

Spine

# DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung Architektur

Thomas Felber

Technische Universität Graz

Erzherzog-Johann-Universität

Fakultät für Architektur

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Institut für Tragwerksentwurf

Mai/2014

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am \_\_\_\_\_

(Thomas Felber)

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly made all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

\_\_\_\_\_  
(date)

\_\_\_\_\_  
(Thomas Felber)

### **Einleitung 9**

Persönliche Motivation  
Ausgangspunkt  
Grundsystem  
Weiterentwicklung  
Ähnliche Systeme

### **Modell I 21**

### **Statik 27**

Statik des Grundsystems  
Statik des vorgespannten Systems  
Offene und geschlossene Spannsysteme  
Reibung  
Vorspannung

### **Beweglichkeit 37**

### **Prototyp I 39**

Grundgedanken  
Statisches Prinzip des Ersatzträgers  
Materialwahl  
Herstellung  
Produktionsprobleme

### **Weitere Erkenntnisse 47**

Umlenkkräfte  
Spannkraftverluste  
Seilreibungsverluste durch Winkeländerung  
Spaltkräfte  
Spanngliedführung

# Inhalt:

## Prototyp II 55

Grundgedanken  
Materialwahl  
Herstellung  
Weitere Erkenntnisse aus der Herstellung

## Modifizierung 59

Reibungserhöhung durch Änderung der Geometrie  
Formstabilität durch Verschiebung der Schichten  
Querschnittsanpassung an Momentenlinie

## Modell II 63

Grundgedanken  
Materialwahl  
Herstellung

## Dreidimensionales System 67

Dreidimensionales Grundsystem  
Erweitertes Dreidimensionales System  
Modell III

## Modell IV 75

Wichtige Erkenntnisse und Vorteile des Systems 79

Zukünftige Anwendungen 81

Persönliches Fazit 83

Quellenverzeichnis 84

Bildverzeichnis 85

# Einleitung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung eines speziellen statischen Prinzips.

## Persönliche Motivation

Durch meine persönliche schulische Laufbahn bedingt, begann ich im Jahre 1999 an der Tu Graz zu studieren. Ich inskripierte auf der Fakultät für Bauingenieurwesen, lernte bald einige Leute kennen und wechselte kurzerhand die Studienrichtung. Natürlich kam es nicht von ungefähr, Bauingenieurwesen zu studieren. Vor allem die Zweige Tragwerksentwurf und Statik im Allgemeinen waren für mich immer schon interessant. Ebenso prägte meine schulische Vergangenheit das gesamte Architekturstudium. Machbarkeit, Funktion sowie statische Herausforderungen sind für mich sehr wichtig.

Ich bemerkte verstärkt die Diskrepanz zwischen Architekten und Bauingenieuren. Einerseits aus Sicht des Statikers und andererseits aus Sicht des Planers. Dies war für mich Grund genug schon in der Planung an die Machbarkeit von Entwürfen zu denken und neue Wege einzuschlagen.

## Ausgangspunkt

Der Ausgangspunkt meiner Diplomarbeit findet sich schon sehr früh in meinem Studium. Im Zuge eines Wohnbauseminars wurde im Jahr 2001 ein Ideenwettbewerb abgehalten. In Zusammenarbeit mit zwei damaligen Studienkollegen wurde ein spezielles Tragwerkskonzept, das sich am Bewegungsmuster der menschlichen Wirbelsäule orientiert.

Diese Idee brachte uns bei dem Wettbewerb den 3. Platz ein.

## Grundsystem

Unser Grundgedanke war es ein System zu entwickeln das aus Einzelteilen besteht und durch ein innenliegendes Seil zusammengehalten wird. Dadurch sollte eine Verdrehung der einzelnen Glieder zu einer flexiblen Formgebung führen. In unseren ersten Skizzen und Zeichnungen gingen wir von einem regelmässigen Achteck aus, welches jedes zweite Glied bildet. Dazwischen liegen immer Bindeglieder, welche ein Negativform aufweisen und so lückenlos das System schliessen. Die Formgebung erlaubt es jedes einzelne Element zum nächsten Element um  $45^\circ$  zu verdrehen. Dadurch ist es möglich verschiedene Formen zu generieren und die einzelnen Glieder mittels eines Seiles zusammenzupressen um die frei modellierte Form zu stabilisieren.

Wesentliches Grundelement des Systems ist ein durch sämtliche Elemente geführtes Seil. Das Seil presst diese von außen zusammen. Durch diese Krafteinwirkung wird die Verdrehung der Glieder zueinander blockiert. Im weiteren wurden Gedanken über die Optimierung der Seilführung angestellt. Diese muss einen gewissen Freiraum für das Spannglied bieten. Wenn, ausgehend von der Neutralstellung, ein benachbartes Element um  $45^\circ$  weitergedreht wird muss sich das Spannglied ebenso um  $45^\circ$  weiterdrehen können. Um dies zu bewerkstelligen wurde die Seilachse in beiden Richtungen um  $45^\circ$  verdreht. Dadurch erhält man ein Kreuz. Dieses Kreuz stellt die äusserste Begrenzung der Winkeländerung dar. Diese wurden dann mit viertelkreisförmige Randkurven verbunden. Diese Randkurven stellen die nun die äußere Begrenzung des Seils dar. Dabei verändert sich bei einer Formänderung auch die Seillänge. Dieses Phänomen spielte in unserem Fall noch keine tragende Rolle und wurde erst später als Problem erkannt.

## Weiterentwicklung

Das Studienjahr war vorüber, doch der Gedanke an ein wirklich frei verformbares System ohne eine Bindung an einen gewissen Raster war für mich treibende Kraft um mich noch tiefer mit der Materie zu befassen.

Meine Gedanken drehten sich in erster Linie um die Formgebung der Glieder. Was passiert, wenn die Glieder nicht nur 8 Ecken sondern 12 Ecken oder mehr aufweisen? Bei dem bisherigen System erfolgt die Kraftübertragung über den Formschluss.

Wenn man aber nun die Anzahl der Ecken erhöht wird der offene Winkel von Eckpunkt zu Eckpunkt immer grösser. Der Formschluss, der die Glieder an der Verdrehung hindert, wird geringer. Eine völlige Freiheit in der Formgebung wird aber erst dann erreicht, wenn die Glieder nicht mehr an einen Raster gebunden sind. Der Lösungsansatz lag darin, die Entwicklung der Glieder in Richtung eines „Unendlich“ Ecks auszudehnen und so die Vielecke durch Kreise zu ersetzen. Doch durch diese Formgebung bedingt verlieren die Elemente den Formschluss. Um diesen zu kompensieren muss das Spannglied um ein Vielfaches mehr Kraft aufbringen.

Diese Tatsache führte zu ganz neuen Überlegungen bzw. Problemen. Einerseits wird Kraft benötigt um das System stabil zu halten und andererseits erhöht sich die Schwierigkeit der idealen Formfindung für die Seilführung.

### Form der Glieder

Ausgangspunkt war bis dato ein Vieleck bzw. ein Kreis und dazwischenliegende Negativelemente. Somit setzt sich das System immer aus zwei unterschiedlichen Bauteilen zusammen. Eine weitere Überlegung war nun das System zu vereinfachen und auf die Bestandteile eines Seils und mehrerer identer Glieder zu reduzieren. Jedes Element verfügt über die gleiche Grundform und den selben Einschnitt in der Geometrie. Diese Formgebung lässt eine passgenaue Verkettung der Elemente zu. Die mondsichelförmigen Glieder bilden in dieser Aneinanderreihung das selbe statische System aus wie anfänglich das System mit unterschiedlich geformten Elementen.

### **Grundprinzip Reibungskraft:**

Um das System stabil zu halten muß nun die Spannkraft, die die Glieder zusammenpreßt, so groß sein, daß eine resultierende Reibungskraft zwischen den Gliedern entsteht, die einer Verdrehung unter Belastung entgegenwirkt.

### **Grundprinzip Vorspannung:**

Dieses Problem brachte mich auf den Gedanken der VORSPANNUNG. Die Glieder werden mit einer Vorspannkraft zusammengedrückt. Dadurch entsteht Reibung in den Berührungsflächen. Diese Reibungskraft in der Berührungsfläche trägt somit die auftretenden Momentenbelastungen ab.

### **Seilführung:**

Bei dem Grundsystem mit den achteckigen Gliedern ist damals schon die Frage aufgetaucht, wie die Form der Seilführung innerhalb der Gliedern verlaufen muss. Es ist verständlich, dass das Seil nicht einfach durch eine gerade Bohrung laufen kann, da dabei natürlich keine Verdrehung der Glieder untereinander möglich ist. Das heißt, die Form der Seilführung muss sich zum nächsten Glied hin auf spezielle Art „auffächern“ um genügend Platz für die Verdrehung zu schaffen. Trotzdem soll das Seil aber nicht zu viel Spielraum haben, da sich ansonsten die Länge des Seils abhängig von der Form mehr oder weniger stark verkürzt oder verlängert. Fazit ist, dass das Seil so „straff“ wie möglich geführt werden muss.

Für das Grundsystem reicht diese Art der Seilführung völlig aus um ein stabiles System zu generieren. Doch betrachtet man das weiterentwickelte System, muss die Form der Führung so gewählt sein, dass sich die Seillänge innerhalb des Systems nicht verändert, unabhängig von der Verdrehung der Glieder zueinander. Sollte sich die Seillänge innerhalb des Systems verändern, können bestimmte Probleme auftreten. Das System möchte sich selbst in eine Form bringen, bei der die Seillänge am kürzesten ist. Daraus folgt, dass die angesetzte Vorspannkraft geringer wird und anschließend das System zusammenbricht.

Es verging einige Zeit bis ich mich mit diesem Problem konstruktiv auseinandersetzen konnte als mir eines Tages plötzlich eine Idee in den Sinn kam. Grundgedanke war die Bewegung die jedes Glied zu Nächsten ausführt. Diese Bewegung folgt einer Kreisbahn bzw. ist durch ein gewisses Kreissegment definiert. Wenn man nun das Zentrum dieser Kreisbahn mit den Endpunkten des Kreissegmentes verbindet, erhält man einen Art Keil in dem das Spannglied verlaufen muss. Ist das System jetzt im schlaffen Zustand, lassen sich die Einzelelemente gegeneinander verdrehen ohne die Seillänge zu beeinflussen. Denn die Segmentlänge des Seils je Element summiert sich immer aus dem Radius und dem Abstand zum nächsten Element. Dieser Abstand ist in jedem Fall konstant und der Radius ebenso. Das Nachbarlement dreht sich lediglich um einen gewissen Winkel weiter.

Somit kann sich das Spannglied von einem Element zum nächsten immer um diesen Abstand verdrehen ohne sich dabei zu verkürzen oder zu verlängern. Dies funktioniert, da sich die Elemente untereinander immer entlang des Radius des Basiskreises verdrehen. Diese Erkenntnis war ausschlaggebend dafür, dass ich immer tiefer in die Materie eintauchte und mich der Drang, dieses System weiter zu bearbeiten, völlig übermannte.

## Ähnliche Systeme

Im weiteren wurden Recherchen zu diesem Thema durchgeführt. Es taten sich Fragen auf, wie: Gibt es ähnliche Systeme und in welchen Anwendungsbereichen finden sich diese. Bald wurde mir klar, dass die Grundform an sich nichts Neues ist. Aber in Verbindung mit Vorspannung wurde nichts gleichwertiges entdeckt.

Ähnliche Systeme waren hauptsächlich für den medizinischen Einsatz angedacht. Und dabei ging es meist um die Veränderbarkeit der Form und nicht um ein statisches Erfordernis. Daher war für diese Systeme die Tragfähigkeit nicht von Nöten.

## Modell I

Bisher war das System noch nicht wirklich greifbar. Es gab nur Skizzen und Zeichnungen. Es war die Zeit gekommen, um ein Modell bzw. einen Prototypen zu bauen.

In dieser Zeit wurden die ersten Überlegungen getätigt, wie ich nun ein Modell bauen könnte, das diese ganzen bisherigen Gedanken vereint. Eine lange Phase des Ausprobierens begann.

Die ersten Gedanken gingen in die Richtung, dass man aus einem Querschnitt, beispielsweise Holz, einmal den konkaven und einmal den konvexen Teil heraus fräht. Damit sind natürlich gewisse Schwierigkeiten verbunden. Einerseits habe ich nun das Profil, das das System darstellt andererseits ist Vollholz an sich leider nicht in alle Richtungen gleich belastbar. In weiterer Folge spielt auch die Faserrichtung des Holzes eine gewichtige Rolle.

Ein weiterer Faktor ist die Genauigkeit der Herstellung. Falls die Einzelteile zu ungenau ausgeführt sind und nicht perfekt aneinander passen, funktioniert das System nicht mehr.

Ein zusätzliches Problem in der Herstellung stellte auch die Seilführung dar.

Zu der Zeit war nun das Lasercutten schon nichts Neues mehr und daher gingen die nächsten Überlegungen in die Richtung, das System in lasergecutteten Schichten zusammenzufügen, da die Formen so wesentlich genauer hergestellt werden können.

Das Modell wurde nun so ausgeführt, dass ich einen Balkenträger aus dem System erhalte. Die Einzelelemente werden in einzelne Schichten aufgeteilt. Jedes Einzelelement besteht aus fünf verschiedenen Schichten. Die jeweils mittlere Schicht hat den Bewegungskeil für die Seilführung ausgespart.

Als Material kam mir Sperrholz in den Sinn, da ich damit eine höhere Stabilität erreiche. Die Sperrholzplatten mit 4mm Stärke wurden übereinander gelegt und miteinander verleimt. Als Resultat erhalte ich die Einzelelemente. Diese wurden nun auf ein 3mm Stahlseil aufgefädelt. Das Seil an einem Ende mit dem Randelement verbunden und am anderen Ende mit einem Spannmechanismus versehen.

Dieses Modell oder Anschauungsobjekt war für mich wichtig, um jetzt die große Frage einem Statiker zu stellen: Ist dieses System in meiner erdachten Art und Weise überhaupt möglich?

Mir erschien Prof. Lutz Sparowitz, damals Professor am Institut für Betonbau der TU Graz, und ein erfahrener Techniker in punkto Vorspannung, als passende Ansprechperson.

Ich erklärte ihm mein System und zeigte anhand des ersten Modells die Art und Weise meines entwickelten Konzeptes.

Nach einiger Zeit des Nachdenkens und gewisser Skizzen erklärte er mir, dass es seiner Meinung nach durchaus möglich ist dieses System zu realisieren.

Weiters zeigte er mir wie ich auf die Umlenkkräfte käme und wie das System grundsätzlich als Gesamtheit funktioniert. Anhand der Kesselformel könne man die Umlenkkräfte bestimmen. (siehe Abb.)

Weiters diskutierten wir mögliche Anwendungen im Spannbetonbau.

Dies war nun wirklich der Punkt an dem ich für mich entschied: Das wird das Thema meiner Diplomarbeit, denn bis dato war alles nur ein hypothetisches Konstrukt ohne irgend einen Beweis der Machbarkeit.

Doch die Meinung eines erfahrenen Statikers war mir mehr als wichtig. Letztendlich war mir das Beweis genug um mich jetzt noch intensiver damit zu beschäftigen und die vielen ungeklärten Fragen zu beantworten. Diese werden im weiteren Verlauf noch im Detail erklärt.

# Statik

## Statik des Grundsystems:

Das Grundsystem mit den beispielhaften acht Ecken funktioniert folgenderweise. Die Einzelelemente sind aneinander auf dem Seil aufgefädelt, dann werden diese durch das Seil zusammengespannt. Man kann nun vereinfacht von einem Balkenträger ausgehen bei dem der Querschnitt die halbe Höhe des Systems hat. Dies ist aufgrund der zentralen Lage des Spanngliedes vorgegeben.

Beispielhaft sieht das System als einfeldträger folgendermaßen aus. (siehe Abb.)

Wird das System nun belastet, so entsteht in diesem Beispiel Zug an der Unterseite und Druck an der Oberseite. Die Zugkraft an der Unterseite kann aber von den Elementen nicht aufgenommen werden. Diese Zugkraft muss von dem Spannglied abgetragen werden. Daraus ergibt sich, dass nun nur mehr die halbe Trägerhöhe statisch wirksam wird. Die untere Hälfte des Trägers bleibt quasi wirkungslos. Es entstehen ähnlich wie im Betonbau Risse an der Unterseite des Trägers entstehen, „klaffende“ Fugen in den Berührungsflächen der Einzelelemente. Darum müsste bei diesem System ein verhältnismäßig gleich „kräftiger“ Träger doppelt so hoch sein, als ein Träger aus einem Stück. (siehe Abb.)

Wird das System jedoch anders belastet, zum Beispiel in die entgegengesetzte Richtung, so wird die untere Hälfte des Trägers auf Druck beansprucht und die obere Hälfte bleibt wirkungslos.

## Statik des vorgespannten Systems:

Beim neuen System können die Kräfte nicht mehr über den Formschluss abgetragen werden. Jetzt kommt das Prinzip der Vorspannung und das Prinzip der Kraftableitung durch Reibung zum Einsatz. Wenn nun die Kräfte nicht mehr über den Formschluss ableitbar sind, müssen die Elemente so stark zusammengepresst werden, dass genug Reibung in den Kontaktflächen entsteht um die auftretenden Momente und Querkräfte zu übernehmen. Dabei ist jedoch nicht die Grösse der Kontaktfläche wichtig sondern die Spannkraft und die Lage im Querschnitt. Zum Abtragen von Momenten ist im speziellen wichtig ein möglichst hohes Widerstandsmoment des Querschnittes zu erzielen. Um dies zu schaffen sind natürlich die Randbereiche des Trägers wichtiger als Bereiche näher zur Mittelachse.

Dazu kommt, dass durch das Prinzip der Vorspannung noch ein wesentlicher Vorteil für das System entsteht. Denn durch die Überlagerung der Vorspannung mit der Spannung aus der Belastung wird der Querschnitt voll ausgenutzt.

Nachteil dabei ist jedoch die erhöhte Druckbelastung der Einzelelemente. (siehe Abb.)

- A Spannungverteilung aus Belastung
- B Spannungverteilung aus Vorspannung
- C Überlagerung Belastung und Vorspannung

## Offene und geschlossene Spannsysteme:

*Die Kraft des Spannumediums bildet samt ihrer Reaktionen, völlig unabhängig von den äußeren Belastungen, denen die betreffende Konstruktion sonst noch ausgesetzt ist, für sich allein ein vollständiges Gleichgewichtssystem (vgl. Abb.). Davon ist das für die Vorspannung verwertbare, unmittelbar auf die Spannoobjekte einwirkende Kräftespiel ein vom Konstruktions-typ abhängiges Teilsystem. In geschlossenen Spannsystemen stützt sich die Spannkraft ausschließlich auf das Spannoobjekt ab und bildet ein mobiles System (Fussball, vorgefertigtes Spannbetonelement, Speichenrad). Bei offenen Systemen wirkt die Spannkraft nicht nur auf das Spannoobjekt, sondern auch auf die Umgebung, wodurch das System örtlich gebunden ist (abgespanntes Zeltdach, durch Stützensenkung eingeprägte Vorspannung).<sup>1</sup>*

In diesem Fall herrscht nun ein geschlossenes System vor, das völlig eigenständig in sich gespannt ist. Die eingeleiteten Vorspannkraft und die Umlenkkraft an den Richtungsänderungen heben sich gegenseitig auf.

## Reibung:

Reibung ist ein ganz wesentliches Grundprinzip in der Weiterentwicklung des Systems.

Die Reibungskraft ist nicht abhängig von der Fläche sondern nur von der Normalkraft und vom Haftreibungskoeffizienten.

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

$F_R$  = Reibungskraft

$F_N$  = Normalkraft

$\mu$  = Reibungszahl oder Reibungskoeffizient

(siehe Abb.)

### **Definition Haftreibung:**

*Haftreibung, Ruhreibung, durch die Rauheit der Berührungsflächen bedingte Kraft, die sich als Widerstand des Körpers gegen ein Gleiten äußert. Haftreibung tritt nur auf, wenn der Körper auf der Berührungsfläche ruht. Wirkt auf den Körper eine Kraft, dann setzt eine Bewegung erst ein, wenn diese Kraft die Haftreibungskraft übersteigt. Die Haftreibungskraft ist proportional zur Auflagekraft (Normalkraft), die den einen Körper gegen den anderen drückt. Die Proportionalitätskonstante, die den Maximalwert der Haftreibungskraft bestimmt, heißt Haftreibungszahl oder Haftungskoeffizient.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

<sup>2</sup> [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/1m\\_data/1m\\_324/daten/kap\\_2/node44.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/1m_data/1m_324/daten/kap_2/node44.htm)



## Vorspannung:

Das zweite wichtige Werkzeug zur Weiterentwicklung des Systems ist das Prinzip der Vorspannung.

Vorspannung ist eine ohne äußere Belastung in Bauteilen vorhandene mechanische Spannung, die bei Produktion oder Montage eingebracht wird, um im Lastfall das gewünschte Verhalten zu erreichen.

### 8 Vorspannung (Skript TU Berlin - Massivbau)

#### 8.1 Einführung

Unter Vorspannung versteht man das „künstliche Unter-Spannung-Setzen“ (Heinz Hossdorf, 2003) von Bauteilen oder Bauwerken, bevor sie den normalen Beanspruchungen aus Eigengewicht, Schnee, Wind, ... ausgesetzt werden. Dadurch können sehr gezielt die inneren Beanspruchungen (Schnittgrößen bzw. Spannungen) und die Verformungen, auch zur optimalen Formgestaltung, im gewünschten Sinne beeinflusst werden. In der Fachliteratur findet man zur Definition der Vorspannung ganz unterschiedliche Darstellungen und Erklärungen:

Alf Pfüger (1978) meinte zur Frage, ob die Vorspannung als Last oder als Zwang aufzufassen sei: „ ... ist nun ein Vorspannungszustand kein Eigenspannungszustand, ... „

„Die künstlichen Vorspannungen kann man ebenfalls unter die Lastspannungen einordnen“ (Gotthard Franz, 1983)

„Man nennt deshalb das Ergebnis des Vorspannens einen Eigenspannungszustand“ (Jörg Schlaich, 1990)

„Vorspannung verursacht einen Eigenspannungszustand“ (Christian Menn, 1986)

Das Prinzip der Vorspannung ist schon von alters her bekannt und wird auch im Stahlbau, Glasbau, Membranbau, Seilbau, Verbundbau, ... häufig angewendet. Das Daubenfass, der Regenschirm, der Pneu im Fahrzeugreifen, fest angezogene Schrauben sind allgegenwärtige Beispiele dafür. Spricht man im Bauwesen von Vorspannung, wird dies unwillkürlich auf vorgespannten Beton projiziert. In den 50er Jahren beeinflusste der Spannbeton nach ausgereifter Technologie spektakulär die Konstruktionsweise von Brückenbauten. Aus dieser Sicht ist der Spannbeton ein Anwendungsbeispiel eines weit allgemeineren mechanischen Konzepts, das auf viele Bereiche der Konstruktionstechnik übertragen werden kann.

#### 8.2 Prinzip der Vorspannung

Mit der Erzeugung eines Vorspannungs-Zustands (Eigenspannungszustand) wird das Tragwerk mit potentieller elasto-statischer Energie

„aufgeladen“. Die hierzu notwendige Arbeit wird meistens durch spezielle mechanische Vorrichtungen erzeugt.

Womit rechtfertigt sich nun dieser technische Aufwand, der unvermeidlich zu einer Zusatzbeanspruchung der Konstruktion führt, deren Widerstandskraft doch zum Tragen der erwartenden Belastungen zur Verfügung stehen soll? Die Anwendung der Vorspannung ist nur dann sinnvoll, wenn sie in der Konstruktion vorhandene, im ungespannten Zustand aber ungenutzte Tragreserven aktivieren kann. Diese kommen fast ausschließlich in Konstruktionselementen mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften vor.

Die Festigkeitseigenschaften des Materials Beton sind bekannt: Hohe Druckfestigkeit und äußerst geringe Zugfestigkeit, er reißt!<sup>3</sup>

### Ähnlichkeit zu Spannbeton:

Das heißt Spannbeton ist ähnlich wie das flexible System. Die Einzelelemente untereinander sind nicht zugfest miteinander verbunden, können jedoch aufgrund der Formgebung die Druckkräfte übertragen. Die auftretenden Zugkräfte werden durch das Spannglied abgetragen. Was sich im Spannbetonbau durch die sogenannte „klaffende Fuge“ abzeichnet, sind im Fall dieses Systems die Stöße zwischen den Einzelelementen. (siehe Abb.)

<sup>3</sup> Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

# Beweglichkeit

Die Beweglichkeit bzw. Krümmung des Systems ist geometrisch allein abhängig vom Öffnungswinkel der Seilführung. Die Größe des Öffnungswinkels ist direkt proportional zur maximalen Winkeländerung je Einzelglied. Daraus ergeben sich beispielsweise verschiedene Szenarien. (siehe Abb.)

Aufgrund der Tatsache, daß die Umlenkkräfte bzw. die daraus resultierenden Reibungsverluste von der Winkeländerung der Glieder zueinander abhängig sind, stellt sich die Frage: wie weit kann der Öffnungswinkel und wie groß werden die Reibungsverluste die dadurch verursacht werden? Es ist abzuwiegen ob das System maximale Krümmungen erzeugen soll oder ob die statischen Erfordernisse im Vordergrund stehen.

# Prototyp I

## Grundgedanken:

Der Grundgedanke beim Bau des ersten Prototypen war es einen Biegeträger aus Holz anhand dieses Systems nachzubauen. Man geht von einem Träger aus Holz aus, der die ungefähren Querschnittsabmessungen von 5/8 cm hat und sich über eine Länge von 2-2,5m spannt.

## Statisches Prinzip des Ersatzträgers:

### **Das statisch System an sich sieht folgendermaßen aus:**

Im schlaffen Zustand ist das System eine Art Kette aus Einzelstäben, die mit Gelenken miteinander verbunden sind. Nur die Bewegung zum Nachbarstab ist immer in einem gewissen Bereich begrenzt. (siehe Abb.)

Wird nun die Vorspannkraft aufgebracht, entsteht ein neues System. Die Gelenke entfallen. Aus einer schlaffen Gliederkette entsteht ein geknickter Träger. (siehe Abb.)

Die statische Wirkung des Systems ist immer ein Biegeträger. Auch wenn eine bestimmte Formgebungen vermuten lässt, es handle sich um eine Bogenwirkung, eine Gewölbewirkung oder ähnliches.

## Materialwahl:

Holz als Ausgangspunkt für die Herstellung eines solchen Bauteils erschien mir sehr sinnvoll. Ähnlich wie schon beim ersten Modell, entschloß ich mich die Einzelelemente aus mehreren lasergecutteten Sperrholzplättchen zusammenzufügen. Somit ergeben sich immer kreuzweise verleimte Bauteile. Diese Variante ist insbesondere für die Abtragung von Querspannungen im Gegensatz zu Vollholz sehr sinnvoll. Als Spannelement bietet sich Stahl in Seilform an, gleich wie im Spannbetonbau.

## Herstellung:

Um die Einzelelemente nun herzustellen, entschloß ich mich die Sperrholzplättchen mit dem Lasercutter zu schneiden und sie dann in insgesamt zwölf Schichten aufzubauen. Dazu erstellte ich eine Lehre um die Schichten möglichst genau aufeinander zu leimen. Ebenso wurden die Radien der Segmente so gewählt, dass der Innenradius etwas geringer als der Außenradius ist. Dadurch sind die Berührungspunkte zum nächsten Element möglichst an den statisch wirksamen Randbereich verlegt. Zusätzlich wurden die Berührungsflächen der Elemente so ausgeführt, dass sie eine leichte Strukturierung aufweisen, um die Reibung zu erhöhen.

Die Elemente bestehen aus jeweils zwölf Schichten Pappelsperrholz mit 4mm Stärke. Die Randbereiche bestehen je aus fünf Schichten voll ausgeführt und zwei innenliegenden Schichten bei denen die Aussparung für die Seilführung enthalten ist. Somit entsteht genug Platz in der Seilführung für ein 6mm Drahtseil. Die Schichten werden nun aufeinander geleimt. Weiters wurde die innenliegende Flanke der Seilführung mit Stahlblechstreifen ausgestattet. Dies erfolgte um die Umlenkkräfte des Spanngliedes später besser in das umliegende Materialgefüge zu übertragen.

Diese Elemente werden jetzt auf ein Drahtseil 6mm aufgefädelt. Für Anfang und Ende der Gliederkette bedarf es natürlich Spezialteile. Einerseits ein Endstück für die Verankerung des Seils. Über dieses wird die Spannkraft aus dem Seil in das erste Glied übertragen. Und andererseits einen Spannmechanismus um die nötige Spannkraft in das System einzuleiten. Diesen Spannmechanismus wurde von einem Maschinenbauunternehmen nach meinen eigenen Plänen anfertigen.

Abb. Spanner, Einzelelement, Kette

## Produktionsprobleme:

Die Genauigkeit der Ausführung der Berührungsflächen ist bei diesem System von höchster Priorität. Durch diese Art der Herstellung schlichen sich laufend Fehler in der Produktion ein. Trotz einer Lehre, die die Einzelschichten genau übereinander platziert, kam es immer wieder zu leichten Verdrehungen über die zwölf Schichten gesehen. Daraus ergeben sich Probleme an den Berührungsflächen der Elemente. Aus den Berührungsflächen wurden nur mehr Berührungspunkte, und das ist zur Übertragung von Reibungskräften nicht dienlich.

# Weitere Erkenntnisse

## Umlenkkräfte:

Durch die Verdrehung der Einzelelemente zueinander entsteht eine Winkeländerung des Spanngliedes jeweils im Drehpunkt. Durch diese Winkeländerung wird die vorhandene Zugkraft im Spannglied so umgeleitet, daß eine Gegenkraft dieser Umlenkung entgegenwirken muss. Betrachtet man nun das Gesamtsystem werden jeweils an den Enden die Vorspannkräfte aufgebracht. Wenn man die Umlenkkräfte der jeweiligen Winkeländerung aufsummiert heben sich diese durch die Vorspannkräfte auf und umgekehrt. Das System ist in sich geschlossen.

Man möge meinen, dass sich das System bei Aufbringung der Vorspannkraft zusammenzieht bzw. sich in eine „günstigere“ Lage bringt. Doch dies ist aufgrund der „straffen“ Seilführung nicht der Fall:

*Zitat aus Skriptum Massivbau TU Berlin:*

*Frei gekrümmte oder gerade Betonstäbe mit einer Exzentrizität  $e$  aus Imperfektionen (Bild 8-11, Bild 8-27) knicken durch zentrisch geführte Vorspannung alleine nicht aus. Die gleichmäßig über den Stabquerschnitt verteilten Druckspannungen ändern wie die Zugkraft im Spannglied ihre Richtung in den Krümmungen. Dabei entstehen Umlenkkräfte  $ub$ , die denjenigen aus Vorspannung  $uv$  genau entgegenwirken (Bowdenzug-Prinzip). Durch die Druckstauchung entsteht lediglich eine proportionale Verkleinerung der Figur. Der Bruch erfolgt aber erst beim Erreichen seiner Material-Druckfestigkeit.<sup>4</sup>*

(siehe Abb.)

### **Bowdenzug - Prinzip:**

*Der Bowdenzug (nach DIN 71986 „Seilzug“) ist ein bewegliches Maschinenelement zur Übertragung einer mechanischen Bewegung bzw. einer (Zug)kraft mittels einer flexibel verlegbaren Kombination aus einem Drahtseil und einer in Verlaufsrichtung stabilen Hülle. Benannt ist der Bowdenzug nach seinem Erfinder, dem Briten Ernest Monnington Bowden (1860-1904).*

### **Aufbau:**

*Moderner Bowdenzugmantel - Stahldrähte, fixiert durch äußere Kunststoffumhüllung, darin eingebettet ein Teflonschlauch als Führung für die Bowdenzugseele. Der Bowdenzug besteht aus einem Stahldraht oder Drahtseil (Bowdenzugseele oder Zugseil), das in einer flexiblen, aber in Zugrichtung druckfesten Hülle verlegt wird. Die Hülle wirkt als mechanische Führung des Zugs und als Gegenlager für die übertragenen Zugkräfte, so dass der Bowdenzug Kräfte auch über Biegungen übertragen kann. Anstelle einer Übertragung von Zugkraft durch das Bowdenzugseil kann man gleichwertig von einer durch die Hülle ausgeübten Druckkraft sprechen. Die Hülle muss dabei einer Längenveränderung (Verkürzung) widerstehen können.<sup>5</sup>*

Dies funktioniert erst ohne „Ausweichen“ des Spanngliedes von der gewünschten Nulllinie indem die Spanngliedlänge in jeder gewünschten Form immer konstant bleibt. (siehe Abb.)

## Spannkraftverluste:

*Durch Reibung des Spannglieds beim Vorspannen nehmen die Spannkraften vom Spannanker weg ab. Außerdem entstehen sogenannte „Spannkraftverluste“ durch die Schwind- und Kriechverkürzungen des Betons, der das Spannglied umgibt und ihm damit dieselbe Verkürzung aufzwingt. Bei hohen Spanngliedspannungen sinkt außerdem die Spanngliedspannung im Laufe der Zeit durch Relaxion um einige Prozent. Durch diese Wirkung geht ein erheblicher Teil der ursprünglichen Vorspannung im Spannstahl verloren. Dies wirkt sich umso stärker aus, je geringer die anfängliche Spannstahlspannung ist - auch ein Grund dafür, daß sich die Vorspannung erst mit der Herstellung hochfester Stähle in der Praxis durchsetzte.<sup>6</sup>*

## Seilreibungsverluste durch Winkeländerung:

Die Winkeländerung des Spanngliedes verursacht nicht nur Umlenkkräfte sondern erzeugt einen Reibungsverlust und führt somit zur Verringerung der Zugkraft im Spannglied. Das Spannglied wird durch die Richtungsänderung gegen das Einzelglied gepresst. Dadurch entsteht bei Aufbringen der Vorspannkraft Reibung zwischen Glied und Spannglied.

Diese Reibungsverluste können mittels der Seilreibungsformel von Euler und Eytelwein bestimmt werden.

Um die Reibungsverluste für dieses System möglichst zu minimieren muss versucht werden dies durch eine geeignete Materialpaarung zu bewerkstelligen.

<sup>4</sup> Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

<sup>5</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Bowdenzug>

<sup>6</sup> Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

## Spaltkräfte:

Um das System statisch wirksam zu machen, ist es notwendig, die auftretenden Druckkräfte an den Randbereichen des Trägers abzuleiten, da diese Randbereiche den Hauptanteil des auftretenden Momentes abtragen. Daraus folgt, die Berührungsflächen der Einzelelemente an den Randbereich zu verlegen. Da die Reibung, wie bereits erwähnt, nicht von der Größe der Berührungsflächen abhängig ist, entsteht daher kein zusätzliches Problem für die Kraftübertragung.

Durch diese Geometrie entsteht aber ein neues Problem. Da sich die Einzelglieder nur in den Randbereichen berühren, und aber die Vorspannkraft in der Mitte der Glieder verläuft, entsteht eine Art Keilwirkung, die die Glieder in der Mittelachse aufspalten möchte. Es kommt zu einer zusätzlichen Momentenbelastung für jedes Einzelglied. Aufgrund der Tatsache, daß ich in diesem Fall Vollholzquerschnitte verwende, stellt dies ein erhebliches Problem dar. Holz ist anisotrop, das heißt, es hat in jeder Richtung andere Festigkeiten. Problem ist der geringe Widerstand des Materials gegen diese Spaltwirkung. Im Fall des Prototypen I, bei dem die Schichten kreuzweise verleimt wurden, stellt dieses Thema keine zusätzlichen Probleme dar, weil in diesem Fall Quersugspannungen gleich gut abgetragen werden können. (siehe Abb.)

## Spanngliedführung:

*Der Verlauf der Spannglieder ist im Betonbau in der Regel zentrisch, exzentrisch, linear oder parabolisch. Die Norm läßt aber auch eine freie Spanngliedführung zu, die vor allem im Hochbau sehr wirtschaftlich angewendet wird. Um eine möglichst effektive Vorspannung zu erreichen, ist es normalerweise üblich, mit den Spanngliedern die Momentenlinie unter Dauerlast auszugleichen.<sup>8</sup>*

In diesem Fall ist aufgrund der Geometrie eine exzentrische Spanngliedführung nicht möglich bzw. wäre aufgrund der unterschiedlichen Lastfälle nicht sinnvoll. Ich gehe davon aus, dass ich die Form ändern kann und sich somit immer eine andere Situation bzw. ein anderer Lastfall ergibt. Daher entsteht beispielsweise einmal Zug an der Unterseite und in einem anderen Fall Zug an der Oberseite.

Die Frage ob die Spanngliedführung linear oder parabelförmig verläuft stellt sich in diesem Fall nicht, denn sie hängt lediglich von der Formgebung des Systems ab.

# Prototyp II

## Grundgedanken:

Bis dato wurde immer nur von Biegeträgern, Statik und Ähnlichem gesprochen. Doch ganz einfache Gedanken über die Funktionalität fehlten mir bisher. Ein allererster Gedanke an die Anwendung war für mich der Möbelbau. Einen Sessel, eine Liege, einen Tisch. Oder am besten gleich alle Funktionen durch ein Element zu bedienen.

Dazu benötige ich Profile die aneinander gefügt das System ergeben. Diese Profile werden auf zwei Spanngliedern aufgefädelt und mit Spannmechanismen versehen. Somit entsteht nun eine Art flexible Matte, die man in eine gewünschte Form bringen kann und durch Anspannen der Spannglieder fixieren kann.

## Materialwahl:

Die Materialwahl fiel in diesem Fall relativ leicht aus. Denn Holz ist und bleibt eines der beliebtesten Materialien für den Möbelbau. Aufgrund des Auswahlkriteriums der Festigkeit entschied ich mich für Esche.

## Herstellung:

Für die Herstellung entschied ich mich für ausgefräbte, quadratische Profile. Dazu wurden aus Eschenbohlen quadratische Profile mit den Abmessungen 40 mal 40mm geschnitten und gehobelt. Um nun die konkaven und konvexen Formen aus den Querschnitten auszufräsen, benötigt man die richtigen Fräbmesser. Diese wurden von einem Maschinenbauunternehmen angefertigt. Nach dem zweimaligen Fräbvorgang waren die Grundprofile fertig. Nächster Schritt waren die Bohrungen in Querrichtung für die Ausparung der Seilführung. Die Bohrung alleine reicht aber nicht aus, um die Bewegung des Seils zu gewährleisten. Der Keil für die Seilführung muß noch ausgefräst werden. Dies funktionierte sehr gut mit einer Tischfräse und einem passenden Gegenstück zu den Elementen. Die Elemente wurden auf den Fräskopf aufgesteckt und nach beiden Seiten um den bestimmten Öffnungswinkel weitergedreht. Somit habe ich nun die gewünschte Form der Seilführung erhalten.

Die Profile wurden nun in die gewünschten Längen geschnitten und mit je zwei Bohrungen für die Seilführungen versehen. Diese Bohrungen wurden zu den gewünschten Kegeln ausgefräst. Um Material und somit Gewicht zu reduzieren, beschloß ich nur jedes zweite Element durchlaufen zu lassen und dazwischen immer ein kurzes Element einzubauen. Dieses sollte so groß sein, dass die auftretenden Druckspannungen kein Problem darstellen und genug Platz für die beiden Spannglieder bieten.

## Weitere Erkenntnisse aus der Herstellung:

### **Reibungserhöhende Maßnahmen:**

Um die Reibung in den Berührungsflächen zu erhöhen, bediente ich mich verschiedener Beschichtungen. Versuche mit unterschiedlichen Beschichtungen von unterschiedlichen Herstellern wurden gemacht. Dafür beschichtete ich kleine Probekörper mit unterschiedlichen Materialien, um dann die Reibung unter Vorspannung zu testen. Dafür wurden dann immer drei Elemente zusammengespannt. Jeweils das Mittlere stellte den Versuchskörper dar. Mit einem Hebelsarm und verschiedenen Gewichten ausgestattet, konnte so ermittelt werden, welche Beschichtungen bei gleicher Normalkraft die besten Reibwerte besitzen.

### **Gewicht:**

Da das Möbelstück aus Vollholzprofilen gebaut ist und keinerlei Hohlkörper oder ähnliches besitzt, wurde dieses Element mit den Abmessungen von ca. 180cm mal 70cm und einer Stärke von 4cm so schwer, daß eine Person nicht mehr in der Lage ist, das Möbelstück zu manipulieren.

# Modifizierung

## Reibungserhöhung durch Änderung der Geometrie:

Um die Reibung an den Berührungsflächen der Elemente zu erhöhen, wurden einerseits verschiedene Beschichtungen ausprobiert, andererseits wurden Überlegungen angestellt, wie man die Reibung noch verbessern könnte. Bis jetzt wurde immer nur von der Reibungserhöhung durch einen besseren Reibwert gesprochen. Doch weitere Überlegungen gehen in die Richtung, dass man durch Änderung der Geometrie eine bessere Kraftübertragung erhält. Dazu werden beispielsweise die Elemente im Querschnitt mit einer Art schrägen Verzinkung versehen. Dadurch kommt es beim Zusammenfügen bzw. beim Zusammenspannen der Elemente zu einer Verzahnung der Einzelelemente untereinander. Dadurch wird nicht nur die Oberfläche größer sondern durch die Keilwirkung wird der Druck auf die Reibungsflächen stark erhöht, was eine bessere Reibung bedeutet. (siehe Abb.)

## Formstabilität durch Verschiebung der Schichten:

Aufgrund dessen, dass das Modell I und der Prototyp I durch Schichten aufgebaut sind, stellt sich die Frage, ob man eine gewisse Verzahnung durch eine leichte Verschiebung von einzelnen Schichten erreichen könnte, um somit eine Aussteifung in Querrichtung erzielen zu können. Diese Art der Stabilisierung wurde später im Modell II angewendet. Dazu im nächsten Punkt mehr.

## Querschnittsanpassung an Momentenlinie:

Wenn ich jetzt von einem Bauteil ausgehe, z.B. ein flexibler Schalungsträger, der bestimmte Abmessungen aufweist und immer für den selben Einsatz bestimmt ist, so bietet sich die Möglichkeit eine Anpassung des Querschnitts des Systems an die zu erwartende Momentenlinie vorzunehmen.

Wenn ich nun nicht mehr gleich große Elemente zusammenfügt werden, sondern verschieden große Elemente so hintereinanderschaltet werden, dass beispielsweise vom Auflager weg die Trägerhöhe zur Mitte hin größer wird und dann zum anderen Auflager hin wieder kleiner, erreiche ich, dass das System bei gleicher Tragfähigkeit weit geringere Eigenlasten mit sich bringt. (siehe Abb.)

# Modell II

## Grundgedanken:

Ich baute erneut ein Anschauungsmodell, um die Funktionsweise und die auftretenden Probleme mit Anderen diskutieren zu können. Ich entschied mich erneut für lasergecuttete Teile, um die Einzelelemente herzustellen. Ziel war es eine Gliederkette mit mindestens einem halben Meter Länge zu fertigen. Diese sollte in ihren Querschnittsabmessungen etwa so groß sein, dass sie leicht zu manipulieren ist.

## Materialwahl:

Aufgrund der Tatsache, dass dies ein Anschauungsmodell wird, und die Teile mit einem Lasercutter geschnitten werden, entschloß ich mich für durchsichtiges Acrylglas. Somit ist gewährleistet, daß die Funktionsweise des Systems aus allen Richtungen klar ersichtlich ist.

## Herstellung:

Wie vorhin erwähnt, wurden nun mit dem Lasercutter die Teile zurechtgeschnitten. Die aussenliegenden Elemente mit einer Schichtstärke von 8mm hergestellt. Dazwischen liegende Teile mit der Aussparung für die Seilbewegung mit einer Schichtdicke von 4mm gefertigt. Um diese später leichter verbinden zu können, wurden an Ober- und Unterseite kleine Nuten vorgesehen. Zusätzlich wurden je Element 2 Bohrungen vorgesehen, um die Schichten genau übereinander zentrieren zu können. Weiters ist wie im vorherigen Punkt angemerkt, eine Verschiebung der Schichten untereinander vorgesehen. Die mittlere Schicht steht im zusammengefügt Zustand leicht über die Aussenschichten. Dadurch erreicht man eine Art Verzahnung, die verhindert, daß das System im schlaffen Zustand auseinander fällt.

Durch die Nuten entstand die Möglichkeit die drei Schichten temporär mit Klammern zusammenzuhalten. Anschließend wurden die Schichten mit Dichlormethan untereinander fest verschweißt.

Die somit erhaltenen Einzelelemente werden jetzt wie gewohnt aufgefädelt und gespannt.

# Dreidimensionales System

## Dreidimensionales Grundsystem

### **Grundgedanken:**

Das System funktioniert nun in seinen Grundzügen. Doch was passiert, wenn das System nun noch mehr Bewegungsfreiheit zulassen soll? Wenn die Bewegung nicht durch eine Ebene begrenzt wird sondern sich in die dritte Dimension erweitert?

### **Form der Glieder**

Das dreidimensionale System bedingt eine Formveränderung der Einzelelemente. Statt den Zylinderflächen, die im Zweidimensionalen System die Berührungsflächen und auch die Bewegungsflächen bilden, werden nun Kugeln mit den dazugehörigen Kugelein-schnitten hintereinandergeschaltet.

Siehe Abb

### **Spanngliedführung:**

Die Spanngliedführung an sich ändert sich nur in der Hinsicht, daß statt einem Keil, der die Bewegung des Seils ermöglicht, nun ein Kegel in das Kugelelement eingeschnitten ist.

Siehe Abb

### **Bewegungsmöglichkeit:**

Im zweidimensionalen System ist der Keil für die Bewegungsfreiheit zum nächsten Glied nur in einem gewissen Bereich über die Querschnittsbreite ausgenommen. Der Keil kann einen relativ großen Winkel aufweisen. Beim 3D System stellt diese geometrische Tatsache ein weiteres Problem dar. Denn nun ist die Berührungsfläche immer proportional zum Kugeldurchmesser und kann nicht durch Verbreiterung des Profils vergrößert werden.

Die Bewegungsfreiheit des dreidimensionalen Systems ist dadurch eingeschränkt, dass sich die Einzelglieder zueinander nur so weit verdrehen können, bis sich die Berührungsfläche und der Bewegungskegel nicht überschneiden. Dies ist im zweidimensionalen System vernachlässigbar. Im Gegensatz zum 2D System ist dieser Öffnungswinkel wesentlich geringer.



## Erweitertes Dreidimensionales System:

### **Grundgedanke:**

Ist es möglich das 3D System in ein Geflecht zu transformieren? Als nächsten Entwicklungsschritt werden nebeneinander liegende 3D Systeme miteinander durch quer dazu liegende Systeme gekoppelt bzw. verbunden. Somit erhalte ich nun statt einzelnen Einfeldträgern einen Trägerrost.

### **Modell III:**

Diese Grundgedanken waren nun der Ausgangspunkt um dies mit einem einfachen Modell zu überprüfen. Dazu wurden Styroporkugeln als Grundmaterial verwendet. Die Kugelausschnitte und die Bewegungskegel wurden aus den Kugeln ausgeschnitten. Einzelne 3D Systeme wurden dann auf Schnüre aufgefädelt und diese in Querrichtung mit weiteren Verbindungselementen zusammengespannt. Geometrisch bedingt ist es jedoch unmöglich diese Verflechtung Mann an Mann zu generieren, weil mindestens eine Reihe zwischen den einzelnen Reihen frei bleiben muss, da sich diese sonst in der Bewegung gegenseitig völlig sperren würden.

Bis dahin war noch nicht klar wie sich dieses Geflecht verhält bzw. verformen lässt. (siehe Abb.)

### **Form der Glieder:**

Die Form der Glieder ist ähnlich zum einfachen 3D System. Lediglich im Bereich der Kreuzungspunkte der einzelnen Gliederketten werden andere Formen benötigt. In diesen Schnittstellen werden Kugeln benötigt die um neunzig Grad verdreht die selben Kugelausschnitte und Bewegungskegel aufweisen. An diesen Kreuzungspunkten sind nun vier Nachbarelemente angeordnet.

### **Statisches System:**

Beim zweidimensionalen System wird von Einfeldträgern ausgegangen. Ordnet man nun diese gekrümmten oder geknickten Einfeldträger in einem Raster so ergibt sich, statisch gesehen, ein Trägerrost.

#### *Definition Trägerrost:*

*Trägerroste sind Tragsysteme aus Trägerscharen, die sich in der Regel rechtwinklig kreuzen und die in diesen Kreuzungspunkten biegesteif miteinander verbunden sind.*

*Es sind hochgradig statisch unbestimmte Tragwerke mit Lastabtragung in zwei Richtungen.*

*Die Lastabtragung eines Trägerrostes geschieht hauptsächlich über Biegung.<sup>9</sup>*

So gesehen ist das erweiterte dreidimensionale System unter Spannung ein gekrümmter bzw. geknickter Trägerrost.

### **Beweglichkeit:**

Die Beweglichkeit dieses erweiterten dreidimensionalen Systems setzt sich einerseits aus den Bewegungskegeln der Einzellemente und andererseits aus den Abhängigkeiten der einzelnen Gliederketten zueinander zusammen. Folglich schränken sich die Gliederketten gegenseitig in der Bewegungsfreiheit ein.

Um weitere Überlegungen anstellen zu können, mußte ich mich mit der Frage auseinandersetzen: Wie findet man heraus wie die Bewegungsmöglichkeiten dieses Systems tatsächlich aussehen? Muß ein Modell dazu gebaut werden oder ist es möglich ein 3d Modell in einem CAD Programm zu erstellen? Wie kann ich ein geeignetes Modell bauen?

Diese Fragen wurden unter anderem mit Kollegen, Programmierern und Mathematikern diskutiert. Der Fragenkatalog wurde länger und länger. Immer neue Probleme und Ungereimtheiten taten sich auf.

Schließlich begann ich mit dem Versuch der 3D Visualisierung. Dabei wurden die bisherigen Erkenntnisse aus dem zweidimensionalen System und aus den Besprechungen mit fachkundigen Personen herangezogen.

### **Ziel der Programmierung:**

Das Endergebnis dieser Untersuchungen sollte folgenderweise aussehen: Ziel war ein Programm zu generieren, daß dieses erweiterte dreidimensionale System auf eine vorgegebene Fläche anwendet und eventuell noch zusätzlich auftretende Fehler anzeigt. Möglichkeiten der Krümmungsrichtungen des Systems werden überprüft.

Versuche in verschiedenen CAD Programmen wurden angestellt, um die komplexen Abhängigkeiten der Einzelketten zueinander zu untersuchen. Schließlich erschien Grasshopper für Rhino als passendes Werkzeug, um dies zu testen.

<sup>9</sup> [http://neu.architekten-bht.de/fileadmin/architektur/content/downloads/LVI\\_trash/Tr%C3%A4gerroste\\_St.pdf](http://neu.architekten-bht.de/fileadmin/architektur/content/downloads/LVI_trash/Tr%C3%A4gerroste_St.pdf)

### Prinzip der Programmierung:

Durch die Geometrie bedingt, ergeben sich gleich dem 2D System Polygone, welche die Seilführung darstellen. Diese Polygone weisen immer die gleichen Strecken zwischen den Winkeländerungen auf. Werden nun diese Polygone kreuzweise zusammengefügt, ergibt sich das erzielte Gitter. Dieses Gitter muss jetzt auf eine Fläche gelegt werden. Somit ist die neue Aufgabe die Kreuzungspunkt dieser Polygone auf dieser Fläche zu finden.

Erste Überlegungen gehen in die Richtung eine Freiformfläche zu generieren und diese in Segmente aufzusplitten. Das heißt eine Fläche wird in einzelne sogenannte Splines unterteilt. Diese Splines sind die einzelnen Gliederketten. Problem dabei ist, dass dabei die Gliederketten nur in einer Richtung exakt bestimmt werden können. Denn in der Querrichtung verschieben sich die Gliederketten zueinander, wenn davon ausgegangen wird, dass die nachzubildende Fläche keine planare Ebene ist. Dazu kommt die Verschiebung der Einzelelemente, da die einzelnen Splines auch nicht die gleiche Form und Krümmung aufweisen.

### Modell IV:

Parallel zu den Programmierarbeiten war nun wichtig für mich ein Modell zu bauen, welches die Bewegungsfreiheit des Systems veranschaulicht.

Die Überlegung war jene Kegel, die jeweils die Bewegungsmöglichkeit eines Gliedes zum Nachbarglied darstellen, in irgendeiner Weise nachzubilden. Dadurch wird die Bewegung zum nächsten Glied begrenzt. Wenn nun die Kegel mit Abstandhalter versehen sind, welche den Abstand der Glieder untereinander darstellt, erhalte ich einen schlanken Zylinder der dann in einem Kegel endet. Die Form des Zylinders entstand deshalb, weil dadurch diese Elemente auf ein Spannglied aufgefädelt werden können.

Siehe Abb

Diese Elemente können nun durch das Spannglied verbunden werden. Somit habe ich nun Gliederketten, die kreuzweise zu einem Geflecht verbunden werden.

### Herstellung:

Die Teile wurden folgendermaßen gefertigt: Aus Acrylglasröhrchen wurden die einzelnen Segmente abgelängt. Um den Kegel zu erzeugen, werden jetzt die Röhrchen auf einer Seite erwärmt und anschließend mittels eines Metallkegels aufgeweitet. Nach der Abkühlung ist dann das Element erstarrt. Die somit entstandenen Teile werden nun auf ein Spannglied aufgefädelt und an den Randbereichen fixiert bzw. leicht gespannt. Diese Spannung ist nötig, damit die Bewegung zwischen den Elementen nicht überschritten werden kann. Diese Gliederketten werden mit den um neunzig Grad verdrehten Gliederketten zu einem Netz zusammengefügt.

Anhand des Modells wurde klar, daß unterschiedliche Fälle in der Bewegungsmöglichkeit entstehen, abhängig davon, in welcher Richtung man die Gliederketten anlegt. Je nach dem wie die Elemente für die einzelnen Gliederketten hintereinander geschaltet werden und wie die Verbindungsglieder quer dazu eingeschnitten sind, ergeben sich unterschiedlichste Bewegungs-Fälle.

Weiters ist dieses bestimmte Geflecht frei gewählt. Wenn aber die einzelnen Reihen und Spalten dieses Geflechtes anders gewählt werden, ergeben sich noch komplexere Abhängigkeiten. Beispielsweise werden die Reihen und Spalten nur an jedem vierten Element angeordnet wird die Verformbarkeit des System verändert.

## Wichtige Erkenntnisse und Vorteile des Systems:

Zusammenfassend die wichtigsten Erkenntnisse aus der Diplomarbeit:

- Das System ist maßstabslos
- Wiederverwendbar und wiederverformbar
- Keine zusätzlichen Momente durch gekrümmte Stabachse bei Vorspannung
- Reibungskraft wird erst bei äußerer Lasteinwirkung aktiv
- Durch Vorspannung wird Gesamtquerschnitt wirksam
- Grundprinzipien können in die dritte Dimension erweitert werden

## Zukünftige Anwendungen:

Die zukünftigen Anwendungsgebiete sind vielfältig. Die Maßstabslosigkeit des Systems macht dieses potenziell für unterschiedliche Forschungsgebiete interessant. Maschinenbau, Medizintechnik und Bautechnik sind hier exemplarische Beispiele dafür.

Bei der Verwendung des Systems sei anzumerken, dass die Stärke nicht in einer statischen, permanenten Form liegt, sondern in seiner Veränderbarkeit und Recyclebarkeit. Dies macht das System beispielsweise in der Baubranche für eine Vielzahl von Nutzungen interessant, sei es für temporäre Tragwerke, Schalungsbau oder Möbelbau. Interessant sind Anwendungen die von der Möglichkeit eines Tragsystems profitieren welches sich rasch in Form bringen, schnell wieder abbauen lässt und anderer Orts wiederverwendet werden kann. Hinzu kommt die Möglichkeit optimierten Lagerung und Transport der Spine. Beispielsweise im Schalungsbau würde man von der systemimmanenten Eigenschaft profitieren.

## Persönliches Fazit:

Die Diplomarbeit befasst sich mit der Evolution und Verfeinerung der 2-dimensionalen Spine und ist nun an einem Punkt angelangt, an dem das System in Bezug auf Material und im Belastungsversuch auf zukünftig mögliche Anwendungen hin geprüft werden muss, bevor dieses schlussendlich für unterschiedliche Einsatzgebiete optimiert werden kann.

## Quellenverzeichnis:

Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

[https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_324/daten/kap\\_2/node44.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_324/daten/kap_2/node44.htm)  
(Zugriff: 08.09.2012)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bowdenzug>  
(Zugriff: 17.11.2013)

[http://neu.architekten-bht.de/fileadmin/architektur/content/downloads/LV/\\_trash/Tr%C3%A4gerroste\\_St.pdf](http://neu.architekten-bht.de/fileadmin/architektur/content/downloads/LV/_trash/Tr%C3%A4gerroste_St.pdf)  
(Zugriff: 6.2.2014)

# Bildverzeichnis:

S.24

## Abbildung Kesselformel und Umlenkkräfte

Umlenkkräfte in gekrümmten Stahlbetonbalken, DI Markus Intichar, VAss DI Martin Ebner, Prof. DI Dr.techn. Lutz Sparowitz, erschienen in Österr. Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, Seite 11-16

S.46

## Abbildung Umlenkkräfte

Vorlesungsskript Konstruktiver Ingenieurbau II, 2. Auflage Juli 2008 Technische Universität Berlin Prof. Dr.sc. techn. Mike Schlaich, DI Achim Bleicher

## Eigenabbildungen/Eigenaufnahmen

S.10:

-Grundsystem schlaff - gespannt

S.12:

Grundsystem Schnitt Varianten

S.14:

Evolution der Gliederform

S.16:

Schnitt Grundsystem Seilführung

S.18:

Seilführung: Länge des Seils bleibt immer gleich lang

S.20:

Modell I Herstellung Detailaufnahme

Modell I Detailaufnahme

S.22:

Modell I Gesamtaufnahme

S.24:

Skizzen Prof. Sparowitz

S.26:

Grundsystem als Einfeldträger

System OHNE Vorspannung: Querschnitt, Spannungsverteilung und Querschnitt Beton

S.28:

System MIT Vorspannung Querschnitt und Spannungsverteilung

Offenes und Geschlossenes System

S.30:

Prinzip Reibung

S.34:

Klaffende Fuge/Risse im Beton

S.36:

Studie Beweglichkeit des Systems

S.37:

Modell I Detailaufnahme

S.38:

Prototyp I Studie  
flexible Gliederkette

geknickter Träger

geknickter Träger unter Belastung

S.40:

Prototyp I Detailaufnahme Herstellung

S.41:

Prototyp I Detailaufnahme Berührungsfläche  
Detailaufnahme Spanner

S.42:

Prototyp I Gesamtaufnahme

S.43:

Prototyp I Detailaufnahmen Einzelelement

S.45:

Prototyp I Gesamtaufnahme TRANSPORT

Prototyp I Detailaufnahme

S.48:

Seilführung MIT und OHNE Verkürzung des Seils

S.50:

Spaltkräfte bzw. Querspannungen

S.54:

Einzelprofil

Detailaufnahme Bewegungskeil

Prototyp II Studie

Schema Fräsung

S.56:

Prototyp II Variante Liege

Prototyp II Variante Sessel

S.57:

Prototyp II Probekörper mit verschiedenen Beschichtungen

S.58:  
Variante Erhöhung der Reibung

S.60:  
Anpassung an Momentenlinie

S.62:  
Modell II Detailaufnahme Bestandteile  
Modell II Detailaufnahme

S.64:  
Modell II Gesamtaufnahme

S.66:  
Dreidimensionales System als Gliederkette aus Kugel

S.68:  
Erweitertes dreidimensionales System: Grundgedanke Schaubild  
Modell III gekrümmt  
Modell III in Ebene

S.70:  
Bewegungsstudie

S.72:  
Programmierungsaufbau

S.74:  
Modell IV Detailaufnahme  
Modell IV Gitterstruktur

S.80:  
Grafik zukünftige Anwendungsgebiete

S.81:  
Grafik Mobilität

S.82:  
Schema mögliche Weiterentwicklungen