



fold²structure

Potentiale einer gefalteten
Konstruktionsweise

Gabriel Stern

„Don't fight forces, use them“

Buckminster Fuller



Potentiale einer gefalteten
Konstruktionsweise

Gabriel Stern

MASTERARBEIT

eingereicht an der
Leopold-Franzens-Universität Innsbruck
Fakultät für Architektur

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Betreuung
Dipl.Ing Dr. Rupert Maleczeck

Institut für Gestaltung
Konstruktion und Gestaltung
ISD
Innsbruck, Mai 2018

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich bei allen bedanken, die mir während meiner Masterarbeit mit Inspiration und Motivation zur Seite standen.

Ein spezieller Dank gilt meinem Betreuer Dipl.Ing Dr. Rupert Maleczeck, der mir die Welt des Structural Origami eröffnete und es stets geschafft hat, mich zu fordern und gleichzeitig zu motivieren.

Danke auch dem Institut für Konstruktion und Gestaltung und seinem gesamtem Team, das stets ein offenes Ohr für mich hatte und mich mein gesamtes Studium über immer wieder inspiriert hat.

Ein großer Dank geht an die Firma Holzbau Saurer, die es mir ermöglichten einen großformatigen Demonstrator aus Holz umzusetzen und mir dabei mit unschätzbarem Know How und viel Geduld zur Seite standen.

Danke auch meiner Familie, die mich im Herzen immer begleitet und mir Kraft gibt sowie der Familie meiner Freundin, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt haben.

Ein spezieller Danke gilt meiner Freundin Bettina, die mir stets liebevoll zur Seite steht und mir mit Motivation, Kraft und unglaublich großem Verständnis durch das ganze Studium geholfen hat.

Inhalt

10	<i>Vorwort</i>
	<i>I: Faltung</i>
14	Ein natürlicher Prozess
20	Origami Faltkunst
24	Faltung & Architektur
30	Technische Faltung & Structural Origami
	<i>II: fold2structure</i>
40	Bent Interwoven Stripes
46	Linear Folded Interwoven Stripes
50	Vom Streifen zur Fläche
54	Lens Tessellation Inspired Surface Approximation
60	Paper2Bar
66	Fold2Bar
76	Architektonisches Potential der Lens Tessellation
	<i>III: Demonstrator</i>
102	Entwurf eines Origami - inspirierten Demonstrators für die 7OSME in Oxford
130	<i>Verzeichnis</i>
137	<i>Appendix A</i>
155	<i>Appendix B</i>
159	<i>Eidesstattliche Erklärung</i>

Vorwort

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Suche nach einer ästhetischen und eleganten Methode, um räumliche Strukturen sowohl im kleinen als auch im großen Maßstab zu realisieren. Dazu wurde die reiche Formenwelt der Faltung näher untersucht, welche als grundlegendes Informationssystem gesehen werden kann, indem sie eine Fläche in zwei Seiten einer Faltkante teilt. In vielen Bereichen der Natur, wo Strukturen große Performance erbringen müssen und dazu entweder sehr stabil oder sehr flexibel sind, findet man Faltung als Lösung dieser Probleme. Somit bietet sie eine reichhaltige Quelle der Inspiration die schon etliche Architekten, Ingenieure und Designer auf neue Ideen gebracht hat.

Im Zuge der Masterarbeit wurde anhand von physischen und digitalen Modellen eine Strategie entwickelt, um dreidimensionale Strukturen mit einem performativen System anzunähern. Als Ergebnis wird das Design-Tool „fold2structure“ vorgestellt, dessen Funktionalität mit der Konstruktion von zwei großformatigen Versuchsbauten nachgewiesen wurde.

Um die konstruktiven und gestalterischen Möglichkeiten der Strategie im architektonischen Kontext aufzuzeigen wurde abschließend ein Demonstrator für die 7OSME, die weltweit größte Messe für Origami Science, entworfen.

I: Faltung



Abb. 1

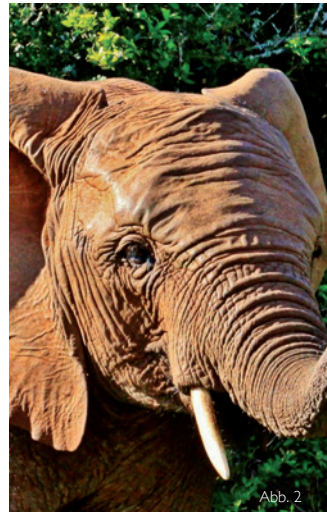


Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

Faltung - ein natürlicher Prozess

Gefaltete Gegenstände begegnen uns in unserer Umwelt eigentlich ständig - wir sind dies so gewohnt, dass wir die meisten gar nicht bewusst als Faltung wahrnehmen. Man denke nur an alltägliche Utensilien wie Brillen, Schirme, Liegestühle, Umschläge, Strassenkarten, Verpackungen aller Art oder gar Büroklammer. Außerdem treten Falten nicht nur auf, wenn sie bewusst als Mechanismus eingesetzt werden, sondern entstehen und organisieren sich oftmals von selbst oder sind Abbild der Kräfte, welcher ein bestimmter Gegenstand unterworfen ist. Man denke zum Beispiel an Kleidung, die einem

laufenden Zyklus von Falten und Entfalten unterworfen ist. Wir versuchen sogar sie durch den Prozess des Bügelns in den entfalteten Zustand zu zwingen, was aber spätestens durch den nächsten Waschgang zunichte gemacht wird.

Natürlich ist Faltung keine Erfindung der Menschheit. Jean-Marie Delarue untersuchte und beschrieb in seinem Forschungsreport „Construction plissées, figuration graphique et recherche structurale“ 1987 unzählige Arten von Falten und ihre verschiedenen Funktionen in der internen Organisation von Dingen und

Wesen. Er kam zu dem Schluss, dass Faltung einen universellen Prozess der Morphogenese zur Folge hat - mit maßgeblichen Einfluss sowohl auf die mineralische Welt als auch auf die Tier- und Pflanzenwelt. Gefaltete Strukturen entstehen überall in der Natur als Resultat aus vielen zusammenwirkenden Faktoren und Ansprüchen. Sie können mehrere verschiedene Funktionen in einer Struktur erfüllen - zum einen ermöglichen sie hohe Steifigkeit bei einer sehr geringen Menge an Material - zum anderen können sie eine stabile Konstruktion an nötigen Stellen gezielt flexibel machen. Eine weitere Funktion ist die eines Gelenks, welches durch einen zusätzlichen pneumatischen Mechanismus eine kinetische Struktur ermöglicht. Betrachtet man beispielsweise den Lebenszyklus einer Pflanze, so tritt in jeder Entwicklungsphase, vom Wachsen über das Erblühen bis zum Verwelken, Faltung auf. Blüten sind oftmals sogar in der Lage, sich tagsüber zu entfalten und in der Nacht zum Schutz wieder zusammenzuziehen. [1] [2]

Faltung um Platz zu sparen bzw. die Größe zu ändern ist für die Funktion von Lebewesen von entscheidender Bedeutung. Angefangen beim DNA-Strang, der in entfaltetem Zustand 2 Meter lang wäre und sich doch in jeder einzelnen Zelle befindet, über innere Organe, welche sich laufend ausdehnen und wieder schrumpfen, bis hin zum Gehirn, das nur durch geschickte Faltung der Gehirnwindungen überhaupt Platz im Kopf hat. Auch die Haut stellt eine komplexe gefaltete Struktur dar, welche sich nicht nur ausdehnen und zusammenziehen kann, sondern an Gelen-

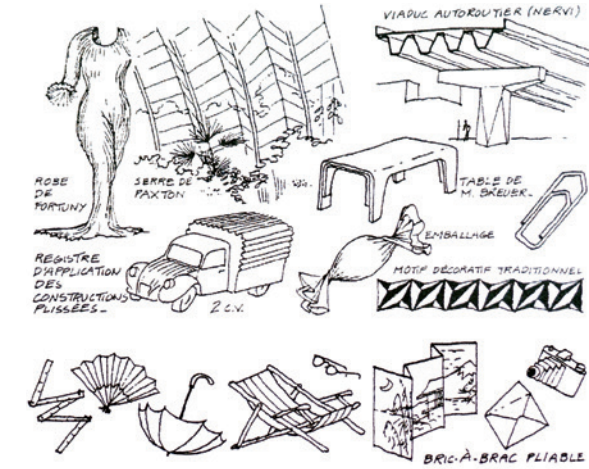


Abb. 5

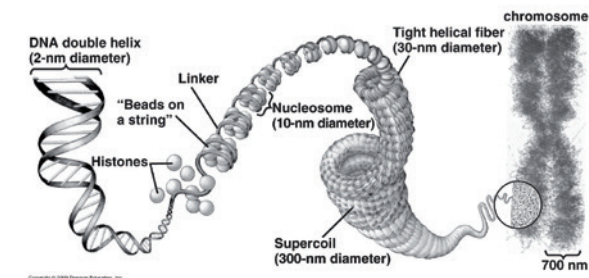


Abb. 6

Abb. 1: Gefaltete Gesteinsformationen
 Abb. 2: Stark gefaltete Haut eines Elefanten
 Abb. 3: Junge Buchenblätter beim Entfalten
 Abb. 4: Käfer mit entfaltenen Flügeln
 Abb. 5: Zeichnung von Jean Marie Delarue zur Illustration des breiten Feldes der Anwendungen von gefalteten Strukturen, 1997
 Abb. 6: Illustration der Art und Weise, wie ein meterlangere DNA Strang sich auf wenigen hundert Nanometern zu einem Chromosom faltet



Abb. 7

ken trotz sämtlicher Bewegungen des Körpers eine geschmeidige Hülle bildet. Sogar Insekten machen sich Faltung in sehr geschickter Weise zu Nutze - sie Falten und Entfalten gekonnt die filigranen Chitin Flügel oder lassen in kürzester Zeit Rüssel um ein vielfaches der ursprünglichen Länge anwachsen. [1] [2]

Aus geologischer Sicht ist Faltung das Abbild einer sich langsam, über Millionen Jahre ziehenden Bewegung - bzw. eine Momentaufnahme dieser. Durch die Kontinentaldrift der Erdmassen schieben diese sich an Berührungszonen in- bzw.

untereinander und durchmischen auf diese Weise die verschiedenen Erdschichten untereinander bzw. falten sich auf und erzeugen dadurch sogar die höchsten Gebirge. [1] [2]

Man sieht, es ist nicht ungewöhnlich, dass wir uns mit gefalteten Strukturen umgeben, sind diese doch überall in der Natur vorhanden. Das Entscheidende hierbei ist, die Stärken und Schwächen verschiedener Eigenschaften gefalteter Strukturen zu kennen und sie dementsprechend einzusetzen. [1] [2]



Abb. 8



Abb. 9

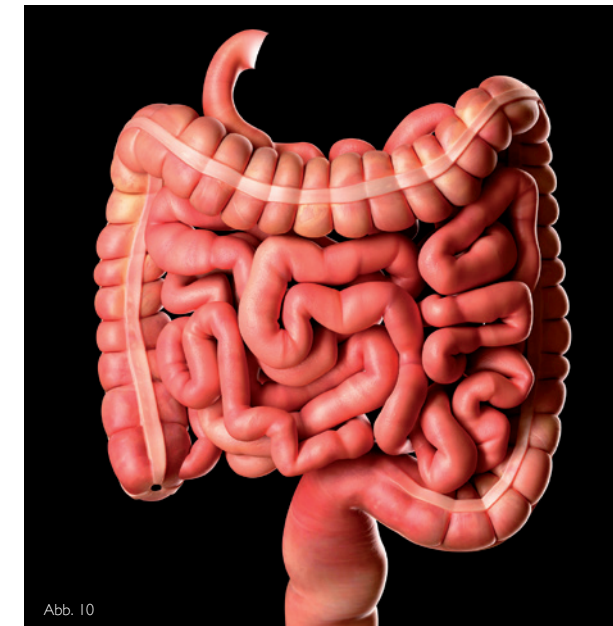


Abb. 10

Abb. 7: Zeitraffer des Erblühens einer Amaryllis
 Abb. 8: Junge Pflanze beim ersten Entfalten der Blätter
 Abb. 9: Gefaltete Lamellen oder Unterseite eines Pilzschirms
 Abb. 10: Der etwa 6 m lange Darm faltet sich im Bauchraum
 Abb. 11: Gefaltete Gesteinsschichten nahe der San Andreas Verwerfung
 Abb. 12: Strassen an der San Andreas Verwerfung müssen laufend ausgebessert werden

Nächste Seite: Abb. 13: Die Falten des Gehirns vergrößern dessen Oberfläche um mehr Platz für seine Funktionen zu bieten



Abb. 11



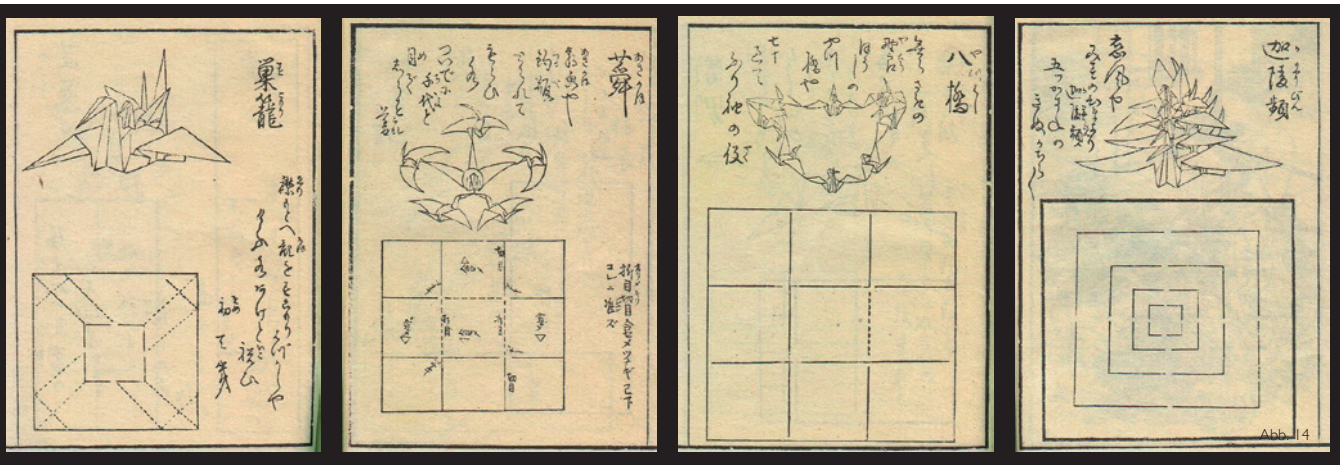
Abb. 12



Abb. 13

„Folding therefore offers the designer who seeks to format space and material for human use a real language to express tangible ideas.“

Jean-Marie Delarue



Origami - fernöstliche Faltkunst

Nachdem Papier um 105 n.Chr. in China erfunden wurde und man das Falten von Papier dort etwa seit dem 6. Jahrhundert als Kunstform ausübte, brachten Mönche es etwa 1000 Jahre später nach Japan. Hier wurde das Falten von Papier vor allem als rituellen Praktik mit meist religiösem Hintergrund verwendet, da der Rohstoff damals noch als Luxusgut galt. Als die erste handschriftliche Faltanleitung gilt Akisato Rito's Sembazuru Oriката von 1797, oder die tausend gefalteten Kraniche. Im späten 18. Jahrhundert wurde aus dem Wort Oriката für gefaltete Form schließlich Origami, aus den japanischen Wör-

tem „oru“ für Falten und „kami“ für Papier. Mit der Massenproduktion von Papier wurde Origami schließlich zur populären Kunstform. [1] [21]

Die Faltkunst arbeitet mit einer starken geometrischen Vereinfachung der interpretierten Objekte, wobei diese Verfremdung einen großen Spielraum für den künstlerischen Ausdruck offen lässt. Der Origami Meister Akira Yoshizawa - bekannt als Begründer des modernen Origami - schuf zeit seines Lebens über 50.000 Origami Figuren. Außerdem entwickelte er ein eigenes System für gedruckte Faltanleitungen, bei welchem die

einzelnen Faltschritte als leicht verständliche Diagramme dargestellt werden. Dadurch wurde es möglich komplexere Modelle aufzuzeichnen und weiterzugeben. Der heute gebräuchliche Standard, das Yoshizawa-Randlett-System, stellt eine weiterentwickelte Form von Yoshizawas System dar. [9] [27]

Das Credo bzw. die Herausforderung des traditionellen Origami besteht darin, eine mehr oder minder komplexe dreidimensionale Figur aus einem einzigen, quadratischen Blatt Papier zu falten, ohne das Papier zu zerschneiden oder Teile hinzuzufügen. Während den ersten Figuren noch relativ einfache und auch für Laien nachvollziehbare Faltpattern wie der Kranich oder das Segelboot zugrunde lagen, bestehen die aufwendigen Figuren heutiger Origami Künstler wie Robert Lang oder Jason Ku oft aus hochkomplexen Mustern. [22] [24]

Ein entscheidendes Hilfswerkzeug zum Erstellen komplexer Origami Faltpattern hat Robert Lang 1989 mit dem TreeMaker geschaffen. Mit dem frei erhältlichen Programm ist es möglich, eine komplizierte Figur zuerst in eine simple Strichgrafik umzuwandeln, um dann ein Faltpattern zu generieren, welches immer weiter verfeinert wird. Nicht selten werden auch von Wissenschaftlern wie Eric Demaine oder Jun Mitani fantastische Origami Skulpturen erschaffen, die mit Hilfe von Algorithmen am Computer erstellt und in einer sehr zeitaufwendigen und präzisen Faltungen zu räumlichen Strukturen werden. [1] [23] [25] [26]

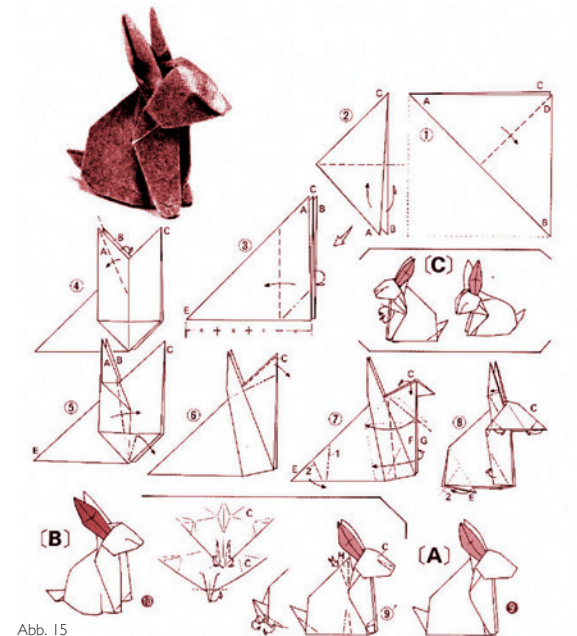


Abb. 15

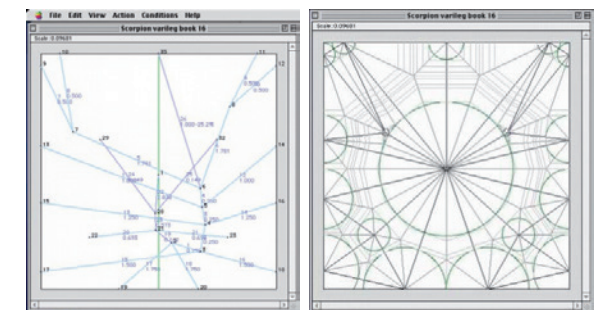


Abb. 16

Abb. 14 : Auszug aus dem ersten Origami-Buch Senbazuru Oriката von 1797

Abb. 15: Origami Hase von Meister Akira Yoshizawa
Abb. 16: Umwandlung von Strichgrafik in ein Faltpattern mit Hilfe des Treemakers von Robert Lang

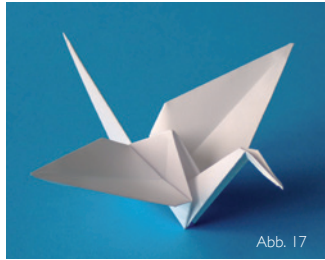


Abb. 17



Abb. 19



Abb. 21



Abb. 23

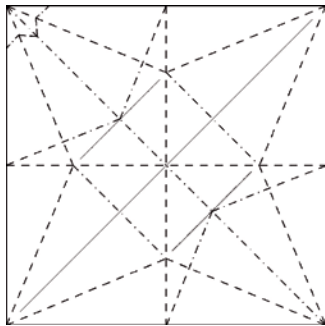


Abb. 18

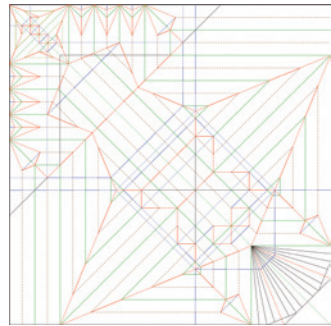


Abb. 20

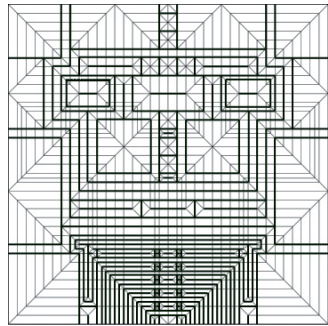


Abb. 22

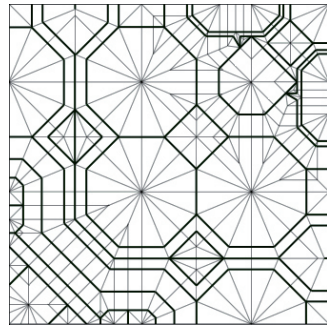


Abb. 24

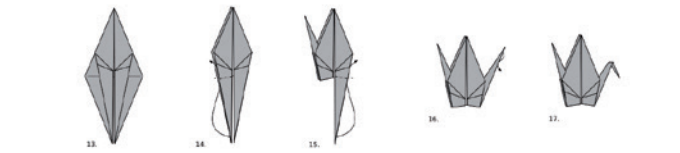
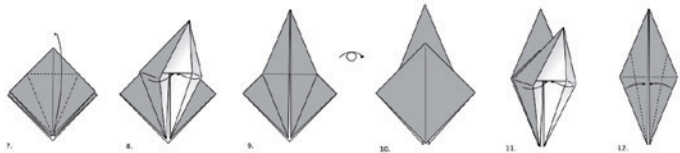
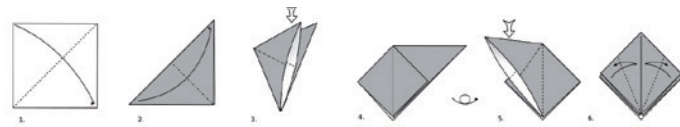


Abb. 25

Abb. 17: Gefalteter Kranich, eines der ersten bekannten Beispiele für gefaltete Origami Kunst

Abb. 18: Das recht einfache Faltpattern des Kranichs

Abb. 19: Opus 681, Flying Owl von Robert Lang

Abb. 20: Das aufwendige Faltpattern der Flying Owl lässt die später entstehende Figur erahnen

Abb. 21: Interpretation einer Wespe von Jason Ku aus dem Jahr 2004

Abb. 22: Das hochkomplexe Faltpattern lässt keinerlei Schlüsse auf die zu entstehende Wespe erkennen

Abb. 23: Gefaltete Version eines Nazgul von Jason Ku

Abb. 24: Das komplexe Faltpattern eines Nazguls

Abb. 25: Ausführliche Faltanleitung zur Erstellung eines traditionellen japanischen Kranichs



Abb. 26



Abb. 27

Abb. 26: Gefaltete Origamiskulpturen des am MIT lehrenden Mathematikprofessors und Origamikünstlers Erik Demaine. Die Kunstwerke mit dem Titel „Computational Origami“ stammen aus dem Jahr 2008 und sind Teil der permanenten Ausstellung des Museum of Modern Art (MoMA)

Abb. 27: Geometrische Origamiskulpturen von Professor Jun Mitani des Instituts für Computer Science an der Universität Tsukuba in Japan

Faltung & Architektur

Ende des 20. Jahrhunderts tauchte im architektonischen Diskurs der Begriff der Faltung auf und wurde von Architekten wie Peter Eisenman, Frank O. Gehry, Jeffrey Kipnis und Greg Lynn als Alternative zum Dekonstruktivismus diskutiert. Die Anregung dazu kam vom französischen Philosophen Gilles Deleuze und seinem Buch „Le Pli: Leibniz et le baroque“. Deleuze schreibt von der unendlichen Generierung von Falten im Barock, welche er differenziert als die Faltung der Materie und die Faltung in der Seele. Laut Deleuze stellte Leibniz sich die Seele als Monade vor – eine in sich geschlossene Einheit – in der die äußere Welt nur als innere Vorstellung aktualisiert wird – sie existiert nur in den Falten der Seele. Leibniz verwendete auch ein architektonisches Modell – das Bild eines zweigeschossigen Hauses – um Materie und Seele zu erklären. Die untere Etage repräsentiert die Materie, die Öffnungen stehen für die fünf Sinne, mit welcher sie wahrgenommen wird. In der oberen Etage, einer dunklen Kammer ohne Fenster, tapeziert mit einer von Falten untergliederten Leinwand, ist die Seele eingeschlossen. Die Kommunikation findet durch eine Art von Widerhall zwischen den zwei Etagen statt – ähnlich einem Musiksalon, der die unten sichtbaren

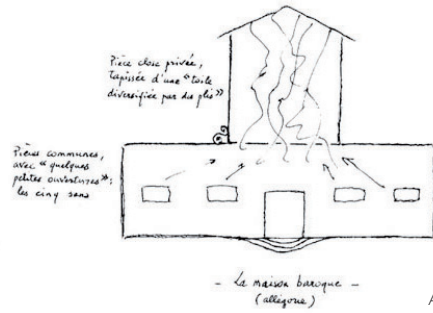


Abb. 28

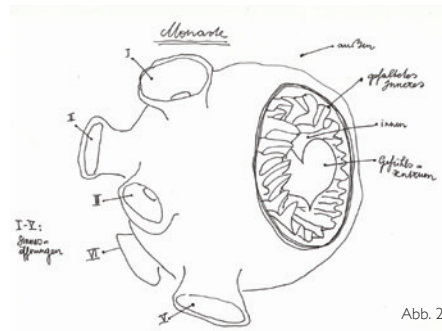


Abb. 29

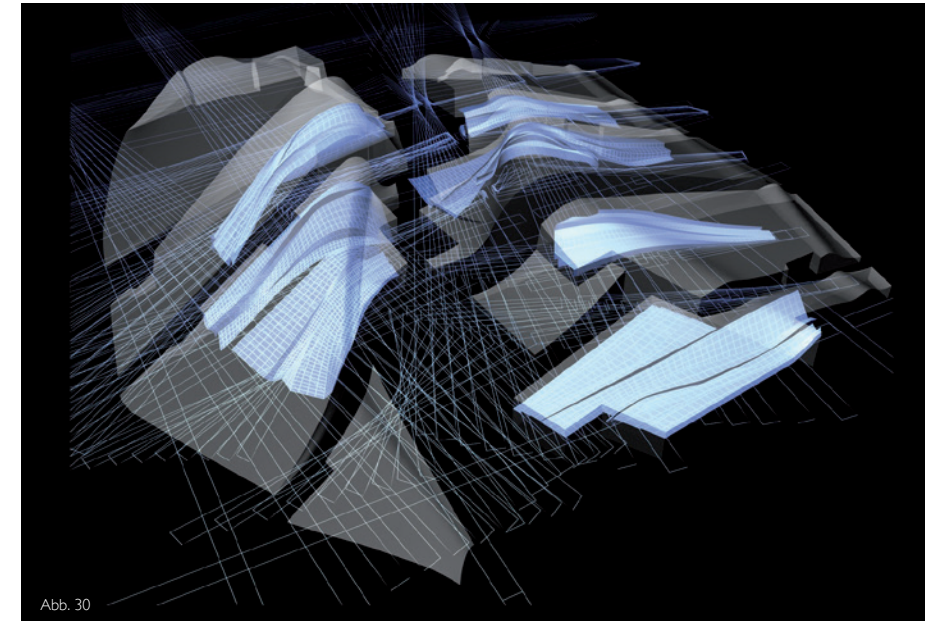


Abb. 30



Abb. 31

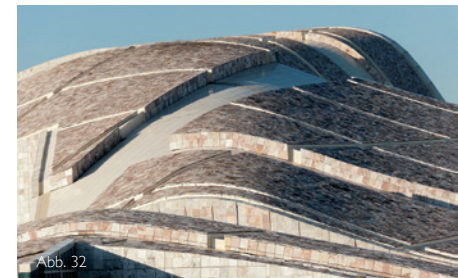


Abb. 32

Bewegungen in Töne übersetzt. Das eigentlich barocke an dieser Vorstellung ist die Aufteilung in der Welt in verschiedene Etagen, getrennt durch eine Falte, welche auf den beiden Seiten unterschiedliche Auswirkungen hat. [3] [4]

Greg Lynn beschreibt in seinem Aufsatz „Architectural curvilinearity – the folded, the pliant and the supple“ Faltung als neue architektonische Antwort auf komplexen kulturellen und formalen Kontext und somit als Alternative einerseits zum Dekonstruktivismus, und andererseits zu Neo-Klassizismus und Modernismus. Er bezeichnet die

Architektur der Falte als eine raffinierte Taktik zur Integration von Unterschieden in heterogene und dennoch kontinuierliche Systeme – analog zur geologischen Entstehung Mineralogischer Sedimentschichten oder dem kulinarischen Mischen von Zutaten. Als Instrumente dieser neuen Architektur nennt er Viskosität und Flexibilität. Er beschreibt diese neuen weichen Formen als klebrig und flexibel – Dinge in ihrer Umgebung tendieren dazu, ihnen anzuhafeln und werden im Prozess der Deformierung der weichen Form in sie eingearbeitet. [4]

Abb. 28: Das barocke Haus als architektonisches Modell der Faltung der Seele

Abb. 29: Interpretation einer Monade, wie sie von Leibniz beschrieben wird

Abb. 30: Diagramm des Kulturzentrums in Santiago de Compostela von Peter Eisenman

Abb. 31 und 32: Fotos des Kulturzentrums in Santiago de Compostela in Spanien, fertiggestellt 2011

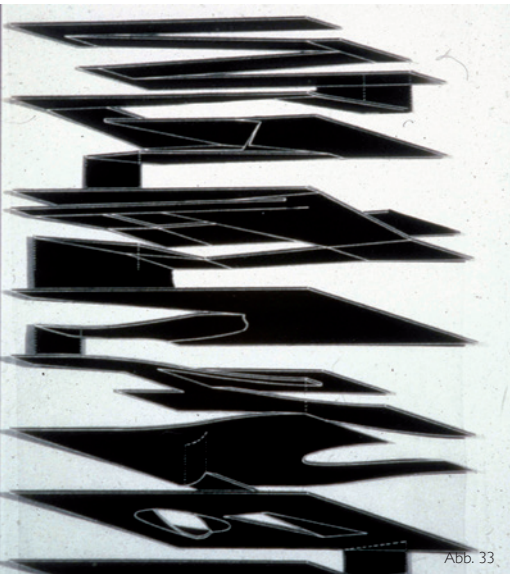


Abb. 33

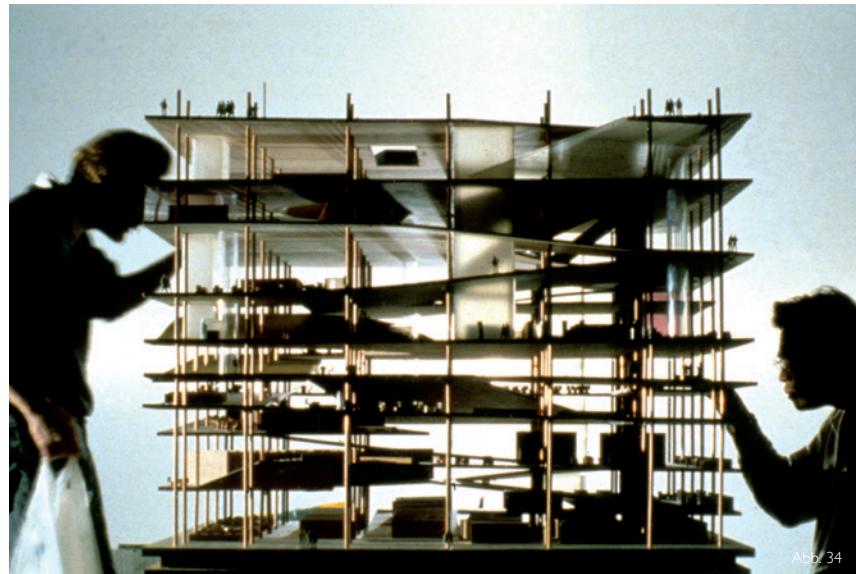


Abb. 34

Neben diesem theoretischen Ansatz, das Programm eines Gebäudes mit dem kulturellen und formalen Kontext zu durchmischen, kann man Faltung in der Architektur auch als gestalterisches Mittel einzusetzen und auf diese Weise Komplexität zu erzeugen. Die Faltung wird so zum Bindeglied zwischen dem Mikrokosmos der Einzelteile, welche durch ihre Heterogenität ein fast chaotisches Bild hinterlassen und Makrokosmos der einheitlichen Form, in dem das Zusammenspiel der gefalteten Einzelteile eine kontinuierliche Komposition erzeugt. In diesem Sinn könnte man gefaltete Strukturen mit semibiologischen Formen vergleichen, welche durch komplexe

Maschinen produziert werden und in ihrer Vielfältigkeit an natürliche Organismen erinnern. [3]

Ein sehr einflussreiches aber nicht realisiertes Projekt und vielleicht das erste, welches den philosophischen Ansatz Deleuzes in einen architektonischen Entwurf einarbeitete war „2 Bibliothèques de Jussieu“ in Paris von OMA aus dem Jahr 1993. Der Beitrag zur Gestaltung einer Bibliothek auf dem Universitätscampus verwendete Faltung sowohl als organisatorisches Diagramm wie auch als räumliches Instrument zum Erzeugen von Dichte. Ein durchgehender gefalteter Pfad, „the social magic carpet“ wie

Koolhaas ihn nannte, führte durch das ganze Gebäude und verknüpfte die programmatischen Bereiche miteinander, wodurch eine Art von innerer urbaner Landschaft entstand. Mit dem Bau des Educatoriums in Utrecht 1997 schuf Koolhaas vier Jahre später „...an entirely new kind of spatial experience in which it is hard to tell where the exterior ends and the interior begins.“, wie Bart Lootsma es eindringlich beschrieb. Die Böden aus Beton verbinden die verschiedenen Ebenen, sie falten sich und erzeugen eine einzigartige tektonische Landschaft. [3]

In dem Entwurf für den 2002 in Japan fertiggestellten Yokohama Terminal von Foreign Office Architects bestimmt Faltung jeden Aspekt des Designs. Das Dach wurde mit geöffneten Schnitten zur durchgehenden öffentlichen Landschaft, welche fließend in den Terminal übergeht und so die Funktionen des Terminals mit dem Gefüge der Stadt verflechten. Das Programm im Inneren des Terminals wurde auf mehreren Ebenen durch vernetzte Wege organisiert. Während das Gebäude sich formal als topologische Fläche manifestiert, welche mit sanften Übergängen die einzelnen programmatischen Elemente verbindet, wurde die Konstruktion im Inneren durch Origami inspirierte gefaltete Stahlträger realisiert und so Faltung zusätzlich auf struktureller Ebene in den Entwurf eingebracht. [3]



Abb. 35



Abb. 36

Abb. 33 und 34: Diagramm und Modell zu „Two libraries at Jussieu“ einem Entwurf von OMA für die technische Universität von Paris aus dem Jahr 1992
Abb. 35 und 36: Die gefaltete Außenwand des Educatoriums in Utrecht von OMA, fertiggestellt 1997



Abb. 37

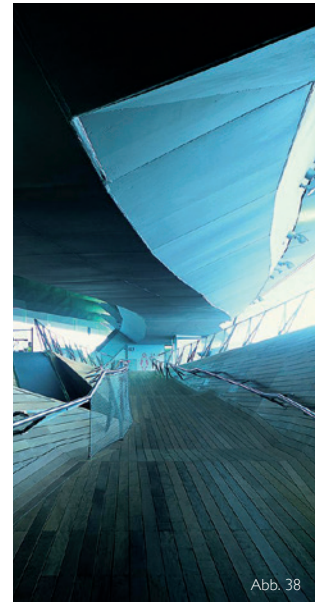


Abb. 38



Abb. 39



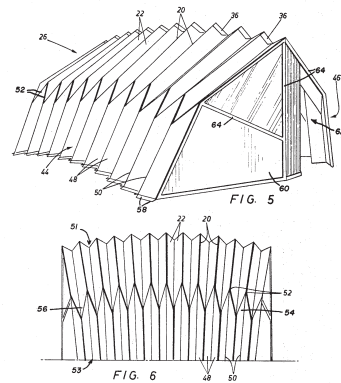
Abb. 40

Abb. 37 bis 40: Der Yokohama International Terminal von FOA aus dem Jahr 2002 verflechtet die Funktionen des Terminals mit der Stadt. Im Inneren wurden Stahlträger nach Origami inspirierten Faltpatternen gestaltet.

„Pliancy allows architecture to become involved in complexity through flexibility.“

Greg Lynn

Oct. 29, 1968 H. G. YATES ET AL. 3,407,546
 FOLDABLE SHELTER STRUCTURE WITH ZIG-ZAG ROOF PROFILE
 Filed Feb. 23, 1965 2 Sheets-Sheet 2



Oct. 29, 1968 H. G. YATES ET AL. 3,407,546
 FOLDABLE SHELTER STRUCTURE WITH ZIG-ZAG ROOF PROFILE
 Filed Feb. 23, 1965 2 Sheets-Sheet 1

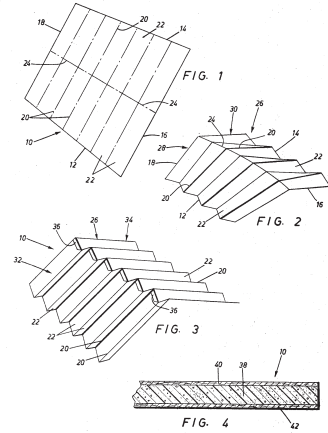


Abb. 41

Abb. 41: Patent für eine faltbare Unterkunft mit Zig-Zag Dachprofil von Yates und Geoffrey aus dem Jahr 1965
 Abb. 42: Vergleich der Faltkanten von Straight Crease Folding (SCF) und Curved Crease Folding (CCF)

Technische Faltung & Structural Origami

Origami beflügelte schon die Fantasie von Architekten wie Josef Albers im Bauhaus und wurde so ein fester Bestandteil einer umfassenden Architekturausbildung. Auch heute noch ist sie in etlichen Bereichen eine vielschichtige Inspirationsquelle und Ausgangspunkt zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten an renommierten Universitäten und Forschungseinrichtungen für die Erforschung neuer Technologien. Obwohl Origami eigentlich als Kunstform bekannt ist, beschäftigen sich größtenteils Mathematiker, Ingenieure und Architekten mit den strukturellen Eigenschaften gefalteter Konstruktionen, wodurch sich in den letzten Jahren die technische Faltung und Structural Origami entwickelt haben. [6]

Da in der Industrie Platten- und Bahnmaterialien wie Metall und Holz standardmäßig in großen Mengen hergestellt und weiterverarbeitet werden, sind durch Faltung inspirierte Konstruktions- und Fabrikationsmethoden, welche aus ebenem Material dreidimensionale Strukturen mit komplexen Eigenschaften generieren können, eine vielversprechende Herangehensweise für Architekten und Designer. Der Begriff Structural Origami wurde 2016 auf der gleichnamigen Ausstellung in Tokyo

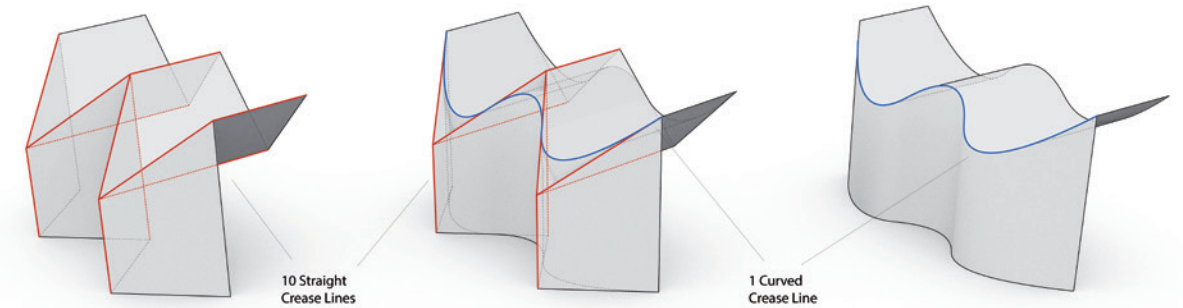


Abb. 42

zum ersten Mal der breiten Öffentlichkeit vorgestellt und beschreibt das spezielle Interesse der Nutzung von Origami-Techniken, um tragfähige Strukturen zu erzeugen. [14]

Faltungen können in Straight Crease Folding (SCF) und Curved Crease Folding (CCF) unterteilt werden. Beim SCF, wie der Name schon impliziert, besteht die Faltung aus geraden Faltkanten und die gefalteten Flächen sind daher in der Regel planar. Solche Faltsysteme fanden aufgrund einer neuen Formenwelt und interessanter struktureller Eigenschaften schon viele Anwendungen in Design und Architektur - etwa in dem Patent für einen faltbaren Unterschlupf von 1966. Beim CCF hingegen bestehen die Faltmuster aus Kurven unterschiedlicher Krümmung und

die Flächen sind in der Regel gebogen. Solche Faltungen sind in der Regel komplexer, verfügen aber neben einer unbestreitbaren Ästhetik über bestimmte günstige Eigenschaften gegenüber SCF Systemen. Der größte Vorteil des CCF gegenüber der Faltung entlang gerader Faltkanten besteht in der Reduktion der Anzahl und Länge der Faltkanten, was eine erhebliche Erleichterung für Fabrikation und Assembly zur Folge hat, da jede zusätzliche Faltkante die Komplexität einer Struktur erhöht. [17]

Rigid Foldable Origami bezeichnet Strukturen, bei welchen alle Einzelteile der Origami Tessellierung während des Faltprozesses unverändert bzw. rigid bleiben und sich nur zueinander an den Faltlinien als gedachte Gelenke drehen.



Abb. 43



Abb. 44

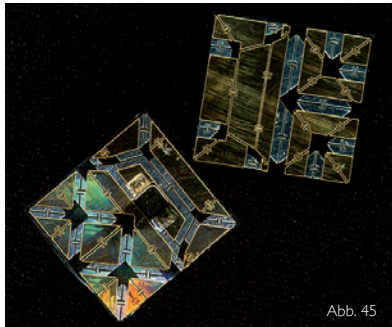


Abb. 45

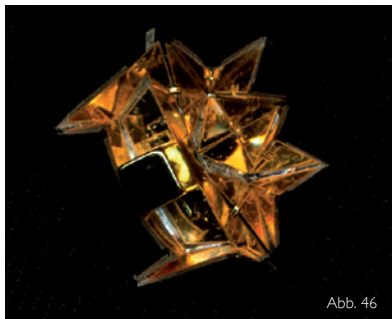


Abb. 46

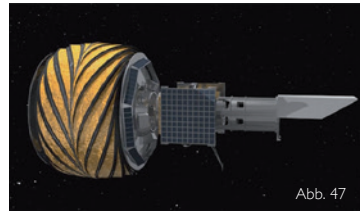


Abb. 47

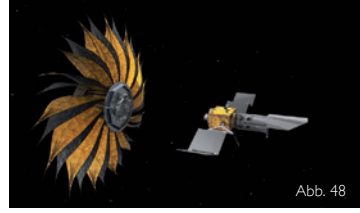


Abb. 48

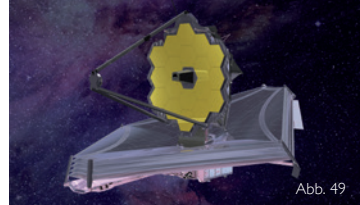


Abb. 49

Diese Eigenschaft ist sehr interessant für Systeme aus nicht biegbaren Plattenmaterialien, wobei der Prozess der Faltung hier in der Regel durch die Assembly der einzelnen Teile ersetzt wird. Das Feld des Rigid Foldable Origami ist vorallem durch Arbeiten von Robert Lang, Erik Demaine und Tomohiro Tachi bereits sehr gründlich erforscht - letzterer hat mit dem Rigid Origami Simulator sogar eine Software geschaffen, mit der nahezu jede Geometrie in ein Origami Faltmuster übersetzt werden kann. Mittlerweile findet man Rigid Foldable Origami in etlichen experimentellen Anwendungen wie faltbaren Robotern, Faltungen

im Nanobereich, selbstfaltenden Systemen zur Expansion/Reduktion, entfaltbaren Sonnensegeln bzw. Beschattungselementen und vielen weiteren. [8] [9] [12] [13]

Im Forschungsgebiet des Curved Crease Folding allerdings sind Forscher gerade erst dabei zu verstehen, wie gekrümmte Faltungen mathematisch genau funktionieren, was essentiell für die exakte Berechnung von Falt- und Schnittmustern für zukünftige Anwendungen ist. Ausgangspunkt für das heutige Interesse an CCF sind die historischen Arbeiten von David A. Huffman und Ron Resch

in den 1970er Jahren. Der Mathematiker Huffman veröffentlichte 1976 eine Arbeit über das lokale Verhalten gekrümmter Falten, welches auch heute noch als einer der wegweisendsten Texte für diese Art der Geometrie gilt. Nachdem das Thema warscheinlich auch wegen seiner Komplexität jahrelang ein Schattendasein fristete, wurde es vor wenigen Jahren von dem Mathematiker Erik Demaine und dem Architekten Duks Koschitz am MIT aufbereitet und rückte so erneut ins Interesse von Ingenieuren, Architekten und Künstlern, welche gekrümmte Faltungen zum einen ästhetisch ansprechend finden und außerdem die guten statische Eigenschaften zu schätzen wissen. [5] [6] [7]

Martin Kilian, Simon Flöry, Zhonggui Chen, Niloy J. Mitra, Alla Sheffer und Helmut Pottmann von der TU Wien präsentierten mit ihrer 2008 veröffentlichten Arbeit „Curved Folding“ einen Weg, die Faltkanten bzw. Biegelinien in Systemen von abwickelbaren Flächen zu optimieren und eröffneten damit das Designpotential von Huffmans Arbeiten für Architektur und Industrial Design. Erste konkrete Anwendungen des CCF ließen nicht lange auf sich warten, wie beispielsweise der Flux Chair™ von Flux furniture® aus dem Jahr 2009 oder das Patent einer Methode um Plattenmaterial zu einer gefalteten Struktur zu biegen von Gregory Epps aus dem Jahr 2010. [11] [28] [29]

Die herausragende Tragfähigkeit von Systemen gekrümmter Faltung konnten Christopher Robeller, Seyed Sina Nabaei und Yves Weinand vom EPFL Laboratory for Timber Constructions IBOIS 2014

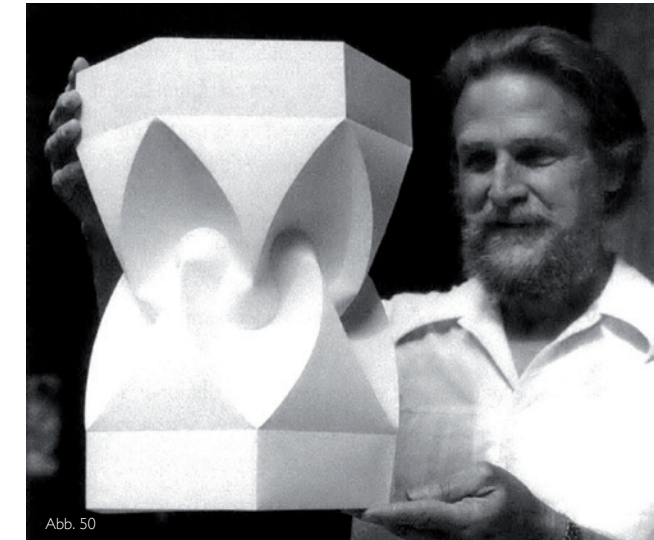


Abb. 50



Abb. 51

Abb. 43: Verschiedenen Plattenmaterialien aus Holz
Abb. 44: Versandfertige Stahlrollen in einem Gusswerk
Abb. 45 & 46: Versuche zu winzigen selbstfaltenden Origami-Robotern am MIT in Boston
Abb. 47 & 48: Prototyp des „Flower Power Starshade“ der NASA für zukünftige Weltraummissionen
Abb. 49: Der faltbare Sonnenschutz des Kepler Weltraumteleskops der NASA
Abb. 50: David A. Huffman und sein „hexagonal tower“
Abb. 51: Ron Resch mit seinen tessellierten Faltmustern



Abb. 52



Abb. 53



Abb. 54

Abb. 52: LVL-Connector eines Versuchsbaus des EPFL Laboratory for Timber Constructions 2014
 Abb. 53: Der Versuchsbau mit über 13m Spannweite zum Nachweis der Tragfähigkeit gekrümmter Faltungen des EPFL Laboratory for Timber Constructions 2014
 Abb. 54: Skelettierten Polyeder - Case Study 2 der Masterthesis von Suryansh Chandra aus dem Jahr 2012

unter Beweis stellen, indem sie mit einer Flachdecke, welche an den Seiten mit einer gekrümmten Faltung auf zwei gebogenen Trägern auflagert, 13,5 Meter Spannweite erreichten. Dafür war ohne weitere Hilfskonstruktionen Holz mit einer Materialstärke von 77 Millimetern ausreichend. Die einzelnen konkaven und konvexen Holzteile wurden hierfür in ihrer späteren gebogenen Form durch Verleimung vorgefertigt. Diese wurden danach an der unteren Faltecke per 5-achsiger CNC Fräse mit einer Schwabenschwanz Holzverbindung versehen, während an der oberen, flachen Kante ein spezieller LVL-Connector zum Einsatz kam, um die Einzelteile kraftschlüssig zu einer Struktur vereinen zu können. [18]

Ein weiteres gelungenes Beispiel für die Kombination von Tragfähigkeit und Eleganz sind die aus Aluminium gefertigten, skelettierten Polyeder von Suryansh Chandra, Shajay Bhooshan und Mustafa El-Sayed vom Büro Zaha Hadid Architects in London aus dem Jahr 2012. Die Konstruktion stellt einen Prototyp für gekrümmte Faltung dar, der die Synergien zwischen zeitgenössischer Architektur, Ingenieurwesen und dem Einsatz von Robotern bei der Fabrikation eindrucksvoll demonstriert. Mit einem ähnlichen Zugang entwarf und konstruierte dasselbe Team eine vielbeachtete Skulptur für die Biennale 2012 in Venedig. [15] [16]

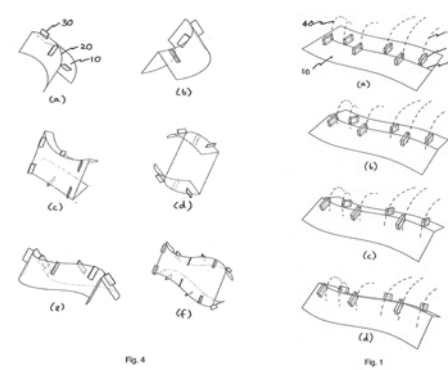


Fig. 4

Fig. 1

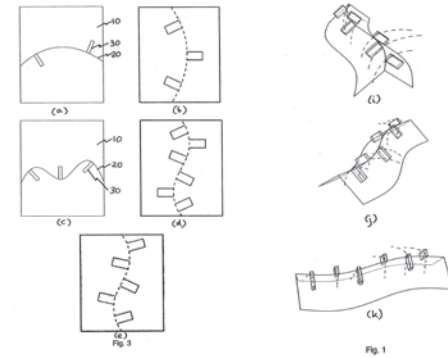


Fig. 4

Fig. 1

Abb. 55

Abb. 55: Patent für eine Methode um Plattenmaterial zu einer gefalteten Struktur zu biegen, Gregory Epps, 2010
 Abb. 56: Flux Chair™ von Flux furniture®, 2009
 Abb. 57: Beispiel der Funktionsweise des Organizers von Erik Demaine und Tomohiro Tachi
 Abb. 58: Komplex tesseliertes Faltmuster als Beispiel für Computational Origami Design gefaltet aus einer Aluminiumplatte von Tomohiro Tachi

Nächste Seite: Abb. 59: Die Arum Installation von Zaha Hadid Architects auf Venice Architecture Biennale 2012



Abb. 56

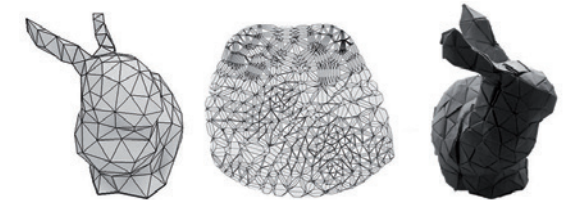


Abb. 57

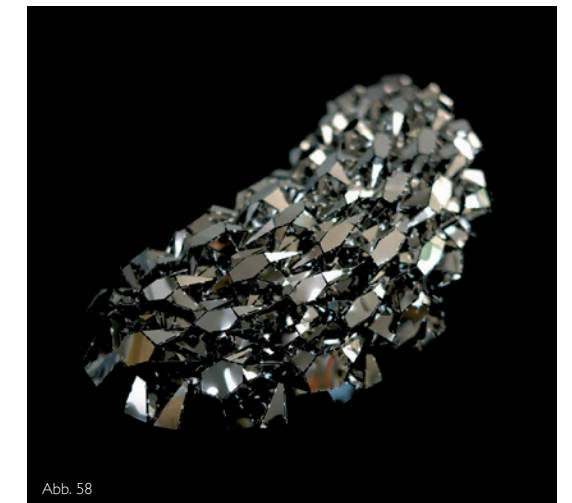


Abb. 58



Abb. 59

*„The model for the sciences of matter is the ,origami‘,
as the Japanese philosopher might say, or the art of
folding paper.“*

Gilles Deleuze

II: fold²structure



Abb. 60

Abb. 60, 62, 63: „Bent Interwoven Stripes“ Modelle auf der Ausstellung The Nature of Form“ in der Franzensfeste 2016

Abb. 61: Visualisierung eines unrealisierten Modells im Rahmen der Ausstellung in der Franzensfeste

Bent Interwoven Stripes

Mit diesem Kapitel beginnt die Dokumentation der eigenen Experimente und Untersuchungen zu den Themen Straight Crease Folding (SCF) und Curved Crease Folding (CCF) sowie zum Verhalten planarer und gebogener Strukturen zur Erzeugung räumlicher Konstruktionen. Die Herangehensweise führte stets von der Idee bzw. der Zeichnung über das Modell zu einer Simulation am Computer, wobei oftmals die Schnittmuster und Faltdiagramme digital erstellt wurden und so ein konstanter Feedback-Loop entstand.

Erste Studien und Modelle wurden immer mit Papier oder Karton erstellt, da es viele Vorteile für ein schnelles Experimentieren mit sich bringt und die zur Faltung entscheidenden Materialeigenschaften Schneidbarkeit und Faltbarkeit vereint. Später wurden größere Modelle und Versuchsbauten auch in Holz realisiert. Das stellt einerseits einen realen Baustoff mit statischen Eigenschaften wie Biegesteifigkeit und relevantem Eigengewicht dar, womit die gefaltete Struktur von der Zero-Thickness Modellstudie in ein echtes Statisches Modell übergeht. Andererseits muss dadurch sowohl der Fertigungsprozess als auch die Assembly konkret geplant werden.



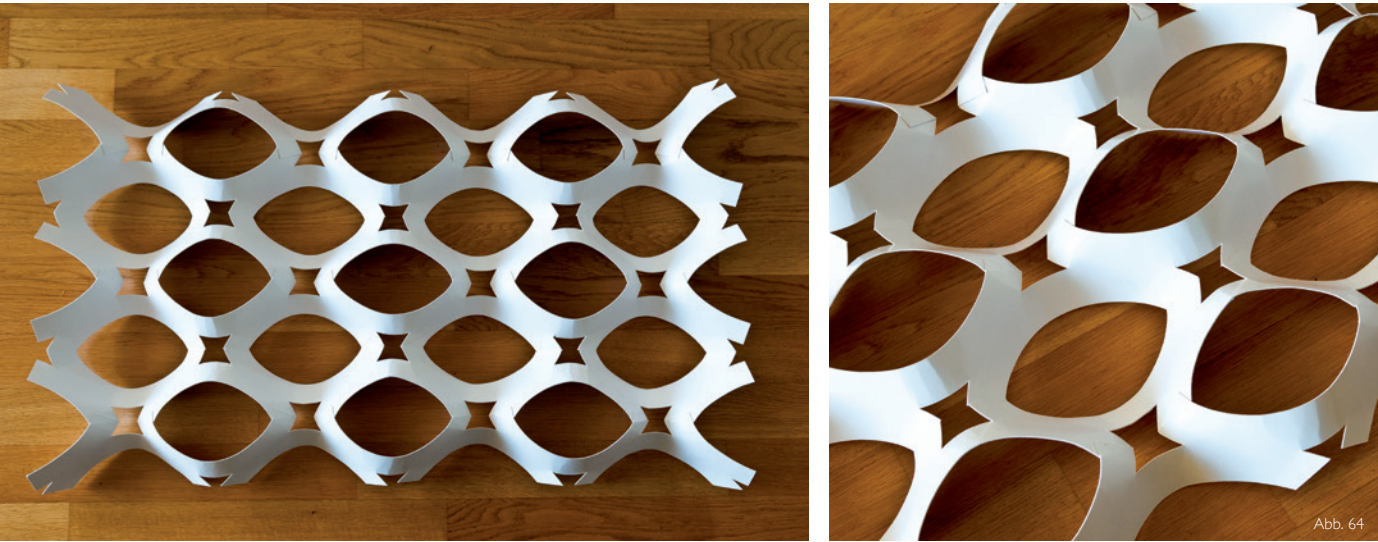
Abb. 61



Abb. 62



Abb. 63



Ausgangspunkt der Arbeit war die Präsentation von Modellen unter dem Namen „Bent Interwoven Stripes“ im Rahmen der Ausstellung „The Nature of Form“ in der Franzensfeste, organisiert von Guenther H. Filz vom Institut für Konstruktion und Gestaltung an der Universität Innsbruck 2016. Die ausgestellten Modelle untersuchten die Möglichkeiten und Potentiale zur Generierung von Flächen und räumliche Strukturen aus einerseits gefalteten und andererseits gebogenen, jeweils aber planar abwickelbaren Streifen. Die so entstandenen filigranen Strukturen waren der Start für die weitere Untersuchung der konstruktiven und formalen Eigenschaften von Systemen verflochtener Streifen. [19]

Im Folgenden wurde mit etlichen Modellstudien

und zeitgleich erstellten digitalen Simulationen die strukturellen Eigenschaften und eine mögliche Beeinflussung dieser ausgelotet sowie eine erste Parametrisierung des Systems vorgenommen. Die Verflechtung durch doppelte Streifen im alternierenden Hoch- und Tiefpunkten generierte im System eine statische Höhe, welche den Modellen eine zusätzliche Integrität und Stabilität verlieh.

Durch die inhaltliche Nähe zur der Dissertation „Linear Folded Stripes“ von Rupert Maleczech aus dem Jahr 2014, wurde eine genauere Untersuchung der „Bent Interwoven Stripes“ und Anwendung auf das System der „Linear Folded Stripes“ in Betracht gezogen. [20]

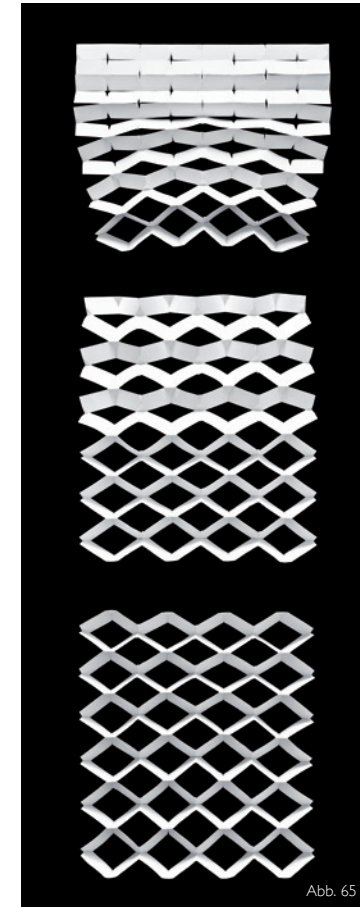


Abb. 64: Bent Interwoven Stripes, reguläres Pattern
 Abb. 65: Faltung eines Bogen Papiers zu einem Faltpattern mit Hilfe von Schnitten
 Abb. 66: Variationen der BIS und zugehörige Faltdiagramme
 Nächste Seite: Abb. 67,68: Diverse Renderings und Modelle von Streifensystemen

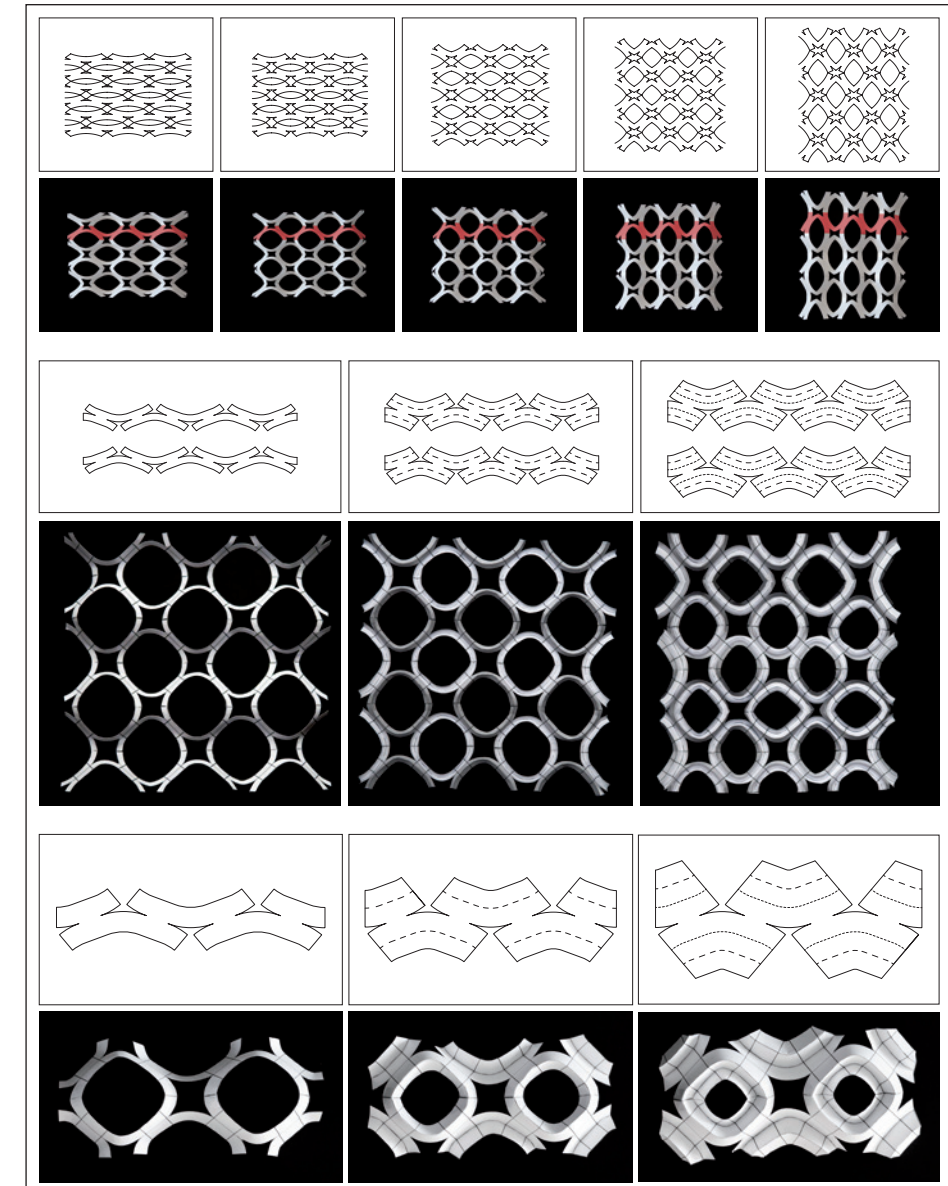
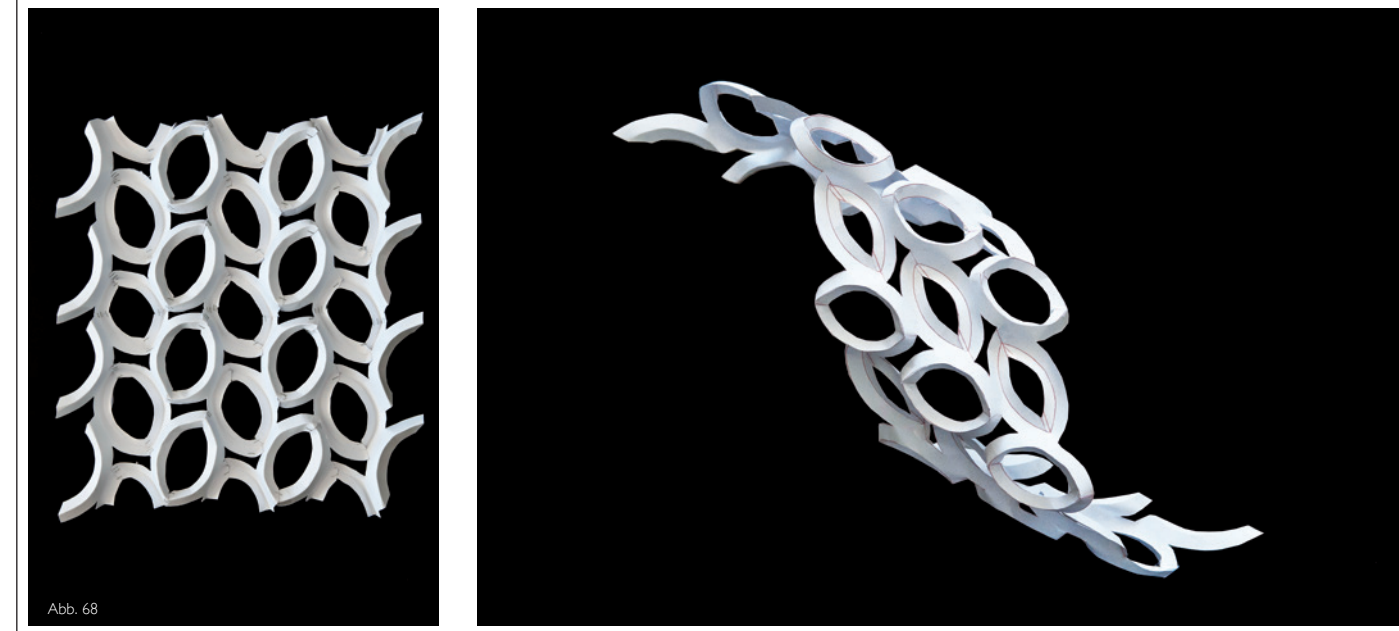
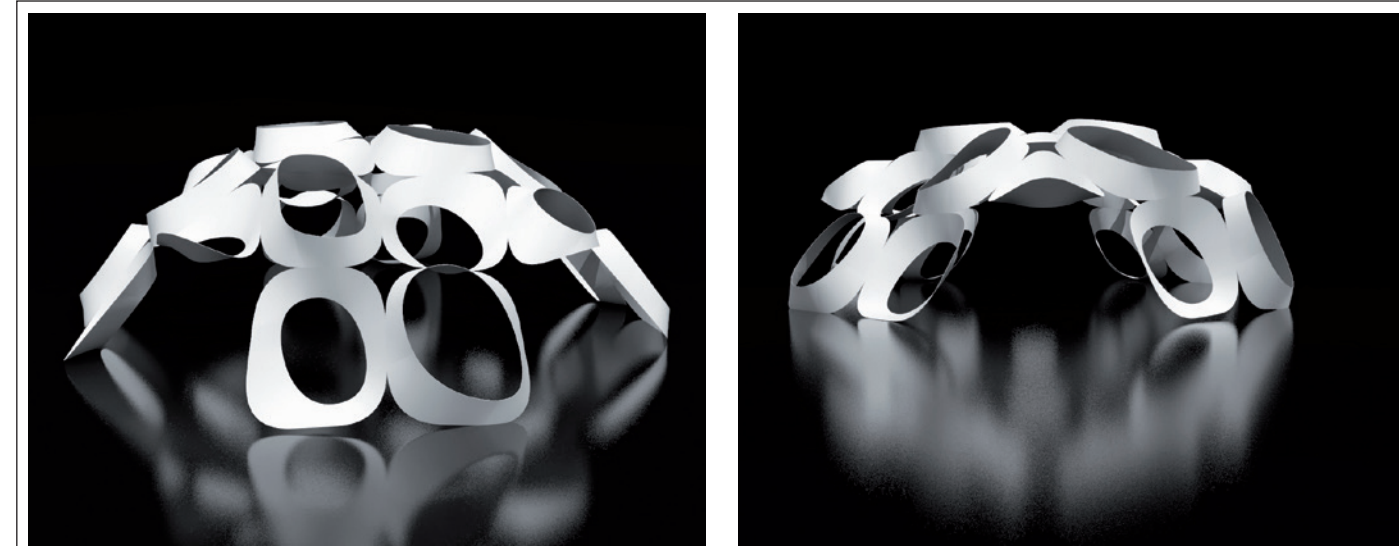
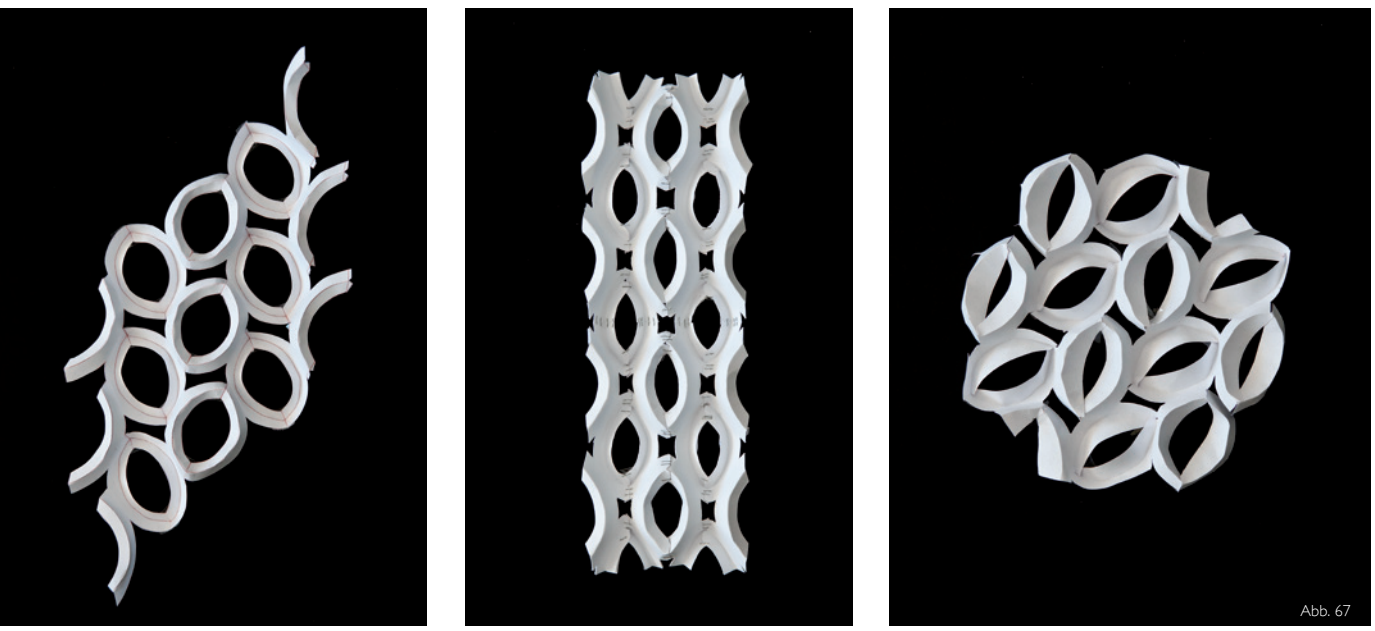
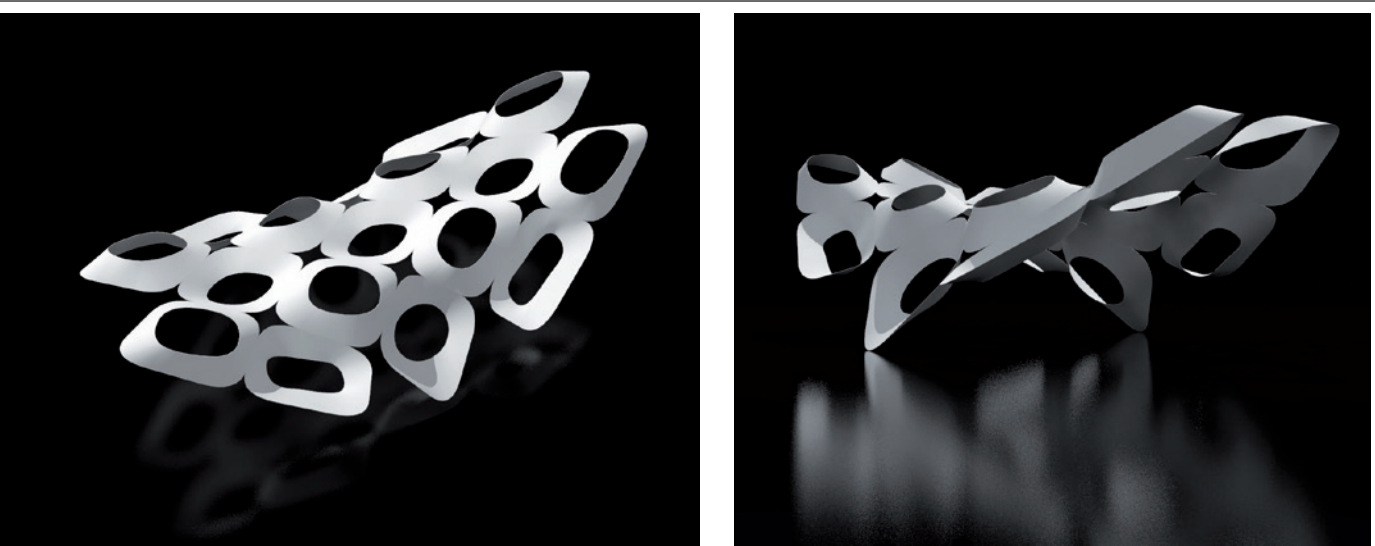


Abb. 66



Linear Folded Interwoven Stripes

Die Motivation für die detaillierte Untersuchung der Funktionsweise und möglicher Anwendungsgebiete der „Linear Folded Interwoven Stripes“ LFIS basiert auf der Tatsache, dass dieses System sowohl für die Fertigung als auch während der Montage viele Vorteile mit sich brächte. Zum einen ermöglicht es unter Berücksichtigung gewisser Constraints die Errichtung komplexer dreidimensionaler Leichtbaustrukturen, zum anderen bestehen diese Konstruktionen aus linearen, planaren Bauteilen, welche relativ einfach gefertigt werden können und für den Transport oder die Lagerung platzsparend stapelbar wären.

Die untersuchten LFIS basieren auf den Linear Folded Stripes - erstmals beschrieben von Rupert Maleczek 2014. Das System wird um eine zusätzliche strukturelle Ebene erweitert, indem aus einfachen Streifen Doppelstreifen mit verbindenden Segmenten werden. Die gefalteten Streifen sind ausnahmslos rigid faltbar - in der gesamten Struktur entsteht keine Biegung. Außerdem wird die Möglichkeit erwähnt, mehrere Systeme von verflochtenen Streifen wiederum zu verbinden und so in einem additiven Verfahren eine bestehende Konstruktion aus LFIS zu erweitern.

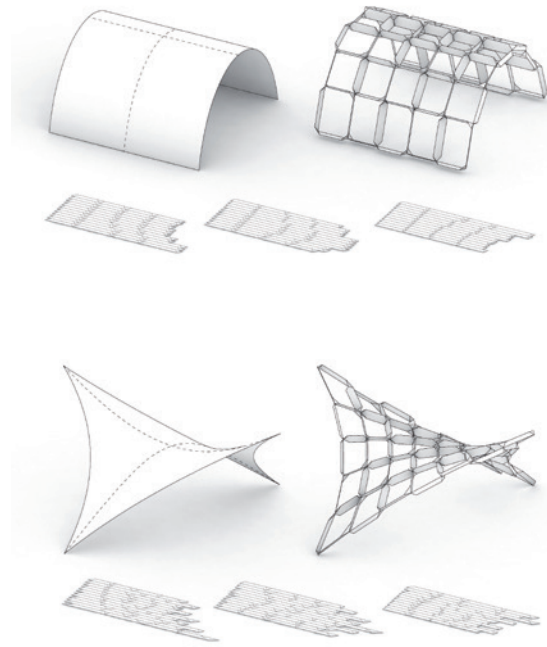


Abb. 69

Abb. 69: Annäherung von einfach und doppelt gekrümmten Flächen durch LFIS

Abb. 70: Offene bzw. geschlossene quadratische und hexagonale Streifensysteme

Abb. 71: Ein Segment eines „Interwoven Stripes“ für offene und geschlossene Systeme

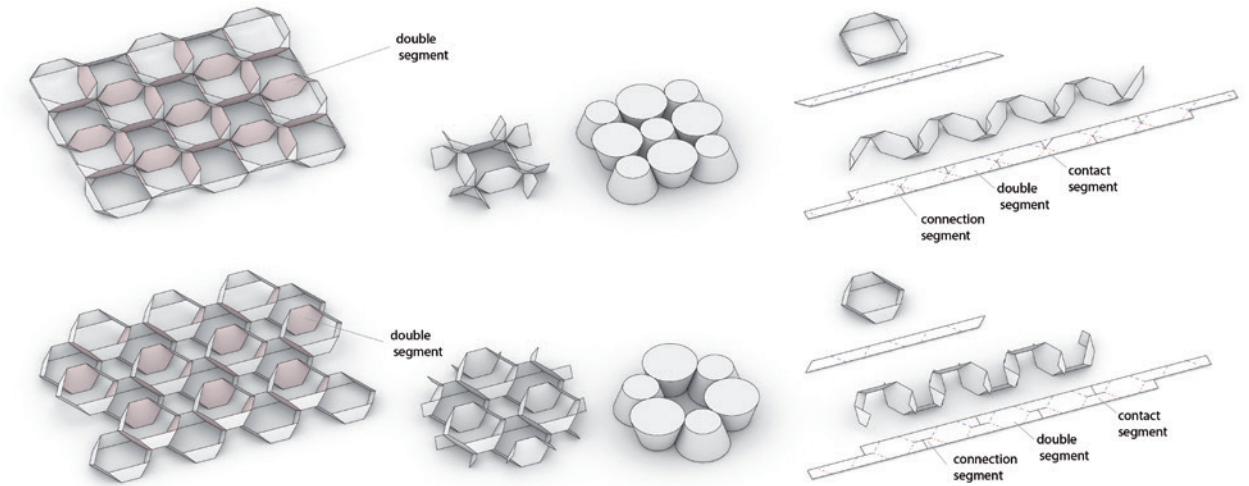


Abb. 70

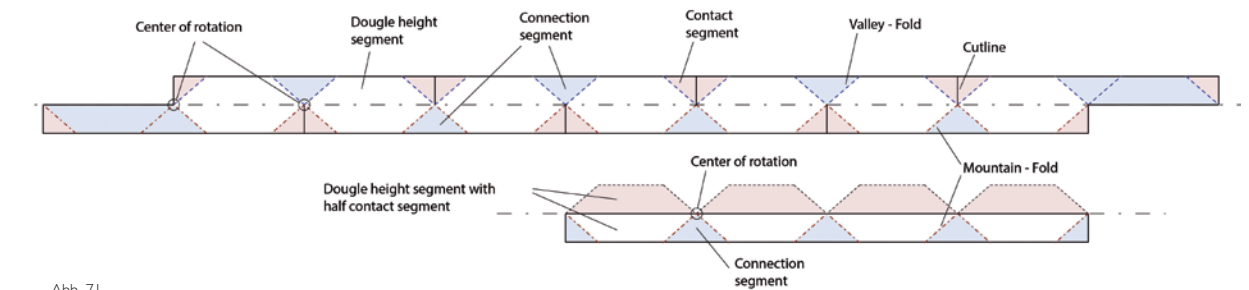


Abb. 71

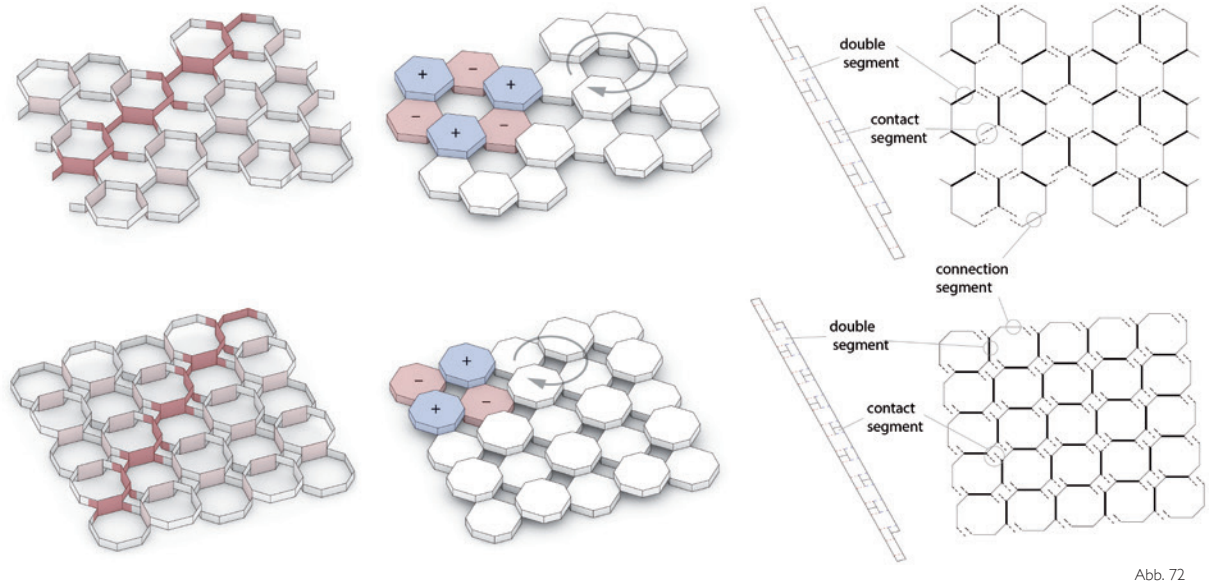


Abb. 72

Abhängig von der Lage der Kontaktsegmente und Doppelsegmente kann die Struktur als aufgebaut aus offenen oder geschlossenen Streifen gelesen werden. Weiters gibt es verschiedene Arten der Verflechtung, welche entweder auf hexagonalen oder oktagonalen Liniengrafiken basieren. Die hochgestellten und tiefgestellten Zellen, die so entstehen können, linear oder radial zueinander angeordnet werden, was verschiedene Auswirkungen auf Fertigung und Stabilität der gesamten Konstruktion nach sich zieht. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Streifen gezielt zueinander zu neigen, was die Zellengeometrie in Kegelstümpfe umwandelt und abhängig vom verwendeten Winkel wiederum für mehr Stabilität im System sorgt.

entweder über eine Überlagerung des zweidimensionalen Liniendiagramms oder über idente Flächen in den zu verbindenden mesh-based Geometrien. Die auf diese Weise entstehenden identen Streifen können überlagert und verbunden werden. Im dem Fall, dass die angrenzenden Zellen kollidieren würden, können die Streifen linear zueinander verschoben werden und durch eine kraftschlüssige Verbindung die zwei Systeme vereinen.

Die wissenschaftliche Arbeit „Linear Folded Interwoven Stripes“ wurde 2017 auf der IASS in Hamburg präsentiert und findet sich in gesamter Länge im Appendix A am Ende dieses Buches.

Die Verbindung mehrerer Systeme LFIS geschieht

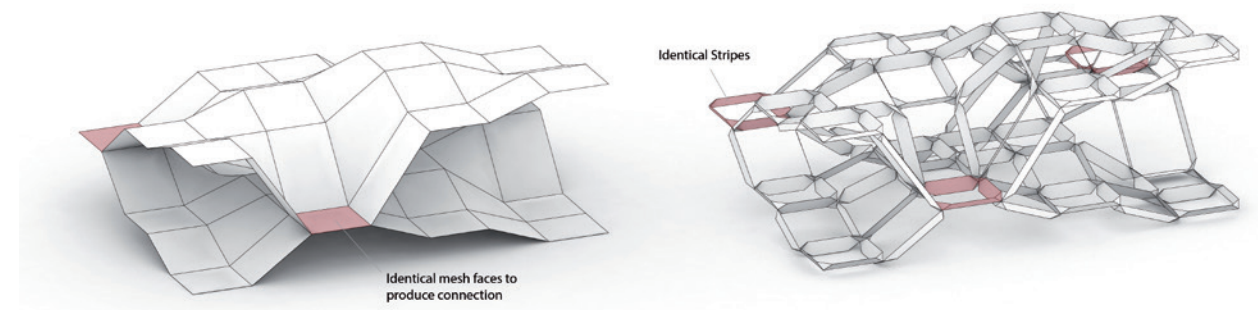


Abb. 73

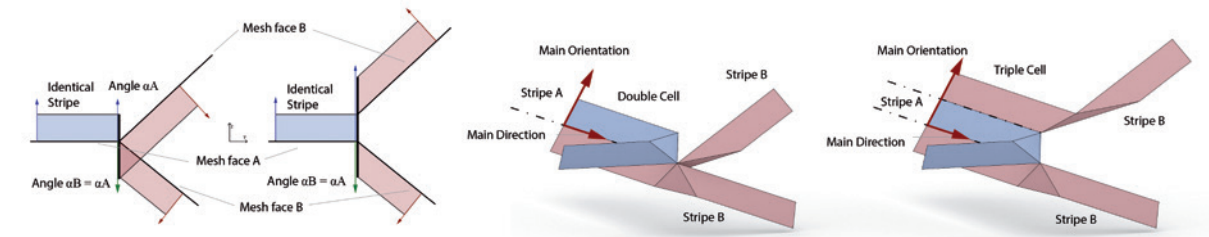


Abb. 74

Abb. 72: Hexagonale und Oktagonale verwobene Streifensysteme
 Abb. 73: Verbindungen mehrerer Flächen durch Systeme von „Interwoven Stripes“
 Abb. 74: Verschiedene Verbindungsmöglichkeiten von approxiierten Flächen
 Abb.75: Multi-Flächen Large Scale Modell

Nächste Seite: Abb.76: Entwicklung vom LFIS über Bent Interwoven Stripes zur Lens Tessellation.
 Abb.77: Annäherung einer Fläche durch eine in Streifen aufgelöste Tessellation

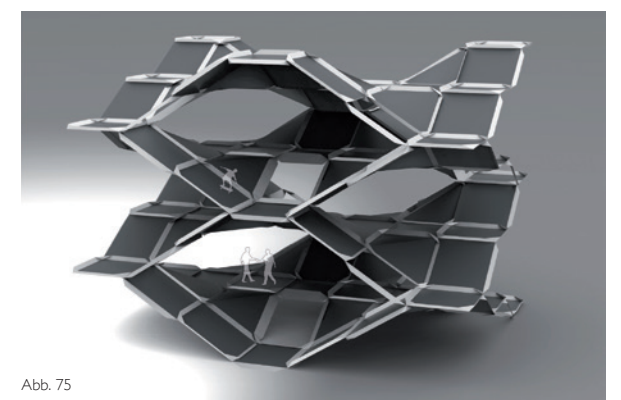


Abb. 75

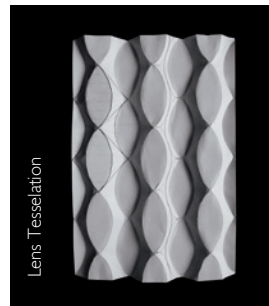
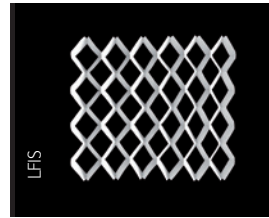


Abb. 76

Vom Streifen zur Fläche

Ausgehend von den Ergebnissen der Arbeit mit LFIS wurde eine mögliche Erweiterung des Systems der Planar gefalteten Streifen untersucht, welche in Bezug zu den „Bent Interwoven Stripes“ BIS steht, welche zusätzlich die Eigenschaft der Biegung im System haben. Über die Einführung einer Faltkante an der Innenseite der durch die verwobenen Streifen entstehenden Aussparungen wurde die Tragfähigkeit von Systemen BIS erheblich gesteigert.

Inspiziert von den Erkenntnissen von David A. Huffman zur gekrümmten Faltung 1976 und der von ihm erstmals beschriebenen „Lens Tessellation“ wurden die Möglichkeiten der Vereinigung der zwei Systeme untersucht, wodurch letztlich die Arbeit „Lens Tessellation Inspired Surface Approximation“ LTISA entstand, welche die Grundlage für die weiteren Überlegungen dieser Arbeit bildet. [5] [6] [7]

Als Erstes fand eine Annäherung der Streifen statt - sie sind beim Zusammenfügen nicht mehr planar, sondern weisen eine alternierende kegelförmige Krümmung auf, welche sich durch die gekurvte Faltkante einstellt. Auf diese Weise kann

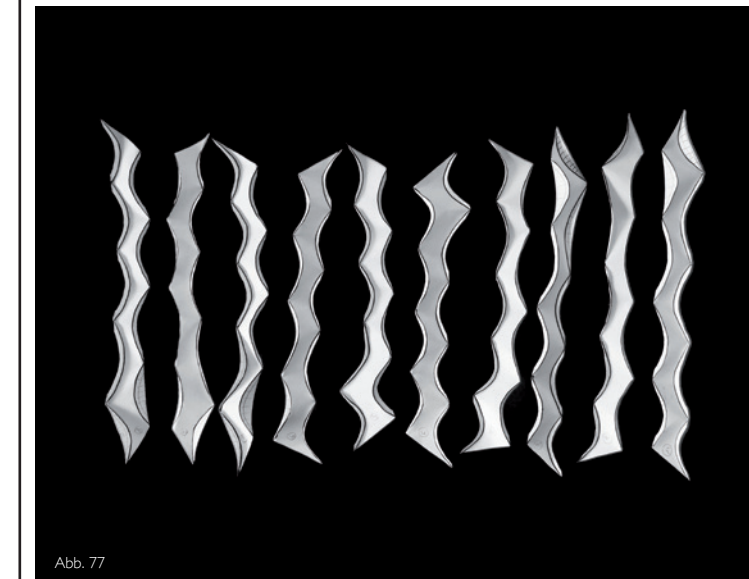
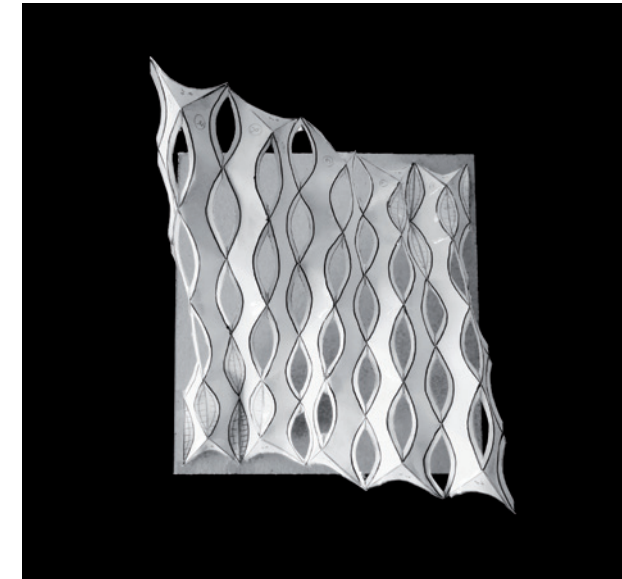
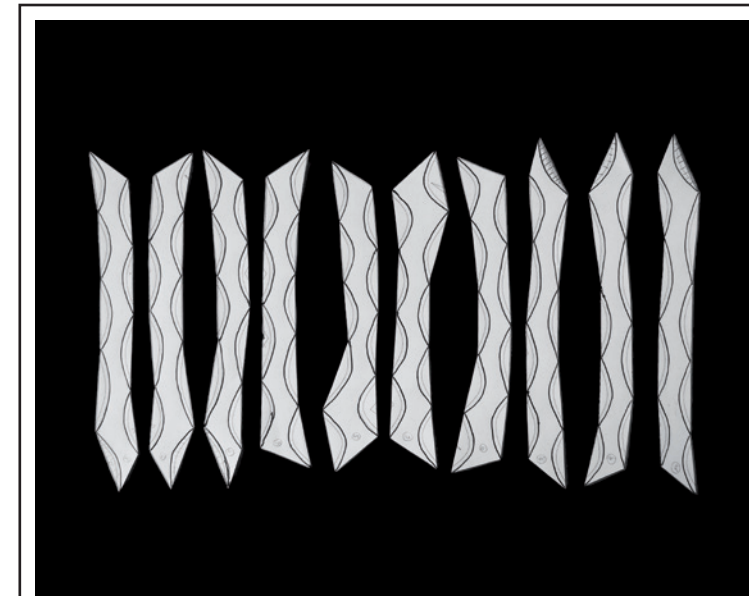
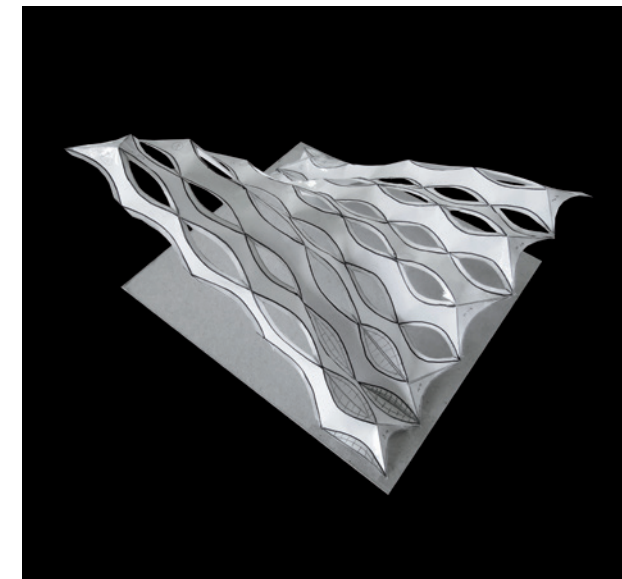


Abb. 77



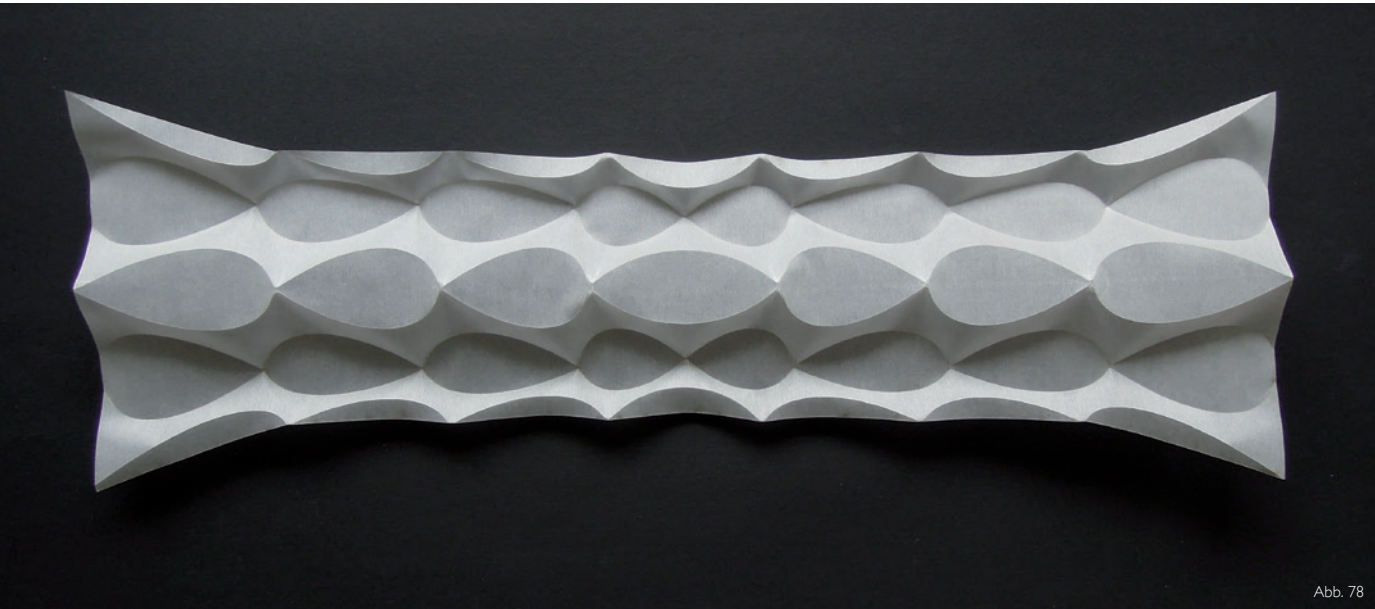


Abb. 78

man durch Faltung und Montage der einzelnen Streifen relativ einfache, gekrümmte und tesselierte Flächen erzeugen. Nach Digitalisierung und Parametrisierung des Systems wurden nicht mehr einzelne Streifen sondern ganze Flächen in einem Verbund von hoch und tief gelegenen Linsen umgewandelt. Die einzelnen Linsen bestehen aus planar gefertigten Flächen, und werden im gebogenen Zustand verbunden. Das von Huffman, Demaine und Koschitz beschriebene System funktioniert aber nur bei einer ebenen zu tesselierenden Fläche - die einzelnen Zellen können dann tangential miteinander verbunden bzw. aus einem Blatt Papier gefaltet werden. [7]

Nachdem bereits nachgewiesen wurde, dass die tesselierte Fläche durch die Zerlegung in Streifen mehr Freiheiten zulässt, wurde im folgenden Schritt die Fertigung durch einzelne Linsen erprobt, wodurch - mit gewissen Constraints - beliebige zweifach gekrümmte Flächen tesseliert und nach Abwicklung aus planaren Materialien gefertigt werden konnten. Das so entstandene konstruktive System bietet durch die sich aus den Kraftflüssen ergebenden statischen Spannrichtungen interessante Rahmenbedingungen zur Gestaltung von konstruktiven Bauteilen und leichten Flächentragwerken. Es war daher naheliegend die „Lens Tessellation Inspired Surface Approximation“ LTISA genauer zu untersuchen.

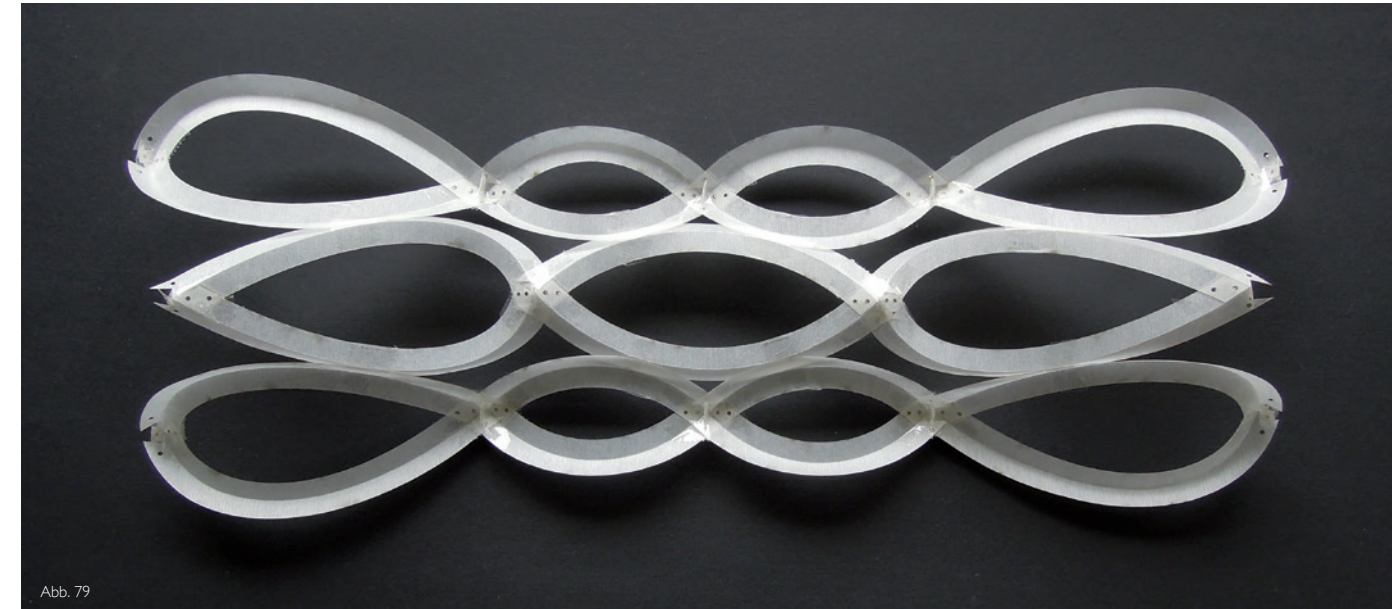


Abb. 79

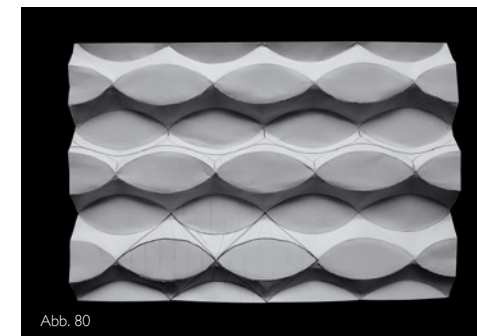


Abb. 80

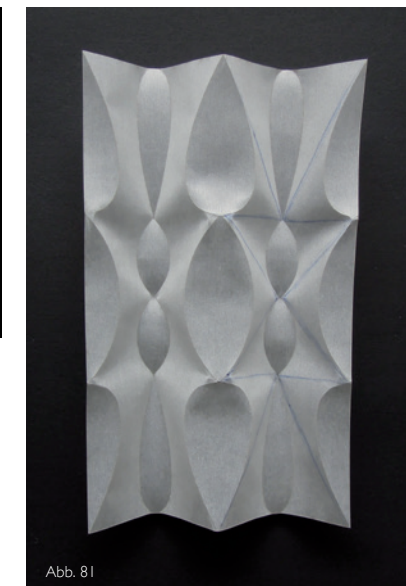


Abb. 81



Abb. 82

Abb.78: Modell zur Tessellierung einer gesamten Fläche einen Bogen zu erstellen
 Abb.79: Modell zur Auflösung einer Tessellierung in streifenförmige Einzelteile
 Abb.80: Ursprüngliche Lens Tessellation von David A. Huffman
 Abb.81: Modell zur Tessellierung einer Fläche
 Abb.88: Versuch durch Tessellierung in einer Fläche Krümmung zu erzeugen

Lens Tessellation Inspired Surface Approximation

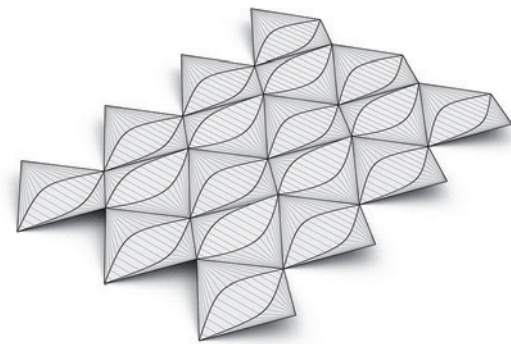
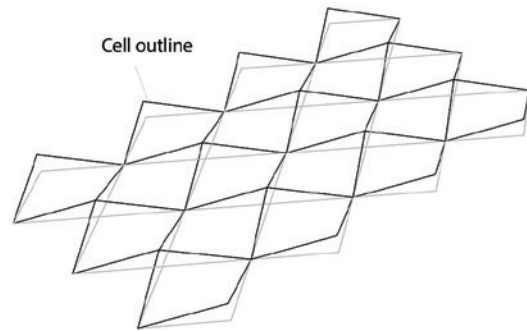


Abb. 83

Abb. 83: Thick planar folded Lens Tessellation erzeugt durch ein Netzwerk an Outlines

Die genauere Untersuchung gekrümmter tessellierter Flächen führte dazu, dass als erstes der exakte Aufbau der einzelnen Linsenzellen oder Kites analysiert und beschrieben werden musste. Anders als in den Arbeiten von Huffman, Demaine und Koschitz wird zur Konstruktion der Kites die Outline der jeweiligen Mesh Face herangezogen, was wichtig ist um später auch gekrümmte Flächen bearbeiten zu können. Die Outline ergibt durch die so definierte Zellenhöhe eine Verhältniszahl, welche die Zellenbreite bestimmt. Folglich darf keine der Mesh Faces planar sein, da die Höhe sonst Null ist. Diese Zellenhöhe konnte später als Parameter definiert werden, was für die statische Höhe und folglich die Stabilität sehr wichtig ist. [7]

Nach Festlegung einer Linsenrichtung können durch die Cell Ratio die Kegelflächen des Kites aufgespannt werden. Die verbindende Zylinderfläche wiederum ergibt sich aus der Verschneidung der Kegel mit einer Ebene, welche durch die Endpunkte der Linse und den Durchdringungspunkt, der aus der Linsenbreite berechnet wird, aufgespannt wird. Der so erzeugte Kite kann kom-

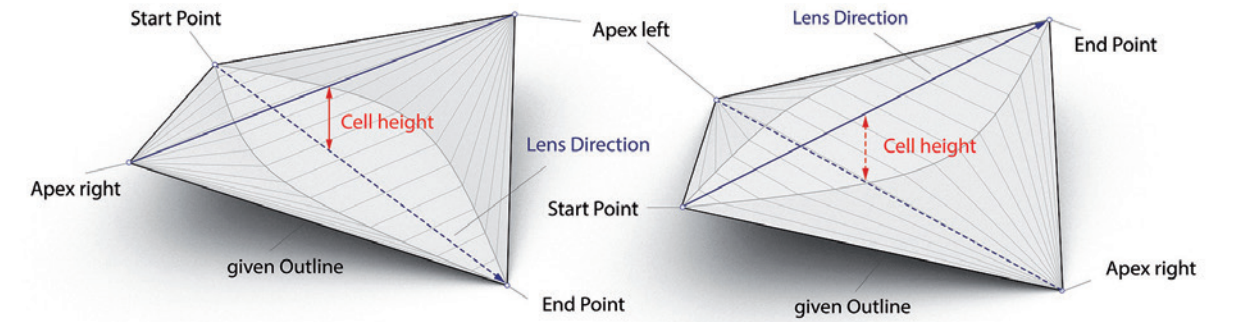


Abb. 84

Abb.84: Generierung von Kites und die zwei möglichen Ausrichtungen der erzeugten Linsen

Abb.85: Erzeugung der Linsengeometrie durch Verschneiden der Kegelfläche mit der Ebene durch den Durchdringungspunkt.

Nächste Seite: Abb. 86, 87: eine extrudierte Fläche und die zwei möglichen Linsenrichtungen

Abb.88: Strukturelle Analyse eines identen Bogens, welcher durch Linsen in verschiedenen Richtungen approximiert wurde

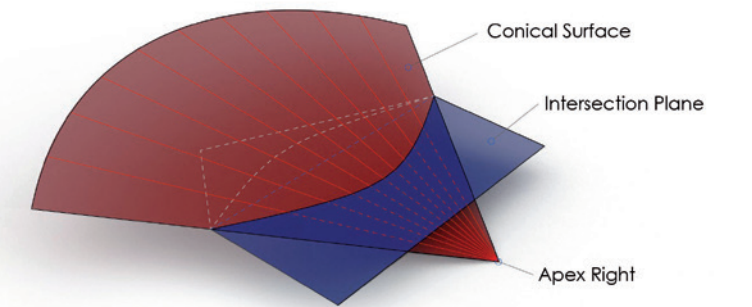


Abb. 85

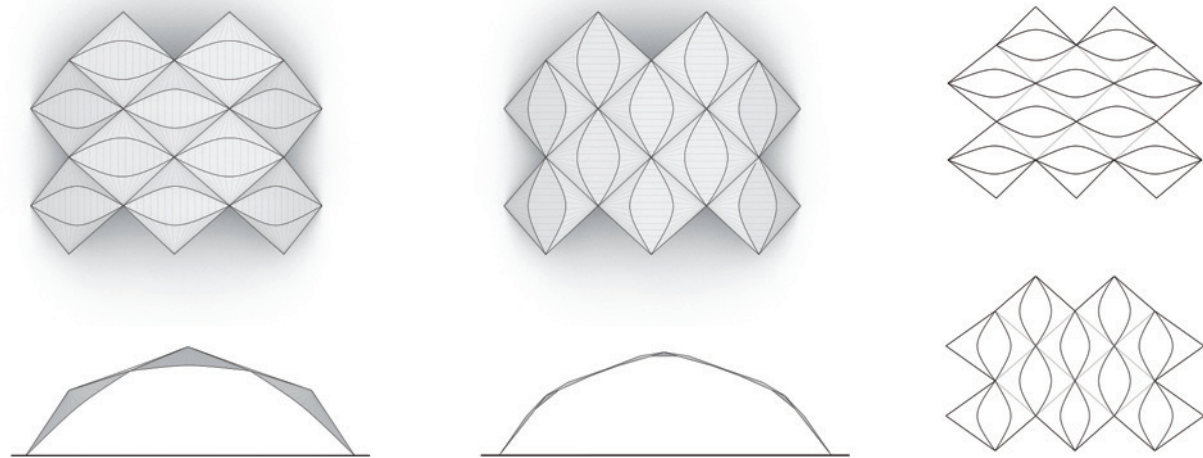


Abb. 86

plett abgewickelt und aus einer einzigen Platte fabriziert werden.

Bei der Tessellation einer Fläche treten durch die Spannrichtung der Kites bestimmte Constraints auf, welche im Design berücksichtigt werden müssen. Zum einen ändert sich durch die Lage der Kites zur Krümmung der Fläche deren statische Höhe, was für große Spannweiten oder Auskragungen sehr wichtig ist. Zum anderen sind die einzelnen Zellen aus verschiedenen Richtungen unterschiedlich stark mit Schubkräften belastbar.

Die Resultate der Untersuchungen zur LTISA

wurden in zwei Demonstratoren umgesetzt, welche weitere Eigenschaften des Systems offenbaren und zudem einen ersten Eindruck zur räumlichen Wirkung Lens-tessellierter Strukturen ermöglichen.

Die wissenschaftliche Arbeit „Lens Tessellation Inspired Surface Approximation“ wird voraussichtlich im September 2018 auf der 7OSME in Oxford präsentiert. Sie befindet sich in einem geschlossenen Peer-Review Verfahren zur Veröffentlichung im Rahmen der 7OSME und daher findet man nur den Abstract im Appendix B am Ende dieses Buches.

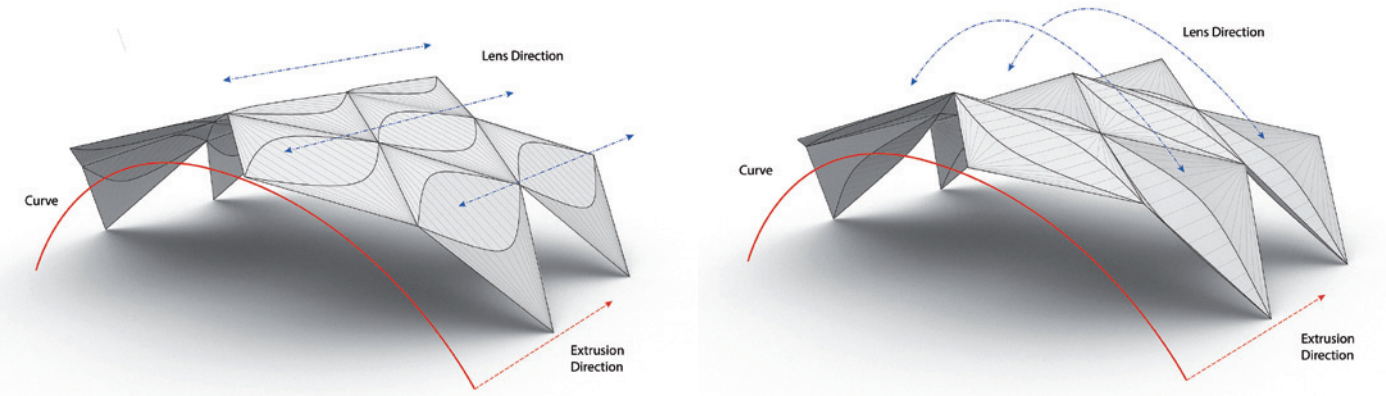


Abb. 87

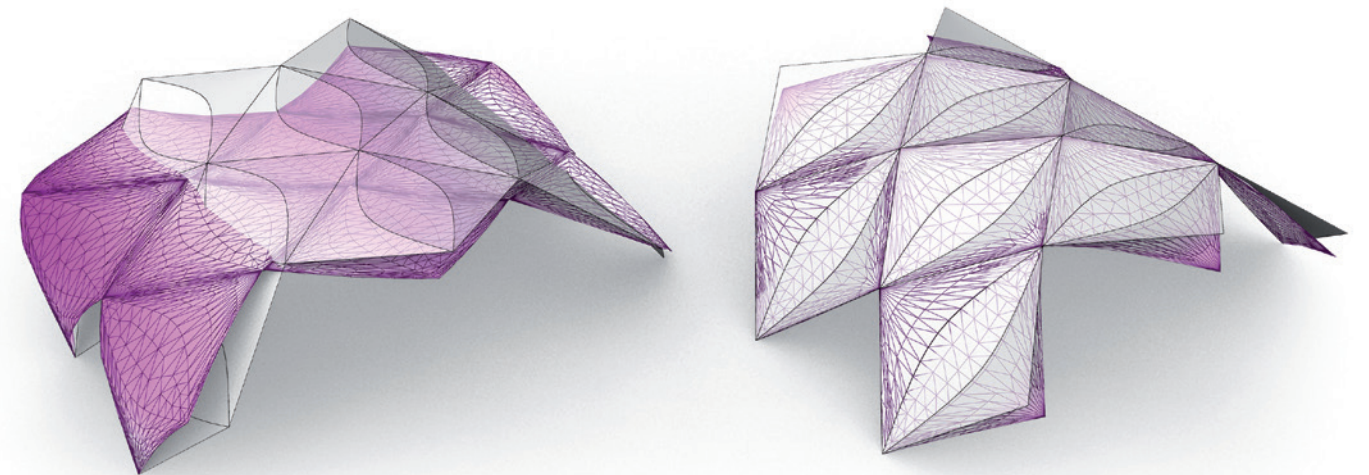


Abb. 88

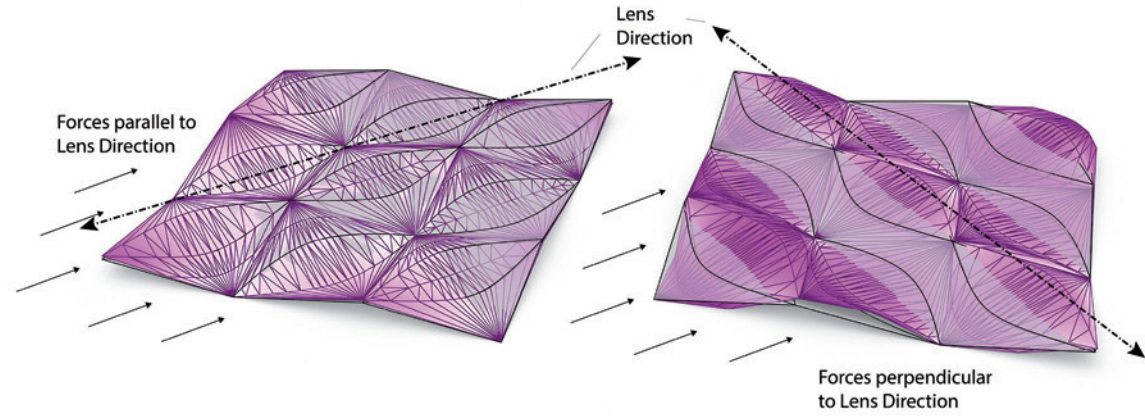


Abb. 89: Strukturelle Performance bei Kräfteinwirkung parallel und normal zur Linsenrichtung mit Zellen kleiner statischer Höhe

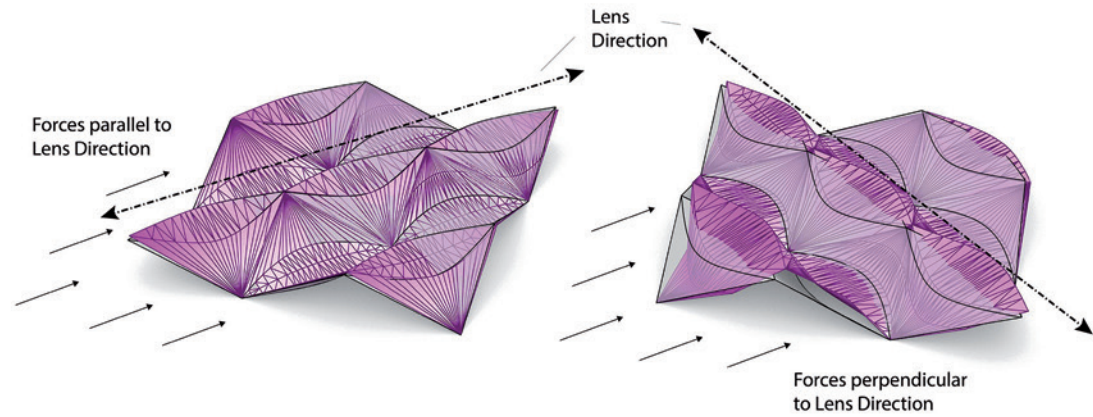


Abb. 90: Strukturelle Performance bei Kräfteinwirkung parallel und normal zur Linsenrichtung mit Zellen großer statischer Höhe

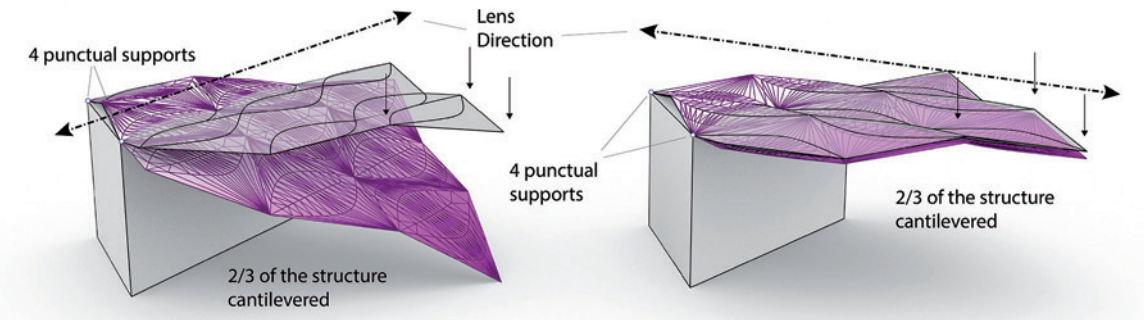


Abb. 91: Strukturelle Performance bei großer Auskrümmung parallel und normal zur Linsenrichtung mit Zellen kleiner statischer Höhe

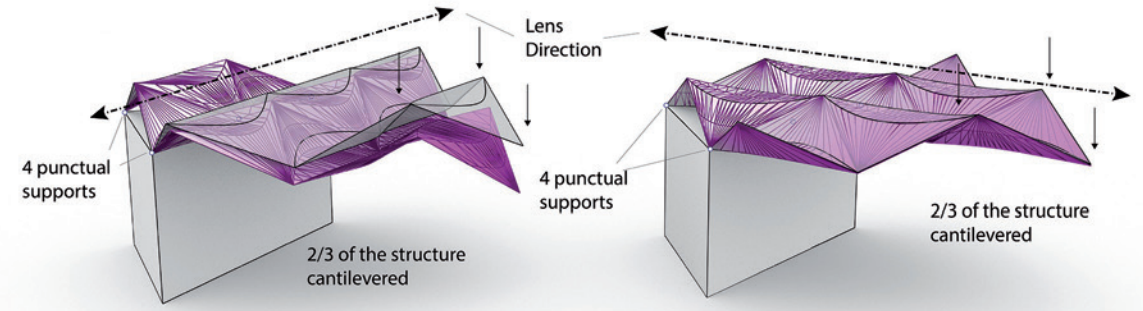


Abb. 92: Strukturelle Performance bei großer Auskrümmung parallel und normal zur Linsenrichtung mit Zellen großer statischer Höhe

Paper2Bar

Im Zuge der Bachelorpräsentationen an der Fakultät für Architektur der Universität in Innsbruck wurde im Sommer 2017 eine filigrane Struktur für die Nutzung als Bar für einem Abend errichtet.

Der in kurzer Zeit entstandene Entwurf war an den Umstand gebunden, die 70 Stück 100x70 cm großen und 1 mm starken Karton als Material optimal auszunutzen, welche zu der Zeit im Institut vorrätig waren. Daraus sollte eine Bar mit Tresen zum Ausschank von Getränken errichtet werden.

Die so entstandenen 70 Einzelteile der tesselierten Fläche wurden mit einem Schneidplotter aus dem Karton geschnitten, nachdem die Faltkanten mit einer Rille zur Faltung vorbereitet wurden. Die gefalteten Einzelteile wurden an vorgesehenen Laschen getackert und umhüllten so einen Raum von etwa 1,5 x 4 Metern Grundfläche und annähernd 3 Metern Höhe. Einzig die fast 4 Meter weite Auskragung des Daches hielt der extrem geringen Materialstärke und dem doch sehr weichen Material nicht stand und musste daher abgehängt werden. Nach der Party blieb die Struktur noch ein paar Wochen stehen ehe sie von einer einzigen Person innerhalb von nur einer Stunde abgebaut und entsorgt werden konnte.



Abb. 93

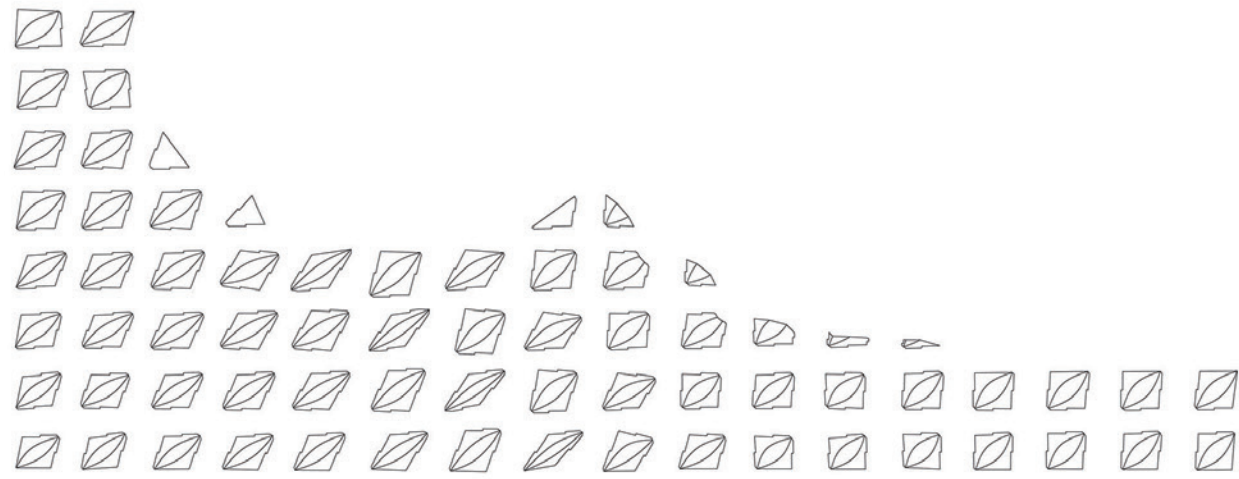


Abb. 94

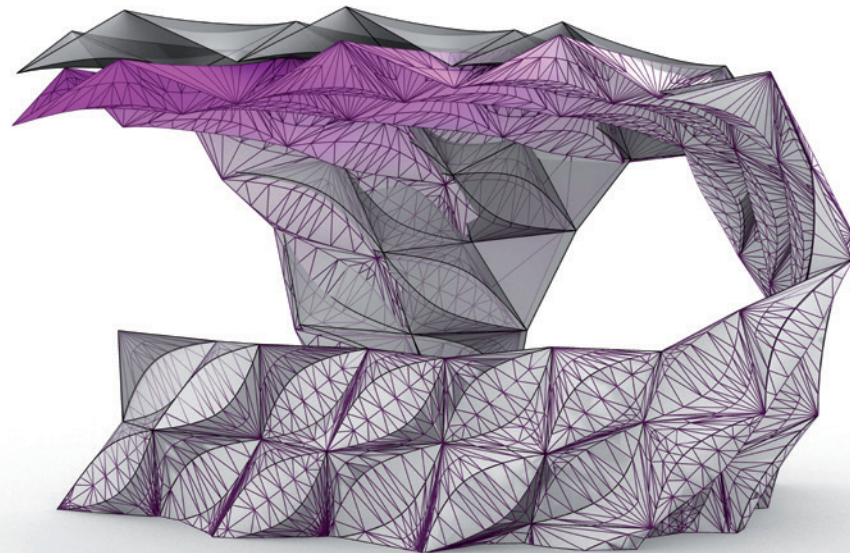


Abb. 95

Vorherige Seite: Abb. 93: Der elegante Rücken der Struktur

Abb. 94: Die Faltdiagramme der 70 Einzelteile

Abb. 95: Strukturanalyse der Konstruktion veranschaulicht die Schwachstelle

Abb. 96: Perspektivische Grafik zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse zwischen Bar und einzelner Linse

Abb. 97: Schnitte in verschiedenen Richtungen

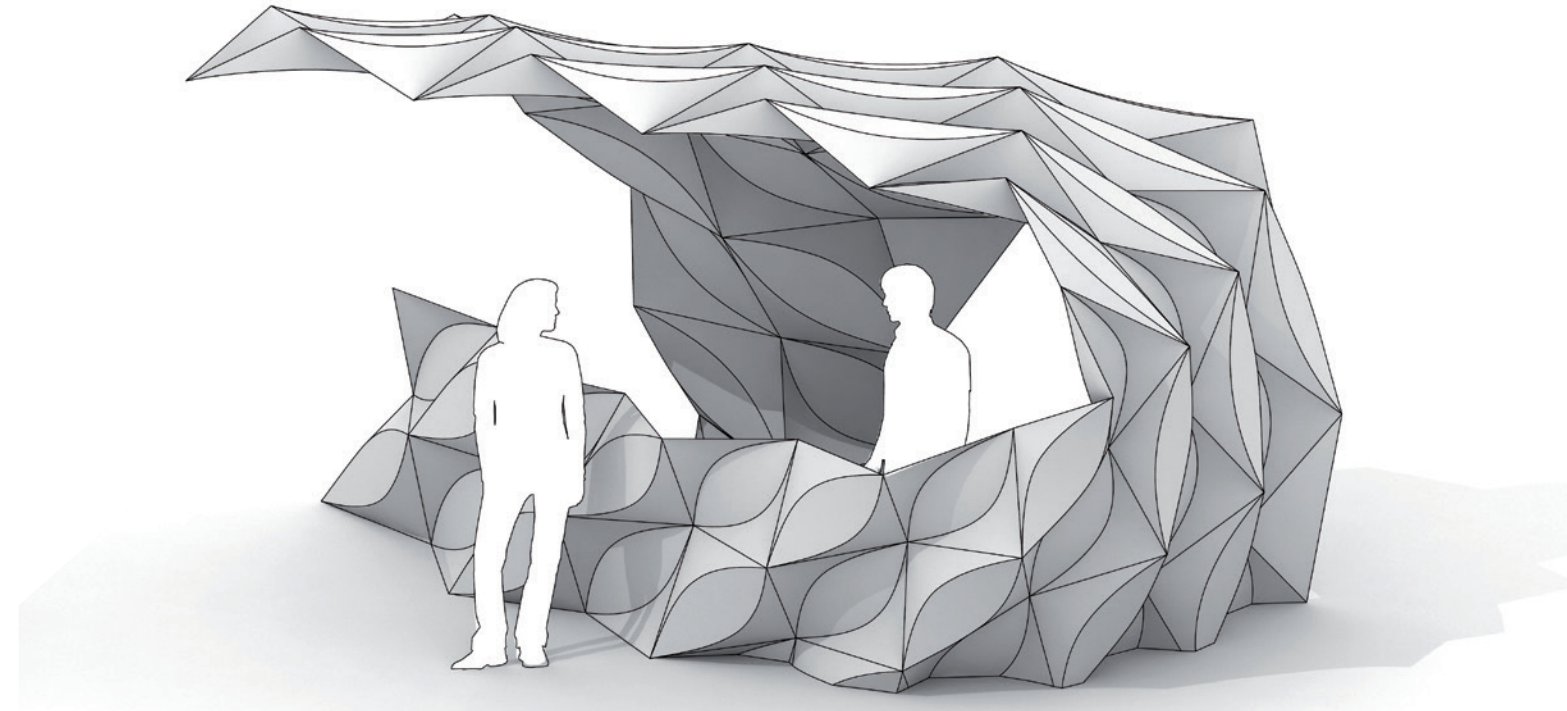


Abb. 96



Abb. 97



Abb. 98

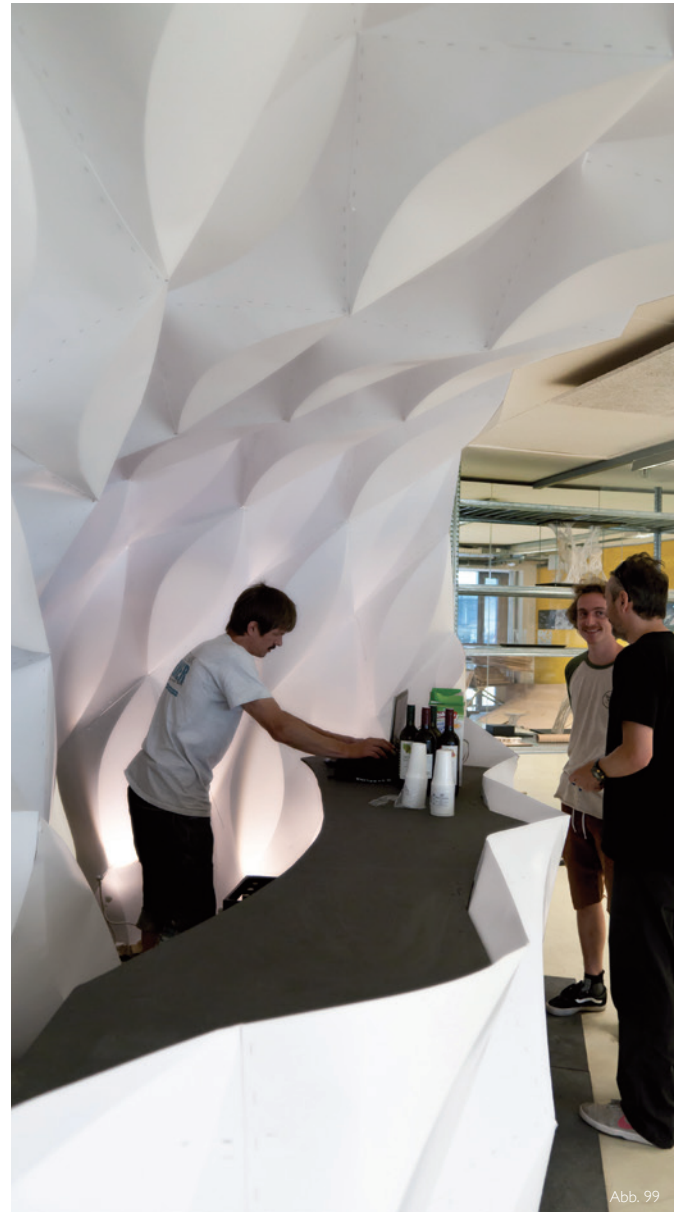


Abb. 99

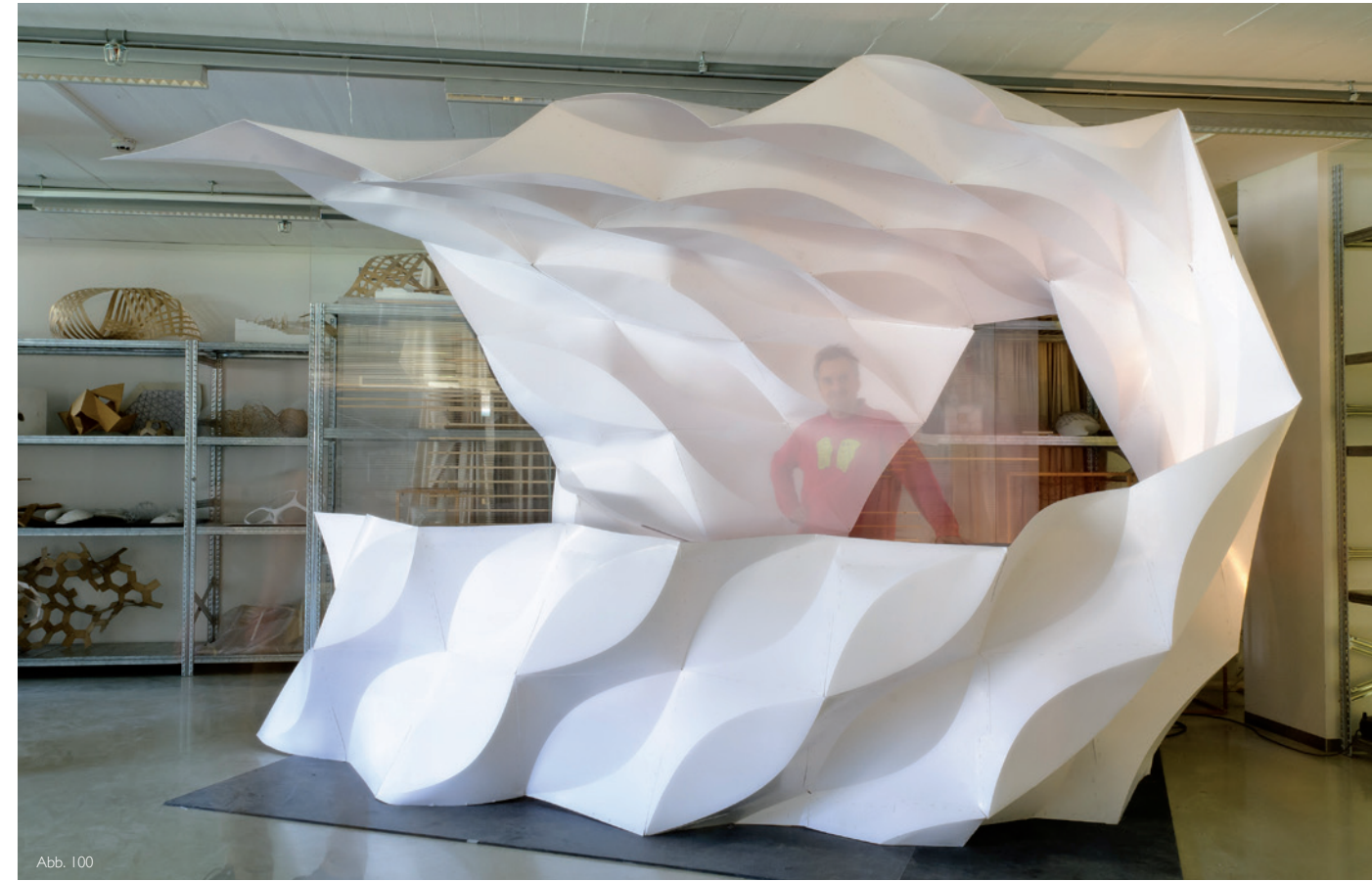


Abb. 100



Abb. 101



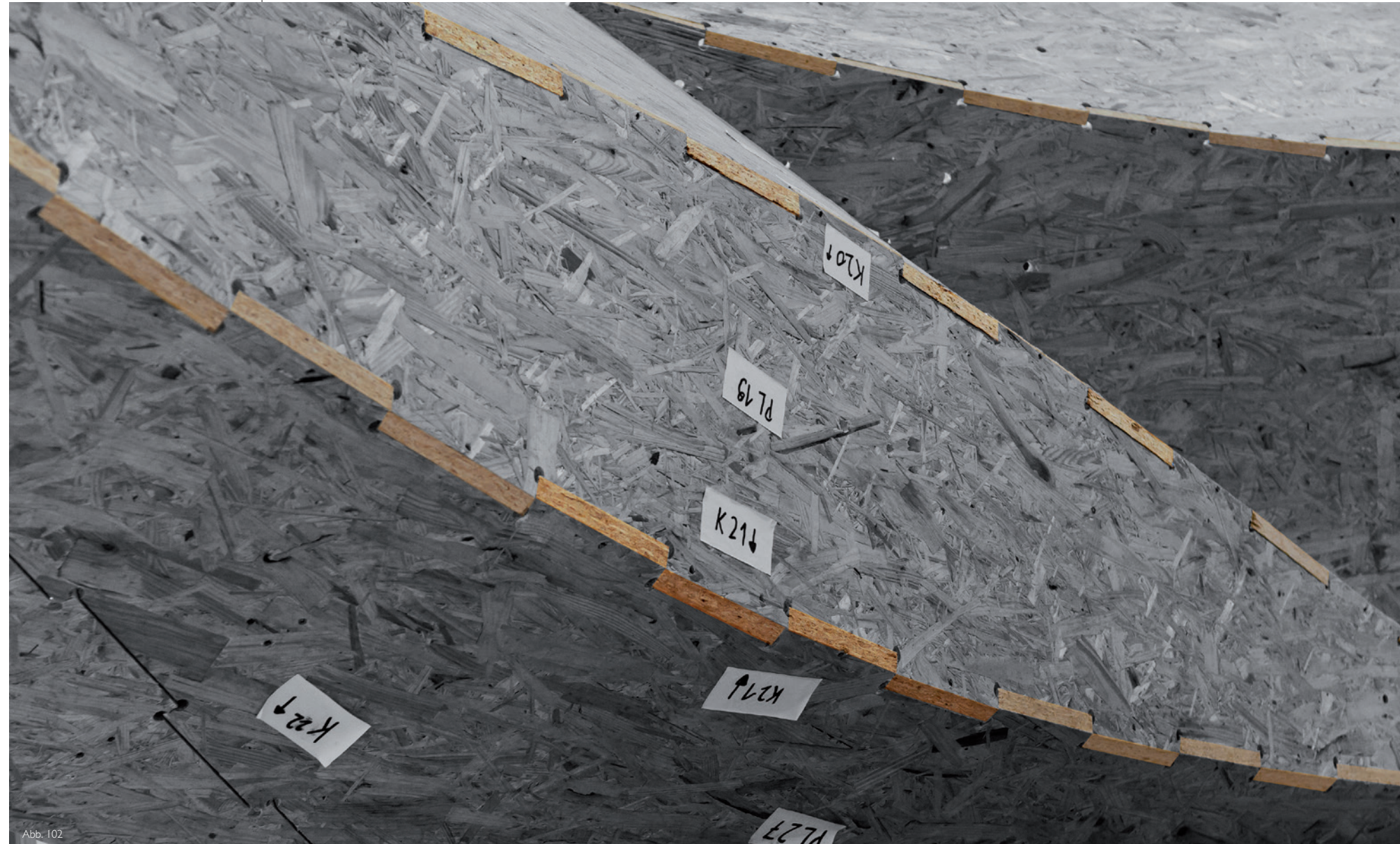
Abb. 98: Die Auskragung von fast 4 Metern musste mit einem Kabel nach oben gespannt werden
 Abb. 99: Party-Vorbereitungen hinter dem Bartresen
 Abb. 100: Die fertige Bar in gebautem Zustand
 Abb. 101: Der Abbau durch den Autor war innerhalb einer Stunde erledigt und die Überreste konnten leicht entsorgt werden

Fold2Bar

Im Herbst 2017 wurde auf Anfrage der Firma Holzbau Saurer in Tirol für die Einweihungsfeier der neu errichteten Produktionshalle erneut eine kleiner Bar-Pavillon errichtet. Die Inhaber konnten überzeugt werden, statt eines konservativen Zugangs das Experiment zu suchen, um so auch die Fähigkeiten der neuen Fräsmaschine und der überaus qualifizierten Handwerker der Firma Saurer zu veranschaulichen.

Die komplexe Geometrie stellte sowohl das Design-Tool als auch die Holzbaumeister vor technische Herausforderungen, welche in enger Zusammenarbeit schließlich gelöst werden konnten.

Für den Pavillon wurden erstmals 19 mm starke OSB-Platten „gefaltet“, um eine räumliche Struktur zu schaffen. Die Konstruktion besteht aus 14 zylinderförmig gebogenen Linsen, welche mit jeweils 2 kegelförmig gebogenen Dreiecken eine Zelle bildet. Diese Zellen definieren im S-förmigen Grundriss einen Barbereich mit Tresen und davor einen kleinen Aufenthaltsbereich, welcher von der sich nach oben schwingenden Struktur überdacht wird.



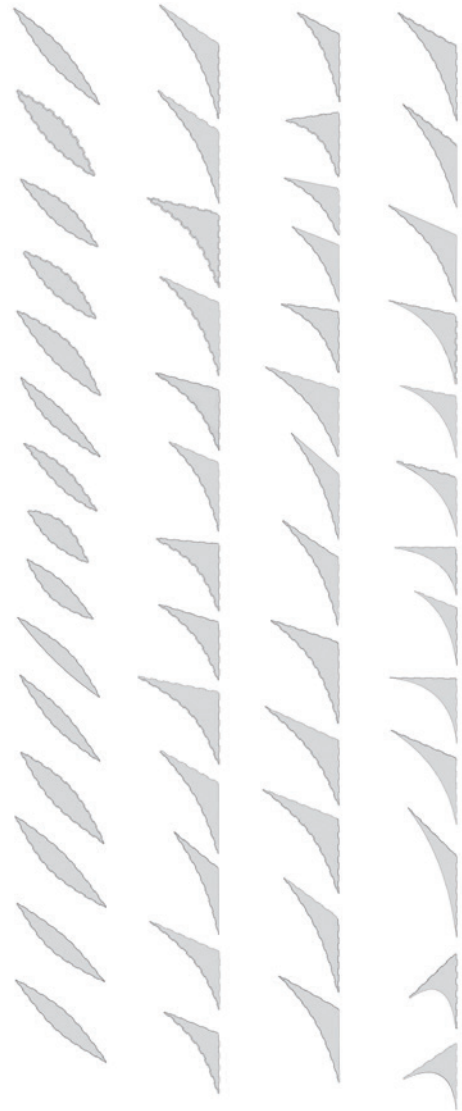


Abb. 103

Für die Fügung der Einzelteile wurden erstmals im Rahmen der Lens Tessellation Fingerzinken verwendet. Diese wurden parametrisch im dreidimensionalen Zustand modelliert, um danach im abgewickelten Zustand als File für den Fräsroboter vorbereitet zu werden. Die größte Schwierigkeit hierbei ist, dass die Zinken im digital gebogenen Zustand perfekt ineinander greifen, in der Realität aber die Materialträgeit dafür sorgt, dass sich die Fingerzinken nicht mit dem Material mitbiegen.

Dadurch wurde der Zusammenbau der Kites sehr komplex, welcher schon durch dem Umstand erschwert wird, dass die Einzelteile aus OSB Platten im gebogenen Zustand gefügt werden müssen. Die fertigen Kites wiederum konnten ähnlich der Paper2Bar relativ einfach verbunden werden. Das einzige Problem hier war es, einen kraftschlüssigen Übergang zwischen den Zellen zu gewährleisten, was bei sehr flachen Winkeln kritisch war.

Abb. 102: Detail der Zinkenverbindung der Fold2Bar

Abb. 103: Die gesamte Struktur bestand aus 54 Einzelteilen, welche nach dem Fräsvorgang zu den Kites gefügt wurden

Abb. 104: Perspektivische Grafik zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse zwischen gesamter Bar und einzelner Linse

Abb. 105: Grundriss und Draufsicht der Struktur

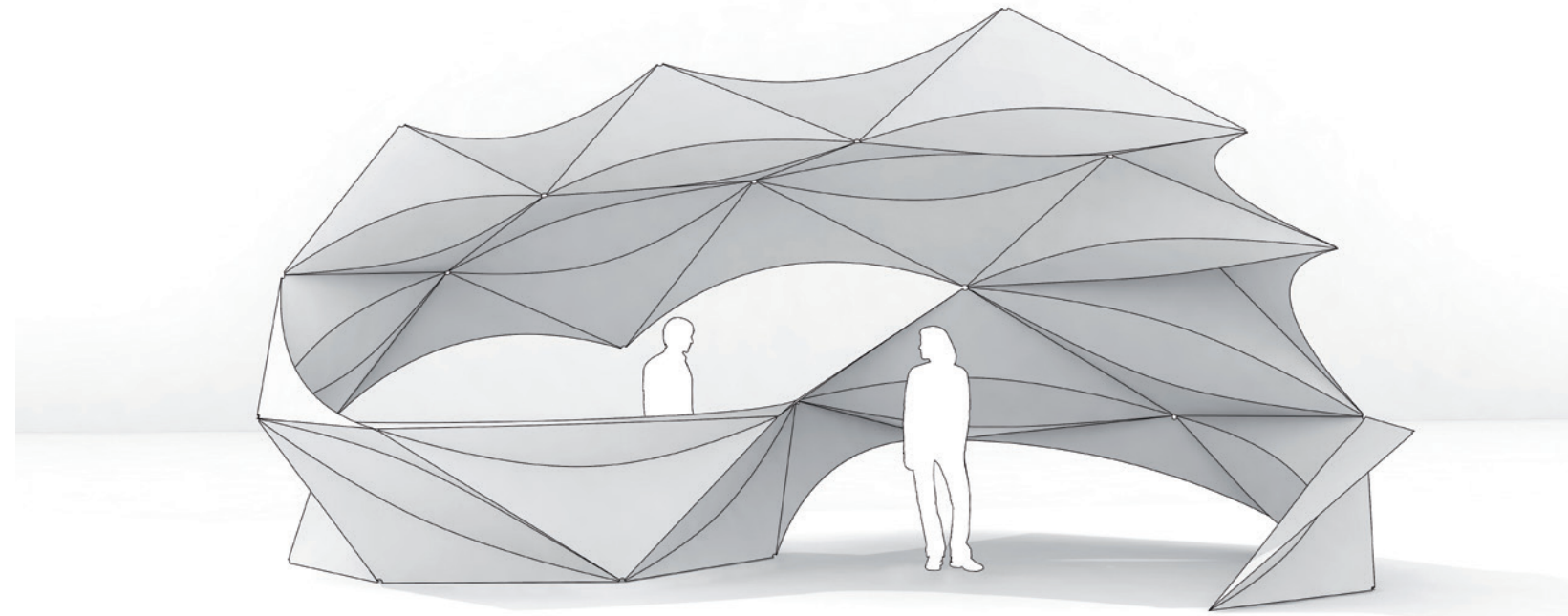


Abb. 104

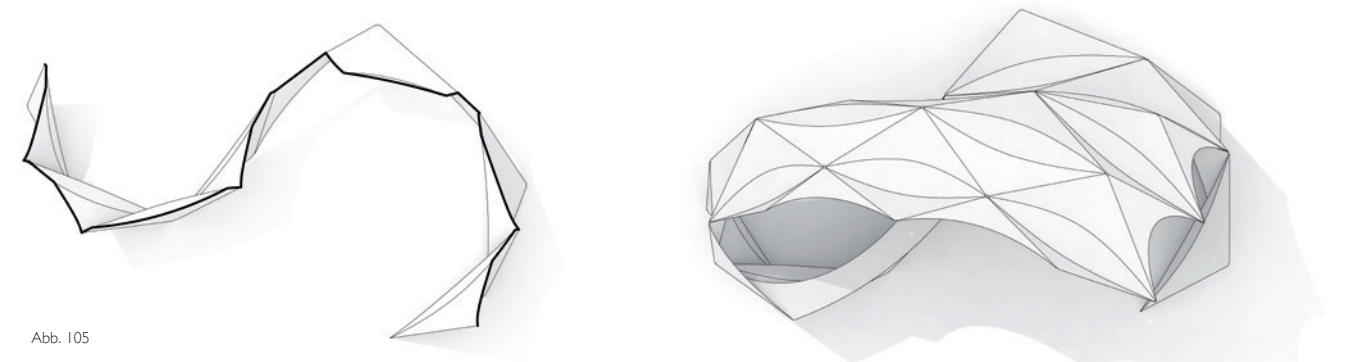


Abb. 105

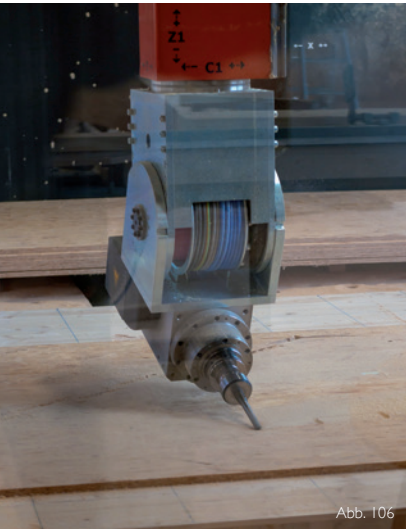


Abb. 106



Abb. 107



Abb. 108



Abb. 109



Abb. 110

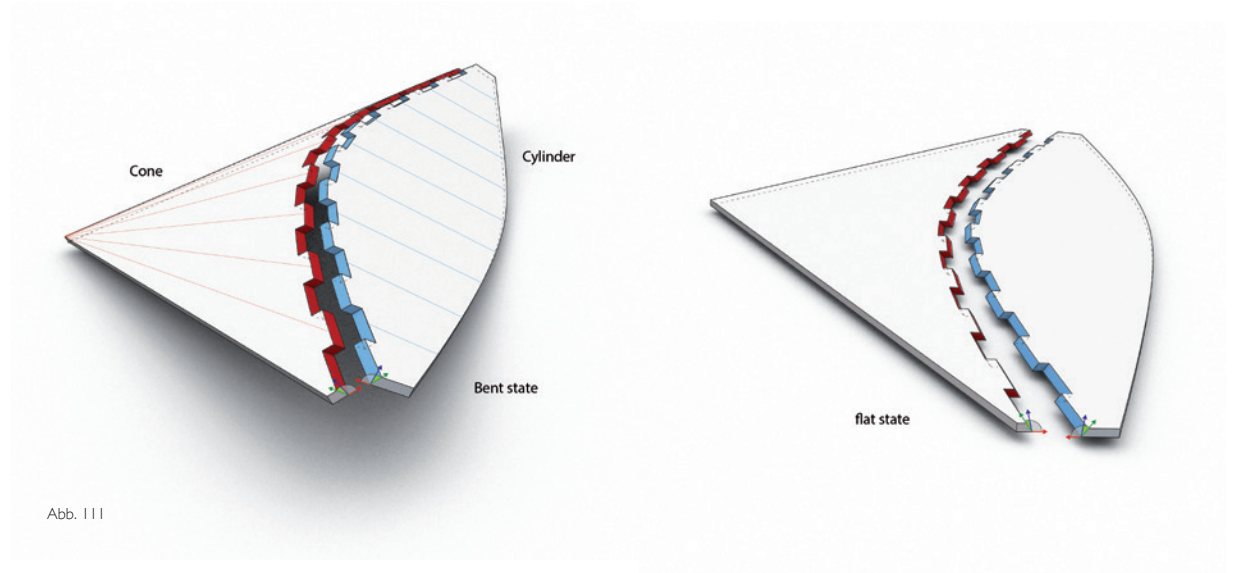


Abb. 111

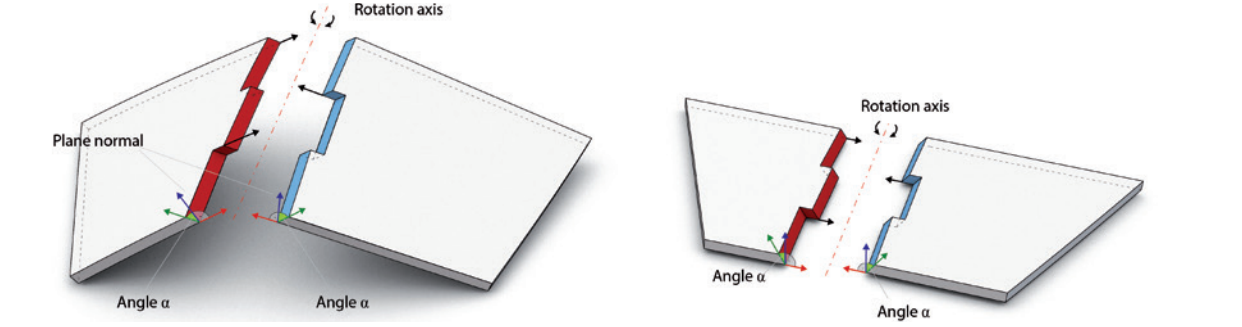


Abb. 112

Abb. 106, 107: Die Einzelteile wurden per 5-achsigem Fräsroboter aus OSB-Platten gefertigt
 Abb. 108: Das Fügen der einzelnen Kites und seine Tücken beim Biegen des widerstandsfähigen Material
 Abb. 109: Nur mittels eigens für die Handwerker gefertigtem 3D-Modell war die Zuordnung der Zellen zueinander möglich

Abb. 110: Für die Fabrikation des Prototypen waren Fachleute nötig
 Abb. 111: Ein halber Kite in gebogenem und flachem Zustand
 Abb. 112: Geometrisches Detail zur Skriptgesteuerten Generierung der perfekt ineinander greifenden Zinken

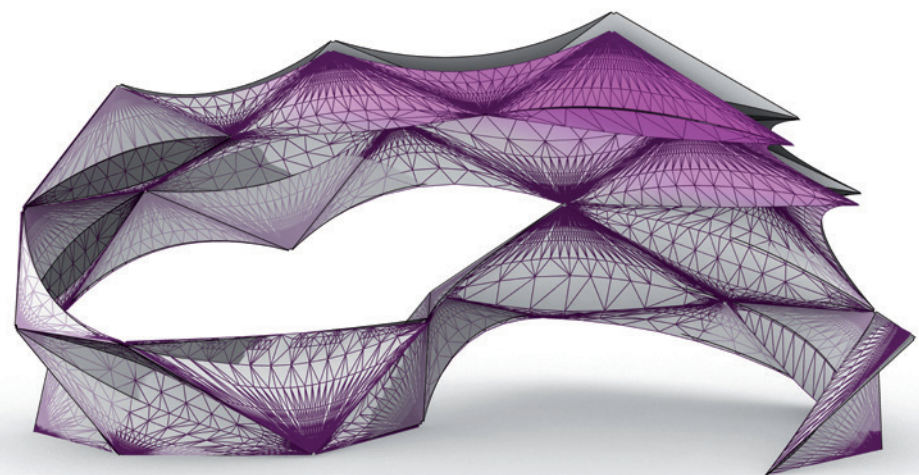
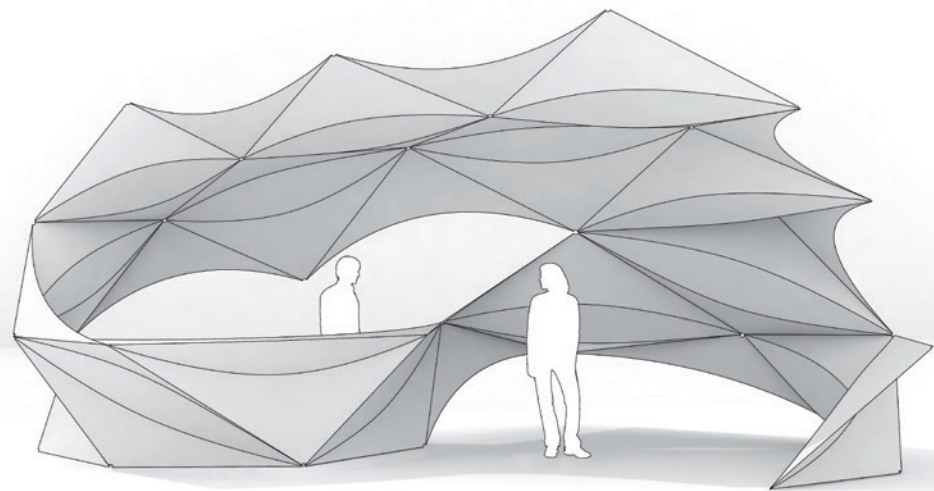


Abb. 113



Abb. 114



Abb. 115

Abb. 113: Die strukturelle Analyse der Holzkonstruktion sagte eine vertretbare Durchbiegung der Auskragung vorher

Abb. 114: Die fertiggestellte Bar entsprach zum größten Teil dem 3D Modell und dem vorhergesagten statischen Modell

Abb. 115: Direkter Vergleich von 1:50 Papiermodell und 1:1 gebauter Holzkonstruktion

Nächste Seite: Abb. 116, 117: Die Bar als echter Blickfang während der Einweihungsparty der neuen Produktionshalle der Firma Holzbau Saurer, welche die Produktion finanziell und durch die Bereitstellung von Arbeitszeit des Fachpersonals ermöglicht hat.



Abb. 116

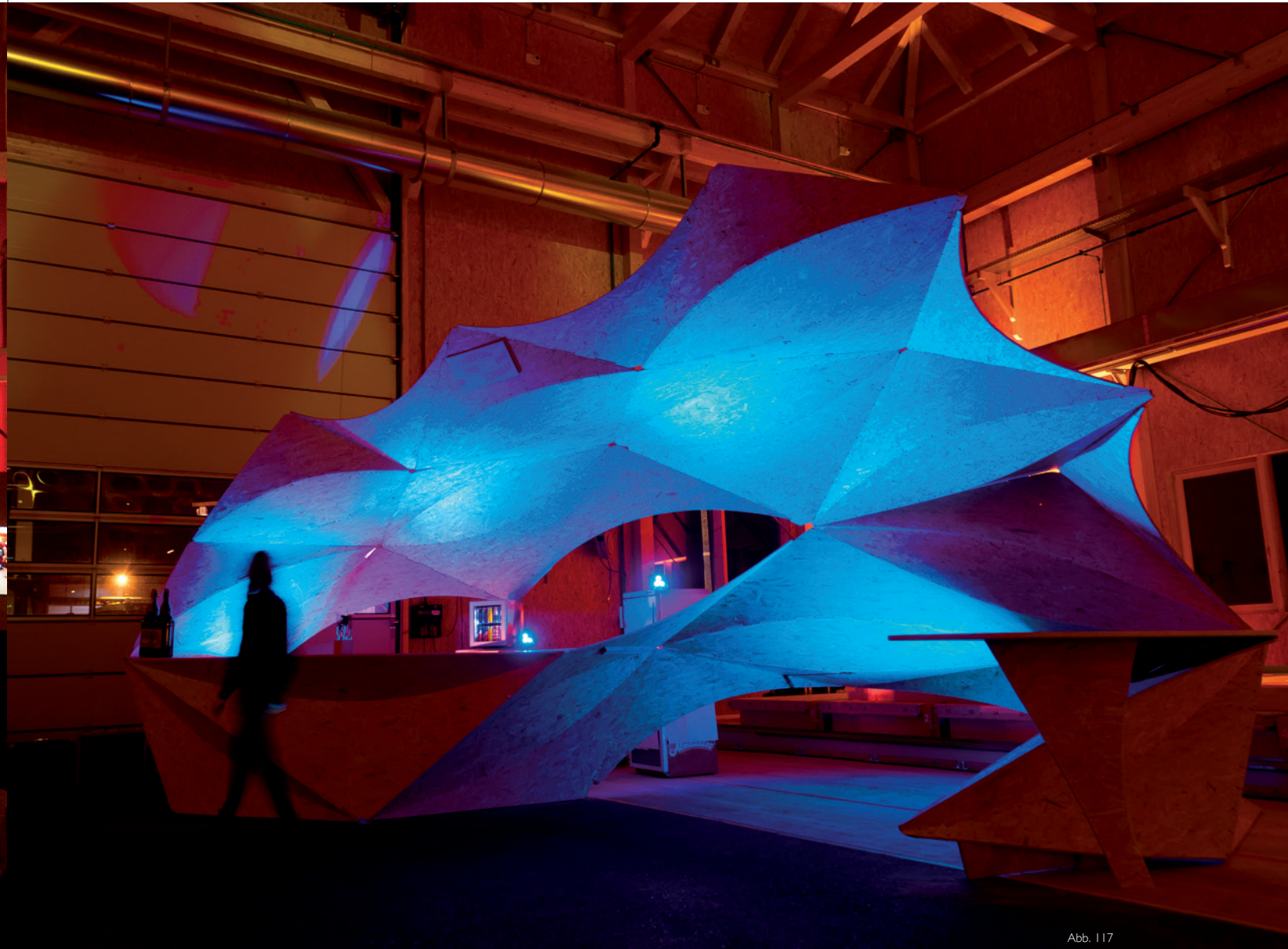


Abb. 117

Architektonisches Potential

Auf den nächsten Seiten folgt eine Auswahl an Möglichkeiten, die über den wissenschaftlichen Teil der Arbeit hinaus geht, bei dem hauptsächlich die Annäherung von leicht lesbaren Flächen zum Nachweis der Umsetzbarkeit und Aufzeigen der Constraints im Fokus stand.

Die Strategie der Lens Tessellation bietet eine Fülle von architektonischen Potentialen. So könnte man sich die Konstruktion einer Fassade vorstellen oder mit ihr einzelne Bausteine erzeugen, welche in additiven Verfahren verbunden werden könnten. Auch Flächentragwerke mit variablem Öffnungsgrad der einzelnen Linsen, welche statisch sehr wirksam sind könnten realisiert werden.

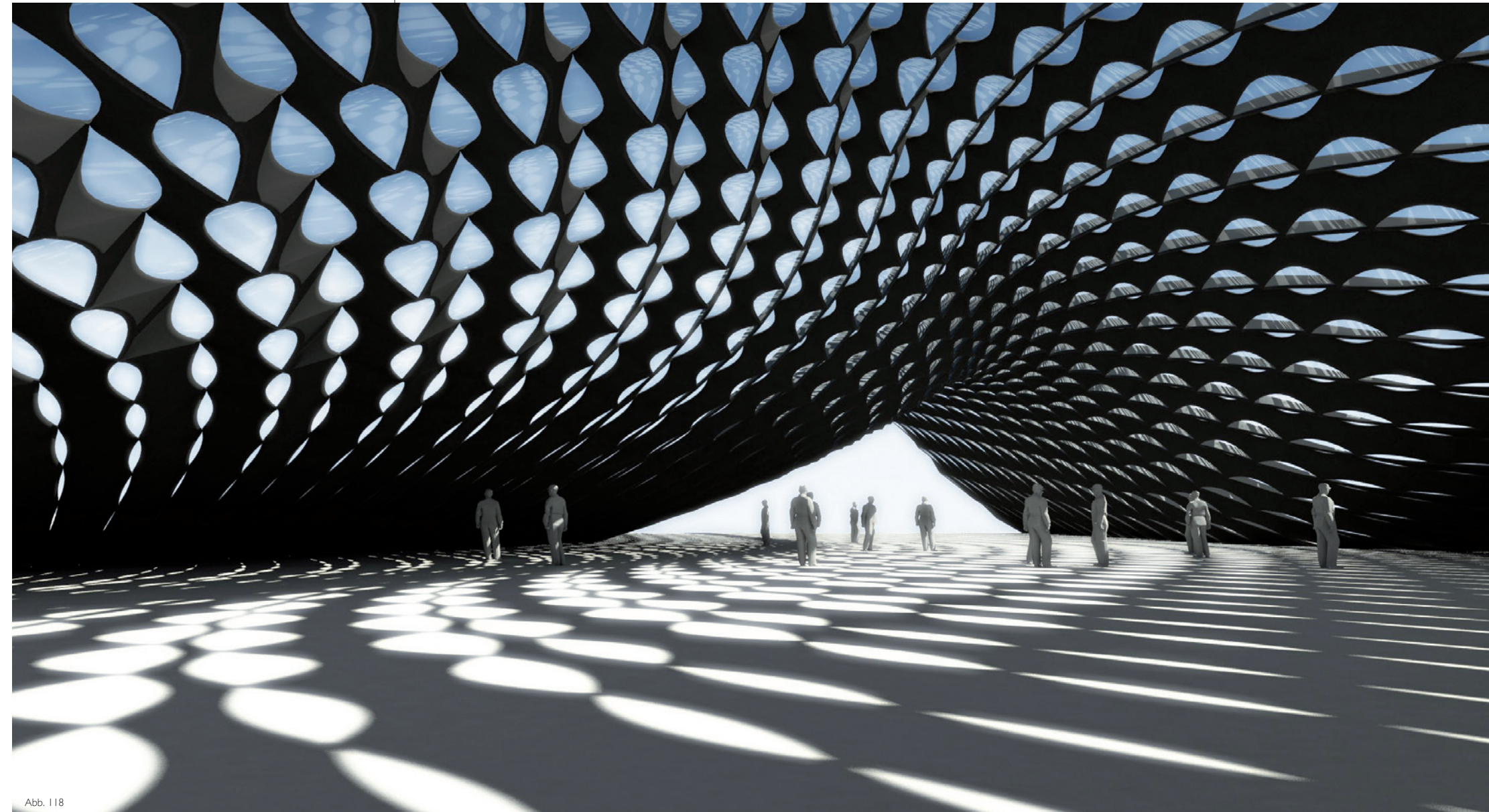
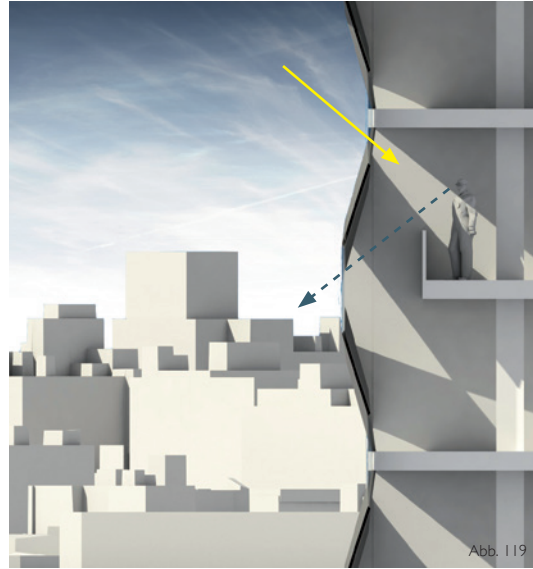


Abb. 118

Performatives Fassadensystem

Eine performative Fassade als Vorsatzschale könnte auf ein inneres Raumprogramm reagieren und die lokalen Linsen dementsprechend stärker oder weniger stark ausgebildet werden, um verschieden viel Sonnenlicht ins Innere zu lassen.

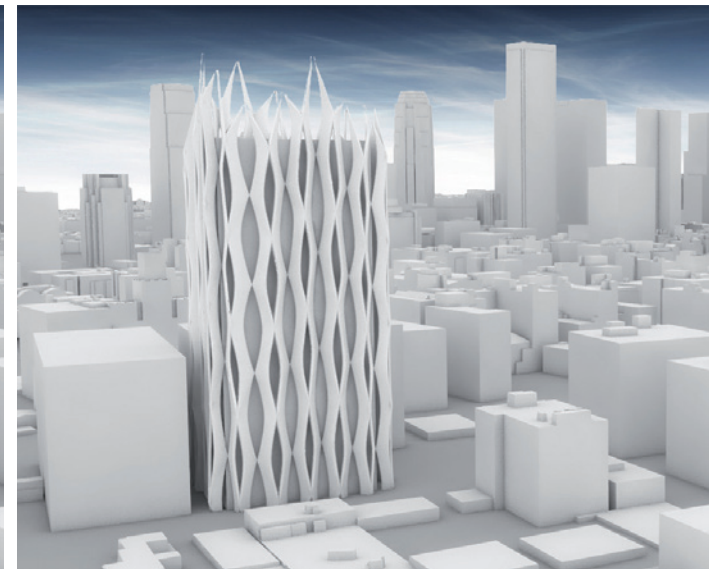
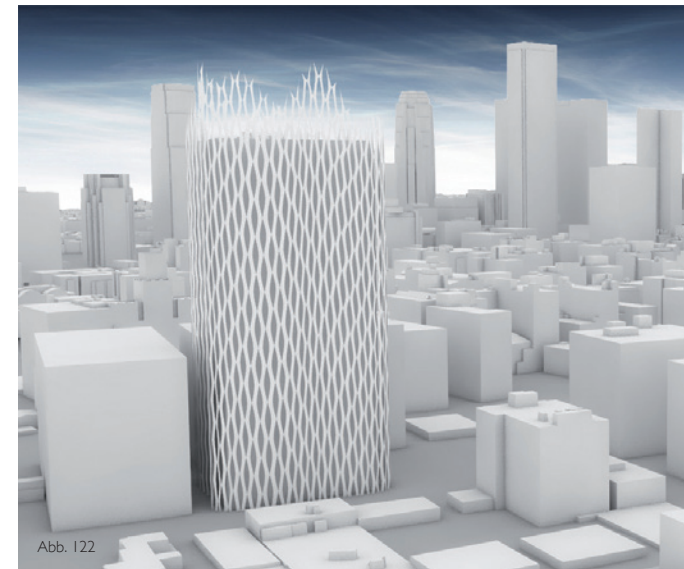
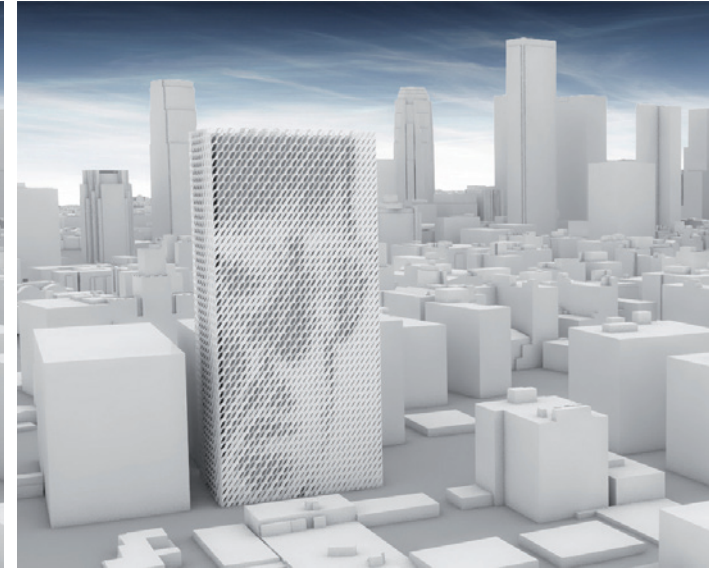
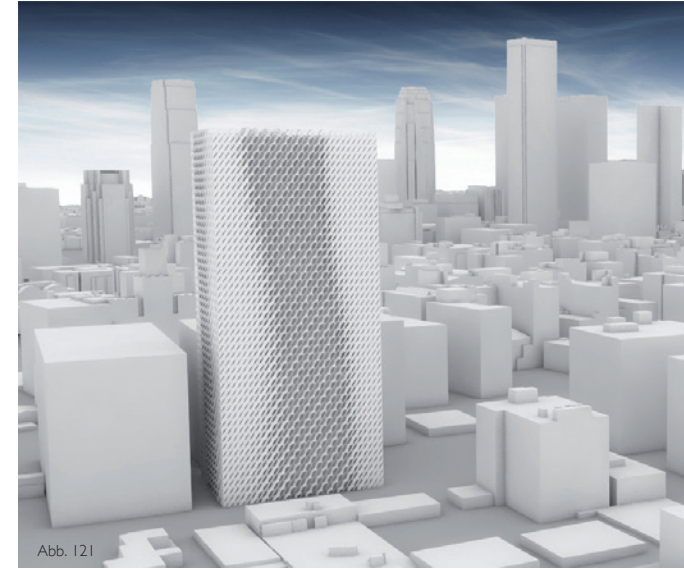
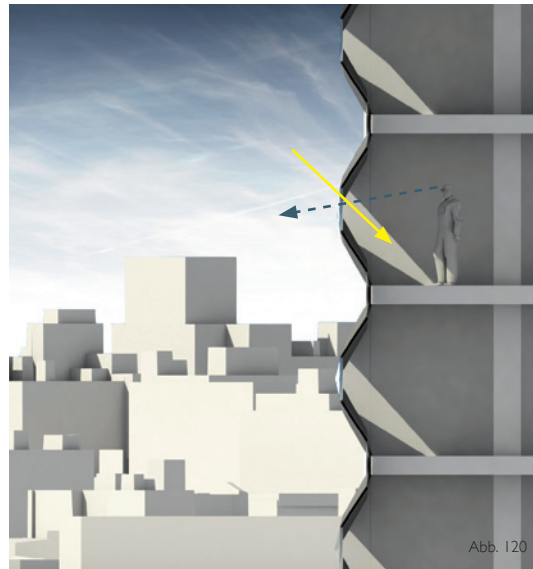
Eine mögliche Weiterentwicklung könnte eine flexible Struktur darstellen, welche im Laufe eines Tages oder im Wandel der Jahreszeiten bzw. zu speziellen Anlässen das Erscheinungsbild eines Gebäudes komplett umgestalten könnte. Dies könnte in ein ganzheitlich informiertes energietechnisches Konzept eines Gebäudes einfließen und somit eine ökologisch performative Gebäudehülle erzeugen, welche auf äußere Einflüsse reagieren könnte.



Tragende Aussenkonstruktion

Neben einer rein performativen oder gestalterischen Funktion bzw. als Verschattungssystem wäre durchaus eine tragende Aussenhülle denkbar, welche anfallende Windlasten effektiv in den Boden ableiten würde und somit die innere Tragstruktur des Gebäudes entlasten könnte.

Bei genügend statischem Querschnitt und entsprechender materieller Ausführung bzw. einem angepassten Grundriss des Gebäudes wäre sogar eine rein äußere Tragstruktur denkbar, in welche die Ebenen des Gebäudes eingehängt werden könnten.



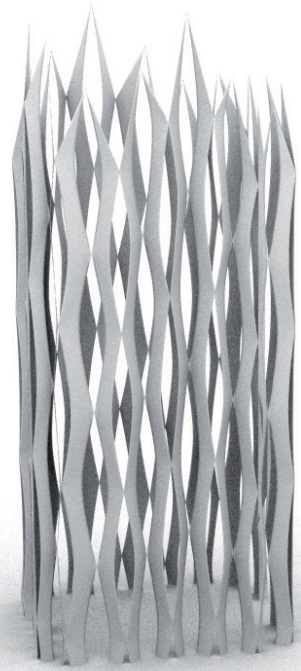


Abb. 123



Vorherige Seiten:

Abb. 118: Visualisierung einer Halle

Abb. 119, 120: Lens Tessellation als Fassadensystem

Abb. 121: Performatives Fassadensystem

Abb. 122: Konstruktive Aussenhülle

Abb. 123: Statisches Analysemodell einer tesselierten Konstruktiven Aussenhülle

Abb. 124: Zeitliche Abfolge eines sich öffnenden Fassadensystems

Abb. 125: Überlagerung eines Linsensystems zu verschiedenen Zeitpunkten

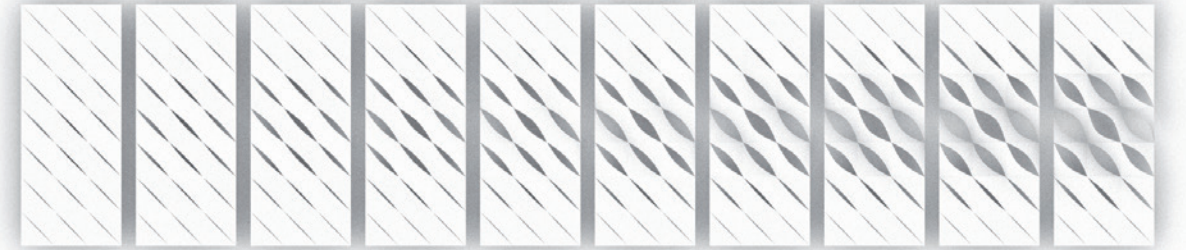


Abb. 124

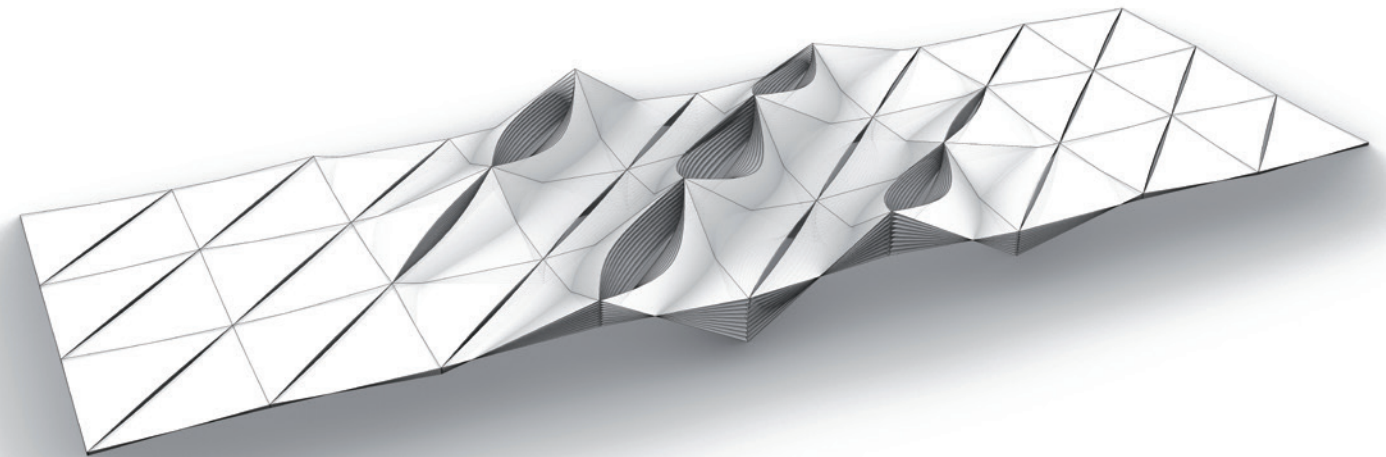
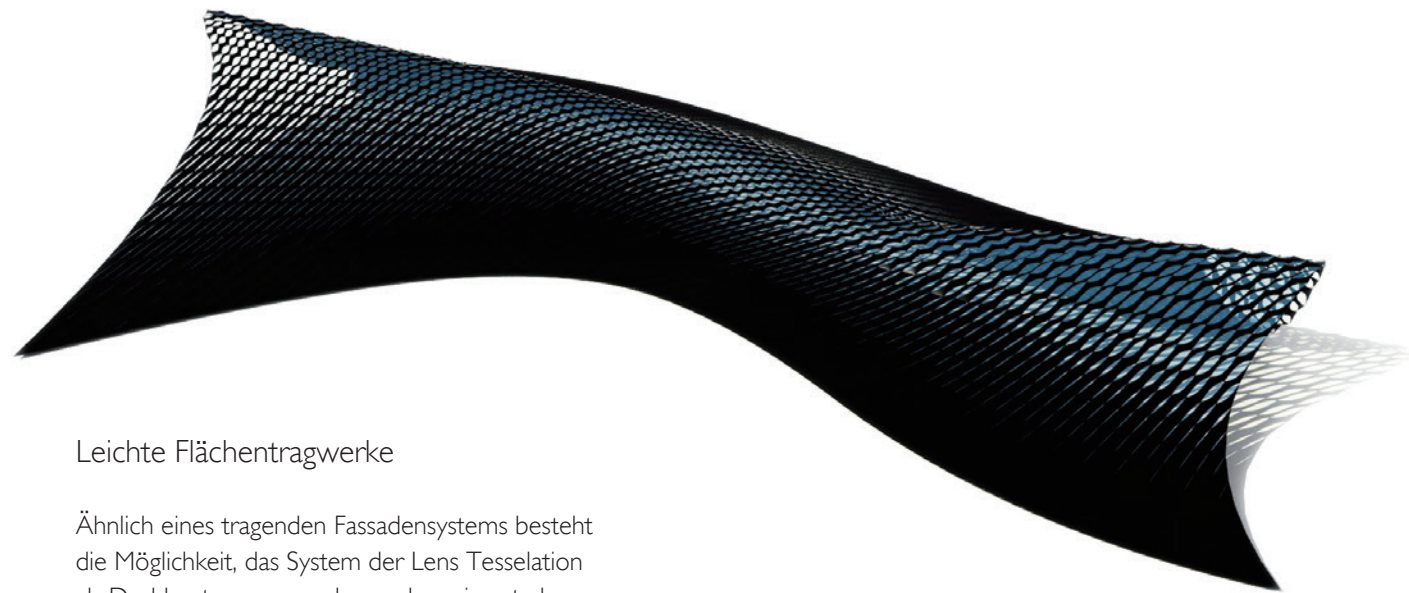


Abb. 125



Leichte Flächentragwerke

Ähnlich eines tragenden Fassadensystems besteht die Möglichkeit, das System der Lens Tessellation als Dachhaut zu verwenden und so eine stark verformte leichte Dachkonstruktion zu erstellen. Durch die zusätzliche Verwendung verschiedener Öffnungswinkel der Zylinderflächen und den Einsatz von einseitig gekrümmtem transparentem Material könnten auf diese Weise große Hallen wie Thermen oder Sportstätten stützenlos überdacht werden. Die graduell abgestuften Oberlichter können zum Einen die natürliche Notwendigkeit solch großer Räume für Tageslicht befriedigen und andererseits gezielt einen effektiven Sichtschutz bilden.

Das System der Lens Tessellation lässt einen hohen Grad an Freiheit bei der Verformung eines Gewölbes zu, was zu spektakulären Konstruktionen führen könnte. Das Verhältnis von konstruktiven Elementen zu Glasfläche solch eines leichten Flächentragwerks ist zudem relativ groß.

Abb. 126

- Abb. 126: Perspektive eines möglichen verformten leichten Flächentragwerks
 Abb. 127: Perspektive eines möglichen verformten leichten Flächentragwerks
 Abb. 128: Visualisierung eines möglichen verformten leichten Flächentragwerks

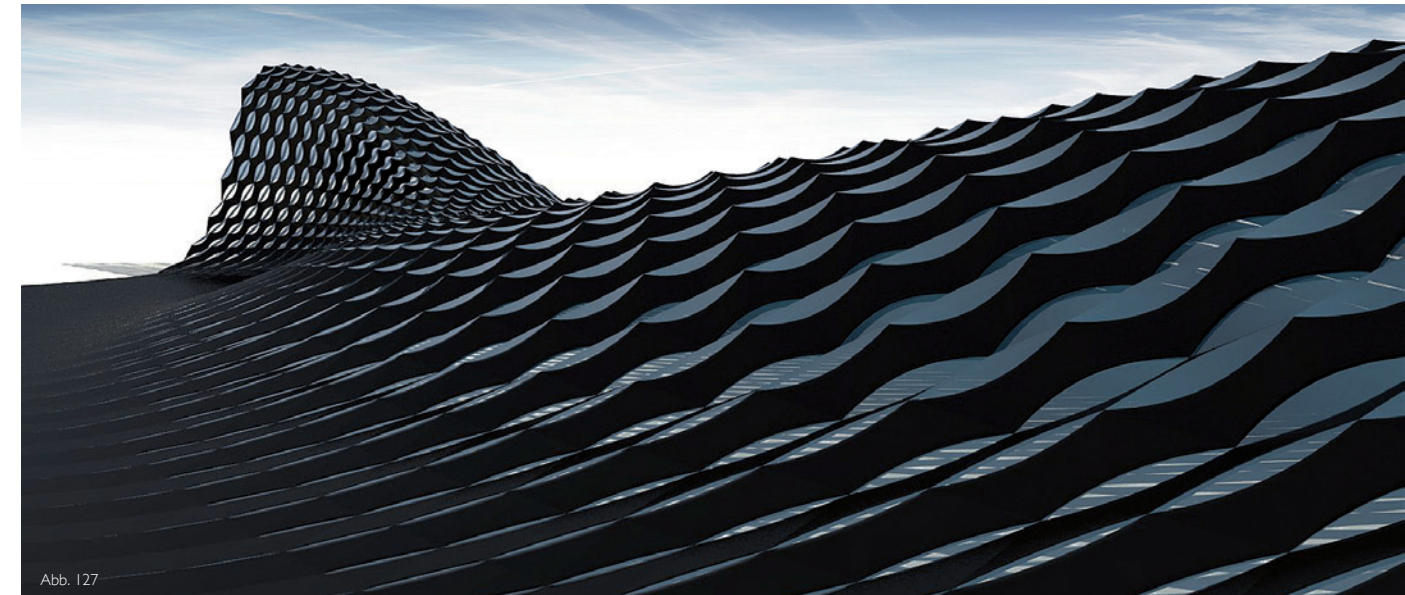


Abb. 127

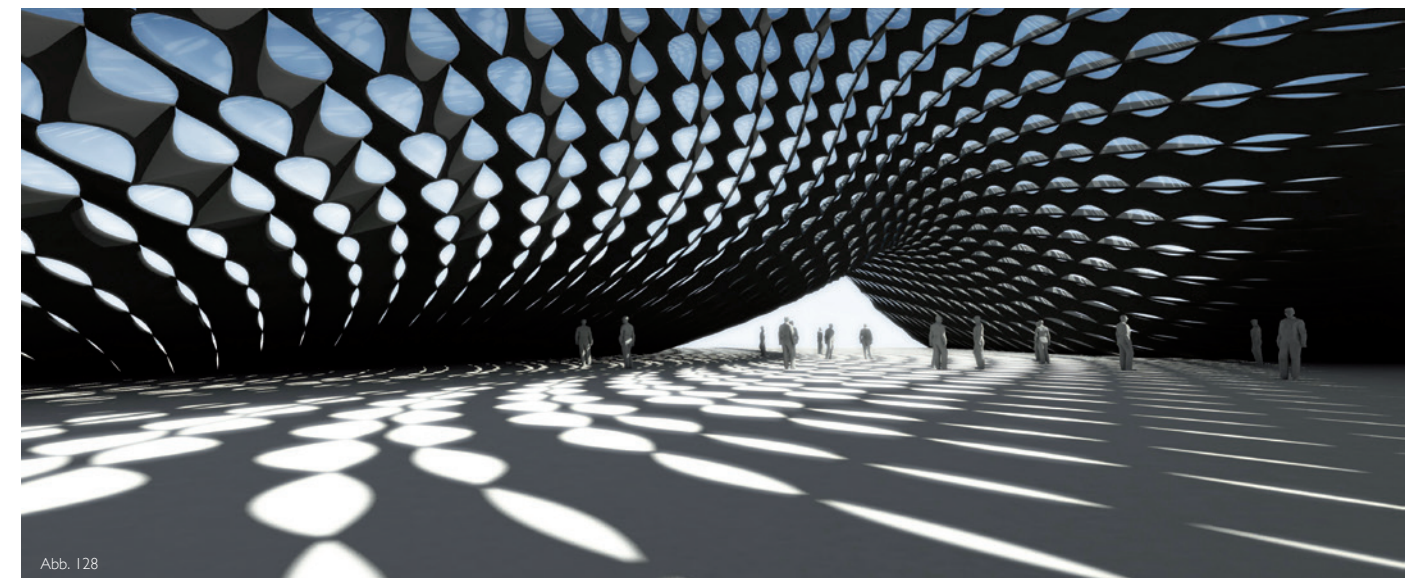


Abb. 128

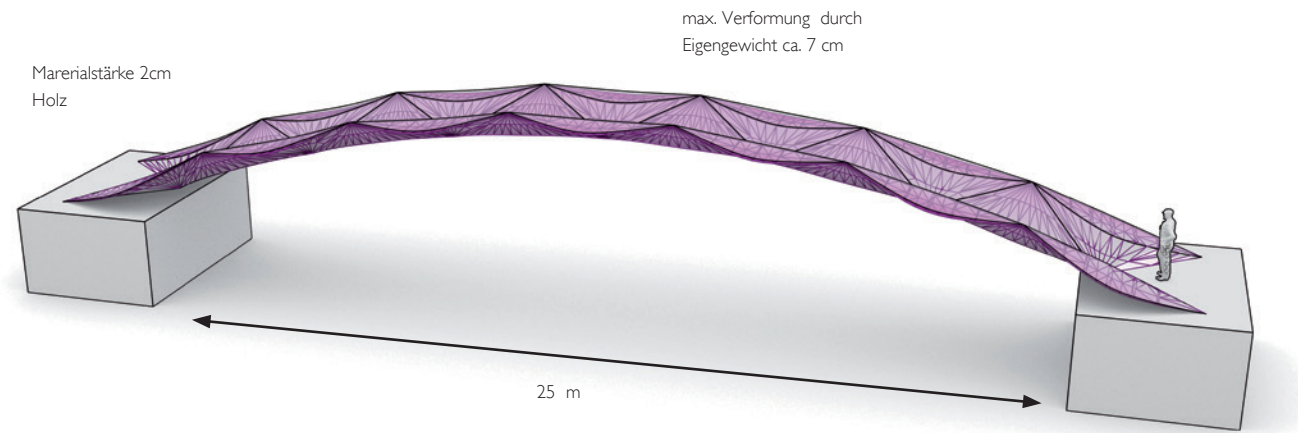


Abb. 129

Tragende Bauteile

Durch die Tessellierung von Bögen entstehen sehr stabile Tragwerke, mit denen im Vergleich zur sehr geringen Materialstärke extrem große Spannweiten erreicht werden können, was für Brücken oder Träger in Hallen sehr interessant wäre. Durch die einfache Krümmung solcher Bögen und die dadurch mögliche verschnittfreie Erstellung eines Trägers aus einer einzigen Platte wäre dieses System sehr wirtschaftlich und hätte das Potential zur standardisierten Massenware.

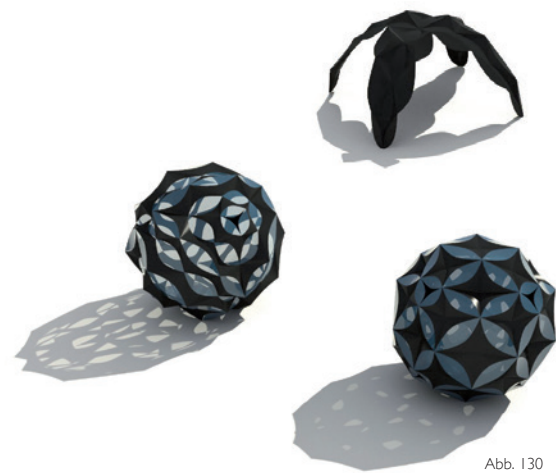


Abb. 130

Eine weitere Möglichkeit wäre das Verbinden von mehreren tesselierten Systemen zu konstruktiv wirksamen Bauteilen. Dadurch könnten dessen statische Eigenschaften noch erweitert werden und es würden neben flächigen, bogenähnlichen und kuppelförmigen Systemen auch in sich geschlossene Konstruktionen möglich, welche durch ihre Geometrie besonders stabil wären.

Abb. 129: Strukturelle Analyse eines möglichen Brückenträgers
 Abb. 130: Verbindung mehrerer tessellierter Systeme
 Abb. 131: Visualisierung einer Halle mit tesselliertem Tragwerk
 Abb. 132: Prototyp eines tessellierten Trägers aus 5mm Sperrholzplatten

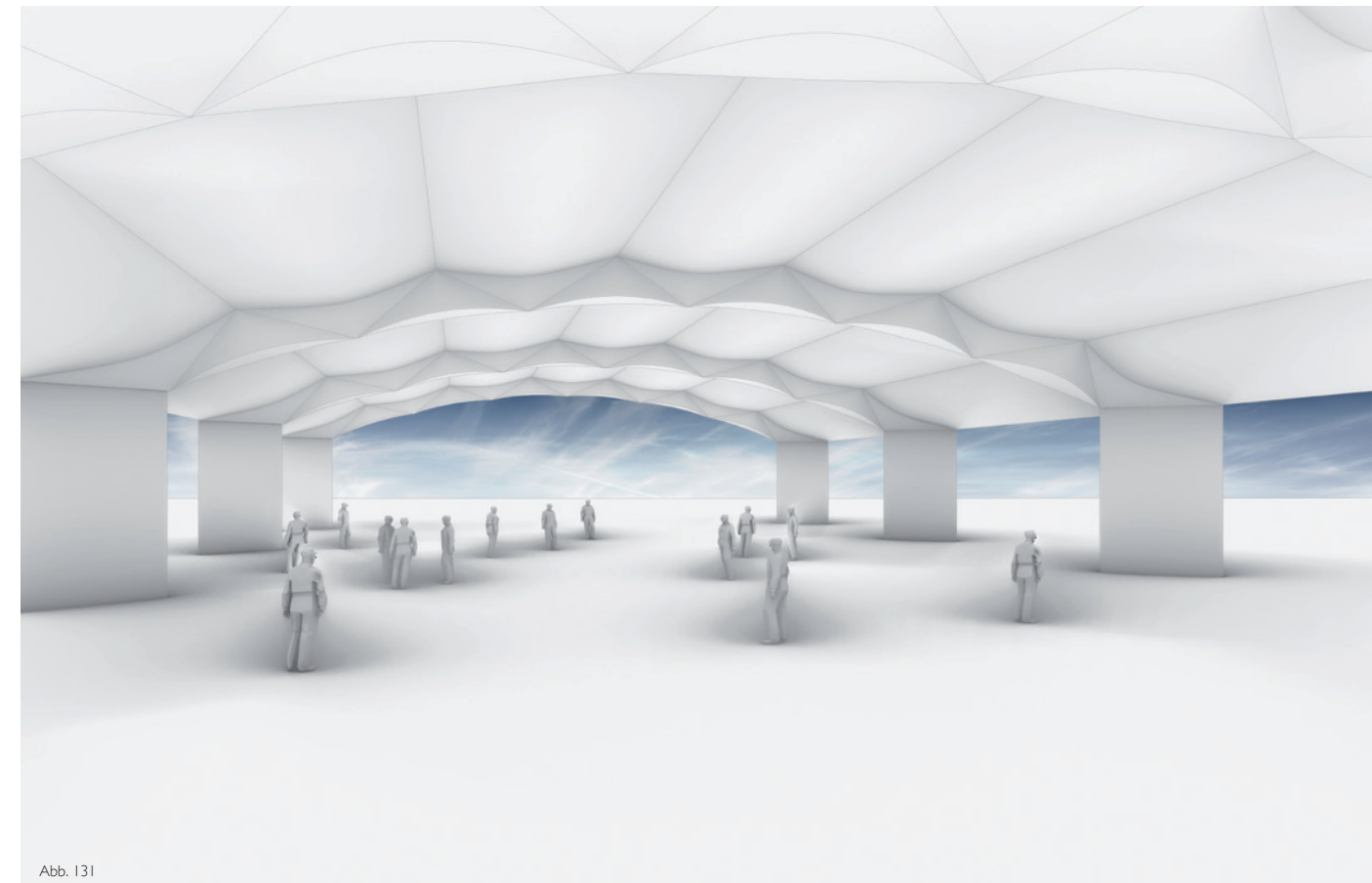


Abb. 131

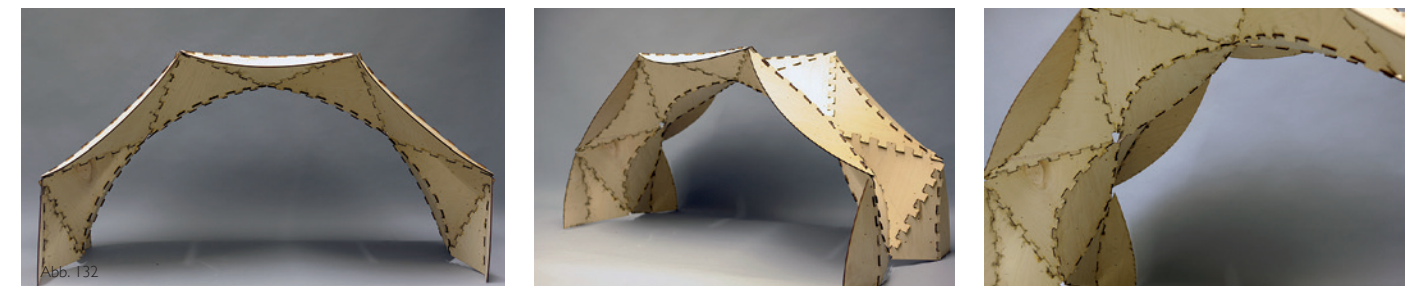


Abb. 132

Überlagerung der Spannrichtungen

Werden zwei Linsenrichtungen auf einer Fläche überlagert und ohne oder mit geringem Abstand zueinander invertiert und verbunden, entsteht ein System mit zwei Spannrichtungen. Das bringt eine Erhöhung der statischen Performance und erlaubt tesselierte Konstruktionen mit mehr Freiheiten und einem starken ornamentalen Charakter.

Solche überlagerten Systeme würden außerdem in einzelne Bausteine zerlegbar sein. Die räumlichen Einzelteile könnten in einem additiven Verfahren zu räumlichen Systemen verbunden werden. Außerdem entstehen durch die Volumenkörper die Möglichkeiten dieses als Fenster oder sogar als Dämmelement zu verwenden.

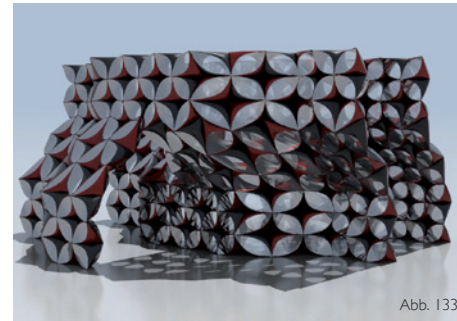


Abb. 133

- Abb. 133: Visualisierung Bausteine
- Abb. 134: Papiermodell von 4 verbundenen Bausteinen
- Abb. 135: Visualisierung einer Kuppel mit überlagerten Spannrichtungen
- Abb. 136: Überlagerung von zwei Systemen

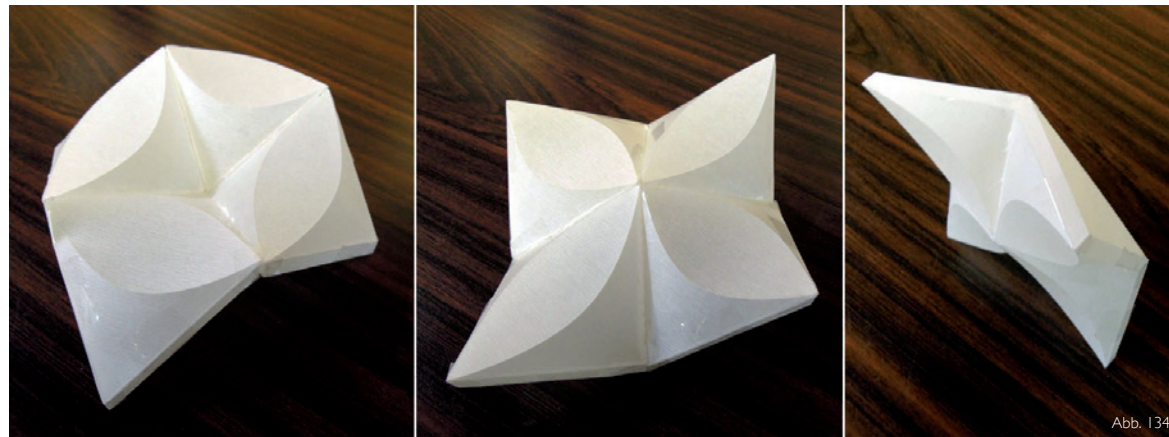


Abb. 134



Abb. 135

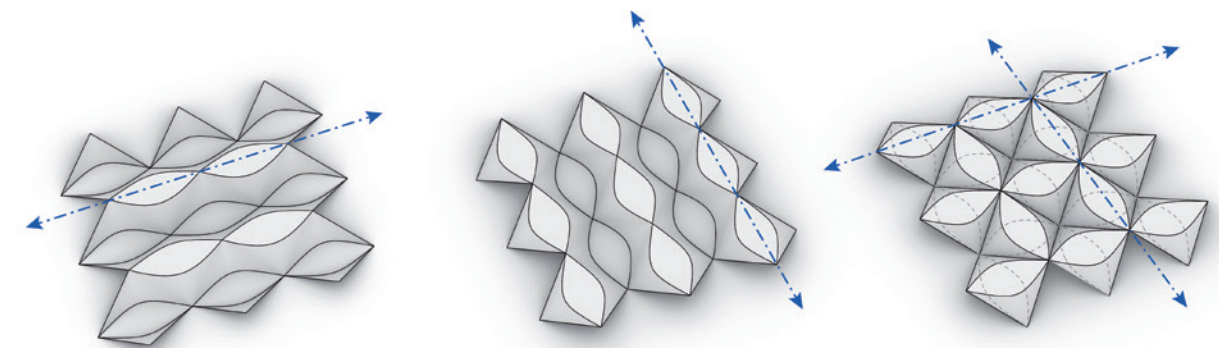


Abb. 136

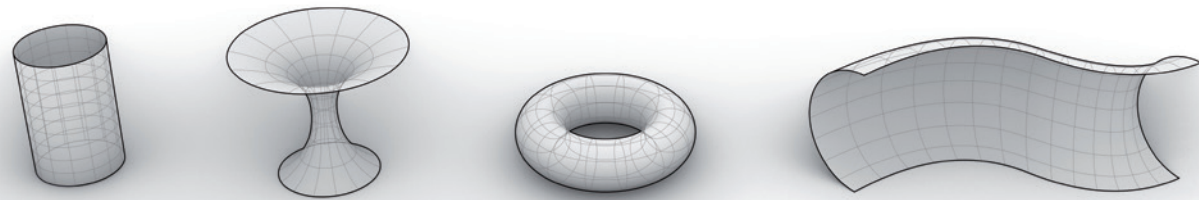


Abb. 137

Rotationskörper

Durch die Eigenschaft von Systemen tessellierter Linsen, bei einfacher Krümmung orthogonal zur Linsenrichtung, sehr stabile Konstruktionen zu erzeugen, bietet die Formenwelt der Rotationskörper eine gute Ausgangsbasis für Entwürfe mit der Lens Tessellation.

In einem exemplarischen Entwurf zu den architektonischen Potentialen von Rotationskörpern wurde ein halbiertes Torus verzerrt und dann die äußeren Seiten so abgespreizt, dass die gesamte Konstruktion außer auf der mittleren Säule nur noch auf zwei Punkten ruht. Dadurch ergibt sich speziell in der Untersicht der Rippen eine spannende organische Form. Die Struktur erreicht eine relativ große Spannweite und überdacht so einen großen Bereich.

Eine Überprüfung der statischen Performance ergab bei einer Materialstärke von 3 cm, einer Höhe von etwa 4 Meter und über 8 Meter Spannweite eine Verformung von nur 5 cm.

Abb. 137: Verschiedene Rotationskörper

Abb. 138: Liniengrafik eines Entwurfs auf Torusbasis

Abb. 139: Statische Performance einer tessellierten Rotationsfläche

Nächste Seite: Abb. 140 - 142: Visualisierungen eines exemplarischen Entwurfs zu den architektonischen Potentialen von tessellierten Rotationskörpern

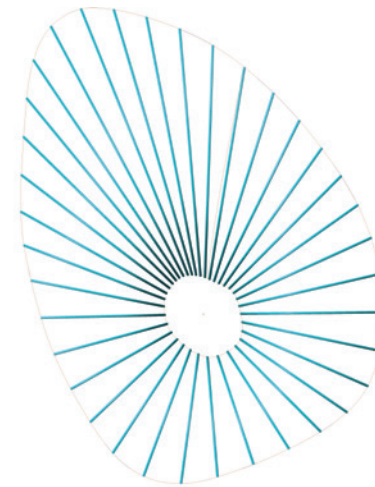


Abb. 138

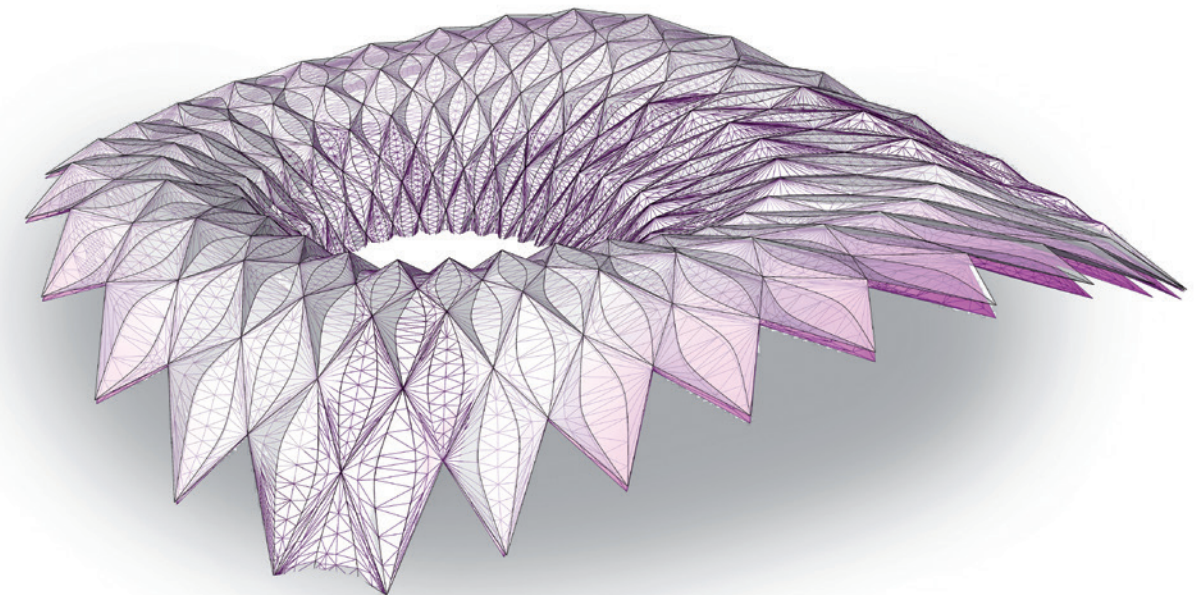
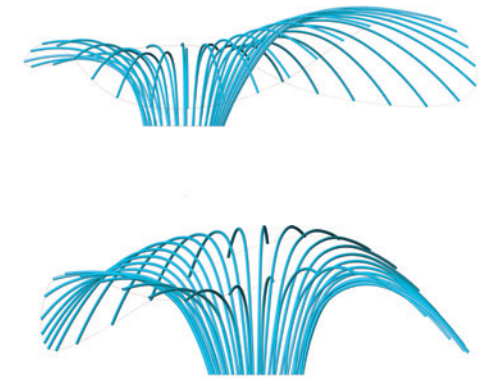


Abb. 139

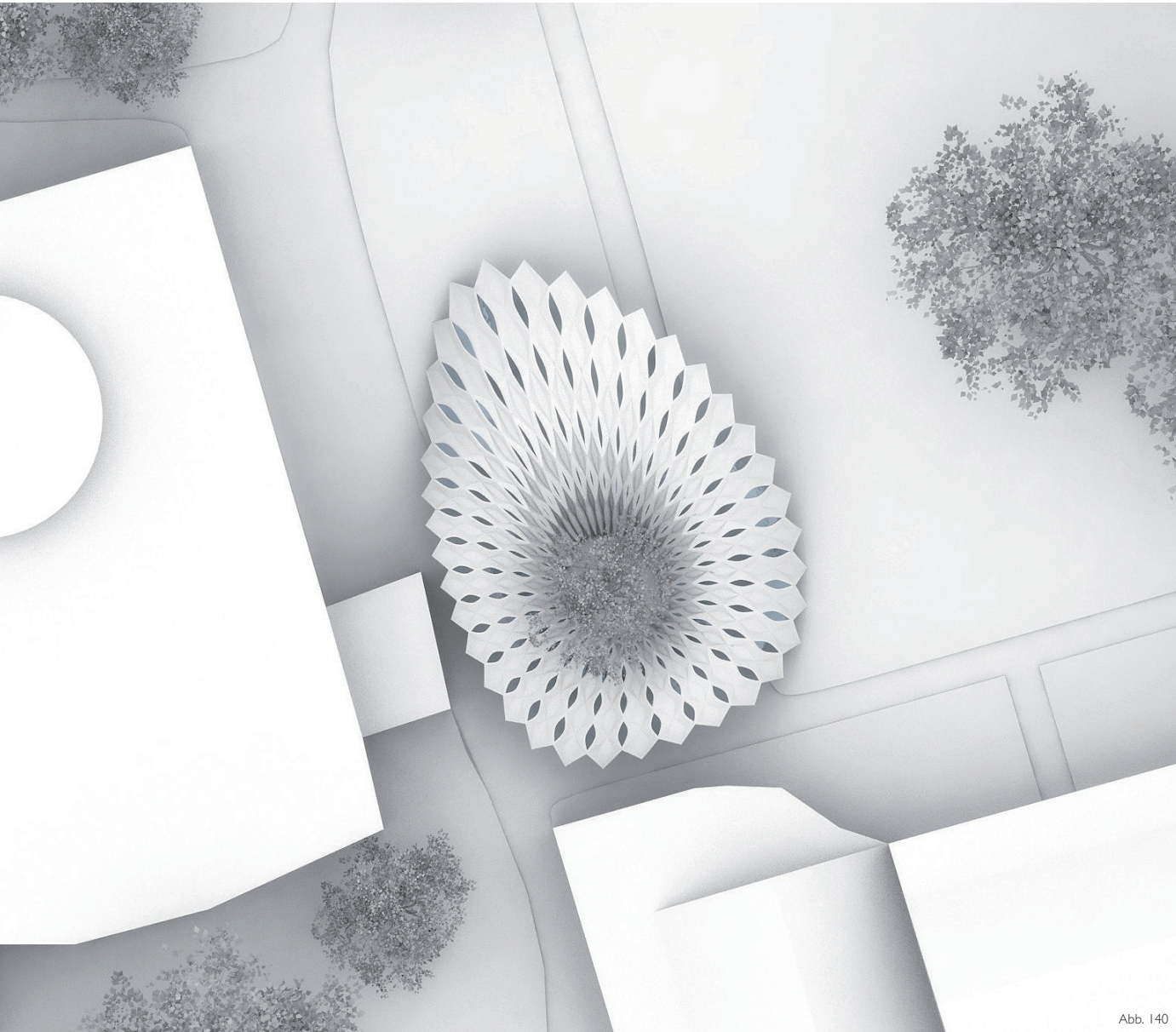


Abb. 140

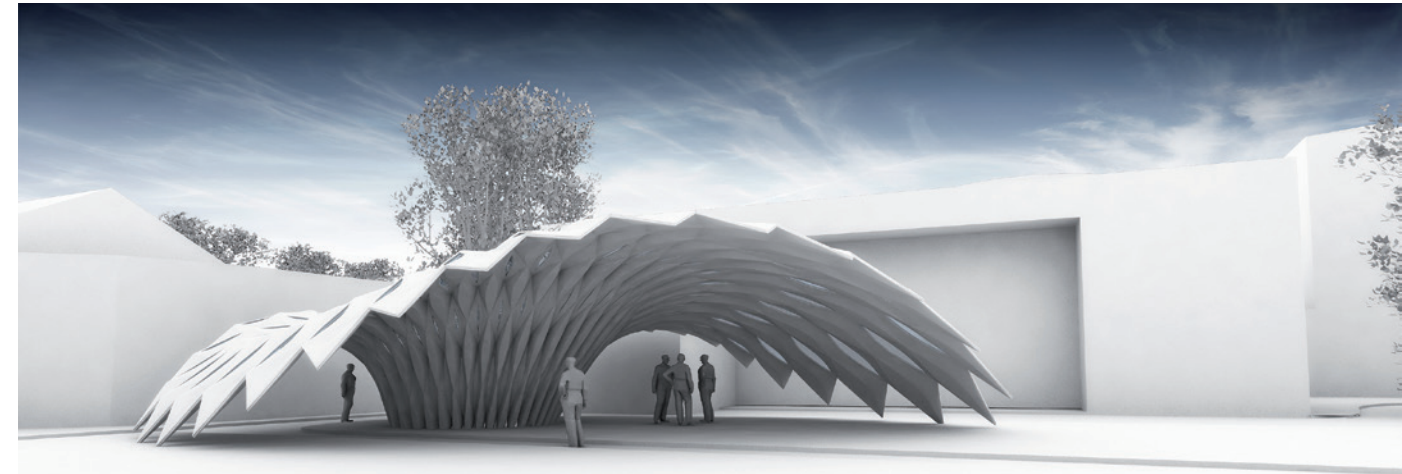


Abb. 141



Abb. 142

Periodische Minimalflächen

Durch die Anwendung der Lens Tessellation auf dreifach periodische Minimalflächen - sogenannte „Schwarz'sche P-Flächen“ - entstehen nicht nur Räume, die von Innen nach Außen fließen sondern die Konstruktion ist mit regelmäßigen Linsen möglich, da die Fläche eine stetige Krümmung aufweist.

Periodische Minimalflächen entstehen durch das Aneinanderreihen von Hyperbolischen Paraboloiden und erzeugen eine endlose Fläche, die in sich verschlungen ist und dadurch schwer zu lesen ist.

Auch bei Deformierung der Minimalflächen bleibt die in sich geschlossene Struktur stabil und ermöglichen es sehr wahrscheinlich, die Linsen teilweise komplett in transparentem Material auszuführen, da die Kräfte sich regelmäßig in der Struktur verteilen.



Abb. 143

Abb. 143: Versuch der Tessellierung einer aufgelösten Minimalfläche

Abb. 144: Herleitung von dreifach periodischen Minimalflächen aus Hyperbolischen Paraboloiden

Abb. 145: Visualisierung eines tesselierten periodischen Minimalfläche

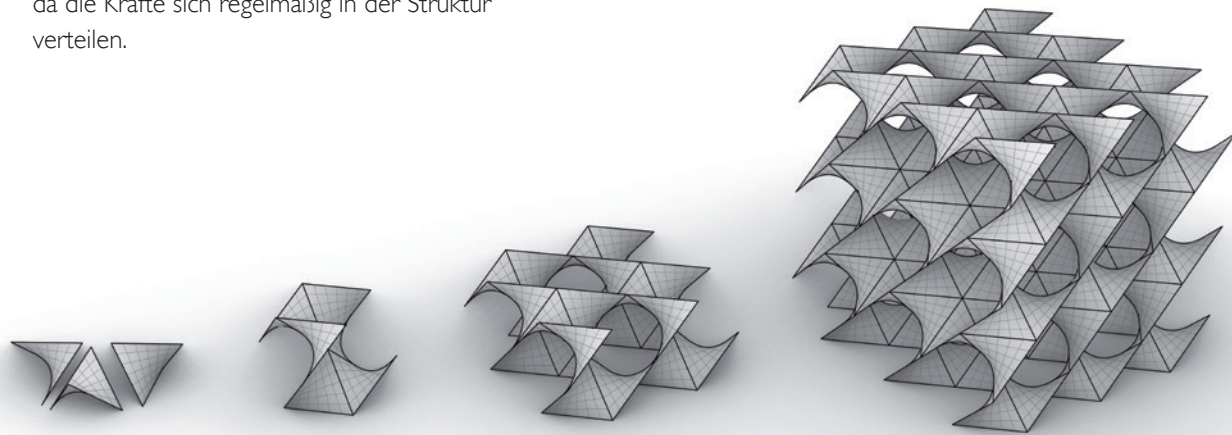


Abb. 144



Abb. 145

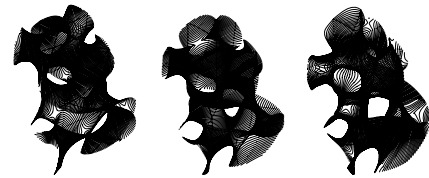
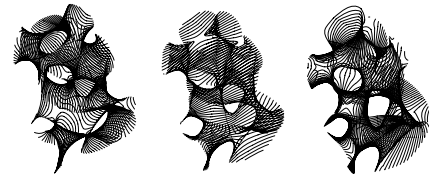
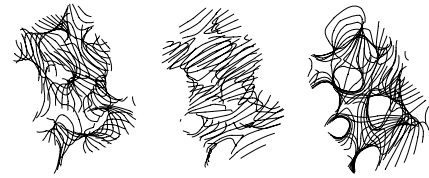


Abb. 146

Abb. 146: Liniengrafik zur Herleitung einer periodischen Minimalfläche

Abb. 147: Visualisierung eines exemplarischen Entwurfsmodells

Abb. 148: Analyse der statischen Performance eines exemplarischen Entwurfs

Nächsten Seiten: Abb 149 - 154: Visualisierungen eines exemplarischen Entwurfsmodells

Qualitäten und strukturelle Eigenschaften tesselierter periodischer Minimalflächen

Ein exemplarischer Entwurf zeigt, dass eine solche Geometrie nicht auf einen Blick lesbar ist. Die in sich verschlungene Fläche bildet neben einem Durchgang mehrere „Fenster“, Oberlichter sowie einen separaten Raum den man gesondert betreten kann.

Die dargestellte Struktur besteht aus etwa 100 zu einer durchgehenden Fläche verbundenen, teils stark verzerrten Hyperbolischen Paraboloiden.

Durch die kleinteilige Tessellierung entsteht eine Struktur aus ca. 7500 Linsen und den sie verbindenden gefaltenden Elementen. Die Linsen verdichten bzw. öffnen die Struktur durch variierende Öffnungswinkel.

Eine Analyse der statischen Performance der Geometrie mit weniger und dafür größeren Linsen und einer Materialstärke von 2 cm wies in etwa eine maximale Verformung von 1 mm auf, was an der sehr guten strukturellen Eigenschaft der Minimalfläche liegt und dafür spricht, viele der Linsen entweder frei zu lassen oder durch ein transparentes Material ersetzen zu können. Das Problem solcher Strukturen ist allerdings ihre enorme Kleinteiligkeit, was neue Überlegungen zu Material, Fabrikation und Aufbau nach sich ziehen muss.

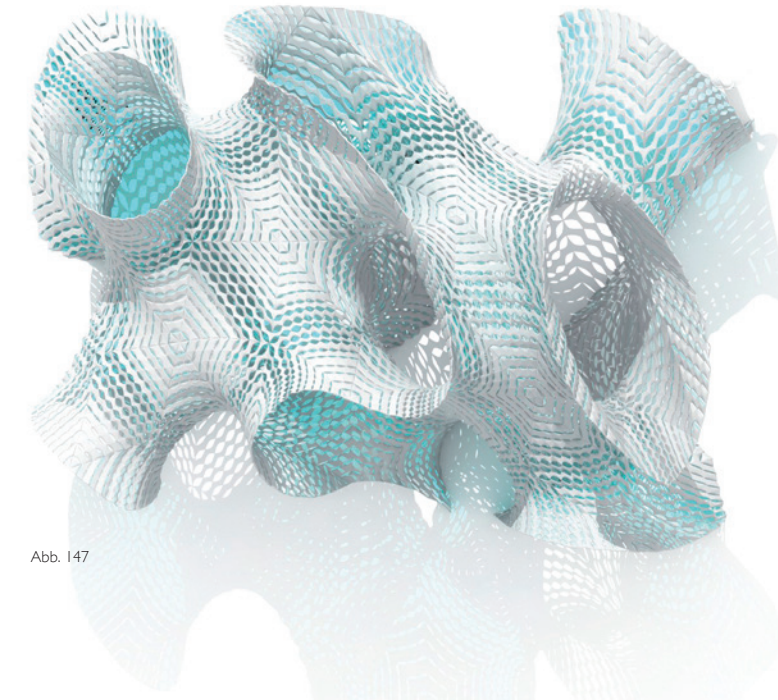


Abb. 147



Abb. 148



Abb. 149

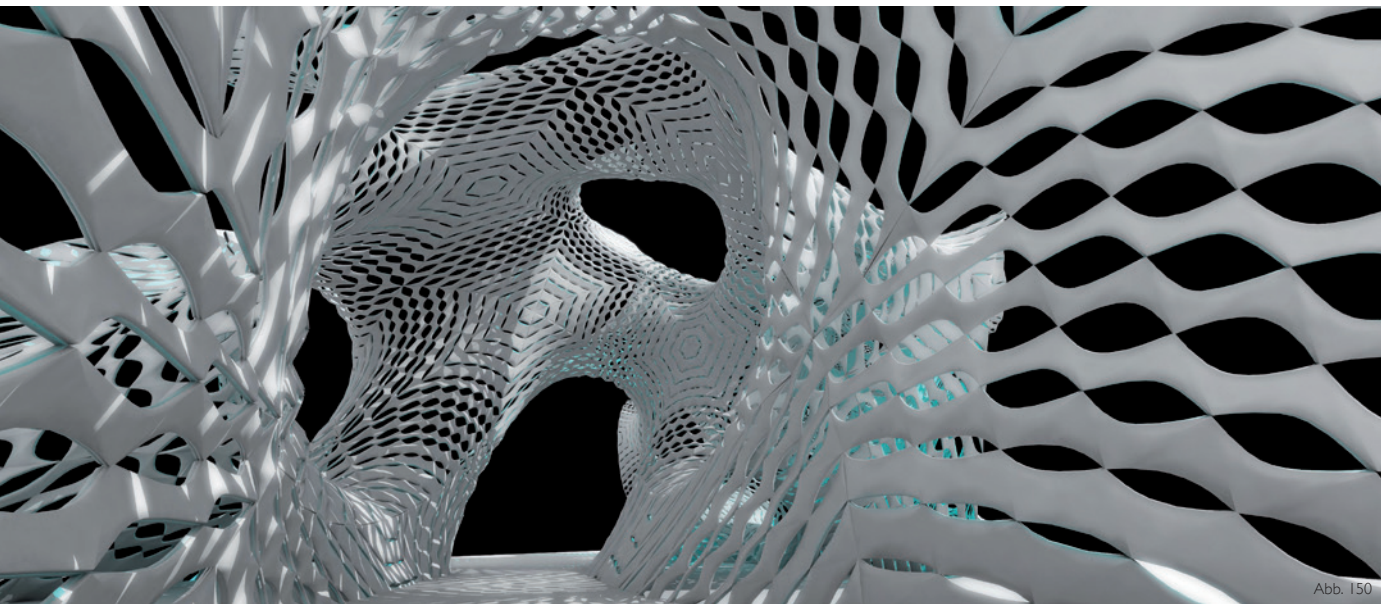


Abb. 150

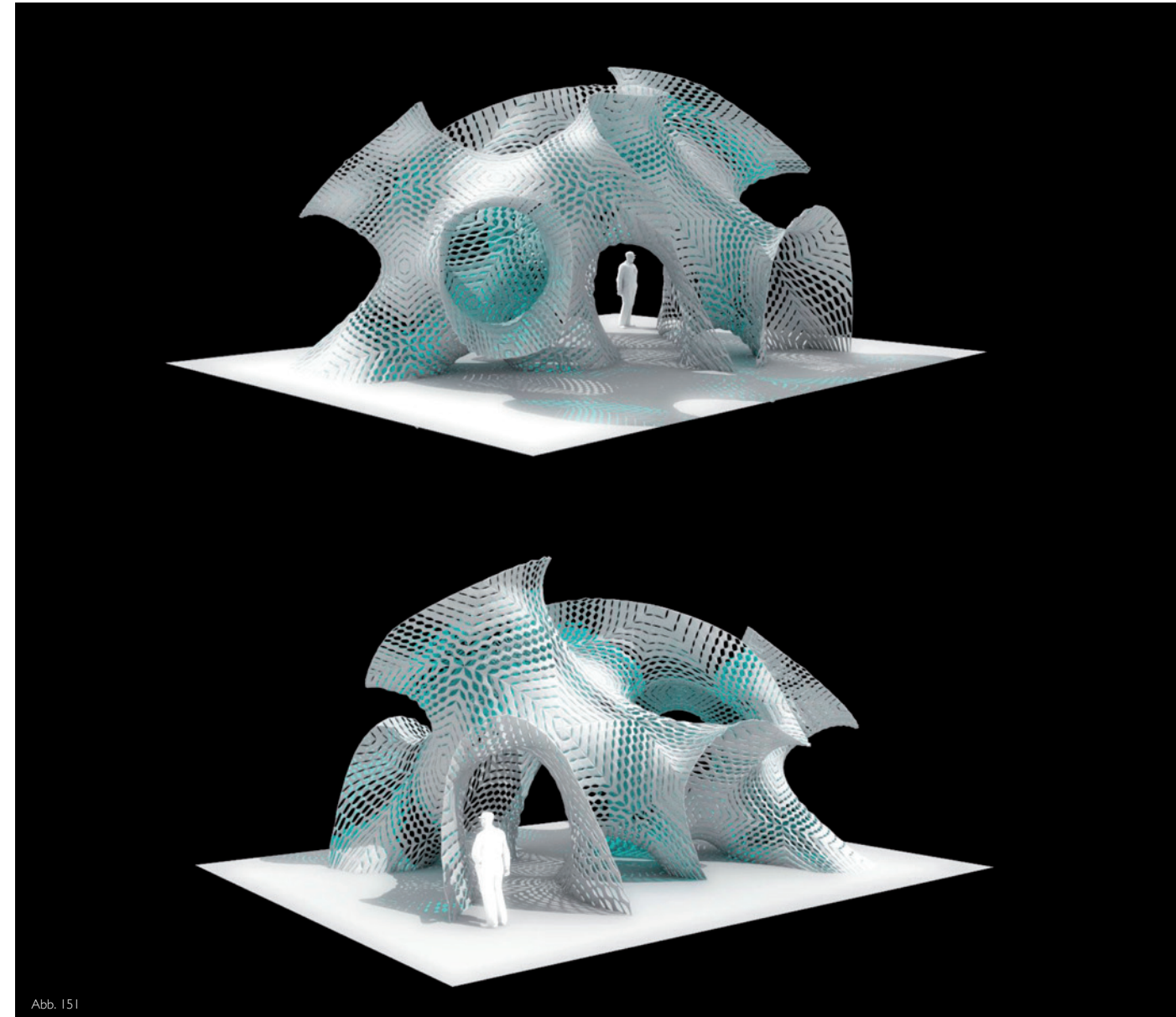


Abb. 151

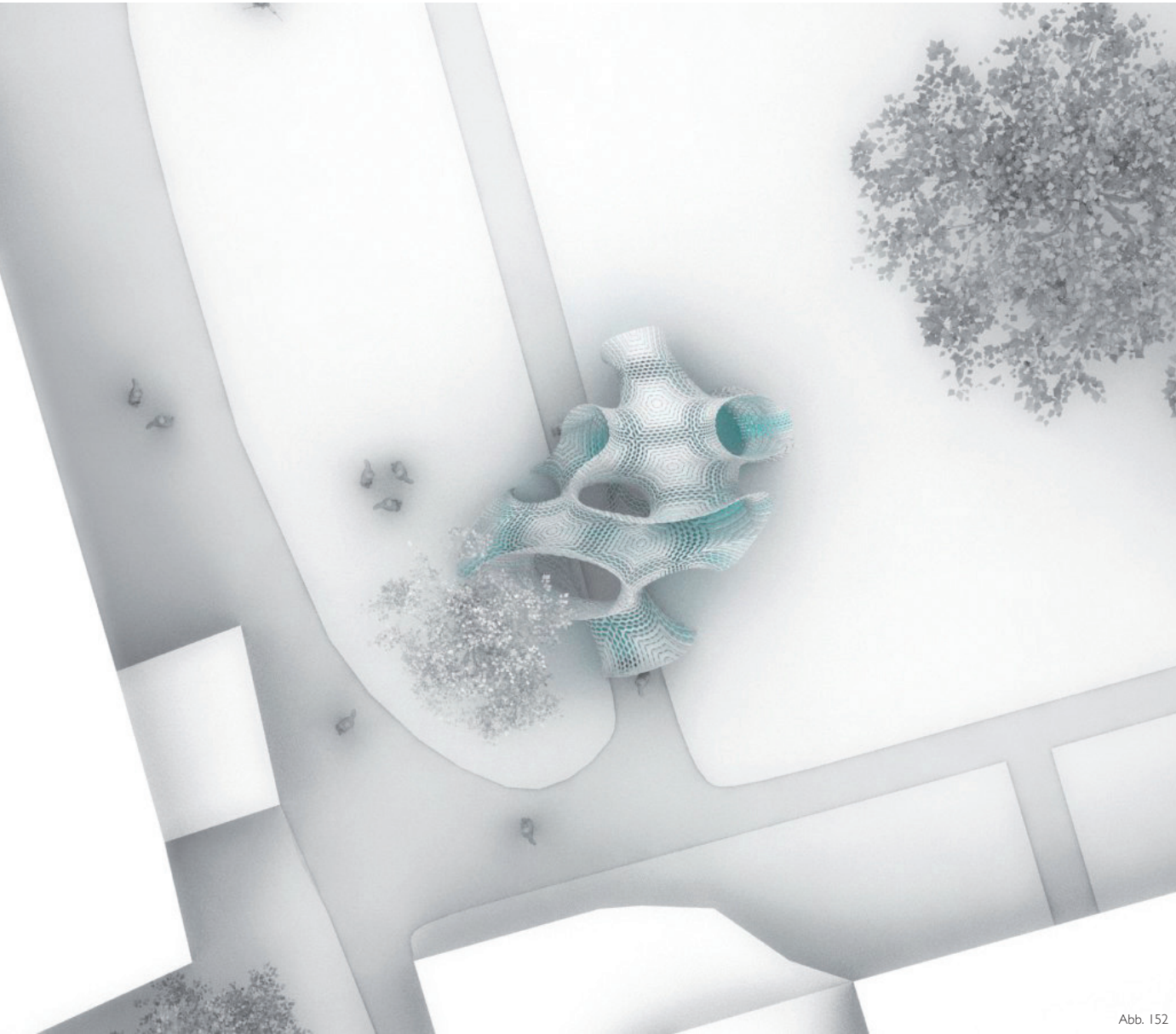


Abb. 152

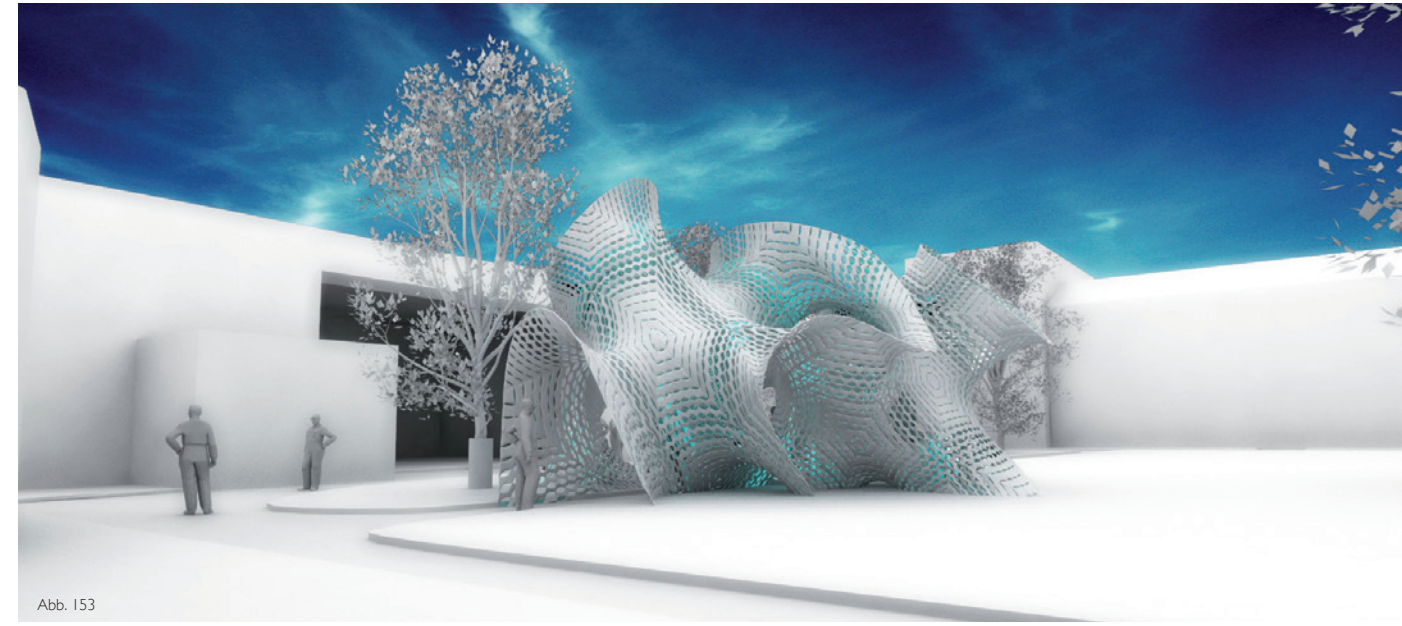


Abb. 153

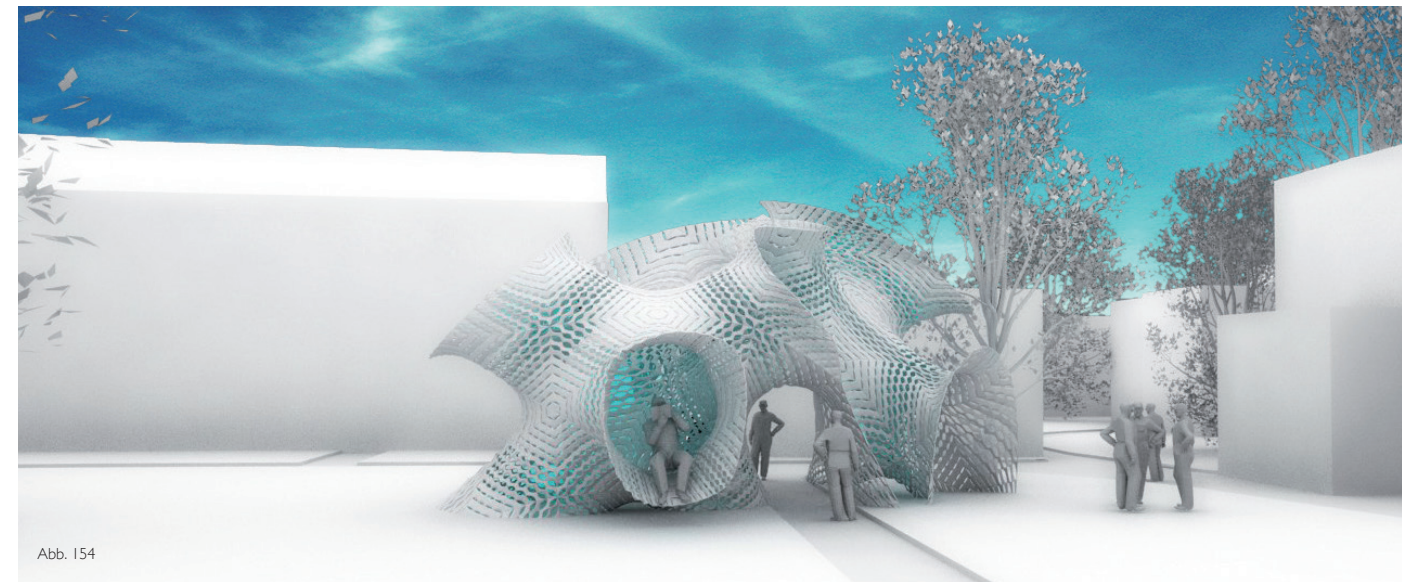


Abb. 154

III: Demonstrator

Entwurf eines Demonstrators für Oxford

Die Universitätsstadt Oxford, gegründet im 8. Jahrhundert n.Chr., ist seit mehr als 800 Jahren ein Ort des Lernens und der Wissenschaft. Die Universität ist eine der ältesten und renommiertesten der Welt. Das älteste College wurde im späten 13. Jahrhundert gegründet und beherbergt auch heute noch eine der 38 Akademien und 6 Privatschulen, welche gemeinsam die Universität von Oxford bilden.

Da jedes College über seine eigenen Sportstätten verfügt, gibt es in der Stadt nicht nur jede Menge sportlicher Wettkämpfe sondern auch eine große Zahl von Parks und Grünanlagen, welche die über 20.000 Studenten gerne in ihrer Freizeit aufsuchen. Die Stadt beherbergt ausserdem 30 Bibliotheken sowie 7 Museen, und das bei einer Einwohnerzahl von gerade einmal 160.000 Menschen.

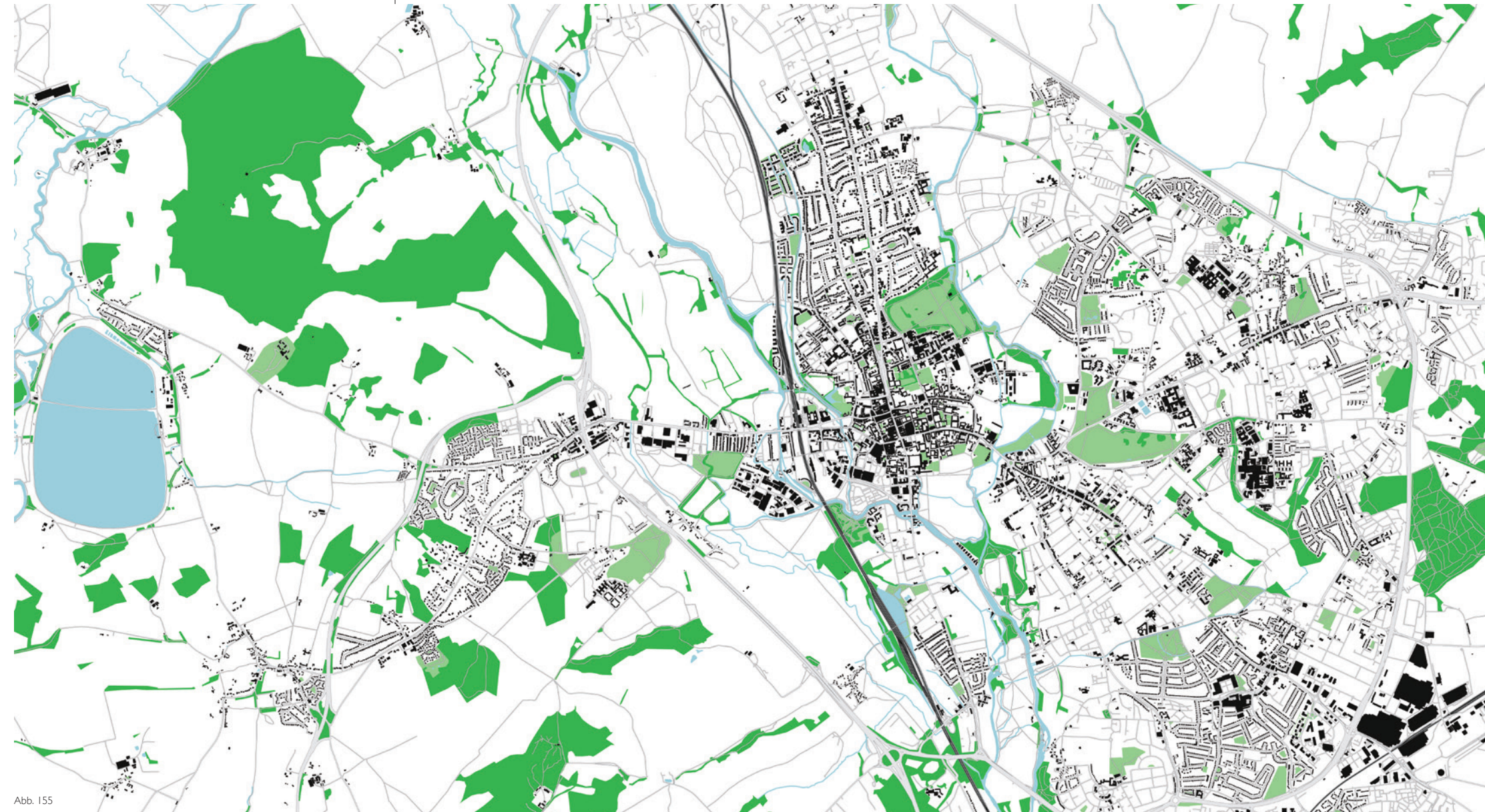


Abb. 155

Die 7OSME in Oxford

Die 7OSME, die „7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education“ findet heuer in Oxford statt. Die Messe ist eine der wichtigsten Treffen rund um Origami und Origami-Science der Welt und findet alle 4 Jahre statt. Die wichtigsten Erkenntnisse und Präsentationen der OSME werden nach jedem Treffen als Buch veröffentlicht, welche als Standardwerke zum Nachschlagen für die konstruktiven und mathematischen Aspekte der Faltung dienen. Aber auch Künstler präsentieren bei jedem Treffen ihre neuesten Kreationen und so wird die OSME zur Schnittstelle von Kunst, Ingenieurwesen und Mathematik.

Beim heuer stattfindenden Treffen werden sowohl im St. Anne's College als auch im Institut für Ingenieurwesen Teilnehmer ihre Vorträge halten, während im Mathematischen Institut die Keynote Lectures abgehalten werden. Für die Unterbringung ist wiederum das St. Anne's College geplant.

Vorherige Seite: Abb. 155: Übersichtsplan der Stadt Oxford in Großbritannien

Abb. 156: Übersicht der Bildungseinrichtungen in Oxford

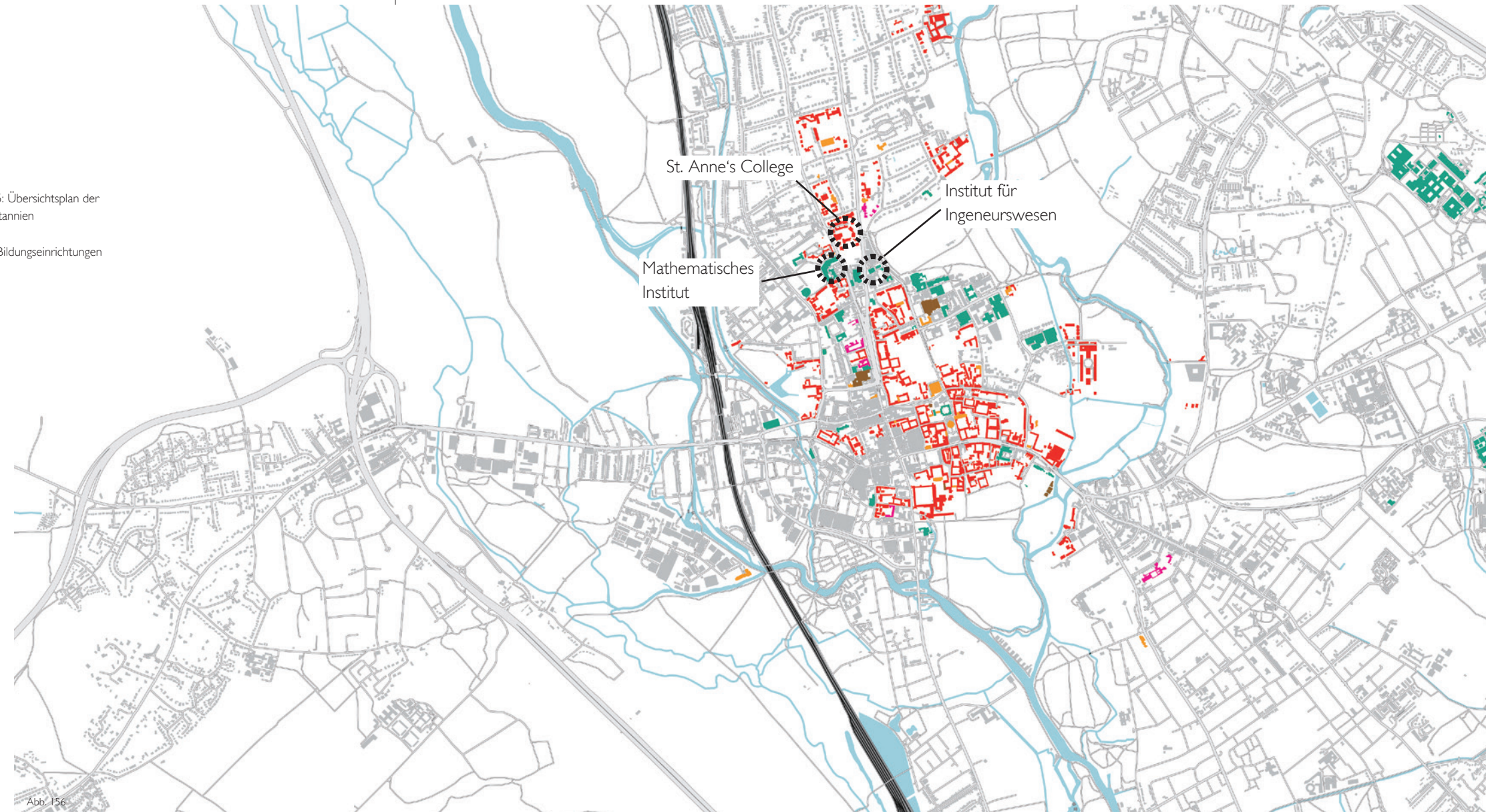


Abb. 156

Ablauf und Organisation

Das heuer stattfindende Treffen der 7OSME wird auf drei Locations verteilt. Während sowohl im St. Anne's College als auch im Institut für Ingeneurswesen Teilnehmer ihre Vorträge halten werden, wird das mathematische Institut der Ort, in dem die Keynote Lectures abgehalten werden.

Für die Unterbringung ist wiederum das St. Anne's College geplant - in den zwei Gebäuden des Wolfson Building und des Rayne Building.

Ein Großteil der Konferenz findet also im St. Anne's College statt, welches daher auch als Ort für einen möglichen Demonstrator ausgewählt wurde.

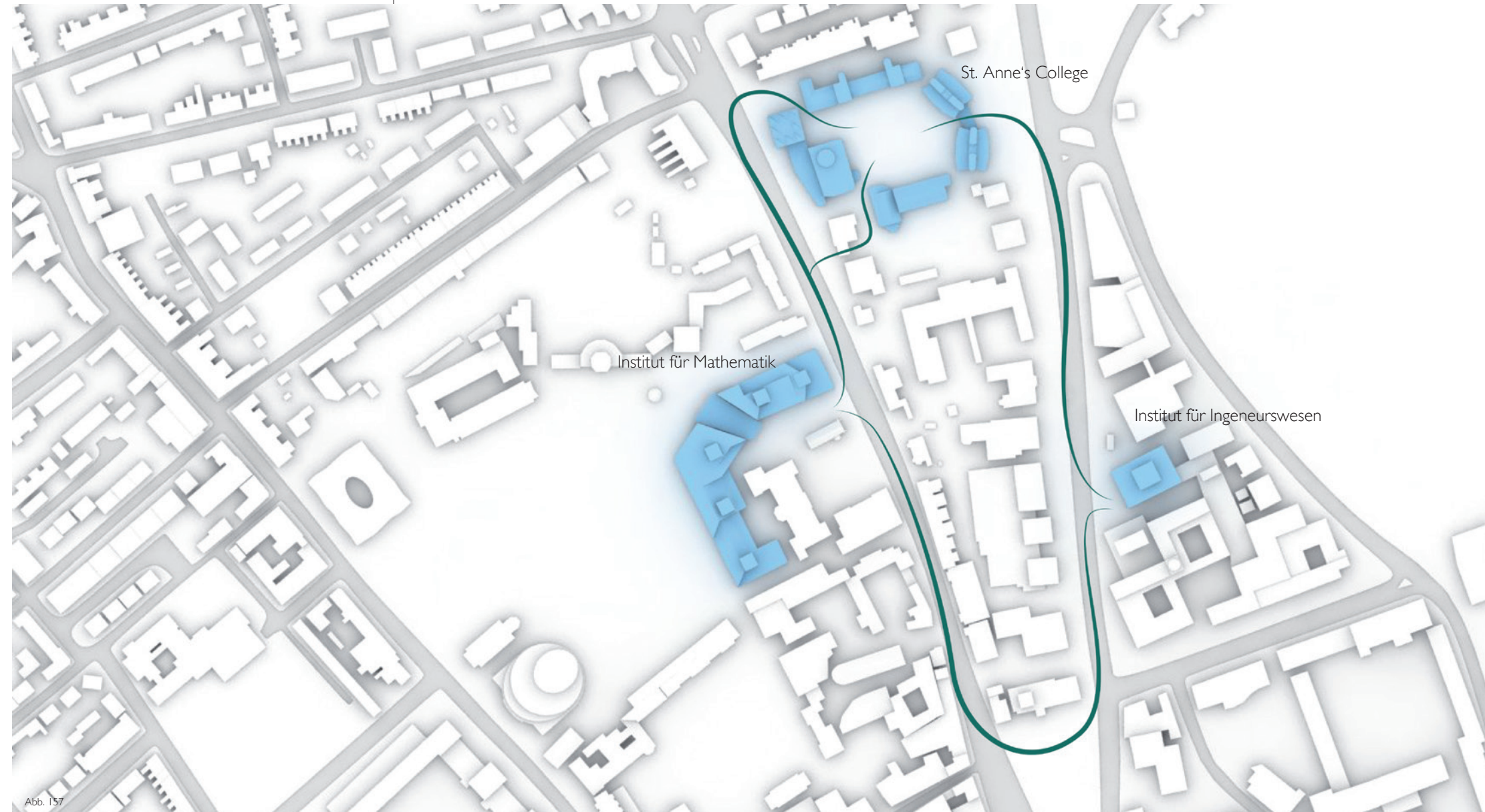


Abb. 157: Die drei Veranstaltungsorte, die den Rahmen der 7OSME bilden

Abb. 157

St. Anne's College

Innerhalb des St. Anne's Colleges wird der zentrale Hof als Hotspot und Treffpunkt dienen, da um ihn herum die wichtigsten Gebäude der ZOSME positioniert sind.

Um den etwa quadratischen Hof, in dem einige sehr große und schöne Bäume wachsen, führt ein Gehweg, der alle Gebäude miteinander verbindet. Lediglich die Hörsäle sind über einen Shortcut direkt mit der Bibliothek verbunden, was wohl am Verhalten der Studenten liegt, immer den kürzesten Weg zu nehmen.

Die Mensa verfügt über eine große Glasfront, von der aus der Park gut eingesehen werden kann.

Die Eingänge zum Campus befinden sich sowohl nördlich an der College Bar als auch im Westen und im Osten des Areals - und auf dieselbe Weise kann auch der zentrale Platz betreten werden.

Abb. 158: Übersicht der Gebäude des St. Anne's College in Oxford



Entwurf eines Demonstrators für die 7OSME

Der Ausgangspunkt für die Geometrie des Demonstrators bildet wegen seiner günstigen Eigenschaften für die Lens Tessellation ein Rotationskörper. Der geviertelte Torus wird durch eine Reihe von Deformationen zu einer verdrehten Schleife, die am Punkt ihrer größten Krümmung einen Überschlag vollzieht.

Die fertige Geometrie erzeugt einerseits einen großen überdachten Bereich und andererseits einen halb offenen Innenhof, der einen Baum vor Ort umschließt. Getrennt werden diese Bereiche durch eine zweischalige Wandkonstruktion, welche begehbar ist und im Inneren etwa 4m² Stauraum bietet. Außerdem formt die Geometrie am Überschlag der Schleife einen Durchgang, durch den ein bestehender und viel benutzter Weg vor Ort führt.

Die Geometrie wurde in Karamba mit verschiedenen Linsenrichtungen auf die statischen Performance analysiert. Die Struktur zeigte sowohl mit Linsen quer als auch mit Linsen längs zur Orientierung der Fläche eine relativ geringe

Verformung. Mit einer Überlagerung der Linsenrichtungen konnte die Verformung allerdings fast um einen Faktor 2 verringert werden. Die Maximale Verformung wurde bei einer Materialstärke von etwa 2 cm auf etwa 8 cm berechnet.

Die gesamte Geometrie misst etwa 17 mal 4 Meter und bildet 2 überdachte Bereiche in der Größe von etwa 30 m² und 20 m². Der entstehende Innenhof misst etwa 40 m². Die Durchgänge haben eine lichte Höhe von mehr als drei Metern und die Konstruktion ist an ihrem höchsten Punkt über 6 Meter hoch.

Abb. 159: Veranschaulichung der nötigen Transformationsschritte vom Torus bis hin zur Geometrie des Demonstrators

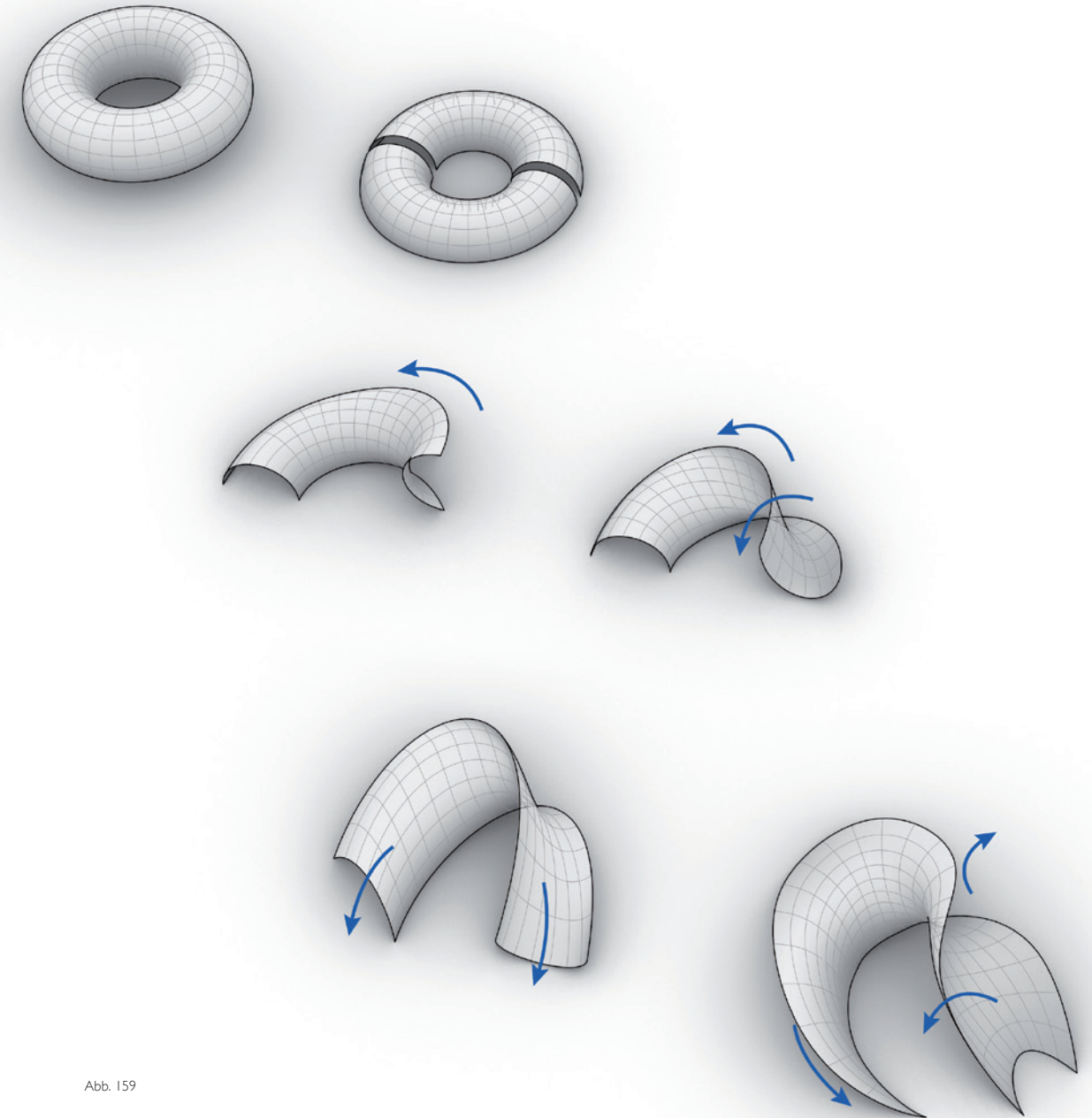


Abb. 159

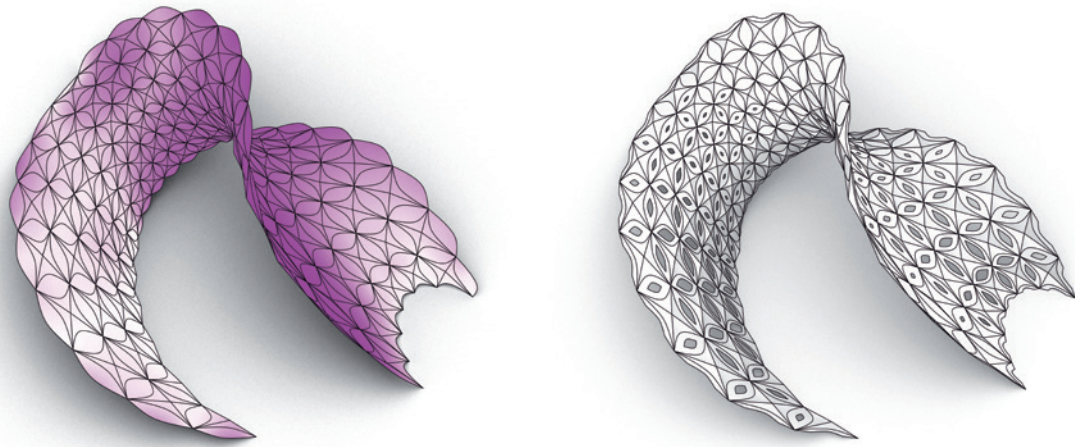


Abb. 160

Um die überdachten Bereiche des Demonstrators transparenter zu gestalten, wurden die zylindrischen Linsenelemente an bestimmten Stellen mit Aussparungen versehen, welche durch die einfache Krümmung leicht mit einem transparentem Material abgedichtet werden können.

Die Anordnung und Größe der Oberlichter stützt sich dabei auf eine Strukturanalyse zur Verformung der Struktur. Sie wurden in einem Verlauf generiert, beginnend bei der geringsten Deformation bis zu einem Grenzwert, der nicht überstiegen werden sollte. Dadurch wird sichergestellt, dass erstens die gesamte Struktur keine Schwächung der statischen Wirksamkeit erfährt und zweitens im Fall einer Verformung der

Struktur die ausgesparten und mit einem dünnen transparentem Material belegten Flächen möglichst keine Deformation erfahren.

Als Material wurde Holz in einer Stärke von zwei bis drei Zentimeter gewählt, da dies einerseits das Eigengewicht in Grenzen hält und andererseits eine recht unkomplizierte und bereits erprobte Fertigung der Einzelteile mittels Fräsroboter zulässt. Allerdings wird das Holz weiß lasiert, da sonst die Lesbarkeit des Demonstrators nicht ausreichend gegeben wäre. Außerdem erinnert die weiße Farbe an die Materialität von Papier und stellt damit wiederum einen Bezug zu Origami und Origami Science her.



Abb. 161



Abb. 162



Abb. 163

Abb. 160: Ableitung der Öffnung der Zylinderförmigen Linsen vom statischen Deformationsmodell
 Abb. 161: Vereinigung der zwei Linsenrichtungen zur Optimierung der statischen Performance
 Abb. 162: Demonstrator in Holzoptik
 Abb. 163: Demonstrator in weiß lasiertem Holz

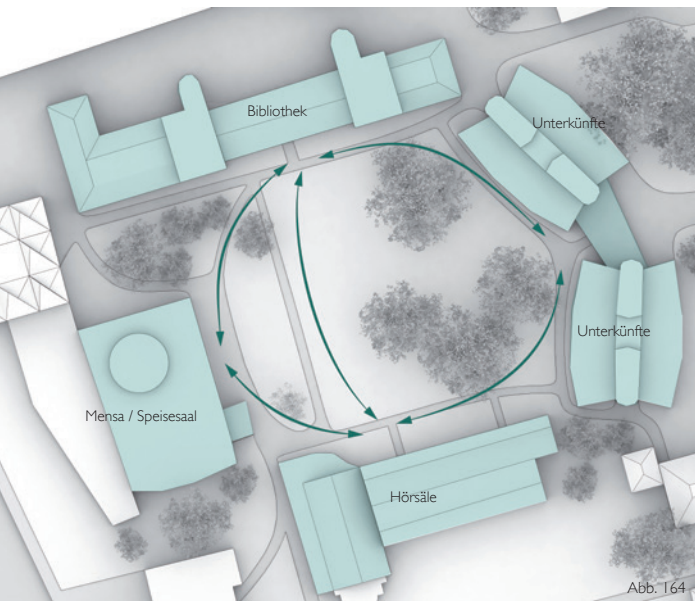


Abb. 164

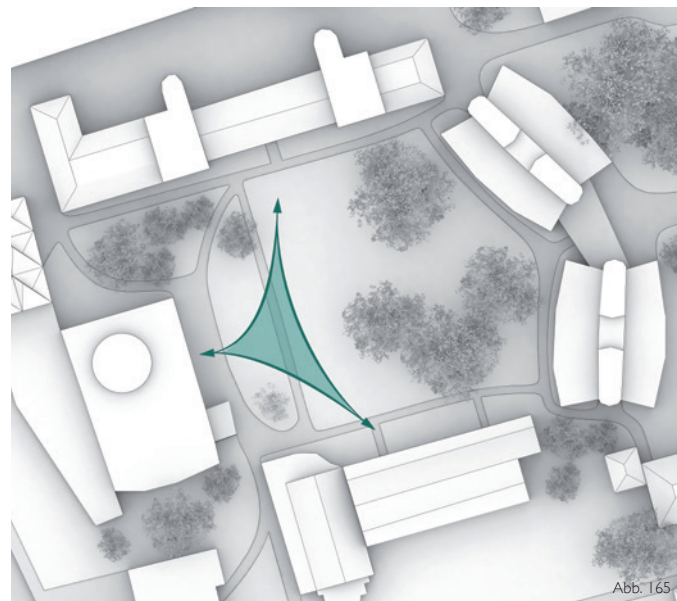


Abb. 165

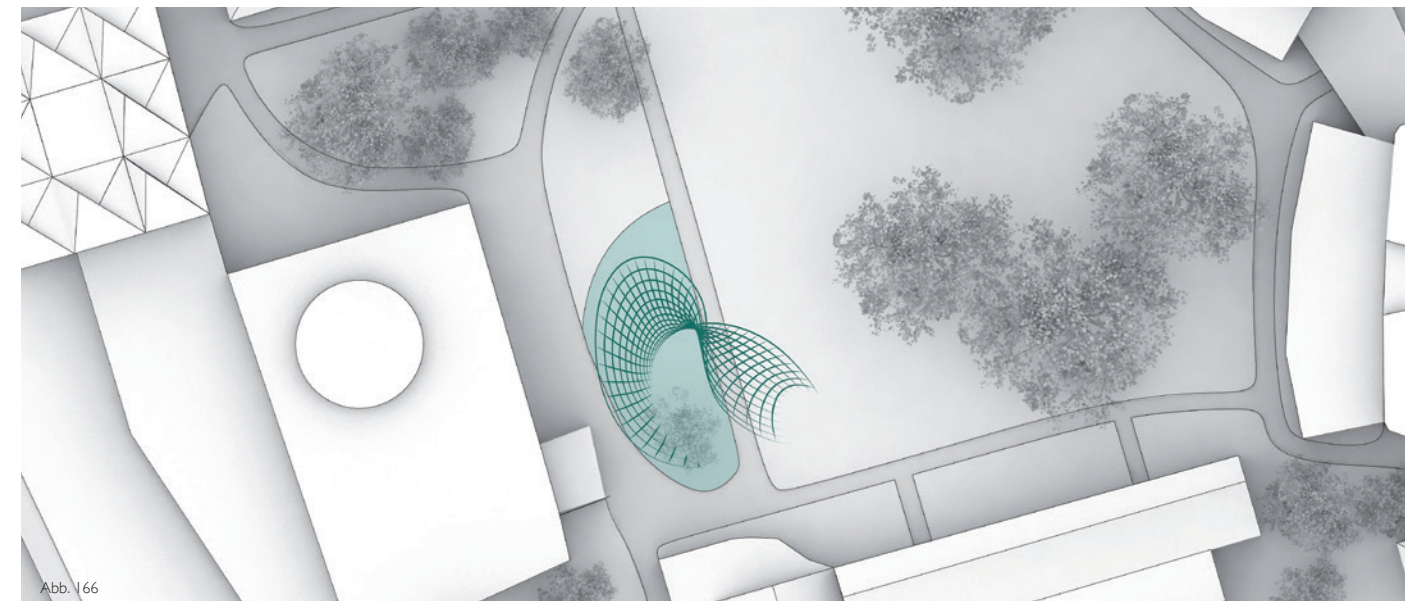


Abb. 166

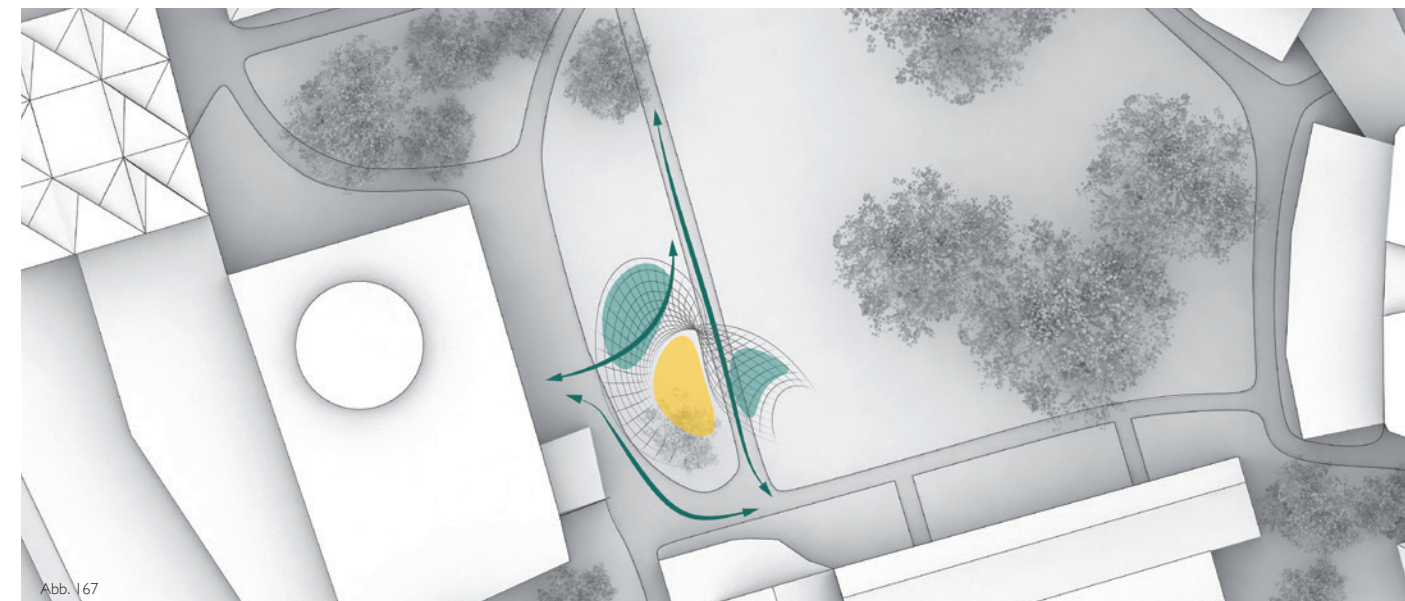


Abb. 167

Verortung

Der Pavillon fügt sich in die Zirkulation des zentralen Parks des St. Anne's College ein. Er platziert sich zwischen Mensa und Hörsaal und schafft dort einen zentralen Treffpunkt. Außerdem überspannt er den direkten Verbindungsweg zwischen Hörsälen und Bibliothek. Er umschließt einen vorhandenen Baum und platziert ihn in einen Innenhof, der zum Verweilen einlädt. Die zwei überdachten Bereiche bieten Schutz vor Sonne oder Regen und könnten für den morgendlichen Kaffee oder ein entspanntes Bier nach einem langen Tag genützt werden.

Abb. 164: Zirkulation rund um den zentralen Park des St. Anne's College

Abb. 165: Wichtigste Verbindung zwischen Mensa, Hörsälen und Bibliothek

Abb. 166: Verortung des Demonstrators zwischen Mensa und Hörsälen

Abb. 167: Interne Zirkulation des Demonstrators zeigt zwei überdachte Aufenthaltsbereiche und einen halb offenen Patio sowie die weiterhin nutzbaren Wege

Abb. 168: Der Lageplan zeigt die harmonische Einbettung des Entwurfs in den Park des St. Anne's College

Nächste Seiten: Abb. 169: Der Grundriss zeigt zum einen die Holzkonstruktion, auf welcher die zweischalige Struktur aufliegt. Der entstehende Innenraum verfügt über ca. 4 m². Zum anderen werden die zwei nördlichen und 5 süd-östlichen Bodendübel sichtbar, mit welchen die Struktur verankert ist. Außerdem wird ein Teil der westlichen Grasinsel mit Kies abgedeckt, um einen geeigneten Untergrund für Gartenmöbel zu erzeugen. Östlich des Weges wird der Rasen intakt gelassen und lediglich die 5 punktuellen Bodendübel verankern minimalinvasiv die Konstruktion.

Abb. 170: Schnitt A-A schneidet durch den Über-schlag der Struktur - mit den Durchgangslichtern von etwa 3 Metern sowie der maximalen Höhe von 6,10 m fügt sich der Entwurf unauffällig in die Parklandschaft ein.

Abb. 171: Schnitt B-B zeigt die Holzkonstruktion und die darauf ruhende doppelschalige Wand des Entwurfs. Außerdem sind wieder die Bodendübel gut zu erkennen.

Abb. 172 - 174: Visualisierungen des Entwurfs eines Demonstrators für die 7OSME in Oxford

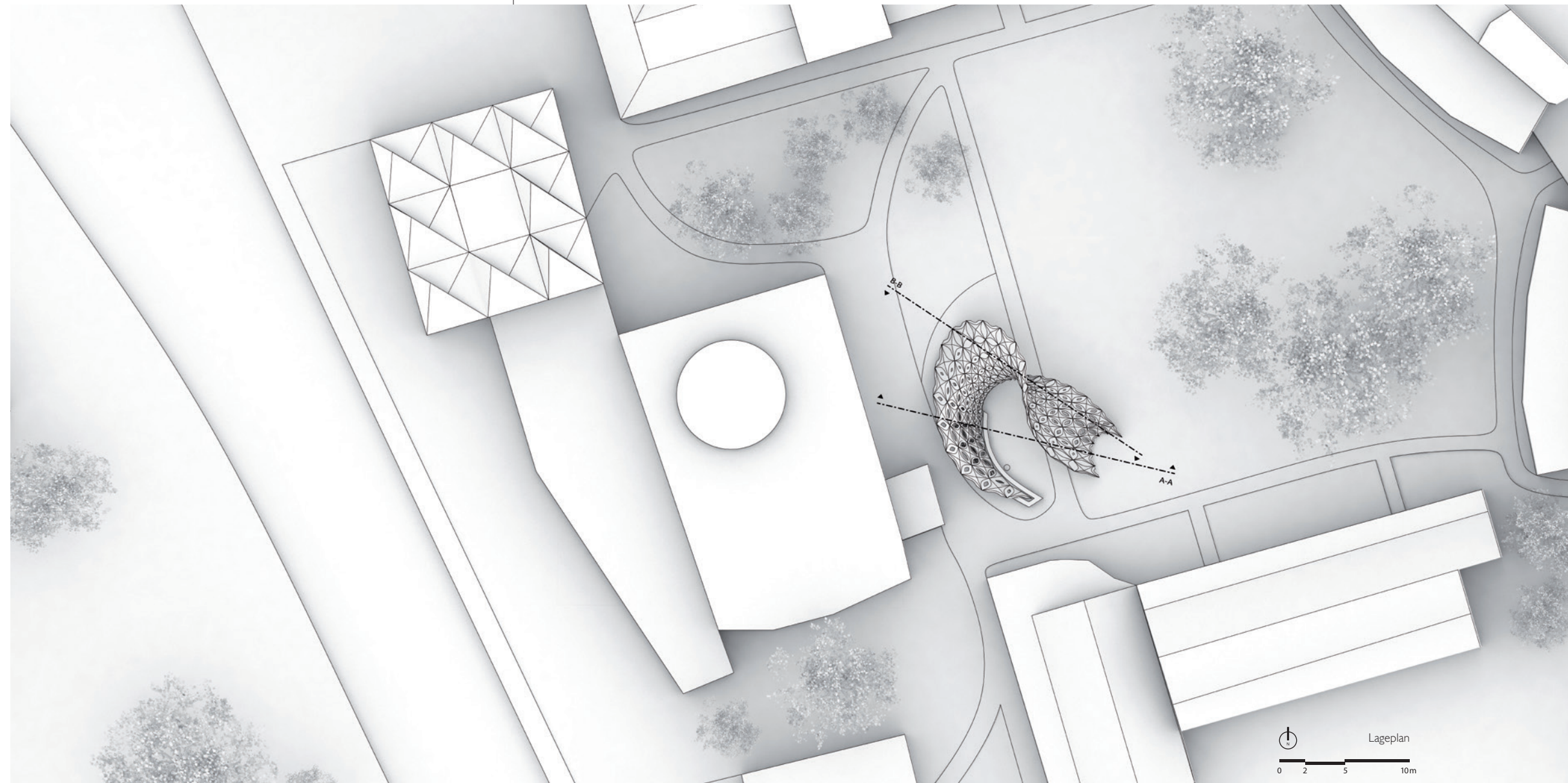




Abb. 169





Abb. 171

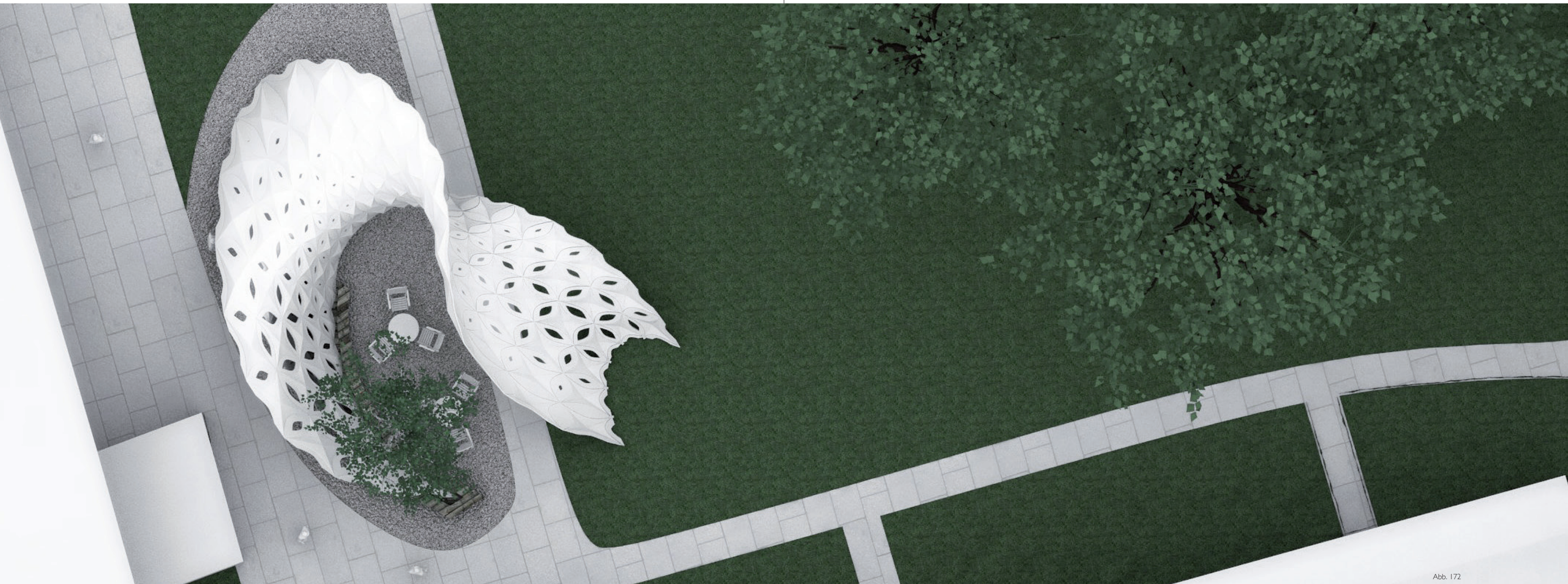


Abb. 172



Abb. 173



Abb. 174

Literaturverzeichnis

- [1] Jean-Charles Trebbi, Chloé Genevoux, Guillaume Bounoure, *The Art of Folding Vol. 2*, Barcelona : Promopress; 2017
- [2] Jean Marie Delarue, *Constructions Plissees*, Grenoble : Ecole d'Architecture de Grenoble; 1981
- [3] Sophia Vyzoviti, *Folding architecture : spatial, structural and organizational diagrams*, Amsterdam : BIS; 2003
- [4] Greg Lynn, *Folding in architecture*, Chichester : Wiley-Academy Ed.; 2004
- [5] David A. Huffman, *Curvature and Creases: A Primer on Paper*, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-25, No. 10; 1976
- [6] Richard Duks Koschitz, *Computational design with curved creases : David Huffman's approach to paperfolding*, M. I. o. T. D. o. Architecture., Hrsg., Cambridge: PHD Massachusetts Institute of Technology. Department of Architecture., 2014
- [7] D. E. Demaine, L. M. Demaine, A. D. Huffman, D. Koschitz und T. Tachi, „Characterisation of curved creases and rulings : Design and Analysis of Lens Tessellations,“ in *Origami 6 ; Proceedings of the 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education*, American Mathematical Society, 2016, pp. 209-230
- [8] C. E. Demaine und J. O'Rourke, *Geometric Folding algorithms : linkages, origami, polyhedra*, Cambridge: Demaine, C., Eric; O'Rourke, Joseph, 2007, p. 472.
- [9] J. R. Lang, *Origami Design Secrets - Mathematical Methods for an ancient art*, J. R. Lang, Hrsg., Natick: AK Peters, 2003.
- [10] Thomas A. Evans, Robert J. Lang, Spencer P. Magleby and Larry L. Howell, *Rigidly foldable origami gadgets and tessellations*, R. Soc. open sci. 2: 150067, <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.150067>, 2015
- [11] Martin Kilian, Simon Flöry, Zhonggui Chen, Niloy J. Mitra, Alla Sheffer, Helmut Pottmann, *Curved Folding in ACM Transactions on Graphics*, 27(3), Article 75, 2008
- [12] Tomohiro Tachi, *Rigid origami simulator*, 2007, <http://www.tsg.ne.jp/TT/software/>
- [13] Tomohiro Tachi, "Generalization of Rigid-Foldable Quadrilateral-Mesh Origami", *Journal of IASS*, Vol. 50, No. 3, 2009, pp. 173–179
- [14] T. Tachi, *structural origami*, Komaba Museum, Tokyo: Tomohiro Tachi, 2016.
- [15] Shajay Bhooshan, Mustafa El-Sayed, Suryansh Chandra, *Design-friendly strategies for computational form-finding of curved-folded geometries: a case study in SimAUD*, 14 Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design, Article No. 19, 2014
- [16] Shajay Bhooshan, Mustafa El-Sayed, Suryansh Chandra, *Curve-folding polyhedra skeletons through smoothing in Origami 6 ; Proceedings of the 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education*, American Mathematical Society, 2016, pp. 231-240
- [17] Shajay Bhooshan, *Interactive Design of Curved-Crease_Folding*. Master Thesis. Bath: University of Bath, 2015.
- [18] Christopher Robeller, Seyed Sina Nabaei, Yves Weinand, *Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT in Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp.67-81)
- [19] G. Stem and R. Maleczek, *Artists, Bent interwoven stripes*, exhibition the nature of Form, Guenther H. Filz, 2016.
- [20] Rupert Maleczek, *Linear folded stripes*, Rupert Maleczek, Ed., Innsbruck: Eigen, 2014

Online Medien

- [21] PBS, 2017, Between the Folds [online], Zugriff am 15.03.2018
<http://www.pbs.org/independentlens/between-the-folds/history.html>
- [22] Robert Lang, 2018, Origami, Zugriff am 10.02.2018
<http://www.langorigami.com/>
- [23] Eric Demaine, 2018, Curved-Crease Sculpture, Cambridge, Zugriff am 10.02.2018
<http://erikdemaine.org/curved/>
- [24] Jason Ku, 2017, Origami, Zugriff am 10.02.2018
<http://jasonku.mit.edu/gallery.html>
- [25] Jun Mitani, 2012, Origami, Zugriff am 11.02.2018
http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/en/cp_download.html
- [26] Robert J. Lang, 2018, Origami Treemaker, Zugriff am 01.04.2018
<http://www.langorigami.com/article/treemaker>
- [27] Wikipedia Foundation, 2018, Akira Yoshizawa, Zugriff am 15.04.2018
https://de.wikipedia.org/wiki/Akira_Yoshizawa
- [28] Flux furniture®, 2018, Flux Chair™, Zugriff am 10.04.2018
<http://www.fluxfurniture.com/items/chair/>
- [29] Gregory Epps, 2010, Method for bending sheet material, bent sheet material and system for bending sheet material through attachment devices, US Patent 20100279842 A1, Zugriff am 10.04.2018
<https://patents.google.com/patent/US20100279842/en>

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen außer den hier genannten sind vom Autor selbst erstellt

- Abb. 1. Gefaltete Felsformation, Zugriff am 10.04.2018
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agiospavlos_DM_2004_IMG002_Felsenformation.JPG
- Abb. 2. Faltige Elefantenhaut, Zugriff am 10.04.2018, <https://pxhere.com/de/photo/1370801>
- Abb. 3. Gefaltetes Buchenblatt, Zugriff am 10.04.2018, <https://pxhere.com/de/photo/654342>
- Abb. 4. Käfer mit entfalteten Flügeln, Zugriff am 10.04.2018, <https://pxhere.com/de/photo/1061408>
- Abb. 5. Sketch von J.M.Delarue zur Faltung, Jean-Charles Trebbi, Chloé Genevaux, Guillaume Bounoure, The Art of Folding Vol. 2, Barcelona : Promopress; 2017, Page 5
- Abb. 6. Faltung der DNA, schwarz weis gefärbt, Zugriff am 10.04.2018,
<https://epigeneticsliteracyproject.org/blog/epigenetics-around-web-pancreatic-cancer-metastasis-fueled-epigenetic-changes/>
- Abb. 7. Entfaltung der Amaryllis, Zugriff am 10.04.2018, <https://pixabay.com/de/wachsen-aufbl%C3%BChen-zeitraffer-73353/>
- Abb. 8. Junge Pflanze, Zugriff am 10.04.2018, <https://pxhere.com/de/photo/706857>
- Abb. 9. Pilzlamellen, Zugriff am 10.04.2018, <https://pxhere.com/de/photo/992590>
- Abb. 10. Gefaltete Darmschlingen, Zugriff am 10.04.2018, <https://daily.spiegel.de/social/blinkist-a-25688>
- Abb. 11. Gefaltete Felsen, Zugriff am 10.04.2018, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:San-Andreas-Verwerfung_1.jpg
- Abb. 12. Gefaltete Strasse, Zugriff am 10.04.2018,
https://de.wikipedia.org/wiki/San-Andreas-Verwerfung#/media/File:San-Andreas-Verwerfung_2.jpg
- Abb. 13. Himfalten, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.flickr.com/photos/flamephoenix1991/8376271918>
- Abb. 14. Senbazuru Orikata, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.pinterest.at/orikatie/orikata-inspiration/>
- Abb. 15. Origami Hase von Meister Akira Yoshizawa, Zugriff am 10.04.2018, <http://origami-art.us/instructions/153-rabbit-yoshizawa>
- Abb. 16. Treemaker, Zugriff am 10.04.2018, <http://www.langorigami.com/article/treemaker>
- Abb. 17. Gefalteter Kranich, Zugriff am 12.04.2018, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Origami-crane.jpg>
- Abb. 18. Faltmuster für Kranich, Zugriff am 12.04.2018,
<https://digitalcitizen.ca/2016/01/24/an-origami-crease-pattern-quilt-or-origami-quilt/flapping-crane-crease-pattern/>
- Abb. 19. Gefaltete Eule, Zugriff am 12.04.2018, <http://www.langorigami.com/crease-pattern/flying-owl-opus-681>
- Abb. 20. Faltmuster zur gefalteten Eule, Zugriff am 12.04.2018, <http://www.langorigami.com/crease-pattern/flying-owl-opus-681>
- Abb. 21. Gefaltete Wespe, Zugriff am 12.04.2018, <http://jasonku.mit.edu/wasp1.html>
- Abb. 22. Faltmuster zur gefalteten Wespe, Zugriff am 12.04.2018, <http://jasonku.mit.edu/wasp2.html>
- Abb. 23. Gefalteter Nazgul, Zugriff am 12.04.2018, <http://jasonku.mit.edu/nazgul2.html>
- Abb. 24. Faltdiagramm für Kranich, Zugriff am 12.04.2018, <http://jasonku.mit.edu/nazgul2.html>
- Abb. 25. Faltdiagramm für Kranich, Zugriff am 12.04.2018, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Tsuru_wiki.svg
- Abb. 26. Gefaltete Origamiskulptur von Eric Demaine, Zugriff am 12.04.2018, <http://erikdemaine.org/curved/MoMA/>
- Abb. 27. Origami von Jun Mitani, Zugriff am 12.04.2018, https://makezine.com/2012/04/06/jun_mitanis_computer-designed/
- Abb. 28. Das barocke Haus, Zugriff am 10.04.2018,
<https://thefunambulist.net/architectural-projects/architectural-theories-diagrams-of-utopia-by-anthony-vidler>
- Abb. 29. Die Monade, Zugriff am 11.04.2018,
https://2.bp.blogspot.com/-P01M6CFc6FAVrSx4wuNq_I/AAAAAAAAAHmU/hjt6Nqp719E/s1600/die%2Bmonade.jpg

- Abb. 30. Diagramm des Kulturzentrums in Santiago di Compostela, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.archdaily.com/785334/interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style/570ba636e58ece29ac0002dc-interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style-photo>
- Abb. 31. Kulturzentrum Santiago von Peter Eisenman, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.archdaily.com/785334/interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style/570ba6a2e58ece64aa000180-interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style-photo>
- Abb. 32. Kulturzentrum in Santiago von Peter Eisenman, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.archdaily.com/785334/interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style/570ba6a2e58ece64aa000180-interview-with-peter-eisenman-i-am-not-convinced-that-i-have-a-style-photo>
- Abb. 33. Diagramm Two Libraries von OMA, Zugriff am 10.04.2018, <http://oma.eu/projects/jussieu-two-libraries>
- Abb. 34. Modell von Two Libraries von OMA, Zugriff am 10.04.2018, <http://oma.eu/projects/jussieu-two-libraries>
- Abb. 35. Educatorium von OMA, Zugriff am 10.04.2018, <http://oma.eu/projects/educatorium>
- Abb. 36. Educatorium von OMA, Zugriff am 10.04.2018, <http://oma.eu/projects/educatorium>
- Abb. 37. Yokohama Terminal FOA, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.farshidmoussavi.com/node/15>
- Abb. 38. Yokohama Terminal FOA, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.farshidmoussavi.com/node/15>
- Abb. 39. Yokohama Terminal FOA, Zugriff am 10.04.2018, <https://divisare.com/projects/314352-foa-azpml-farshid-moussavi-architecture-valerie-bennett-yokohama-international-port-terminal#lg=1&slide=0>
- Abb. 40. Yokohama Terminal FOA, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.farshidmoussavi.com/node/15>
- Abb. 41. Patent für eine faltbare Unterkunft, Zugriff am 12.04.2018, <https://patents.google.com/patent/US3407546>
- Abb. 42. Grafik zum Vergleich der Faltkanten von SCF und CCF nach einer Vorlage von Rupert Malezcek
- Abb. 43. Plattenwerkstoffe, Zugriff am 11.04.2018, <http://www.holz-dransfeld.de/plattenwerkstoffe>
- Abb. 44. Stahlrollen, Zugriff am 11.04.2018 <http://www.stahl-online.de/index.php/album/urformen/>
- Abb. 45. Origami Roboter, Zugriff am 11.04.2018, <https://www.eecs.mit.edu/news-events/media/rus-team-develops-mini-printable-origami-bots-can-swim-climb-and-carry-load-twice>
- Abb. 46. Origami Roboter, Zugriff am 11.04.2018, <http://news.mit.edu/2015/centimeter-long-origami-robot-0612>
- Abb. 47. Sonnensegel NASA, Zugriff am 11.04.2018, <https://www.jpl.nasa.gov/video/details.php?id=1284>
- Abb. 48. Sonnensegel NASA, Zugriff am 11.04.2018, <https://www.jpl.nasa.gov/video/details.php?id=1284>
- Abb. 49. Kepler Weltraumteleskop, NASA, Zugriff am 11.04.2018, <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/studying-the-solar-system-with-nasa-s-webb-telescope>
- Abb. 50. Foto von David Huffman, Richard Duks Koschitz, Computational design with curved creases : David Huffman's approach to paperfolding, M. I. o. T. D. o. Architecture., Hrsg., Cambridge: PHD Massachusetts Institute of Technology. Department of Architecture., 2014, Page 16
- Abb. 51. Ron Resch, Zugriff am 11.04.2018, <https://arkinetblog.wordpress.com/2009/11/20/ron-resch-paper-folding-origami-tessellation/>
- Abb. 52. Versuchsbau des EPFL, Zugriff am 11.04.2018, <https://actu.epfl.ch/news/exhibition-timber-project-at-the-academy-of-archit/>
- Abb. 53. Versuchsbau des EPFL, Zugriff am 11.04.2018, <https://actu.epfl.ch/news/exhibition-timber-project-at-the-academy-of-archit/>
- Abb. 54. Skelletierte Polyeder, Shajay Bhooshan, Interactive Design of Curved-Crease_Folding. Master Thesis. Bath: University of Bath, 2015. S69

- Abb. 55. Patent für eine Konstruktionsmethode von gefalteten Strukturen, Zugriff am 11.04.2018, <https://patents.google.com/patent/US20100279842/en>
- Abb. 56. Flux Chair™ von Flux furniture®, Zugriff am 10.04.2018, <http://www.fluxfurniture.com/items/chair/>
- Abb. 57. Origamizer, Zugriff am 10.04.2018, https://www.u-tokyo.ac.jp/en/about/publications/tansei/13/innovation_4_3.html
- Abb. 58. Tesseliertes Faltmuster, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.uibk.ac.at/fakultaeten/architektur/news/koge-lecture-tomohiro-tachi-computational-origami-design.html>
- Abb. 59. Arum Installation von Zaha Hadid Architects, Zugriff am 10.04.2018, <https://www.competitionline.com/en/projects/48877>

Appendix A:
Linear Folded Interwoven Stripes

Linear Folded Interwoven Stripes

Gabriel STERN*, Rupert MALECZEK*,

* Institute of Design | unit koge. Structure and Design, University of Innsbruck / Faculty of Architecture, Technikerstrasse 21c, 6020 Innsbruck, Austria, Rupert.maleczek@uibk.ac.at

Abstract

This work presents the investigation on linear folded interwoven stripes. Interwoven stripe systems represent a multilayer variation of linear folded stripes [1], in order to build stable spatial configurations. The multilayer arrangement enables different and new configurations and extends the existing possibilities of this particular system. The additional layer or layers can be used for a spatial extension as well as for an augmentation of structural behaviors. As the system enables the possibilities to approximate spatial networks based on given surfaces to reticular structures, the authors will describe the limits and potentials of this particular system.

The presented structures are assemblies from rigid folded stripes that are rectangular in unrolled position. After folded in final position they can be assembled either to open- or closed-stripe systems [2]. The assembly of two layers of stripes must be done either in the main direction or in the main orientation of the stripes segments. If both segments that are assembled have identical main directions and main orientations, two vertical assembly strategies are thinkable. As shown in Figure 2, the assembly can either be made through Edge stitching in main direction or through coplanar face-stitching. For this particular paper the focus lies on the edge stitching method.

Therefore, some standard constraints of the system can be influenced. The classic alternating configuration of contact and connection segments is redefined with the augmented number of layers. Some segments must become the height of two or more layers, to connect them in main orientation.

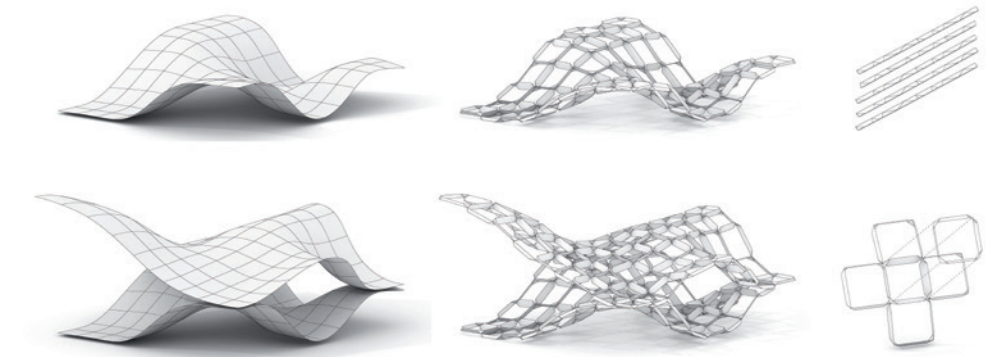


Figure 1: Approximation of a single (top) and two touching surfaces (bottom) with interwoven stripes

In this paper, the different approaches to generate interwoven stripe systems on a given surface will be discussed. Especially the necessary constraints and limits as well as their potentials will be pointed out.

Keywords: structural origami, folding, multilayer structures, computational design, fabrication

1. Introduction

Adding a second layer to a folding system adds interesting properties to its original ones. Filipov [3] as well as Klett and Middendorf showed [4] the double layering changes the mechanical and other properties when compared to single-layer tessellations. For linear folded stripes, a small experiment in cardboard showed the advanced structural behavior by fabricating a small cardboard cantilever.

In contrary to these investigations, the work on linear folded stripes has also a focus on stable configurations in assembled state. Therefore, this paper has a strong focus on the geometric constraints and its relation to design and spatial properties. One aim

of the authors is the extension of the design space through the multilayer approach.

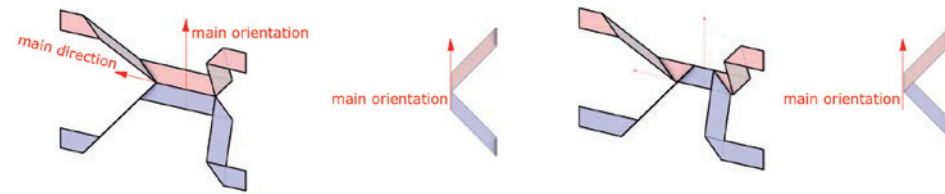


Figure 2: The Edge stitching method (left) and the coplanar face stitching method (right)

The multilayering of linear folded stripes is an approach, that was indicated in oral presentations and in the outlook of his thesis [1] for some particular systems as parallel stripes. While the idea of these structures was mostly a multilayering through the combination of two stripe systems, generated through two connected surfaces, the presented system can also be applied to a single surface.



Figure 3: A possible superposition of two parallel stripe systems in top left) and perspective view (right) with identical main directions and main orientations

This paper will show a possible approach on how to create a folded multilayer structure from a single surface by using an interwoven stripe system. Thereby the structural behavior of the approximation of the surface can be augmented. The system can be further expanded to connect multiple surfaces by creating connecting segments that share the same main direction and orientation.

2. Linear Folded Stripes

As plate material can be fabricated from many different materials with manifold properties, it has a widespread usage for various fabrications. Folding rectangular elements enables a deformation of plates to three-dimensional structures with reduced offcuts and interesting spatial and structural properties. The focus of linear folded stripes is the generation of reticular structures in manifold variations and configurations with a focus on material efficiency and spatial appearance.

Maleczek and Geneveaux [2] introduced two categories and several subsystems, which should describe all forms of stripe based systems. The category of post-defined stripes allows the transformation of given surfaces into systems of linear folded stripes, whereas the category of pre-defined stripes enables to create complex surfaces with given starting parameters.

2.1 Line Networks and surfaces

As folded stripes can be seen as a special form of line extrusion, the generation of the different stripe sub-systems need a line network with special properties and additional information. The line network should consist of polylines that have common segments or common parts of segments, which define the contact segment's main direction of the stripe system. To generate two coplanar contact segments that should be assembled through face stitching, a Vector that defines the main orientation is necessary. The position and orientation of the contact segments is then used to generate the connection segments that have a constraint orientation defined through its adjacent faces.

To approximate the geometry of a given surface, a line network with necessary properties and configuration is linked to this surface. Depending on the stripe system, the line network's segments will then be defined as contact or connection segments and the main orientation of the contact segments will be defined. The main orientation of contact segments can [5], but must not be [6] related to the surface itself. For this particular method the stripes are generated with a double fold similar to the one

presented for mesh based stripes in 2012 [5].

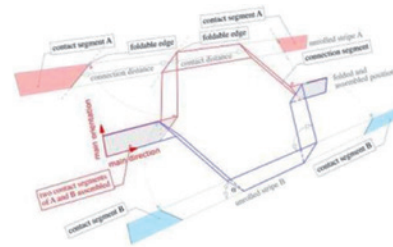


Figure 4: Relationship of stripes segments for an assembly

3. Interwoven Stripes

The authors use the term interweaving, as this particular system is not only stitching two stripe systems in main orientation together, but implement contact faces, that have the double layer height. We name this element double segment. If several double segments are on one stripe, and a cut is made in between these elements, it is possible to form a closed hexagon cell from a single stripe (Figure 5). As double segments connect two stripes in main orientation, that are separated, we give in relation to this edge a positive and negative main orientation. In the standard case, segments that are assembled to a continuous stripe based on a closed polyline have the same prefix. This closed stripe segments will be named cells. If the entire cell has identical main orientations, positive or negative cells are formed. If the Main orientation varies as shown in Figure 5, the cell is neutral. Depending on the configuration, the double segment can also be a contact segment. Single stripes with double segments are named double stripes and are assembled to interwoven stripe systems.

The assembly of several double stripes to a linear folded stripe system is a more complex task, as each double segment has now two stripe segments on each side. This means for these connected segments a potential number of connected stripes of four per double segment.

For this particular paper the focus is on hexagonal as well as quadrangular grids. In the

flat state of hexagonal line networks, the contact and double segments share the main direction while in the quadrangular grid the segments have different main directions. Also the stripes categorization with the topology approach to either open or closed stripes, is not always valid for this system, as open and closed stripes can now be generated with the same stripe. If double stripes are assembled with single stripes, a hybrid system is generated.

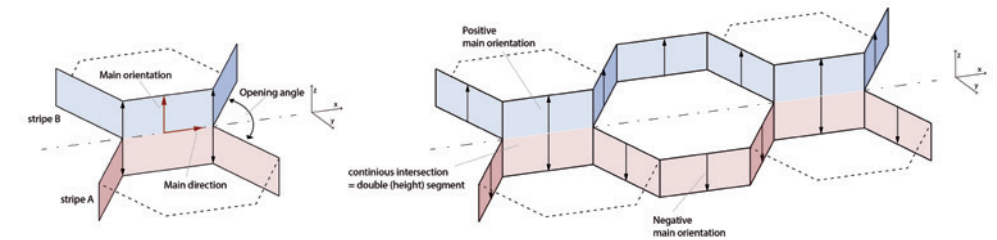


Figure 5: Generation of interwoven stripe forming a neutral cell

3.1. Network interpretations and assembly strategies

As described above, regular configurations have clear assembly strategy based on cells. Currently the authors identified two approximation strategies for regular systems. A linear and a circular one.

The linear approach is generating alternating positive and negative cells in one direction and series of positive or negative cells in the other direction of the grid. In this strategy the double stripes are only connected two neighboring double stripes at the double segments. This leads to very complex assemblies concerning fabrication especially for the hexagonal pattern, which is why the further studies where mainly based on quadrangular meshes.

As shown in Figure 7, the rotational approximation process generates alternating positive and negative cells around neutral or void ones, that can be interpreted as a meta-cell. The pattern can be expanded in each direction but leads to complex boundary conditions as seen in the assembly diagram.

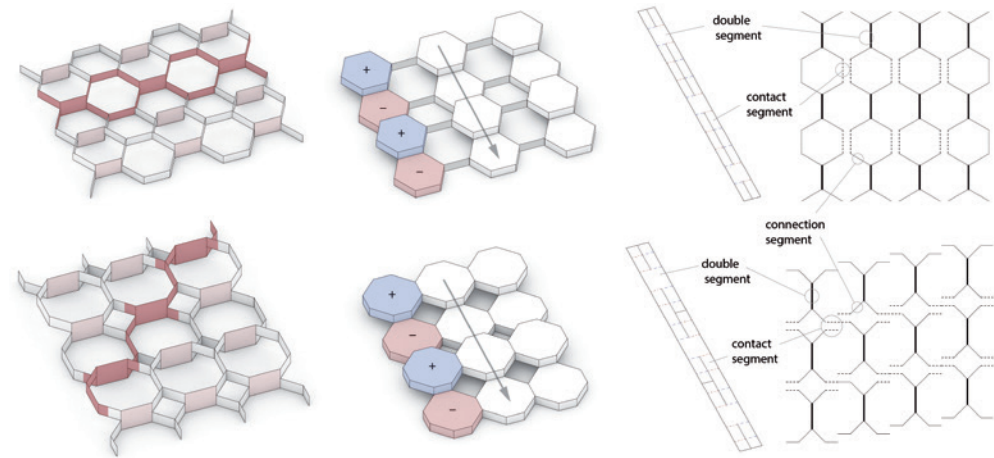


Figure 6: Linear grid approximation on Hexagonal (top) and octagonal (bottom) grids

With a quadrangular grid (Figure 7, bottom) this strategy forms also meta-cells around a void rectangle, which can also be read as linear alternating cell-patterns in two main directions. To avoid self-intersections of the stripes at the vertices, the faces of the quadrangular mesh can become octagons by being chamfered, but this brings four additional fold-lines to each cell and causes a higher degree of complexity to each cell. Both systems can be read as either open or closed stripes [2]. When regarded as closed, the connection of the cells have to be done with the double segments, which thereby also become half contact segments Figure 6.

As described above, the main orientation of the contact segments can be manipulated for different purposes. One interesting aspect is the manipulation of the main orientations to generate a simplified stripe generation. The main orientations can for example form segments of truncated cones to increase the overall stiffness. Those cones are orientated in the same pattern as the positive and negative main orientation of the grid (Figure 8). This introduces fold angles to the interwoven stripes with rotation centers located at the stripe-axis.

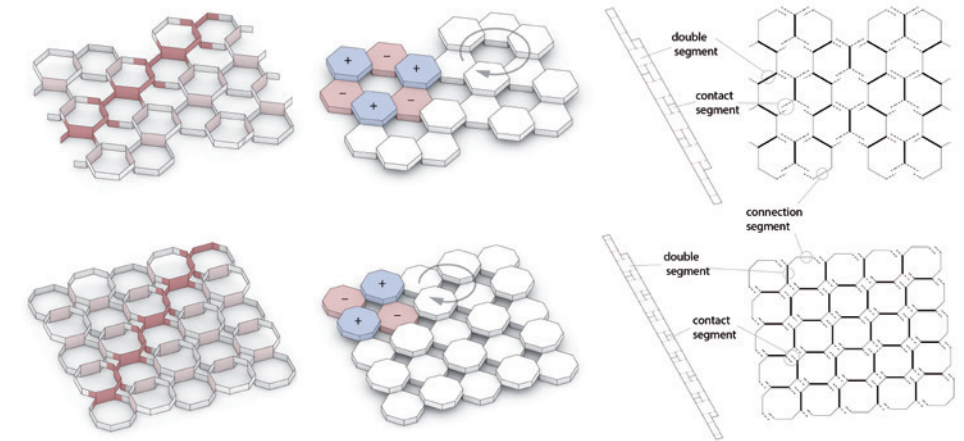


Figure 7: Hexagonal (top) and octagonal (bottom) interwoven stripe systems

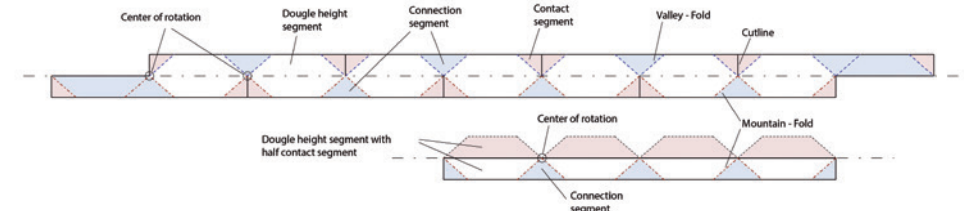


Figure 8: Explanation of interwoven stripe segments for open stripes (top) and closed stripes (bottom)

4. Surface approximation strategies

As one important design aspect of linear folded stripes is the approximation of given surfaces expressed with post defined stripes, two methods will be explained here: The approximation of a single surface and the constraints to work with multiple linked surfaces.

A single surface defines the position of the Surface Defined Edge and relates the

positive and negative main orientations to the stripe system. Two surfaces must have a spatial line pattern that has identical Surface Defined Edges (identical line segments) so a double segment can be formed. Positive and negative main orientations are related to the two different surfaces.

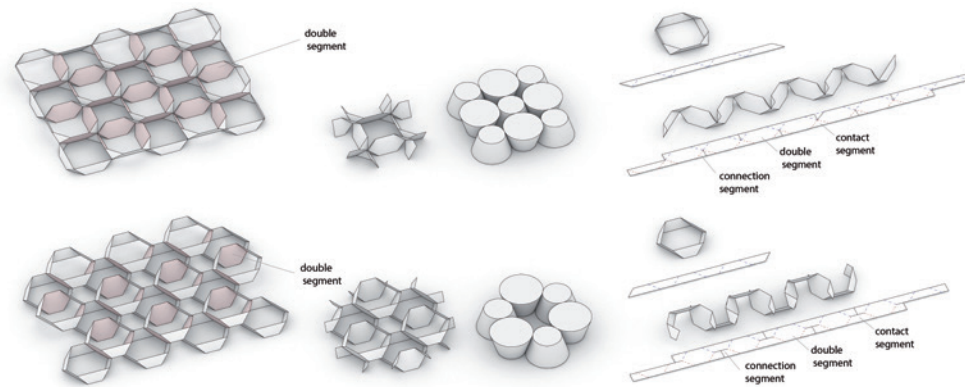


Figure 9: Open and closed quadrangular (top) and hexagonal (bottom) interwoven stripe systems

As the generation of different line patterns are manifold and would exceed this paper, the authors focus on regular pattern mainly generated from quadrangular meshes. These meshes are easy to manipulate and most double curved surfaces can be described with them very accurate.

4.1 Single Surface Approximation with Interwoven Stripes

Relating stripes to a surface is not only important for the line pattern, but also for the main orientation. As the possible main orientations can vary for many reasons and will generate very complex pattern, the authors will focus here on simplified strategies related to meshes.

In the simplest case each single face is planar. This means, that the symmetric double fold method may be applied to all four edges of the face. Angles α are given and the

angle γ between two cells that do not share the same plane is a product of the two face normals. This angle γ gives the main orientation and the angle β of the double segment of the two neighboring cells.

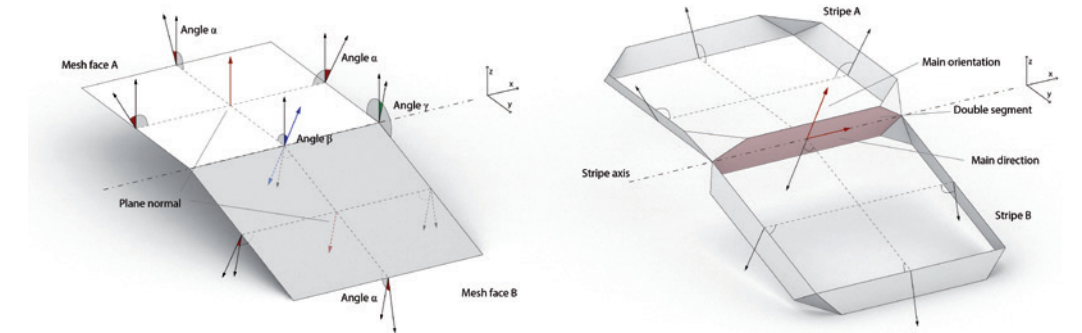


Figure 10: Approximation of two quadrangular faces with interwoven stripes

In a more general case, the face will not be planar, and has therefore not a single face-normal. Every edge must therefore be analyzed separately to generate a main orientation for the contact segment, similar to the mesh based stripes method. The angles α^1 and α^2 are different and so the average α^{12} is calculated. Knowing α^{12} the stripe can be constructed like before in the special case by calculating the new angles β^{12} in order to get the continuous connections between the cells.

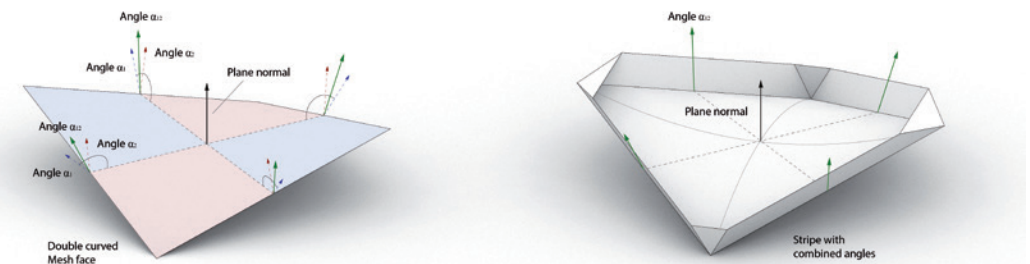


Figure 11: Approximation of two quadrangular faces with interwoven stripes

This method offers the possibility to approximate most single and double curved surfaces with the constraint that the curvature of the surface may not exceed a certain curvature radius r_0 .

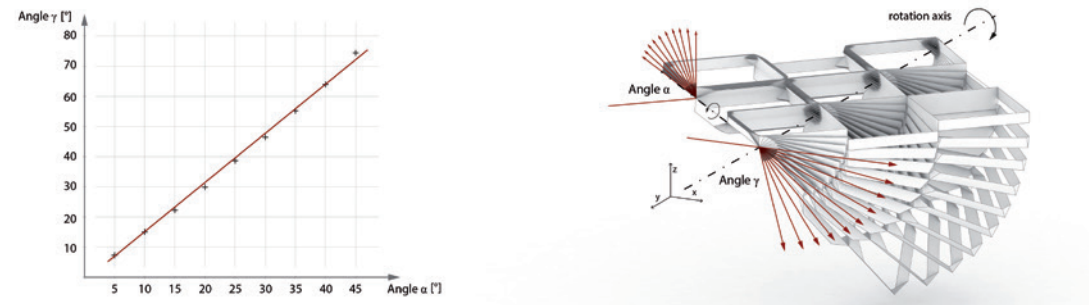


Figure 12: showing constraint of proportion γ to α

This radius can be understood as a correlation of main direction angle α and angle γ in between the connecting cells. If γ gets too big or too small the stripes of two diagonally connected cells may start to intersect each other. Thus the next evolutionary development in the approximation of double curved surfaces has to be the automatic adjustment of the angle β^{12} of two connecting cells in the case that the curvature radius r_0 is not in the working range.

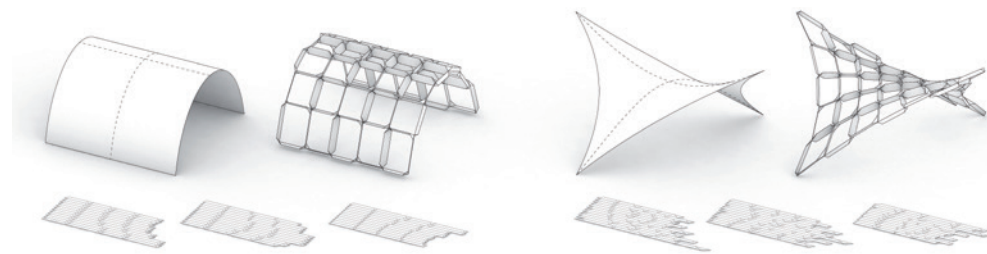


Figure 13: Approximation of single (left) and double (right) curved surface with interwoven stripes

4.2 Linear Folded Stripes

Knowing the constraints for a single surface, we can also apply and extend this knowledge to generate interwoven stripes from multiple linked surfaces. The main idea is to generate line pattern on two surfaces that have identical segments, where double segments can be implemented to stitch the stripe systems together. In the standard case, the two surfaces have similar pattern, so the generation of identical line segments is slightly feasible. Thinking of meshes not only line segments but entire mesh faces can be identical.

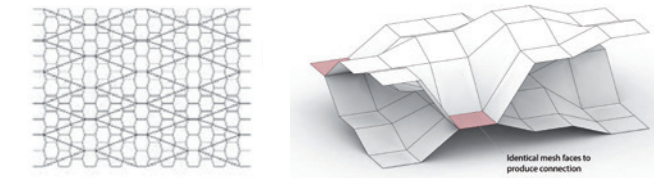


Figure 14: Identical lines (left) and identical faces (right) of two connected surfaces

Therefore, the base surfaces will be meshed with the same subdivision (or u/v Division) for this assumption. This gives the possibility to define enough congruent faces to generate the interwoven system with a stability based on the geometric constraints. Physical paper and cardboard models of these spatial multilayer structures let assume that the resulting stripe-system tend to have high internal stiffness.

However, some constraints have to be pointed out that must be taken care of, additionally to the curvature radius r_0 . There are two ways how surfaces and the connecting cells can interact. Depending on the contact cells height, a differentiation between double- and triple-height assembly can be made.

We assume that the given meshed surfaces form a common cell with two coplanar meshes, that have identical main orientations for its contact segments. If this cell is the contact cell where the stripes depending to the two surfaces are connected, it is either possible to stitch with the edge stitching method or with the coplanar face stitching method. The edge stitching method will generate a triple segment as the upper and

the lower stripe-segments will be stitched on both edges. If the face stitching method is used, a double segment is generated that has multiple layers of material.

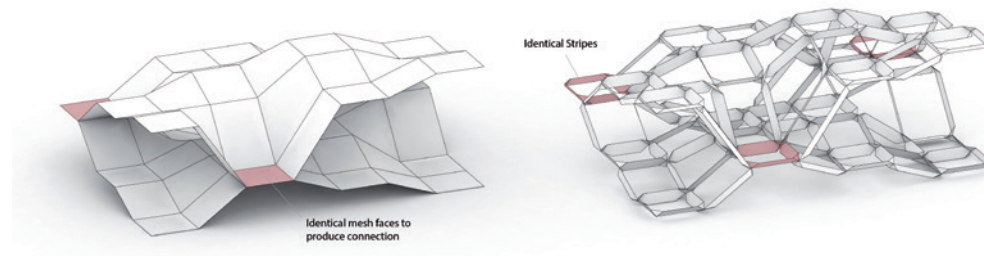


Figure 15: Multi-surface approximation with interwoven stripes

As the face stitching method will cause geometric and structural problems, the authors propose to implement the use of a triple segment, as it avoids multi material layers and its accompanying problems.

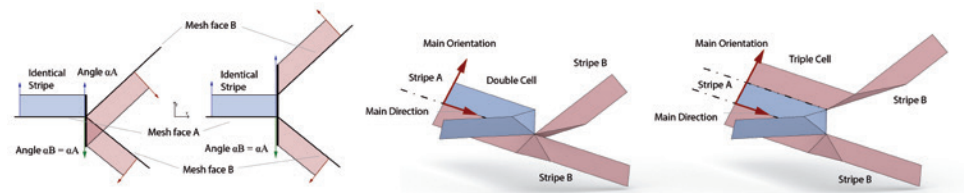


Figure 16: Connection of two approximated surfaces with double (left) and triple segment solution (right)

The triple segments main orientation needs to be either linked to the upper or lower mesh topology. This comes with the constraint, that there can always only be one locally defined connection cell. It has to be taken care of, that the angles α for the local area of the cell are identical. Another constraint is the topology of the approximated surfaces in the local area of the connecting cell.

As was shown in Figure 17 the u/v grid does not have to be identical for the connected surfaces

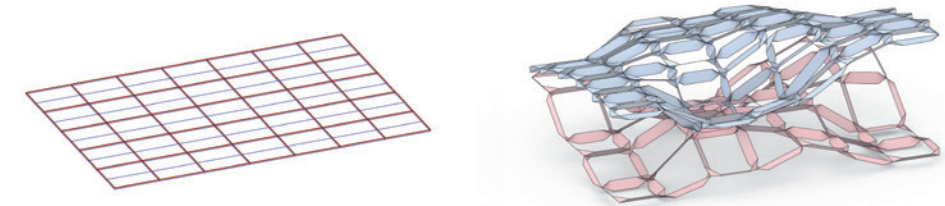


Figure 17: Connecting approximated surfaces with different grids

5. Conclusion

The authors presented a subsystem of linear folded stripes and its associated constraints. After showing the relation to other stripe systems, the implementation of interwoven stripes is made and described as a system that can approximate single- as well as multiple connected surfaces with this system. A generation method using mesh faces and transforming them to informed cells with main orientations has been described. Also a method with stripes that have triple-segments was presented to link to given and meshed surfaces together. The initial zero-thickness models promise good structural abilities for spatial and structural design, with low material use while maintaining the general advantages of stripe based systems. The closer investigation will therefore be topic of future research.

6. Outlook

As the system has promising properties, it will be investigated in future research. Especially fabrication, structural and design aspects must be explored in a more detail way. Furthermore, research and design studies for multiple layer structures, that should represent an architectural building scale, are considered as promising design field. Related to this design question the correlation to thick origami, as well as its materialization will be investigated.

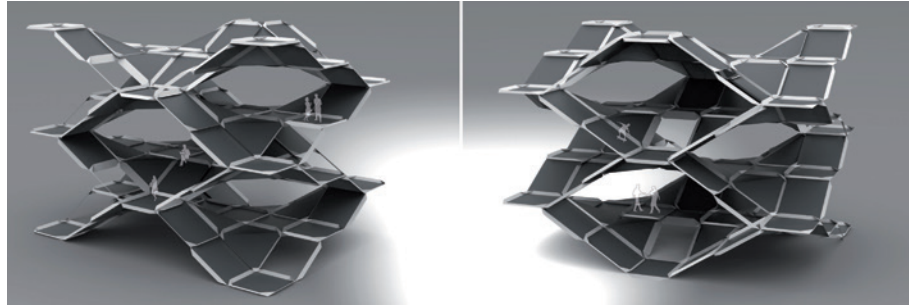


Figure 18: Multi surface mixed material large-scale model

In addition the system variations and relations to active bending [7] as well as curved folding [8] [9] should be investigated. Exhibited [10] paper models by the authors show an interesting structural and spatial behavior with this system related to bending and curved folding.

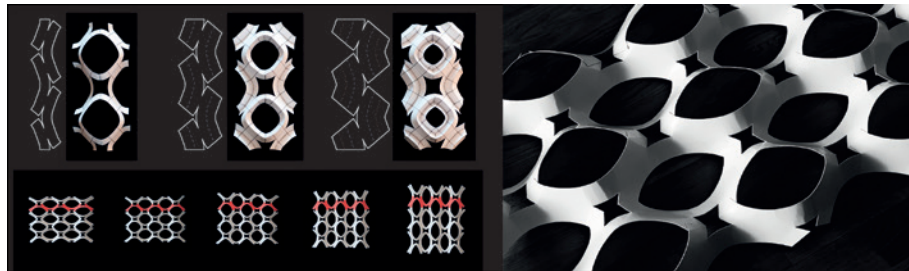


Figure 19: curved folded interwoven- and bent interwoven stripes

References

- [1] R. Maleczek, Linear folded stripes, R. Maleczek, Ed., Innsbruck: Eigen, 2014.
- [2] R. Maleczek and C. Geneveaux, Open and closed linear Folded Stripes in IASS 2011, Taller, Longer, Lighter, London, 211.
- [3] T. F. Evgueni, H. P. Glaucio y T. Tomohiro, Origami tubes with reconfigurable polygonal cross-sections in Proceedings of the Royal Society A, vol. 2185, 2016.
- [4] Y. Klett and P. Mittendorf, Face to Face: Varieties and Properties of Coplanarly Joined, in IASS2016, Tokyo, 2016.
- [5] R. Maleczek, G. Geneveaux and J. Ladinig, Linear folded mesh based stripes, in IASS2012 From Spatial Structures to Space Structures, Seoul, 2012.
- [6] R. Maleczek, Linear Folded (parallel) stripe(s) in Computational Design Modeling, Berlin, Springer, 2011, pp. 153-160.
- [7] J. Lienhard, Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein, Stuttgart, 2014.
- [8] R. D. Koschitz, Computational design with curved creases: David Huffman's approach to paperfolding, M. I. o. T. D. o. Architecture., Ed., Cambridge: PHD Massachusetts Institute of Technology. Department of Architecture., 2014.
- [9] T. Tachi, Rigid-Foldable Thick Origami, in Orisami 5, Boca Raton, CRC Presse, 2011, pp. 253-264.
- [10] G. Stern and R. Maleczek, Artists, Bent interwoven stripes, exhibition the nature of Form, Guenther H. Filz, 2016.
- [11] D. Huffman, Curvature and Creases, in IEEE Transactions on Computers, 1976.

Appendix B:
Lens Tessellation Inspired Surface Approximation

Lens Tessellation Inspired Surface Approximation

G. Stem, R. Maleczek

Abstract

This paper presents the research on variations and interpretations of David Hufmanns lens tessellation pattern [Koschitz 14] in order to investigate its architectural, spatial and structural properties. Based on the investigations by Demaine et. al [Demaine, et al. 16] as well as Koschitz's work [Koschitz 16], this contribution is focused on the architectural potentials of Hufmanns work in relation to freeform geometries. The authors will present a strategy that generates this pattern in three-dimensional state based on a given quadrilateral mesh surface. These target mesh surfaces either can be single- or double curved.

Die gesamte wissenschaftliche Arbeit „Lens Tessellation Inspired Surface Approximation“ kann zum Zeitpunkt des Erscheinens dieses Buches im Mai 2018 aus Copyright technischen Gründen leider nicht abgedruckt werden, da sie sich zur Zeit in einem geschlossenen Peer-Review Verfahren zur Veröffentlichung im Rahmen der 7OSME befindet.

Bei näherem Interesse zu dem Thema der Lens Tessellation gebe ich natürlich gerne nähere Auskunft und bin zu erreichen unter der Emailadresse g.stem79@gmail.com

Leopold-Franzens-Universität Innsbruck



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Magister-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation eingereicht.

Datum

Unterschrift