TŲ UB

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

http://www.ub.tuwien.ac.



The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.

http://www.ub.tuwien.ac.at/eng



DIPLOMARBEIT

TENSION TREE

"Entwicklung von Tragstrukturen aus verformten plattenförmig geschichteten Werkstoffen"

> ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung

o.Univ. Prof. DDI Wolfgang Winter

E259 - Institut für Architekturwissenschaften / Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Architektur und Raumplanung von

Dal-Bianco Bernhard 0225118

Wien am 28.05.2015

Strukturen sind das Resultat aus einem Wechselspiel von Kräften. Sie gehen hervor aus Ihnen und werden durch sie geprägt. Die vorliegende Arbeit von Materialien und synthetisiert die Erkenntnisse in einem prototypischen Tragwerksentwurf. Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist die Motivation, aus planaren Plattenwerkstoffen elastisch deformierte dreidimensionale Tragstrukturen zu erzeugen. Dazu wird eine Vorgangsweise vorgeschlagen, wie man aus einer einzelnen, ebenen Holzplatte durch Schlitzen und spreizen, deren Steifigkeit erhöht. Die aus dieser Logik entspringende, neuartige Tragstruktur, genannt "Linsenschale", wird in physical forces to inform the design. der Arbeit beschrieben und im Entwurf einer Überdachungseinheit angewandt. Die entstandenen biegeaktiven Strukturen demonstrieren exemplarisch, welche konstruktiven und gestalterischen Potenziale in elastisch deformierten Strukturen stecken. Die Faszination an diesem Thema entspringt aus der Absicht, physikalische Kräfte für den Entwurf zu instrumentalisieren.

ABSTRACT

Structures result from the interplay of forces. Even when these forces have passed through a material, they leave traces behind. The present study examines this process in relation untersucht diese Prozesse in Bezug auf das Biegen to the bending of materials and synthesises the findings in a prototypical structural design. The intention is to generate three-dimensional structures by elastically deforming planar plate materials. The proposed logic enables the stiffness of a flat wooden board to be increased by making cuttings and splaying them. This "active bending" - system, called "lensshell", is described in this thesis and then applied in the design for a roofing unit that effectively demonstrates the constructive and creative potentials of elastically deformed structures. The fascination with this issue arises from the intention to use

Ich möchte allen danken, die mich bei der Entwicklung dieser Arbeit begleitet haben.

Zuallererst möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Stefan Kaufmann bedanken, der mich während meines Erasmus-Aufenthaltes an der TU München mit der Fragestellung, wie man aus planaren Platten Tragstrukturen erzeugt, in Berührung gebracht hat. Gefördert durch ihn und Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold vom Lehrstuhl für Architekturinformatik der Fakultät für Architektur der TU München war ich in der Lage zahlreiche Modelle anzufertigen um meine Ideen zu testen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dipl.-Ing. M.Eng. André Ihde vom Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TU München und meinem Studienfreund M.Eng. Florian Meier bedanken. Beide verhalfen mir meine Strukturen durch die FEM besser zu verstehen.

Nachdem ich von meinem Erasmus-Aufenthalt nach Wien zurückgekehrt war, fand ich bei Univ. Prof. DDI Wolfgang Winter vom Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der TU Wien die Möglichkeit meine Ideen im Rahmen dieser Diplomarbeit tiefergehend auszuarbeiten. Durch ihn konnte ich mein Grundlagenwissen ausbauen und meinen Blick durch zahlreiche anregende Gespräche konkretisieren - ich freue mich auf die kommenden.

Als ich nach einem anregenden Vortrag über biegeaktive Strukturen von Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel dazu eingeladen wurde, einer Online-Forschungsgruppe zu diesem Thema beizutreten, eröffneten sich mir durch diese Online-Plattform zahlreiche aktuelle Publikationen zu diesem Themenfeld. Für diesen Zugang möchte ich mich herzlich bedanken.

Großer Dank gilt auch allen meinen Freunden in München und Wien, sowie meiner Familie. Eure Unterstützung und Zusprache spendete mir unendlich viel Kraft.

Zuletzt danke ich dir, Iwi. Danke, dass du an mich glaubst. Ich glaub an dich!

1. Intro	2	Faszination
2. Forschungsfeld	4	Biegen als Designstrategie
	8	Biegeaktive Tragwerke
3. Technik	14	Deformationsarten und deren Randbedingungen
4. Material	20	Rhenomes Verhalten von Holz
	26	Plastische und elastische Biegetechniken bei Holz
	34	Der Baum als Schwingungsdämpfer
	36	Holzwerkstoffe
	42	Glossar
5. Entwurf	47	Einführung
	49	Logik - Form "Biegelinie gestalten"
	53	Logik - Struktur "Biegung instrumentalisieren"
	59	Vergleichende FEM-Simulation
	65	Fabrikation & Montage
6. Tension Tree	69	Angewandtes Beispiel
	81	Modulare Überdachung
	89	Analoge & digitale Modellversuche
8. Dokumentation	95	Arbeitsmodelle
	106	Bibliografie
	108	Abbildungsverzeichnis



FASZINATION

Strukturen sind das Resultat aus einem Fig 1 - Überlagerung von Biegelinien Wechselspiel von Kräften. Sie gehen hervor aus Ihpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Motivation, gen. Die Faszination an diesem Thema entspringt stellende Gestalt, direkter Ausdruck der wirkenden dem im späteren Entwurf zur Anwendung komgen wie man aus einer einzelnen ebenen Holzplatte

nen und werden durch sie geprägt. Die vorliegende Arbeit untersucht diesen Prozess im Bezug auf das Biegen von Materialien und synthetisiert ihn in einem prototypischen Tragwerksentwurf. Ausgangsaus planaren Plattenwerkstoffen elastisch deformierte dreidimensionale Tragstrukturen zu erzeuaus der Absicht mit Kräften zu entwerfen. Biegen ist eine der Kulturtechniken in welcher die sich ein-Kräfte durch das Material ist. Der erste Teil der Arbeit gibt eine Einführung in das Forschungsfeld der biegeaktiven Strukturen an Hand angewandter Beispiele in Architektur und Design. Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit den technischen Grundlagen der Deformationsarten und menden Material, Holz. Im dritten Abschnitt wird eine Logik vorgeschladurch Schlitzen und spreizen deren Steifigkeit erhöht. Die aus dieser Logik entspringende neuartige Tragstruktur, genannt "Linsenschale", wird in der

Arbeit beschrieben und im Entwurf einer Überdachungseinheit angewandt.

1. INTRO

Fig. 2



BIEGEN ALS DESIGNSTRATEGIE

Biegen ist eine der ursprünglichsten Kulturtechniken ein Material zu verformen. Dies geht weit in die Entwicklungsgeschichte der von Menschenhand gefertigten Werkzeuge, Waffen und Behausungen zurück. Neben dem positiven Einfluss auf die Stabilität des Materials erlaubte geschichtlich betrachtet der Prozess des Biegens einen ökonomischen Einsatz von Material und Arbeitskraft. Der relativ geringe Aufwand ein Material durch Biegen zu verformen unterscheidet es von den zeitintensiven handwerklich elaborierteren Methoden, in welchen ein Material in Form geschnitten, geschnitzt oder gegossen wird (1).

Pfeil und Bogen

Funde belegen, dass Bögen (Pfeil und Bogen) schon in der ausgehenden Altsteinzeit (30.000 - 10.000 v Chr. als Abschussvorrichtung für Pfeile gefertigt wurden. Bögen sind insofern interessant da Sie das versinnbildlichte Wechselspiel zwischen Material, Kraft und Gestalt sind. Die Fertigung setzt ein genaues Wissen über die Materialeigenschaften und den Einfluss der Ausgangsform auf die gespannte Endform voraus (Fig. 2). Dem Einsatzgebiet entsprechend (Jagd, Kriegs-

führung) forderten bestimmte Leistungsfähigkeiten (Schussweite, Gewicht,...) bestimmte Konstruktionsweisen. Eingeschränkt durch die zur Verfügung stehenden Rohstoffe und Technologien entwickelte sich eine Vielzahl unterschiedlicher Bogenarten

2. FORSCHUNGSFELD

2.1

Federation of Arts. Bent Wood and metal furniture: 1850 - 1946 : [in conjunction with the exhibition Bent Wood and Metal Furniture: 1850 - 1946'; circulated September 1986 - October 1988]. (The University of Washington Press, New York, NY, 1987).

(1) Ostergard, D. E. [Hrsg & American

Fig. 2 - Relation Ausgangsform-Endform (a) Ausgangsform (b) Vorspannung (c) Aufspannung (d) maximale Spannung vor Pfeilauswurf

Fig. 3 - Bogenformen





(Fig. 3). Bemerkenswerte Bogenformen und Konstruktionsarten verschiedenster Kulturen zeugen von einer tief gehenden Auseinandersetzung mit Prinzipien kinetischer Kraftübertragung. Material und Form werden als Medium der Kraftübertragung verstanden und entsprechend ausgewählt und ausgebildet. Dieser zentrale Ansatz mit natürlichen Prozessen zu entwerfen, führt zu außerordentlich differenzierten Ausbildungen. Beispielhaft illustriert dies der asiatische Reflexbogen durch seinen der auftretenden Kräfte entsprechenden Materialaufbau (Fig. 4).

Energetisches Prinzip des Bogens

Ein Bogen entspricht dem physikalischen Modell einer Feder (Fig. 5). Federn sind in der Lage kinetische Energie zu speichern (Umwandlung in potenzielle Energie). Bei einem Bogen wird eine Feder aus einem Stab und einer Sehne (Zugseil) gefertigt. Durch das Biegen des Stabes und anschließender Einfrierung dieses Zustandes, mithilfe der Sehne, wird die gewünschte Vorspannung erzeugt. Zum Abschuss eines Pfeils spannt der Bogenschütze den Bogen über die Sehne weiter auf. Bei diesem zweiten Spannvorgang fließen erneut Kräfte in den Stab. Dieser ist nun maximal elastisch gespannt. Beim Abschuss des Pfeils entspannt sich der Bogen. Die Rückstellkräfte, die den Stab nun in seine Ausgangsform zurückschnellen lassen, übertragen sich mittels der Sehne auf den Pfeil, welcher dadurch in Schussrichtung ausgeworfen wird. Erst die Fähigkeit des Stabes sich elastisch deformieren zu können, erlaubt es die zugeführte Kraft im Material zu speichern und auf Wunsch des Bogenschützen wieder abzugeben.



6



BIEGEAKTIVE TRAGWERKE

Analog zum Bogen als Waffe kam die (2) Ochsenschlager, E. Life on the Edge of the Marshes. Expedition 40, 29-39 elastische Deformation als reversible Verformungs-(1998)technik auch in der Architektur nachweislich bereits (3) Lienhard, J., Alpermann, H., Geng-3000 v. Chr zur Anwendung (2). Der Mudhif (Fig. nagel, C., Knippers, J., "Active Bending, 6), eine aus dem südirakischen Sumpfgebiet stam-A Review on Structures Where Bending mende Bauform, wird von dem Volk der Madan Is Used as a Self-Formation Process," International Journal of Space Structures aus gebogenem Schilf errichtet. Bei dieser Bauwei-28, no. 3 (September 1, 2013): 187-196. se werden Bögen aus elastisch deformierten Schilfrohrbündeln erzeugt. Die erstellten Bögen werden Fig. 6 - Mudhif Herstellung: im Anschluss durch eine Eindeckung ausgesteift (a) einspannen der Schilfrohrbündel (Fig. 8). Wegen der schwankenden Wasserstände im (b) jeweils zwei Bündel werden elastisch zu Bögen verformt&verschnürt Sumpfgebiet wechseln diese Konstruktionen zeit-(c) Innenansicht weise Ihren Standort (Fig. 7). Der Raba, eine kleine-(d) Außenansicht re Bauform bestehend aus fünf Bögen, kann bereits Fig. 7 - schwimmende Siedlungen der in weniger als einem Tag abgebaut, transportiert Madan im südirakischen Sumpfgebiet. und wieder aufgebaut werden. Bei entsprechender Fig. 8 - Querschnitt Mudhif Pflege werden so erstellte Bauten weit über 25 Jahre alt.

Aktuelle Beispiele aus dem universitären Umfeld markieren eine Wiederentdeckung des konstruieren mit dynamischen Prozessen wie der elastischen Deformation beim Biegevorgang. Die Verschmelzung computerbasierter Entwurfs- und Fertigungsmethoden erlaubt es alte Wirkprinzipien und deren Phänomene digital abzubilden und in den Architektur- und Tragwerksentwurf zurückzuführen.

Biegeaktives Design

"Active bending"(3) ist eines dieser neuen Forschungsfelder, die sich aus diesem Diskurs entwickelt haben. Per Definition fallen unter diesen Begriff gekrümmte Stäbe oder Flächen, deren Form ein Produkt der elastischen Deformation von ursprünglich ebenen Elementen ist. Die Motivation hinter diesem Konstruktionsprinzip ist die Vereinfachung von Produktion, Transport und Errichtung. Ebene Elemente lassen sich einfacher und schneller produzieren als gekrümmte, das Transportvolumen ist geringer und die Lagerung unkompliziert. Im Aufbau werden die einzelnen Teile am Boden aufgelegt, aufgebogen und aufgerichtet. Neben den logistischen Vorteilen spricht vor allem die Integrität von Form und Struktur und den daraus resultierenden positiven Eigenschaften auf die Tragfähigkeit für diesen Ansatz. Da die Biegefähigkeit von Materialien formal durch eine geringe

(a)

(b)





2.2

Fig. 7





Fig. 8









(a)

(b)

(c)

(d)

Materialstärke in Relation zur Spannweite stei siedeln sich biegeaktive Entwürfe in der Regel Leicht- und Ultraleichtbau an.

Biegeaktive Tragwerke aus Holzplattenwerkstoffen:

Biegeaktive Tragwerke aus Holzplattenwerkstof (Fig. 9) bestehen aus einem oder mehreren elasti deformierten einfach gekrümmten Plattenelem ten. Die Krümmungen der einzelnen Holzeleme entstehen durch Selbstbildung.

Eine Holzplatte lässt sich in der Regel wie ein B Papier nur um eine Achse (einfach) krümmen (I 10). Ein elastisch deformiertes Element befin sich ständig unter Spannung. Jedes der vorgest ten Projekte verfolgt seinen eigenen Ansatz der aufgebauten Biegespannung konstruktives u zugleich gestalterisches Potenzial zu schöpfen. unterschiedlichen Strategien, welche es erlauben Plattenelemente aufzubiegen und in aufgeboge Form miteinander zu fixieren, werden zum er wurfsbestimmenden Merkmal.

Ähnlich dem Prozess eines Schneiders muss Schnittmuster entworfen werden. So wie Schneider wissen muss wie ein Stoff fällt, muss Entwerfer wissen wie sich der eingesetzte Ho plattenwerkstoff unter Spannung krümmt. Mitt Materialtests, Modellen und computerbasier Simulationen wird das Materialverhalten studi Nachdem ein übergeordnetes Tragsystem ent ckelt wurde wird dieses in ein Schnittmuster üb geführt und erprobt. Die einzelnen Elemente Schnittmusters werden im nächsten Schritt aus el nen Holzplatten ausgeschnitten, in Form gebog und zusammengefügt.

Die Entwicklungsschritte vom zweidimensionalen Schnittmuster zur dreidimensionalen Gestalt sind anhand ausgewählter Beispiele tabelarisch vergleichend dargestellt (Fig. 11, S. 12).

Um biegeaktive Tragwerke aus Holzplattenwerkstoffen zu entwerfen setzt es ein Wissen über die Deformationsarten und deren Randbedingungen, sowie dem Material Holz voraus. Die Grundlagen hierzu werden in den darauffolgenden Kapitel beschrieben.

igt, im	Fig. 9 - Entwürfe aus Holzplattenwerk- stoffen die "active bending" Strategien verfolgen
ffen sch ente	(a) Projekt: "Self-strutted geodesic plydome" Jahr: 1957 Material: Sperrholzplatten Spannweite max.: unbekannt Befestigungsmittel: Schraubverbindungen Fügung: Überlappung der Platten Objektgeometrie: Kuppel Entwurf: Richard Buckminster Fuller
latt	(b) Projekt: "Forschungspavillion" Jahr: 2010
Fig	Material: Sperrholzstreiten; $t = 6.5 \text{ mm}$
i ig. dot	Befestigungsmittel: Schraubverbindungen
hall	Fügung: Holzstreifen punktuell zum jew-
ten-	eiligen Nachbarelement "verkeilt"
aus	Torus
und	Entwurf: ICD/ITKE Universität Stuttgart
Die	
die	(C) Projekt: "Connecting Intelligence"
ener	Jahr: 2012
ent-	Material: Sperrholzstreifen; $t = 6.5 - 9 \text{ mm}$
	Spannweite max.: 9.5 m
	Fügung: Keilzinkenverbindung
ein	Objektgeometrie: Gewölbe - modifizierter
der	Torus
der	Entwurf: Oliver David Krieg (Diplomar- beit : Universität Stuttgart)
olz-	ben, emiliar brangary
tels	(d)
ten	Projekt: "Timber Fabric Arch" John: 2012
ort	Material: Sperrholzstreifen
	Spannweite max.: unbekannt
W1-	Befestigungsmittel: Schraubverbindungen
ber-	die Holzstreifen in Längsrichtung gegen-
des	gleich verdrehen.
ebe-	Objektgeometrie: Bogen
gen	Entwurf: Laboratory for timber construc- tion, IBOIS, ENAC, EPFL

Fig 10 - Abwickelbare Fläche (einfach gekrümmt)













Fügung

UND DEREN RANDBEDINGUNGEN

Rheologische Modelle

"Rheologie" leitet sich aus dem griechischen Wort rheos ab und bedeutet fließen. Unter Fließen ist die fortwährende Deformation eines Materials unter Kräfteeinfluss zu verstehen. Der Zusammenhang zwischen der Verformung eines Körpers und der diese Verformung verursachenden äußeren Spannung wird durch rheologische Modelle beschrieben. Die 3 idealisierten Grundmodelle sind die Elastizität (Feder), Plastizität (Reibklotz) und Viskosität (Dämpfungszylinder) (Fig. 12). Aus der Kombinationen dieser werden materialspezifische Modelle entwickelt, welche eine Vorhersage des Deformationsverhaltens erlauben. (5)

Biegeverformungszustände von harten/spröden Materialen

Grundsätzlich lassen sich zeitlich unmittelbar eintretende Deformierungen durch die elastische Deformation (reversibel) und die plastische Deformation (irreversibel) beschreiben. Während eines Biegevorgangs durchläuft ein Material zuerst eine elastische Deformation, die in eine plastische Deformation übergeht. Wann ein Material von einer Phase in die nächste wechselt, hängt von seinen Materialeigenschaften und der angewandten Biegetechnik ab. Dieser Übergang wird "Fließgrenze" oder auch "Streckgrenze" bezeichnet. Bevor die Fließgrenze erreicht ist, verhält sich ein Material elastisch und kehrt nach Entfernung der Belastung

Plastizität

Elastizität

Feder

(Hooke)

 $F_{\mathbf{R}}$

Reibklotz (Saint-Venant-Körper)



 $F_r = Haftreibung$ F = Deformationskraft



 $F_{\mathbf{W}} = Widerstandskraft$ F = Deformationskraft

Viskosität

Kolben in zäher

Flüssigkeit (Newton)

3. TECHNIK

DEFORMATIONSSARTEN 3.1

(5) Hofko, B. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten. (2006) pp.16

Fig. 12 - rheologische Modelle



in seine Ursprungsform zurück. Wird die Fließgrenze jedoch überschritten, tritt ein plastisches Deformationsverhalten auf. Dies bedeutet das sich die Materialstruktur verändert hat und das Werkstück in diesem Zustand nicht mehr in der Lage ist nach Entfernung der Belastung in seine Ursprungsform zurückzukehren. Das Brechen oder Reißen eines Materials tritt ein, wenn die Biegespannung im Material dessen Biegefestigkeit übersteigt. Das Material kann in diesem Fall keine Spannungen mehr aufnehmen und versagt (Fig.14a,b). Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Bruchversuchen illustrieren die Übergangsphasen im Material und die Fließgrenze lässt sich eindeutig ablesen. (Fig. 13)

Biegetechnik

Biegetechniken sind Methoden Materialien bruchfrei zu verformen. Materialspezifisch entwickelten sich unterschiedliche Methoden. In der Regel beschreiben sie Abläufe wie ein Material vorbereitet, gebogen und nachbereitet werden soll. Konkret werden die Materialeigenschaften durch die Geometrie des Werkstücks (bei Platten, die Kontur und die Materialdicke), und/oder über Temperatur & Zusatzstoffe dem Biegevorgang entsprechend angepasst und anschließend in eine Vorrichtung eingespannt, welche das Material in seine Biegeform überführt. Je nach angewandter Technik wird das Material entweder strukturell umgeformt (plastische Deformation).

Kräfteverlauf beim Biegen

Ein Biegemoment bewirkt im Materialquerschnitt wechselwirkende Zug- und Druckkräfte. Die Zug und Druckkräfte arbeiten im Materialquerschnitt gegeneinander und nehmen von der neutralen Faser aus nach außen hin zu. Die Zugkräfte, die auf der konvexen Seite auftreten, dehnen das Material, während im selben Augenblick die Druckkräfte auf der konkaven Seite das Material stauchen. (Bild)

Verhält sich das Material elastisch, ist es in der Lage, wie am Beispiel des Pfeil und Bogens gezeigt wurde, die auftretenden Zug- und Druckkräfte zu speichern und entsprechend einer Feder wieder abzugeben. Im Gegensatz dazu wird bei der plastischen Deformation die Biegespannung durch Veränderungen in der Materialstruktur abgebaut. Dies bedeutet, dass sich das Material irreversibel verformt





Flexural Youngs Modulus E [GPa]

und daher nicht wie bei der elastischen Deformation in seine Ursprungsform vor der Belastung zurückkehren kann.

Biegelinie bei der elastischen Deformation

Die Biegelinie gibt die Kurve an die ein Material aufgrund einer Biegeverfomung einnimmt. Beim Entwerfen innerhalb des elastischen Bereichs von Materialien lässt sich der Kümmung der Biegelinie durch die Materialstärke beeinflussen. Angewandt zeigt sich das an dem Profilverlauf eines Bogens (Waffe). Die Profilhöhe vom Haltegriff bis zu den Wurfarmenden des Bogens nimmt stetig ab. Diese Maßnahme wirkt sich direkt auf den Verlauf der Biegelinie aus (Fig. 17). Neben designorientierten Lösungsansätzen die Biegelinie durch den Materialquerschnitt zu beeinflussen, bestimmt die Biegefestigkeit und die Elastizität des zum Einsatz kommenden Materials über mögliche elastische Deformationen. (Fig. 15)

Zusammenfassung

Die Materialwahl ist bei biegeaktiven Strukturen Form und Entwurfs bestimmend. Will man die Rückstellkräfte einer elastisch deformierten Struktur nützen, sucht man ein Material, das bei der angestrebten Krümmung maximale Biegespannungen aufbaut, ohne zu versagen. Soll ein biegeaktives Tragwerk entworfen werden, müssen demnach zusätzliche Spannungsreserven für externe Lasten aufgeschlagen werden. Diese lassen sich für einen gewünschten Biegeradius(Fig. 16) auf Kosten der Steifigkeit durch die Wahl eines Materials mit niedrigem Elastizitätsmodul und einer geringen Querschnittshöhe vergrößern.

Kurz gesagt, ein genaues Einstellen der Relationen zwischen Material - Form -Last sind gefragt.



RHENOMES VERHALTEN 4.1 VON HOLZ

Grundsätzlich ist nach Grimsel(4) das Verf mungsverhalten von Holz eine explizite Funkt der:

- mechanischen Spannungen
- Feuchtigkeit X
- Temperatur T
- Zeit t

Da Holz wie jedes Material ein Spannungsequil um anstrebt, lösen Spannungen, die durch die o genannten Faktoren im Material ausgelöst werd unterschiedliche sich wechselseitig beeinflusser Deformationsprozesse aus. Für die Herstellung l geaktiver Strukturen gilt es diese, oft zeitlich ver gerten Deformationenprozesse, zu berücksichtig

Viskoelastische Verhalten -Kriechen und Relaxation

Einflussfaktoren: Zeit, Spannung, Temperatur, Belastungsfrequenz (5)

Kriechen und Relaxation sind Verformungsverl ten die wir bei langfristigen Belastungen von H beobachten können. Beide Phänomene treten terhalb der Fließgrenze auf und werden durch ein viskoelastisches Modell beschrieben. Unter Visko-Elastizität versteht man ein Materialverhalten, bei dem nach Wegnahme der Last eine vollständige Rückstellung erfolgt (deshalb Elastizität), diese aber zeitverzögert eintritt (deshalb visko)(6).

4. MATERIAL

rfor- tion	(4) Grimsel, M. Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteriden- tifikation eines anisotropen Werkstoffes.(W.e.b. Univ. vlg., 1999) pp.58					
	(5) Hofko, B. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten. (2006) pp.14					
	(6) 1.Rust, W. Nichtlineare Finite-Ele- mente-Berechnungen. (Vieweg Teubner, 2011).					
ibri- oben den, ende bie- rzö- gen.						
rhal-						
10lZ						







Kriechen

Das Kriechen (Fig. 21) (Retardation) äußert sich in der Verzerrung des Werkstoffes und nimmt bei konstanter Last unterhalb der Fließgrenze mit der Zeit zu. Beispielhaft erkennt man dieses Verhalten an Bücherregalplatten, welche sich unter der Last der Bücher über die Jahre immer weiter durchbiegen (Fig. 19).

Eine Sonderform des Kriechens ist das mechano-sorptive Kriechen. Bei dieser Form des Kriechens wird die Verzerrung des Holzes unter einer Last durch wechselnde Holzfeuchte ausgelöst. Im Gegensatz zum konventionellen Kriechverhalten spielt bei dieser Sonderform die Zeit t eine untergeordnete Rolle.

Relaxation

Die Relaxation (Fig. 22) beschreibt den mit der Zeit zunehmenden Spannungsabbau bei konstanter Deformation. Dies kennt man von dem anfangs erwähnten Beispiel von Pfeil und Bogen. Die Spannkraft eines gespanten Bogens nimmt über die Zeit ab jedoch seine Form bleibt unverändert. Zu diesem Zweck werden Sportbögen nach dem Gebrauch entspannt, um Ihre Eigenspannung durch Relaxation nicht abzubauen (Fig. 20).

Für biegeaktive Tragwerke spielt die Relaxation eine besondere Rolle. Wenn ich ein Holzplattenelement elastisch deformiere, entstehen automatisch Rückstellkräfte, die die Platte in Ihre Ursprungsform zurückführen wollen. Diese Rückstellkräfte können gezielt eingesetzt werden um die Steifigkeit im Tragwerk zu erhöhen. Da sich aber beim Material Holz aufgrund der Relaxation diese Rückstellkräfte abbauen, sind sie nur zeitlich begrenzt verfügbar.

Der "stress stiffening" Effekt (7)

Untersuchungen über den "Forschungspavillion" der Universität Stuttgart zeigen, dass die Rückstellkraft der jeweiligen elastisch deformierten Bogensegmente eine Zugkraft auf die geraden Segmente ausübt. Dies erhöht die Steifigkeit des gesamten Tragwerks und verringert die Durchbiegung unter Eigenlast um 15 % . Dieser Effekt reduziert sich jedoch langfristig stetig durch die Relaxation des Holzes (Fig. 23).

σ



(7) Lienhard, J. "Bending-active struc-

tures: form-finding strategies using elastic

deformation in static and kinetic systems

developed additional geometrical stiffness due to

and the structural potentials therein." (2014). pp.68: "It was found that the pavilion



Fig. 21

Fig. 22









Quellen und Schwinden

Einfluss Faktoren: Zeit und Feuchtigkeit Neben den Prozessen, die aufgrund von zug führten Spannungen im Material stattfinden, res tiert ein wechselnder Feuchtigkeitsgehalt im H ebenfalls in strukturinternen Deformationen. schwankender Feuchtigkeitsgehalt unterhalb Fasersättigungsbereiches löst bei Abnahme Schwinden (Fig. 24a/25), und bei Zunahme Quellen (Fig. 24b) des Zellverbandes aus. Schw den beschreibt also eine Verringerung des He volumens aufgrund von Feuchtigkeitsabnah und umgekehrt das Quellen die Vergrößerung Holzvolumens.

Hysterese

Materialien, die permanent be- und entlastet werden, entwickeln unterschiedliche E-Module im belastetem und entlastetem Zustand. Materialien besitzen also ein belastungsspezifisches Gedächtnis.



(a)

(b)

	Fig. 23 - "stress stiffening" Effekt. Der Spannungsverlauf in den Segmenten.
ıge- sul- Iolz	Fig. 24 - Verformung eines Holzstücks (a) Schwinden (b) Quellen
Ein des ein ein vin- olz- me des	Fig. 25 - Formveränderungen und Span- nungsrisse beim Trocknen von Holz

Fig. 25





Vollholz ausgeschnitten

dampfgebogen laminiert

biegeaktiv gebogen

PLAST. UND ELAST. BIE-GETECHNIKEN VON HOLZ

Wie bereits beschrieben, unterscheidet man elastische Deformationen (reversibel) von plastischen Deformationen (irreversibel). Dementsprechend haben sich Holzbiegeverfahren entwickelt, die innerhalb einer dieser beiden Zustände operieren. Zur Veranschaulichung werden plastische und elastische Biegetechniken anhand von Möbelentwürfen verglichen. Die vorgestellten Designs markieren Entwicklungsschritte in Einsatz und Herstellung von gekrümmten Holzelementen und lassen deren gestalterische Qualitäten erkennen. Das Potenzial dieser Weiterentwicklungen gegenüber in Form geschnittenen Holzelementen (Fig. 26/27a) liegt neben der verschnittfreien Herstellung im Erhalt von durchlaufenden Holzfasern über die gesamte Länge des Werkstücks, wodurch die Stabilität und Festigkeit der Elemente wesentlich erhöht wird. (Fig. 26 a,b,c,d)

Biegetechniken um Holz plastisch zu deformieren:

Um Holz plastisch zu deformieren (irreversibel) muss es einem strukturellen Wandel unterzogen werden. Für Holz, das aus einem diffusionsoffenen Zellverband besteht, sind die wirkenden Kräfte, die Holzfeuchte, die Temperatur und die Zeit, die Haupteinflussfaktoren für strukturelle Veränderungen. Grundsätzlich ist Holz unter einem Biegemoment in der Lage mehr Druckkräfte als Zugkräfte aufzunehmen. Daher versagt das Material auf der beim Biegevorgang auf Zug beanspruchten konvexen Seite zuerst. Holz ist ein Zellverband und dessen Zellwände können bei entsprechender Vorbehandlung (Temperatur, Wasser, chemische Holzbehandlung) wieder weich und gefügig gemacht werden (Plastifizierung). Im plastifizierten Zustand lässt sich der Zellverband unter Druck verdichten und verbleibt nach entsprechender Trocknung im komprimierten Zustand. Rückstellkräfte bilden sich aufgrund der Plastifizierung nicht und das so erstellte Werkstück verbleibt spannungsfrei in seiner neuen Form.

Bugholzverfahren Thonet:

Die Gebrüder Thonet entwickelten und industriali-

4.2

Fig. 26/27 - Eigenheiten von künstlich gekrümmten Holzelementen und deren Einsatz im Möbeldesign

- (a) Scherenstuhl (16 Jhdt.) Vollholz ausgeschnitten
- (b) M. Thonet Nr. 14 (1859) Vollholz dampfgebogen
- (c) G. Summers Armchair (1933) Furnierblätter laminiert
- (d) N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) Sperrholzplatte biegeaktiv gebogen



Fig. 27

(a)





Fig. 29



sierten im 19. Jahrhundert ein entsprechendes Verfahren Buchenvollholz plastisch zu deformieren. Sie erkannten, dass die Dehnung des Holzes der auf Zug beanspruchten Seite unterbunden werden musste, und lösten dies mittels einem Zugband aus Stahl (Fig. 28). Dieses übernimmt auf der konvexen Zugseite die Zugkräfte und führt Sie direkt zurück in die konkave Druckseite, wodurch der durch Wasserdampf plastifizierte Zellverband komprimiert wird. Bei diesem Vorgang kommt es zu einer plastischen Deformation der Zellen. Der Kompressions- (1880) vorgang verkürzt die Druckseite und das Werkstück krümmt sich bruchfrei in die gewünschte Biegeform und kann nach dessen Trocknung spannungsfrei der Biegeapparatur entnommen werden. Die entwickelte Methode und das daraus angemeldete Patent ließen Sie zu einem der größten Möbelproduzenten ihrer Zeit avancieren. Die Biegetechnik ermöglichte es rasch und kostengünstig industriell zu produzieren und das aus logistischen Gesichtspunkten revolutionäre Design des "Kaffeehausstuhl Nr. 14" (Fig. 27b,29) erlaubte es bis zu 36 dieser inklusive Verbindungsmittel in einer Transportkiste von einem Kubikmeter zu verpacken (Fig. 30) und zu verschicken. Durch diese zwei Faktoren konnten die Gebrüder Thonet ihre Stühle zu niedrigen Preisen anbieten und der "Kaffeehausstuhl Nr. 14" wurde bis heute mehr als 50 Millionen Mal verkauft und gilt damit als einer der meist verkauften Stühle der Welt. (8)

Fassbinden

Bei der traditionellen Herstellung von Holzfässern wird ebenfalls über Temperatur und Wasser Holz plastifiziert. Dauben (Längshölzer) werden in Wasser getränkt und über ein Feuer im Inneren des Fasses (Druckseite) erhitzt (Fig. 31). Die dadurch plastifizierten Dauben werden in einem nächsten Schritt durch Fassreifen (Stahlreifen) in Position gebogen.

Zusammenfassung

Biegetechniken, die sich innerhalb der plastischen Deformation bewegen, verformen das Material permanent. Sie erlauben es Holz frei von Spannungen in die gewünschte Form zu versetzten und behalten aufgrund der durchlaufenden Holzfasern ihre ursprüngliche Stabilität und Festigkeit. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber, in Form geschnitzt und geschnittenen Holzelementen.

Fig. 28 - historische Thonet Biegevorrichtung mit Stahlband zur Zugspannungsentlastung Fig. 29 - Thonet Kaffeehausstuhl Nr. 14 Einzelteile Fig. 30 - Vertriebsidee Packung des Kaffeehausstuhl Nr. 14 Fig. 31 - Zeichnung Fassbinder/ Böttcher

(8) Thonet GmbH. Thonet essence 01.

(Thonet, 2011).





Fig. 31







Biegetechniken um Holz elastisch zu deformieren:

Um Holz elastisch (reversibel) zu deformieren, benötigt es eine Kraft, die das Material daran hindert, in seine Ursprungsform zurückzukehren. Im Falle des zu anfangs angeführten Beispiels von Pfeil und Bogen ist die gespannte Sehne das Element welches den Stab daran hindert seine geradlinige Ausgangsform einzunehmen. Elemente, die diese Aufgabe übernehmen, können je nach Einsatz unterschiedlicher Natur sein (Bindemittel, Verschraubungen, Seile, Einspannungen)

Laminieren ist eine häufig eingesetzte Technik um gekrümmte Holzteile zu realisieren. Ein Bindemittel hält bei dieser Methode die verklebten Schichten in Position (Fig. 34). Beim Laminieren im Holzmöbelbau werden einzelne dünne Holzfurniere zuerst flächig mit Bindemittel benetzt und dann lose übereinander geschichtet. Wenn diese aufeinandergeschichteten Furniere in eine gekrümmte Pressform eingelegt und anschließend in der Furnierpresse zusammengepresst werden, erlaubt der noch nicht ausgehärtete viskose Klebstoff ein Verschieben der Furniere untereinander, wodurch die zueinander auftretenden Längenveränderungen beim Biegevorgang ausgeglichen werden. (Fig. 32). Wenn das Bindemittel ausgehärtet ist, hält dieses die Schichten zueinander in der neuen Form fest. Das Werkstück ist demnach nicht spannungsfrei und die einzelnen Furniere würden sich theoretisch nach Entfernen des Bindemittels in Ihre flächige Ausgangsform rückstellen. Da das Holz nach gegebener Zeit rerückkehren würden.

laxiert, ist anzunehmen das die einzelnen Schichten nicht komplett in Ihre flächige Ursprungsform zu-Gerald Summers "armchair" Der aus Furnierblättern laminierte "armchair" von Gerald Summers entstand 1933 (Fig 33,35). Er besticht vor allem durch sein intelligentes Schnittmuster, das es erlaubt den Stuhl nahezu verschnittfrei aus rechteckigen Furnierblättern auszuschneiden. Das gestalterische Wechselspiel zwischen der zweidimensionalen Ausgangsform und der dreidimensionalen Endform lässt sich in diesem Entwurf besonders gut erkennen.

Fig. 32 - Furnierpresse zum laminieren Fig. 33/35 - G. Summers Armchair (1933)

Fig. 34 - Funierblätter verklebt und unverklebt



Fig. 35





Biegeaktives Wandregal "Chuck"

Der Entwurf des Wandregals "Chuck" von Natascha Harra-Frischkorn nützt das elastische Verhalten einzelner Sperrholzstreifen (Fig. 36). Die einzelnen lose übereinander liegenden Elemente biegen sich elastisch um den Inhalt und bilden so immer neue Formen aus. Dieses sich stetig an den Inhalt anpassendes Wandregal schrumpft und wächst je nach Gebrauch mit. Aufgrund der Bündelung der Sperrholzstreifenenden fächern sich diese sobald ein Buch eingeschlichtet wird zueinander auf und nützen die dadurch entstanden Bögen und Ketten zur Lastabtragung (Fig. 36). Wesentliche Vorteile die die elastische Deformation bietet wurden in diesem Entwurf sowohl konzeptionell als auch strukturell integriert.

Ausblick

Biegetechniken, die sich innerhalb der elastischen Deformation bewegen, zeichnen sich durch ihre formflexiblen Eigenschaften aus. Intelligent eingesetzt erlauben Sie wandelbare Strukturen zu erzeugen die in der Lage sind auf Lasten zu reagieren. Elastisch gebogene Materialien gehen auf die zugeführten Lasten ein und drücken diese förmlich aus. Diese wandelbaren Verformungen besitzen neben gestalterischen Qualitäten auch konstruktive Vorteile. Im Bereich der Bauindustrie haben die Entwickler der KIELSTEG-Bauelemente dies bereits erkannt und ein Flächentragsystem aus Holz auf den Markt gebracht welches große Spannweiten bei geringem Eigengewicht überspannen kann. KIEL-STEG-Bauelemente (Fig. 37) bestehen aus einem Ober- und Untergurt aus Schnittholz sowie Stegen aus Sperrholz oder OSB. Die elastisch deformierten Stege erlauben eine Material sparende Bauweise und erzeugen im Verband ein Bauelement mit herausragendem Verhältnis zwischen Tragfähigkeit und Eigengewicht.

Holz elastisch zu denken eröffnet neue Potenziale für Architektur und Design und animiert eine bisher vernachlässigte Eigenschaft dieses Baustoffes weiterzuentwickeln.

Fig. 36 - Wandregal "Chuck" (2012) (a) Biegung unter Eigenlast (b) als klassisches Wandregal (c) biegeaktive wandelbare Form (d) Detail - Halterung die eine variable Längenänderung der Sperrholzstreifen erlaubt. Fig. 37 - KIELSTEG-Bauelement

(a) Schnitt (b) Bauelement







DIE ELASTISCHE **D**EFORMATION BEI LEBENDIGEN **P**FLANZEN

Das es Sinn macht Holz auf Biegung zu beanspruchen geht auch schon alleine von der Tatsache hervor, dass Bäume neben der Schwerkraft wechselnden Wind- und Schneelasten ausgesetzt sind und diese erst durch Ihr elastisches Verhalten ertragen. Holz ist in anderen Worten zum Biegen geschaffen. Beispielhaft lassen sich an Pflanzen und ihrem Wachstum die Kräfte ablesen, denen Sie im Laufe ihres Wachstums ausgesetzt sind (Fig. 38). Aus struktureller Sicht wird einem klar, dass Ihr gesamter Aufbau aus dem Wechselspiel von Nährstoffzufuhr und Wachstum in Relation zu exogenen Kräften bestimmt ist. Dementsprechend spiegeln sich im strukturellen Aufbau Prinzipien der Kraftableitung wieder.

Der Baum als reaktiver Schwingungsdämpfer

Stamm, Äste und Blätter eines Baumes verarbeiten auftretende Windkräfte unter anderen, in dem Sie zu schwingen beginnen. Dieses Verhalten erlaubt Ihnen eingeführte Kräfte inkrementell zu speichern und mit jedem Schwung abzubauen ähnlich einem Schwingungsdämpfer. Die auftretenden mechanischen Kräfte stimulieren zudem die Holzzuwachsrate des Baumes, der seine Form und strukturelle Ausbildung im Laufe des Wachstums standortspezifisch anpasst. Der Baum bildet dafür Reaktionsholz (9). Es gibt zwei Arten von Reaktionsholz, Druckholz und Zugholz (Fig. 39). Bei Weichholzarten bildet sich an der Druckseite Druckholz aus. Druckholz tritt vorwiegend bei Nadelbäumen auf und unterstützt den geneigten Baum an dessen konvexen Seite (Fig. 39a). Bei Hartholzarten hingegen bildet sich an der Zugseite "Zugholz" aus. Dieses findet sich vorwiegend bei Laubbäumen an deren konkaven Seite und zieht die Äste des Baumes in Position (Fig. 39b).

Schwingen bedeutet für einen Baumstamm sich elastisch deformieren zu können. Die Elastizität selbst variiert von Art zu Art. Sobald die Biegefestigkeit überschritten wird, versagt das Material und bricht. In der Forstwirtschaft spricht man hier vom Windbruch. Je nach Bodenbeschaffenheit und Wurzelausbildung kann der Baum statt zu brechen auch entwurzeln. Dieser Vorgang wird Windwurf genannt.

4.3



Fig. 38 - Baumwachstum als Kräftespiel

Fig. 39 - Schematische Darstellung des durch Belastung ausgelösten Wachstum von Reaktionsholz und dessen Faserorien-



++

Opposite wood

Fig. 39

(a)

(b)

HOLZWERKSTOFFE



(a)

(b)

(c)

Holzwerkstoffe sind industriell hergestellte Produkte. Im Gegensatz zum Vollholz, welches direkt aus dem Zuschnitt des Baums gewonnen wird, bestehen Holzwerkstoffe aus einem Verbund von verarbeiteten Holzteilen. Der dadurch künstlich hergestellte Materialquerschnitt ermöglicht es maßgeschneiderte Materialeigenschaften zu realisieren.

Hergestellt werden sie aus Holzteilen (Spänen, Fasern, Furniere ...) welche mit einem Bindemittel (Klebstoffe oder mineralische Bindemittel) verpresst werden. Holzart, Qualität, Bindemittel, Anordnung, und Pressverfahren erlauben eine Einteilung in Gruppen von Holzwerkstoffen. (Fig. 40)

(a) Lagenholz (verpresste Furnierschichten) (b) Spanholz (verpresste Holzspänne) (c) Holzfaserplatten (verpresste Holzfasern)

Dem Einsatzgebiet entsprechend wählt man ein Produkt nach Kosten, Verformungsverhalten, Festigkeitsverhalten, Dimensionsstabilität bei klimatischen Veränderungen, Feuerwiderstand und Bearbeitbarkeit aus. Im Folgenden wird ausschließlich Lagenholz in Form von Platten näher beschrieben da es von allen Holzwerkstoffen aufgrund seines besonderen Verformungs- und Festigkeitsverhalten für den Entwurf von biegeaktiven Strukturen geeignet ist.

Lagenhölzer

Lagenhölzer bestehen aus zwei oder mehreren Holzschichten, welche über ein Bindemittel kraftschlüssig verbunden sind. Neben der Holzart bestimmen Anzahl und Querschnitt der Schichten, deren Fasserrichtung sowie das Bindemittel die Eigenschaften des fertigen Werkstoffes.

Man unterscheidet grundsätzlich Schichtholz, Sperrholz und Sternholz. Beim Schichtholz werden die einzelnen Furniere faserparallel angeordnet verklebt (Fig. 41a). Im Gegensatz dazu sind beim Sperrholz die einzelnen Furnierschichten orthogonal zueinander verlegt (Fig. 41b). Beim Sternholz werden die Furniere wie beim Sperrholz angeordnet nur liegt der Verdrehungswinkel hier nicht bei 90 Grad, sondern zwischen 15 - 45 Grad zur Längs-

4.4

Fig. 40 - Holzwerkstoffe

(c)

Fig. 41

(a)

(b)

Faserrichtung der längslaufenden Funiere

richtung (Fig. 41c). Warum der Winkel, indem die Schichten zueinander verdreht sind, von so großer Bedeutung ist zeigt sich, wenn man seinen Einfluss auf die Materialeigenschaften der Platte betrachtet. Es lässt sich das gewünschte E-Modul in Längsrichtung gezielt über den Sperrwinkel einstellen. Will man ein gleichmäßig niedriges E-Modul im Werkstoff erhalten reicht es die Furniere in einem Winkel von 45 Grad zur Längsrichtung zu platzieren (10). Durch solch eine Maßnahme lassen sich die Eigenschaften der Platte schon in Ihrem Aufbau auf die später zu erwartende Belastung hin konzipieren. Darüber hinaus wirkt sich die Sperrung positiv gegen Verformungen aufgrund von klimatischen Veränderungen aus. Quell- und Schwindprozessen werden durch die gesperrten Holzschichten entgegengewirkt. Derzeit gängige Holzprodukte bedienen sich dieser Methode und es existieren Mischformen in denen innerhalb eines Holzwerkstoffes unterschiedlich zueinander gedrehte Furniere kombiniert werden.

Ein weiterer Vorteil von einem geschichteten Holzwerkstoff gegenüber Vollholz/Bauholz liegt in der Streuung von "Holzfehlern" wie z.B. Astlöchern (Fig. 43). Umso mehr Schichten eingesetzt werden umso homogener wird das Material, sprich "Holzfehler" in einzelnen Schichten werden durch die umgebenen Schichten ausgeglichen (Fig. 44). Neben den materialtechnischen Vorteilen bieten Lagenhölzer eine große Variabilität in den Formaten. Theoretisch gibt es keine Format Einschränkung. Praktisch werden Sie von Faktoren der Transportierbarkeit und der maximalen Verarbeitungsgröße der zu Verfügung stehenden Produktionsmaschinen bestimmt. So werden bereits standardisiert beachtliche Formate produziert die eine Größe von 20m x 2,5m erreichen. Um diese Formatvielfalt zu erreichen, müssen die Furniere versetzt verklebt werden. Die dadurch entstehenden geschäfteten Stöße können zu Schwachstellen werden. Beim Entwurf von biegeaktiven Strukturen aus Lagenholz sollte man dies wenn möglich im Schnittmuster berücksichtigen.

(10) Rosenthal, M. Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz. (Technischen Universität Dresden, 2009). pp. 52 Fig. 42 - Schäftung der einzelnen Furnierschichten z.B bei Kerto Fig. 43 - Bei Bauholz werden Astlöcher als Holzfehler bertrachtet. Die Darstellung eines Schnitts durch den Stamm eines 7 jährigen Baumes zeigt den Einfluß der Verästelung auf die Faserausrichtung. (AB) Zwei Äste die nach ein paar Jahren verstorben sind. (C) Ein Ast der nach ein paar Jahren Wachstum abgeborchen ist. (D) Ein zum Zeitpunkt des Baumschnitts lebendiger Ast. Fig. 44 - Wood-Veneer-Composite

Fig. 43

Fig. 44

Ausblick:

In der Natur finden sich ausschließlich auf Belastungen ausdifferenzierte Strukturen. Neben dem bereits beschriebenen Reaktionsholz bei Bäumen erkennt man im Aufbau der verholzten Zellwand einer Holzzelle selbige Mechanismen die das künstlich produzierte Lagenholz versucht nachzuahmen. Wo beim plattenförmigen Lagenholz lediglich die Furnierschichten zueinander verdreht werden so finden sich in einer Holzzelle bereits unterschiede zwischen den einzelnen Zellwandschichten. Sowohl in ihrer chemischen Zusammensetzung als auch in der Orientierung der Zellulose-Mikrofibrillen differenzieren sich die Schichten räumlichen zueinander (Fig. 47). Neben Pflanzen findet man im Exoskelett von Gliederfüßlern ein ähnliches Prinzip angewendet. Das Exoskelett einer Ameise besteht aus Chitinfasern, welche ähnliche Eigenschaften wie Zellulose besitzen (Fig. 45abc). Die Chitinfaser ordnen sich antiparallel zueinander in Bündeln aneinander. Ähnlich dem Lignin im Holz, umhüllen Strukturproteine die Chitin Microfibrillen, welche diese je nach Zusammensetzung und Anteil in harte und feste oder weiche und biegsame Strukturen verwandeln (Bouligand Struktur) (11). Die Bauindustrie folgt bereits diesen Vorbildern und die Entwicklung von funktionell ausdifferenzierten Materialeigenschaften innerhalb eines Materials steckt erst in den Anfängen (Fig. 46). Dementsprechend ist es vorstellbar das in Zukunft Lagenhölzer produziert werden deren Holzsorte, Sperrung und chemische Zusammensetzung bereits innerhalb einer Holzschicht variieren. So könnte man auf spezielle Lastfälle hin maßgeschneiderte plattenförmige Lagenhölzer produzieren, deren Aufbau wie bei ihren natürlichen Vorbildern funktionsbezogen variiert. Mal hart und fest und anderswo weich und biegsam. Dies würde die Möglichkeit eröffnen elastisch bewegliche Strukturen aus einem Material zu erzeugen. Im Gegensatz dazu wird in der Zeitgenössischen Architektur plattenförmiges Lagenholz weitgehend statisch als zweidimensionale Platte oder Scheibe verwendet.

Welches versteckte Potenzial in diesem zurzeit noch konservativ eingesetzten Werkstoff liegt, wird in dem folgenden Entwurf vorgestellt.

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Exoskelett&oldid=141631194> Fig. 45 - Exoskelett - Gliederfüßler (a) Bouligand Struktur (b) Hautschichtungen (Cuticula) (c) Ameisenkopf

Fig. 46 - Textilbeton

Fig. 47 - Aufbau der verholzten Zellwand einer Holzzelle

Fig. 47

Gleichgewichtsfeuchte (auch: Ausgleichsfeuch Bilanzfeuchte, praktischer Feuchtegehalt) ist der nige Wassergehalt, der sich in einem Baustoff na längerer Lagerung in einem Raum mit konstan relativer Feuchte und konstanter Temperatur ergi

Eine Biegelinie (auch Biegungslinie, Durchb gungslinie, elastische Linie) ist eine mathematisc Kurve, die die Verformung eines Balkens bei B gung beschreibt. Es ist in der Statik der Bauwer die Linie, in die infolge der Elastizität des Bauste fes die Achse eines ursprünglich geradlinigen B kenträgers übergeht.

Beschreibt die maximale Spannung die ein Mater (Körper) aufnehmen kann. Sie beschreibt den V derstand eines Werkstückes, welcher seiner Durc biegung oder seinem Bruch entgegengesetzt wird Einheit: [N/mm²]

Die Biegespannung beschreibt die Kraft, weld auf den Querschnitt (z. B. eines Balkens) wirkt, o senkrecht zu seiner Ausdehnungsrichtung belas wird. Einheit: [N/mm²]

Die Bruchdehnung ist ein Materialkennwert, die bleibende Verlängerung des Materials nach de Bruch bezogen auf die Anfangslänge angibt.

Die Dehnung ist eine Angabe für die relative Lä genänderung (Verlängerung bzw. Verkürzung) ein Körpers unter Belastung, beispielsweise durch ei Kraft oder durch eine Temperaturänderung (W meausdehnung). Einheit: [mm]

Reaktionsholz das von Pflanzen zur Aufnahme v Drucklasten gebildet wird. Druckholz findet s vorwiegend bei Nadelbäumen an der Astunterse

Eigenspannungen sind mechanische Spannung die in einem Körper herrschen, an dem keine äuf ren Kräfte angreifen und der sich im thermisch Gleichgewicht befindet. Einheit: [N/mm²]

GLOSSAR

hte, rje- ach nter gibt.	Ausgleichsfeuchte
bie- che Bie- erke tof- Bal-	Biegenlinie
erial Wi- rch- rd.	Biegefestigkeit (f _m)
che der stet	Biegespannung (σ _M)
der lem	Bruchdehnung (A)
än- nes eine 7är-	Dehnung (ɛ)
von sich eite.	Druckholz
gen, Be- hen	Eigenspannung (o_{es})

- *Elastizität* Elastizität ist die Eigenschaft eines Körpers sich aufgrund einer Krafteinwirkung unterhalb der Fließgrenze reversibel zu verformen. Sprich bei Wegfall der einwirkenden Kraft kehrt der Körper in seine Ursprungsform zurück. (vgl. *Plastizität*)
- *Elastizitätsmodul (E)* Materialkennwert der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt. Einheit: [N/mm²]
- FasersättigungsbereichDer Bereich in dem die Zellwände des Holzes keine
Feuchtigkeit mehr aufnehmen können und Wasser
nur mehr in den Hohlräumen der Zellen in Form
von freien Wasser eingelagert wird. Quellen und
Schwinden sind Prozesse die unterhalb des Faser-
sättigungsbereichs stattfinden.
- Flächenträgheitsmoment (1) Das Flächenträgheitsmoment ist eine geometrische Kenngröße einer Querschnittsfläche. Es sagt aus, wie groß der Widerstand des Querschnitts gegen eine Verformung ist. Es ist neben der Fläche wesentlich von der Form der Querschnitts abhängig. Zusammen mit dem E-Modul bildet es die Steifigkeit. Einheit: [cm⁴]
- *Fließgrenze/Streckgrenze* Grenzpunkt für den Übergang vom elastischen zum plastischen Zustand eines Werkstoffes bei mechanischer Belastung oder Beanspruchung. Oberhalb der Fließgrenze kommt es zu einer plastischen Verformung (irreversibel). Unterhalb der Fließgrenze verformt sich ein Werkstoff elastisch (reversibel).
 - Holzfeuchte (u) Holzfeuchte oder Holzfeuchtejkeit bezeichnet man den Wasseranteil von Holz in Prozent. Genau andersherum als allgemein üblich (vgl. Massenanteil und Wassergehalt) wird in der Holzbranche der Wasseranteil (die Holzfeuchte) auf die Trockenmasse eines feuchten Körpers bezogen und der Wassergehalt auf die Gesamtmasse (d. h. Feststoff + Wasser).

Das Kriechen (Retardation) äußert sich in der Vo zerrung des Werkstoffes und nimmt bei konstant Last unterhalb der Fließgrenze mit der Zeit zu. (z.B. Durchbiegung von Bücherregalböden). D Spannung im Werkstoff bleibt konstant, jedoch o Dehnung nimmt zu.

Kunstwort in Sinne von "weichgemacht werder welches den Übergang eines Stoffes vom festen einen verformbaren oder fließfähigen Zustand b zeichnet. Bei Holzwerkstoffen lässt sich die Flie grenze künstlich durch Anstieg der Temperatur u der Holzfeuchte herabsetzten.

Plastizität ist die Eigenschaft eines Körpers och Werkstoffes sich unter einer Krafteinwirkung ob halb der Fließgrenze irreversibel zu verform Sprich bei Wegfall der einwirkenden Kraft verble der Körper im verformten Zustand. (vgl. *Elastizi*.

Quellen beschreibt eine Vergrößerung des Holz lumens aufgrund von Feuchtigkeitszunahme. I anstieg des Holzvolumen aufgrund der Feuch keitsaufnahme der Zellwände resultiert in Def mationen des Holzes. Dieser Prozess findet solar statt bis die Fasern gesätigt sind und keine Feuch keit mehr aufnehmen können. (siehe.: *Fasersättigungsbereich*)

Reaktionsholz beschreibt ein bei Pflanzen auft tendes Zellwachstum das sich aufgrund von Spa nungen im lebenden Gewebe ausbildet um die a tretenden Lasten besser abzutragen - (ausgeldurch Umwelteinflüsse - Hanglage, Windlasten,.

Die Relaxation beschreibt den mit der Zeit zund menden Spannungsabbau bei konstanter Deform tion. Die Dehnung im Werkstoff bleibt konsta jedoch die Spannung nimmt ab.

G L O S S A R

Ver- nter Die die	Kriechen/Retardation
en", n in be- eß- and	Plastifikation
der per- en. eibt	Plastizität
vo- Der tig- for- nge tig-	Quellen (Holz)
tre- an- uuf- öst)	Reaktionsholz
eh- na- ant,	Relaxation

- Rückstellkraft Die Rückstellkraft ist eine Kraft, die auf eine, aus ihrer Ruhelage heraus bewegte, Masse wirkt. Die Rückstellkraft wirkt hierbei in Richtung der Ruhelage dieser Masse, sie will die Masse in ihre Ruhelage "zurückstellen".
- Schwinden (Holz) beschreibt eine Verringerung des Holzvolumens aufgrund von Feuchtigkeitsabnahme. Schwinden ist der Prozess des Schrumpfens der Zellwände unterhalb des Fasersättigungsbereiches aufgrund von austrocknen und resultiert in Deformationen des Holzes.
 - Steifigkeit Die Steifigkeit beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen elastische Verformung durch eine Kraft oder ein Drehmoment. Biegesteifigkeit = E * I Einheit: [N/mm²]
 - Zugholz Reaktionsholz das von Pflanzen zur Aufnahme von Zuglasten gebildet wird. Zugholz findet sich vorwiegend bei Laubbäumen an der Astoberseite. (vgl. Druckholz)

TENSION TREE

"Entwicklung von Tragstrukturen aus verformten plattenförmig geschichteten Werkstoffen"

ENTWURF

"The resistant virtues of the structure that we make depend on their form; it is through their form that they are stable and not because of an awkward accumulation of materials. There is nothing more noble and elegant from an intellectual viewpoint than this; resistance through form."

(Eladio Dieste - The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture, page 21)

5.1

Einführung

Fig. 1 - Überlagerung von Biegelinien

Der entwickelte Entwurf setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zuerst werden Methoden der Bearbeitung von Holzplatten und deren Einfluss auf die Biegeline beschrieben. Diese Auseinadersetzung führte zum Entwurf der Linsenschale. Ein neuartiges elastisch deformiertes Tragsystem das sich aus einer einzelnen planaren Holzplatte fertigen lässt. Die Linsenschale wird in Folge beschrieben und getestet und es zeigt sich, dass Sie neben einer Ressourcen sparenden Fabrikation besondere lastabtragende Fähigkeiten besitzt.

Im zweiten Teil wird die Linsenschale exemplarisch in einem architektonischen Entwurf eingearbeitet und angewandt. Die daraus entwickelte Überdachung demonstriert die konstruktiven und gestalterischen Qualitäten von elastisch deformierten Strukturen. Die Faszination an diesem Thema entspringt aus der Absicht, physikalische Kräfte für den Entwurf zu instrumentalisieren.

5.2

LOGIK - FORM

Fig. 48 - unterschiedliche Biegelinien von elastisch deformierten Platten aufgrund von künstlichen Querschnittsschwächungen

Biegelinie-Gestalten

Wie sich die Biegelinie einer elastisch deformierten Platte ausformuliert ist abhängig vom E-Modul des eingesetzten Werkstoffes, der Querschnittsform und dem einwirkenden Lastfall.

In den folgenden vorgestellten Bearbeitungsmethoden von Lagenholzplatten werden künstliche Querschnittsschwächungen illustriert. Diese Querschnittsschwächungen erlauben es die Biegelinie standardisierter, plattenförmiger Holzwerkstoffe nach Bedarf zu beeinflussen.

Wobei nicht vergessen werden darf, dass jede Querschnittsschwächung eine Schwächung des Materials und seiner Tragfähigkeit darstellt.

1

Fig. 49

Fig. 49 - Arten von Querschnittsschwächung um die Biegeline zu beeinflussen.

(a) Standard Plattenprofil (b) Konturschnitt (c) variables Querrschnittsprofil
(d) einfache V-Kerbung
(e) mehrfach Kerbung
(f) Ausschnitt

5.3

LOGIK - STRUKTUR

(12) Laves-Balken Laves, G. L. Georg Ludwig Friedrich Laves. (Steinbock-Verl., 1964).

(13) Heino Engel. Mit einem Vorw. von Ralph Rapson. Tragsysteme = Structure systems. (Hatje, 1999).

(14) Fischbauchträger Wikipedia (2015). at <http://de.wikipedia.org/wiki/Fischbauchträger#cite_note-3>

Fig. 50 - Laves-Balken

Fig. 51 - Linien der Hauptkraftrichtungen = isostatische Netzlinien bei einem Träger unter Gleichlast. "Kraftrichtungen im Träger bilden zwei Gruppen die sich immer rechtwinkelig überschneiden: Druckrichtungen haben Stützlinienform, Zugrichtungen haben Kettenlinienform"(13) (a)(b)(c) Umlenken und Aufspalten der Kraftrrichtungen

Biegung instrumentalisieren

Die "Linsenschale" entwickelte sich aus der Absicht aus einer einzelnen elastisch deformierten Platte ein Tragsystem zu erzeugen. Die Herleitung der Form lässt sich als direkte Antwort auf die wirkenden Kräfte lesen (Fig. 51). Das System sieht sich als Weiterentwicklung des Linsenträger oder auch "Laves-Balken"(12) genannt (Fig. 50) mit dem Unterschied das das Tragsystem aus einer einzigen Platte mithilfe der elastische Deformation erzeugt wird.

"...Laves verband das Prinzip der Bogenbrücke mit dem der Hängebrücke in einem System, wobei der obere Gurt als Brückenbogen, der untere als Kettenzug anzusehen (ist). Während hierbei die untere Kette das Ausweichen des oberen Bogens verhindert, widerstrebt der obere Bogen dem Zusammenziehen der Kette, wodurch beide Kräfte neutralisiert werden und ein für sich bestehendes Ganzes erlangt wird, welches weder zieht noch schiebt, sondern senkrecht auf die Unterlagenpunkte wirkt oder drückt..." (14)

Fig. 50

Fig. 52 - System der Kraftrichtungen (a) Ein Seil unter Einzellast (b) Ein Seil unter mehreren gleichmäßig verteilten Einzellasten nähert seine Form der Kettenlinie an. (c) Eine parabolische Kettenlinie bildet (c) Ente parabolische Ketterlinne blidet sich unter Gleichlast. In ihr herrschen ausschließlich Zugkräfte. Invertiert bildet Sie einen einen Stützbogen aus, indem nur Druckkräfte wirken. (d) Überlagerung von Kette und Bogen(e)(f) Integration dieses Systems in eine

elastisch deformierte Platte. (Linsenschale)

(e)

(d)

(f)

(a)

(b)

Fig. 52

(c)

t

Plattenprofil

Spannungsverteilung im Träger mit rechtwinkeligen Querschnitt

Fig. 54

aufgespreiztes Plattenprofil

(15) "Gurte" als Bauteilbezeichnung der Zug und Druckbereiche bei z.B. Doppel T-Trägern im Stahlbau.

Fig. 53 - konventioneller Träger unter Gleichlast (a) Träger unter Gleichlast (b) Kräfte des Biegemoments (c) Momentenverlauf

Fig. 54 - Linsenschale unter Gleichlast. Umlenken der isostatischen Netzlinien zur Steigerung der Tragfähigkeit.

(a)(b)(c) Umlenken und Aufspalten der Kraftrrichtungen

Die Platte wird zur Schale

Bei der Belastung einer Platte unter Gleichlast bauen sich die maximalen Biegespannungen in Trägermitte auf (Fig. 53). Die Linsenschale hindert diese Biegespannungen am Entstehen, indem sie die Linien der Hauptkraftrichtungen umlenkt (Fig. 54). Dies geschieht über die neuartige Querschnittsform, die aus in die Platte eingeschnittenen und elastisch deformierten Segmenten erzeugt wird. Hierdurch entstehen innerhalb einer Platte bogenförmige Zug und Druckgurte(13), die in Wechselwirkung die Biegespannungen in Trägermitte minimieren. Die durch die elastische Deformation der Segmente erlangte neue Querschnittsform erhöht das Flächenträgheitsmoment und damit die Steifigkeit des Systems.

parabolisch über die Länge des Trägers verteilt, mit max. Spannung in Trägermitte" (11)

Durch die Aufspreizung wird das Flächenträgheitsmoment in Trägermitte vergrößert.

5.4

Fig. 55 unbelastete Ausgansformen (a) Platte (b) Linsenschale

Im folgenden Versuchsaufbau wurde eine Platte vor und nach dem Umbau zu einer Linsenschale

VERGLEICHENDE FEM-SIMULATION

Versuchsaufbau

vergleichend getestet (Fig. 55).

Platte:

Plattenformat: 140*275 cm (3.85m²) Plattendicke: 21 mm

Bearbeitung: Schlitzlänge: 190 cm Segmentbreite: 14 cm Aufspreizhöhe: 27 cm Anzahl Segmente Gesamt: 9 Anzahl Segmente auf Zug: 4 Anzahl Segmente auf Druck: 5

Material:

Kerto-Q 21mm Lagenholz Sperrung I-III-I in Längsrichtung Rohdichte: 480 kg/m³ E-Modul: 10000 N/mm² Biegefestigkeit in Längsrichtung: 32 N/mm²

Lastfall: zweiseitig vertikal gelagert Flächengleichlast 0.3 kN/m² (30kg/m²)

(a)

(b)

Fig. 56 - Durchbiegung (a) einfache Platte (b) Linsenschale

Durchbiegung: zweiseitig vertikal gelagerte Platte Lastfall: Flächengleichlast 0.3 kN/m² (30kg/m²)

(a) einfache Platte In Trägermitte kommt es zu einer Durchbiegung von 27mm.

(b) Linsenchale Im Vergleich dazu biegt sich die Linsenschale um 74 % weniger durch (< 7mm).

(a)

Fig. 57 - Biegespannungen (a) einfache Platte (b) Linsenschale

Rechenweg Ermittlung σ_{zul} (max. Biegespannungen die die Biegefestigkeit inkl. Sicherheitsbeiwerte erträgt)

> Biegefestigkeit 32 N/mm² Sicherheitsbeiwerte: $k_{mod} = 0.9$ (Lastdauer) $\gamma_m = 1,25$ (Material) $\gamma_s = 1,5$ (Belastung)

$$\sigma_{zul} = \frac{k_{\rm mod}}{\gamma_{\rm m} \cdot \gamma_{\rm s}} \cdot f_{\rm b}$$

 $\sigma_{zul} = \frac{0.9}{1,25\cdot 1,5} \cdot 32 = 15,36 \text{ N/mm}^2$

Ermittlung der maximalen Flächenlast unter Einbezug der Sicherheitsbeiwerte

(1) Ausnutzung bei $f_k = 32 \text{ N/mm}^2$ Flächengleichlast = 0,3 kN/m²

Platte: (Fig. 37a) sigma/fc = 0.175 Ausnutznung = 5,6 N/mm²

Linsenschale: (Fig. 37b) sigma/fc = 0.279Ausnutznung = 8,93 N/mm²

(2) maximale Flächenlast σ_{zul} = 15,36 N/mm²

Platte: max. Fl.Gleichlast 0,82 kN/m² (82 kg/m²)

Linsenschale: max. Fl.Gleichlast 0,52 kN/m² (52 kg/m²)

Biegespannungen

zweiseitig vertikal gelagerte Platte Lastfall: Flächengleichlast 0.3 kN/m² (30kg/m²)

(a) einfache Platte

Zu sehen sind die Biegeverformung unter der Last und die nach Plattenmitte zunehmenden Druckspannungen an der Plattenoberseite.

(b) Linsenschale

Durch die Aufspreizung der Segmente wurde das Flächenträgheitsmoment und damit die Steifigkeit wesentlich erhöht. Die maximalen Spannungen verschieben sich von Trägermitte nach außen. Zusätzlich wird durch die asymmetrische Anordnung der Segmente (5 Druckgurte - 4 Zuggurte) eine Überhöhung des Trägers erreicht, welche der Durchbiegung zusätzlich entgegenwirkt.

Wenn man unter Einbezug der Sicherheitsbeiwerte (Lastdauer, Material, Belastung) die maximal mögliche Ausnutzung ermittelt, stellt sich heraus, dass die erhöhte Steifigkeit durch die Aufspreizung der Segmente Ihren Preis hat. Bei 52 kg/m² versagt die Linsenschale deutlich früher als die einfache Platte (82 kg/m²). Jedoch arbeitet die Zeit für die Linsenschale, da Holz durch die Relaxation die extra zugeführten Biegespannungen die durch die Aufspreizung entstehen wieder abbaut.

FABRIKATION & MONTAGE 5.5

Fig. 58 - Schnittmuster der Linsenschale Fig. 59 - Einzelteile die zur Montage der Linsenschale benötigt werden.

(a) eingeschlitzte Platte (b) Spreizsteg (c) Distanzstücke (d) 1x Zurrgurt (Verankerung)

Zuschnitt

Die Fabrikation der Linsenschale ist kostengünstig und schnell zu bewerkstelligen. Sie setzt sich aus 2 planar ausgeschnittenen Elementen zusammen: (Fig. 59ab)

(a) eingeschlitzte Platte (b) Spreizsteg

Diese lassen sich sowohl maschinell ab Werk über eine 3-achsige Fräsmaschine vorfertigen als auch an Ort und Stelle von Hand mit einfachen Handwerkzeugen zuschneiden. Aufgrund des rechteckigen Standardplattenformates entsteht in der Fabrikation kein Materialverschnitt. (Fig. 58)

Aufspreizung und Montage

Damit die Platte Ihre Biegeform einnimmt, muss der "Spreizsteg" in Position gebracht werden. Um die elastische Deformation der Segmente durchzuführen und die auftretenden Biegespannungen zu überwältigen wurde eine eigene Montagetechnik entwickelt. Dazu werden zusätzlich benötigt:

(c) Distanzstücke (optional aus Plattenzuschnitt) (d) 1x Zurrgurt + Verankerungsmöglichkeit

Fig. 59

Fig. 60

Fig. 60 - Montageablauf (a) Positionierung der Distanzstücke (b) eingerichtete Platte mit ungespanntem Zurrgurt (c) aufgespreizte Platte mit gespanntem Zurrgurt

Aufbau: (Fig. 60)

(1) Jeweils ein Distanzstück wird pro Segment seitlich der Plattenmitte abwechselnd befestigt. (2) Die Platte wird mittig im rechten Winkel zu den Verankerungsmöglichkeiten ausgerichtet. (3) Der Zurrgurt wird durch die Einschlitzungen gegengleich durchgefädelt und über den Distanzstücken positioniert. (4) Die Zurrgurtenden werden in die Verankerungen eingehakt. (5) Durch das kontinuierliche Verkürzen des Zurrgurtes über die Langhebelratsche spreizen die Deistanzstücke die Segmente gegengleich auf. (6) Sobald die gewünschte Aufspreizhöhe erreicht wurde wird der "Spreizsteg" durchgeschoben und befestigt. (7) Nun wird der Zurrgurt langsam entspannt, bis der Spreizsteg die Lastenaufnahme übernommen hat. (8) Die Distanzstücke und der Zurrgurt werden entfernt und die fertig Platte kann verbaut werden.

Vorteile Fabrikation&Montage

- Ausgangsmaterial: standard Plattenformate
- einfache Fertigung (maschinell oder von Hand)
- geringes Transportvolumen
- einfache Lagerung und Montage Vorort
- wieder Auf- und Abbaubar
- kein Materialverschnitt

Fazit

Durch die entwickelte Methode können planare Platten in Linsenschalen umgewandelt werden. Motivation hinter diesem Konstruktionsprinzip ist die Vereinfachung von Produktion, Transport und Errichtung. Ebene Elemente lassen sich einfacher und schneller produzieren als gekrümmte, das Transportvolumen ist geringer und die Lagerung unkompliziert. Im Aufbau werden die einzelnen Teile am Boden aufgelegt, aufgebogen und aufgerichtet. Neben den logistischen Vorteilen spricht die Integrität von Form und Struktur und den daraus resultierenden positiven Einfluß auf die Steifigkeit des Tragsystems für diesen Ansatz.

6.1 ANGEWANDTES BEISPIEL

Fig. 61 - Arbeitsmodell Tension Tree 1:20 Randbedingungen:

1. Bauaufgabe

- modularer Sonnenschutz
- Elemente: Stütze & Dach

2. selbstgesetzte Entwurfseinschränkungen

- Material plattenförmiges Lagenholz
- minimaler Materialverschnitt
- minimale Anzahl an Teilen
- auf- und abbaubar

3. Designstrategie

- Linsenschale
- elastische Deformation

"Das ästhetische Element kann man nicht direkt planen. Eine ästhetische Form steht am Ende eines Prozesses. Allein mit dem Willen zur Schönheit wird man sie nicht erreichen. Wenn wir ehrlich gearbeitet haben, bekommen wir sie manchmal geschenkt." (Frei Otto)

Elemente Der gestaltete Schirm setzt sich aus 3 Elementen zusammen.

- Dachfläche (Prinzip der Linsenschale)
- Spreizsteg
- Stütze

Sämtliche Elemente lassen sich planar aus Plattenwerkstoffen ausschneiden und werden mit Ausnahme des Spreizstegs bei der Montage elastisch deformiert.

625

_+

M 1:50

Draufsicht

₊

Untersicht

Ł

250

Ł

-

 $\overline{}$

 \square

73

-45 -‡

285

ŧ

M 1:50

Fig. 64 - Entwicklung Dachfläche
(a) planare zweifach geschlitzte
Ausgangsplatte
(b) elastisch deformierte Platte
(c) erneute Vorspannung der Schale durch die elastische Deformation zu den Stützenanschlusspunkten in Plattenmitte.
(d)Untersicht mit Stützenanschlusspunkten

Prinzip Dachfläche

Aus dem einfach geschlitzten Träger der Linsenschale wurde ein zweifach geschlitzter beidseitig ausgkragender Träger entwickelt. Zusätzlich wurde der Träger durch eine erneute elastische Deformation in Trägermitte vorgespannt. (Fig. 64)

(b) Der erzeugten Dachfläche wird an den mittigen Stützenanschlusspunkten(1) ein neuerlicher Tiefpunkt zugeführt. Durch die Auflagerung der Kragarme an den äußeren Stützenanschlusspunkten(2) muss die Dachfläche um dies Tiefpunkte(1) erreichen zu können erneut elastisch deformiert werden.

Die ebene Platte, aus der die Dachfläche hergestellt wird, ist somit durch zwei Maßnahmen vorgespannt. Die erste Vorspannung erhält sich durch das Aufspreizen zur Linsenschale und die zweite Vorspannung beim Anschluss an die Stütze. Die Flügelform der Dachfläche resultiert aus dem Wechselspiel zwischen diesen Vorspannungen. (d) Untersicht

(1)

Fig. 65 - Tension Tree Ansicht & Biegeradien

(a)

Fig. 66 - Schnittmuster der Stützenelemente

Fig. 67- Entwicklung Stütze (a) planare Einzelteile (b) Stütze inneinander verspreizt (c) Ansichten mit Aufbiegerichtungen der jeweiligen Stützenelemente

Prinzip Stütze

Die Stütze besteht aus 4 planar ausgeschnittenen Elementen (Fig. 66), die ineinander gesteckt und verspreizt werden (Fig. 67). Durch diesen Aufbau erhält man eine Kreuzstütze, die sich in Stützenmitte in vier T-Profile auflöst, um unter der Dachfläche wieder in ein steifes Kastenprofil zusammenzulaufen (Fig. 68d). Die Biegeform der einzelnen Stützenblätter ergibt sich aus der elastischen Deformation des Holzes.

(c)

Fig. 66

Fig. 68

81

(1)

6.2

MODULARE Überdachung

Fig. 69 - Lineare Anordnung - Bahnhof

Der Tensiontree lässt sich in mehreren Einheiten zu einem Verband zusammenschließen. Unterschiedliche Aufstellungsvariationen erlauben es linear oder flächig Räume zu beschatten.

X

punktförmig

flächige Mischform mit Lichthof

flächig mit Lichthof

flächig Mischform mit Randaussparungen

Fig. 71 Aufstellungsvariation: flächig mit Lichthof

Vorderseite

Seitenansicht

Draufsicht

Schaubild

10 m

87

(a)

(b)

(c)

6.3 ANALOGE UND DIGITALE MODELLVERSUCHE

Fig. 72 - 1:4 Modell Tension Tree (a) Zuschnitt (b) Aufgespreizte Dachfläche (c) digitale Biegesimulation Um das elastische Verhalten der Dachfläche besser beurteilen zu können, wurde ein Modell aus 4 und 6 mm Flugzeugsperrholz im Maßstab 1:4 angefertigt. Durch das einfache Schnittmuster kann die Kontur in wenigen Minuten von einer 3 achsigen Fräse ausgeschnitten werden (Fig. XXa). Es zeigt sich in aufgespreizter Form bereits die Überhöhung des Trägers aufgrund der asymmetrischen Segmentanzahl (Fig. XXb). Selbiges Verhalten konnte in einer qualitativen FEM-Simulation ermittelt werden. Der Rückgriff auf die digitale Simulation um die elastische Deformation zu ermitteln ist immer dann entscheidend, wenn sich zwei Elemente in ihrem elastisch deformierten Zustand treffen sollen. Im Fall des TensionTree sind das z.B die Anschlusspunkte des deformierten Daches und der deformierten Stütze.

Fig. XX - Riss des Sperrholzes am inneren Einschnittende **Versagen** Durch Belastungsversuche der Dachfläche M 1:4 wurden gezeigt wo die maximalen Spannungen durch die Aufspreizung der Segmente auftreten.

(b)

Fig. XX - Relaxation (a) Dachfläche mit Spreizsteig (b) relaxierte Aufspreizung

Relaxation

Die Sperrholzplatte baut die durch die elastisch-Deformation zugeführten Biegespannungen nach mehreren Wochen kontinuierlich ab.

7. DOKUMENTATION

ARBEITSMODELLE

Fig. 74 - erste Versuche eine Platte einzuschneiden und aufzuspreizen

Die Linsenchale und der Tensiontree wurden anhand von 1:20 & 1:4 Modelle entwickelt und erarbeitet.

Fig. 75 Arbeitsmodelle M 1:20

Fig. 76 Arbeitsmodelle M 1:4 & M 1:20

(1) Ostergard, D. E. [Hrsg & American Federation of Arts. Bent Wood and metal furniture: 1850 - 1946 : [in conjunction with the exhibition 'Bent Wood and Metal Furniture: 1850 - 1946'; circulated September 1986 - October 1988]. (The University of Washington Press, New York, NY, 1987

(2) Ochsenschlager, E. Life on the Edge of the Marshes. Expedition 40, 29-39 (1998)

(3) Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C., Knippers, J., "Active Bending, A Review on Structures Where Bending Is Used as a Self-Formation Process," International Journal of Space Structures 28, no. 3 (September 1, 2013): 187–196, doi:10.1260/0266-3511.28.3-4.187.

(4) Grimsel, M. Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes. (W.e.b. Univ. vlg., 1999) pp.58

(5) Hofko, B. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten. (2006) pp.14-16

(6) Rust, W. Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. (Vieweg Teubner, 2011

(7) Lienhard, J. Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. (2014). at <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9483/>

(8) Thonet GmbH. Thonet essence 01. (Thonet, 2011).

(9) Martone, P.T., Boller, M., Burgert, I., Dumais, J., Edwards, J., Mach, K., Rowe, N., Rueggeberg, M., Seidel, R., Speck, T., 2010. Mechanics without Muscle: Biomechanical Inspiration from the Plant World. Integrative and Comparative Biology 50, 888–907. doi:10.1093/icb/icq122

(10)Rosenthal, M. Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz. (Technischen Universität Dresden, 2009). pp. 52

(11) Exoskelett. Wikipedia (2015). at <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Exoskelett&oldid=141631194>

(12) Laves, G. L. Georg Ludwig Friedrich Laves. (Steinbock-Verl., 1964).

BIBLIOGRAFIE

(Ausschließlich die Bilder, die nicht vom Autor stammen sind hier aufgelistet.)

(13) Heino Engel. Mit einem Vorw. von Ralph Rapson. Tragsysteme = Structure systems. (Hatje, 1999).

(14) Fischbauchträger Wikipedia (2015). at <http://de.wikipedia.org/wiki/Fischbauchträger#cite_note-3>

(15) Gurt (Bauteil) Wikipedia (2015). at <http://de.wikipedia.org/wiki/Gurt_(Bauteil)>

(16)form follows nature Frei Otto • Finsterwalder Architekten • Carsten Nicolai at <<u>http://www.aut.cc/index.php?content=http%3A//www.aut.cc/</u> event.php%3Fitem%3D7721> Fig. 3 : DOMINA, H. Composite Bows: Weapon of Ancient Nomadic Equestrian Cultures. Legio I Lynx Fulminata [Online Image] Available from: https:// legioilynx.files.wordpress.com/2012/04/typesofbow.jpg [Accessed 14/10/14]

Fig. 4 : DOMINA, H. Composite Bows: Weapon of Ancient Nomadic Equestrian Cultures. Legio I Lynx Fulminata [Online Image] Available from: https:// legioilynx.files.wordpress.com/2012/04/construction-materials.jpg [Accessed 14/10/14]

Fig. 6a : "Constructing a mudhif from qasab" [Online Image] Available from: http://www.memoryprints.com/image/422466/constructing-a-mudhif-fromqasab.jpg [Accessed 12/08/14]

Fig. 6b : "MUDHIF houses..." (2011) [Online Image] Available from: https://pbr2010.files.wordpress.com/2011/08/mudhif-4.jpeg?w=450&h=294 [Acccessed 12/08/14]

Fig. 6c : "MUDHIF houses..." (2011) [Online Image] Available from: https://pbr2010.files.wordpress.com/2011/08/mudhif-3.jpeg?w=450&h=300 [Acccessed 12/08/14]

Fig. 6d : Mudhif Außenansicht (1955) [Online Image] Available from: http://lowres-picturecabinet.com.s3-eu-west-1.amazonaws.com/125/main/1/421558.jpg [Accessed 06/05/15]

Fig. 7: GORDON J. ; Flickr [Online Image] Available from: http://www.at-lasobscura.com/places/mudhif-houses [Accessed 05/05/15]

Fig. 8: "Irak // Basra Plain // Mudhif" [Online Image] Available from: http:// documents.epfl.ch/groups/l/lf/lfv/www/web/rossiniere/01/01.jpg [Accessed 13/01/15]

Fig. 9a : GORMAN, J.G. Buckminster Fuller Designing for Mobility, Skira Editore, Milano (2005), pp.154-157

Fig. 9b : ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.detail-online.com/inspiration/sites/inspiration_detail_de/uploads/ imagesResized/projects/780_20121120032952091a222d6eb65dc8edb3faf-1b24a26b54a5ea181.jpg [Accessed 13/12/13]

Fig. 9c : KRIEG, O. D. Connecting Intelligence (2012) [Online Image] Available from: http://www.oliverdavid.de/wp-content/uploads/2012/11/1201_08.jpg [Accessed 13/06/14]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Fig. 9d : WEINAND, Y. Method of form-finding and mechanical analysis of woven timber (2012) [Online Image] Available from:<http://infoscience.epfl. ch/record/183826/files/ScientificReport_Weinand.pdf> [Accessed 18/06/14]

Fig 10 : Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M. & Kilian, A. Architectural Geometry. (Bentley Institute Press, 2007). pp.536

Fig. 11 : (a)(1,2,3,4) Richard, B. F. Self-strutted geodesic plydome. (1959). at <http://www.google.com/patents/US2905113>

(Fig 1,3,4)(1b) ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.archplus.net/thumb/?src=gallery/004711/FP32_Eisenhardt-VollrathWaechter.jpg [Accessed 13/01/15]

(2b) ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.archplus.net/thumb/?src=gallery/004711/FP28_EisenhardtVollrathWaechter.jpg [Accessed 13/01/15]

(3b) ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.archplus.net/thumb/?src=gallery/004711/FP31_EisenhardtVollrathWaechter.jpg [Accessed 13/01/15]

(4b) ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.archplus.net/thumb/?src=gallery/004711/FP17_AMenges.jpg [Accessed 13/01/15]

(1c)(2c)(3c) KRIEG, O. D. Connecting Intelligence (2012) [Online Image] Available from: http://www.oliverdavid.de/wp-content/uploads/2012/11/1201 03. jpg [Accessed 13/06/14]

(4c) KRIEG, O. D. Connecting Intelligence (2012) [Online Image] Available from: http://www.oliverdavid.de/wp-content/uploads/2012/11/1201_011.jpg [Accessed 13/06/14]

(1d)(2d)(3d)(4d) Nabaei, S. S., Baverel, O. & Weinand, Y. Mechanical form-finding of the timber fabric structures with dynamic relaxation method. International Journal of Space Structures 28, 197-214 (2013).

Fig. 12: Rheologische Modelle [Online Image] Available from: http://rheologie. homepage.t-online.de/k1_1.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [Online Image] Available from: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Spgs-DehnungsKurve_Streckgrenze.svg [Accessed 01/05/15]

Fig. 14ab: W. C. Stevens & N. Turner. Wood bending handbook. (Fox Chapel Pub., 2008) pp.6

Fig. 15: Lienhard, J. Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. (2014). at <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9483/>. pp.34

Fig. 16: Biegelinie-Diagramm [Online Image] Available from: http://www. nirvanatec.com/support/bend/images/bend-nomen.gif [Accessed 13/03/15]

Fig. 17: Biegung eines Bogenendes bei unterschiedlicher Materialstärke im Profilverlauf [Online Image] Available from: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Bogentutorial_Biegung_bei_verschiedenen_Fadeouts.svg [Accessed 10/10/14]

Fig. 18: Viskoelastisches Verhalten [Online Image] Available from: http://www. chemie.unibas.ch/Kuhn/HansKuhn/Texte/S208.html [Accessed 13/03/15]

Fig. 21/22: Grimsel, M. Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes. (W.e.b. Univ. vlg., 1999) pp.66

Fig. 23: Spannungsverlauf in den Bogensegmenten ICD/ITKE Research Pavilion (2012) [Online Image] Available from: http://www.archplus.net/thumb/?src=gallery/004711/FP37_JulianLienhard.jpg [Accessed 13/01/15]

Fig. 24: Quellen/Schwinden [Online Image] Available from: (a) http://www. bauversuche.de/experimente/images/holzstuecktrocken.jpg (b) http://www. bauversuche.de/experimente/images/holzstuecknass.jpg [Accessed 13/03/15]

Fig. 25: Formveränderungen von Holz beim Trocknen [Online Image] Available from: http://www.payer.de/tropenarchitektur/trarch040685.jpg [Accessed 13/03/15]

Fig. 27a: Scherenstuhl, Oberitalien, erste Hälfte des 16. Jahrhunderts, Museo Nazionale del Bargello, Florenz [Online Image] Available from: http://www. antique.co.at/pdf/AntiqueTeil2/Image_013.jpg [Accessed 02/05/15]

Fig. 27b: Kaffeehausstuhl Nr. 14 [Online Image] Available from: http://www. skandium.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d-

6e5fb8d27136e95/v/d/vdm_e01_320.jpg [Accessed 02/05/15]

Fig. 27c: Gerald Summers Armchair (1933) [Online Image] Available from: http://www.peterpetrou.com/assets/gallery-pages/Gerald-Summers-Armchair/ Summers-chaircrop.jpg [Accessed 17/03/15]

Fig. 27d: N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) [Online Image] Available from: http://payload.cargocollective.com/1/4/158135/2124143/Multichuck_by%20 hafriko%2012_1000.jpg [Accessed 03/05/15]

Fig. 28: Biegevorrichtung mit Stahlband zur Zugspannungsentlastung [Online Image] http://archolab.com/wp-content/uploads/2013/02/05_Spring-Back_-Thonet-Jig.jpg [Accessed 11/09/14]

Fig. 29: Tonet Kaffeehausstuhl Nr. 14 Einzelteile [Online Image] Available from: http://www.thonet.de/uploads/pics/prinzip.jpg [Accessed 13/03/15]

Fig. 30: Vertriebsidee Packung des Kaffeehausstuhl Nr. 14 [Online Image] Available from: http://www.thonet.de/uploads/pics/vertriebsidee.jpg [Accessed 13/03/15]

Fig. 31: Böttcher (1880) [Online Image] Available from: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Böttcher_1880.jpg [Accessed 02/05/15]

Fig. 32: W. C. Stevens & N. Turner. Wood bending handbook. (Fox Chapel Pub., 2008) pp.46

Fig. 33: Gerald Summers Armchair (1933) [Online Image] Available from: http://www.peterpetrou.com/assets/gallery-pages/Gerald-Summers-Armchair/ Petrou-034-orig.jpg [Accessed 17/03/15]

Fig. 34: Funierblätter verklebt und unverklebt [Online Image] Available from: https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x /2c/39/8e/2c398e5ad6e4a81705d7da4a75467cbb.jpg [Accessed 02/05/15]

Fig. 35: Gerald Summers Armchair (1933) [Online Image] Available from: http://www.peterpetrou.com/assets/gallery-pages/Gerald-Summers-Armchair/ Summers-chaircrop.jpg [Accessed 17/03/15]

Fig. 36a: N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) [Online Image] Available from: http://payload.cargocollective.com/1/4/158135/2124143/Multichuck_by%20 hafriko%2021_1000.jpg [Accessed 03/05/15]

Fig. 36b: N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) [Online Image] Available from: http://payload.cargocollective.com/1/4/158135/2124143/Multichuck_by%20 hafriko%2011_1000.jpg [Accessed 03/05/15]

Fig. 36c: N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) [Online Image] Available from: http://payload.cargocollective.com/1/4/158135/2124143/Multichuck_by%20 hafriko%2012_1000.jpg [Accessed 03/05/15]

Fig. 36d: N. Harra-Frischkorn "Chuck" (2012) [Online Image] Available from: http://www.detail.de/daily/wp-content/uploads/2013/02/Chuck-5.jpg [Accessed 03/05/15]

Fig. 37a: Kielsteg-Bauelement [Online Image] Available from: http://www.kielsteg.at/wp-content/uploads/2012/12/Kapitel_01.pdf [Accessed 21/05/15]

Fig. 37b: Schnitt KIELSTEG-Bauelement [Online Image] Available from: http://www.kielsteg.at/wp-content/uploads/2015/03/Kielsteg_Regel_Querschnitte_DE.pdf [Accessed 21/05/15]

Fig. 38: Baumwachstum als Kräftespiel [Online Image] Available from: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Wind-blown_tree_Ka_Lae_Hawaii.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 39ab: Schematische Darstellung : Martone, P. T. et al. Mechanics without Muscle: Biomechanical Inspiration from the Plant World. Integrative and Comparative Biology 50, 888–907 (2010).

Fig. 39a: Druckholz Nadelbaum [Online Image] Available from: http://www. woodkorea.co.kr/news/photo/201006/11605_4854.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 39b:Zugholz Laubbaum [Online Image] Available from: http://www.wood-korea.co.kr/news/photo/201006/11605_4855.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 40a:Lagenholz Kerto Q[Online Image] Available from: http://www.stylepark.com/db-images/cms/finnforest_deutschland/img/p250683_2200_1515-2.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 40b:Spanholz OSB Platte [Online Image] Available from: http://st.bygg-hemma.se/productimages/0x0/cd2c85b1-e883-4054-9f17-d71cdd1c714e/osb-skiva-oputsad-yta-11x2440x1197-mm.jpg [Accessed 04/05/15]

Fig. 40c:Holzfaserplatte MDF[Online Image] Available from: http://www.ghzcham.de/img/?f=KAT0011408.JPG&w=900[Accessed 04/05/15] Fig. 41abc: Rosenthal, M. Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz. (Technischen Universität Dresden, 2009). pp.52

Fig. 42: Schäftung Kerto [Online Image] Available from: http://www.fh-finn-holz.com/fileadmin/files/Kerto_Zulassung_Z-9_1-100_bis_2016-06.pdf [Accessed 06/05/15]

Fig. 43: Einfluß der Verästelung auf die Faserrichtung [Online Image] Available from: http://www.gutenberg.org/files/35419/35419-h/35419-h.htm [Accessed 04/05/15]

Fig. 44: Wood-Veneer-Composite [Online Image] Available from: https://www. tu-chemnitz.de/mb/FoerdTech/aew/img/wvc0.jpg [Accessed 06/05/15]

Fig. 45a:Bouligand Struktur [Online Image] Available from: http://pubs.rsc. org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService. svc/ImageService/Articleimage/2014/NR/c4nr02814g/c4nr02814g-f10_hi-res. gif [Accessed 22/05/15]

Fig. 45b: Cuticula Available from: http://cdn.iopscience.com/images/1367-2630/10/1/013032/Full/nj265882fig3.jpgAccessed 22/05/15]

Fig. 45c:Exoskelett - Elektronenmikroskop Aufnahme eines Ameisenkopfes [Online Image] http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Ant_SEM.jpg [Accessed 22/05/15]

Fig. 46: Textilbeton [Online Image] Available from: http://de.wikipedia.org/ wiki/Textilbeton#/media/File:Textilbeton1.jpeg [Accessed 22/05/15]

Fig. 47: verholzte Zellwand einer Holzzelle [Online Image] Available from: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:28981/eth-28981-01.pdf [Accessed 04/05/15]

Fig. 50: Laves Balkenträger [Online Image] Available from: http://de.academic. ru/pictures/meyers/large/190656a.jpg [Accessed 27/05/15]

Fig. 59d: Zurrgurt [Online Image] Available from: http://www.ramb.net/ tl_files/contentelemente/Image/ladungssicherung/long_handle_ergo.jpg [Accessed 18/05/15]