ring- und Radialmuskulatur; Quallen	
Grundmuster 7 Auf der Basis von Prinzip 7/ 3D-Prinzip Konvex-Konkav-Effekt; Venusfliegenfalle	
Grundmuster 8 Auf der Basis von Prinzip 8/ 3D-Prinzip Krümmungsfalten-Effekt; Löwenmaul	

Die Ergebnisse, die in diesem Kapitel gefunden und als Grundmuster definiert wurden, sind hier in einer vergleichenden Übersichtstabelle zusammengefasst (Abb. 3-47). Die acht definierten Muster sind nun auf verschiedene Weise in der Ar-

chitektur anwendbar. Im nächsten Kapitel versuchen wir, die Verformungsmöglichkeiten der Grundmuster durch Manipulationen, Kombinationen und Weiterentwicklungen der hier erzielten Ergebnisse zu erweitern.

4 Möglichkeiten der Verformung



4.1 Einführung

In Kapitel 1, Abschnitt 1. 5. 2, wurden verschiedene Arten der Verformbarkeit biegsamer Konstruktionen unter zwei Aspekten betrachtet. Die Veränderung der Größe sowie die Veränderung der geometrischen Eigenschaften.

In diesem Kapitel versuchen wir, aus der Natur gewonnenen Prinzipien, die im letzten Kapitel abstrahiert und als acht Grundmuster definiert wurden, weiterzuentwickeln. Ein weiteres Ziel dieses Kapitels ist es, die jeweilige Veränderung der biegsamen Konstruktionen in Bezug auf Größe und Geometrie zu definieren und zu belegen.

Die Verformungspotentiale werden hier abstrakt präsentiert. Auf Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse dieses Kapitels wird im letzten Kapitel eingegangen.

Wie im letzten Kapitel benutzen wir für die Entwicklung der Prinzipien eine geometrische Methode. Wir versuchen, die Grundmuster durch Manipulation und Kombination weiterzuentwickeln. Auf diese Weise lässt sich eine Vielzahl verschiedener neuer Verformungsmechanismen finden. In manchen Fällen können diese Muster direkt als fertige Konstruktion[1] betrachtet werden. In vielen Fällen müssen sie jedoch auf unterschiedliche Weise erweitert werden. Über die Anordnung der Muster können wir Konstruktionen erzeugen, die sich vergrößern, verkleinern, öffnen, schließen oder als Fläche deformieren lassen.

Die Grundmuster, manipulierten Muster und kombinierten Muster sind der Hauptbestandteil einer biegsamen Konstruktion, die sich mit einem bestimmten Mechanismus verformen lassen.

Manipulation, Kombination und Anordnung, die drei Formen der Weiterentwicklung der Prinzipien, werden miteinander verknüpft. Dank dieser aggregierten Anwendung lassen sich vielfältige weitere Kategorien für biegsame Konstruktionen erstellen, die sich auf Basis natürlicher Mechanismen verformen.

Die Art der Aggregation der auf den Grundmustern angewendeten Änderungsmechanismen wird mit Hilfe einer eigenen Nomenklatur, bestehend aus Buchstaben, Ziffern und Klammern, deutlich gemacht.

Einige Beispiele für erweiterte Grundmuster werden am Ende des Kapitels gezeigt und durch Versuchsmodelle überprüft.

4.2 Modifikation der Grundmuster

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Grundmuster lassen sich insgesamt auf acht verschiedene Arten verformen. Durch Manipulation jedes Grundmusters kann man jedoch mit ein- und denselben Mechanismen neue Möglichkeiten der Verformbarkeit anbieten.

Jedes Muster (einfach oder manipuliert) hat einen eigenen Verformungscharakter. Durch die Kombination einiger Muster miteinander finden wir neue Muster mit neuen Charakteristika. Nach der Kombination lassen sich drei Gruppen von Mustern definieren.

1. Eine Konstruktion, die direkt in der Architektur anwendbar ist.

1. Grundmuster
2. Manipulierte Muster
3. Kombinierte Muster

Wenn eines oder mehrere Muster aus diesen drei Gruppen nebeneinander angeordnet werden, kann man durch diese Erweiterung der Muster eine Fläche erstellen. Diese Fläche kann sich wiederum durch einen bestimmten Mechanismus vergrößern, verkleinern, sowie öffnen oder schließen, oder auch nur ihre Geometrie verändern.

Die drei Gruppen von Modifikationen zur Entwicklung der Prinzipien sind miteinander verknüpft. Der erste Schritt ist die Manipulation der Grundmuster. In einem zweiten Schritt erfolgt die Kombination der Grundmuster oder die Kombination der manipulierten Muster, oder beides. Der dritte Schritt besteht in der Anordnung der Grundmuster oder in der Anordnung der manipulierten oder kombinierten Muster.

M1(Gn) / 8 K.

M2(Gn) / 8 K.

Abb. 4-1 Kategorien (K.) der Manipulation (insgesamt 16)

4.2.1 Manipulation

In diesem Schritt wird die Geometrie oder Topologie der Grundmuster verändert. Wir benutzen die Grundmuster als Eingabe und suchen nach neuen Möglichkeiten. Manipulation wird in diesen Fällen in zwei Gruppen eingeteilt: Manipulation der Form und Manipulation der Struktur.

„M“ wird hier als Abkürzung für Manipulation verwendet, „M1“ für Manipulation der Form und „M2“ für Manipulation der Struktur.

- **Manipulation der Form (M1)**

Durch Manipulation der Form werden folgende Parameter der Grundmuster verändert: Länge, Winkel und Krümmung (Krümmung der Kurve - Gerade zur Kurve und umgekehrt). Die Ergebnisse müssen geometrisch bewiesen und anhand von die Modellen bestätigt werden.

Aus den acht Grundmustern kann man acht Kategorien für die Manipulation der Form definieren. Diese Kategorien werden mit M1(Gn) bezeichnet[2].

In jeder Kategorie kann man durch Änderung verschiedener Parameter verschiedene Ergebnisse finden. Die Ergebnisse werden hier gegliedert:

M1(G1)-1, M1(G1)-2, M1(G1)-3, ...
M1(G2)-1, M1(G2)-2, M1(G2)-3, ...
...
M1(G8)-1, M1(G8)-2, M1(G8)-3, ...

- **Manipulation der Struktur (M2)**

Durch diese Manipulation wird die Struktur eines Grundmusters durch die Formverfahren der Addition und Subtraktion

2. In allen Fällen: $n, m \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ und $o, p \in \{1, 2\}$

und gewisse Formtransformationen verändert. Auch hier müssen die Ergebnisse geometrisch bewiesen und durch Modelle bestätigt werden.

Aus acht Grundmustern kann man auch hier acht Kategorien für die Strukturmanipulation definieren. Diese Kategorien werden mit M2(Gn) bezeichnet.

In jeder Kategorie lassen sich durch verschiedene Modifikationen in der Struktur verschiedene Ergebnisse finden. Die Ergebnisse werden hier gegliedert:

M2(G1)-1, M2(G1)-2, M2(G1)-3, ...
M2(G2)-1, M2(G2)-2, M2(G2)-3, ...
...
M2(G8)-1, M2(G8)-2, M2(G8)-3, ...

Abb. 4-2 Kombinationskategorien (insgesamt 316)

4.2.2 Kombination

Durch die Kombination mindestens zweier Muster miteinander ergeben sich neue Muster mit neuen Eigenschaften. Um die Komplexität der Ergebnisse möglichst gering zu halten, beschränken wir uns auf die Kombination von nur jeweils zwei Mustern. Wir nutzen Grundmuster, manipulierte Muster oder beides als Eingabe und forschen nach neuen Möglichkeiten der Verformung, die sich in der Ausgabe erzeugen lassen. Kombination wird in diesen Fällen in zwei Hauptgruppen eingeteilt: Kombination ähnlicher Muster und Kombination unterschiedlicher Muster.

„K“ wird hier als Abkürzung für Kombination, „K1“ für Kombination ähnlicher Muster und „K2“ für Kombination unterschiedlicher Muster verwendet.

In einer Kombination müssen manchmal neue Elemente addiert oder subtrahiert oder einige Parameter variiert werden.

- **Kombination ähnlicher Muster (K1)**

Hier werden zwei gleiche Grundmuster oder zwei gleiche manipulierte Muster miteinander kombiniert. Im Falle manipulierter Muster können zwei gleiche M1(Gn) oder zwei gleiche M2(Gn) miteinander kombiniert werden.

Aus acht Grundmustern kann man acht Kombinationskategorien definieren. Diese Kategorien werden mit K1(Gn) benannt.

In jeder Kategorie lassen sich mit verschiedenen Kombinationsvarianten verschiedene Ergebnisse finden. Folgende Reihe zeigt die möglichen Ergebnisse in gegliederter Form:

K1(G1)-1, K1(G1)-2, K1(G1)-3, ...
K1(G2)-1, K1(G2)-2, K1(G2)-3, ...
...
K1(G8)-1, K1(G8)-2, K1(G8)-3, ...

Aus insgesamt 16 manipulierten Mustern kann man 16 neue

Kategorien für Kombination definieren. Diese Kategorien werden mit K1(Mo(Gn)) bezeichnet.

Wir können hier auch durch verschiedene Formen der Kombination verschiedene Ergebnisse erzielen. Folgende Reihe zeigt die möglichen Ergebnisse in gegliederter Form:

K1(M1(G1))-1, K1(M1(G1))-2, K1(M1(G1))-3, ...
K1(M1(G2))-1, K1(M1(G2))-2, K1(M1(G2))-3, ...
...
K1(M2(G8))-1, K1(M2(G8))-2, K1(M2(G8))-3, ...

- **Kombination unähnlicher Muster (K2)**

Man kann drei Gruppen von Kombination zweier unterschiedlicher Muster unterscheiden.

1. Kombination zweier unterschiedlicher Grundmuster miteinander. Aus acht Grundmustern kann man 28 neue Kombinationskategorien definieren. Diese Kategorien werden mit K2(Gn, Gm) bezeichnet (n≠m).

Folgende Reihe zeigt die Gliederung der verschiedenen möglichen Kombinationsformen innerhalb jeder Kategorie:

K2(G1, G2)-1, K2(G1, G2)-2, K2(G1, G2)-3, ...
K2(G1, G3)-1, K2(G1, G3)-2, K2(G1, G3)-3, ...
...
K2(G7, G8)-1, K2(G7, G8)-2, K2(G7, G8)-3, ...

2. Kombination eines Grundmusters und eines manipulierten Grundmusters miteinander. Aus acht Grundmustern und 16 manipulierten Mustern kann man 128 neue Kombinationskategorien definieren. Diese Kategorien werden mit K2(Gn, Mo(Gm)) bezeichnet.

Folgende Reihe zeigt die Gliederung der verschiedenen möglichen Kombinationsformen innerhalb jeder Kategorie:

K2(G1, M1(G1))-1, K2(G1, M1(G1))-2, K2(G1, M1(G1))-3, ...
K2(G1, M1(G2))-1, K2(G1, M1(G2))-2, K2(G1, M1(G2))-3, ...
...
K2(G8, M2(G8))-1, K2(G8, M2(G8))-2, K2(G8, M2(G8))-3, ...

3. Kombination zweier unterschiedlicher manipulierter Grundmuster miteinander. Aus 16 manipulierten Mustern kann man 136 neue Kombinationskategorien definieren. Diese Kategorien werden mit K2(Mo(Gn), Mp(Gm)) bezeichnet[3].

Folgende Reihe zeigt die Gliederung der Kombinationsmöglichkeiten pro Kategorie:

K2(M1(G1), M1(G1))-1, K2(M1(G1), M1(G1))-2, ...
K2(M1(G1), M1(G2))-1, K2(M1(G1), M1(G2))-2, ...
...
K2(M2(G8), M2(G8))-1, K2(M2(G8), M2(G8))-2, ...

3. Wenn n=m und o=p, müssen die Muster aus zwei unterschiedlichen Formen innerhalb einer Kategorie ausgewählt werden. z.B. M1(G1)-1 und M1(G1)-2

4.2.3 Anordnung

In dieser Phase werden die definierten Muster nebeneinander angeordnet. Je nach Richtung und Art und Weise der Verbindung zwischen den Mustern nach der Anordnung, Gleichzeitigkeit oder Ungleichzeitigkeit und Gleichmäßigkeit oder Ungleichmäßigkeit der Verformung der Muster sind unterschiedliche Bewegungen des Gesamtsystems möglich.

Wir benutzen die Grundmuster, manipulierten Muster oder kombinierten Muster als Eingabe und suchen nach Erweiterungsmöglichkeiten der Muster, die sich als Ausgabe erzielen lassen. Die Form der Anordnung der Muster kann in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden: rechteckig und polar.

„A“ wird hier als Abkürzung für Anordnung, „A1“ für eine Anordnung in rechteckiger, und „A2“ für eine Anordnung in polarer Form verwendet.

- **Rechteckig (A1)**

Die Muster werden hier in rechteckiger Form nebeneinander angeordnet und miteinander verbunden. Durch eine gleichzeitige und gleichmäßige Verformung der Muster bewegt sich das Gesamtsystem parallel. Durch eine asynchrone oder ungleichmäßige Verformung der Muster wird eine freie Bewegung des Systems ermöglichet.

Die rechteckige Form der Anordnung kann in drei Gruppen eingeteilt werden:

1. Rechteckige Anordnung der Grundmuster. Aus acht Grundmustern kann man acht Kategorien für ihre rechtekkige Anordnung definieren. Diese Kategorien werden mit A1(Gn) bezeichnet.
2. Rechteckige Anordnung der manipulierten Grundmuster. Aus 16 manipulierten Mustern kann man 16 Kategorien für ihre rechteckige Anordnung definieren. Diese Kategorien werden mit A1(Mo(Gn)) bezeichnet.
3. Rechteckige Anordnung der kombinierten Grundmuster. Aus 316 kombinierten Mustern kann man 316 Kategorien für ihre rechteckige Anordnung definieren. Diese Kategorien werden in der folgenden Weise eindeutig benannt:
   A1(K1(Gn)),
   A1(K1(Mo(Gn))),
   A1(K2(Gn, Gm))
   A1(K2(Gn, Mo(Gm)))
   A1(K2(Mo(Gn), Mp(Gm)))

In jeder Kategorie sind verschiedene Formen rechteckiger Anordnungen möglich.

- **Polar (A2)**

Die Muster werden hier in polarer Form nebeneinander an-

A1(Gn) / 8 K.

A1(M1(Gn)) / 8 K.
A1(M2(Gn)) / 8 K.

A1(K1(Gn)) / 8 K.
A1(K1(M1(Gn))) / 8 K.
A1(K1(M2(Gn))) / 8 K.

A1(K2(Gn,Gm)) / 28 K.
A1(K2(Gn,M1(Gm))) / 64 K.
A1(K2(Gn,M2(Gm))) / 64 K.
A1(K2(M1(Gn),M1(Gm))) / 36 K.
A1(K2(M1(Gn),M2(Gm))) / 64 K.
A1(K2(M2(Gn),M2(Gm))) / 36 K.

A2(Gn) / 8 K.

A2(M1(Gn)) / 8 K.
A2(M2(Gn)) / 8 K.

A2(K1(Gn)) / 8 K.
A2(K1(M1(Gn))) / 8 K.
A2(K1(M2(Gn))) / 8 K.

A2(K2(Gn,Gm)) / 28 K.
A2(K2(Gn,M1(Gm))) / 64 K.
A2(K2(Gn,M2(Gm))) / 64 K.
A2(K2(M1(Gn),M1(Gm))) / 36 K.
A2(K2(M1(Gn),M2(Gm))) / 64 K.
A2(K2(M2(Gn),M2(Gm))) / 36 K.

Abb. 4-3 Kategorien der Anordnung (insgesamt 680)

geordnet und miteinander verbunden. Durch eine gleichzeitige und gleichmäßige Verformung der Muster kann sich das Gesamtsystem zentral, zirkulär oder peripher bewegen. Durch eine asynchrone oder ungleichmäßige Verformung der Muster ist manchmal auch eine freie Bewegung möglich.

Auch die polare Anordnung kann in drei Gruppen gegliedert werden:

1. Polare Anordnung der Grundmuster. Aus acht Grundmustern lassen sich acht Kategorien für ihre polare Anordnung definieren. Diese Kategorien werden mit A2(Gn) bezeichnet.
2. Polare Anordnung der manipulierten Grundmuster. Aus 16 manipulierten Mustern lassen sich 16 Kategorien für ihre polare Anordnung definieren. Diese Kategorien werden mit A2(Mo(Gn)) bezeichnet.
3. Polare Anordnung der kombinierten Grundmuster. Aus 316 kombinierten Mustern lassen sich 316 Kategorien für ihre polare Anordnung definieren. Diese Kategorien werden in folgender Weise benannt:
   A2(K1(Gn)),
   A2(K1(Mo(Gn))),
   A2(K2(Gn, Gm))
   A2(K2(Gn, Mo(Gm)))
   A2(K2(Mo(Gn), Mp(Gm)))

Auch hier sind in jeder Kategorie verschiedene Formen polarer Anordnungen möglich.

4.3 Beispiele

Durch die Bearbeitung der Grundmuster lassen sich die aus der Natur gewonnenen Prinzipien weiterentwickeln. Mit Hilfe kategorisierter Bearbeitungsstrategien lassen sich die Prinzipien gezielt für Entwuerfe und zur Erstellung neuer Konstruktionen nutzen.

Zur Veranschaulichung des Vorgangs der Entwurfserstellung in unterschiedlichen Kategorien werden hier Beispiele dargestellt und durch Modelle überprüft.

In allen Beispielen bestehen die Konstruktionen aus linearen Elementen, deren Hauptteile biegsame Elemente sind. Die nötigen Gelenke sind alle um eine Achse drehbar (F=1). Es gibt nur zwei Ausnahmen, die in den Abbildungen gezeigt und beschrieben worden sind.

Die Bedeutungen der Farben sind dieselben wie im letzten Kapitel.

In jedem Beispiel wird zu Beginn ein Grundmuster oder ein modifiziertes Muster geometrisch dargestellt. Anschließend

wird auf der Basis der Ergebnisse ein vollständiges oder teilweises Modell gebaut und in verschiedenen Verformungsphasen gezeigt.

Zwischen zwei dargestellten Stufen jedes Beispiels liegen jeweils mehrere Stufen von Form- und Strukturmodifikationen. Hier werden jeweils nur die Ein- und Ausgabe der Modifikationssequenz präsentiert.

4.3.1 Beispiel für M1(G4)

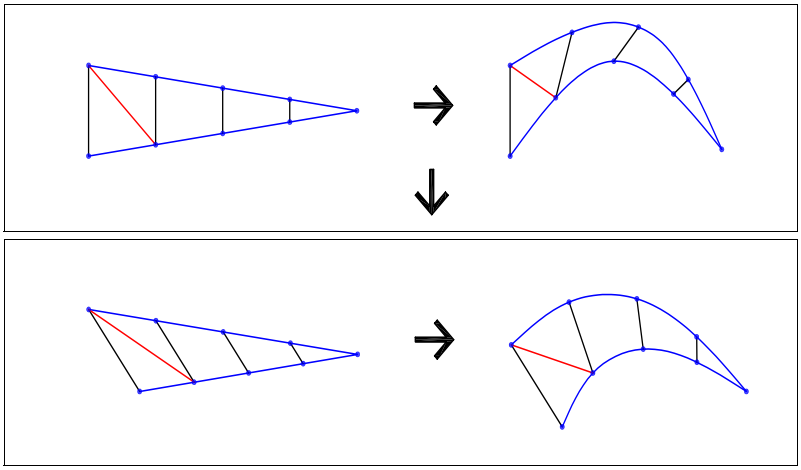
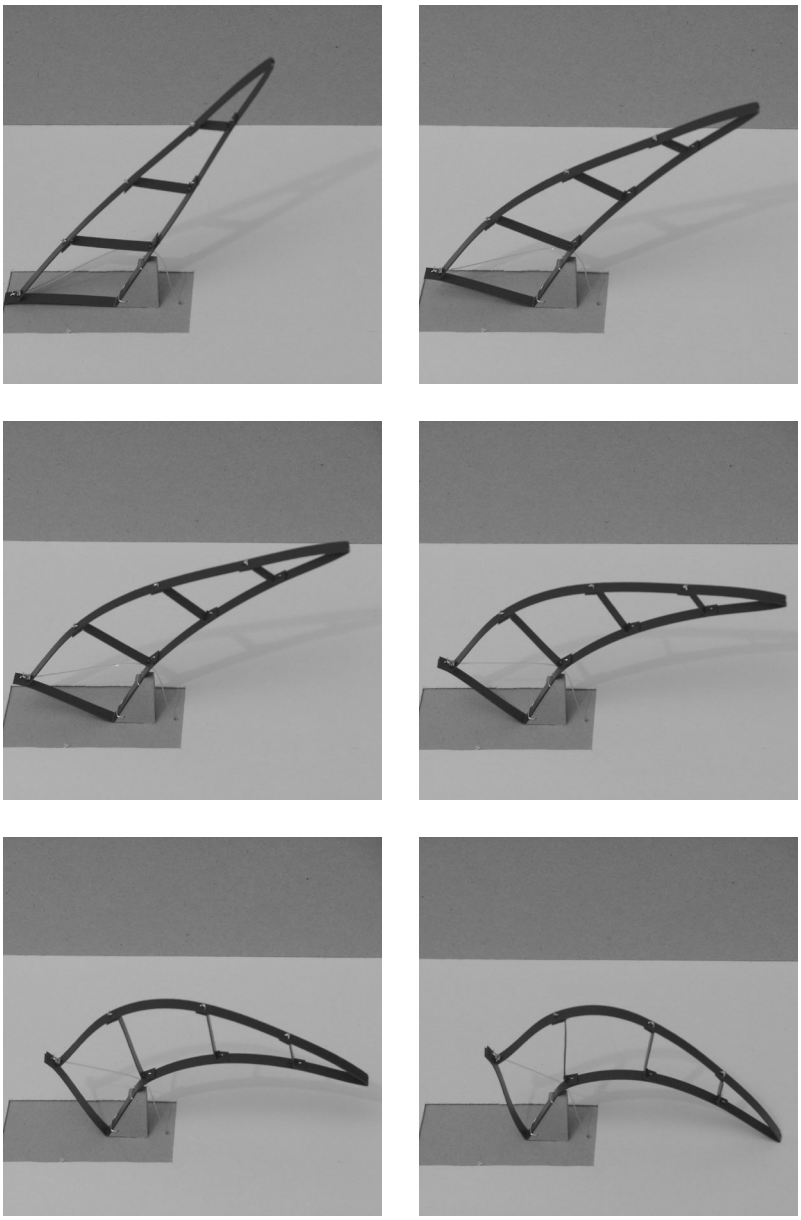


Abb. 4-4 Beispiel für M1(G4)

Grundmuster 4/ G4

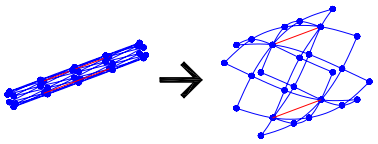
Beispiel für M1(G4)

Im Grundmuster des Prinzips 4 haben beide blaue Linien (biegsame Elemente) die gleiche Länge. Im manipulierten Muster ist diese Länge jedoch unterschiedlich. Die Deformation des manipulierten Musters ähnelt Grundmuster 4 sehr stark.

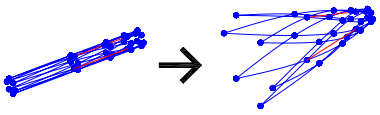


4.3.2 Beispiel für M1(G5)

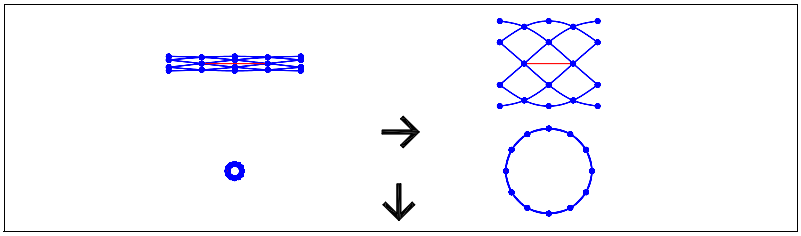
Abb. 4-5 Beispiel für M1(G5)

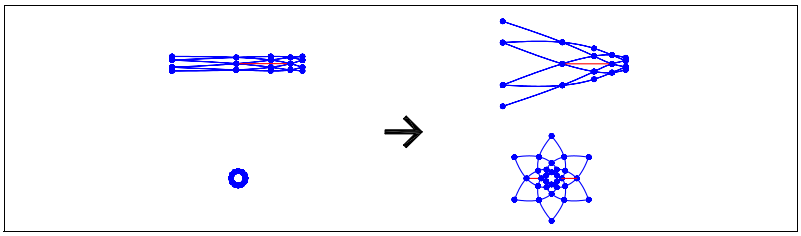


Grundmuster 5/ G5

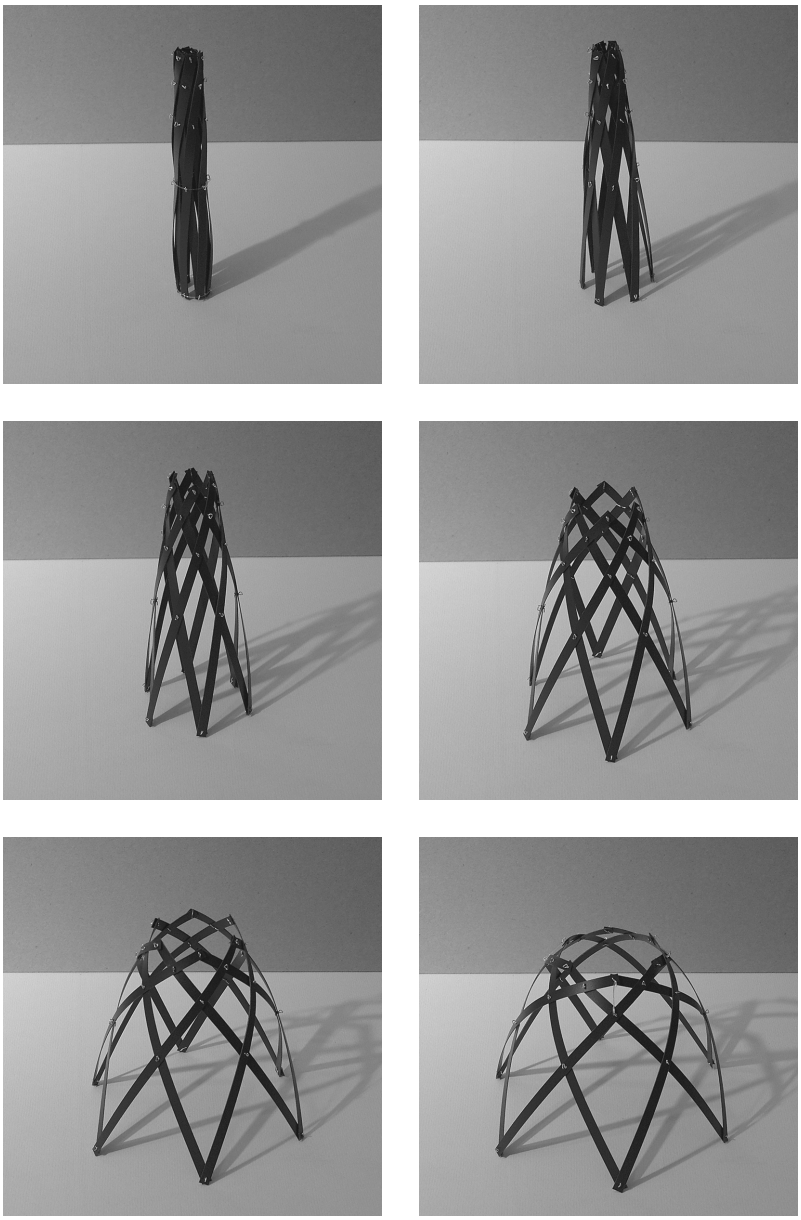


Beispiel für M1(G5)





Im Grundmuster 5 haben alle Verbindungspunkte auf jeder Kurve gleichen Abstand. Wenn diese Abstände manipuliert werden, kann man andere Deformationen durch dieses Prinzip darstellen. Hier wird eine wandelbare kegelförmige Konstruktion durch diese Manipulation präsentiert.



4.3.3 Beispiel für M2(G3)

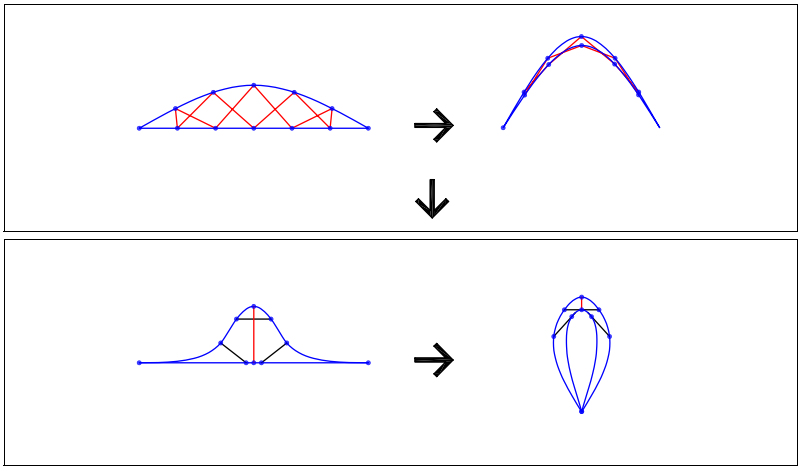
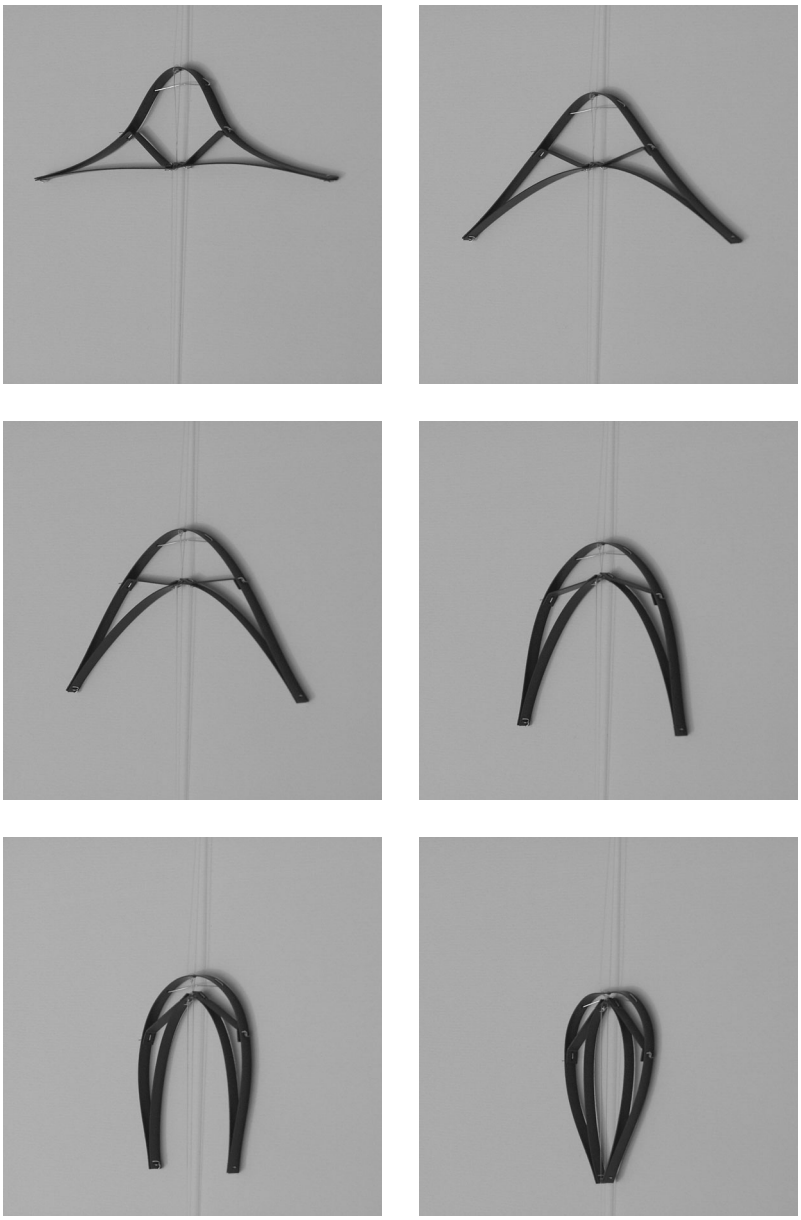


Abb. 4-6 Beispiel für M2(G3)

Grundmuster 3/ G3

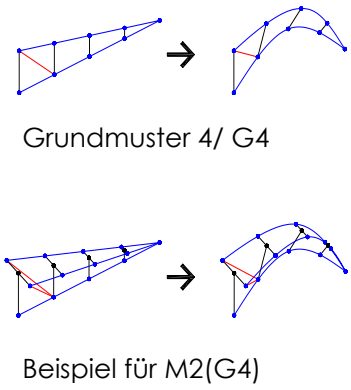
Beispiel für M2(G3)

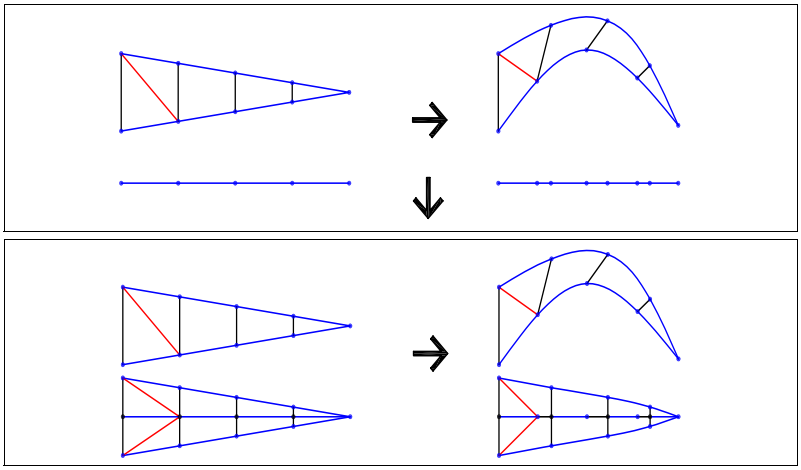
Die Änderung des Abstandes zwischen den beiden blauen Linien (biegsame Elemente) ist in Grundmuster 3 die Ursache für die Änderung der Krümmung. Durch die Manipulation der oberen Kurve und Veränderung mancher innerer Elemente kann man bessere Deformationen durch Biegung ermöglichen.



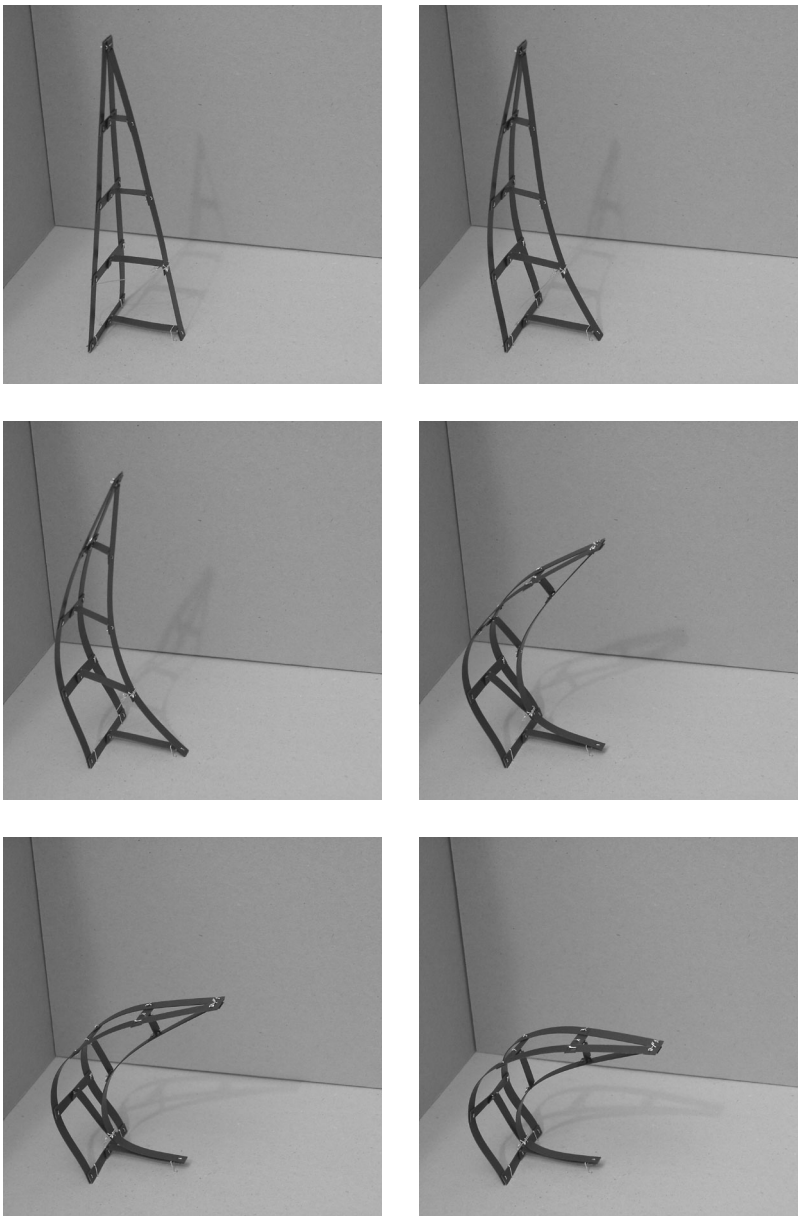
4.3.4 Beispiel für M2(G4)

Abb. 4-7 Beispiel für M2(G4)





Das Prinzip 4 wurde als Grundmuster 4 und in 2D dargestellt. In einem manipulierten Muster wird dieses Prinzip mit einem 3D Modell umgesetzt und geprüft.



4.3.5 Beispiel für M2(G5)-1

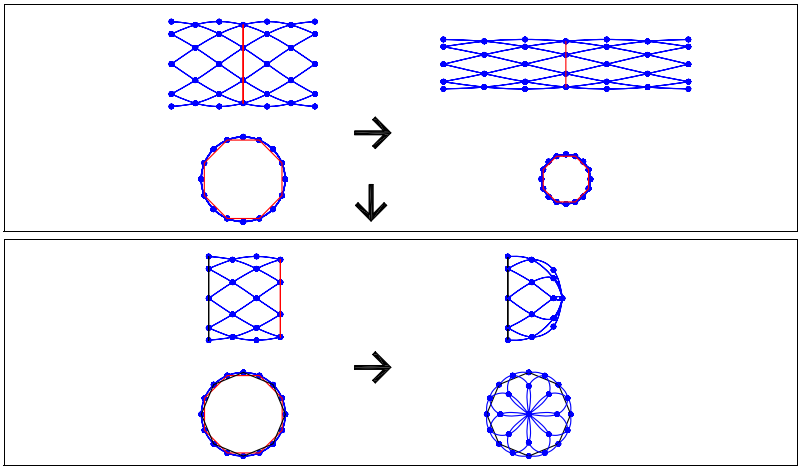
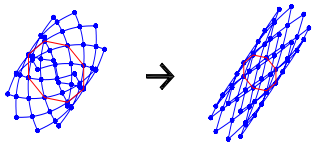
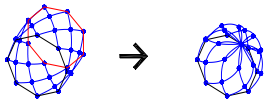


Abb. 4-8 Beispiel für M2(G5)-1

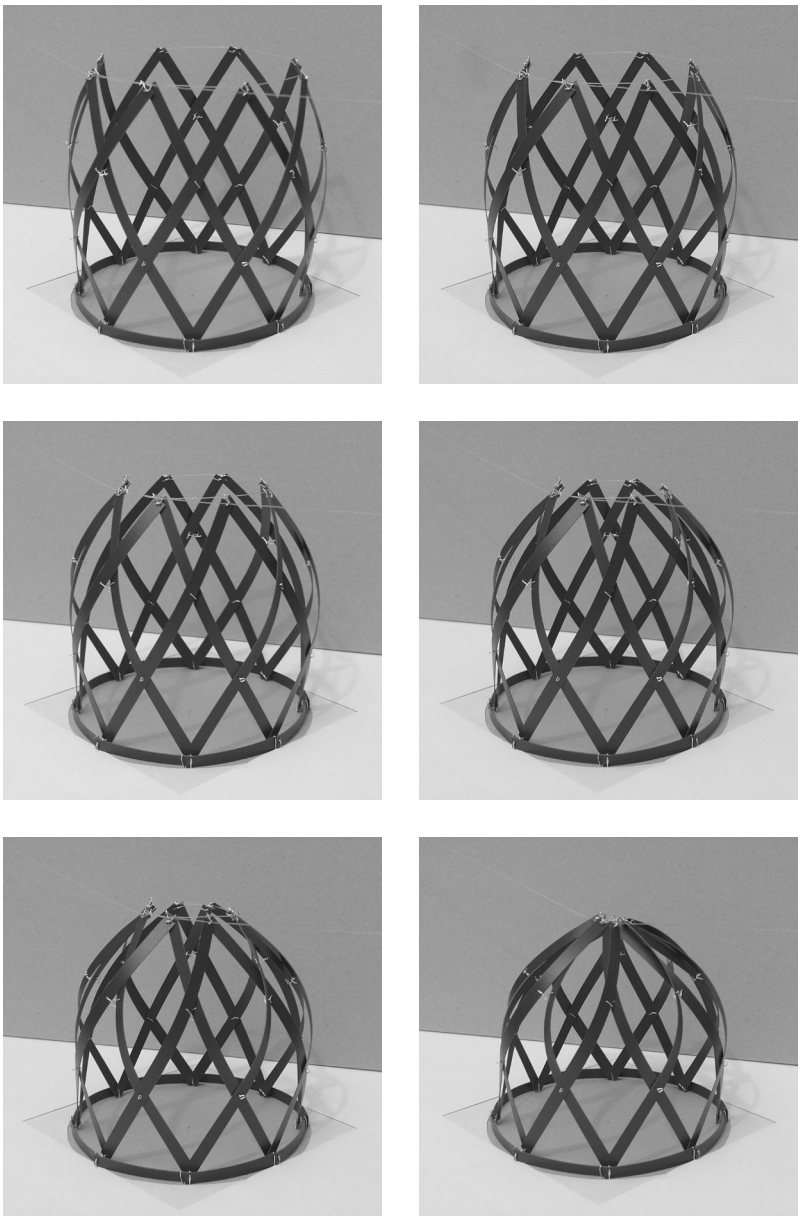


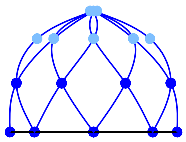
Grundmuster 5/ G5



Beispiel für M2(G5)-1

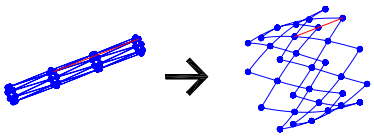
Grundmuster 5 zeigt die Veränderung der Höhe und des Durchmessers eines Zylinders durch eine Änderung der Krümmung seiner Bestandteile. Wenn der Abstand zwischen den Endpunkten der Kurven in einer Seite des Zylinders konstant bleibt und gleichzeitig auf der anderen Seite verkürzt wird, , verwandelt sich der Zylinder in eine Kuppel.
Eine wichtige Voraussetzung ist dabei, dass sich die verbundenen Linien in den hellblauen Punkten um drei Achsen drehen können (F=3).



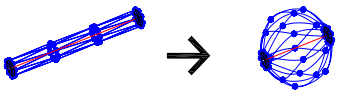


4.3.6 Beispiel für M2(G5)-2

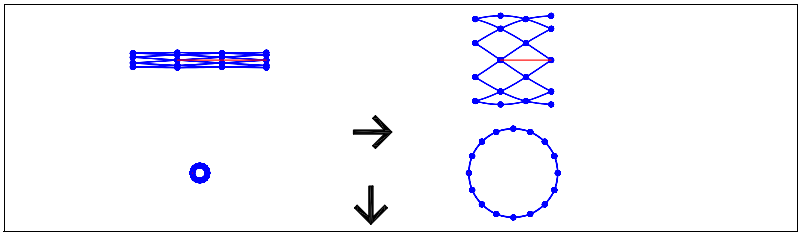
Abb. 4-9 Beispiel für M2(G5)-2

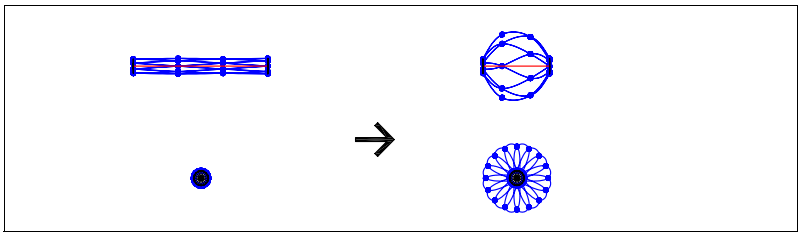


Grundmuster 5/ G5

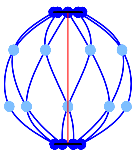


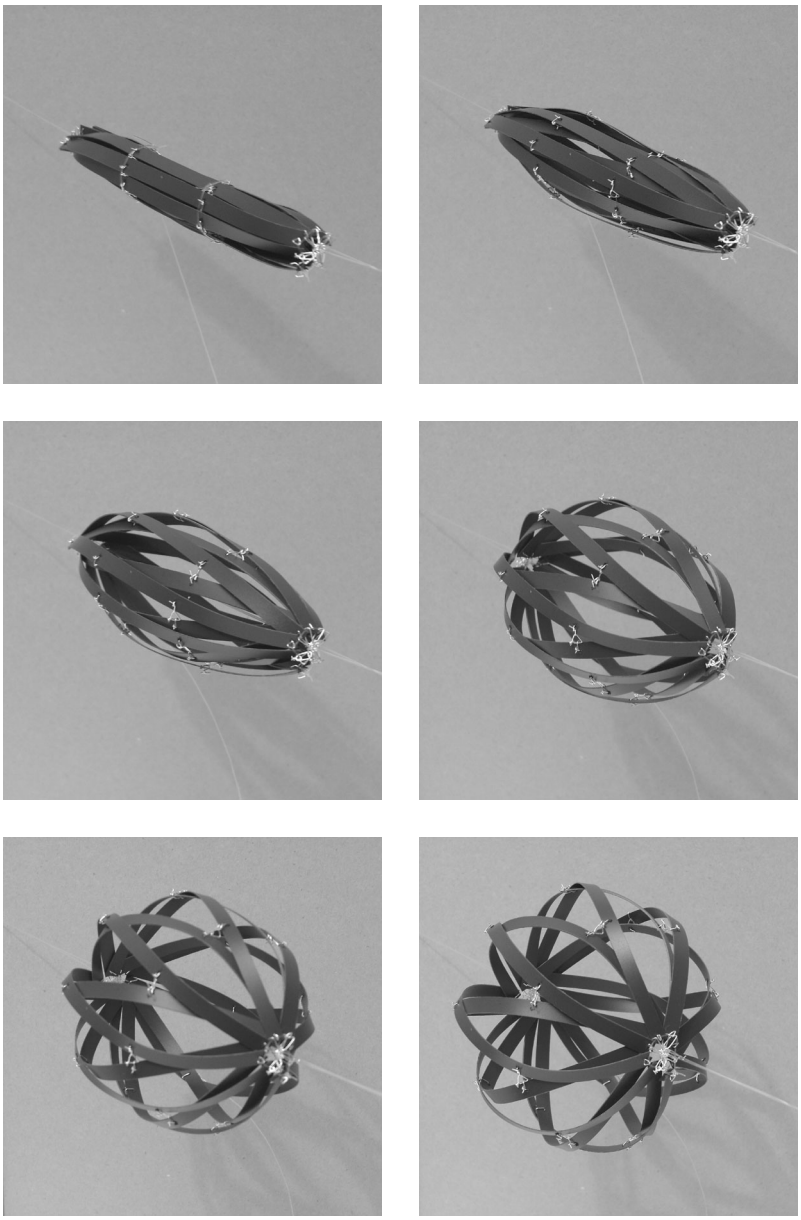
Beispiel für M2(G5)-2





Wenn bei Grundmuster 5 im geschlossenen Zustand der Zylinder (wenn der Zylinder lang und dünn ist) der Abstand zwischen den Endpunkten der Kurven in beiden Seiten des Zylinders konstant bleibt und sich beide Enden des Zylinders aufeinander zubewegen, verwandelt sich der Zylinder in eine Kugel.
Auch hier ist die Drehbarkeit der verbundenen Linien in den hellblau markierten Punkten um drei Achsen (F=3) eine wichtige Voraussetzung.





4.3.7 Beispiel für K1(G1)

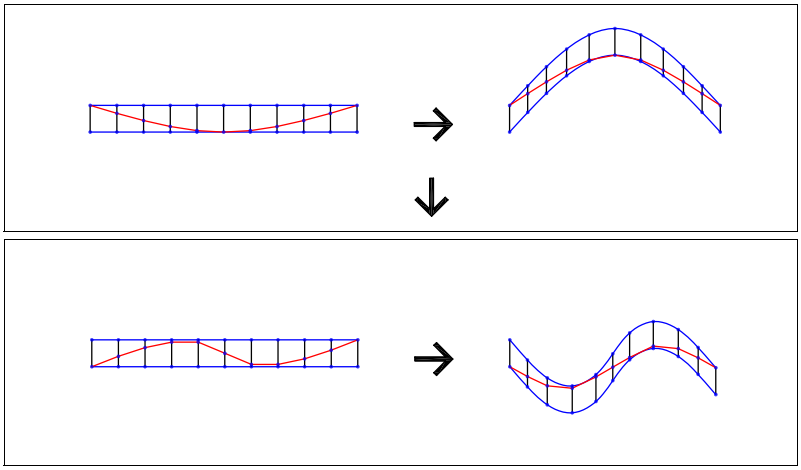
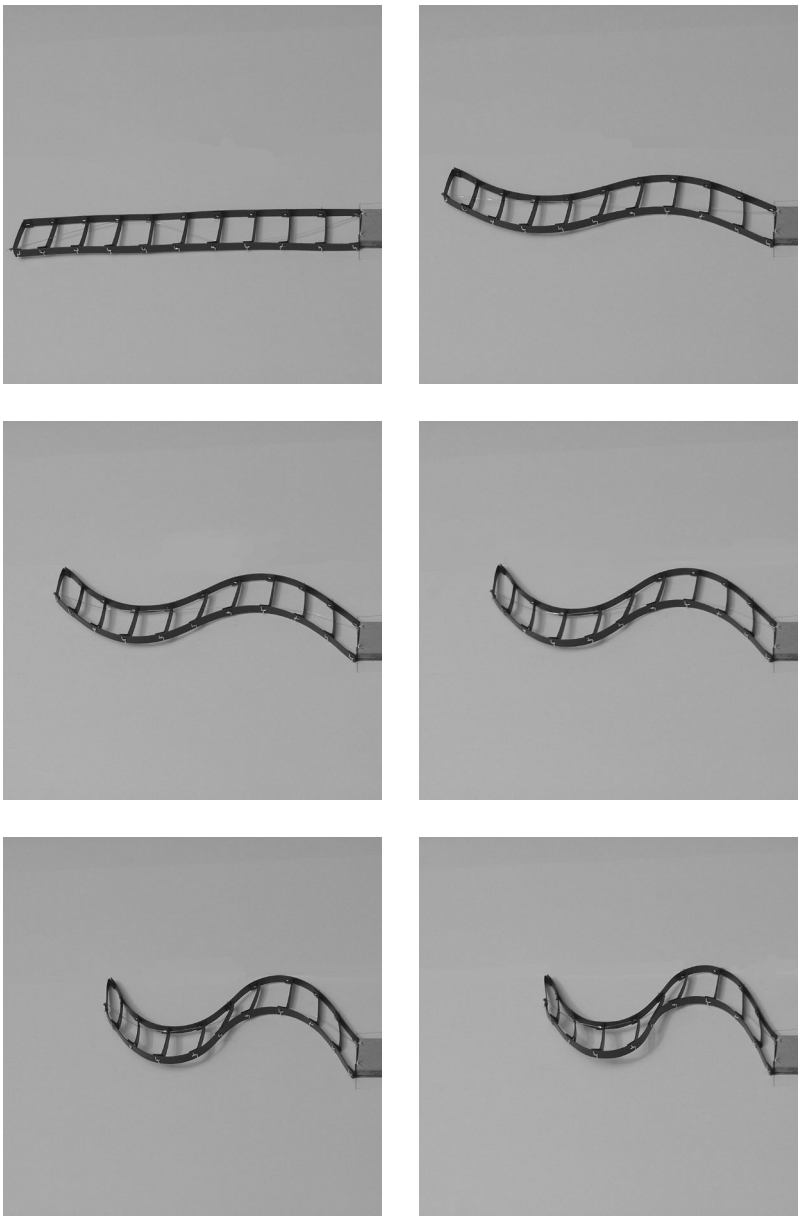


Abb. 4-10 Beispiel für K1(G1)

Grundmuster 1/ G1

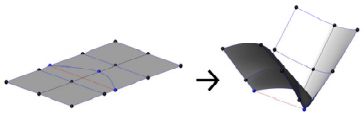
Beispiel für K1(G1)

Grundmuster 1 kann auf verschiedene Arten und Weisen kombiniert werden, wobei verschiedene wellenförmige Deformationen entstehen.

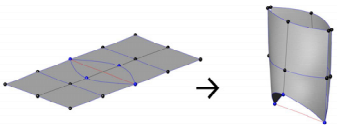


4.3.8 Beispiel für K1(G8)

Abb. 4-11 Beispiel für K1(G8)

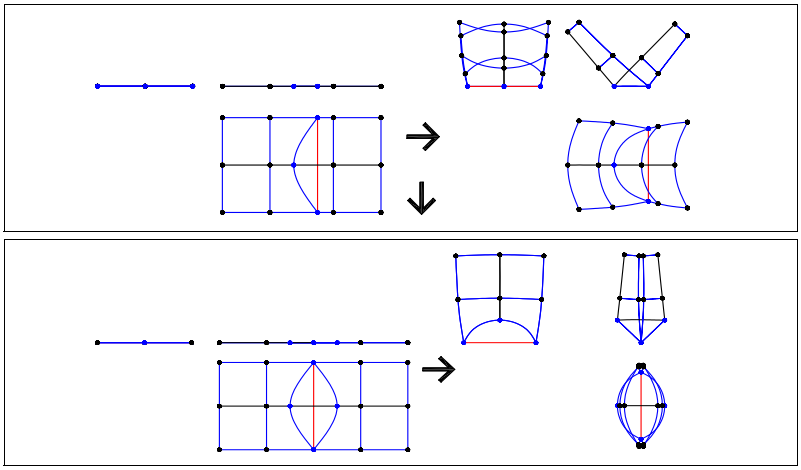


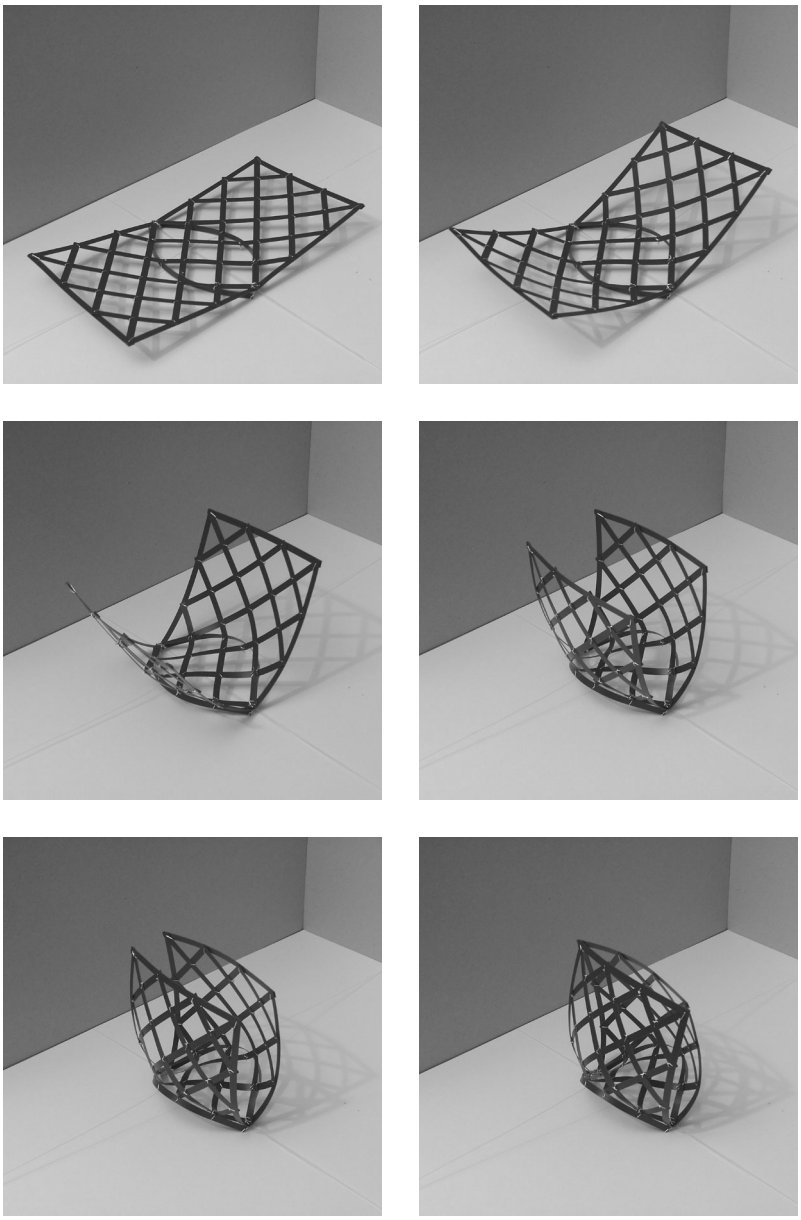
Grundmuster 8/ G8



Beispiel für K1(G8)

Grundmuster 8 wird hier symmetrisch mit sich selbst kombiniert. Die Endpunkte der in der Mitte befindlichen Kurven sind miteinander verbunden. In Kombination stellt sich Prinzip 8 in einer neuen Form dar.





4.3.9 Beispiel für K1(M1(G4))

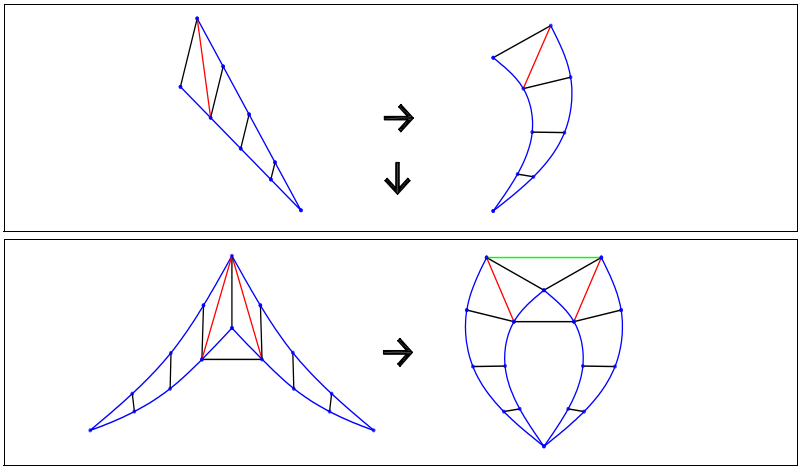
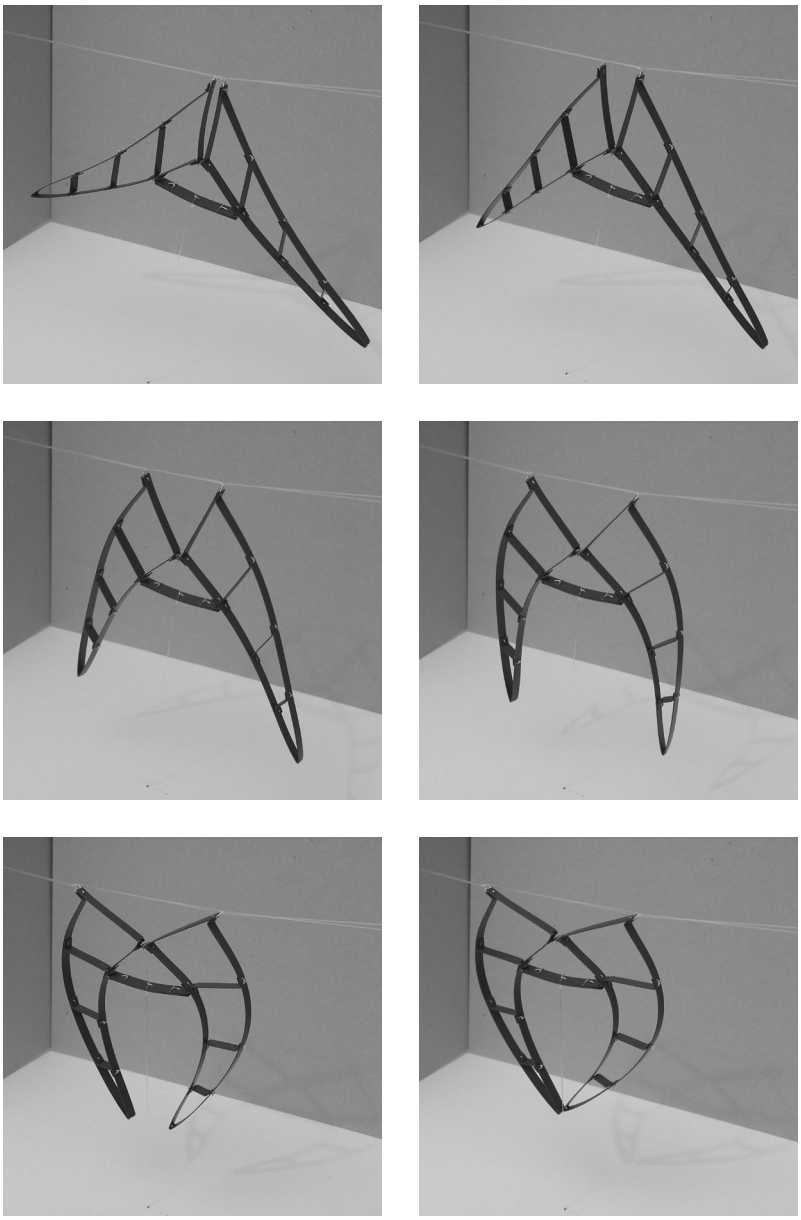


Abb. 4-12 Beispiel für K1(M1(G4))

Beispiel für M1(G4)

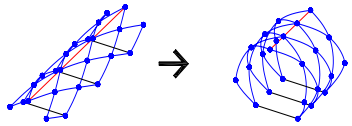
Beispiel für K1(M1(G4))

Zwei manipulierte Muster 4 werden hier symmetrisch miteinander kombiniert. Die Kombination kann sich im offenen Zustand nach außen und im geschlossenen Zustand nach innen biegen.

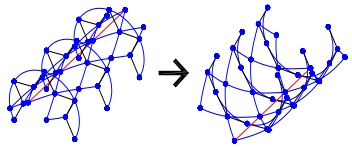


4.3.10 Beispiel für K2(G2, M2(G5))

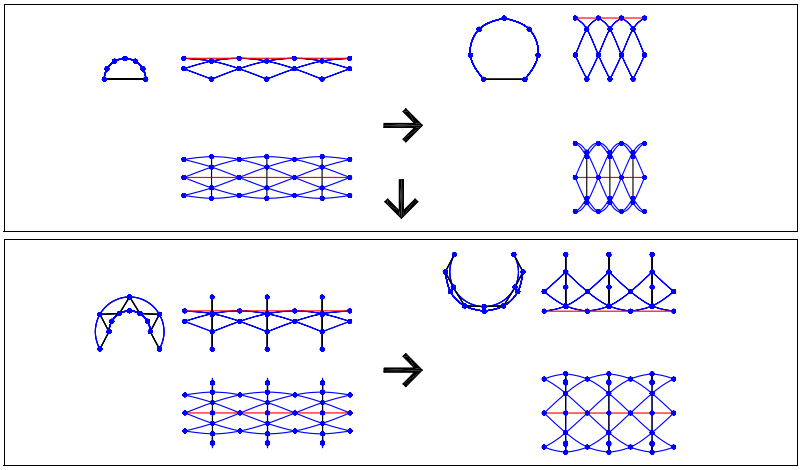
Abb. 4-13 Beispiel für K2(G2, M2(G5))



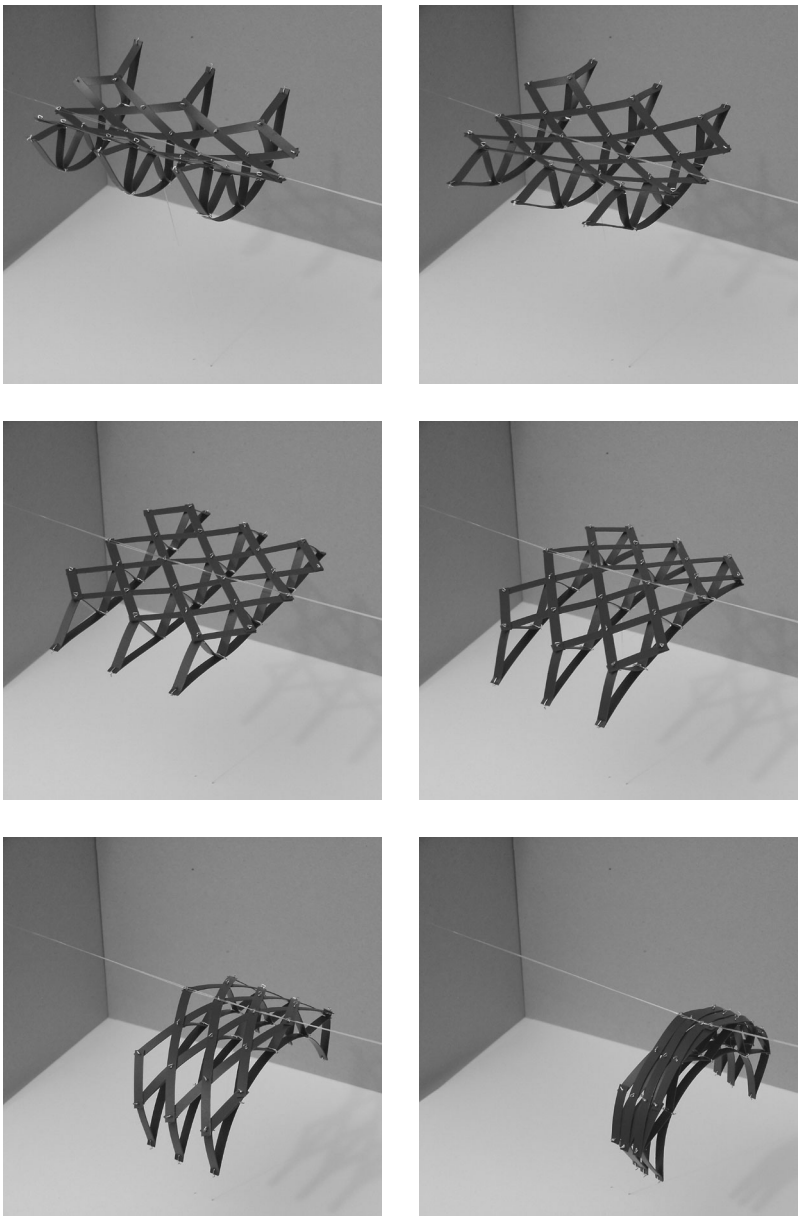
Beispiel für M2(G5)



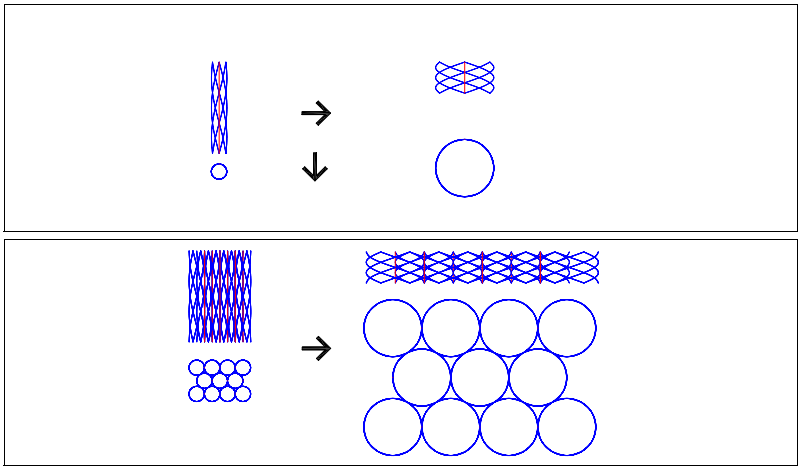
Beispiel für K2(G2, M2(G5))



In Beispiel für M2(G5) wird der zylinderförmige Körper des Grundmusters 5 halbiert. Durch schwarze Linien (steife Elemente) werden die Endpunkte der Kurven (biegsame Elemente) an einer Seite miteinander verbunden. Deshalb ändert sich die Krümmung der Mantelfläche des Halbzylinders bei einer Verkürzung der roten Linie.
Die Kombination des Grundmusters 2 und dieses Beispiels für M2(G5), erzeugt eine neue Eigenschaft. Durch eine Verkürzung der roten Linie ändert sich die Krümmungsrichtung der Mantelfläche des Halbzylinders.



4.3.11 Beispiel für A1(G5)



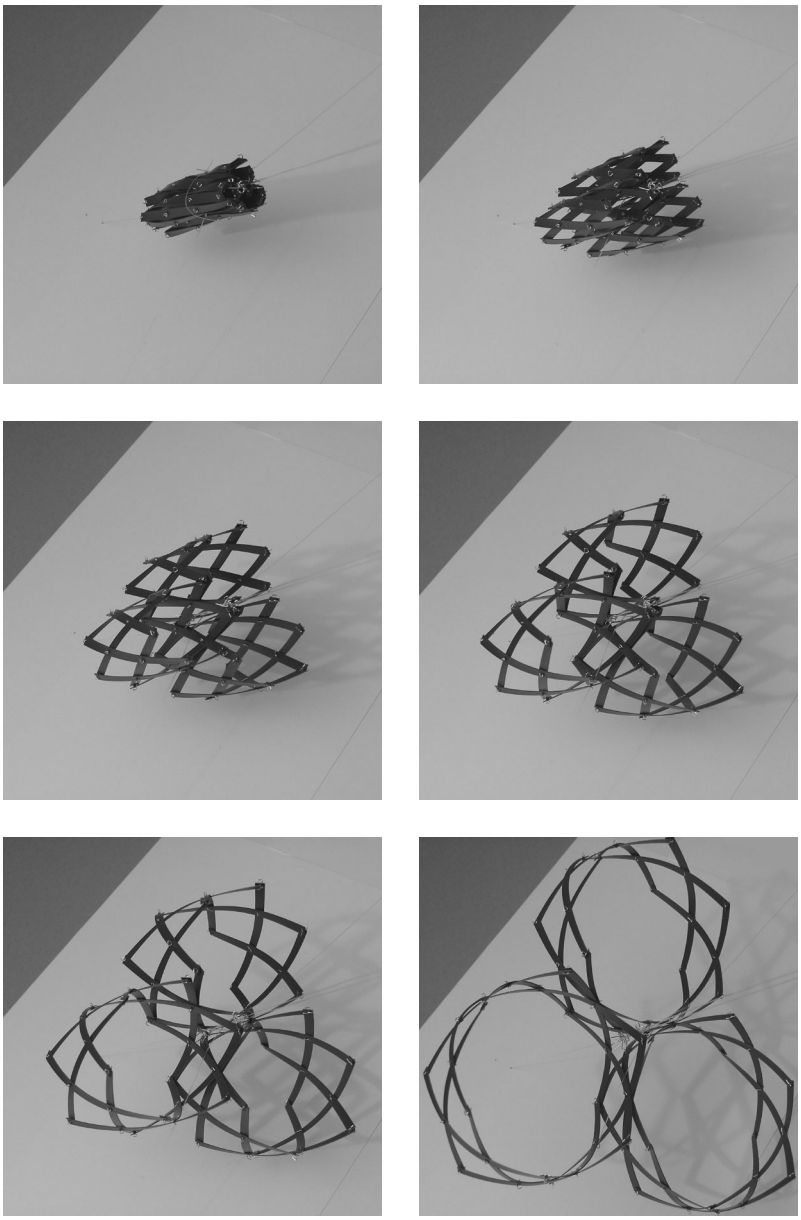
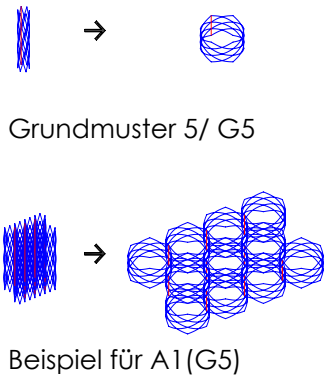


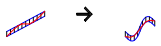
Abb. 4-14 Beispiel für A1(G5)



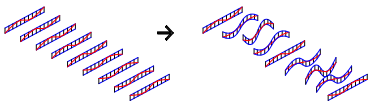
Grundmuster 5 zeigt einen zylinderförmigen Körper, dessen Höhe und Durchmesser sich gleichzeitig umgekehrt zueinander ändern können. Wenn diese Muster senkrecht nebeneinander angeordnet werden, entsteht aus diesem Muster eine Fläche, die vergrößer- oder verkleinerbar ist.
Das Modell besteht hier aus nur drei G5. Dies ist jedoch bereits ausreichend, um diese Eigenschaft nachzuweisen.

4.3.12 Beispiel für A1(K1(G1))

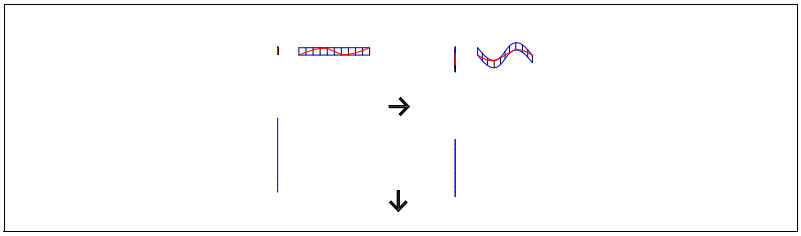
Abb. 4-15 Beispiel für A1(K1(G1))

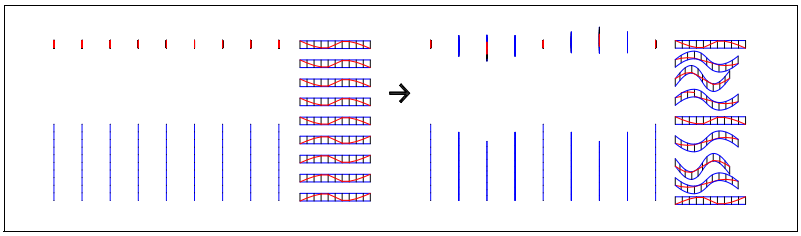


Beispiel für K1(G1)

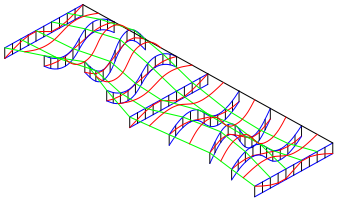


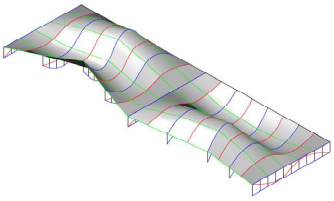
Beispiel für A1(K1(G1))

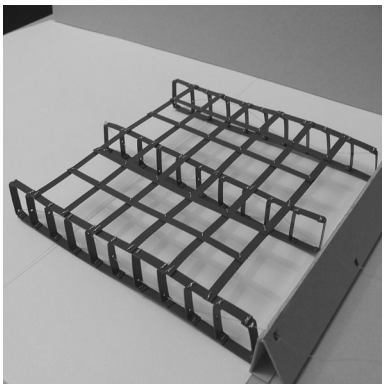


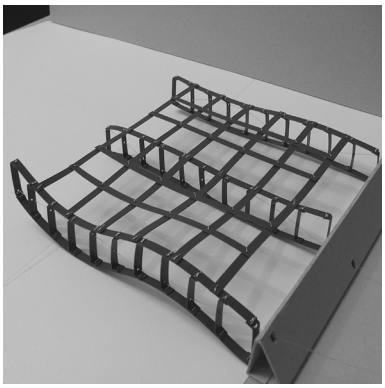


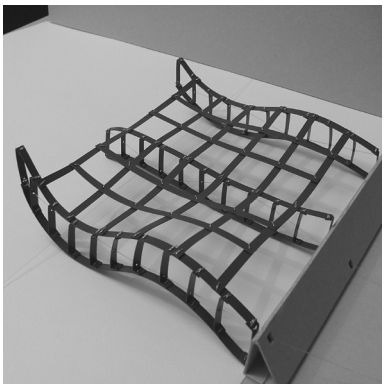
Die rechteckige Anordnung dieses Beispiels für K1(G1) zeigt viele Möglichkeiten zur Verformung einer Fläche. Durch ungleichmäßige oder asynchrone Verformung der Muster(oder beides), kann eine Freiformfläche erzeugt werden. Für die Erzeugung einer Fläche braucht man die Verbindungslinien zwischen den angeordneten Hauptelementen. Wenn die Abstände zwischen den Hauptelementen konstant bleiben sollen, müssen die Verbindungslinien ihre Länge verändern.
Im folgenden Bild sind diese Änderungen der Länge durch Farben kenntlich gemacht worden.

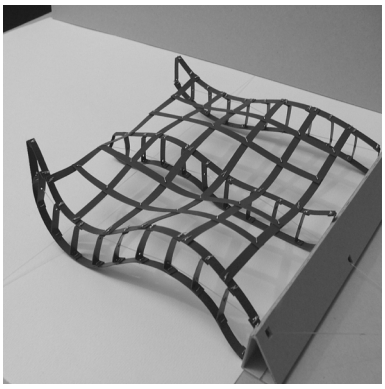


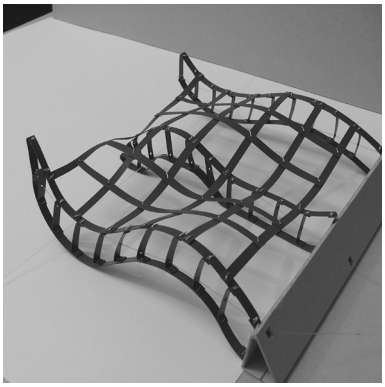


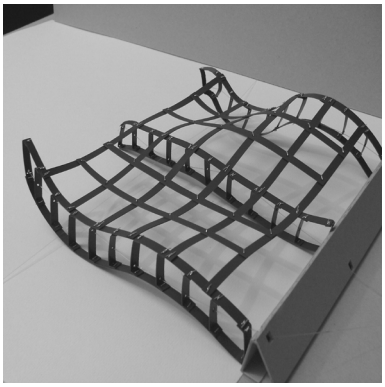




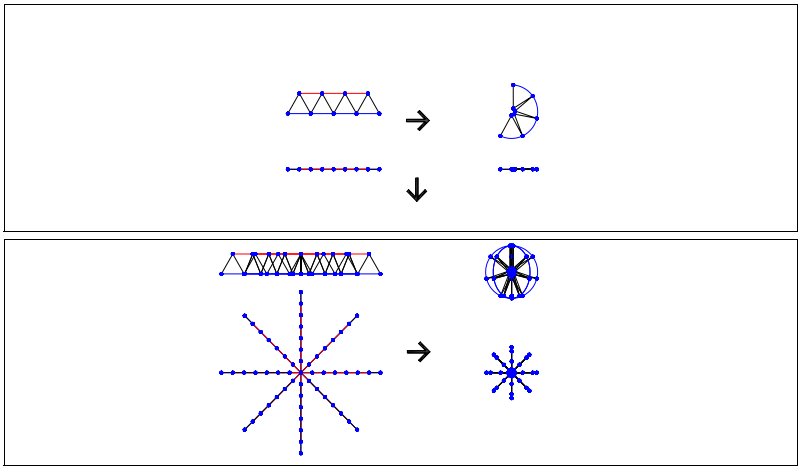








4.3.13 Beispiel für A2(G2)



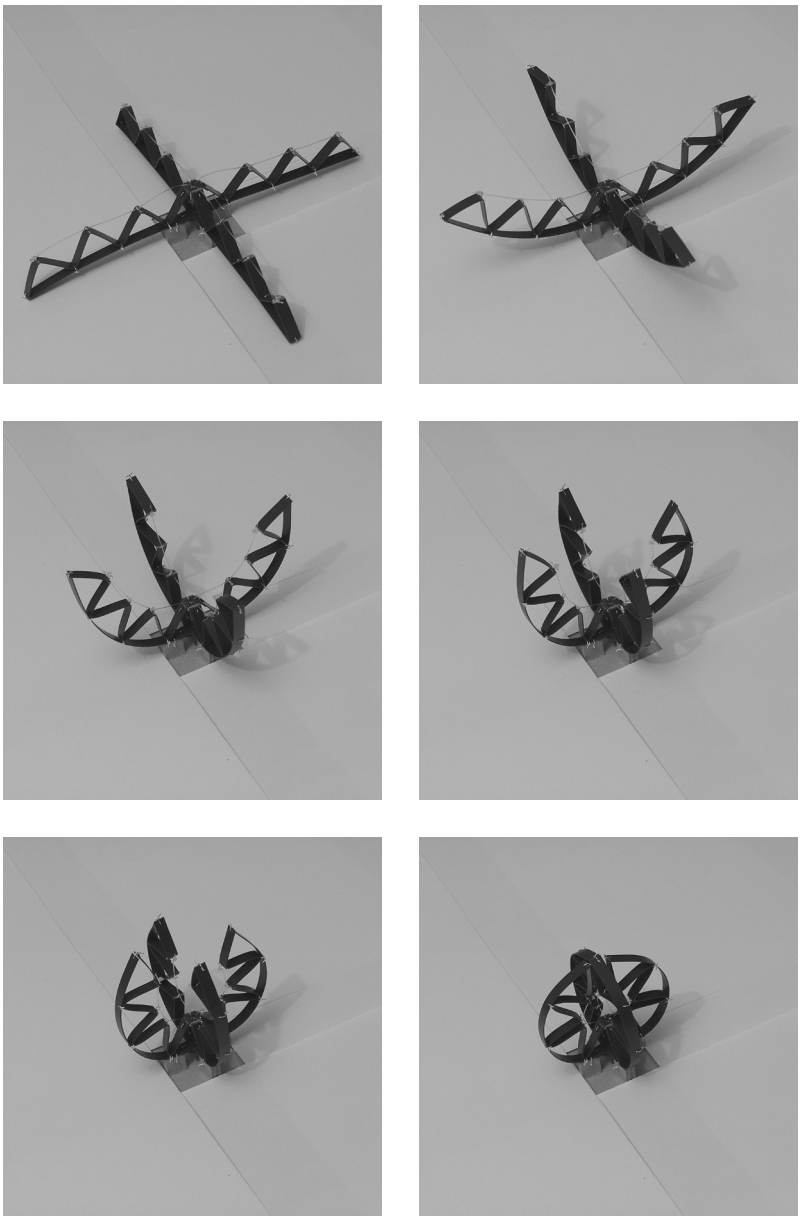
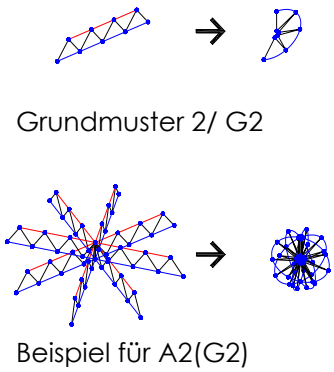


Abb. 4-16 Beispiel für A2(G2)

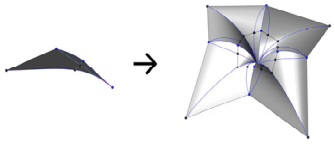


Ein Beispiel für eine polare Anordnung des Grundmusters 2 zeigt die Möglichkeit einer zentrale Bewegungsrichtung. In diesem Beispiel kann die gesamte Form wie eine Kugel zusammengerollt werden.

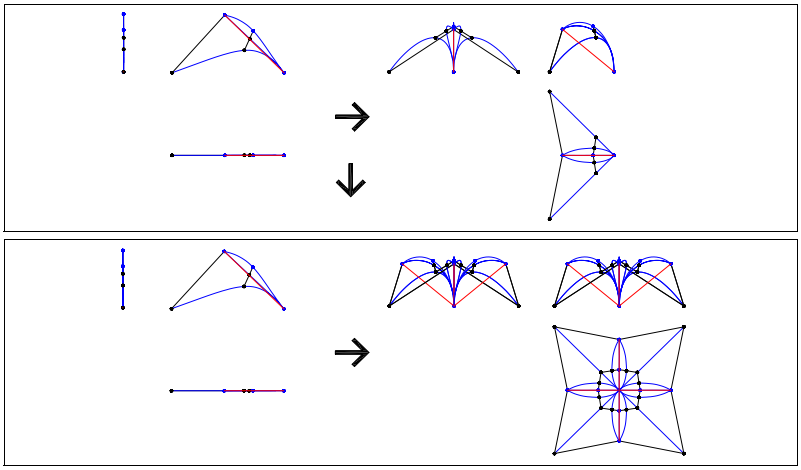
4.3.14 Beispiel für A2(M1(G7))

Abb. 4-17 Beispiel für A2(M1(G7))

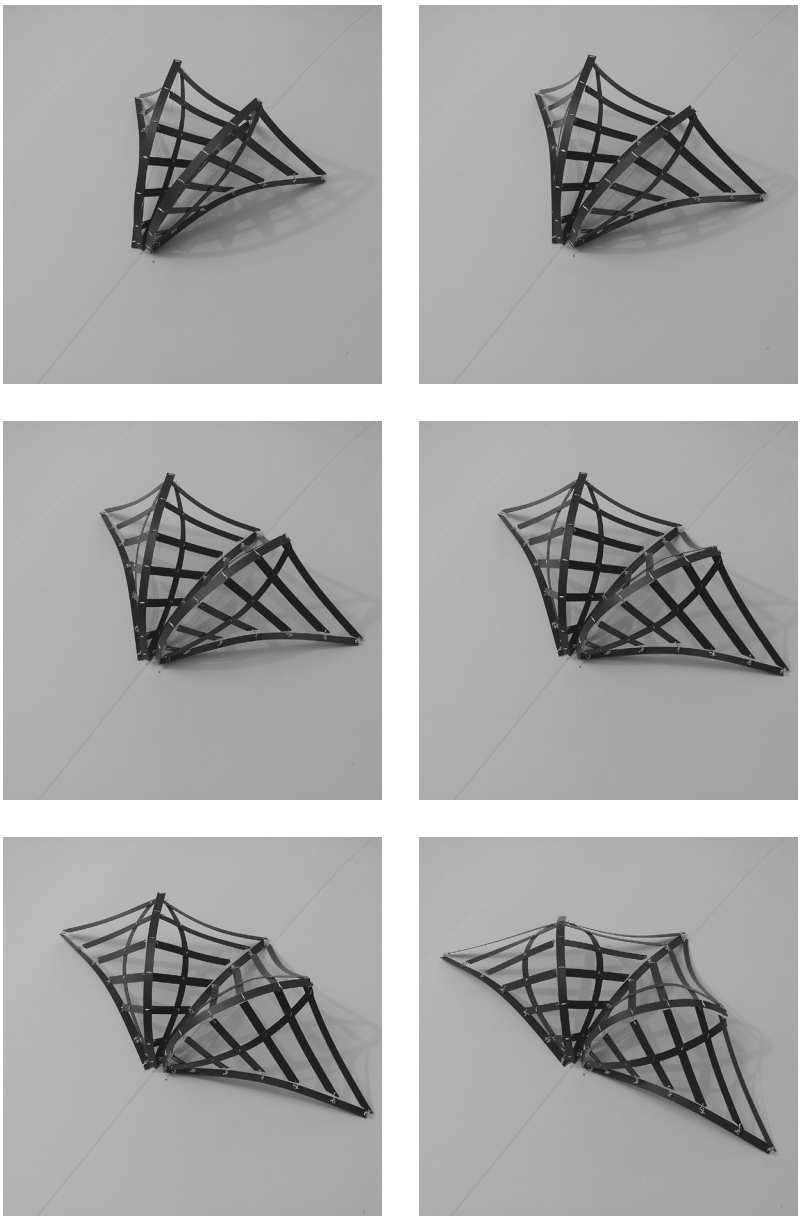
Beispiel für M1(G7)



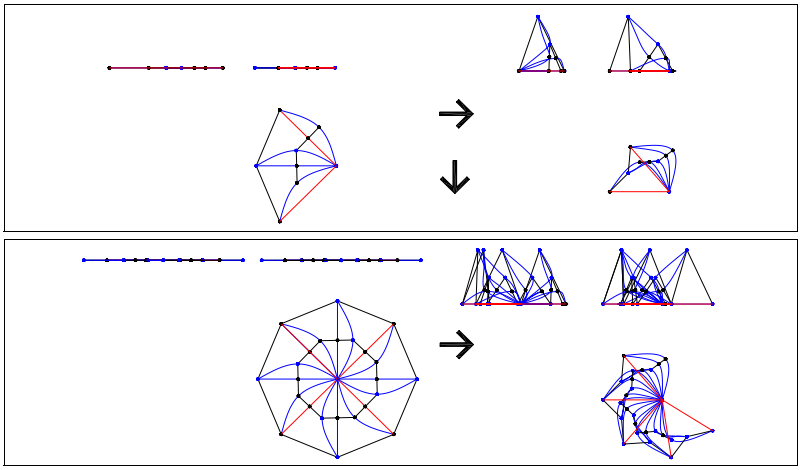
Beispiel für A2(M1(G7))



In diesem Beispiel für M1(G7)) wird die Verbundkurve zwischen zwei Flächen nach außen gekrümmt (umgekehrt zu G7). Die Kanten der Flächen bestehen ebenfalls aus einer Kurve und einer Geraden.
Die polare Anordnung dieses Musters macht eine zirkuläre Bewegungsrichtung möglich.
Die verformbaren Flächen bestehen hier aus linearen Elementen.



4.3.15 Beispiel für A2(M2(G8))



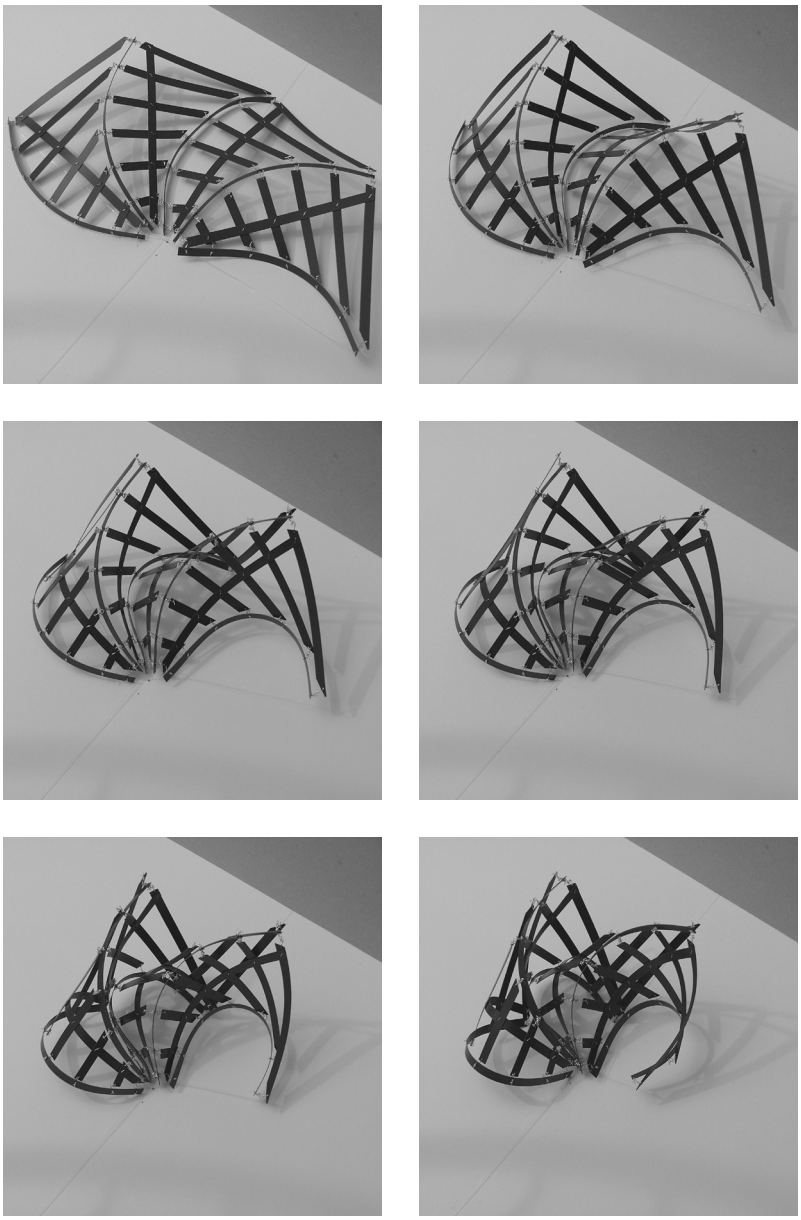
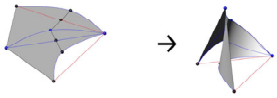
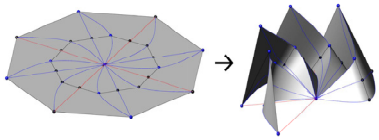


Abb. 4-18 Beispiel für A2(M2(G8))



Beispiel für M2(G8)

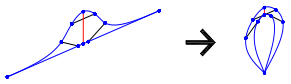


Beispiel für A2(M2(G8))

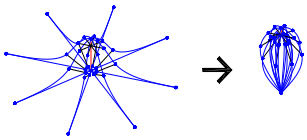
Hier wird ein weiteres Beispiel für eine Verformung in zirkulärer Bewegungsrichtung dargestellt. Das manipulierte Grundmuster 8 hat zwei kurvige Kanten, die der Kurve in der Mitte der Fläche ähneln und in einem Endpunkt mit gleicher Richtung miteinander verbunden werden. In diesem Beispiel stehen zwei rote Linien zwischen den beiden Endpunkten der Randkurven. Die mittlere rote Linie wird subtrahiert. Die polare Anordnung dieses manipulierten Musters zeigt eine andere Form einer Verformung in zirkulärer Bewegungs-richtung.
Durch die Verkürzung der roten Linien wird im letzten Beispiel der gesamte Körper geöffnet. Hier ist der Effekt allerdings umgekehrt, so dass die Verkürzung der roten Linien zur Schließung des Gesamtkörpers führt. Verformbare Flächen bestehen auch hier aus linearen Elementen.

4.3.16 Beispiel für A2(M2(G3))

Abb. 4-19 Beispiel für A2(M2(G3))

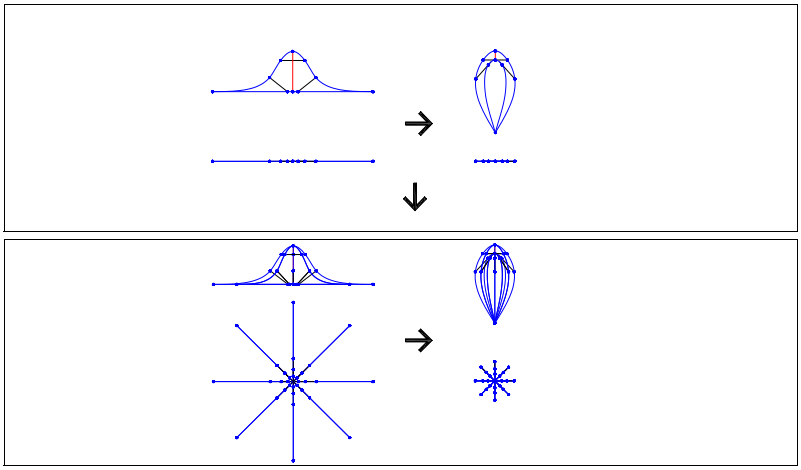


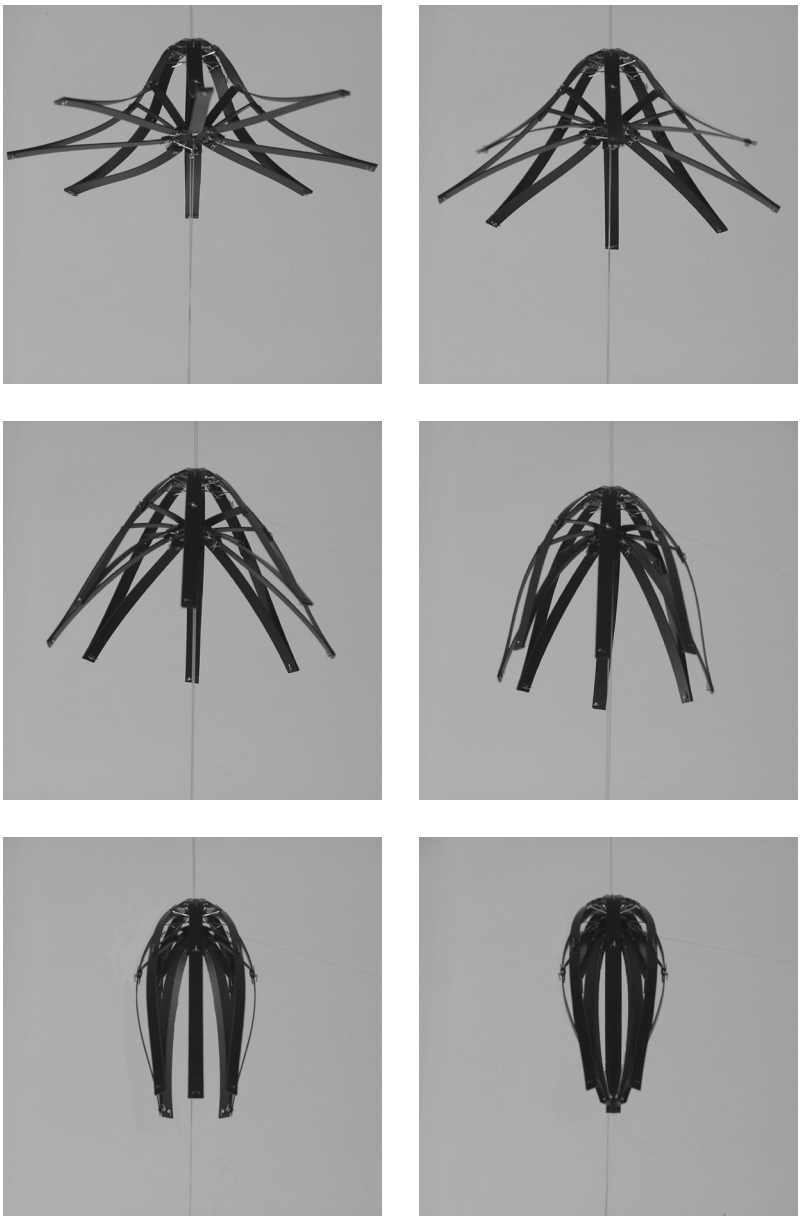
Beispiel für M2(G3)



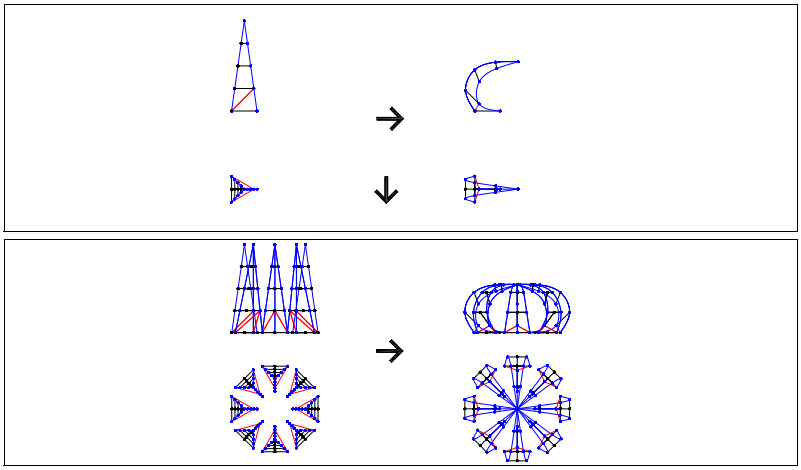
Beispiel für A2(M2(G3))

Die polare Anordnung eines Beispiels für A2(M2(G3)) zeigt eine weitere Möglichkeit für eine zentrale Bewegungsrichtung einer biegsamen Konstruktion.





4.3.17 Beispiel für A2(M2(G4))



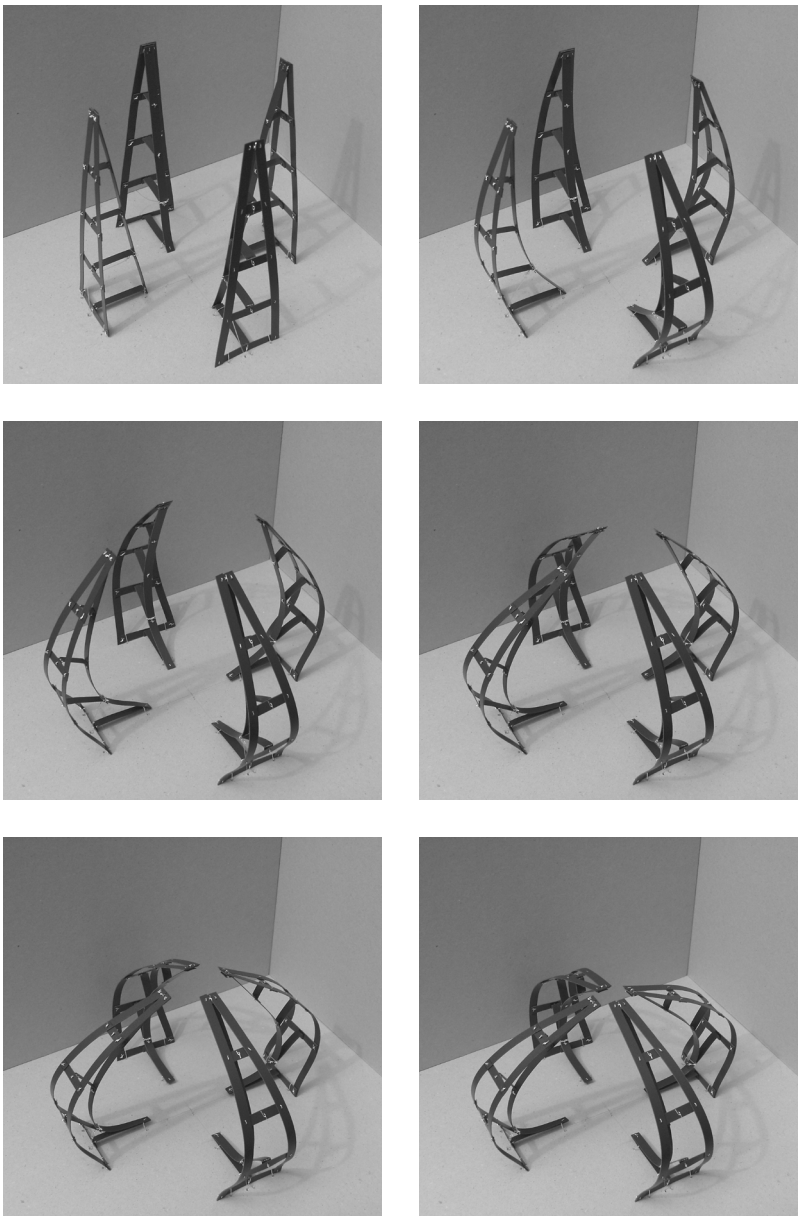
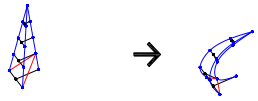
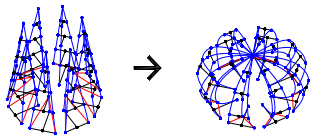


Abb. 4-20 Beispiel für A2(M2(G4))



Beispiel für M2(G4)

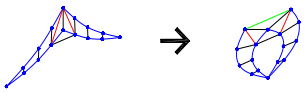


Beispiel für A2(M2(G4))

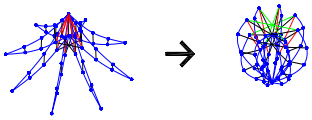
In diesem Beispiel wird ein manipuliertes Grundmusters 4 polar angeordnet. Dadurch lässt sich der Gesamtkörper mit einer peripheren Bewegungsrichtung deformieren.

4.3.18 Beispiel für A2(K1(M1(G4)))

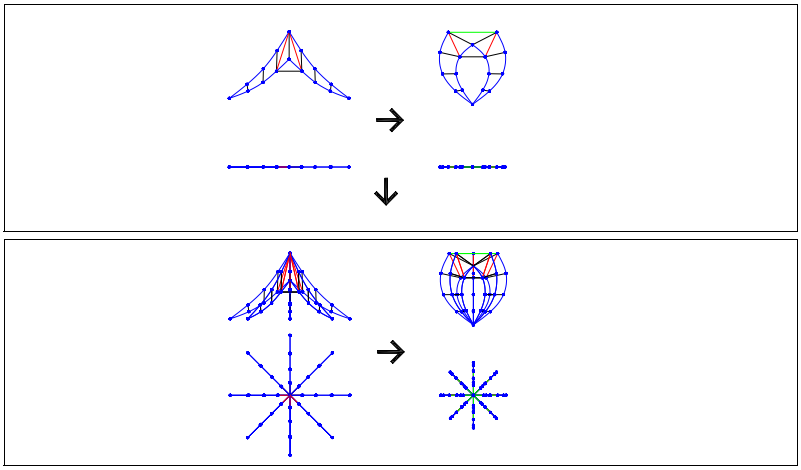
Abb. 4-21 Beispiel für A2(K1(M1(G4)))



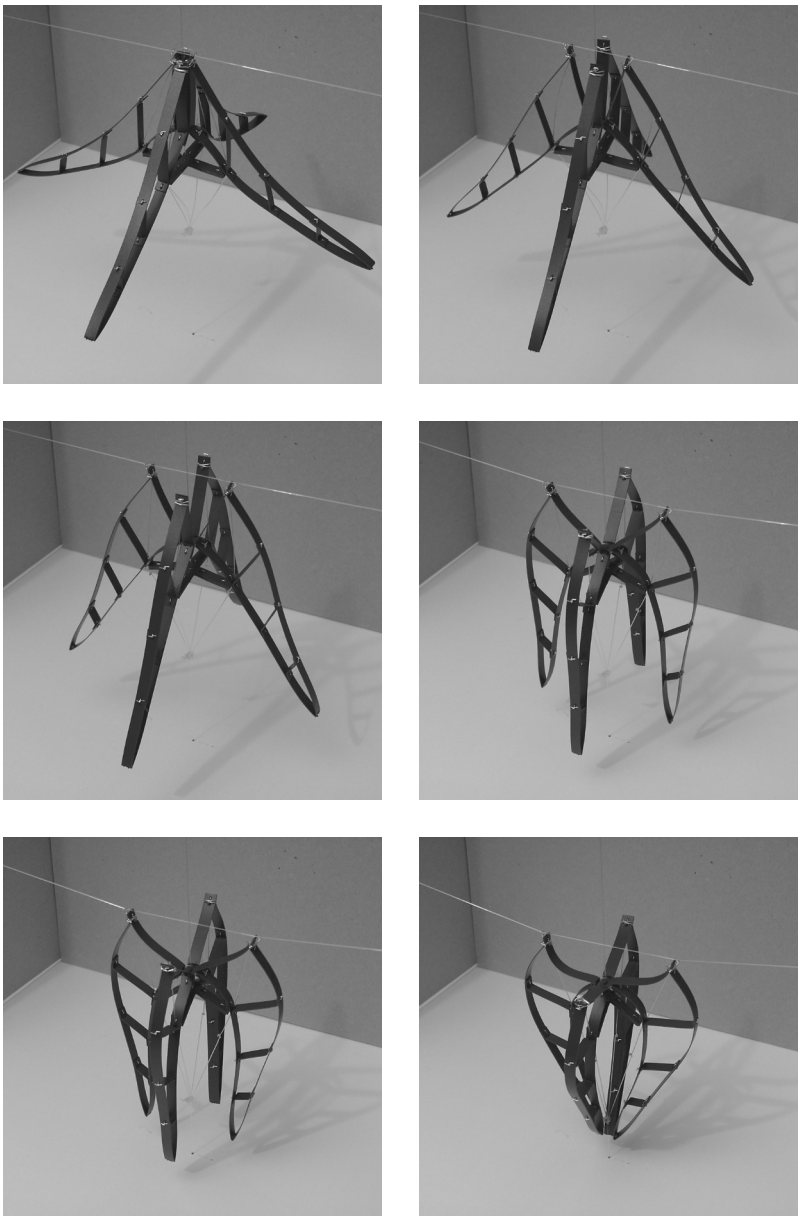
Beispiel für K1(M1(G4))



Beispiel für A2(K1(M1(G4)))



Ein anderes Beispiel für eine zentrale Bewegungsrichtung einer biegsamen Konstruktion, die durch polare Anordnung eines kombinierten Musters erstellt wird.

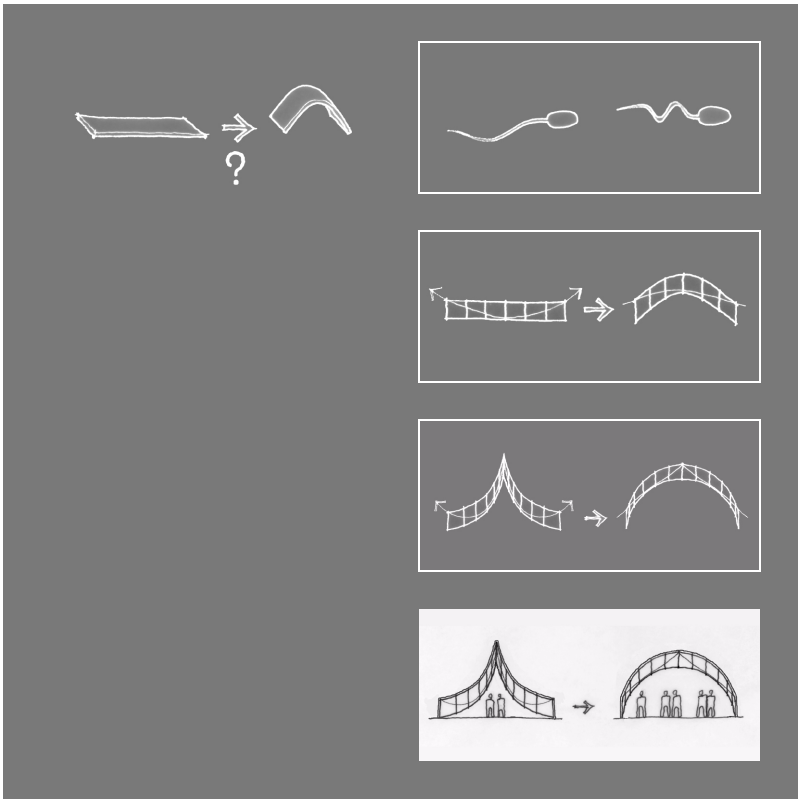


4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde über eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten von Verformungen berichtet, die aus acht natürlichen Prinzipien hergeleitet wurden. Auf der Basis unserer Methode lassen sich insgesamt 1012 unterschiedliche Kategorien (16 manipulierte Muster + 316 kombinierte Muster + 680 Anordnungen) definieren. Hierbei muss man beachten, dass jede Kategorie nur jeweils eine Variante für einen Entwurf zeigt. Für manche Kategorien lassen sich leicht viele verschiedene Beispiele definieren. Es ist jedoch auch möglich, dass man für eine Kategorie überhaupt kein sinnvolles Beispiel findet.

Unsere Methode zeigt viele Möglichkeiten, die Grundmuster durch Manipulation, Kombination und gemeinsame Anordnung weiterzuentwickeln. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass diese Kategorien noch immer nicht alle mögliche Verformungen umfassen können. Sie können beliebig erweitert oder anders definiert werden. Z.B. könnten die Ergebnisse nach der Anordnung erneut und in neuer Weise angeordnet, kombiniert oder manipuliert werden.

5 Anwendungsbeispiele



In diesem Kapitel werden eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für auf natürlichen Prinzipien basierende biegsame Konstruktionen vorgestellt.

Diese Art von Konstruktionen bietet innere, äußere und mobile Wandelbarkeit in der Architektur. Man muss sich allerdings bewusst sein, dass diese elastischen Konstruktionen für manche Anwendungen, z.B. für große Dächer oder die Bauteile, die starke Belastungen aushalten müssen, kaum vorstellbar sind.

Die Beispiele zeigen, dass biegsame Konstruktionen am besten für mobile Architektur wie temporäre Ausstellungen oder Notunterkünfte für die Opfer von Naturkatastrophen geeignet sind.

Die Anwendungszwecke der unten angeführten Beispiele

für biegsame Konstruktionen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- **Gruppe 1:**

  Erstellung unterschiedlicher Varianten einer Konstruktion aus gleichen Elementen mit gleicher Größe. Dadurch lassen sich viele verschiedene Räume mit teilweise sehr unterschiedlichem Charakter kreieren.

- **Gruppe 2:**

  Erstellung von Konstruktionen, die sich öffnen oder schließen können und im geschlossenen Zustand sehr platzsparend zu transportieren sind. Diese Gruppe bietet besonders viele Möglichkeiten für mobile Architektur.

- **Gruppe 3:**

  Erstellung von Konstruktionen, deren Form auf bestimmte Art und Weise veränderbar ist. Es ist z.B. ein Raum vorstellbar, in welchem ein Bauteil variabel ist. Diese Gruppe von Konstruktionen bietet vielseitige Möglichkeiten zur Anpassung an Änderungen der Umgebung, z.B in der Lichtsituation oder der Akustik oder auch zur Veränderung des Raumcharakters.

In den meisten der vorgeschlagenen Anwendungen werden biegsame Konstruktionen in Kombination mit weichen Flächen wie Membranen o.ä. vorgestellt.

Die Verformung der Konstruktionen wird in den meisten Fällen durch das Ziehen eines oder mehrerer Seile gesteuert. Es gibt kaum Beispiele, auf die aufgrund von Anwendungsbeschränkungen zum Zwecke der Verformung Druck ausgeübt werden muss. Ein Pfeil (mit dreieckiger Spitze) in den Abbildungen gibt jeweils die Bewegungsrichtung eines Seiles an, das im Endpunkt eines Bauteils befestigt wird.

Die Reihenfolge der Beispiele entspricht der Reihenfolge der Prinzipien, die in diesen Beispielen die Hauptrolle spielen.

Für jedes Beispiel werden folgende Eigenschaften bestimmt.

A. Kategorie der Formentwicklung (nach der Methode des vorigen Kapitels)
B. Anwendungsgebiete (innere, äußere oder mobile Wandelbarkeit)
C. Anwendungszwecke (Gruppe 1, 2 oder 3)

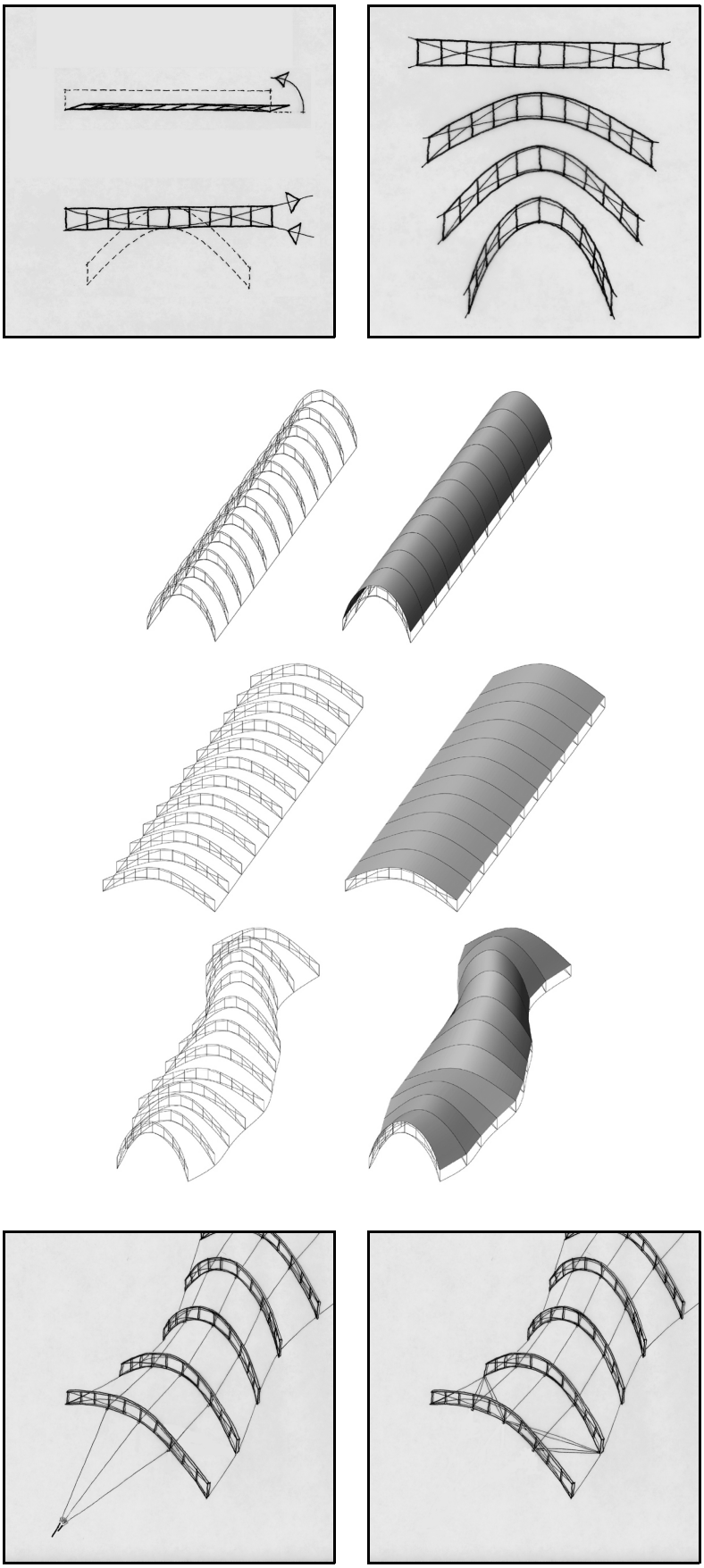
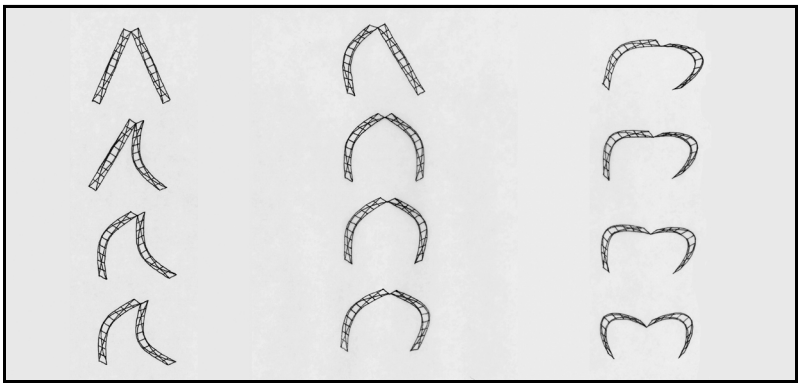


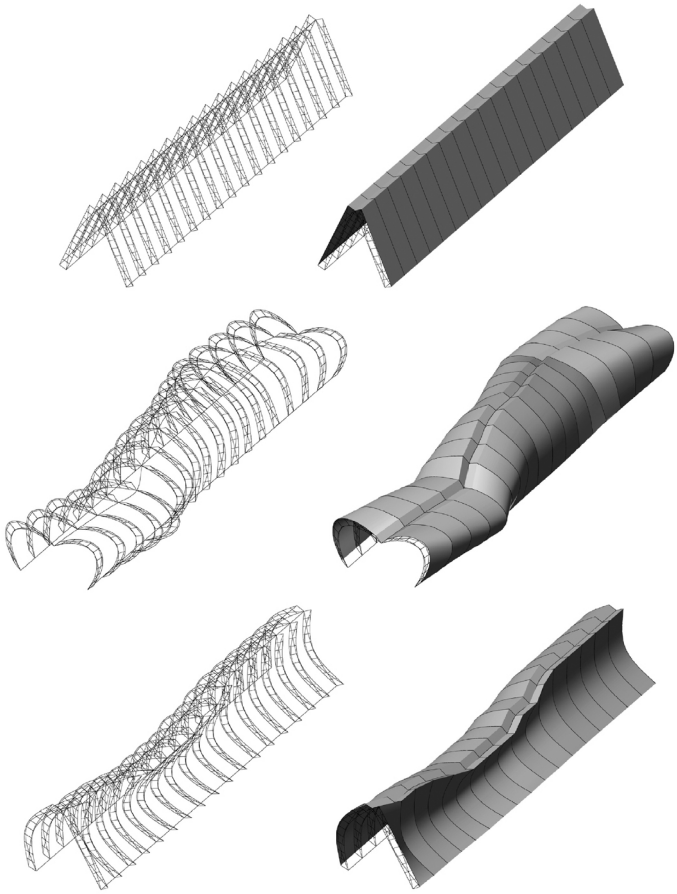
Abb. 5-1 Beispiel 1

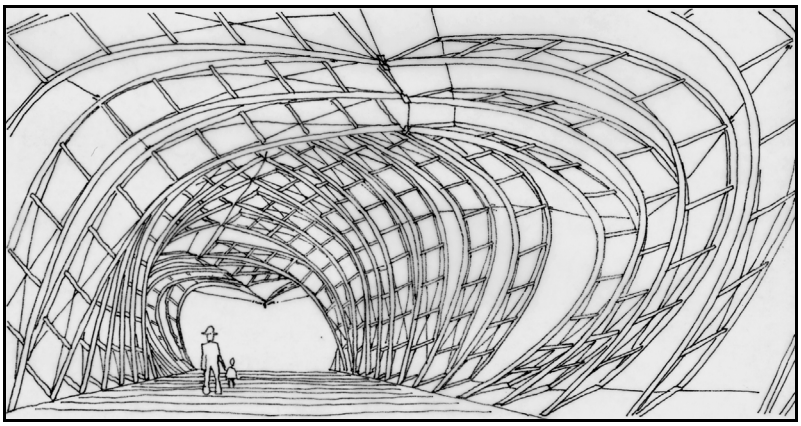
A. A1(G1)
B. Mobile Architektur
C. Gruppen 1 & 2

Abb. 5-2 Beispiel 2

A. A1(K1(G1))
B. Mobile Architektur
C. Gruppen 1 & 2







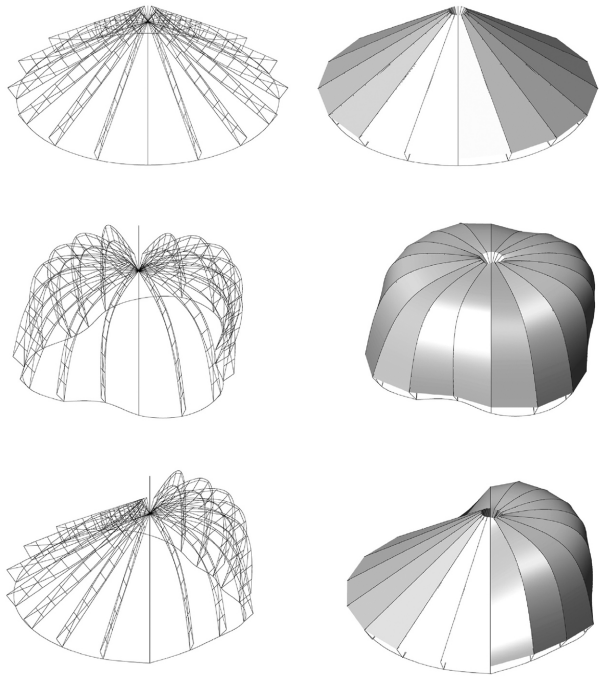


Abb. 5-3 Beispiel 3

A. A2(G1)
B. Mobile Architektur
C. Gruppen 1 & 2

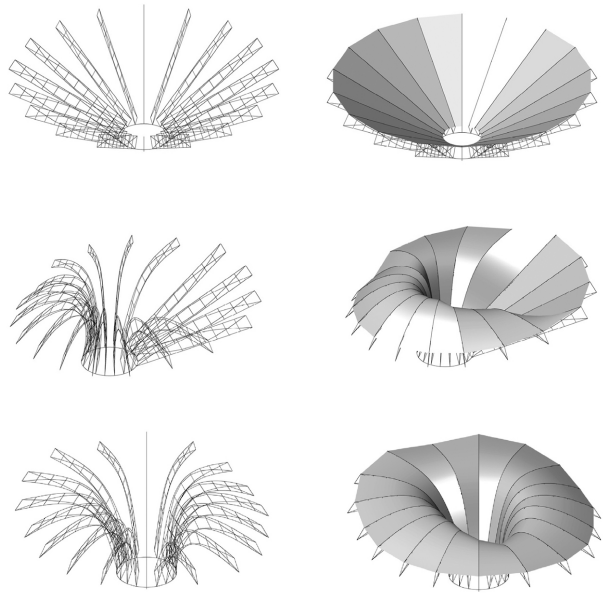
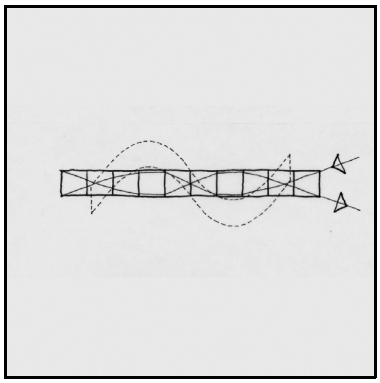
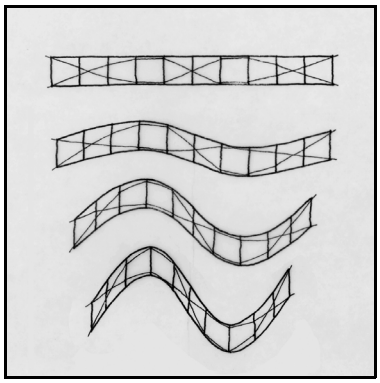
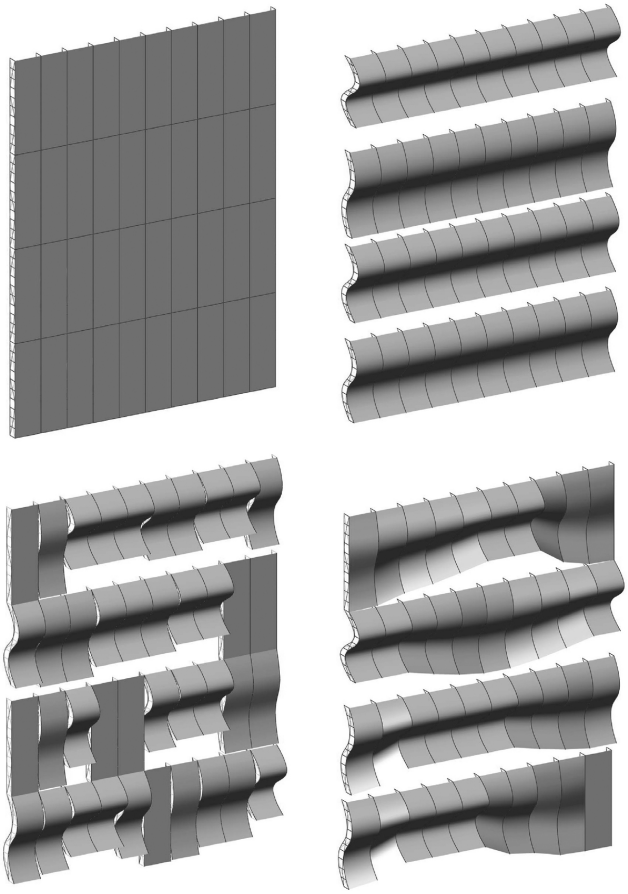


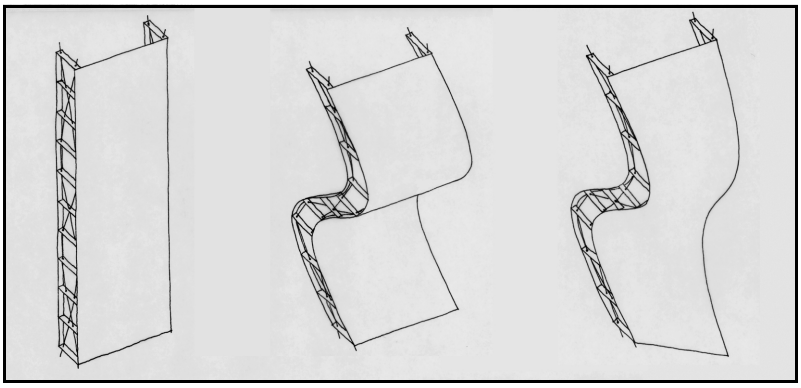
Abb. 5-4 Beispiel 4

A. A1(K1(G1))
B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)/ Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/variable Akustik)
C. Gruppe 3









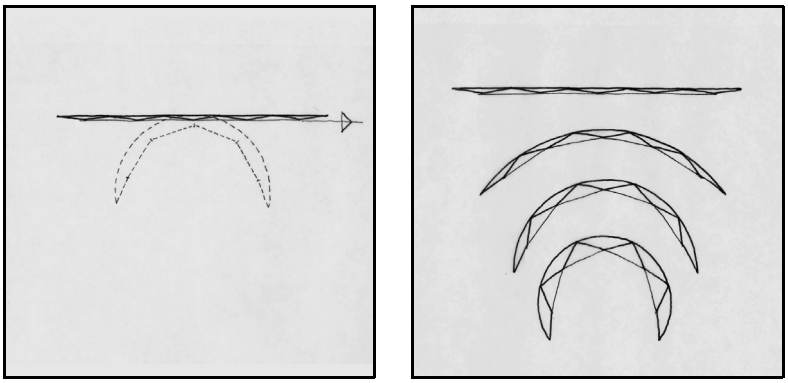
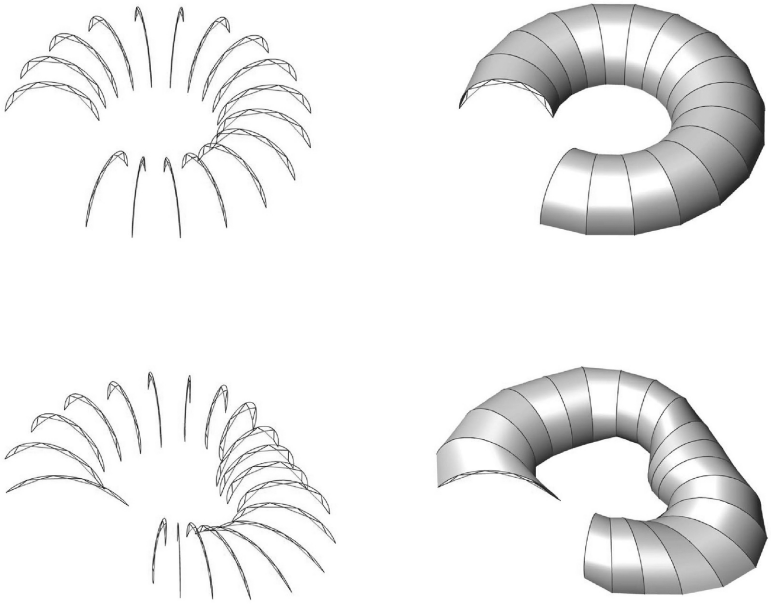


Abb. 5-5 Beispiel 5

A. A2(G2)
B. Mobile Architektur
C. Gruppen 1& 2



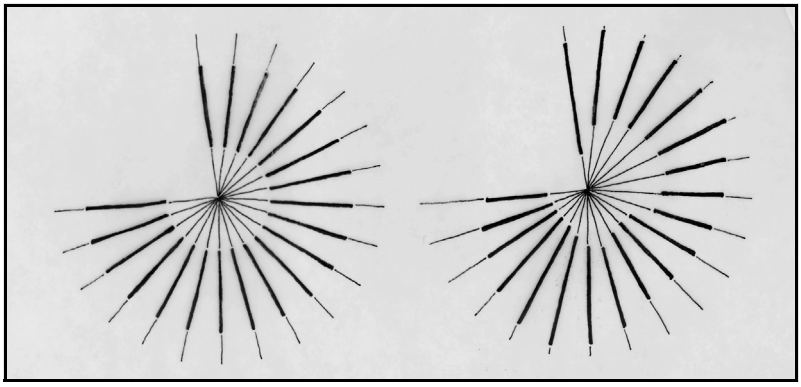
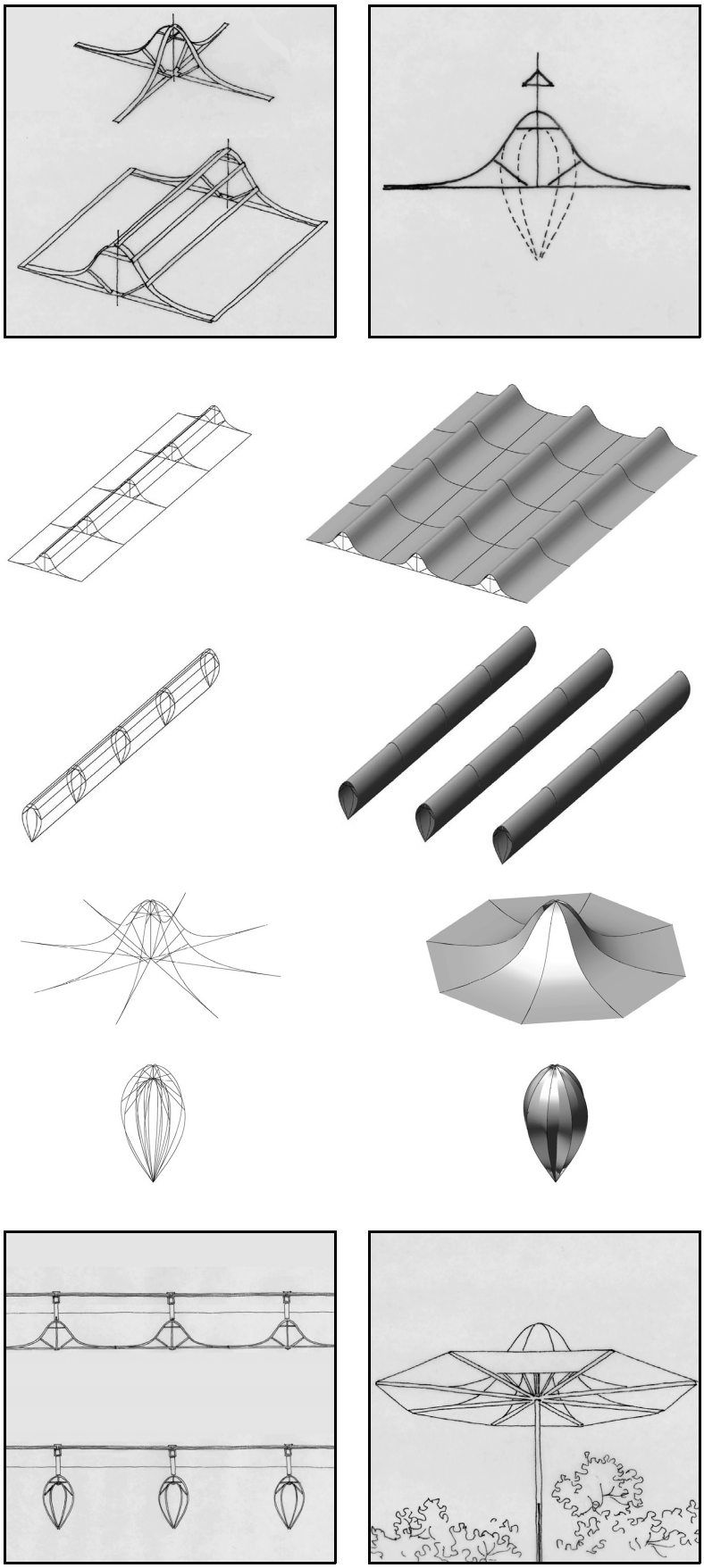


Abb. 5-6 Beispiel 6

A. A1(M2(G3))
B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)/ Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/variable Akustik)
C. Gruppe 3

A. A2(M2(G3))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2



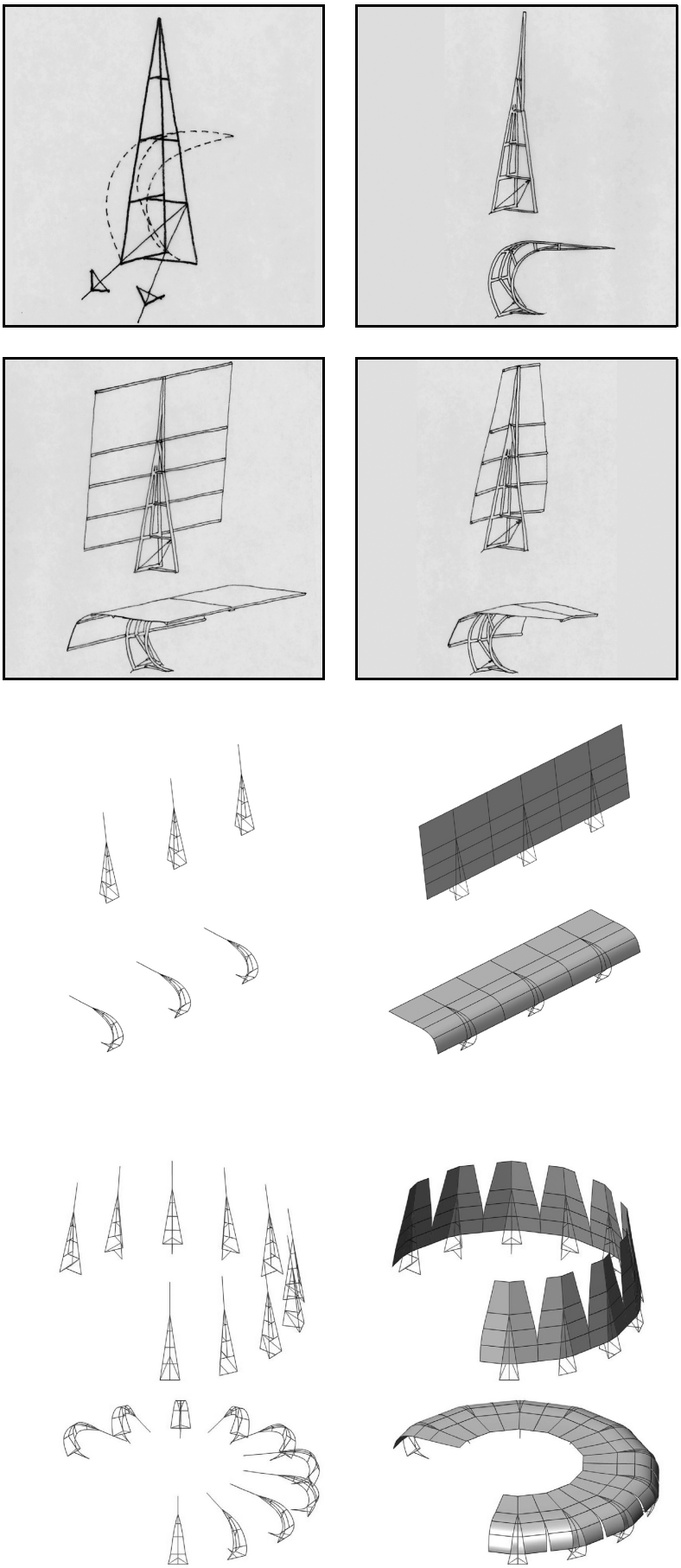
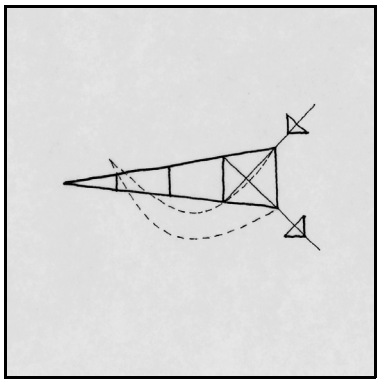


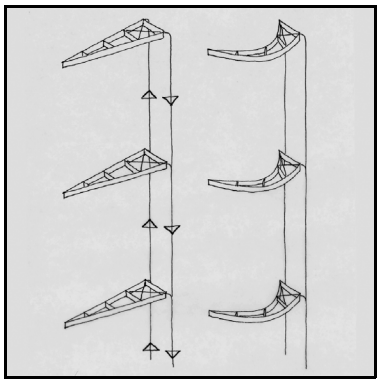
Abb. 5-7 Beispiel 7

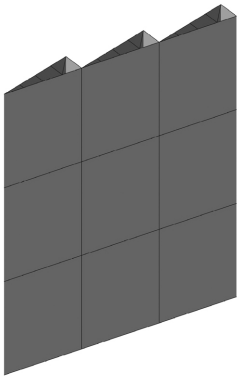
A. A1(M2(G4) & A2(M2(G4)
B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer)
C. Gruppe 3

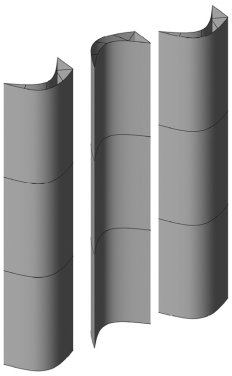
Abb. 5-8 Beispiel 8

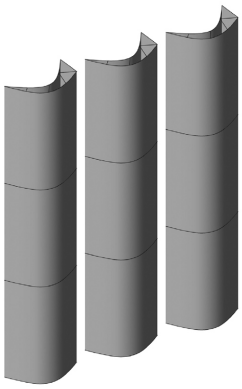
A. A1(G4)
B. Innere Wandelbarkeit (Raumeinteilung/ variable Belichtung und Beleuchtung/ variable Akustik)/ Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)
C. Gruppe 3

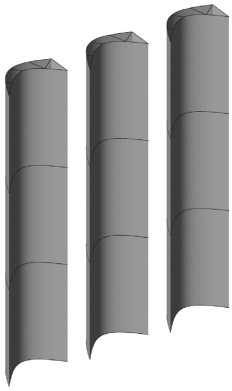


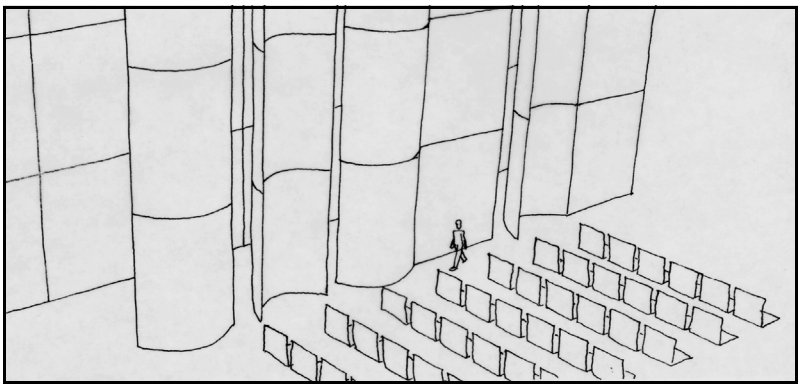


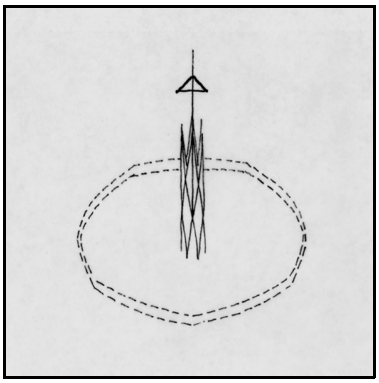












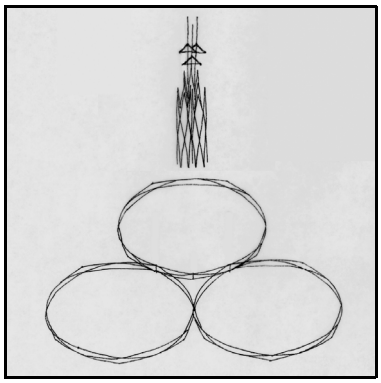
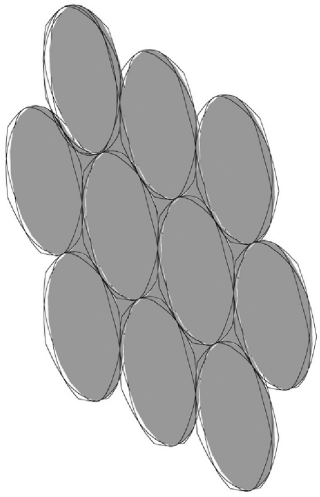


Abb. 5-9 Beispiel 9

A. A1(G5)
B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung und Beleuchtung)/ Spezielle Anwendung (Solarsegel in der Raumfahrt)
C. Gruppe 2 & 3



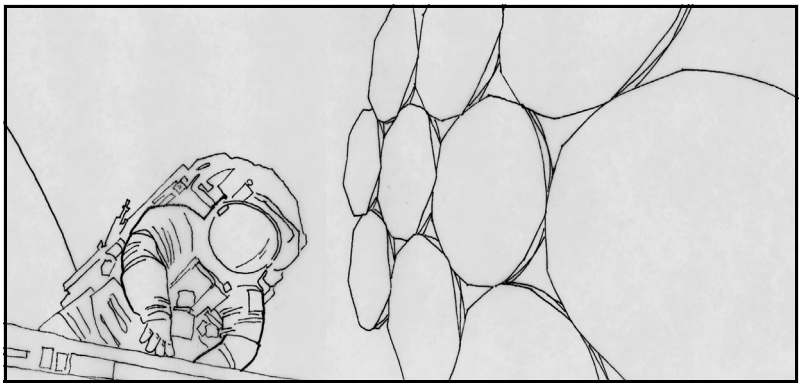
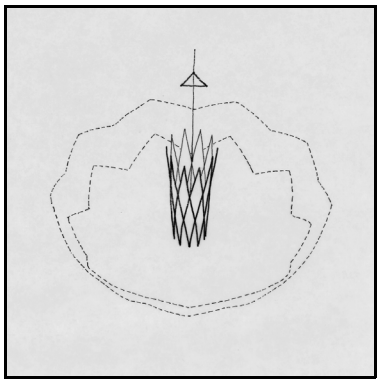
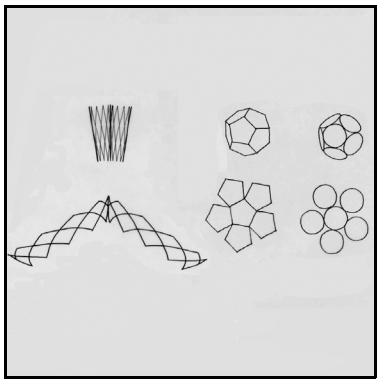
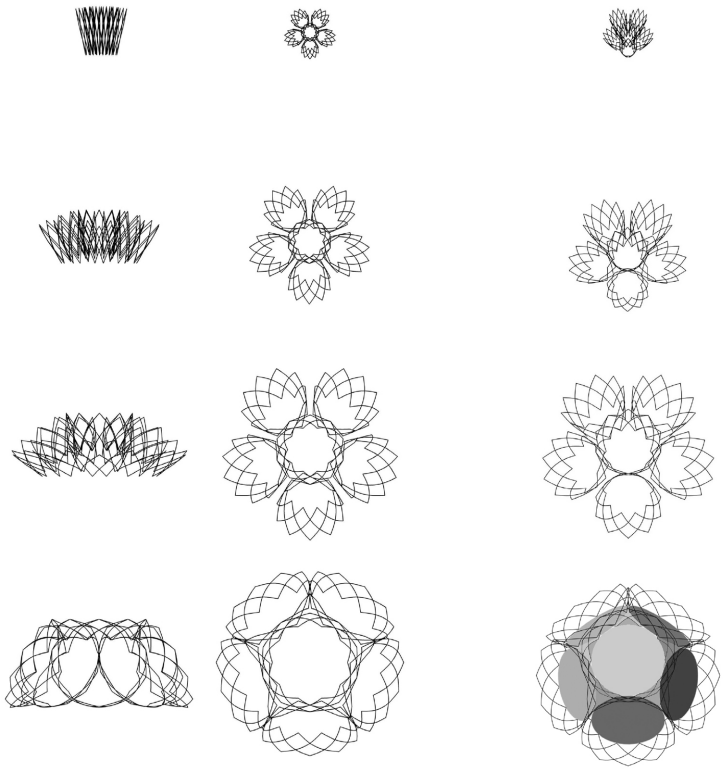


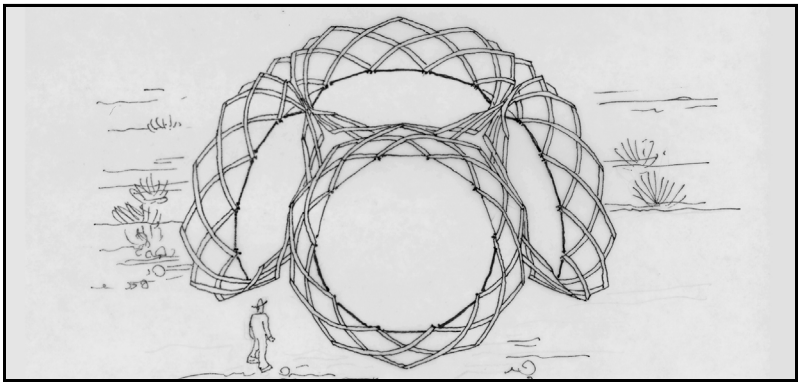
Abb. 5-10 Beispiel 10

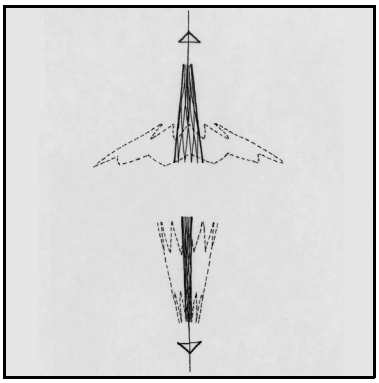
A. A2(M1(G5))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2











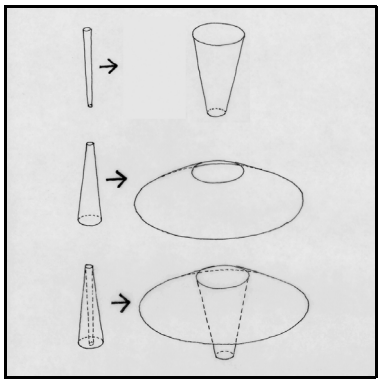
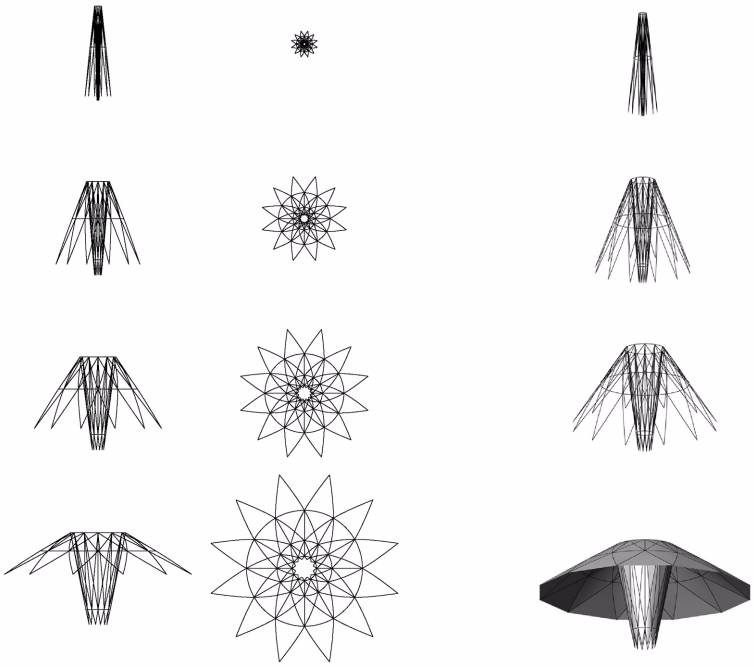


Abb. 5-11 Beispiel 11

A. K1(M1(G5))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2



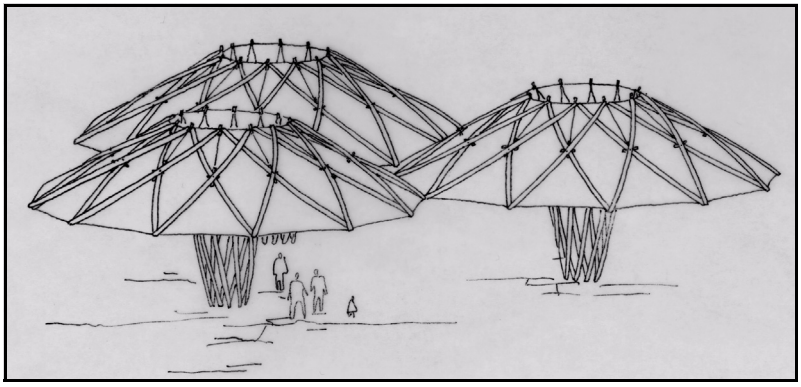
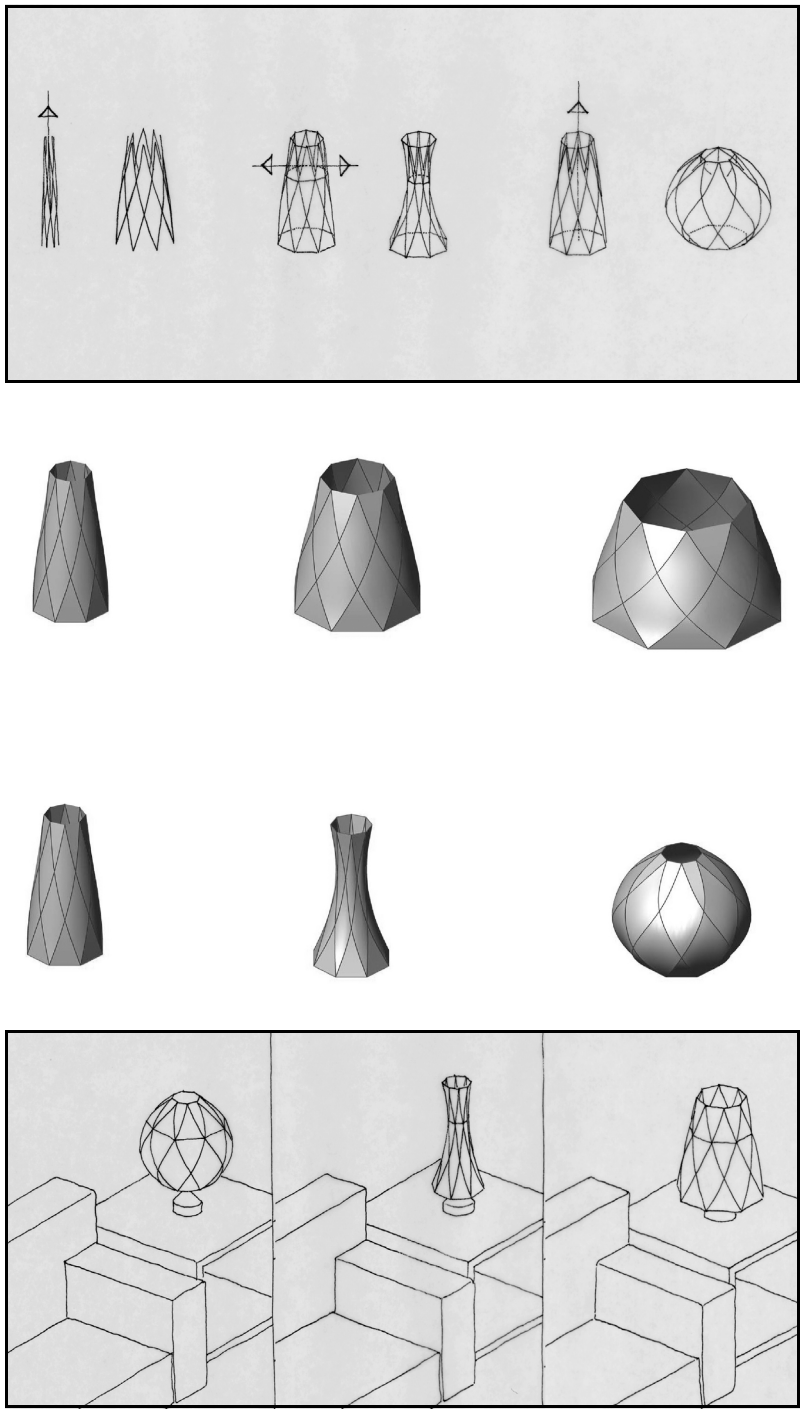


Abb. 5-12 Beispiel 12

A. M2(G5)
B. Innere Wandelbarkeit (variable Beleuchtung)
C. Gruppe 3



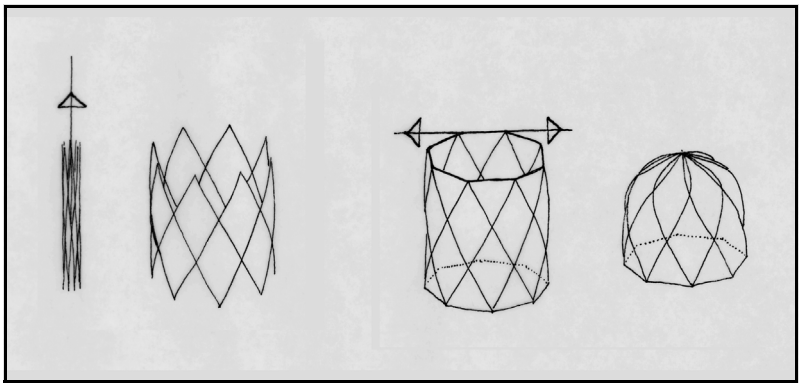


Abb. 5-13 Beispiel 13

A. M2(G5)
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 1 & 2

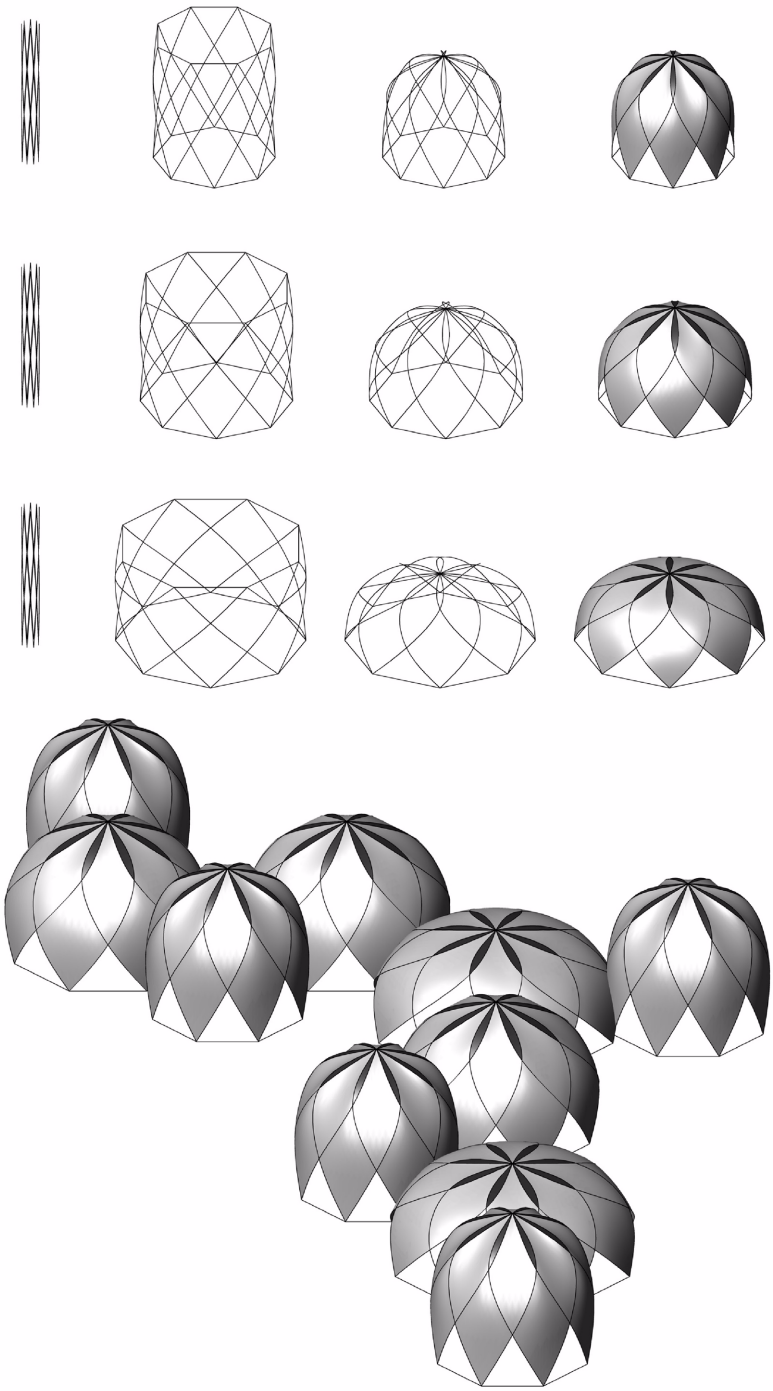
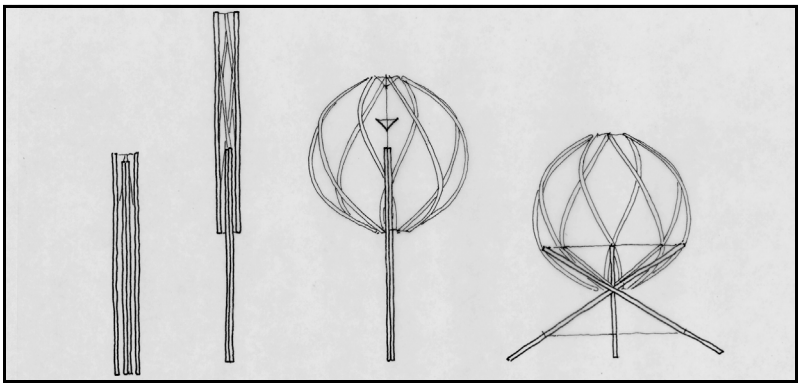
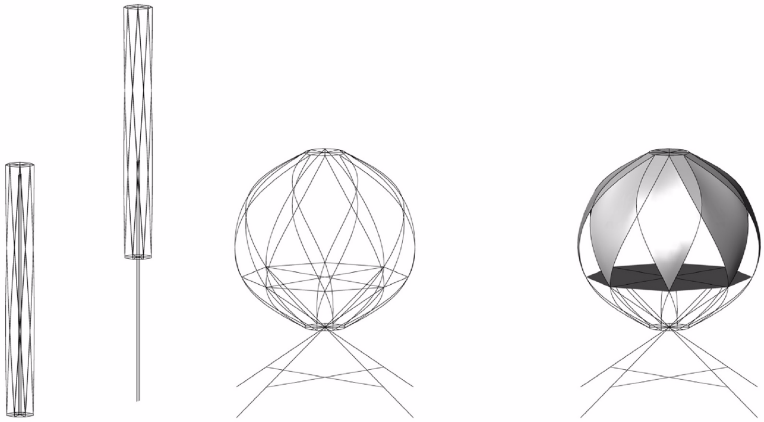
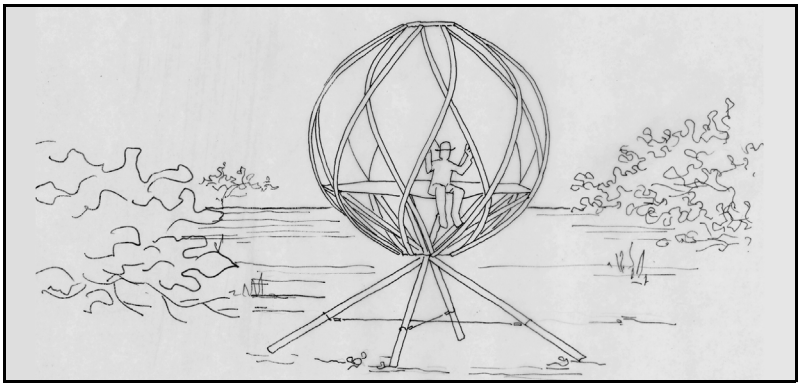


Abb. 5-14 Beispiel 14

A. M2(G5)
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2







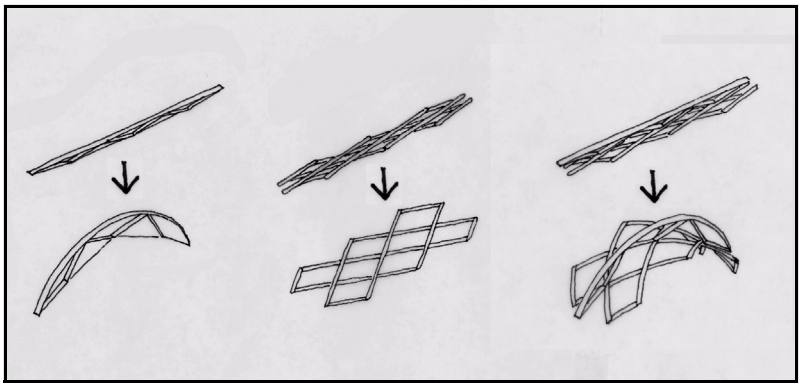
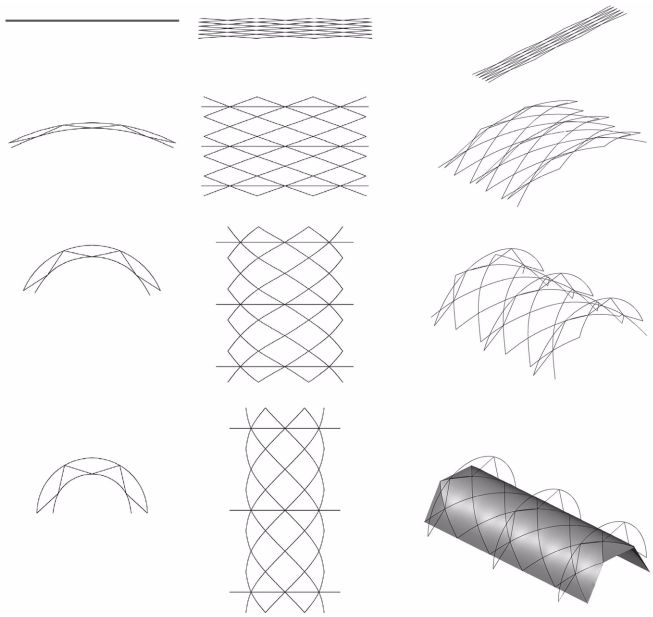


Abb. 5-15 Beispiel 15

A. A1(K2(G2, M2(G5)))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2



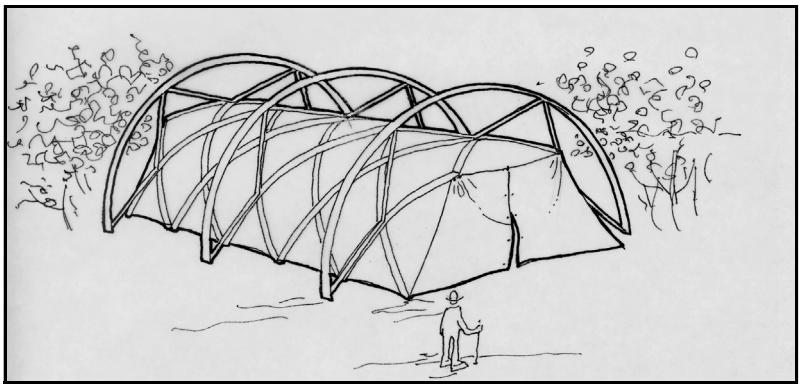
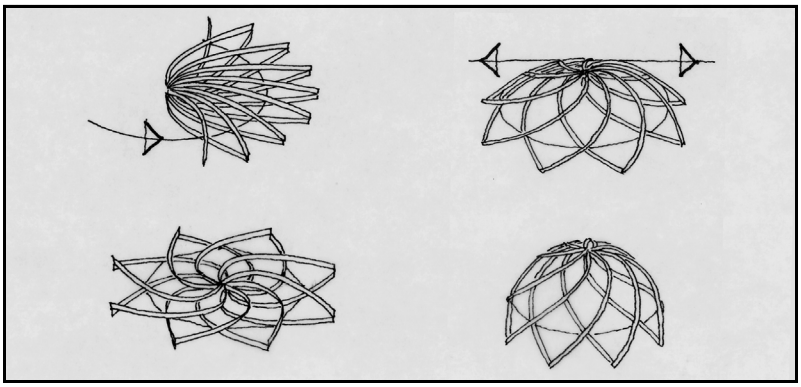
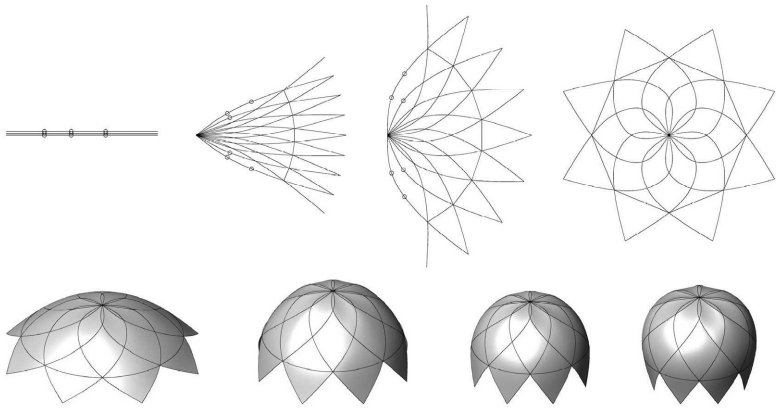
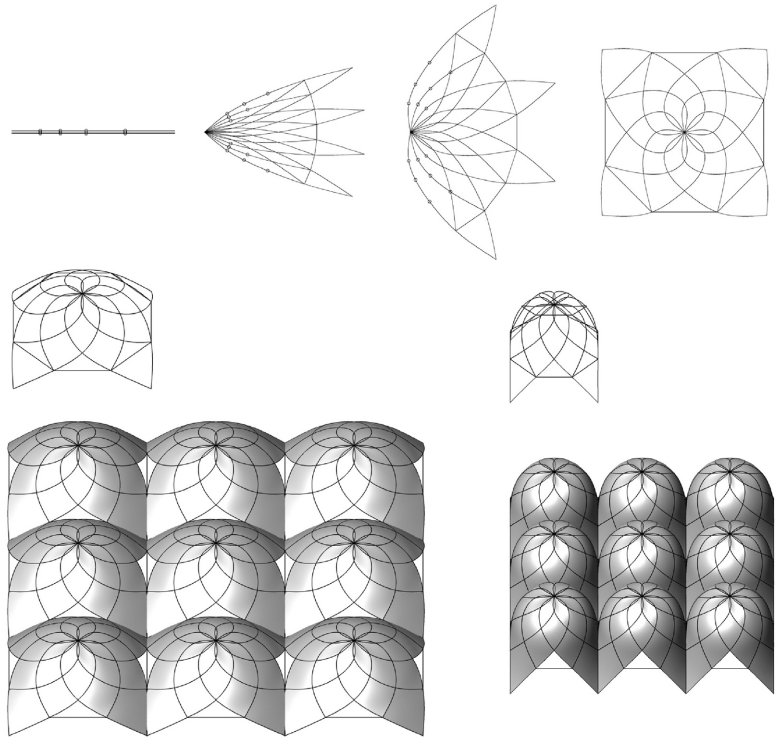


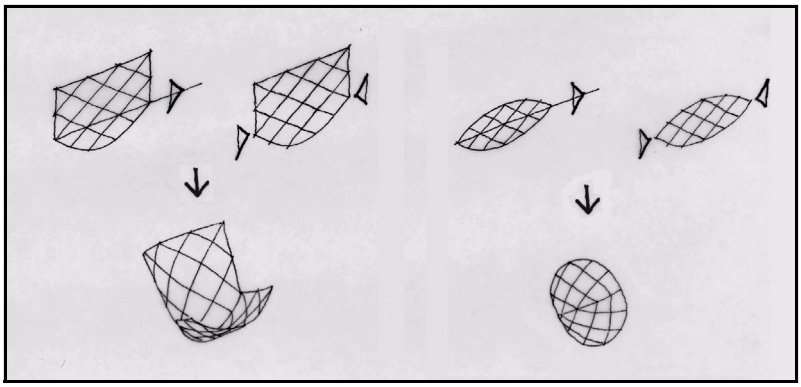
Abb. 5-16 Beispiel 16

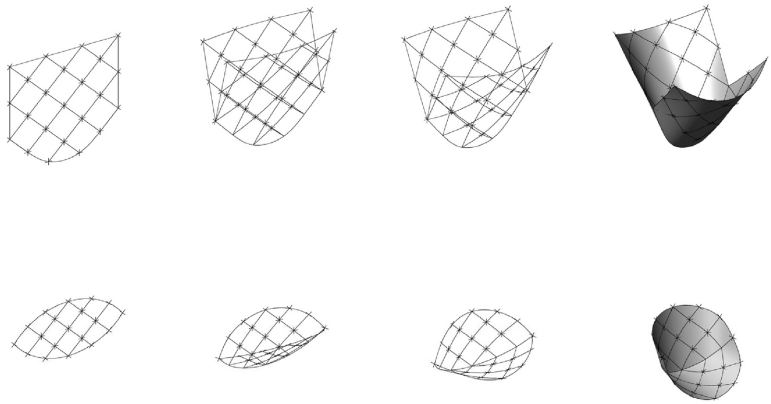
A. M2(G6) & A1(M2(G6))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 1 & 2

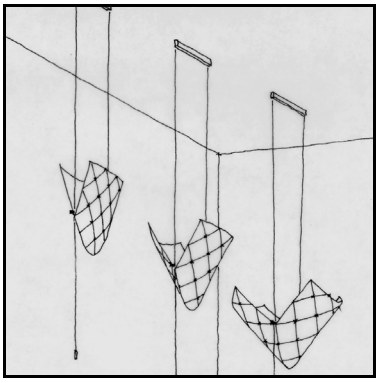












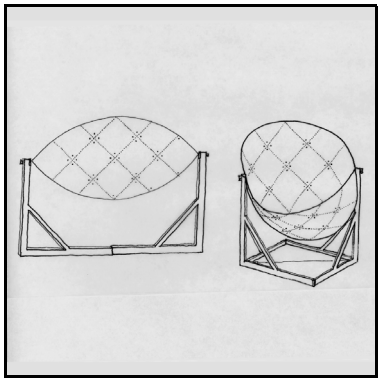
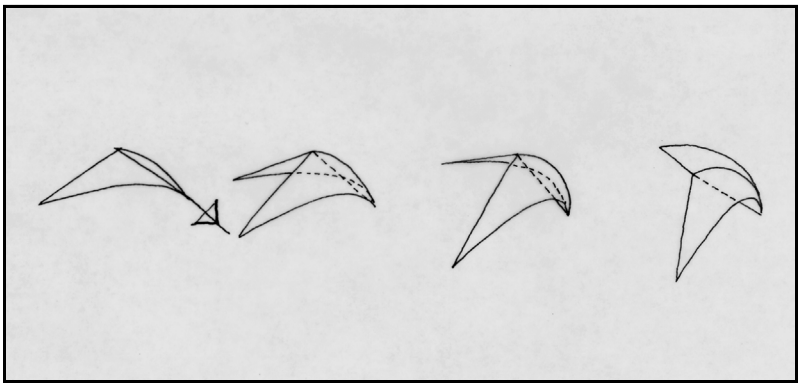


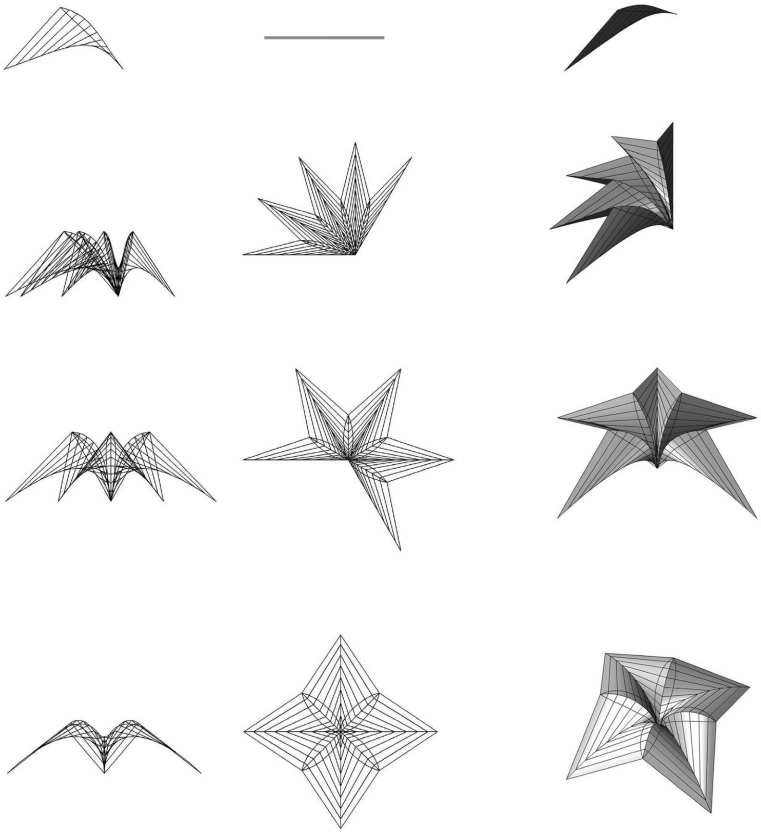
Abb. 5-17 Beispiel 17

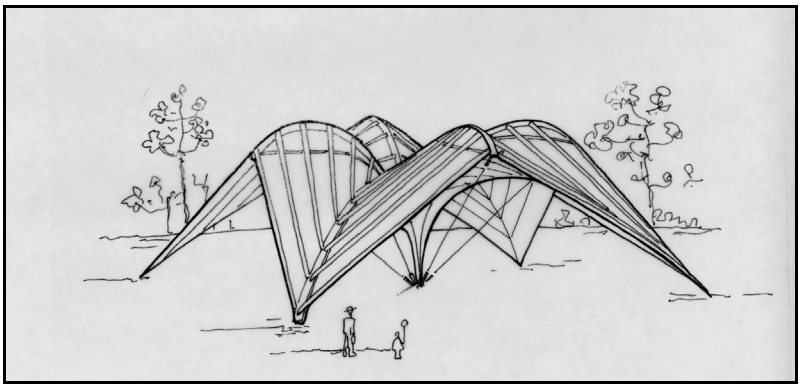
A. M1(G7)
B. Innere Wandelbarkeit (variable Beleuchtung/ Veränderung der Raumeinrichtungselemente)
C. Gruppe 2 & 3

Abb. 5-18 Beispiel 18

A. A2(M1(G7))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 2







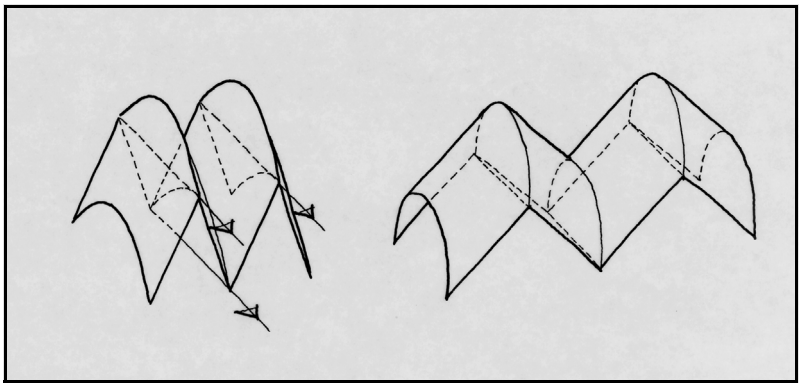
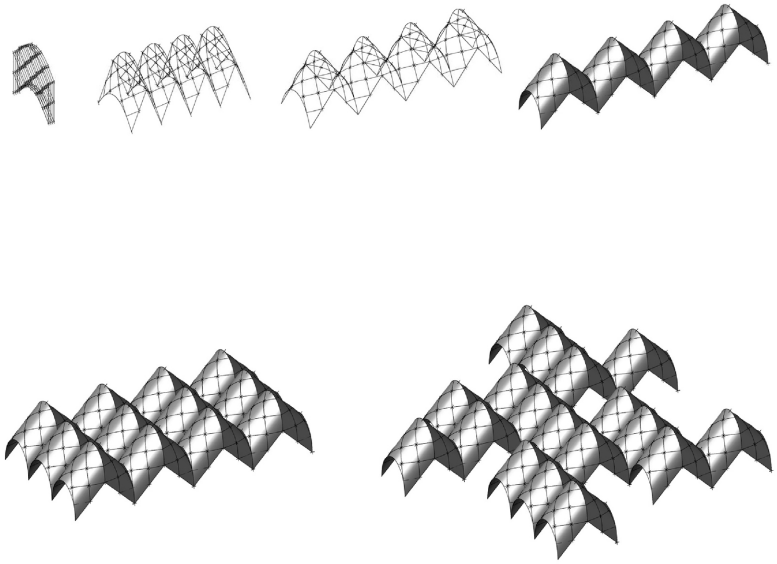


Abb. 5-19 Beispiel 19

A. A1(M1(G7))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 1 & 2



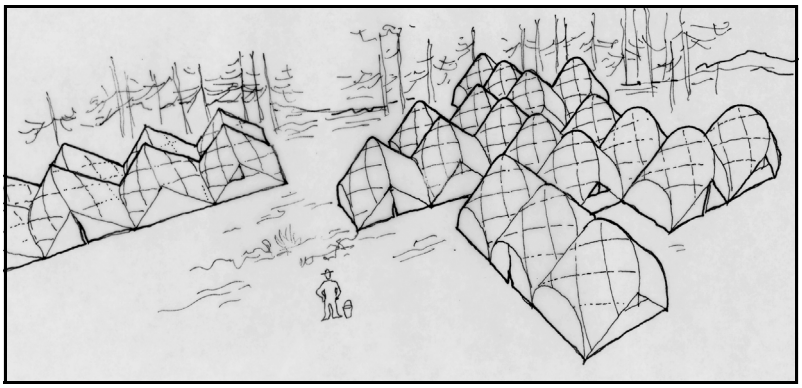
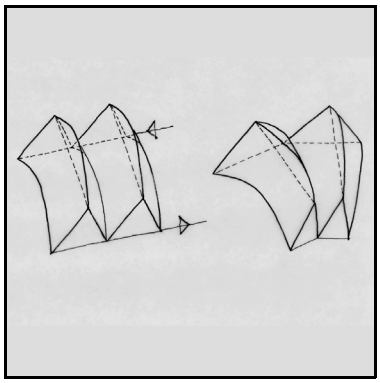
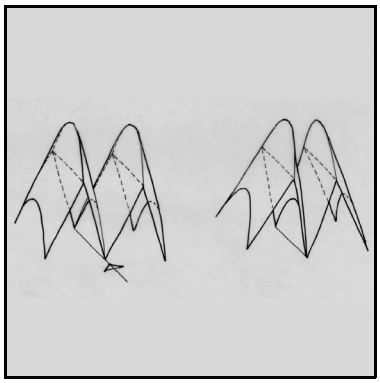
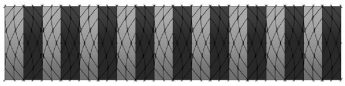


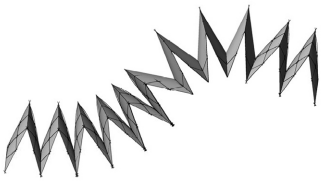
Abb. 5-20 Beispiel 20

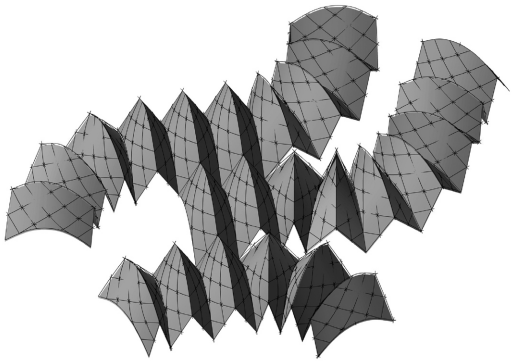
A. A1(M1(G7))
B. Mobile Architektur
C. Gruppe 1 & 2

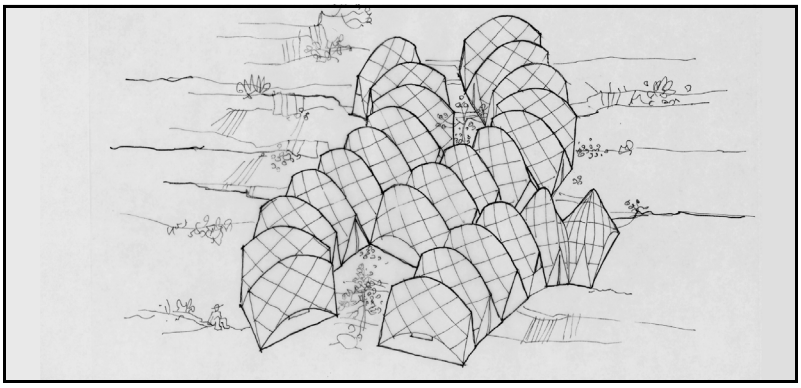


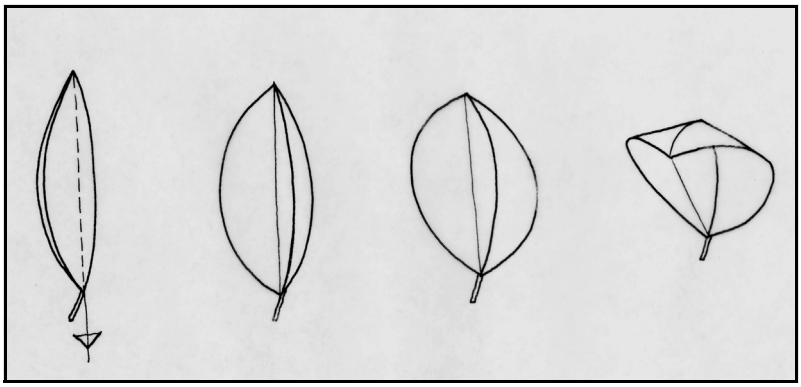


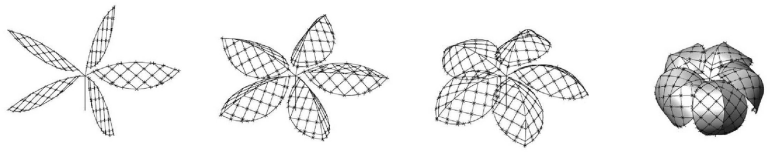


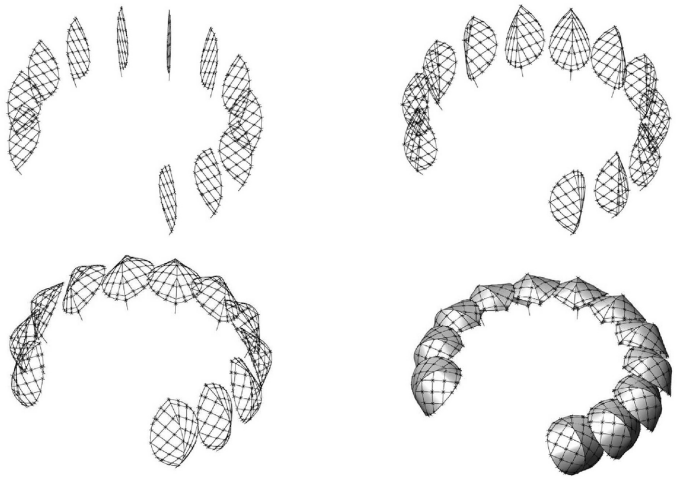


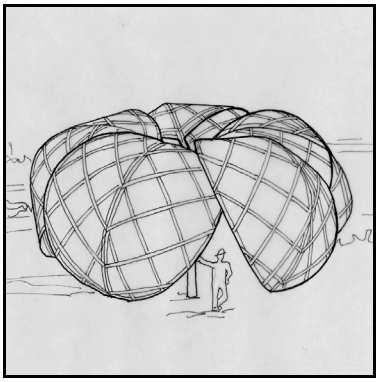












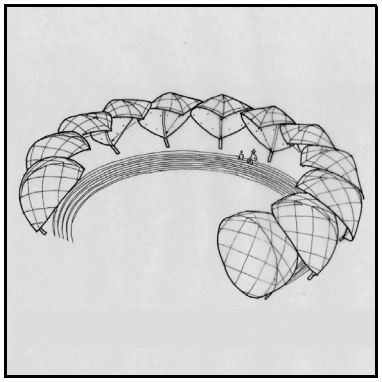
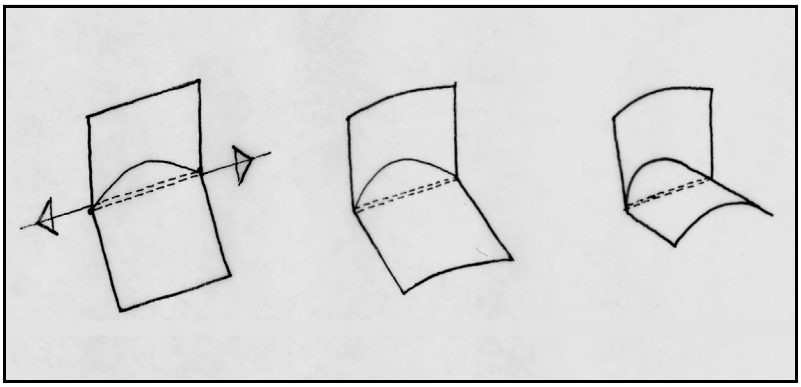


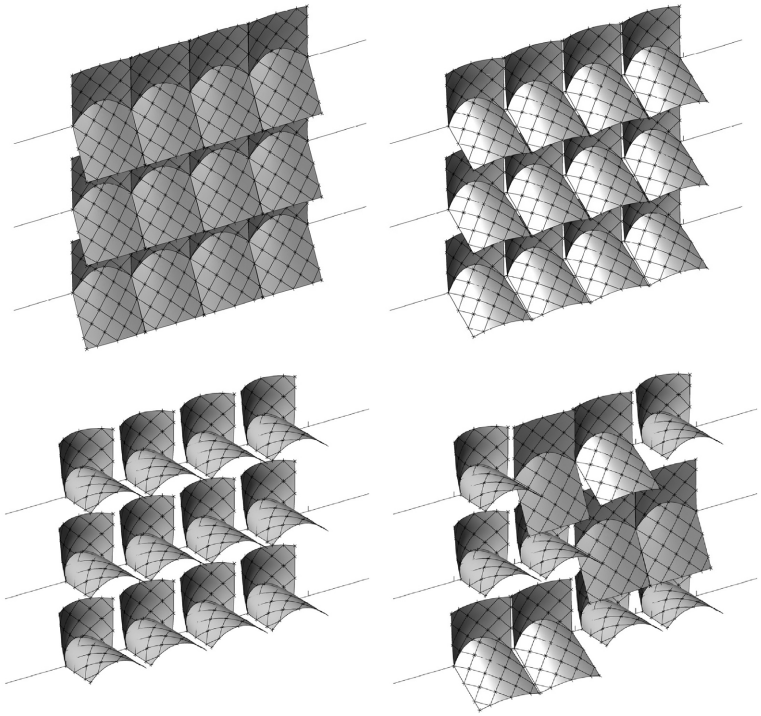
Abb. 5-21 Beispiel 21

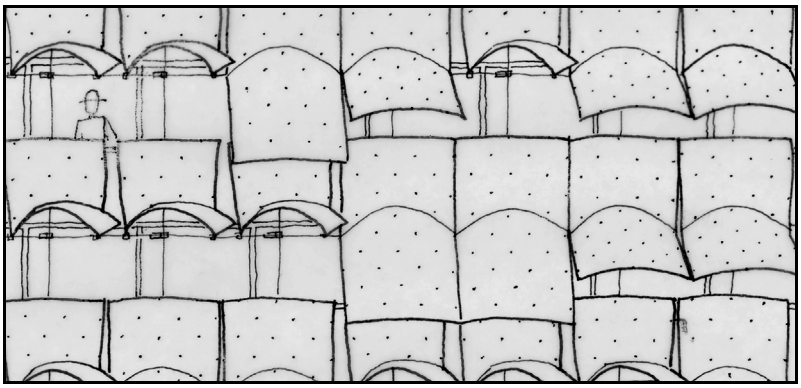
A. A2(M1(G7))
B. Mobile Architektur/ Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer)
C. Gruppe 2 & 3

Abb. 5-22 Beispiel 22

A. A1(G8)
B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung und Beleuchtung/ variable Akustik), Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)
C. Gruppe 3







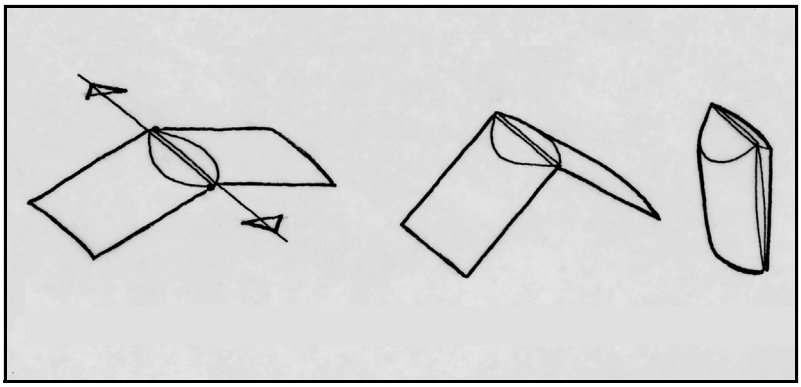


Abb. 5-23 Beispiel 23

A. A1(K1(G8))
B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer)
C. Gruppe 3

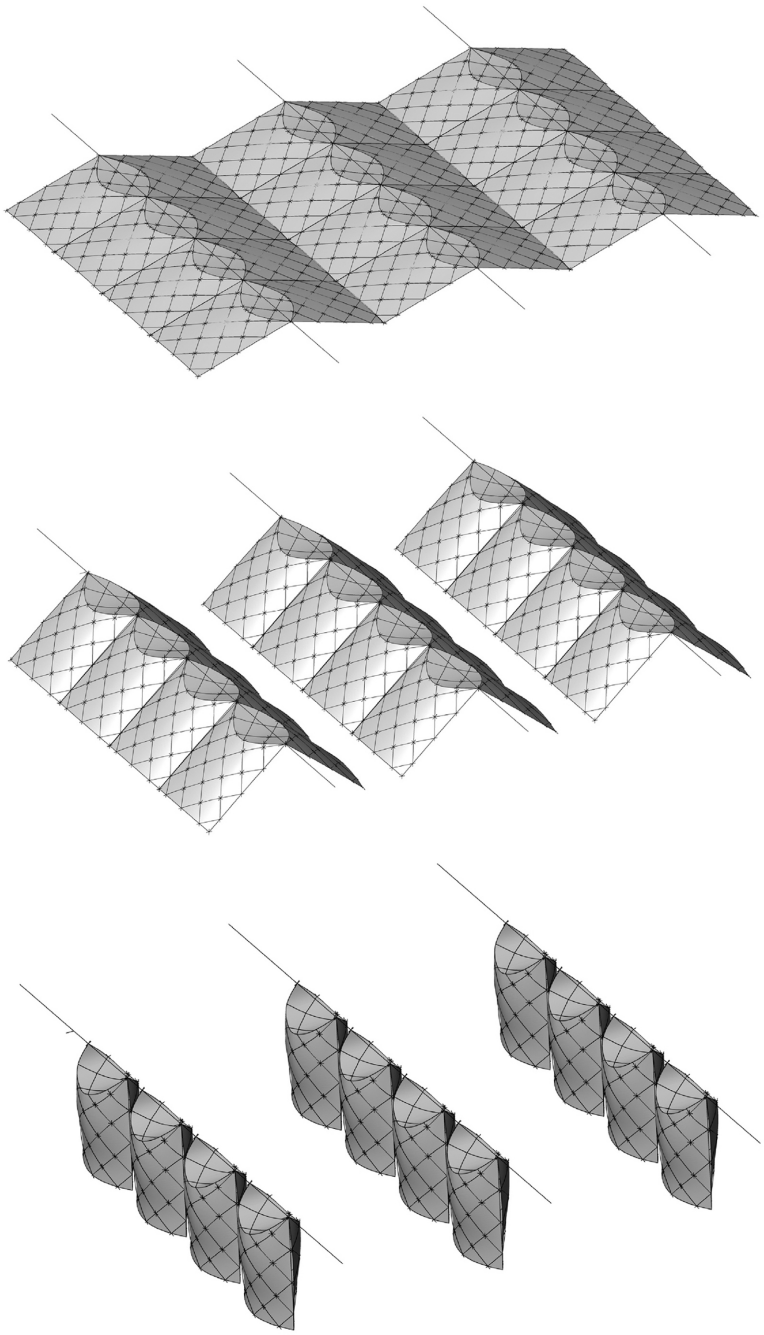
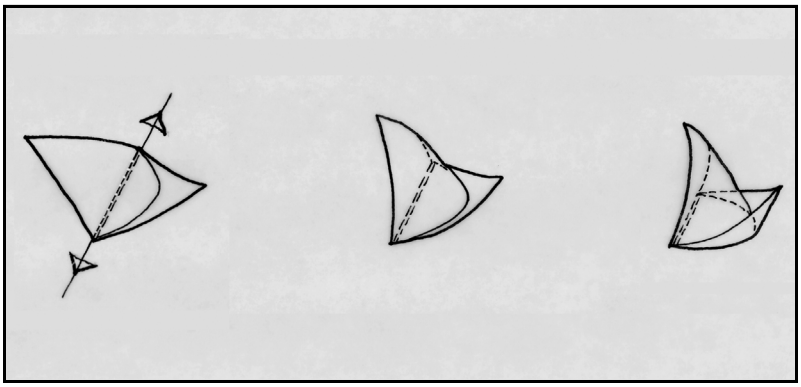
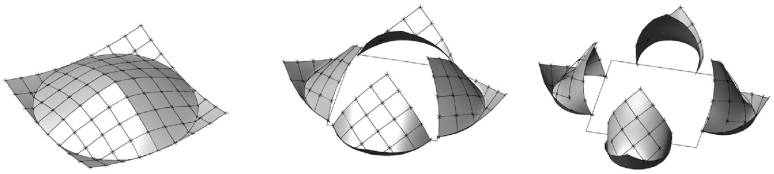
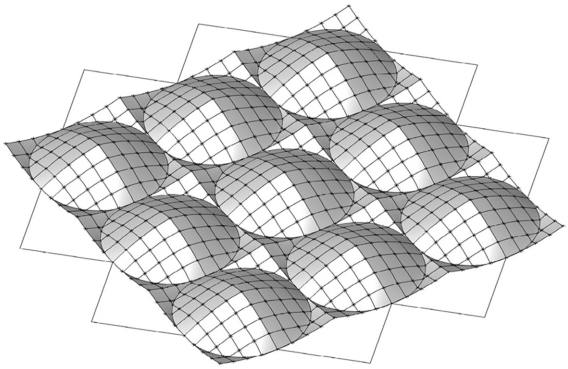


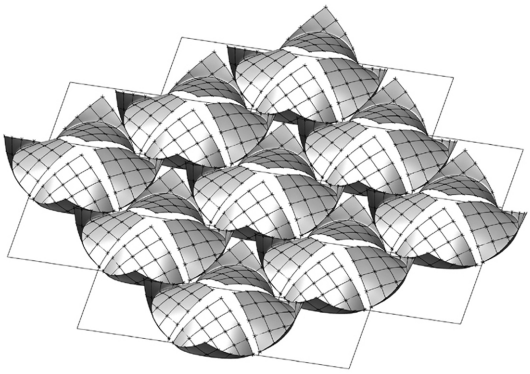
Abb. 5-24 Beispiel 24

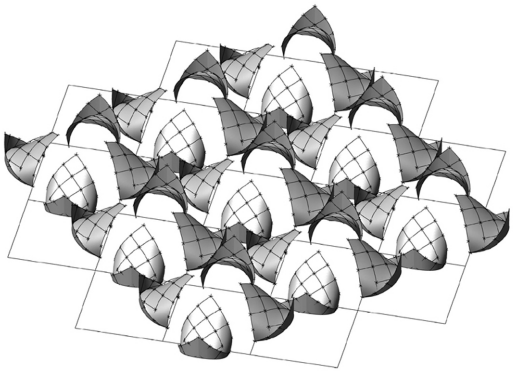
A. A1(A2(G8))[1]
B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/ variable Akustik), Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer)
C. Gruppe 3











1. Wie in Abschnitt 4.4 dargelegt, können die Ergebnisse wieder auf unterschiedliche Weise angeordnet, kombiniert oder manipuliert werden.

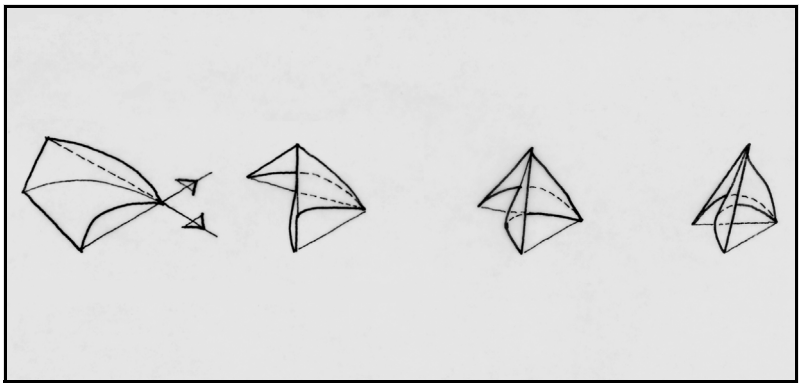
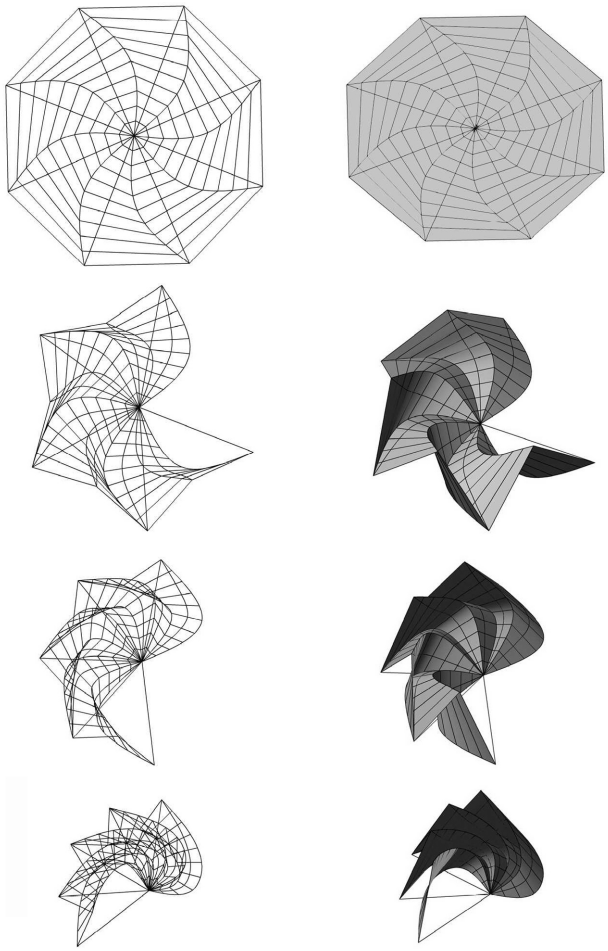
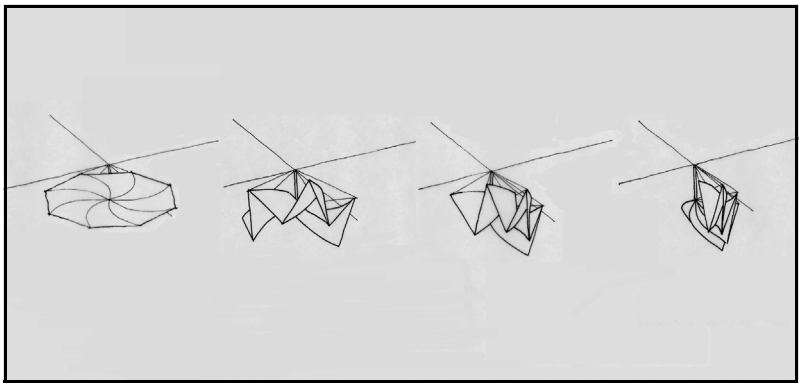


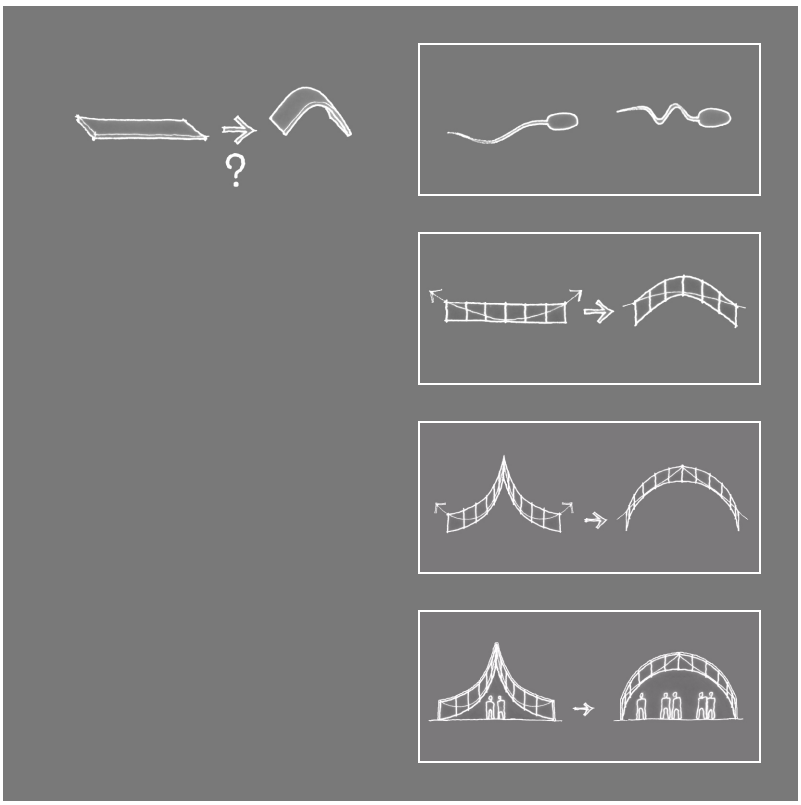
Abb. 5-25 Beispiel 25

A. A2(M2(G8))
B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer)
C. Gruppe 3





6 Zusammenfassung und Ausblick



6.1 Fragestellungen der Arbeit

Biegsame Konstruktionen sind eine Art wandelbarer Konstruktionen in der Architektur, deren Komponenten sich durch die Elastizität ihrer Materialien biegen können. Dies ermöglicht eine neue Form der Wandelbarkeit[1]. Blicken wir noch einmal zurück auf die Fragen, die zu Beginn dieser Arbeit in Bezug auf biegsame Konstruktionen gestellt wurden:

1. Hier muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass was in dieser Arbeit biegsame Konstruktionen genannt wird, wandelbare Konstruktionen mit biegsamen Stäben als Hauptkomponenten sind.

1. Durch welche Mechanismen können sich biegsame Konstruktionen verformen?
2. Welche Verformungen sind durch diese Mechanismen möglich?
3. Welche Anwendungsmöglichkeiten sind für diese Konstruktionen in der Architektur vorstellbar?

Die zentrale Rolle nimmt die erste Frage ein. Die zweite und dritte Frage bauen auf der Antwort auf die erste Frage auf.

6.2 Arbeitsprozess und Ergebnisse

Die erste Frage der Arbeit wurde auf Basis bionischer Prinzipien beantwortet. Wir haben acht Beispiele aus der Natur ausgewählt und auf der Basis ihrer Prinzipien acht Grundmuster definiert. Diese Grundmuster stellen durch geometrische Parameter definierte Verformungsmechanismen dar, die direkt in der Architektur anwendbar sind. Im nächsten Schritt wurden diese Grundmuster durch Änderungen ihrer Parameter sowie Kombinationen miteinander weiterentwikkelt. Im Anschluss wurden diese weiterentwickelten Grundmuster auf die Architektur übertragen und in Form unterschiedlicher Beispiele präsentiert.

Alle in dieser Doktorarbeit behandelten Fragestellungen fallen in die folgenden drei Themenkomplexe:

Gruppe 1: Biegsame Konstruktionen und Verformbarkeit, Mechanismen und Anwendungen dieser Konstruktionen in der Architektur

Gruppe 2: Natürliche Vorbilder und ihre Prinzipien für Verformungsmechanismen

Gruppe 3: Geometrische Modelle, ihre Hauptparameter, Modifikationsmöglichkeiten dieser Modelle, Grundmuster und Weiterentwicklung dieser Grundmuster

Die Verbindung dieser drei Themenkomplexe miteinander zur Beantwortung der in dieser Arbeit gestellten Fragen kann als originärer Beitrag dieser Dissertation zur Forschung bezeichnet werden.

Die folgende Gliederung zeigt die verschiedenen Schritte des Arbeitsprozesses sowie die gefundenen Ergebnisse:

1. Definition geometrischer Kriterien für die Auswahl geeigneter Vorbilder aus der Natur
2. Auswahl acht natürlicher Vorbilder
3. Beschreibung der Prinzipien dieser Vorbilder durch abstrahierte geometrische Modelle
4. Definition bestimmter Form- und Strukturmodifikationen für Modifikationssequenzen
5. Herleitung der acht Grundmuster aus abstrahierten Prinzi-

pien mit Hilfe von Modifikationssequenzen
6. Weiterentwicklung der acht Grundmuster durch Manipulation, Kombination und Anordnungsvariationen
7. Umsetzung der entwickelten Grundmuster in der Architektur

6.3 Ausblick auf zukünftige Arbeit

In dieser Arbeit wird hauptsächlich über Verformbarkeit, Verformungsmechanismen und Anwendungsmöglichkeiten biegsamer Konstruktionen gesprochen, die mit Hilfe biegsamer Stäbe gebaut werden können. Um diese Arbeit zu vertiefen und in unterschiedlichen Richtungen zu erweitern, müssen folgende Themen bearbeitet werden:

1. Technische Eigenschaften und Besonderheiten geeigneter biegsamer Werkstoffe, die zur Verwendung in biegsamen Konstruktionen in der Architektur vertrauenswürdig sind.
2. Definition einer Optimierungsmethode für Beispielskategorien, die in dieser Arbeit vorgeschlagen werden
3. Erweiterung der Verformungsmöglichkeitskategorien, die in dieser Arbeit nur analog behandelt wurden, durch eine geeignete digitale Methode

7 Literaturverzeichnis

[1] Feininger, A. (1966): Form of Nature and Life, Viking Press, New York, P. 19

[2] Otto, F., ... (1972): Wandelbare Dächer (IL5), Inst. für Leichte Flächentragwerke (IL), IL mit Karl Krämer Verlag Stuttgart, S. 12, 44 - 46

[3] Schlaich, M. (2004): Aktive und wandelbare Ingenieurbauten, Zeitschriftenartikel aus „Stahlbau“, v. 73, No. 12, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 1001-1009

[4] Zuk, w.; Clark, R. H. (1970): kinetic architecture, Van Nostrand Reinhold, New York, P. 9

[5] Herwig, O. (2003): Featherweights - Light, Mobile and Floating Architecture, Prestel, Munich, P. 113

[6] Mollerup, P. (2001): Collapsibles - Ein Album platzsparender Objekte, Stiebner, München, S. 131, 171

[7] Bahamon, A. (2004): The Magic of Tents - Transforming Space, HarperCollins, New York, P. 132, 133, 154 - 171

[8] Jodidio, P. (1999): Building a New Millennium - Bauen im neuen Jahrtausend, Taschen Verlag, Köln, S. 384 - 393

[9] Grueneisen, P. (2003): Soundspace - Architektur für Ton und Bild, Birkhäuser, Berlin, S. 28

[10] Schlaich, J.; Bergermann, R. (2003): Leicht weit, Prestel, Berlin, S.134 - 137

[11] Ezawa, K.; Feldmeyer, G.; Igaraschi, T. (2005): Kisho Kurokawa - metabolism and symbiosis - Metabolismus und Symbiosis, Deutsches Architektur-Museum (DAM), Jovis Verlag, Berlin, S.118 - 123

[12] Lesnikowski, W. (1991): Die neue französische Architektur, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, S. 152 - 159

[13] Otto, F.; Rasch, B. (1995): Gestalt finden - auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen, Hrsg.: Deutscher Werkbund Bayern, Axel Menges, Fellbach, S. 191

[14] Kronenburg, R. (1995): Houses in Motion - the genesis,

history and development of the portable building, Academy editions, London, P. 7, 8

[15] Brockhaus-Enzyklopädie (2006): Band 18, 21. Auflage, Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Mannheim, S. 92

[16] Brockhaus-Enzyklopädie (2006): Band 4, 21. Auflage, Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Mannheim, S. 42

[17] Gaffron, S.: Zeitung lesen auf elektronischen Tapeten, in WELT am ZONNTAG (29. Febr. 2004), Wirtschaft/ Innovation, Axel Springer AG, Berlin

[18] Tan, L. T.; Pellegrino, S. (2004): Ultra thin deployable reflector antennas. In Proc. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 19-22 April 2004, Palm Springs, CA AIAA 2004-1730, P. 2

[19] Pellegrino, S. - Hrsg. (2002): Deployable Structures, Springer, Wien

[20] Soykasap, O.; Watt, A. M.; Pellegrino, S. (2004): New deployable reflector concept. In Proc. 45th AIAA/ ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 19-22 April 2004, Palm Springs, CA AIAA 2004-1574

[21] Sickinger, C.; Herbeck, L.; Breitbach, E. (2003): Solar Sail-Dimensionierung und Analyse einer ultraleichten, entfaltbaren Raumfahrtstruktur, Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[22] Sickinger, C.; Melcher, J.; Ströhlein, T.; Nickel, J.; Schillo C.; Mayser, M.; Altenkirch, C. (2005): Entfaltungsmechanismen für den Leichtbau auf Basis bionischer Elemente, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[23] Tibbalds, B.; Guest, S. D.; Pellegrino, S. (2004): Inextensional Packaging of Thin Shell Slit Reflectors, TECHNISCHE MECHANIK, Band 24, Heft 3-4, (2004), 211–220

[24] Burgard, R. - Hrsg. (2004): Kunststoffe und freie Formen, Springer, Wien, S. 11 - 15

[25] Schürmann, H. (2005): Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer, Berlin, S. 4, 28 - 30, 38 - 40

[26] Schürmann, H.: Besondere konstruktive Möglichkeiten der Faser-Kunststoff-Verbunde, in “Thema Forschung” 1/ 2006, Hrsg.: Präsident der TU Darmstadt, Verlag für Marketing und Komminikation GmbH & Co. KG,

Monsheim, S. 56 - 63

[27] Dehn, F.; Holschemacher, K.; Tue, H. N. V. - Hrsg. (2005): Faserverbundwerkstoffe - Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft, Bauwerk, Berlin

[28] IBK Darmstadt - Hrsg. (2001): Bauen mit Kunststoffen, Ernst & Sohn, Berlin

[29] Peters, S. (2006): Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen, Forschungsbericht Nr. 27, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, Stuttgart

[30] Neitzel, M.; Mitschang, P. (2004): Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser verlag, München

[31] Hausmann, K. (1983): Flagellen- und Cilienbewegung - Kenntnisstand zurn 9+2-Muster, Biologie in unserer Zeit, 13. Jahrg - Nr. 6, Verlag Chemie GmbH, Weinbeim, S. 161 - 169

[32] Park, D. U. (2004): Materialgerechte lösbare Verbindungen bei glasfaserverstärkten Kunststoffen, 2. ForschungsForum, FOMEKK/ ITKE/ DLR, Tagungsband, S. 8 - 10

[33] Park, D. U., Hub, A. (2004): prototyp - gfk pavillon mit formschlussverbindung; Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart

[34] Herbeck, L.; Sickinger, C.; Herrmann, A. (1999): Ultraleichte, entfaltbare Maststrukturen aus CFK, Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[35] Herbeck, L.; Eidenz, M.; Leipold, M.; Sickinger, C.; Unckenbold, W. (2000): Development and Test of Deployable Ultralightweight CFRP-Booms for a Solar Sail, Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[36] Sickinger, C.; Herbeck, L.; Ströhlein, T.; Torrez-Torres, J. (2004): Strukturmechanik entfaltbarer CFRP Booms - Analyse, Herstellung, Verifikation und Anwendung adaptiver Konzepte, Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[37] Sickinger, C.; Herbeck, L. (2002): Deployment Strategies - Analyses and Tests for the CFRP Booms of a Solar Sail, Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

[38] Leipold, M.; Runge, H.; Sickinger, C. (2005): Large SAR

Membrane Antennas with Lightweight Deployable Booms, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, D-81379 München, DLR, Remote Sensing Technology Institute, Münchner Str. 20, D-82230 Weßling; DLR, Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, Lilienthalplatz 7, D-38108 Brunswick

[39] Strasburger, E. - begr. (2002): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen, Spektrum, Akad. Verl., Berlin, S. 454 - 456

[40] Jacob, F.; Jäger, E. J.; Ohmann, E. (1994): Botanik, 4. Aufl.. - Gustav Fischer Verlag, Jena, S. 524 - 526

[41] Portoghesi, P. (2000): Nature and Architecture, Skira, Milano

[42] Powers, A. (2000): Natur und Design - inspirationen für Architektur/ Mode und angewandte Kunst, Paul Haupt, Bern

[43] Rossmann, T.; Tropea, C. - Hrsg. (2005): Bionik - Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft, Springer, Berlin

[44] Nachtigal, W. (2002): Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2. Auflage, Springer, Berlin

[45] Nachtigal, W. (2005): Biologisches Design - Systematischer Katalog für bionisches Gestalten, Springer, Berlin

[46] Speck, T.; Harder, D.; Speck, O. (2005): Prozess des bionischen Arbeitens: "top down approach" und "bottom up approach".– 2. Fachtagung Bionik im Automobil, Ulm 2005, Veranstaltungsbeiträge: 6 S., mic management information center / Mediengruppe Süddeutscher Verlag GmbH, Landsberg.

[47] Plant Biomechanics Group Freiburg (2006), BIOKON & Kompetenznetz Biomimetik

[48] Fischer, B. (2002): Von Wegen olle Flunder - Bioniker setzen Phänomene aus der Natur in die Technik um, Fischflossen stehen Modell für Rückenlehnen und U-Boote kommunizieren wie Delfine,..., Dimensionen, Das Berliner Wissenschafts-Magazin, Heft 23, Sommer 2002, S. 10 - 12

[49] Heeger, T. (2004): Quallen - gefährliche Schönheit, Hirzel Verlag, Stuttgart, S. 43

[50] Ruppert, E. E.; Fox, R. S.; Barnes, R. D. (2004): Invertebrate Zoology - A Functional Evolutionary Approach, Thomson, Brooks/Cole, Kap. 12, S. 116

[51] Forterre, Y.; Skotheim, J. M.; Dumais, J.; Mahadevan, L. (2005): How the Venus flytrap snaps, in "NATURE"

journal, Vol. 433, 27 JANUARY 2005, Nature Publishing Group, S. 421 - 425

[52] Stiny, G.; Gips, J. (1972): Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture, in C. V. Freiman, ed., Information Processing 71, North Holland/ Amsterdam

[53] Gips, J. (1975): Shape Grammars and their Uses, Birkhäuser, Basel

[54] Stiny, G. (1975): Pictorial and Formal Aspects of Shape and Shape Grammars, Birkhauser, Basel

[55] Knight, T.W. (1994): Transformations in design - A formal approach to stylistic change and innovation in the visual arts, Cambridge University Press, New York

[56] Knight, T.W. (1992): Designing with Grammars, Verlag Vieweg, Weisbaden

[57] Bannasch, R. (2005): Weniger ist mehr - Der Fin Ray Effect - eine verblüffende Lösung aus der Bionik, in VDWF Magazin - Ausgabe 2/05, VDWF im Dialog - Verband Deutscher Werkzeug- und Formenbauer e.V., S. 8, 9

[58] Menges, A.: Emergence: Morphogenetic Design Strategies, in AD (2004/ May) - Architectural Design, Wiley & Sons, P. 62 - 63

[59] Calculus-based form: an interview with Gerg Lynn, in AD (2006/ I. 4 - V. 76) - Architectural Design, Wiley & Sons, P. 88 - 95

[60] Medienfassaden, in ARCH+ (1991/ 108) - Zeitschrift für Architektur und Städtebau

[61] Hoberman, C.: Kunst und Wissenschaft der Faltungen, in ARCH+ (1996/ 131) - Zeitschrift für Architektur und Städtebau, S. 19 - 21

[62] Hoberman, C.: Olympischer Bogen, in ARCH+ (2002/ 159, 160) - Zeitschrift für Architektur und Städtebau, S. 108 - 111

[63] Wohnanlage in Dornbirn, in DETAIL (2003/ 7,8) - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, S. 778 - 780

[64] Glas und Farbe - Ein Gespräch mit Matthias Sauerbruch, in DETAIL (2004/10) - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, S. 1090 - 1098

[65] Balog, V.; Lutz, M.: Der Post Tower in Bonn - Filigrane Fassadenplanung im Detail, in DETAIL (2004/10) - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, S. 1155 - 1158

[66] Luxuswohnungen in Zürich, in DETAIL (2005/11) -

Zeitschrift für Architektur + Baudetail, S. 1282 - 1285

[67] Schönfeld, J. W.: Variable Gebäudehüllen, in DBZ (1994/ 5) - Deutsche BauZeitschrift, S. 129 -135

[68] Weichzeichner - Präsentationshalle in Sindelfingen, in DBZ (2000/ 7) - Deutsche BauZeitschrift, S. 66 - 69

[69] Leicht zu bauen ist nicht leicht, in db (1993/ 9) - deutsche bauzeitung - Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, S. 18 - 23

[70] Leicht im Sattel, in db (1993/ 9) - deutsche bauzeitung - Zeitschrift für Architekten und Bauingenieure, S. 58 - 63

[71] Herz Jesu Kirche in München, in GLAS (2001/ 2) - Zeitschrift für Architektur und Technik, S. 34 - 40

[72] Pinnasberg 45 - 47 Hamburg St. Pauli, in GLAS (2005/ 4) - Zeitschrift für Architektur und Technik, S. 30 - 41

[73] MUSCLE reconfigured - Programmable Architecture, in Insight of Smart Environments (2005/ 11), Archidata, S. 105 - 124

[74] Brüderlin, M. - Hrsg. (2004): ArchiSkulptur - Dialog zwischen Architektur und Plastik vom 18.Jahrhundert bis heute, Hatje Cantz Verlag, Ostfildern

[75] Steele, J. (2001): Architektur und Computer - Planung und Konstruktion im digitalen Zeitalter, Callwey, München

[76] Alexander, R. M. (2003): Principles of animal locomotion, Princeton University Press, Princeton [u.a.]

[77] Meinhardt, U. (1986): Alles über Regenwürmer, Franckh, Stuttgart

[78] Hess, W. N. (1925/ June): Nervous system of the earthworm, lumbricus terrestris L., Journal of Morphology, Volume 40, Issue 2, P. 235 - 259

[79] Lüttge, U.; Kluge, M.; Bauer, G. (2002): Botanik, 4. Auflage, WILEY-VCH, Weinheim, S. 310

[80] Brusca, R. C.; Brusca, G. J. (2003): Invertebrates - 2. ed., Sinauer, Sunderland, Mass.

[81] Starck, D. (1979): Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere - Band 2: Das Skelettsystem, Springer, Berlin

[82] Campbell, N. A.; Reece, J. B. (2003): Biologie, 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 148 - 153

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Weiche Elemente für die Einteilung des Raumes 6
Abb. 1-2 Eine einziehbare Treppe [6] 6
Abb. 1-3 Variable akustische Elemente, Konzerthaus Luzern, Schweiz [8] 6
Abb. 1-4 Stierkampfarena, Saragossa, Spanien; Schlaich, Bergermann& Partner, Wandelbares Membrandach[10] 7
Abb. 1-5 Das Big Eye-Stadion, Oita, Japan; Kisho Kurokawa, Steifes verschiebbares Dach [11] 7
Abb. 1-6 Bewegungsmatrix 7
Abb. 1-7 Polizei- und Feuerwache, Berlin; Matthias Sauerbruch, wandelbare äußere Glaslamellen [64] 8
Abb. 1-8 „Institut du Monde Arabe“, Paris; Jean Nouvel. Die Öffnungen der Südfassade sind mit Aluminiumlamellen überzogen, die sich computergesteuert dem Stand der Sonne anpassen [12]. 8
Abb. 1-9 Ein wandelbares Dach als Zelt, das besonders schnell zu transportieren und aufzubauen ist [69]. 8
Abb. 1-10 Freilichtspieldach, Wiltz, Luxemburg; Bodo Rasch [70]. 9
Abb. 1-11 Prototypen der Schirme für die großen Moscheebauten in Saudi Arabien; 9
Abb. 1-12 Post Tower, Bonn; Murphy/ Jahn Architects, Chicago. 9
Abb. 1-13 Wandelbare Fassaden; 10
Abb. 1-14 Hoberman Arch, Ein Beispiel für eine periphere Bewegungsrichtung [62] 10
Abb. 1-15 Technisches Detail, „Retractable Dome“, Expo 2000; Chuck Hoberman [61] 11
Abb. 1-16 Die Dachhaut hängt an Rollen, die auf einem Tragseil laufen. Freilichtspieldach, Wiltz, Luxemburg; Bodo Rasch[70] 12
Abb. 1-17 „Spring-Back Reflector“, entfalteter und verpackter Zustand, Courtesy of the Canadian Space Agency; [18]. 12
Abb. 1-18 Größenveränderung einer biegsamen Fläche durch parallele Bewegung 13
Abb. 1-19 Veränderung der Geometrie; 13
Abb. 1-20 Flexible Philips-Display. Das Display lässt sich in alle Richtungen biegen. [17] 14
Abb. 1-21 Biegsame Sprungstäbe aus GFK 14
Abb. 1-22 Ein kleines Modell von einem CFK-Reflektor [23]. 14
Abb. 1-23 ESA-DLR Solar Sail Technologieträger 1999/2000 [22]. 15
Abb. 1-24 „BLOB“-Architektur;. 15
Abb. 1-25 „The Muscle Reconfigured“, „Hyperbody research group“ 16
Abb. 1-26 „hybgrid“ MA Dissertationsprojekt AA 16
Abb. 1-27 Abschätzung des Gewichtsvorteils von FVK anhand eines Dichtevergleichs [26] . 17
Abb. 1-28 Biegsamkeit der Stäbe aus GFK 17
Abb. 1-29 Prototyp - GFK Pavillon, ITKE, 2003/2004, Don-U Park, Alexander Hub [33] 18
Abb. 1-30 Handlaminieren von GFK-Stäben 18
Abb. 1-31 Rollbare Maststrukturen aus CFK [38] 19
Abb. 1-32 Solar Sail; 19

Abb. 2-1 Vorgehensweise;. 26
Abb. 2-2 Die geometrischen Veränderungen biegsamer Konstruktionen (2D);. 28
Abb. 2-3 Gruppen der Vorbilder; 28
Abb. 2-4 Gruppen der Veränderungen; 28
Abb. 2-5 Gruppe A/ Vorbild 1 30
Abb. 2-6 Flagellum [82] 30

Abb. 2-7 Cilie [82] 30
Abb. 2-8 Cilienquerschnitt im elektronenmikroskopischen Bild, [31] 30
Abb. 2-9 Verformungsmechanismus der Cilien und Flagellen, [82] 30
Abb. 2-10 Gruppe A/ Vorbild 2 31
Abb. 2-11 Krümmung von Papierstreifen c und f, die aus je zwei in verschiedenen Richtungen herausgeschnittenen Streifen a und b bzw. d und e zusammengeklebt und dann angefeuchtet wurden. [39] 31
Abb. 2-12 Hygroskopische Bewegung; 31
Abb. 2-13 Gruppe A/ Vorbild 3 32
Abb. 2-14 Öffnungsmechanismus eines Sporangiums [79] 32
Abb. 2-15 Gruppe A/ Vorbild 4 33
Abb. 2-16 Ein Flossenstrahl besteht aus zwei Strahlen, die aufeinander zulaufen. 33
Abb. 2-17 Technisches Modell eines Flossenstrahls. Die Querbalken sind beweglich und entsprechen dem elastischen Gewebe. Seitlicher Druck bewirkt, dass das Modell sich zum Finger hin wölbt. 33
Abb. 2-18 Gruppe AB/ Vorbild 5 34
Abb. 2-19 Fortbewegung des Regenwurmes 34
Abb. 2-20 Anatomie eines Regenwurmes; 34
Abb. 2-21 Gruppe AB/ Vorbild 6 35
Abb. 2-22 Aufbau von Quallen [49] 35
Abb. 2-23 Fortbewegung der Quallen [50] 35
Abb. 2-24 Gruppe AB/ Vorbild 7 36
Abb. 2-25 Venusfliegenfalle im geöffneten und geschlossenen Zustand [51] 36
Abb. 2-26 Dehnungsverteilung und natürliche Krümmung [51] 36
Abb. 2-27 Gruppe AB/ Vorbild 8 37
Abb. 2-28 Wird eine Einzelblüte der Pflanze leicht zusammengedrückt, so öffnet sich die Blüte zu einem Mäulchen. 37
Abb. 2-29 Löwenmaul (Antirrhinum majus);. 37
Abb. 2-30 Anordnung der natürlichen Vorbilder 38

Abb. 3-1 Jedes 2D- oder 3D-Modell wird durch Punkte und ihre Verbindungslinien dargestellt. 42
Abb. 3-2 Die Punkte können nicht nur auf beiden Enden der Kurve, sondern auch auf der Kurve selbst liegen; 43
Abb. 3-3 Die Kanten und die Krümmung der Flächen werden hier durch Geraden und Kurven definiert; 43
Abb. 3-4 Formänderung und Formmodifikation; 44
Abb. 3-5 Graue Markierung zeigt noch nicht definierte Änderungen. 44
Abb. 3-6 Jede Farbe hat eine bestimmte Bedeutung in Bezug auf Formänderung.. 44
Abb. 3-7 Darstellung der Änderungen der Flächen durch ihre definierenden farbigen Linien. 44
Abb. 3-8 Oben nach unten: Strukturmodifikation. 45
Abb. 3-9 Formmodifikationen, Beispiel für FD 45
Abb. 3-10 Formmodifikationen, Beispiele für FK 46
Abb. 3-11 Strukturmodifikationen/ Addition; 47
Abb. 3-12 Strukturmodifikationen/ 48
Abb. 3-13 Strukturmodifikationen/ Subtraktion & Addition;. 48
Abb. 3-14 Strukturmodifikationen/ Transformation; 49
Abb. 3-15 Farbenbestimmung; 49
Abb. 3-16 Reihenfolge der Änderungen 50
Abb. 3-17 Prinzip 1. 52
Abb. 3-18 Prinzip 2. 53
Abb. 3-19 Prinzip 3. 53
Abb. 3-20 Prinzip 4. 54
Abb. 3-21 Prinzip 5. 55
Abb. 3-22 Prinzip 6. 55
Abb. 3-23 Prinzip 7. 56

Abb. 3-24 Prinzip 8. 57
Abb. 3-25 Modifikationssequenz 1-1 59
Abb. 3-26 Modifikationssequenz 1-2 60
Abb. 3-27 Grundmuster 1 60
Abb. 3-28 Modifikationssequenz 1-3 62
Abb. 3-29 Modifikationssequenz 2-1 63
Abb. 3-30 Grundmuster 2 63
Abb. 3-31 Modifikationssequenz 2-2 65
Abb. 3-32 Modifikationssequenz 3 66
Abb. 3-33 Grundmuster 3 67
Abb. 3-34 Modifikationssequenz 4-1 69
Abb. 3-35 Grundmuster 4 69
Abb. 3-36 Modifikationssequenz 4-2 71
Abb. 3-37 Modifikationssequenz 5-1 72
Abb. 3-38 Grundmuster 5 73
Abb. 3-39 Modifikationssequenz 5-2 75
Abb. 3-40 Modifikationssequenz 6-1 76
Abb. 3-41 Grundmuster 6 77
Abb. 3-42 Modifikationssequenz 6-2 79
Abb. 3-43 Modifikationssequenz 7 80
Abb. 3-44 Grundmuster 7 81
Abb. 3-45 Modifikationssequenz 8 83
Abb. 3-46 Grundmuster 8 84
Abb. 3-47 Vergleichende Übersichtstabelle für die verschiedenen Grundmuster 86

Abb. 4-1 Kategorien (K.) der Manipulation (insgesamt 16) 91
Abb. 4-2 Kombinationskategorien (insgesamt 316) 92
Abb. 4-3 Kategorien der Anordnung (insgesamt 680) 94
Abb. 4-4 Beispiel für M1(G4) 97
Abb. 4-5 Beispiel für M1(G5) 98
Abb. 4-6 Beispiel für M2(G3) 99
Abb. 4-7 Beispiel für M2(G4) 100
Abb. 4-8 Beispiel für M2(G5)-1 101
Abb. 4-9 Beispiel für M2(G5)-2 102
Abb. 4-10 Beispiel für K1(G1) 103
Abb. 4-11 Beispiel für K1(G8) 104
Abb. 4-12 Beispiel für K1(M1(G4)) 105
Abb. 4-13 Beispiel für K2(G2, M2(G5)) 106
Abb. 4-14 Beispiel für A1(G5) 107
Abb. 4-15 Beispiel für A1(K1(G1)) 108
Abb. 4-16 Beispiel für A2(G2) 109
Abb. 4-17 Beispiel für A2(M1(G7)) 110
Abb. 4-18 Beispiel für A2(M2(G8)) 111
Abb. 4-19 Beispiel für A2(M2(G3)) 112
Abb. 4-20 Beispiel für A2(M2(G4)) 113
Abb. 4-21 Beispiel für A2(K1(M1(G4))) 114

Abb. 5-1 Beispiel 1; A. A1(G1); B. Mobile Architektur; C. Gruppen 1 & 2 119
Abb. 5-2 Beispiel 2; A. A1(K1(G1)); Mobile Architektur; C. Gruppen 1 & 2 120
Abb. 5-3 Beispiel 3; A. A2(G1); B. Mobile Architektur; C. Gruppen 1 & 2 121
Abb. 5-4 Beispiel 4; A. A1(K1(G1)); B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)/ Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/variable Akustik); C. Gruppe 3 122
Abb. 5-5 Beispiel 5; A. A2(G2); B. Mobile Architektur; C. Gruppen 1& 2 123
Abb. 5-6 Beispiel 6; A. A1(M2(G3)); B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden)/ Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/variable Akustik); C. Gruppe 3 124
Abb. 5-7 Beispiel 7; A. A1(M2(G4) & A2(M2(G4); B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer); C. Gruppe 3 125

Abb. 5-8 Beispiel 8; A. A1(G4); B. Innere Wandelbarkeit (Raumeinteilung/ variable Belichtung und Beleuchtung/ variable Akustik)/ Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden); C. Gruppe 3. 126
Abb. 5-9 Beispiel 9; A. A1(G5); B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung und Beleuchtung)/ Spezielle Anwendung (Solarsegel in der Raumfahrt); C. Gruppe 2 & 3. . . 127
Abb. 5-10 Beispiel 10; A. A2(M1(G5)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 2 128
Abb. 5-11 Beispiel 11; A. K1(M1(G5)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 2 129
Abb. 5-12 Beispiel 12; A. M2(G5); B. Innere Wandelbarkeit (variable Beleuchtung); C. Gruppe 3 130
Abb. 5-13 Beispiel 13; A. M2(G5); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 1 & 2. 131
Abb. 5-14 Beispiel 14; A. M2(G5); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 2 132
Abb. 5-15 Beispiel 15; A. A1(K2(G2, M2(G5))); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 2 133
Abb. 5-16 Beispiel 16; A. M2(G6) & A1(M2(G6)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 1 & 2 . . . 134
Abb. 5-17 Beispiel 17; A. M1(G7); B. Innere Wandelbarkeit (variable Beleuchtung/ Veränderung der Raumeinrichtungselemente); C. Gruppe 2 & 3 135
Abb. 5-18 Beispiel 18; A. A2(M1(G7)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 2 136
Abb. 5-19 Beispiel 19; A. A1(M1(G7)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 1 & 2 137
Abb. 5-20 Beispiel 20; A. A1(M1(G7)); B. Mobile Architektur; C. Gruppe 1 & 2 138
Abb. 5-21 Beispiel 21; A. A2(M1(G7)); B. Mobile Architektur/ Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer); C. Gruppe 2 & 3 139
Abb. 5-22 Beispiel 22; A. A1(G8); B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung und Beleuchtung/ variable Akustik), Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Fassaden); C. Gruppe 3 140
Abb. 5-23 Beispiel 23; A. A1(K1(G8)); B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer); C. Gruppe 3 141
Abb. 5-24 Beispiel 24; A. A1(A2(G8)); B. Innere Wandelbarkeit (variable Belichtung/ variable Akustik), Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer); C. Gruppe 3. 142
Abb. 5-25 Beispiel 25; A. A2(M2(G8)); B. Äußere Wandelbarkeit (wandelbare Dächer); C. Gruppe 3 143

Ma arch. Mohammad-Reza Matini

1970	Geboren in Maschhad, Iran
1989	Abitur in Maschhad
1998	MA Architektur an der University of Teheran
1996 - 2003	Tätigkeit in verschiedenen Architekturbüros in Teheran und Maschhad
1998 - 2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Azad University in Maschad
2004 - 2007	Promotion am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart (Stipendium des iranischen Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Technologie)
seit 2005	Zusammenarbeit mit "National Institute of Informatics", Tokyo