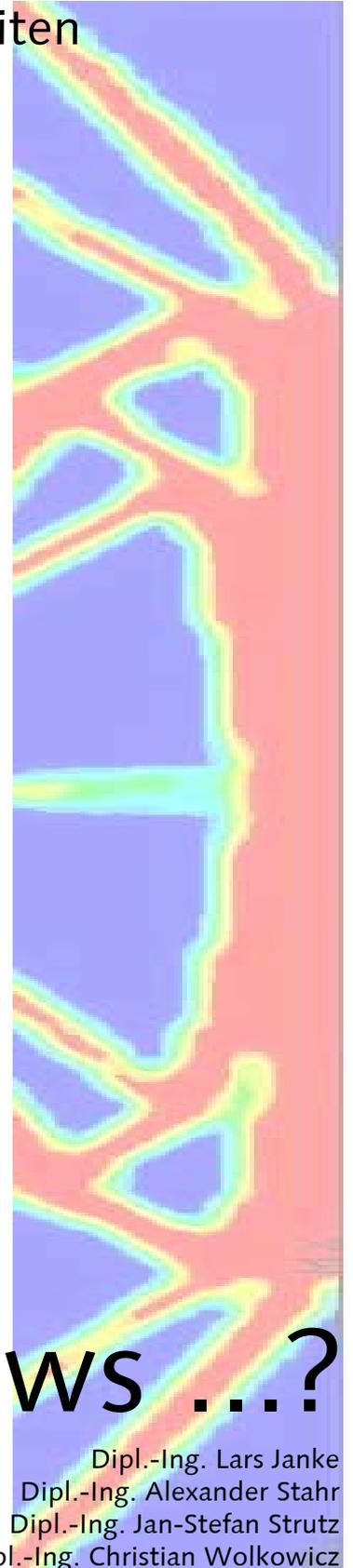


► Dokumentation studentischer Arbeiten



form follows ...?

Dipl.-Ing. Lars Janke
Dipl.-Ing. Alexander Stahr
Dipl.-Ing. Jan-Stefan Strutz
Dipl.-Ing. Christian Wolkowicz

Begrifflich angelehnt an Louis Sullivans „form follows function“-Motiv fand im Sommersemester 2003 im Rahmen eines Seminars

der Fakultät Architektur zum wiederholten Male ein Leichtbaumodellwettbewerb statt.

Im Spannungsfeld zwischen tradierter statischer Berechnung vorgegebener baulicher Konstruktionen („force follows form“), und der Umkehrung dieser Aufgabe, soll heißen der Entwicklung und Optimierung von Strukturen infolge eines vorgegebenen Belastungszustandes („form follows force“), waren die Bearbeiter angehalten die Möglichkeiten des Struktur-, System- und Materialleichtbaus in einem Entwurf umzusetzen und ein Modell der Konstruktion im Maßstab 1:1 zu bauen.

Angelehnt an die Vorgaben des vorangegangenen Wettbewerbs bestand die Aufgabe für die Studenten darin, innerhalb eines vorgegebenen Entwurfsraumes (siehe Aufgabenstellung) eine material- und strukturoptimierte Konstruktion zu entwickeln, welche einer definierten Einwirkung (Einzellast in Trägermitte) im Bruchversuch möglichst lange stand halten sollte. Das maximale Eigengewicht der Konstruktion wurde auf 1000 g limitiert. Als Maßstab für die Bewertung der Tragqualität wurde die von Max Mengerlinghausen definierte Leichtbaukennzahl Z vereinbart. Diese beschreibt das Verhältnis von Gesamtlast und Eigenlast einer Konstruktion und ermöglicht so auf schnelle und unkomplizierte Art und Weise eine Einschätzung der Güte bzw. die Effizienz einer Konstruktion.

Die Studenten, welche in Zweiergruppen arbeiteten, orientierten sich bei Ihren Entwürfen zum einen Teil an den Konstruktionen des Wettbewerbs im vorangegangenen Wintersemester, und versuchten dabei die Schwachpunkte dieser zu eliminieren und eigene positive Akzente zu setzen. Zum anderen Teil wurden eigenständige Ideen entwickelt und in Zusammenarbeit mit den Betreuern verfeinert und realisiert. Bei vielen Entwürfen war eine starke Hinwendung zum Materialleichtbau zu erkennen. So kamen vorwiegend Faserverbund- und Schaumwerkstoffe aller Art, das Leichtmetall Aluminium sowie Stahlseile bzw. -litzen für Einzellelemente aber auch für komplette Konstruktionen zur Anwendung.

Die Ergebnisse und Schädigungsmechanismen im Bruchversuch bestätigten die These, daß bei der Entwicklung und Ausführung leichtbauorientierter Tragsysteme die Präzision in der Umsetzung des Entwurfs, und die Art und Weise bzw. der Typus der verwendeten Fügungen entscheidenden Einfluss auf die zu erwartende Tragqualität haben.

Die im Versuch erzielten Resultate brachten sowohl in der Spitze als auch in der Breite eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zu den Wettbewerbsergebnissen des vorhergehenden Semesters. Das Modell der Sieger des Wettbewerbs, Karsten Schmidt und Ludwig Schuster, hielt bei einem Eigengewicht von 416 Gramm einer Belastung von 6141 Newton stand. Dies entspricht einer Leichtbaukennzahl von 1505!

Die Betreuer und die teilnehmenden StudentInnen bedanken sich bei der Versuchstechnischen Einrichtung der Fakultät Bauingenieurwesen sowie der FOMEKK (Forschungsgruppe für materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen) für die großzügige Unterstützung und Förderung des Seminars.

In dieser Schrift sind die von den Bearbeitergruppen ausgearbeiteten Abstracts zusammengestellt. Die inhaltliche, gestalterische und grammatikalisch-orthografische Verantwortung für die Beiträge liegt allein bei den Bearbeitern. Diese sind in der Kopfzeile des jeweiligen Abschnitts angegeben.

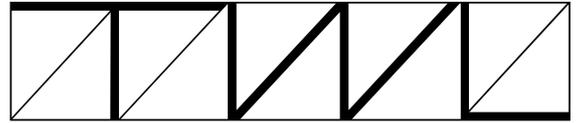
Dipl.-Ing. Alexander Stahr
Professur Tragwerkslehre

Aufgabenstellung

Wettbewerbsergebnisse

Abstracts

Adrian Ewig, Jan-Hendrik Müller	7
Anne Peiker, Elisa Zambonin	9
Martin Duwe, Kai Timmermann	11
Jens Hogeckamp, Clemens Kramer	13
Arne Genz, Anne-Kathrin Siegel	15
Julia Döring, Juliane Holz	17
Karsten Schmidt, Ludwig Schuster	19
Daniela Schwabe, Silke Vetter	21
Stefan Apitz, Sascha Koch	23
Nguyen, Xuan-Giang, Björn Steudte	25
Alexander Gaudlitz, Martin Schriener	27
Susann Kintat, Katharina Panther	29
Urs Bankmann, Christian Thümmeler	32
Carsten Hagendorf, Peter Schüßler	34



► form follows ... ?

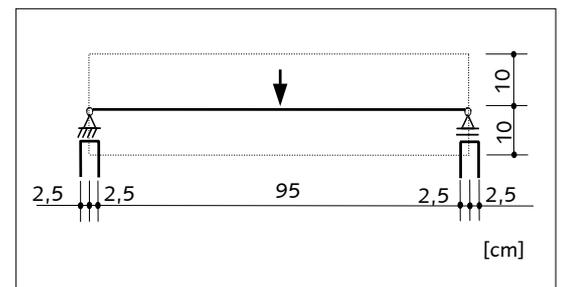
Leichte Konstruktionen bilden die Grundlage für die Überbrückung großer Spannweiten bzw. für die Errichtung hoher Bauwerke. Sie zeichnen sich aus durch die Sparsamkeit der verwendeten Mittel und die Sorgfalt der Verarbeitung. Die Formen solcher Tragwerke sind zumeist keine Zufallsprodukte. Sie sind das Ergebnis von Auswahl- bzw. Optimierungsprozessen und nutzen das Potenzial von System- und Baustoffparametern hochgradig aus.

Aufgabe

Entwickeln Sie, entsprechend den nachfolgenden Vorgaben, eine material- und strukturoptimierte Konstruktion. Nutzen Sie dabei konsequent die sich bietenden Möglichkeiten der Verwendung unterschiedlicher Tragsysteme, Querschnittsprofile und Baustoffe. Das Ziel ist der Entwurf und die Herstellung einer leichten, hochtragfähigen und möglichst verformungsarmen Konstruktion.

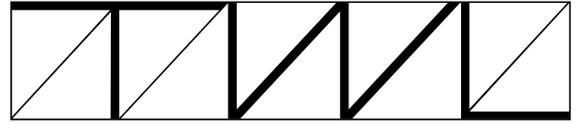
Vorgaben

- Bearbeitung in Gruppen zu je zwei Studenten
- max. Eigengewicht des Modells: 1000 g
- Modellmaterial(ien): frei wählbar
- Geometrie, Belastung und Auflagersituation: siehe Skizze
- Modellbreite: maximal 10 cm



Geforderte Leistungen

- Herstellung eines 1:1 – Modells für den Belastungsversuch
- Anfertigung einer Dokumentation zur Arbeit
 - Abgabe in gedruckter und in digitalisierter Form
 - Druck-Version: max. 8 Blatt, DIN A4, Klemmschiene (keine Ringbindung!)
 - Digital-Version: Abgabe auf CD
Acrobat-Datei (doku_name1_name2.pdf)
Abbildungen (pic1.jpg, pic2.jpg, etc.), Dateigröße ca. 400 kB
Datei (picinfo.txt) mit Beschreibung der Abbildungen
- Anfertigung eines Abstracts (2 Blatt DIN A4) zur Erstellung eines Semesterreaders
 - Abgabe in gedruckter und in digitalisierter Form
 - Druck-Version: 2 Blatt, DIN A4, hochkant, Dokumentvorlage wird gestellt!
 - Digital-Version: Word-Datei (abstract_name1_name2.doc)
Acrobat-Datei (abstract_name1_name2.pdf)
Abbildungen (pic1.jpg, pic2.jpg, etc.), Dateigröße ca. 400 kB
Datei (picinfo.txt) mit Beschreibung der Abbildungen
- Anfertigung und Abgabe eines Posters in gedruckter und in digitalisierter Form
 - Druck-Version: DIN A0, hochkant, TWL-Kopfzeile wird gestellt!
 - Digital-Version: Acrobat-Datei (poster_name1_name2.pdf)



Inhalt der Dokumentation

- Darstellung der Idee, der Umsetzung und Verfeinerung des Entwurfs
- Angaben zum verwendeten Material, einschließlich Materialparameter
- qualitative (verbale und zeichnerische) Beschreibung der Beanspruchung(en) der einzelnen Bauteile und Verbindungen
- Abschätzung der Bruchlast
- Beschreibung des Bruchvorganges und der Versagensursache
- Last-Verformungsdiagramm
- Diskussion des Versuchsergebnisses
- Anlage: Zeichnungen (Ansicht, Draufsicht, Schnitt(e), vollständig vermaßt, M 1 : 3.3)

Bewertung

- Leichtbaukennzahl
- Ideengehalt
- Maßhaltigkeit
- Ausführung (Details, Material)
- Dokumentation (Inhalt, Form)
- Poster

Konsultationen

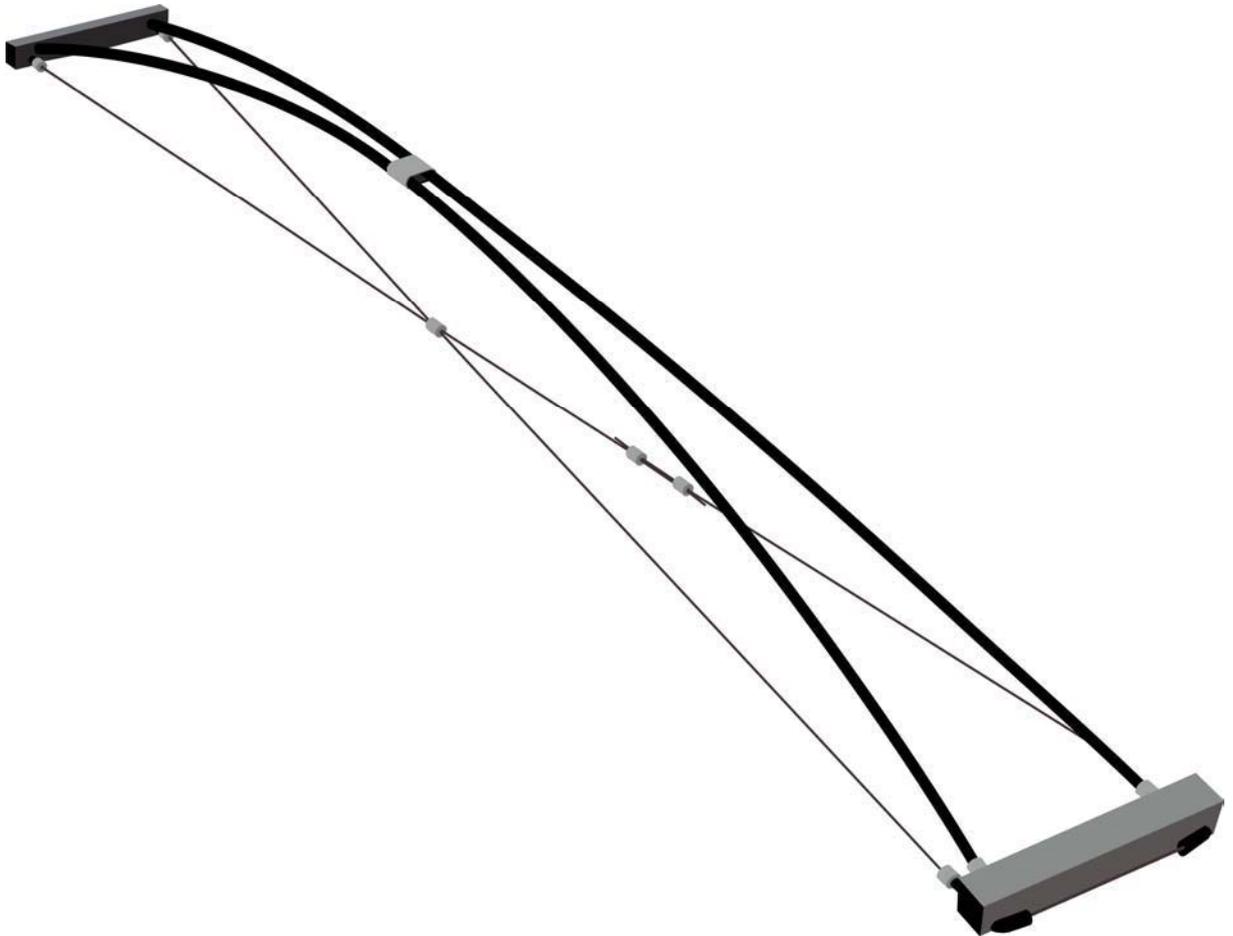
- nach Vereinbarung

Termine

- | | |
|-------------|--|
| 07.04.2003 | Auftaktveranstaltung
9.15 Uhr, Raum 108, Hauptgebäude |
| 06.06.2003 | Abgabe des Modells und der Dokumentation (Teil 1)
9.00-11.30 Uhr, Versuchstechnische Einrichtung,
Marienstraße 7, Kellergeschoss, Versuchshalle , Herr Dabbert |
| 24. KW 2003 | Bruchversuch am Modell |
| 20.06.2003 | Abgabe der Dokumentation (Teil 2) und Digital-Version
9.30 – 11.30 Uhr, Professur TWL, Raum 3/4 |

	BearbeiterInnen	Eigengewicht (g)	Bruchlast (N)	Leichtbaukennzahl Z_L
1.	Karsten Schmidt Ludwig Schuster	416	6141,2	1505
2.	Arne Genz Anne-Kathrin Siegel	561	3623,7	658
3.	Carsten Hagedorf Peter Schüßler	975	5934,7	620
4.	Stefan Apitz Sascha Koch	996	5399,6	553
5.	Jens Hoge Kamp Clemens Kramer	222	1077,7	495
6.	Nguyen, Xuan-Giang Björn Steudte	986	3802,6	393
7.	Susann Kintat Katharina Panther	936	2860,3	312
8.	Julia Döring Juliane Holz	684	1719,9	256
9.	Urs Bankmann Christian Thümmler	712	1734,9	248
10.	Alexander Gaudlitz Martin Schriener	945	2247,5	242
11.	Anne Peiker Elisa Zambonin	269	520,1	197
12.	Daniela Schwabe Silke Vetter	750	669,7	91
13.	Adrian Ewig Jan-Hendrik Müller	126	90,3	73
14.	Martin Duwe Kai Timmermann	863	355,3	42

einszwosechs



Aufgabe

Das Ziel der Aufgabe war es, einen leichten, tragfähigen und zugleich verformungsarmen Träger zu entwickeln und in einem Modell 1:1 umzusetzen. Bei freier Materialwahl waren Geometrie, Belastung und Auflagersituation vorgegeben und das Gewicht des Trägers durfte 1000 g nicht überschreiten. Ausgehend von der Aufgabenstellung, die zum einen eine Gewichtsgrenze vorgab und zum anderen eine möglichst hohe Leichtbaukennzahl, entschieden wir uns für den Weg, die Eigenlast bis auf ein Minimum zu reduzieren.

Philosophie

Der Name des Trägers symbolisiert seine Stärke: das geringe Eigengewicht. Durch die ausgewogene Wahl der Bestandteile minimierten wir das Eigengewicht auf 126 g. Dabei war es hilfreich, auf bestehende

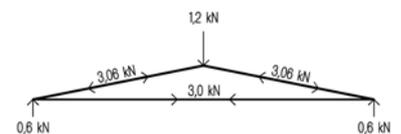
Materialquerschnitte und -profile zurückzugreifen, um ein größtmögliches Maß der Berechenbarkeit zu gewähren.



System

Der Träger besteht aus zwei epoxidharzbeschichteten kohlefaserverstärkten Kunststoffstäben. Diese werden durch eine einfache Steckverbindung mit den Fußpunkten verbunden. Die Fußpunkte sind über ein gekreuztes Stahlseil verbunden, das dem Kräfteverlauf in den Biegedruckstäben folgt und den Träger gleichzeitig vorspannt. Mit Hilfe einer vereinfachten Darstellung des Trägers kann man die zu erwartende Zugkraft im Seil ermitteln. Die angenommene Kraft stellt einen Beispielwert dar. Da der

Kohlefaserstab auch Biegemomente aufnehmen kann, wird die tatsächliche Kraft in den Seilen vermutlich geringer sein. Die Darstellung ist zweidimensional, d.h. Zug- und Druckkräfte verteilen sich im Träger jeweils auf zwei Bauteile – sie halbieren sich.

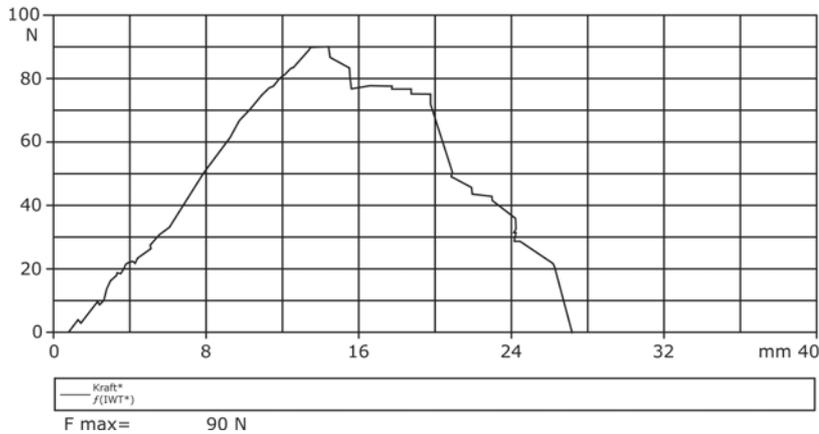


Optimierung

Die Tabelle zeigt die Entwicklung des Eigengewichtes des Trägers im Zuge der Optimierung.

Bauteil	Träger 1 (Holz/Alu)	Träger 2 (Carbon/o)	Träger 3 (Carbon/::)
Druckstäbe	92 g	66 g	67 g
Auflager	24 g	24 g	25 g
Zugseil	32 g	11 g	13 g
Zugseilverbinder	36 g	6 g	-
Fußhülsen/Druckstäbe	-	-	4 g
Zugseilhülsen	-	-	8 g
Muffen	-	4 g	9 g
Summe	184 g	111 g	126 g

Kraft - Durchbiegung



Bruchversuch

Es stellte sich auf dem Prüfstand heraus, dass das Problem der runden Auflager an diesem Träger nicht genug Beachtung fand. Infolgedessen war schon die erste Positionierung problematisch, da die Fußpunkte ungenau aufsetzten. Als der Träger belastet wurde, zeigte sich bald das Resultat der genannten Ungenauigkeit. Die Fußpunkte rutschten ab einer Belastung von 90 N langsam aber stetig von den runden Auflagern ab. Das bedeutete leider schon sehr früh das Ende unseres Bruchversuches, ohne dass es überhaupt zum Bruch kam.

Am Diagramm ist ablesbar, dass sich die Durchbiegung fast proportional zur eingeleiteten Kraft verhielt. Pro eingeleitete 10 N gab das System um ca. 1,5 mm nach. Bei 90 N fing das System an zu kippen. Das Ergebnis des Versuches kann uns nicht zufrieden stellen.

Das Eigengewicht unseres Trägers „einswosechs“ wurde von uns auf ein Minimum reduziert. Wir multiplizierten jedes zusätzliche Gramm mit dem Faktor 1000, um abzuwägen, ob der Mehraufwand an

Gewicht gerechtfertigt ist. So minimierten wir in mehreren Schritten das Eigengewicht. Diese „Gramm“-Überlegungen wirken im Nachhinein absurd bei einer maximalen Kraft von 90 N.

Die Minimierung des Gewichtes hatte natürlich zur Folge, dass z.B. die Aussteifung oder andere Details entsprechend spartanisch ausfielen, alles jedoch abgewogen und wohlbedacht.

Ein Fixieren des Zugseils stellte sich schnell als unbedingt erforderlich heraus. Gleichzeitig wirkte das auch den enormen Torsionskräften entgegen, die durch das Zusammenschnüren des Trägers am

Scheitelpunkt der Stäbe im System stecken.

Diese Torsionskräfte stellten sich in Folge für uns als besonders problematisch heraus, als wir die Verbindung von Biegedruckstäben und Fußpunkt bearbeiteten. Die Kräfte zeigten sich in diesem Punkt als kaum zähmbar, was man dann am Ende an der leicht verschrobenen Fußstellung ablesen konnte. Hier wirken die Biegedruckstäbe unterschiedlich lang. Diese sind jedoch auf den Teil eines Millimeters gleichlang. Diese Schiefstellung ist auf die Verdrehung der Konstruktion im Bereich der Fußpunkte zurückzuführen.

Auf die Auflagersituation reagierten wir insofern, dass wir relativ spät von einem runden Aluminiumprofil auf ein Vierkantprofil umstiegen. In diesem Punkt lag dann auch die größte Schwachstelle. Wir sind einfach nicht gut genug auf die vorhandene Auflagersituation eingegangen. Auch hier spielte natürlich das Eigengewicht eine große Rolle, so groß, dass manchmal, wie an anderen Stellen, wirklich wichtige Aspekte regelrecht „weggewogen“ wurden.



Ziel ist es, ein Tragwerk zu entwerfen, welches den Anforderungen einer Punktlast gerecht wird, wobei ein Minimum an Eigengewicht erreicht werden soll. Das Verhältnis von Tragfähigkeit/Eigengewicht soll optimiert werden.

Große Ziele kleines Tragwerk.

Der Ansatz unserer Überlegung liegt in der statischen Notwendigkeit.

Statisch notwendig sind drei Auflagerpunkte, um einen Körper stabil lagern zu können.

Kraft = Gegenkraft

Gesamtkonstruktion ist nur so stark wie ihr schwächster Punkt.

Produkt unserer Überlegung ist ein Tragwerk aus 4 Stäben und einem Zugseil, die ein Raumtragwerk bilden. Das Tragwerk wird durch ein einseitig, aus 4 unverschieblichen Dreiecken konstruiertes Raumtragwerk gegen Kippen gesichert. So ist es möglich, einen Stab und damit verbundenes Auflager an Gewicht einzusparen. Die Beanspruchung der Stäbe zieht eine differenziertere Dimensionierung nach sich. Minimierung auf das statisch Notwendige.

Die Stäbe sind kohlefaserverstärkte Kunststoffrohre, unterspannt von einem Bautenzug. Die Verbindungen sind aus glasfaserverstärktem Epoxidharz realisiert.

Der Einzelstab besitzt eine dickere Wandstärke als die zwei Stäbe, da diese sich die abzuleitende Kraft teilen. Dieses wirkt sich auch positiv auf den Modellbau aus, da so der obere Knoten, in den die Last eingetragen wird, sauberer zu konstruieren ist, indem alle die Stäbe auf Gärung aufeinanderstoßen. Die drei Hauptdruckstäbe stoßen mit senkrechter Gärung aufeinander. Der kurze senkrechte Druckstab besitzt einen angepassten Stoß und lagert unter den langen Druckstäben.

Der Werkstoff GVK besitzt die für unser Tragwerk nötigen Eigenschaften und ist weitestgehend homogen in seiner Belastbarkeit, Kräfte können umgeleitet und die Zusammensetzung der Beanspruchung angepasst werden. So ist es möglich, die Last stets auf dem gesamten Querschnitt der Rohre einzutragen. Die Knoten sind nahezu steif und erlauben so eine ganz geringe Vorspannung des gesamten Tragwerks, ohne die vorgegebene Geometrie zu verlassen. Dies wirkt auf zweierlei Weise auf das System, zum einen positiv, indem das System weiter ausgesteift und somit die Gefahr des Kippens verringert wird und zum anderen negativ, da die Knoten nun nicht mehr gelenkig sind und somit in den Stäben Biegemomente auftreten, die zum Versagen der Stäbe in Form von Ausknicken führen könnten.

Die Auflager sind so konstruiert, dass ohne Belastung die Knotenpunkte von Druckstab und Zugseil sich innerhalb der Auflager befinden. Bei Lasteintrag wird sich das Tragwerk verformen und die Auflager leicht nach außen drücken, so gelangt der Knotenpunkt des Kraftflusses bei zunehmender Belastung immer näher an die optimale Position, was sich voraussichtlich positiv auf die Tragfähigkeit auswirken wird, da das System eine optimale Position erst bei starker Belastung erreichen wird, anstatt sich vom Optimum zu entfernen. Einem Einknicken des Gelenkes bei geringer Belastung wird mit einer recht massiven Ausbildung des Knotens begegnet.

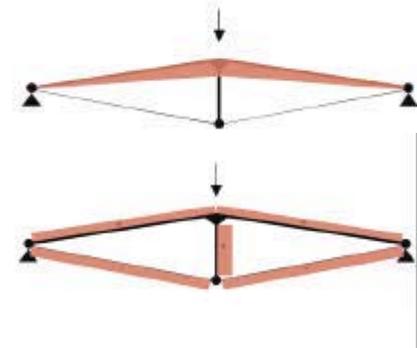
Das Zugseil ist mit einem Bautenzug aus dem Fahrradbedarf realisiert, da dieser unter Belastung eine geringe Dehnung erfährt. Um ein Vorbeirutschen des doppelt geführten Seiles an dem mittleren Druckstab zu verhindern, wurde dieser Knoten ebenfalls vergossen und eine Halterung aus Metall mit eingefügt.

Wir nehmen eine zu erwartende Belastbarkeit von ca. 100 kg an bei einem Eigengewicht von 269 g. Die zu erwartenden Bruchstellen befinden sich am Einzelstab an einer beim Modellbau entstandenen Schwachstelle, wenn der Bruch durch Ausknicken der Stäbe eintreten sollte. Hält diese Stelle, so ist ein Bruch an der Austrittsstelle der Stäbe aus den Knotenpunkten zu vermuten.

Die Summe der Notwendigkeiten wird im Bruch mindestens eine Ergänzung finden.



ASTA DANZANZE



Der Testverlauf:

Nachdem am Prüfstand eine Ungenauigkeit der Geometrie festgestellt wurde, die aber toleriert wurde, wurde der Träger einer Belastung ausgesetzt. Der Träger gelangte zunächst schnell in eine stabile Position. Es kam zu einer erwarteten Verformung, indem die Stäbe die Auflager nach außen drückten.

Bei einer Belastung von 300 N begannen zunächst die zwei Einzelstäbe sich nach außen zu biegen. Das Tragwerk verformte sich bei weiterem Lasteintrag stark in verschiedener Weise, wie in den unten gezeigten Fotos zu sehen ist. Bei weiterer Belastung führte es zu keiner höheren Gegenkraft des Tragwerks mehr, er gab nach und entzog sich der Belastung, indem er den Prüfstand, nachdem sich die Zwillingsstäbe stark nach unten bogen und der Träger zwischen den Auflagern durchrutschte. Bei den Verformungen handelt es sich um reine elastische Verformungen.

Fazit:

Der unzerstörte Träger stellte uns vor die Frage, was wir falsch gemacht hatten, denn die Tragfähigkeit unseres Trägers und seine unschöne Variante, sich der Last zu entziehen, stellte uns nicht zufrieden. Der Träger war unter Belastung nicht stabil und seine Verformung, die aus den auftretenden Biegemomenten entstand, führte zu einem „Tanz der Stäbe“, bis das Tragwerk aus dem Prüfstand sprang und unzerbrochen vor uns lag. Mögliche Gründe für sein Versagen:

Asymmetrien im Auflager oder im Lasteintragungspunkt

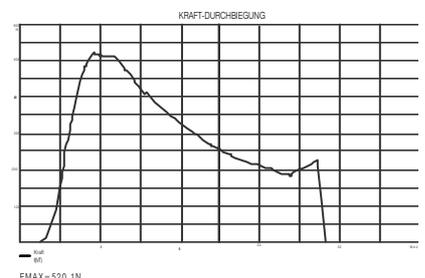
zu geringe Biegesteifigkeit der CFK-Rohre, resultierend aus zu geringen Durchmessern der Einzelstäbe.

ungleiche Biegefestigkeiten von Einzelstab und Stabpaar, führte zu starken Asymmetrien

in der Verformung, die zum Tanzen beitrugen, da das Tragwerk einseitig nachgab, die Zwillingsstäbe waren zu schwach.

**Mögliche Verbesserungen:**

- Die Verbindungen aus GFK könnten gelenkig ausgebildet werden, indem eine Steckverbindung realisiert werden könnte, dieses würde zu reinen Normalkräften in den Stäben führen, die wir am Anfang unserer Überlegung als ideal für die gewählte Konstruktion und das gewählte Material beurteilten.
- Größere und genauere Dimensionierung der Stäbe. Einzelstab und Zwillingsstäbe müssen gleiche Kennwerte besitzen.



1. BLAUER HENGST

1.1. Idee und Umsetzung



1.1.1. Idee

Als Vorbild diente der X-Chromosomen-förmige Träger des Vorjahres.

In ihm wirken idealer Weise nur Normalkräfte als Zug- und Druckkräfte.

Die Durchbiegung des Trägers soll auf ein Minimum reduziert werden.

Die gute Relation von geringem Eigengewicht zu hoher Druckfestigkeit des Werkstoffes Styrodur sollte ausgenutzt werden. Styrodur ist leicht verfügbar und einfach zu verarbeiten.

Die vertikale, mittig eingebrachte Punktlast wird als Druckkraft von einem vertikalen Druckstab in einen Zuggurt übertragen, der um einen horizontalen Druckstab läuft und

Druckkraft in diesen einbringt.

Aus Gründen der Materialhomogenität des Trägers und der Gewichtsersparnis wird das Stahlseil durch einen Kunststoffgurt ersetzt.

Dieser ist ein Umlaufgurt um eine asymmetrische Druckbelastung des Syrodurbalkens zu vermeiden.

Für einen Belastungstest werden Ober- und Unterseite der Trägerenden mit einer 2 mm dicken Plexiglasfolie umwickelt und oben und unten mit Schrauben verbunden, so dass eine Steg-Flansch-Wirkung erzielt wird. Die Biegung in den Enden soll dadurch reduziert werden.

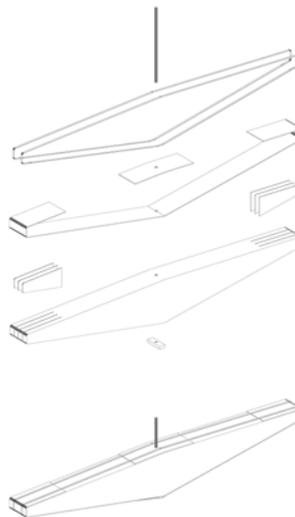
Beobachtung des Bruchtests mit dem Wagenheber:

Problem 1: der Spanngurt aus Nylon hat eine Dehnung von 7 %. Die Vorspannung reicht nicht aus, der Wagenheber drückt den Träger in der Mitte durch.

Problem 2: die Trägerenden biegen sich stark nach oben respektive unten.

Resümee: die Trägerenden werden mit jeweils drei 2,5 mm starken Flugzeugsperrholz-Schwertern verstärkt, die auf der Ober- und Unterseite kraftschlüssig mit dem sie ummantelnden Glasfaser/Epoxiharzlaminat verbunden sind. Die Unterseite des Trägers wird zugverstärkt, indem eine Lage Glasfaser/Epoxiharzlaminat aufgetragen wird.

2. Materialparameter



POS 1 Syrodurbalken

Dow Chemicals Styrofoam Roofmate SL-A Extrudierter Polystyrol Hartschaum

Gewicht Bauteil inkl. GFK Laminat: 565,0 g
Wärmedämmung nach DIN 18164
Wärmeleitfähigkeit
Nennwert: 0,036 W/mk
Baustoffklasse: DIN 4102 - B1
Dichte: 0,004 KN/ m2 pro cm Dicke

POS 2 Druckstab Aluminiumrohr

Vaude Zeltstange
Gewicht Bauteil: 12,0 g
Durchmesser: 11 mm

Innenradius: 4,5 mm
Wandungsstärke: 1 mm
Dichte: 27 KN/ m3
e-modul: 70.000 mpa
Druckfestigkeit:
Knicksteifigkeit:

POS 3 Umreifungsstahlband

Breite: 16 mm
Zugfestigkeit: 350 N/ mm2
Dichte: 78,5 KN/ m3

POS 4 Glasfasermatten im Verbund mit Epoxidharz

POS 5 Flugzeugsperrholz-Schwerter

Dicke: 2,5 mm
Druckfestigkeit parallel zur Faser: 24 N/mm2
Rohdichte: 4,5 KN/ m3

POS 6 Aluminium-Druckplatte

Gewicht Bauteil: 17,5 g
Dichte: 27 KN/ m3

3. Beschreibung der Beanspruchung

Die Belastung der einzelnen Bauteile:

Das Ziel war es einen Übergang von dem harten Material des Druckstabes hin zum weichen Material Styrodur zu finden.

3.1 Die Bauteile

Das Aluminiumrohr: Es handelt sich um eine Zeltstange der Marke Vaude, die aus gezogenem Aluminium hergestellt wurde. Es zeichnet sich durch hohe Druckfestigkeit und geringes Gewicht aus. Es ist davon auszugehen, dass die renommierte Marke Vaude Aluminium mit hoher Biegefestigkeit verwendet, da diese Stange für ein Igluzelt bestimmt ist.

Der Aluminiumblock: ein Stück massives Aluminium, das der Druckverteilung auf die beiden Spanngurte dient.

Die Stahlspanngurte: zwei sechzehn millimeter breite Stahlspanngurte die mit einer Verpackungsmaschine gespannt und vernietet werden. Der vorteil liegt in ihrer geringen dehnbarkeit, bei hohem Gewicht verglichen mit einem Nylongurt.

Die Glasfasern: Die Glasfasern, schichtweise mit Epoxiharz aufgetragen (3-fach)

wurden vom fomekk-Studio bereitgestellt. Sie dienen als Druckverteiler an den Enden, als Flansch auf Ober- und Unterseite, und als Zuggurt auf der Unterseite. Die Flanschwirkung entsteht durch die kraftschlüssige Klebeverbindung der Glasmatten mit den Flugzeugsperrholzschertern. Die hohe Zugfestigkeit verhindert die Durchbiegung des Trägers in dem sie ihn auf der Zugbeanspruchten Seite verstärkt.

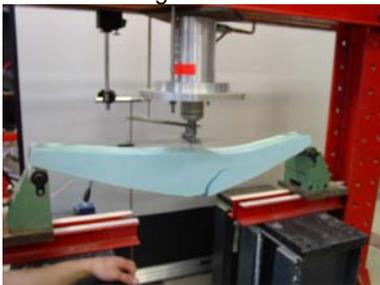
Das Flugzeugsperrholz: Vertikal verwendet hat es bei seinen 2mm Stärke eine hohe Biegefestigkeit, dadurch kann in Verbindung mit den Glasfasermatten eine verbesserte Biegefestigkeit an den Trägerenden erzielt werden.

Das Sperrholz: Es ist flächig mit dem Styrodur verklebt. Die über die Riemen zuerst in die Scherter eingeleiteten Kräfte können so flächig in das Styrodur eingeleitet werden.

Das Styrodur: Es ist leicht und im Verhältnis zu seinem Eigengewicht druckfest. Das Problem ist aufgrund der Weichheit des Materials die Druckeinleitung

4. Der Bruchversuch

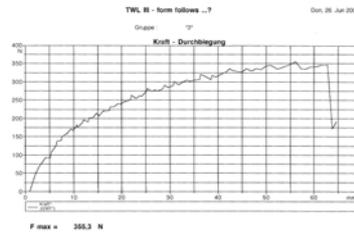
4.1 Beschreibung des Vorganges und der Versagensursache:



Der Druck wird durch den Kolben der Versuchsmaschine den Vertikalen Druckstab eingeleitet. Die Aluplatte beginnt sich unter diesem Druck zu senken, und die Stahlbänder komprimieren den Träger und dieser beginnt sich bei steigender Belastung in der Mitte nach unten zu biegen.

Diese Biegung wird deutlich, bis ein vertikaler Riss auf der Unterseite des Trägers diesen bei 355,3 Newton (peinlich peinlich) versagen lässt.

4.2 Last-Verformungsdiagramm



4.3 Diskussion des Versuchsergebnisses:

Die Verformungskurve:

Die Zacken im Diagramm sind auf reibungsbedingtes Nachrutschen der Metallbänder auf dem Laminat zurückzuführen.

Die kontinuierliche Kurve weist auf eine kontinuierliche Steigerung der Verformung, Durchbiegung in der Trägermitte, hin, was sich auch im Versuch beobachten liess.

4.3.1 Styrodur als Druckstab

Entgegen unserer Annahme hat Styrodur, nicht im Verbund, eine geringe Knicksteifigkeit.

Die Trägerform war richtig ausgebildet, da der Riss am Punkt der grösstzulässigen Materialdicke entstanden ist, dort wo wir das grösste Biegemoment erwartet hatten.

Die Trägergeometrie: es war kein Rohrquerschnitt, sondern ein massiver Querschnitt. Man hätte einen Rohreffekt erzielen können in dem man den Styrodurbalken allseitig mit Glasfaser-Epoxid-Laminat ummantelt. Ein dünnwandiges Hohlprofil mit massiver druckaufnehmender Füllung wäre so entstanden, mit einer höheren Knicksteifigkeit.

Das Schiefstellen der Aluplatte ist darauf zurückzuführen, dass das Rohr ungenügend tief in der Platte versenkt war.

In der Auflager-Position zeigten sich fast keine Verformungen.

Resümee:

Während die Detailpunkte hielten, war der Schwachpunkt das Styrodur, die Materialfestigkeiten waren somit ungenau aufeinander abgestimmt.

1. Theorie...

1.1. Konzept

Die Stichworte der Aufgabenstellung sind leicht, hochtragfähig und verformungsarm.

Für uns beinhaltet diese Reihenfolge gleichzeitig unsere Herangehensweise: Unser Träger soll vor allem leicht sein und wesentlich weniger als die zulässigen 1000g wiegen. Durch den Gewichtsvorteil erhoffen wir uns einen Ausgleich der eventuell geringeren Tragfähigkeit.

Um ein geringes Gewicht zu erreichen, verwenden wir zum einen leichte Materialien, zum anderen eine Konstruktion, die aus wenigen klein dimensionierten Einzelteilen besteht.

1.2. Konstruktion

unterspannte Druckstäbe

Diese Konstruktion führt die Auflast auf dem kürzesten Weg zu den Auflagern.

In der oberen Hälfte der Konstruktion gibt es links und rechts je mindestens einen geneigten Druckstab. Ein senkrechter Druckstab in der Mitte gehört zur Unterspannung.

Aus der gegebenen Geometrie entwickeln wir zunächst ein ebenes Tragwerk aus zwei geneigten unterspannten Trägern, daraus quasi in paralleler Addition eine Konstruktion aus vier geneigten Druckstäben, die mit einem doppelt geführten Seil unterspannt sind.

Festlegungen:

Das Tragsystem ist um zwei Achsen symmetrisch.

Die Seile verlaufen genau unter den Stäben.

Stab- und Seilachse schneiden sich genau senkrecht über dem Auflager.

1.3. Material

Für die Stäbe wählen wir CFK-Rohre 8/6mm mit einer GFK-Rohr-Verstärkung 8/10mm in der Mitte, die bei einer Knicklänge von 50cm laut Herstellerangabe ca. 4KN standhalten.

Für die Unterspannung wählen wir ein Drahtseil 1mm.

Die Verbindungen fertigen wir von Hand aus Aluminium.

1.4. Kennwerte

Aus der Geometrie unseres Tragsystems lassen sich folgende Werte mit dem Ritterschnittverfahren berechnen:

senkrechte Last durch Druck-Stempel:

$$P$$

Vier Auflagerreaktionen:

$$A_1=A_2=B_1=B_2=0,25*P$$

Stabkräfte (geneigt):

$$D_1=D_2=D_3=D_4=-0,653125*P$$

Seilkräfte:

$$Z_1=Z_2=Z_3=Z_4=0,653125*P$$

Druckstab (vertikal):

$$V_1=-1,039872*P$$

Gesamtgewicht:

$$\text{ca. } 225 \text{ g}$$

geschätzte Bruchlast:

$$200 \text{ Kg}$$



Abb. 1: oberes Formstück



Abb. 2: Auflager

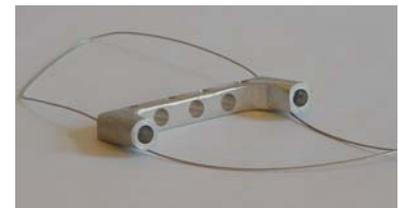


Abb. 3 Auflager



Abb. 4: Träger Schrägansicht



Abb. 5: Träger Ansicht

2. ... und Praxis

Bruchversuch 26.06.2003

gemessenes Gewicht: 222 g
 max F: 1077,7 N
 max f: 17,1 mm
 Leichtbaukennzahl: 485

Aufbau:

Da der Träger nur gesteckte Druck-Verbindungen besitzt, ist beim Aufbau auf eine exakte geometrische Ausrichtung zu achten. Verformungen aufgrund einer Asymmetrie sollen vermieden werden.

Die Schwachstelle vermuten wir entweder in den Seilverbindungen oder darin, dass die herstellungsbedingten Ungenauigkeiten der Verbindungen zu einer Verdrehung des vertikalen Druckstabs führen.

Unter Belastung zeigt der Träger zunächst eine gleichmäßige Verformung. Bei etwa 500 N ist allerdings schon eine leichte Drehung des vertikalen Druckstabs nach vorne erkennbar.

An der im Bild hinteren Seilstrecke befinden sich die Seilverbindungen, die offensichtlich die Schwachstelle bilden: Das Seil zieht sich aus den Verbindungen heraus, wird schlicht länger, das Tragsystem verformt sich entsprechend. Allerdings verhindert die Reibung des Seils in den Alu-Auflagern, dass die Verlängerung des Seils sich auf beide Seilwege auswirkt: Es wird nur auf einer Seite länger. Diese Asymmetrie bewirkt das Verdrehen des vertikalen Druckstabs, es entsteht ein Verdrehungsmoment, das den Träger aus dem Versuchsaufbau herausdreht.

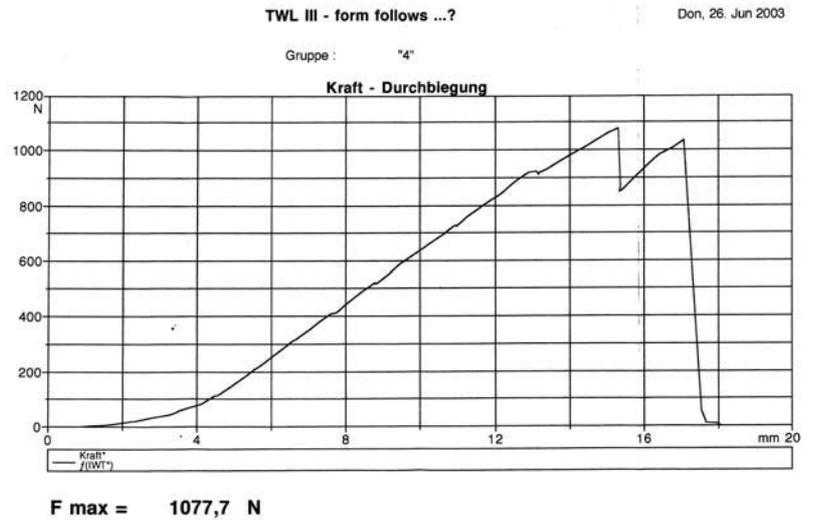


Abb. 7: Last-Verformungs-Diagramm

Das Last-Verformungs-Diagramm zeigt einen ziemlich graden Verlauf, sobald eine Verformung von 4mm erreicht ist. Durch diese Verformung erhält die Konstruktion ihre Steifigkeit, die sie bis zur maximalen Belastung behält. Das sprunghafte Absinken der Lastaufnahme zeigt den Moment, in dem das Seil sich aus seiner Verschraubung gezogen hat.

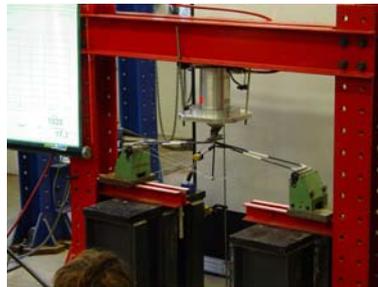


Abb. 8: maximale Belastung



Abb. 9: Entlastet

1. Der gelbe Tiger

1.1. Formfindung

1.1.1. Tragwerk

Als erstes galt es für uns, den Lastbeanspruchungen in den einzelnen Elementen eines Trägers gerecht zu werden. Ausgehend vom klassischen Stabtragwerk mit Holz-Obergurt, senkrechtem Metall-Druckstab und Untergurt als Metallzugseil, entwickelten wir schnell den Wunsch nach einem Material, das sowohl leistungsfähig als auch leicht ist. Gleichzeitig sollten die Verbindungen der einzelnen Elemente so zuverlässig wie möglich sein.

Etwa zur gleichen Zeit bot der Lehrstuhl Tragwerkskonstruktion in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe für faserverstärkte Kunststoffe „FOMEKK“ einen Workshop an, in dem man sich mit dem Material Kunststoff auseinandersetzen sollte. Dieses Angebot nutzten wir, um uns selbst einen Einblick in das Material, seine Verarbeitung und seine Leistungsfähigkeit zu verschaffen. FVK hat entscheidende Vorteile, gegenüber Holz und Metall, den Materialien, mit denen wir uns bis dahin beschäftigt hatten: zum einen durch das geringe Gewicht des Materials selbst, und zum anderen durch die Möglichkeit der individuellen Formgebung, und somit ein Verzicht auf gesonderte Verbindungselemente.

Nachdem das Trägersystem und das Material feststanden machten wir uns daran eine Geometrie zu finden, die sowohl der Lastbeanspruchung entgegen kommt und gleichzeitig auch dem Material faserverstärkter Kunststoff. Als erstes hatten wir die Idee, eine Hartschaumscheibe in die gewünschte Form zu fräsen, und sie anschließen mit FVK zu laminieren. Durch fertigungstechnische Probleme entschlossen wir uns jedoch die Druckstäbe als Rohrprofile auszuführen und ein Zugband gesondert zu laminieren.

1.1.2. Schalungsform

Hier mussten wir einen Weg finden eine Schalung zu bauen, die später im Träger verbleiben kann, ohne das Eigengewicht des Trägers überproportional zu erhöhen.

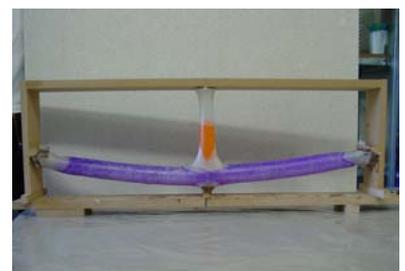
Die zweite Bedingung an die Schalung war die Möglichkeit nach dem laminieren den Träger noch mit Bauschaum füllen zu können.

Der Bauschaum sollte dazu dienen die Druckstäbe weiter zu stabilisieren, und somit aus dem Rohrprofil einen Stab zu machen.

Wir entschieden uns für Luftballons, die sonst zu Tierformen gedreht werden, und überzogen diese mit Nylonstrümpfen. Die Luftballons haben einen Durchmesser von 50mm und sind in eine nahezu gerade Form zu bringen, bei einem Gewicht von zwei Gramm. Die Luftballons ließen sich nach dem Laminieren einfach aufstechen.

Die Verbindung zwischen dem Obergurt und dem mittleren Druckstab musste fließend gestaltet werden, um die eingeleiteten Druckkräfte gleichmäßig auf das Zugband herabzuführen, die Knicklänge der Druckstäbe zu verringern, und eine Aussteifung in der Knotenbildung zu gewährleisten. Dies lösten wir, indem wir den Nylonstrumpf des mittleren Druckstabes in Ovalform an den des Obergurtes nähten. Um eine verstärkte Lasteinbringzone zu gewährleisten, haben wir zudem noch eine 5mm starke MDF-Platte eingebracht, die den Druck besser auf den ansonsten runden Querschnitt verteilt. Am unteren Knotenpunkt wurde einfach der fertiglaminierter mittlere Druckstab mit dem zuvor taillierten Zugband verklebt. Den Übergang vom oberen Druckstab ins Auflager hinein haben wir mit wiederum runden Formen fließend gestaltet. Die Auflagerplatten sind ebenfalls aus MDF, um eine feste Auflagerfläche zu erhalten, in die sich die Auflagerrollen beim Bruchtest nicht so schnell eindrücken können. Die Auflagerplatte selbst ist auf der Unterseite in einem Winkel von 10° angeschliffen, um hier eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Zugband herzustellen.

Auf das Ansetzen eines Auflagerkeils zum Erreichen eines horizontalen Auflager haben wir verzichtet, da es eine 10%ige Eigenlastzunahme bedeutet hätte und gleichzeitig ein Verhindern des Abscherens nicht gesichert gewesen wäre.



1.2. Modellbau

1.2.1.→ Laminieren

Nachdem die Schalung entsprechen unseren Vorstellungen fertig gestellt war, ging es nun an das eigentliche laminieren. In der ersten Phase haben wir 2 Schichten in dem entsprechenden Schalungrahmen laminiert, um diese dann nach dem Erhärten herauszuschneiden zu können. Wir benutzten Glasfilamentgewebe in Leinwandbindung mit einem Gewicht von 49g/m^2 . Dieses schnitten wir in kleine Segmente und belegten damit die kurz zuvor mit Epoxydharz eingestrichenen Luftballons. Der Epoxydharz, der kurz vor dem Laminiervorgang mit dem entsprechenden Härter angerührt wird, hat nur eine Verarbeitungszeit von ca. 40 Minuten. Die Aushärtezeit beträgt 24 Stunden, das heißt wir konnten erst am nächsten Tag weiter machen, da der Träger hart sein musste, damit wir ihn ausschalen konnten.

1.2.2.→ Bauschaumfüllung

Auf das Ausschalen des Trägers sollte nun die Füllung mit Bauschaum folgen. Hier war es wichtig nicht den normalen Schaum zu nehmen, sondern einen 2-Komponentenharthartschaum, der im Gegensatz zum üblichen Schaum keinen Luftkontakt zum Aushärten braucht. Die Aushärtung beruht auf einer chemischen Reaktion der zwei Komponenten, die kurz vor der Benutzung in der Dose miteinander vermischt werden. Die Aushärtezeit bei diesem Schaum, den wir benutzt haben liegt bei ca. 5 Minuten und die Dichte ist höher als bei anderen Schäumen (ca. 36g/l). Die kurze Aushärtezeit des Schaumes stellte geringe Probleme dar, da der Schaum in sehr kurzer Zeit in den Träger gefüllt werden musste, bevor er in der Dose erhärtete. Das dichtere Gefüge, die erhöhte Klebkraft und der erzeugte Innendruck auf die Hülle versteifen die Druckstäbe unseres Trägers ideal.

1.2.3.→ Endbearbeitung

Das nun steife Gerüst wurde nach dem vollständigen Aushärten des 2-Komponentenharthartschaums noch 2 mal überlaminiert. Die bis dahin offen Stellen des Trägers wurden ebenfalls laminiert und somit geschlossen. Durch die Farbenvielfalt unseres Trägers, die durch die bunten Luftballons und den mintgrünen Bauschaum entstand, entschieden wir uns hier für einen einheitlichen Farbton (gelb), den wir in den Epoxydharz mit einmischten. Nach erneutem Aushärten und darauf folgenden Schleifen des Trägers klebten wir das zuvor laminierte und taillierte Zugband unter Vorspannung mit Epoxydharz an die Unterseite des Trägers. Zum Schluss beklebten wir noch die Auflagerunterseite und die Lasteinbringzone mit schwarzem Moosgummi um das Durchstanzen des Gewichtes und der Auflager zu minimieren.

1.3. Bruchversuch

Mit einem Eigengewicht von 561g bleibt unser Träger weit unter den Forderungen. Die maximale Traglast betrug im Bruchversuch 362kg ($3623,7\text{ N}$), was dem 646-fachen seines Eigengewichts entspricht. Der Träger hatte eine Maximale Durchbiegung von 35mm .

Versagt hat der Träger schlussendlich am Auflager, in dem sich Scherkräfte zwischen der MDF-Platte, dem Kunststoff und dem Bauschaum gebildet haben, was zum Bruch kurz vor dem Auflager geführt hat.

Der Träger ist jedoch nach Lastausgang wieder in seine alte Form zurückgegangen, und man sieht schön an dem Durchhängen des Zugbandes, wieviel Kraft es aufgenommen hat.



„Strandgut“

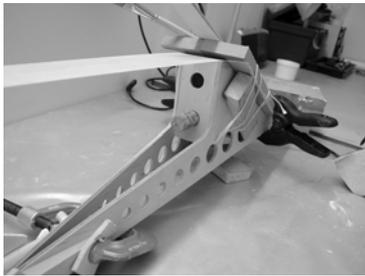


Abb. 1: Modellbauphase

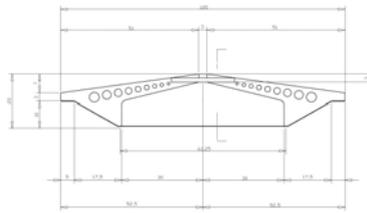


Abb. 4: Ansicht



Abb. 6: Aussparungen

1. Entwicklung des Trägers

1.1 Entwurfsidee

Ausgehend von der idealen Kraftableitung der Einzellast über einen druckbeanspruchten Obergurt, einen zugbeanspruchten Untergurt und einen mittig angeordneten Druckstab entstand eine Entwurfsidee. Die Verlagerung der zentralen Druckebene steht dabei im Mittelpunkt. Dies hat die Auflösung des mittigen Druckstabes in zwei seitlich, aber im Kräfteinwirkungspunkt verbunden sind, zur Folge. Es entsteht eine offene, leichte Konstruktion.

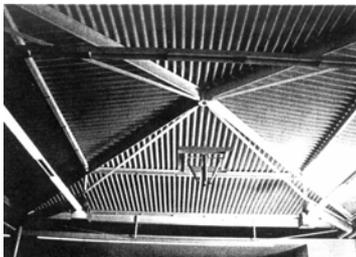


Abb. 2: Referenz: Westfallenhalle Dortmund

1.2 Entwurfsbearbeitung

- Auflösung des mittleren Druckstabes

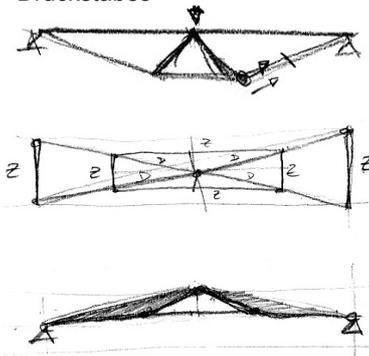


Abb. 4: Skizzen

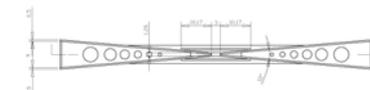


Abb. 5: Draufsicht

-Entwurf des Trägerquerschnittes

- Zugseil oder Zugband
 - 2 Zugseile
 - o parallel
 - o gekreuzt
 - 1 Zugband

-Optimierung des Trägerquerschnittes

- Stabilisierung: Ausnutzung des der Aufgabe entsprechenden möglichen Querschnitts
- Gewichtsreduktion: Materialquerschnitt im Kraftverlauf (mögliche kreisförmige Aussparungen im übrigen Querschnitt)



Abb. 7: Detail Auflager/ Zugbandanschluß

- Wahl des Materials Sperrholz: Hohe Druckfestigkeit durch Mehrschichtigkeit mit wechselnder Faserrichtung

2. Funktionsprinzip

2.1 Funktionsweise/Aufbau des Trägers



Abb. 8: Perspektive

Der Träger setzt sich aus vier Schenkeln zusammen, die zu zwei in sich steifen Kästen gefügt sind. Für Auflager und Kräfteinleitung werden die maximal möglichen Flächen genutzt.

Bei der Kräfteinleitung übernehmen die Schenkel Druck. Die den Kasten erzeugenden Scheiben verhindern ein vertikales Knicken und horizontales Spreizen der Schenkel. Sie sind somit sowohl auf Druck als auch auf Zug belastet.

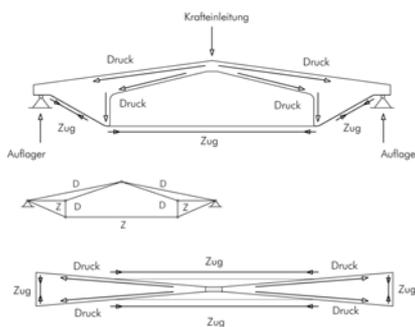
Innerhalb der Schenkel wird die Kraft zuerst direkt zum Auflager, dann vertikal nach unten gelenkt. Ein Zugband, welches jeweils zwei schräg gegenüber liegende Schenkel miteinander verbindet, nimmt am tiefsten Punkt des Trägers die Kräfte auf.

Vollholzkeile im Bereich der Kräfteinleitung verhindern das seitliche Verdrehen der Schenkel. Die geklebten/verleimten Verbindungen sind immer in vielfacher Anzahl wirksam, wie die Vollholzkeile am Kräfteinleitungspunkt und die Kästen am Auflager.



Abb. 9: Ansicht

2.2 Qualitative Beschreibung



3. Bruchversuch

3.1 Bruchvorgang/Beschreibung der Kraftverläufe

Die mittig eingeleitete Kraft wurde gleichmäßig auf beide Druckglieder verteilt. Die vertikale Krafrichtung wurde im Einleitungspunkt aufgrund des fehlenden mittleren Druckstabs in Richtung der Druckglieder abgelenkt. Die weiteren Kraftverläufe finden symmetrisch auf beiden Seiten des Trägers statt.

Die erste Kraftzerlegung geschieht bereits vor dem Auflager (Abb.). Ein Teil der Kraft wird vertikal abgeleitet. Die übrige Druckkraft wird im Auflagerpunkt, begründet durch den kleineren Winkel zwischen Krafrichtung und Auflagerebene, in eine größere horizontale Komponente und eine kleinere vertikale Komponente zerlegt. Letztere wird vom Auflager aufgenommen; das Zugband zwischen beiden Auflagern wirkt dem horizontalen Anteil entgegen. Dabei entsteht aus horizontaler und vertikaler Komponente eine Resultierende, die in der Verbindung ein zusätzliches Moment erzeugt.

Die Haupteintragung der Druckkräfte findet jedoch nach der

ersten Kraftzerlegung statt. Am tiefsten Punkt des Trägers tragen die Seitenflächen des Kastens die Druckkraft in die Randbereiche des Zugbandes ein. Die Gegenkraft (Druck) auf den Kasten wirkt jedoch über die gesamte Breite des Zugbandes auf die Fläche zwischen den Schenkeln. Somit kommt es zu einer gegenläufigen Beanspruchung der Verbindungsflächen von Schenkeln und Mittelwand. Diese Scherbeanspruchung, welche im Betrag dem doppelten der vertikalen Druckkraftkomponente entspricht, führte schließlich zum Nachgeben der Verbindung und Herausdrücken der mittigen Druckfläche nach oben. Das Zugband hatte einseitig keinen Widerstand mehr und riss im Moment des „Bruchs“ ein. Das statische System wurde asymmetrisch und unwirksam.

3.2 Fehlerbetrachtung

Der Bruch erfolgte aufgrund eines modellbautechnischen Mangels. Die gewählte Verbindungsart mit Klebeflächen war nicht optimal ausgeführt, so dass der fehlende Kleber in der linken Druckzone zum Versagen der Verbindung führte.

3.3 Last-Verformungs-Diagramm

Der Träger konnte bis zum Bruch einer Last von 1719 N standhalten. Im Last-Verformungs-Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass ab einer Kraft von 200N die Höhe der Krafteinwirkung im direkt proportionalen Verhältnis zur Verformung steht. Die Durchbiegung bei maximaler Belastung von 1719,19N betrug ca. 13 mm.

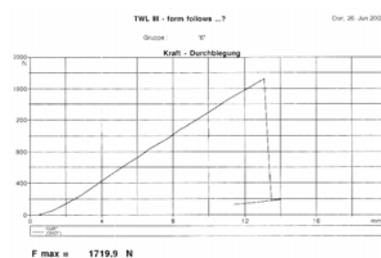


Abb. 9: Bruchdiagramm

Nach dem Bruch stieg diese unter der noch vorhandenen Belastung kurzzeitig auf 14 mm an, worauf sich der Träger wieder zurückverformte. Es handelte sich um eine elastische Verformung.

4. Zusammenfassung/ Diskussion

Der Träger zeichnet sich durch den offenen Raum zwischen Druck und Zugebene aus. Erreicht wird dies durch die Aufteilung des mittleren Druckstabs in zwei seitliche.

Insgesamt kann man sagen, dass der Träger auch ohne mittigen Druckstab (freier Querschnitt) in qualitativ gleicher Weise Kraft aufnehmen und abtragen konnte. Das Versagen der Tragfähigkeit ist auf die mangelnde Auseinandersetzung mit dem Ort der höchsten Beanspruchung und dessen entsprechende Ausbildung zurückzuführen. Um eine höhere Kraftaufnahme zu ermöglichen, ist eine Verstärkung des Zugbandes in diesem Bereich nötig. Weiterhin ist die kraftschlüssige Verbindung der in entgegengesetzter Krafrichtung beanspruchter Druckflächen Voraussetzung für eine Optimierung des Trägers.



Abb. 11: Bruchstelle



Abb. 12: Versagen des Zugbandes

1. Träger-Theorie

1.1. Geometrie

1.1.1. Konzept

Da wir das Rad nicht neu erfinden wollten, entschieden wir uns, das System des Vorjahressiegers aus zwei Zugseilen und einem Druckstab auf seine Schwachstellen hin zu untersuchen und zu optimieren. Knackpunkte waren dabei die Schwächung der horizontalen Druckkomponenten durch den mittig durchgestanzten vertikalen Druckstab sowie die lastgerechte Dimensionierung der Einzelbauteile.

Zuerst ersetzten wir das horizontale Alu-Doppelkreuz durch ein System aus zwei gelenkig verbundenen Druckstäben, die die Punktlast direkt und gleichmäßig verteilt aufnehmen und im Bereich der Auflager auf ein Zugseil umlenken. So konnten wir die Knicklänge der materialintensiven, druckbelasteten Horizontalkomponenten halbieren und deren Masse trotz ihrer rund 10% größeren Gesamtlänge deutlich reduzieren. Die Ausgangsgeometrie verwandelte sich dabei vom Tensegrity zum einfachen Dreieck.

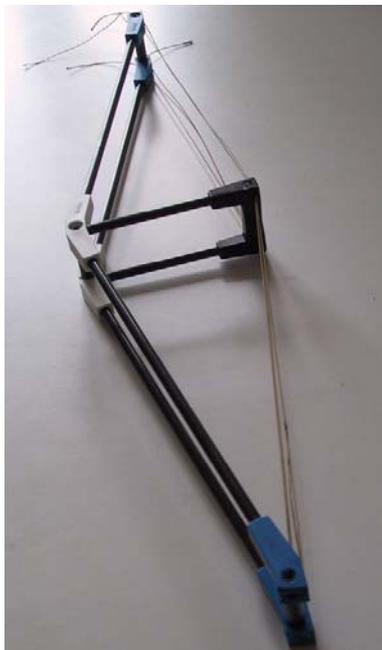


Abb. 1: Arbeitsmodell M 1:2

1.1.2. Entwicklung

Da die zur Verfügung stehende Höhe im Versuchsaufbau unterhalb der Auflager noch nicht ausgenutzt war, ergänzten wir das System um

einen weiteren gelenkig angeschlossenen Druckstab, der die auftretende Last ebenso direkt vertikal auf das Zugseil überträgt, und verdoppelten so bei geringem Gewichtszuwachs die statische Höhe des Trägers. Aus dem Dreieck wurde ein einfaches Fachwerk.

1.1.3. Resultat

Das Zugseil trifft jeweils im Schnittpunkt der Wirkungslinien der Stabkräfte und der Stützkräfte am Auflager mit den beiden Druckstäben zusammen. Gegen Kippen wird dieses Trägersystem doppelt nebeneinander gebaut und über Querstreben zwischen den Gelenken zu biegesteifen Rahmen verbunden. Diese Geometrie verfolgt das Prinzip, in der Ebene der Lastableitung nur Normalkräfte in die Bauteile einzuleiten, wodurch die Druckstäbe im Idealfall keine Momente aufnehmen müssen und somit einzig das Ausknicken der Stäbe oder der Bruch des Seils als Ausfallursache zu erwarten ist.

1.2. Material

1.2.1. Vorauswahl

Bei der Wahl der Materialien entschieden wir uns hinsichtlich der Limitierung der Masse des Trägers auf 1000 Gramm für bewährte Materialien aus der Drachenbauszene.

Versuche am 1:2 - Arbeitsmodell zeigten Defizite in der Konstruktion: das Seil schnürte sich im Auflagerbereich in die Kunststoffgelenke und längs in den darüber angeschlossenen Druckstab ein und führte so zu einer extremen Verformung des Modells. Das Seil brach an der Stelle mit dem stärksten Knick, da der Umlenkungsradius zu klein war.

1.2.2. Zugseil

„Dyneema® extrem“, SK75-Serie (Hersteller: DSM), 2,0 mm Durchmesser, Bruchlast 360 kp, Knotenlast 215 kp, 4fach vorgereckt, Gewicht ca. 2g/m, außen 16fach gewickelt, Dehnung max. 6%.

Im Bereich der Gelenke und des Knotens ist das Seil mit Mantelschnur verstärkt, um direktes Bekneifen des Materials des Materials in engen Krümmungsradien zu verhindern. Der Schluss des Seiles erfolgt nach dem „no-knot“-Prinzip. Es überträgt ohne Knoten die volle Seilkraft und verhindert damit Knickbruch.

1.2.3. Druckstäbe

Die Hauptdruckstäbe sind gewickelte CFK-Rohre, um Längsrisse zu vermeiden sowie die Widerstandsfähigkeit gegen Knicken und Beulen gegenüber einem gezogenen CFK-Rohr zu erhöhen.

Sie sind innen gewickelt und außen UD-gezogen bei 16/14mm Durchmesser (1mm Wandstärke). Ihr Faseranteil beträgt ca. 60% (HT-Fasern in EP-Matrix). Sie sind längs in sehr flachem Winkel gewickelt und können daher auftretende Ungenauigkeiten im Anschlusspunkt sowie Scher- und Torsionskräfte besser kompensieren.

Der vertikale Druckstab ist gezogen, mit 10/8mm Durchmesser. Alle Rohre sind mit Epoxydharz in die Gelenke eingeklebt.

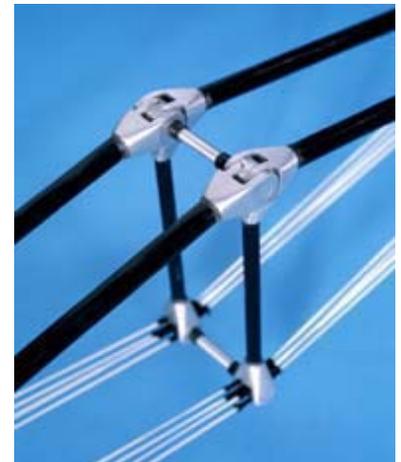


Abb. 2: Gelenkverbindungen

1.2.4. Gelenke

Da die von uns gewünschte hochfeste Aluminiumlegierung AlZnMg-Cu1,5 nicht erhältlich war, verwendeten wir für die Herstellung der Gelenke AlMgSi1 als 25 mm Vierkantvollprofil. Die Gelenke sind in Handarbeit gefertigt und weitestgehend gewichtsreduziert.

1.3. Beanspruchung

Alle Bauteile werden im Idealfall nur mit Normalkräften beansprucht. Die Rohre sind daher in erste Linie auf Knicken optimiert. Auf eine doppelwandige Verstärkung der Rohre haben wir aus Gewichtsgründen verzichtet und stattdessen den Rohrdurchmesser größer gewählt. Durch die Wahl von CFK als Material für die Druckstäbe ist an dieser Stelle das Potenzial für eine gute Leichtbauzahl enorm erhöht worden, da kein anderes Material im Verhältnis zu seinem

Eigengewicht so hohe Druck- und Biegekräfte aufnehmen kann. Da wir vermeiden wollten, dass das Seil die Schwachstelle unseres Trägers darstellt, haben wir es als Schlaufe ausgebildet und flaschenzugartig doppelt gelegt. Es wird nur über möglichst große Radien geführt, um ein Abscheren zu vermeiden. Durch die halbseitige Führung der Seile werden die vertikalen Druckstäbe in Position gehalten.

Die Anordnung des Materials ist in den Aluminium-Gelenken radial-symmetrisch um die Lastlinien verteilt. Alle Lasten treffen in den Gelenken als Scher- und Leibringkräfte auf durchgesteckte Al-Rohre, die im Bereich der Gelenke massiv ausgefüllt sind. Diese müssen durch Rahmenwirkung zusammen mit den Gelenken gleichzeitig die Queraussteifung des Trägers gewährleisten.

2. Träger-Praxis

2.1. Bruchlastabschätzung

Unsere persönliche Zielvorgabe war es, mit der Leichtbaukennzahl an die magische Grenze von 1000 heranzukommen. Bei einem Trägergewicht von 416g wäre eine Bruchlast von mindestens 4160N das Ziel – vorausgesetzt, dass nicht durch Ungenauigkeit in der Konstruktion eine asymmetrische Lastverteilung auftritt und der „Twin Power“ von den Auflagerwalzen abrutscht.



Abb. 3: Twin Power im Versuchsaufbau

2.2. Bruchversuch

Unter Lasteinwirkung im Versuchsaufbau zeigte sich, dass der „Twin Power“ sich im Verhältnis zur steigenden Last immer weniger durchbog. Dennoch verformte sich die Trägergeometrie derart, dass die Druckstäbe beinahe horizontal zu den Auflagern standen. In dieser Position kam es unter weiterer Erhöhung der Last bei 6141,2 Newton zum Ausknicken der Hauptdruckstäbe und damit zum unmittelbaren mittigen Bruch zuerst eines, dann auch des benachbarten Druckstabes.



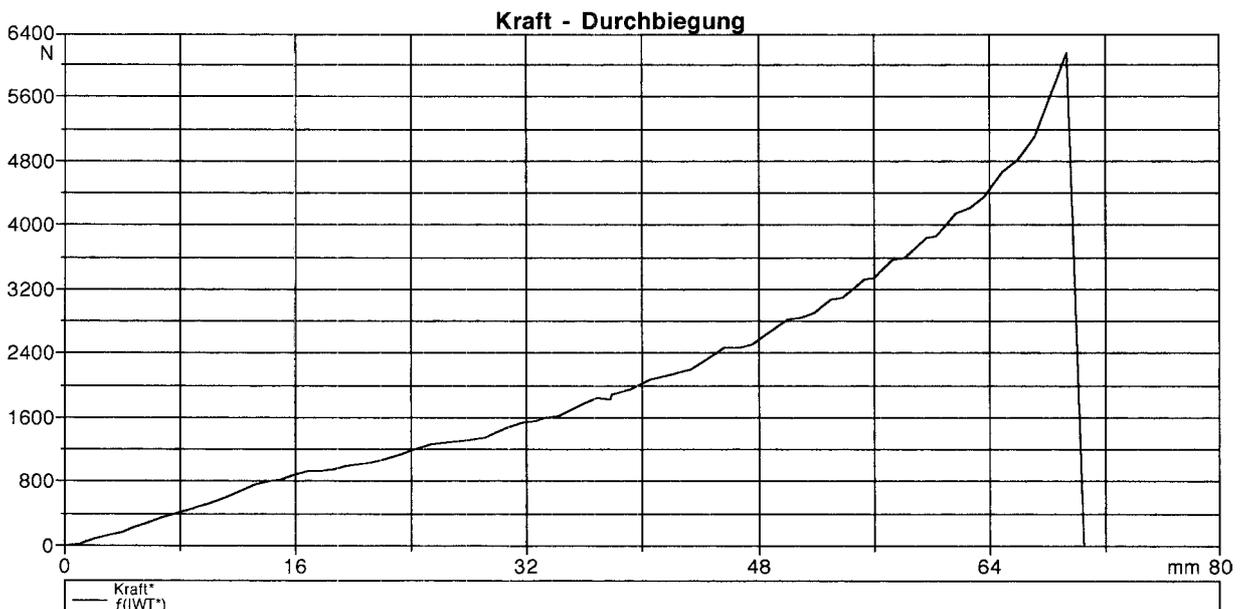
Abb. 4: Der „Twin Power“

2.3. Resümee

Die Topologie des „Twin-Power“ versagte offenbar an der erwarteten schwächsten Stelle. Denn die langen CFK-Druckstäbe sind das labilste Glied, da sie der Knickbeanspruchung mit ihrem Rohrquerschnitt widerstehen müssen. Eine aufgesteckte Rohrhülse, auf die wir bewusst aus Gewichtsgründen verzichteten, hätte die Tragfähigkeit des Systems also noch weiter erhöht.

Durch eine andere Zugseil-Variante, sei es eine andere Seilführung oder gar ein anderes Seil, hätte die Deformation des Trägers reduziert werden können. Ein ähnlich geführtes Stahlseil hätte mit einem etwa dreimal so großen E-Modul bei gleichem Querschnitt die Verformung deutlich geringer ausfallen lassen. Die Leichtbaukennzahl des Stahlseils kommt jedoch an die des Dyneema®-Seils nicht heran. Die Hauptschwachstelle des Seilsystems liegt wohl in der Verbindungsmethode des „no-knot“. Denn diese Verbindung zeigte unter voller Beanspruchung viel Schlupf.

Das AlMgSi1 hat sich zwar als Material für die Auflager und Gelenke bewährt. Die Aluteile zeigten offenbar keine Verformungserscheinungen. Mit hochfesten Aluminiumlegierungen wäre jedoch eine noch schlankere Bauweise möglich. Hier liegt noch erhebliches Potential für eine weitere Gewichtsoptimierung des Trägers, da die Gelenke etwa zwei Drittel der Gesamtmasse ausmachen.



F max = 6141,2 N

Abb. 5: Last-Verformungs-Diagramm



Abb. 1: 3D-Modell des Trägers

1. Vorüberlegungen

1.1. Idee und Umsetzung

Der Hauptgedanke der Konstruktion unseres Tragwerks ist die optimierte Ausnutzung eines minimierten Querschnitts. Daher versuchten wir, den Träger nicht als Biegebalken auszubilden, das heißt Biegezugbelastungen zu auszubilden. Zwei Aluminiumstäbe mit einem quadratischen Hohlprofil sollten als Hauptträger mittels einer zugbelasteten Unterspannung nur auf Druck belastet werden. Aufgrund der reinen Druckbelastung auf den ganzen Querschnitt wird der Träger optimal ausgenutzt. Die Entkopplung von Zug- und Druckzone erfordert einen weiteren vertikalen Druckstab (hier ein T-Stab aus Hartholz), welcher die Last direkt in zwei Stahlseile einleitet. Diese Kraft tritt dort als Zug auf. Dies hat wiederum zur Folge, dass Druck in die Aluminiumstäbe eingebracht wird. Die Normalkräfte in den einzelnen Bauteilen, deren Bestimmung für die Bemessung ist, können über Winkelbeziehungen berechnet werden. Da die Stahlseile laut Herstellerangaben mehr Kraft als die Aluminiumstäbe aufnehmen können, sollte das Tragwerk durch das Biegen und schließlich durch das Abknicken der Stäbe versagen.

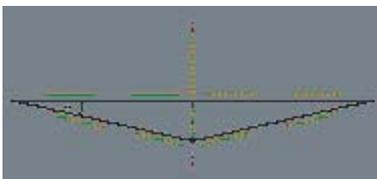


Abb. 2: Kräfteverlauf im Träger

Ursprünglich sollte das druckbeanspruchte Bauteil ein Papprohr sein, was wir jedoch bald verworfen haben. Zum einen, weil wir für Pappe über keinerlei Materialkennwerte verfügen. So hätten wir die Tragfähigkeit eines derartigen Balkens nur schlecht abschätzen können. Und zum anderen, weil die Beschaffung der erforderlichen Rohre mit dem gewünschten Quer-

schnitt mit einem großen finanziellen Aufwand verbunden gewesen wäre, da diese nur im Spezialversand erhältlich sind.

Deshalb haben wir als geeignetere Alternative zwei quadratische Aluminiumhohlprofile gewählt. Diese haben den Vorteil, ein preiswertes Serienprodukt zu sein. Darüber hinaus lassen sich ihre Eigenschaften leicht berechnen und nachschlagen, so dass eine Bemessung ohne Probleme möglich ist. Des Weiteren bewegt sich der T-Stab zwischen ihnen, ohne sie zu berühren und damit kann eine zusätzliche Kräfteübertragung verhindert werden.

1.2. Material

1.2.1. Druckstäbe

Aluminiumhohlprofile: Aluminium weist ähnliche Materialkennwerte wie Stahl auf, hat aber dabei nur 1/3 dessen spezifischen Gewichts. Somit ist Aluminium ein idealer Leichtbaustoff für optimierte Konstruktionen.

1.2.2. T-Stab

Dieser dient zur großflächigen Einleitung der Last in die Zugseile und wurde daher in Hartholz (Eibeere) derart ausgeführt, dass die eingebrachte Kraft in Faserrichtung wirkt, da Holz in dieser Richtung eine weit höhere Festigkeit als quer zur Faser aufweist.

1.2.3. Zugstäbe

Hier haben wir ebenfalls auf preiswerte, standardisierte Baustoffe zurückgegriffen und Stahlseile gewählt. Diese sollten zusätzlich vorgespannt werden, um die bei der Belastung auftretenden Verformungen gering zu halten.

1.2.4. Verbindungen

Für die Verbindung von Zug- und Druckstäben am Auflager haben wir Kirschbaumholz verwendet. Dieses ist ebenso hart wie Buchenholz bei etwa gleichem Gewicht, lässt sich jedoch einfacher bearbeiten. Holz erlaubt eine genaue Verarbeitung, durch welche Außermittigkeiten bei der Überschneidung der Kräftelinien vermieden werden können, die eine zusätzliche Momentenbeanspruchung hervorrufen würden.



Abb. 3: Nach dem Bruchversuch

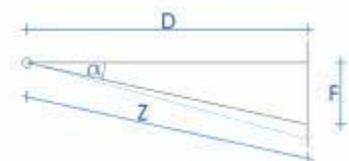
2. Bruchversuch

2.1. Beschreibung des Bruchvorganges und der Versagensursache

Das Manko unseres Trägers war die große vertikale Verschiebung des krafteinleitenden Punktes.

Da die Befestigung der Seile am Auflager aus fertigungstechnischen Gründen nicht stark genug war, um die gewünschte Vorspannung der Seile zu halten, gelang es nicht, die Seile zu spannen. So hingen diese bereits am Anfang des Versuches etwas durch, so dass schon zu Beginn der Belastung eine Verformung vorhanden war, die auch den Weg, den der T-Stab zurücklegen konnte, verkürzte. Während des Versuches rutschte das Seil zusätzlich durch die Auflager hindurch, da die Auflagerverbindungen nachgaben.

Anfangs verlief der Versuch wie erwartet. Durch Einleitung der Kraft wurden die Seile gespannt und damit in den Aluminiumhohlprofilen wurde eine reine Druckkraft hervorgerufen, wodurch die Druckstäbe begannen, sich nach oben zu biegen. Im Idealfall hätte das Tragwerk auf eine weitere Krafteinleitung mit einer stärkeren Durchbiegung und schließlich mit einem Abknicken der Druckstäbe reagieren sollen.



$$\cos \alpha = \frac{D}{Z}$$

Abb. 4: Berechnungsgrundlage

Als das Seil aufgrund der oben beschriebenen Ursachen begann,

durch die Halterungen zu rutschen, änderte sich die Geometrie des Tragwerks. Der Winkel zwischen Zugkraft der Seile und Druckkraft der Stäbe vergrößerte sich wegen der plötzlich vorhandenen größeren Seillänge. Wie durch die obige Abbildung verdeutlicht, bedingt dies bei gleich bleibender Zugkraft der Seile (in diesem Moment) eine geringere Druckkraft auf die Aluminiumhohlprofile. Hierbei ist zu beachten, dass die Abhängigkeit der \cos -Funktion vom Winkel α bei zunehmender Winkelgröße eine steilere Steigung aufweist, was bedeutet, dass kleine Änderungen im Winkel große Änderungen der \cos -Funktion zu Folge haben. Die Aluminiumstäbe waren zu diesem Zeitpunkt aufgrund ihrer Dimensionen vermutlich elastisch gebogen. Deshalb erfuhren sie wegen der Seilverlängerung entweder eine geringe Entspannung oder zumindest eine konstante Vorspannung.

Anschließend trat eine andere Situation ein. Durch die verlängerten Seile und die gebogenen Druckstäbe war die Länge des T-Stabes erschöpft, so dass die krafteinleitende Einrichtung nun direkt auf den Druckstäben lag und diese weiter belastete, wodurch ein völlig neues statisches System entstand. Die krafteinbringende Einrichtung drückte nun direkt auf die Aluminiumbögen. Der nunmehr unterspannte Bogen konnte aufgrund einer gewissen Vorspannung noch eine weitere Lasteinleitung aufnehmen, verformte sich jedoch recht schnell wieder in seine Ausgangsgeometrie zurück. An diesem Punkt änderte sich das statische System erneut, denn von nun an spielte das Seil keinerlei Rolle mehr. Es wurden nur noch die Aluminiumhohlprofile auf Biegung belastet. Da an den Stäben nach Beendigung des Versuches keinerlei Spuren einer plastischen Verformung zu erkennen waren, nehmen wir an, dass während des Experiments nur eine elastische Verformung stattfand. Hätte der Zylinder der Prüfmaschine noch weiter ausfahren können, wäre lediglich die Belastbarkeit der Aluminiumstäbe auf Biegung messbar gewesen. Die Qualität des ursprünglichen Tragwerkes war bei diesem statischen System nicht mehr nachweisbar. Die weiteren Schwankungen der Diagrammkurve können wir uns nur insofern erklären, dass sich die Auflager

durch das Zurückbiegen der Aluminiumbögen in ihre Ausgangsgeometrie nach außen bewegten. Da aber die Position zwischen der Unterkante des Prüfgerätes und der Oberkante des T-Stabes gleich blieb, musste Zug auf die Seile wirken, was zu dem wohl längsten Durchrutschen der Seile an den Auflagern führte. Der Zug spielte jedoch im Tragwerk selbst keine Rolle mehr, da diese Kraft nur noch durch den T-Stab bedingt war. Die maximale Zugkraft in den Seilen, die zu einem früheren Zeitpunkt vorhanden war, wurde nicht mehr erreicht.

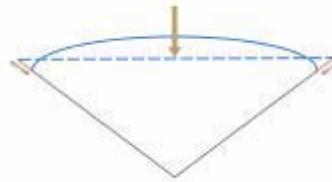


Abb. 5: Verändertes statisches System

Wäre eine weitere Krafteinleitung möglich gewesen, so hätten folgende zwei Szenarien eintreten können:

Entweder wäre das Abknicken der Druckstäbe mit der veränderten Tragwerksgeometrie eingetreten, da die Stäbe nicht für Biegezugbelastungen konzipiert sind. Oder die Seile wären vollständig aus ihrer Verankerung gerissen worden, was uns aus der Beobachtung des Versuches heraus wahrscheinlicher vorkommt. Die zum Zeitpunkt des Versuchsabbruches aufgebrachte Kraft betrug 669,7 N. Wahrscheinlich hätte das Tragwerk bis zum Versagen noch mehr Kraft aufnehmen können.

2.2. Last – Verformungs – Diagramm

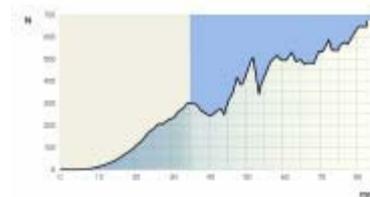


Abb. 6: Last-Verformungs-Diagramm

Das Diagramm zeigt die Kraft, die vom Träger aufgenommen wurde in Abhängigkeit von der durch die Pumpe zugeführten Verformung. Die Kurve verläuft nicht glatt, sondern die Kraft wird kurzzeitig geringer, um dann erneut anzusteigen. Diese Schwankungen

kennzeichnen jeweils die Geometrieänderungen des Tragwerks. Idealerweise treten solche Schwankungen nicht auf, und die Kurve steigt stetig bis zum Maximalwert bei einer sehr viel geringeren Verformung an. Dabei muss jedoch zwischen starren Tragsystemen, bei denen eine zu große Verformung Spannungen hervorruft, die zum Versagen führen und solchen, bei denen die Verformung eine wichtige Rolle spielt, da sie erst die Kraftaufnahme gewährleistet, unterschieden werden.

2.3. Diskussion des Versuchsergebnisses

Das Hauptproblem waren die Seilverspannungen am Auflager. Statt eines dicken Seiles hätte man wohl besser mehrere dünne verwenden sollen, da diese besser vorzuspannen gewesen wären. Vermutlich wäre auch eine umlaufende Seilführung geeigneter gewesen, da sich dabei Standard-Seilverspannungen verwenden lassen, die eine bessere Vorspannung bewirken. Diese hätten jedoch gleichzeitig höheres Gewicht und größere Verformung mit sich gebracht, weshalb wir darauf verzichteten. Sehr positiv hat sich der T-Stab verhalten. Das Holz war ausreichend fest, so dass sich die Seile nicht hineingeschnitten haben und dieser so dimensioniert war, dass ein Knicken nicht stattfand.

1. form follows ...?

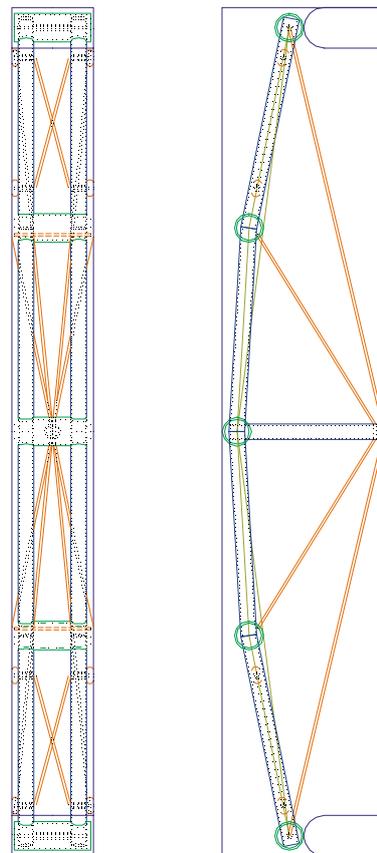
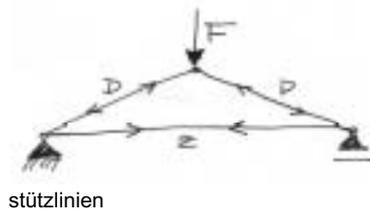
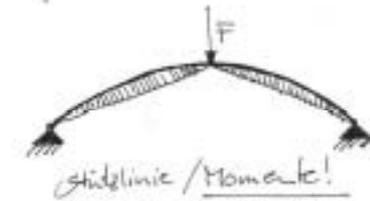
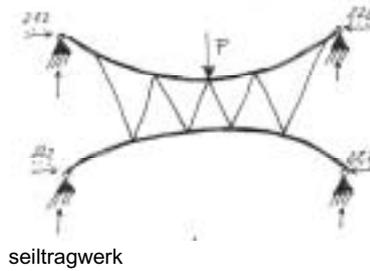
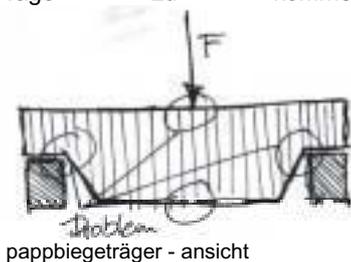
1.1. Entwicklung und Herstellung einer leichten, hochtragfähigen und verformungsarmen Konstruktion

1.1.1. Darstellung und Entwicklung der Idee zum Tragwerk

Nach verschiedenen Überlegungen erfolgte die Entwicklung unseres Tragwerks nach folgenden Prämissen:

- einfacher Aufbau mit leicht nachvollziehbaren Kraftflüssen (an den Stützlinien orientiert)
- dabei optimale Ausnutzung der Geometrie- und Gewichtsvorgaben (bis an die Grenzen)
- keine Momente – also keine Beanspruchung des Trägers auf Biegung, sondern nur auf Druck- und Zugkräfte
- Details sollten möglichst einfach ausgeführt werden
- schließlich sollten alle Tragwerksteile im Baumarkt erhältlich sein um einen möglichst preiswerten Träger herzustellen

Nach einer eingehenderen Beschäftigung mit Tragstrukturen, dem Studium der Ergebnisse des letzten Semesters und nach den oben genannten Entwurfsprämissen konnten wir nun verschiedene Tragsysteme ausschließen. Als optimale Lösung für die Aufgabe schienen der reine Biegeträger, das Seil-, sowie das Bogentragwerk für uns nicht in Frage zu kommen.



So haben wir nach dem Stützlinienverlauf des einfachsten statischen Systems eine Tragstruktur als Kombination von Fachwerk und unterspanntem

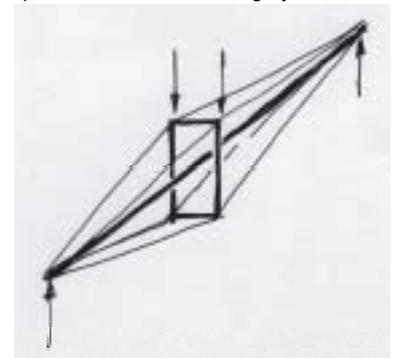
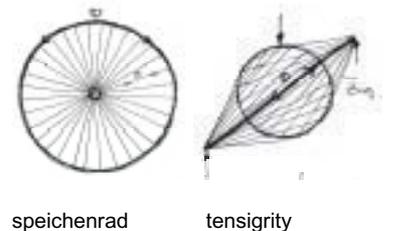
Träger erarbeitet. Die eingeführte Last sollte über Druckelemente im Obergurt und Zugelemente im Untergurt in die Auflager geführt werden. Dabei haben wir versucht die Knicklängen der Druckstäbe zu halbieren. Gleichzeitig mussten dadurch aber auch mehr Knoten bzw. Gelenke für das System geplant werden.



Diesen Träger haben wir daraufhin verworfen, denn die zusätzlichen Gelenke stellen einen zusätzlichen konstruktiven Aufwand und weitere potentielle Versagenspunkte im System dar. Wir haben dann versucht, das Tragsystem auch auf Kosten der Tragkraft weiter zu vereinfachen.

1.1.2. Der Modellträger

Über die Beschäftigung mit Überlegungen Buckminster Fullers zu Tensigrity Strukturen haben wir so ein Tragsystem als unterspanntes Fachwerk entwickelt, in dem die Druckelemente durch Zugelemente getrennt bzw. verbunden sind und so die wechselseitige Bedingung von Druck und Zug veranschaulichen sollen. Die Last wird jetzt über einen „Rahmen“ in das Tragwerk eingeführt.

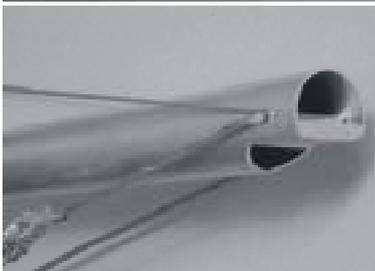
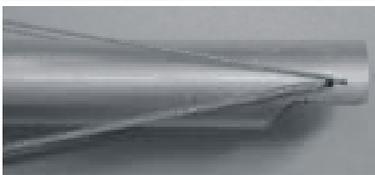


Dieser Rahmen „schwebt“ wie die Felge eines Speichenrades um den Hauptdruckstab (= Narbe) und wird über zwei Zugseile (= Speichen)

gehalten. Die Last wird also aus dem Rahmen als Zugkraft in das untere Seil geführt. Das Zugseil leitet die Kraft in den Hauptdruckstab, der das am höchsten belastete Element des Tragwerks darstellt. Deshalb wurde er so groß wie möglich gewählt.

1.2. Material

Als Material haben wir Aluminium wegen der geringen Dichte und der hohen Zähigkeit für die Druckstäbe und Stahlseile für die Zuelemente verwendet.



modellfotos tensigrity

1.3. Bruchversuch

Die maximal aufnehmbare Last haben wir mit 7,17 kN bei einer Durchbiegung/ Verformung von ca. 1,7 cm berechnet.

Erreicht haben wir eine Kraft von 4,25 kN bei einer Verformung von 3,3 cm ohne schädigende Einwirkung auf das Tragwerk.

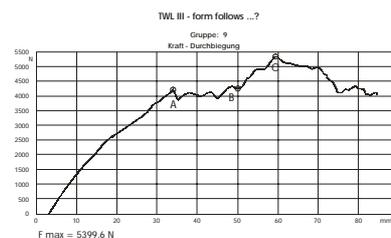
Nach einer weiteren Belastung begann sich das rechte Auflager erheblich zu verformen. Die Umlenkkräfte des Zugseils bewirkten Einschnedungen in dem Punkt der Seildurchführung im Hauptdruckstab. Dadurch lag nun der Rahmen direkt auf dem Hauptdruckstab auf, der dadurch zusätzlich Biegekräfte aufnehmen musste. So konnte der Träger noch bis zu einer Last von 5,4 kN belastet werden. Durch die fortschreitende Verformung des rechten Auflagers konnten danach keine zusätzlichen Lasten mehr aufgenommen werden.



träger nach dem bruchtest



rechtes auflager nach dem bruchtest



verformungsdiagramm

1.4. Diskussion der Ergebnisse

Allgemein kann man sagen, dass sich der Träger während der Belastung gemäß unseren Erwartungen verhielt. Die von uns errechnete Bruchlast haben wir zu ca. 75% erreicht. Als Ergebnis ist eine maximale Prüfkraft von 5399,6 N bei einer Verformung von 5,9 cm festzuhalten. Bei einem Eigengewicht von 996 g ergibt sich daraus eine Leichtbaukennzahl von 542. Bezogen auf eine Spannweite von 100 cm bedeutet die

Verformung unter der Maximallast eine Durchbiegung von ca. $l/17$.

Als Grund für das Versagen des Trägers sind die Querschnittsschwächung im Auflagerbereich und die zu schwache Ausbildung der Seildurchführung in diesem Punkt zu nennen. Die extrem hohen Umlenkkräfte hätten eine leistungsfähigere Ausbildung dieses Details erfordert. Anstelle des punktförmigen Lasteintrages müssten die Kräfte flächig auf den gesamten Querschnitt des Druckstabes übertragen werden. Damit wäre die Tragfähigkeit des Systems näher an die errechnete Bruchlast herangerückt.

G 1000

1. Entwicklung der Idee

Den Vorgaben entsprechend, ist der Einfeldträger der einfachste in seiner Bauart. Dem kann die zulässige Höhe von 20 cm zugeschrieben werden, um die Durchbiegung zu minimieren. Für die Gewichtseinsparung war das System eines Fachwerks für uns sinnvoll. Das einfachste Fachwerk bestünde dann aus einem Obergurt, einem Druckstab und einem Untergurt. Wegen der Punktlast ist eine Vorspannung des Ober- und Untergurts nötig. Daraus ergab sich ein Fischbauch ähnlicher Träger, der zwei Druckstäbe als Obergurt, zwei Zugstäbe als Untergurt und ein

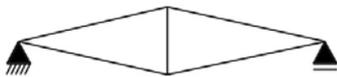


Abb. 1 Fischbauchträger

Druckstab, als Verbindung der zwei Gurte, hat. Durch die Gefahr des Wegkippen haben wir einen dreidimensionalen



Abb. 2 Raumfachwerkträger

Raumfachwerkträger entwickelt, der ausschließlich aus Dreieckssystemen besteht. Am Versuchsmodell stellten wir heraus, dass die Knoten den größten Schwachpunkt darstellt. Hinsichtlich der komplizierten Knotenausbildungen später im 1:1 Modell, mussten wir einen anderen Weg verfolgen. Wir wollten einen Träger ohne Knoten haben. Das wäre eine Platte oder eine Scheibe. Darauf hin haben wir die Scheibe auf ihre Eigenschaften untersucht. Im liegenden Zustand



Abb. 3 Test - Scheibe liegend

ist die Scheibe stabil an den Auflagerbereichen, doch die



Abb. 4 Test - Scheibe stehend

extreme Durchbiegung macht sie als Träger unbrauchbar. Im stehenden Zustand besitzt sie eine sehr geringe Durchbiegung, tendiert aber, aufgrund der kleinen Auflagerfläche, dazu zur Seite zu kippen. Um die Eigenschaften aus den beiden vorhergenannten Fällen auszunutzen, war die Verbindung von mehreren stehenden Scheiben neben einander sinnvoll. Das Resultat war



Abb. 5 Test - Sandwich-Träger

dann ein Sandwich-Träger. Der Materialverbund, der größten Teils aus einem leichten Stoff besteht und zur Stabilisierung der kräfteführenden stabilen Scheiben dient, gewährleistet ein gutes



Abb. 6 Entwurfsträger

Tragverhalten im Verhältnis zu einem geringen Gewicht. Da nur punktuell Lasten aufgenommen und abgetragen werden, mussten wir die Auflagerstellen und die Stelle der Lasteinwirkung am Träger verstärken. Wegen der Gewichtseinschränkung von 1 kg war es notwendig, Volumen vom Träger wegzunehmen. Dabei haben wir uns auf das Prinzip des Fachwerkträgers zurückgegriffen und die Lastabtragung auf schmale Stege konzentriert.

2. Materialien

Die Hauptmaterialien sind Sperrholz und Schaumstoff. Auf beiden Seiten des Trägers ist jeweils eine 5 mm dicke Sperrholzschiene aus Linde, dann folgen zwei 30 mm dicke Schaumstoffplatten, daraufhin wieder zwei 2 mm dicke



Abb. 7 Detail vom Träger

Sperrholzschiene aus Birke und in der Mitte eine 20 mm starke Schaumstoffplatte. Alle Schichten wurden mit Holzleim verklebt und haben zusammen eine Tiefe von 9,5 cm. An den Auflagerstellen und der Mitte des Trägers wurden MDF - Platten der Größe 5 x 9,5 x 0,7 cm zur Verstärkung aufgebracht und mit jeweils zwei Glasfaserschichten umspannt und mit Epoxidharz laminiert. Auf der Unterseite des Trägers befinden sich noch mal zwei Schichten Glasfaser, zwischen in welche zwei Carbon - Seile integriert sind.

3. Kraftwirkungen

Nach dem Prinzip des Fachwerkträgers entstehen auf dem Obergurt Druckkraft und auf dem Untergurt Zugkraft. Gemäß dieser Kräfteinflüsse wurde der Obergurt massiver als der Zuggurt ausgebildet. Dabei helfen die zusätzlichen Glasfaser-Carbon - Verstärkung die starken Zugkräfte am Untergurt aufzunehmen. Die durch MDF verstärkten Auflager sowie die Lasteintragsbereiche sollen ein Eindrücken bei hoher Belastung verhindern. Die Schaumstoffschichten sollen das Auskippen der kräfteführenden Sperrholzschiene verhindern.

4. Bruchlastermittlung

Während unserer Bearbeitung haben wir versucht die inneren Kraftflüsse unseres Trägers mit Hilfe des Statikprogramms InfoCAD für uns verständlich darzustellen und für den Entwurf zu nutzen. Weiterhin haben wir durch verschiedene Eingaben von Lasten eine ungefähre Bruchlast von 8KN ermitteln können. Da der aus Vollholz bestehende berechnete

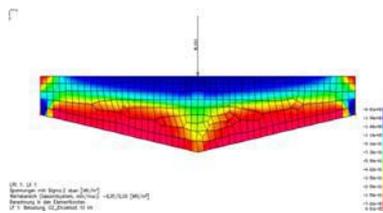


Abb. 8 Spannungsdigramm

Träger aus programmtechnischen Gründen, nur als Volumenkörper angesehen werden konnte, versuchten wir durch eigene Berechnungen zusätzlich genauere Werte zuzubekommen.

5. Bruchlastberechnung für Träger

Die Bruchlast des vereinfachten Fachwerkträgers liegt bei 3,6 kN. Es ist jedoch zu beachten, dass die Zwischenstreben und vor allem die Glasfaser-Karbon-Verstärkung am Unterzug in diesen Berechnungen noch nicht berücksichtigt wurden und somit eine höhere Bruchlast für sehr wahrscheinlich machen. Die von uns vermutete Bruchlast liegt somit eindeutig über 500-600 kg.

6. Bruchtest

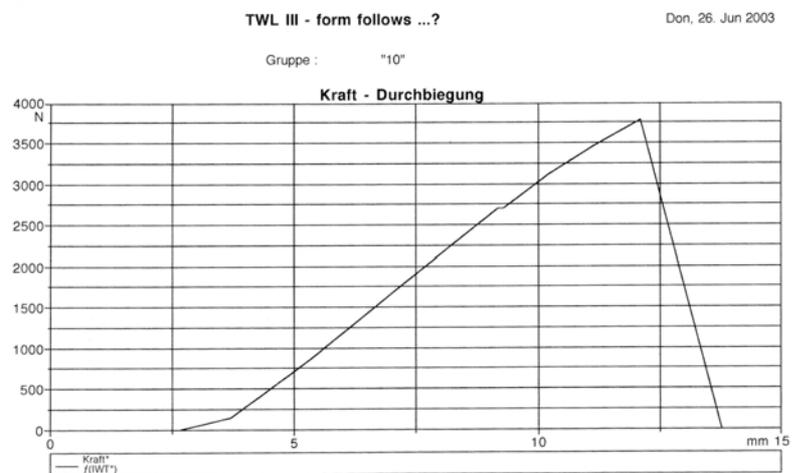
Der Bruchtest ergibt, dass sich der Träger bis zum Bruchpunkt um ungefähr 12 mm durchbiegt. Die Durchbiegung des Trägers verhält sich zur Krafteinwirkung bis zum Versagen proportional. Ein so genanntes „Fließen“ des Materials konnte aus Gründen der Materialeigenschaften nicht beobachtet werden.

Bei 3802,6 N kommt es zum Versagen des Trägers. Das Versagen wurde durch das Nachgeben des Untergurtzugbandes eingeleitet und führte dazu, dass der Sperrholzunterzug die gesamte Zugspannung alleine abtragen musste.

7. Bruchtestauswertung

Die errechnete Bruchlast von 3,6 kN wurde im Bruchtest mit 3802,6 N relativ genau bestätigt. Die Schätzung von 6 kN trat nicht ein. Ursachen dafür liegen in dem frühen Versagen des Glasfasergurtes, der deshalb an der Trägerunterseite der Zugbelastung nicht standhalten konnte. Vielmehr war nicht das Glasfaserband das schwache Element sondern der Verbindungspunkt am Auflager. Da

das Glasfaserband nicht gerissen ist sondern sich relativ sauber von der Verbindung gelöst hat ist der Fehler im Verarbeitungs- und Herstellungsprozess zu vermuten. Es ist anzunehmen, dass sich schon während der Laminierarbeiten des Unterzugbandes ein Stabilitätseinschnitt erfolgte, da es einen unbeabsichtigten Unfall mit einer Verdünnungsmittellösung gab. Aus zeitlichen Gründen war eine Überarbeitung uns leider nicht möglich. Da die gewünschte Unterzugverstärkung aus Glasfaser somit nicht vollständig wirken konnte, kann angenommen werden, dass der Träger auch ohne diese Verstärkung die Bruchlast von 3802,6 N erreicht hätte. Aus diesem Wert und dem Eigengewicht des Trägers von 986 g ergibt sich eine Leichtbaukennzahl von 385.



$$F_{\max} = 3802,6 \text{ N}$$

Abb. 9 Bruchtestdiagramm (Kraft - Durchbiegung)

Turbo 2K

1. Motivation

Große Spannweiten und wenig Material verlangen ein optimiertes Tragwerk.

Präzise Verarbeitung und eine wohlüberlegte Auswahl der Materialien sind dafür unbedingt Voraussetzung. Die experimentelle Ermittlung anhand der Form und des Materials führt zu einem optimierten Tragwerk wie es mit Hilfe rechnerischer Modelle allein nicht möglich ist.

2. Aufgabenstellung

Anhand einer vorgegebenen Auflagersituation sollte eine material- und strukturoptimierte Konstruktion entwickelt werden. Die Möglichkeit der Verwendung unterschiedlicher Tragsysteme, Querschnittsprofile und Baustoffe sollten dabei konsequent genutzt werden. Das Ziel bestand im Entwurf und der Herstellung einer leichten, hochtragfähigen und möglichst Verformungsarmen Konstruktion.



Abb. 1: TWL - Team

3. Die Idee

Die Kraft nimmt den kürzesten Weg. Aus diesem Grund entschieden wir uns für die Aufteilung unseres statischen Systems in wenige druck- und zugbelastete Bauteile. Vereinfacht kann man von zwei Dreiecken sprechen.

Wir lösten das Tragwerk in zwei Druckstreben auf, die in der Mitte auf einen Druckstab treffen, unter welchem ein Zugband verläuft. Im Auflager treffen sich Zugband und Druckstreben und sind dort kraftschlüssig miteinander verbunden:

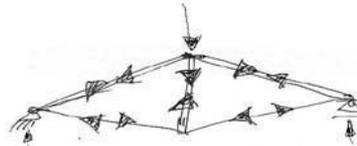
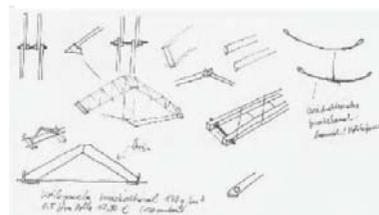


Abb.2: Skizze statisches System

Nachdem wir einen ersten Versuchsträger aus Holz und Metall gebaut und mit unserem Eigengewicht zerstört hatten, analysierten wir die Schwachpunkte. Die Auflösung der Druckstreben in zwei Teile hatte sich als der Schwachpunkt erwiesen. In späteren Berechnung ermittelten wir für die Geometrie unseres Trägers eine 3-fache Belastung der Druckstreben gegenüber des mittleren Druckstabes. Aus dieser Erkenntnis gewannen wir die Überzeugung, dass sich unser Hauptaugenmerk auf Form und Dimensionierung der beiden Druckschenkel zu richten hatte. Da diese Bauteile auch am Materialvolumen den voraussichtlich größten Anteil hatten, kam nun auch die Frage nach Gewichtseinsparung auf. Aufgrund des nicht zulässigen Gewichts des Versuchsträgers überlegten wir uns Materialalternativen und kamen auf Carbon.



Wegen den Materialkosten und unserer fehlenden Erfahrung in der Verarbeitung von Carbon verwarfen wir diese Alternative. Nach einer Konsultation mit FOMEKK und einer überschlägigen Gewichtsermittlung entschieden wir uns für die endgültige Variante mit folgendem Aufbau:

3.1. Druckstreben in Verbundbauweise

Dabei bildet 4 mm starkes Buchensperrholz ein Kastenprofil, welches mit 2-Komponenten Polyurethanschaum (Turbo 2k, Namensgeber unseres Trägers) ausgeschäumt wurde.



Abb.3. Trägerunterseite

Um das Knicken zu verhindern sind die Druckstreben in der Mitte verdickt. Der Verbund des Holzes und des Baumschaums gibt die Stabilität.

3.2. Druckstab

Als Material verwendeten wir Buche-Multiplex, welches zur Gewichtseinsparung ausgebohrt wurde. Der Stab dient gleichzeitig als Aufalger für den Krafteintrag.



Abb4. Druckstab

3.3. Zugband

Mit Hilfe von FOMEKK laminierten wir ein 4-lagiges Zugband aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Um ein Abscheren im Bereich des Druckstempels zu verhindern, wurde dieser sorgfältig ausgerundet. Ein Reißen des Zugbandes erwarteten wir aufgrund der hervorragenden Zugfestigkeit von GFK nicht.

3.4. Auflager

Als Knotenpunkt, in welchem Druckstreben und Zugband zusammenlaufen war eine präzise und wohlüberlegte Ausführung entscheidend: Kernstück bilden zwei geteilte Holzklötze aus Buche-Multiplex zwischen denen das Zugband verklebt und verdübelt wurde. Zur optimalen Aufnahme der Druckkräfte aus den Streben haben wir den oberen Auflagerklotz in den Sperrholz-Bauschaum-Verbund integriert. Die direkte Aufnahme der Druckkräfte aus den Sperrholzstreben geschieht durch Buche-Multiplex-Platten, die als Auflagerflanken mit den BM-Klötzen seitlich verdübelt sind.



Abb. 5. Auflagerunterseite

Zur erhöhten Stabilität wurden beide Klötze zusätzlich mehrfach verdübelt.



Abb. 6 Fertiger Träger

4. Bruchtest

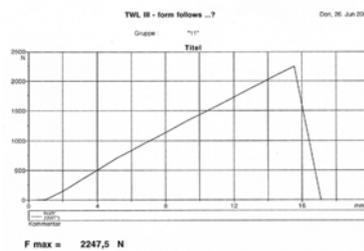


Abb. 7 Kraft/Verformungsdiagramm

Als Versagensursache erwarteten wir einen Bruch in einer der Druckstreben, da diese sich in unseren Berechnungen als schwächstes Bauteil herausstellten. Als Bruchlast ermittelten wir lediglich 700N. Dieser Wert erschien uns allerdings als nicht realistisch und ist in den sehr ungenauen Materialparametern des Bauschaumes begründet. Eigentliche Versagensursache war aber schließlich -ganz entgegen unserer Erwartungen- ein Riß des Zugbandes.

Die guten Verformungswerte, nämlich nur 17mm Durchbiegung und der fast linearen Kraft/Verformungskurve zeigen an dass das Tragwerk verformungssteif war.

Das Reißen des Zugbandes ist wahrscheinlich auf eine einseitige, außermittige Belastung des Zugbandes und auf eine daraus resultierende Reduzierung der wirksamen Zugbandbreite auf ein Minimum zurückzuführen.

Gründe dafür:

1. Reißen des Zugbandes aufgrund von Fertigungstoleranzen und eine Asymetrie in Längsrichtung des Trägers.

2. exzentrische Belastung im Zuge der Versuchsanordnung

Weitere in Betracht zu ziehende Gründe

Asymmetrische Belastung des Zugbandes aufgrund der Unverschieblichkeit durch Verklebung mit dem Druckstab

Beschädigung des Zugbandes bei der Fertigung (minimale Risse?)

Obwohl der Träger unsere Erwartungen übertroffen hat, und erst bei 2247,5N versagte sind wir der Mei-

nung, dass das Potential unseres Trägers nicht ausgereizt wurde. Dies schließen wir aus der Tatsache, dass ausgerechnet das -laut Rechnung- stärkste Tragwerksteil nachgab: das Zugband. Dies sollte eigentlich ca. 2t halten.

5. Fazit

Zieht man die möglichen Versagensgründe des Zugbandes in Betracht, so lassen sich folgende Konsequenzen ziehen:

1. Bei Beibehaltung des Zugbandmaterials:

- Noch präzisere Verarbeitung
- Keine Verklebung des Zugbandes mit dem Druckstab
- Sicherstellung einer exakten Ausrichtung des Trägers bei der Versuchsanordnung.
- Kreuzförmige Laminierung

2. Alternative Wahl des Zugbandmaterials:

- Verwendung von Materialien, die von der Krafrichtung unabhängiger sind (mehrdirektionale Gewebe, z.B. bidirektionales Kohlefaserband, Stahlseil)

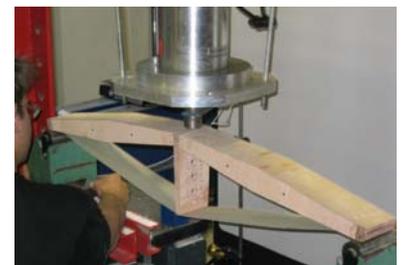


Abb 8. Versuchsanordnung



Abb 9 Crashed

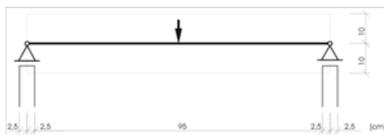
1. Seminaufgabe

1.1. Aufgabenstellung

„Entwickeln Sie eine material- und strukturoptimierte Konstruktion. Nutzen Sie dabei konsequent die sich bietenden Möglichkeiten der Verwendung unterschiedlicher Tragsysteme, Querschnittprofile und Baustoffe. Das Ziel ist der Entwurf und die Herstellung einer leichten, hochtragfähigen und möglichst verformungsarmen Konstruktion.“

1.2. Randbedingungen

maximales Eigengewicht des Modells: 1000g
 Modellmaterial(ien): frei wählbar
 Geometrie, Belastung und Auflagersituation



Modellbreite max. 10cm

1.3. Zielstellung

Der Träger soll sich durch eine hohe Leichtbaukennzahl Z_L auszeichnen. In unseren Betrachtungen beziehen wir uns auf ein Eigengewicht des Trägers von 1 kg und der angreifenden Last von angenommenen 1000 kg.

$$Z_L = \frac{G+P}{G}$$

$$Z_L = \frac{1\text{kg} + 10\text{kN}}{1\text{kg}} \quad 10\text{kN} \approx 1000\text{kg}$$

$$Z_L = \frac{1\text{kg} + 1000\text{kg}}{1\text{kg}} = 1001$$

So erhalten wir eine rechnerisch relativ hohe Leichtbaukennzahl von 1001. Im Bruchversuch wird diese jedoch aufgrund der Ausführung von Anschlussdetails nicht erreicht werden.

2. Projektbearbeitung

2.1. Vorüberlegungen

Durch Zeichnungen und Arbeitsmodellen entwickelten wir verschiedene Formen von Tragsystemen, die dem Prinzip einer Unterspannung folgten.

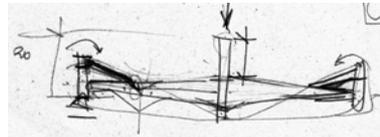


Abb. 1: Ideenskizze



Abb. 2: erstes Arbeitsmodell

Die Arbeitsmodelle sollten uns die Funktionsweise der eigenen Idee verdeutlichen.



Abb. 3: aufgelöster Fachwerkträger

2.2. Das Tragwerk

Wir haben einen unterspannten Träger, der symmetrisch aufgebaut ist, gewählt.

Über eine Freistütze, die als Druckstab fungiert, wird die angreifende Last direkt in die Unterspannung eingeleitet. Der verbindende Druckstab zwischen den Auflagern setzt den dort entstehenden Horizontalkräften im vorgegebenen Lastfall eine entsprechende Druckkraft entgegen.



Abb.4: Arbeitsmodell mit einfacher Unterspannung

3. Das 1:1 Modell

3.1. Die Geometrie des Trägers

Fachwerkträger:

Der Fachwerkträger ist aus Eschenholz hergestellt. Die Ober- und Untergurte sind als liegende Rechteckprofile ausgebildet, um die Knickgefahr in Richtung der y-Achse des Trägers zu minimieren. Die Berechnungen der Kräfte im Fachwerkträger zeigen, dass nur in der mittleren Vertikalaussteifung Lasten aufgenommen werden müssen. Deshalb hat dieser einen größeren Querschnitt als die anderen Aussteifungen. Die übrigen Stäbe sind im idealen Lastfall Nullstäbe. Der mittige Vertikalstab verhindert das Spreizen der Gurte, die anderen verringern im Idealfall nur deren Knicklänge.

Unterszug:

Aufgrund des leichteren Gewichts, im Vergleich zu einem Gewindestab, und der einfacher herzustellenden Anschlüssen fiel die Entscheidung auf ein Seil für die Unterspannung. Dieses wird zwischen den Auflagern geführt und mittig von der Druckstütze umgelenkt. Da in der Automobilindustrie Bowdenzüge für große Zugkräfte eingesetzt werden, findet er für die Unterspannung des Trägers Anwendung.



Abb. 5: Anschlussdetail,
Seil an Druckstütze

Druckstütze:

Um die Knickgefahr der Druckstütze so gering wie möglich zu halten, fiel die Wahl auf ein Alu-Hohlprofil. Aufgrund der Konstruktion und des Gewichts (herstellerabhängig) müssen wir auf einen Rechteckquerschnitt, anstatt auf einen idealen quadratischen, zurückgreifen.

Jedoch zeigt die aufgeführte Rechnung das eine Knickgefahr bei der Druckstütze nicht besteht.

Die Wahl unserer Materialien für den Träger erfolgte hinsichtlich eines günstigen Verhältnisses von Gewicht zu aufnehmbare Last und der Machbarkeit von Detailanschlüssen.

So haben wir für die Druckstütze ein Aluminiumprofil, für die Unterspannung ein Drahtseil, für die Auflager Kirschholz und für die Fachwerkträger Esche gewählt. Esche zeichnet sich durch hohe Festigkeiten und Elastizität parallel zur Faserrichtung aus. Kirschholz weist eine hohe Biegezugfestigkeit auf.

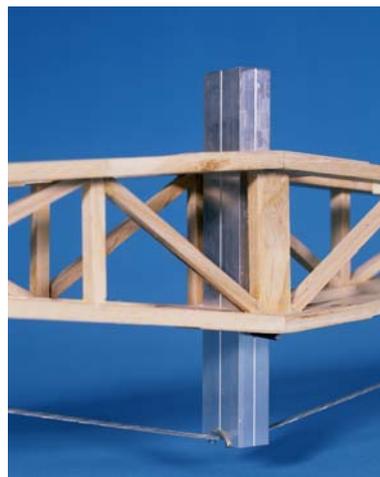


Abb. 6: Druckstütze

4. Der Bruchtest



Abb. 7: fertig gestellter Träger

Das offizielle Wiegen ergab ein „Kampfgewicht“ von 936g.



Abb. 8: Einspannung

Der Träger wird in die versuchstechnische Vorrichtung gestellt und justiert.



Abb. 9: Träger unter Krafteinwirkung



Abb. 10: „Schaltput“

Der Träger wird durch die steigende Krafteinwirkung bis zum Bruch belastet.

5. Die Auswertung

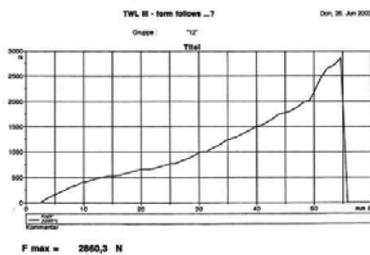
Bis zu einer Last von ca. 2kN erfolgt die Einleitung der Kraft in die Unterspannung durch den Druckstempel. Das Zugelement ist nicht im überschlägig dimensionierten Querschnitt ausgeführt worden, deshalb ist die Längenänderung des Bowdenzuges infolge der Krafteinwirkung enorm gewesen. Das verwendete Zugelement erfüllte nicht die erhoffte Materialqualität. Durch dessen Dehnung ist der Hub rasch maximal ausgelastet gewesen. Die Krafteinleitung erfolgt daraufhin unmittelbar auf den Fachwerkträger. Dieser hat die massive Änderung des Krafteintrages bis zu einer Größenordnung von 2,8 kN kompensieren können, ehe er versagt ist



Abb. 12: gebersteter Fachwerkträger



Abb. 13: zerstörtes Auflager



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
G [g]	126	269	863	222	561	634	416	750	996	988	945	936	712	765	903
F _{max} [N]	305	520	355	1077	362	920	614	670	540	3803	2248	2800	1735	5355	
LBKZ	72	193	41	485	616	251	1476	89	542	386	238	305	244	609	
F _{max} /3	301											953			
σ [mm]												56			
"E"															
244,73															

Abb. 14: „Ranking“-Liste

Die zu erwartende Bruchstelle ist im Anschlußdetail von Träger und Auflager entstanden. Die Auflager haben die Längskräfte aus den Gurten als eine Art Widerlager aufgenommen. Durch die direkt auf dem Träger anliegende Kraft ist in das System des Fachwerkträgers eine Biegung eingeleitet worden. Das Auflager hat das entstandene Biegemoment nicht aufnehmen können und infolge dessen ist der Träger geberstet.



Abb. 11: TWL - Team

Blue Banana

Idee

Der Träger sieht nicht nur sportlich aus, sondern hat auch einen ebensolchen Hintergrund.

Der ursprüngliche Gedankenanstoß war eine zufällige Entdeckung aus dem Radsport, die wir versuchten, auf die gestellte Aufgabe zu übertragen.

Das Fahrrad, mit dem Jan Ullrich diese Saison unterwegs ist, besitzt einen Rahmen aus extrem dünnwandigen Aluminiumrohren, die allein nicht in der Lage zu sein scheinen, den auftretenden Biege- und Torsionsbeanspruchungen eines solchen Sportgerätes zu widerstehen. Zur Erhöhung der Steifigkeit wurden Teilbereiche des Rahmens deshalb mit einem „Hartschaum“ (Katalogtext des Herstellers Bianchi) ausgefüllt.

Das Ergebnis ist ein Verbundsystem, bei dem sich die Hülle und der Kern mit ihren jeweils unterschiedlichen Materialeigenschaften gegenseitig ergänzen.

Dieses Prinzip kann im doppelten Sinn analog auch auf einen Träger auf zwei Stützen übertragen werden:

Die Herausforderung sowohl für Fahrradkonstrukteure als auch für uns, liegt zum einen darin, bei einem möglichst geringen Eigengewicht einen hohen Lastwiderstand bei geringer Verformung zu erzielen. Ein Rahmenrohr eines Fahrrades kann hier als Teil eines Fachwerkträgers interpretiert und für weitere Betrachtungen isoliert werden.

Zum anderen erschien uns eine Beschränkung auf ein homogenes, wie beschrieben synergetisch wirkendes Tragsystem als ein interessantes Leichtbauprinzip, bei dem auf jegliche Verbindungselemente verzichtet werden kann.

Dadurch werden nicht nur die Querschnitte der verwendeten Materialien und damit das Gewicht



Abb.2: Bianchi XL EV 3



minimiert, sondern vor allem auch viele potentielle Schwachstellen ausgeschlossen.

Material

Zunächst experimentierten wir vergleichend mit Wasserflaschen aus Polyethylen, die dünnwandig und leicht verformbar sind.

Dabei interessierte uns erst, da wir nun schon einmal bei diesem Vergleich waren, auch der Effekt, den man beobachten kann, wenn man eine solche, mit kohlen-säurehaltigem Wasser gefüllte Flasche schüttelt, also einen Überdruck erzeugt, der die Wasserflasche enorm stabilisiert.

Ausgehend von der Annahme, Luft sei einer der leichtesten Baustoffe, versuchten wir mittels Bauschaum einen Überdruck im Innern der Flasche zu erzielen. Dieser erwies sich jedoch als nicht dauerhaft und handwerklich schwer kontrollierbar. Deshalb konzentrierten wir uns auf eine direkte Druckverteilung durch Schaum innerhalb einer relativ labilen Hülle.

Auch zeigten die Experimente, daß eine gleichmäßige Struktur des Bauschaums kaum zu gewährleisten ist. Um also von vornherein, durch unregelmäßige Luft einschüsse verursachte, Schwachstellen des Tragsystems auszuschließen, griffen wir auf Styrodur zurück.

Es konnte nun auch als Positivform für die Hülle dienen, welche wir aus Glasfilamentgewebe und Epoxidharz herstellten.

Formgebung

Ausgehend von einem Biegeträger in rechteckiger Form, versuchten wir das Volumen dem, mit Arbeitsmodellen überprüften, Kräfteverlauf entsprechend zu minimieren. Es entstand eine Trägerform, die dem Moment einer mittig

ansetzenden Punktlast die größtmögliche statische Höhe entgegengesetzt. Der Träger beschreibt aus Sorge um die Stabilität der Auflager nur eine leichte Überhöhung von drei Zentimetern.

Der für die Druckverteilung wesentlich wirksame Obergurt weist einen konstanten Querschnitt über die gesamte Trägerlänge auf, während die Zugunterseite konisch schmaler wird.

Die Rundungen sparen Gewicht und sind zur optimalen Verlegung von Glasfasermatten unerlässlich, tragen aber natürlich auch zum sportlichen Erscheinungsbild bei...

Das Laminat wurde intuitiv nach der zu erwartenden Belastung der jeweiligen Trägerbereiche in drei bis fünf Schichten aufgebracht.

Zur besseren Verteilung der Punktlast verstärkten wir die Oberseite mit einem Flachstahl, damit diese nicht zu früh einreißt.

Gewicht

Der Grundkörper aus Polyesterolschaumstoff wiegt ungefähr 280g, das Laminat 240g, die Stahlplatte 140g und der blaue Lack etwa 50g. Das ergibt ein genaues Gesamtgewicht von 712g.

Bruchversuch

Das Verhalten des Trägers während der praktischen Prüfung lässt sich in drei Phasen teilen.

Die eingeleitete Kraft bewirkte eine sofortige Verformung, stieg aber bis zu einer Prüflast von 1250N linear an.

Diese Phase reicht vom Beginn der Krafteinleitung bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Stahlplatte, wie wir es erwarteten, in das Trägervolumen hineingedrückt wurde.

In der zweiten Phase ändert sich das geschlossene Tragsystem durch den größer werdenden Riß

in der Oberseite in ein offenes System, bei dem die Kraftverteilung, auch aufgrund der leider nunmehr asymmetrischen Lastwege, ständig variiert.

Die Durchbiegung des Trägers nimmt hier stark zu, wobei die Last noch auf 1734,9N gesteigert werden konnte.

Die dritte Phase zeigt schließlich das plötzliche Versagen des gesamten Systems, als die Zugbeanspruchung an der Trägerunterseite zu groß wurde und diese mittig reißt.

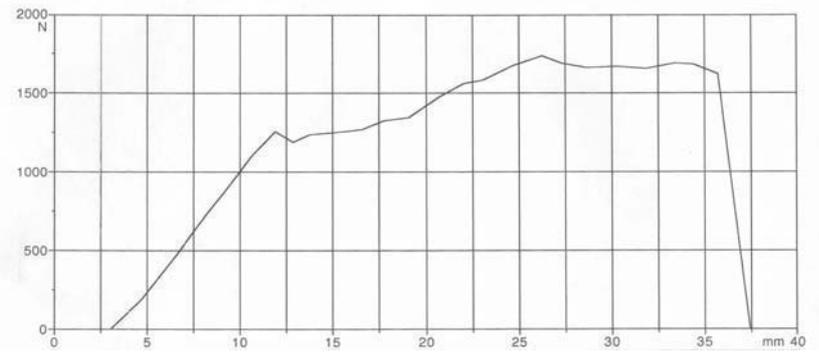


Abb.4: Kraft-Verformungsdiagramm

Verbesserungspotential

Die Art der Lasteinleitung als Punktlast setzt einem homogenen Biegeträger wie unserem, der prinzipiell eher für Streckenlasten geeignet scheint, deutliche Grenzen. Dennoch bietet er in der Herstellung und vor allem auch in der Risikominimierung einige Vorteile.

Das größte Verbesserungspotential sehen wir bei unserem Träger in einer modifizierten Druckverteilung auf der Oberseite. Damit würde sich der Träger erst bei einer höheren Last so weit verformen können, daß der Zugwiderstand an der Unterseite nicht mehr ausreicht.

Zu erreichen wäre dies beispielsweise mit einer über die gesamte Länge des Trägers aufgesetzten Platte, die aus Gewichtsgründen in ihrer Stärke nach außen hin abnehmen und vielleicht auch aus einem anderen Material sein sollte.

Im Hinblick auf die Leichtbaukennzahl wäre allerdings eine veränderte, integrierte Ausformung der Trägeroberseite vorteilhafter.



Abb.3: Detail Auflager beim Laminieren



Abb.5: Bruchversuch

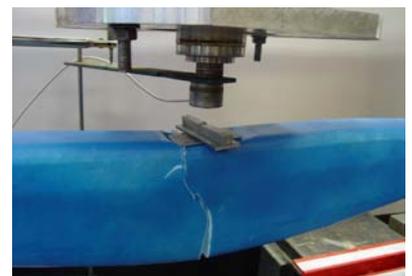


Abb.6: Schadensbild

1. form follows ...

1.1. Idee

Die Aufgabe, die unserer Konstruktion zugrunde liegt, lautete mit möglichst wenig Materialeinsatz (Masse < 1kg) für eine maximale Belastung die Entfernung von 1m zu überbrücken.

Aufgrund der uns bekannten Ergebnisse vergangener Semester erkannten wir, dass es erfolgversprechend ist, druck- und zugbeanspruchte Konstruktionselemente strikt voneinander zu trennen, um so ungünstige Momente und Biegung zu vermeiden. Unsere Idee lehnt sich am Siegerentwurf des vergangenen Jahres, dem X-Wing an.

Ein Druckstempel überträgt über ein Stahlseil die Last in einen Druckstab. Entgegen dem X-Wing wollten wir uns von Anfang an auf einen einzelnen Druckstab beschränken, der mittig zwischen einem zweigeteilten Druckstempel liegt.

Diese Idee erschien uns vom Konzept her am klarsten und sie ermöglichte unserer Meinung nach auch eine bestmögliche Optimierung des Materialeinsatzes.

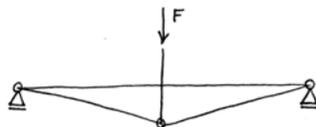


Abb. 1: Das statische System

1.2. Material

Da der Druckstab auf einer Strecke von einem Meter gedrückt wird und dabei relativ schlank ist, ist für den Druckstab die Gefahr des Knickens sehr groß. Dieser Gefahr entgeht man am besten mit einem großen, und da das Knicken um alle Achsen gleich wahrscheinlich ist, mit einem gleichmäßigen, am besten runden Querschnitt.

Nach ersten Gewichtsschätzungen schied Holz aus, da nur ein Vollprofil von geringem Durchmesser in Frage gekommen wäre. Ein Aluminiumrohrprofil erschien uns aufgrund seiner Materialeigenschaften (geringe Dichte von etwa 27 kN/m³ bei hoher Festigkeit und

leichte Bearbeitbarkeit) am geeignetsten für unsere Aufgabe.

Wir setzten ein Höchstgewicht von 500g für den Druckstab an. Damit kamen wir auf einen handelsüblichen Querschnitt von 29,5mm bei einer Wanddicke von 2,4mm. Als für die Druckspannung relevante Fläche standen uns somit 204 mm² im Druckstab zur Verfügung.

Leider war es uns nicht möglich herauszufinden welche Aluminiumlegierung wir verwenden.

Die Festigkeitswerte schwanken zwischen 60 N/mm² für hochreines Aluminium bis 430 N/mm² (Al-Cu-Mg-Legierung). Da wir vermuten, dass unser Aluminiumdruckstab weder aus hochreinem noch aus hochwertig legiertem Aluminium besteht, haben wir eine Al-Mg-Legierung mit einer Festigkeit zwischen 100 und 145 N/mm² angenommen.

1.3. Belastung

Im Druckstab ist in etwa die 2 ½-fache Druckbeanspruchung zu erwarten wie im Druckstempel. Aufgrund der 2-Teilung des Druckstempels halbiert sich für jeden Stab desselben die Belastung. Dadurch konnten wir diese Stäbe auch sehr schlank ausführen. Auch für die beiden Auflagepunkte halbiert sich die eingeleitete Kraft jeweils.

Die Zugseile werden in etwa mit dem 2 ½-fachen der Kraft belastet, wie sie auf das System einwirkt

1.4. Details

Für die hohe Belastbarkeit der Konstruktion von großer Bedeutung war die Frage, wie wir die Elemente der Konstruktion miteinander verbinden können, so dass die Kräfte optimal vom Druckstempel in die Zugseile und von diesen wiederum in den Druckstab und die Auflagepunkte geleitet werden. Vier Voraussetzungen waren zu beachten:

1. Die Kräfte Müssen sich möglichst in jeweils einem Punkt schneiden um Momente und damit Biegebeanspruchungen zu vermeiden

2. Der Druckstempel bedarf einer Führung, es muss aber ein Verkanten des Druckstempels ver-

hindert werden, um den Druckstab keiner Biegung auszusetzen

3. Die Auflagerpunkte müssen so ausgeführt werden, dass das Rohrprofil an dieser Stelle nicht (platt-) gedrückt wird.

4. Um ein unnötiges Verformen der Konstruktion zu vermeiden muss diese vorgespannt werden.

Während es zwischen Druckstempel und Zugseil relativ problemlos möglich war, die Kräfte sich optimal schneiden zu lassen (das Zugseil läuft durch Kerben direkt unter den Druckrohren), gibt es in den Auflagepunkten eine leichte Verschiebung der Kraftlinien um etwa 10 mm.

Das resultiert sowohl daraus, dass in den Auflagepunkten ein Perdinaxzylinder eingefügt werden musste um einer Verformung des Rohres an dieser Stelle vorzubeugen als auch daraus, dass wir den Mechanismus zum Vorspannen der Konstruktion in den Enden des Druckstabes untergebracht haben.

Die Führung des Druckstempels wird durch links und rechts mit dem Druckstab verbundene Aluminiumflügel gewährleistet. Zusammen mit einem weiteren Flügel an der Unterseite erhöhen diese auch die Knickstabilität des Druckstabes. Die Flügel sind mit dem Druckstab mit hochfesten Kleber aus der Automobilindustrie verklebt. Auch der Druckstempel ist verklebt.

Für die auf Zug belasteten Seile der Konstruktion verwenden wir 3 mm starke Bowdenzüge aus Stahlseil. Verbunden werden die Stahlseile mit handelsüblichen Seilklemmen.



Abb. 2: Seitenansicht des Trägers

1.5. Gewicht

Gliedert man die Elemente der Konstruktion nach Art der Belastung (Zug, Druck, Verbindungen) und ihrer Masse auf, kommt man zu folgendem Ergebnis: Die Zugbeanspruchten Glieder bringen mit 195 g die geringste Masse auf die Waage. Der Druckstab ist mit einer Masse

von 515 g das schwerste Element der Konstruktion. Zusammen mit dem Druckstempel ergibt das für die Druckbeanspruchten Glieder eine Masse von 130 g. Die Verbindungselemente wiegen zusammen 135 g. Insgesamt wiegt die Konstruktion 975 g.

1.6. Prognose

Für den Bruchversuch war unsere Vermutung, dass der Druckstab bei einer möglichst hohen Belastung ausknicken wird oder, dass es zum Versagen des Zugseiles kommt. Interessant für uns war, wie sich die geklebten Verbindungen bei sehr hoher Belastung verhalten würden und ob die angeklebten Flügel dem Knicken des Druckstabes entgegenwirken können. Wir rechneten mit einer Bruchlast von etwa 10 kN und somit einer Leichtbaukennzahl von etwa 1000.

1.7. Bruchversuch

Für die Leistungsfähigkeit der Träger beim Bruchversuch entscheidend sind 2 Werte. Zum einen die maximal aufgenommene Last und zum zweiten das Maß der Verformung in Abhängigkeit von der Last. Aus der Maximallast und dem Eigengewicht des Trägers kann man dann die Leichtbaukennzahl ermitteln, die es ermöglicht, die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Träger zu vergleichen.

Da wir unsere Konstruktion vorgespannt hatten, konnte sie von Beginn an die eingetragene Last aufnehmen ohne sich nennenswert zu verformen. Erst mit stark zunehmender Last begann der Druckstab sich zu unserem Erstaunen bedrohlich nach unten durchzubiegen.

Im ersten Moment schien es so, als ob sich der Druckstempel in seiner Führung verkantet hätte. Bevor jedoch die Durchbiegung des Druckstabes zu dessen Versagen führen konnte, hielt eine der beiden Unterlegscheiben an den Enden des Druckstabes der Belastung von mittlerweile immerhin 5934,7 N nicht mehr stand und gab nach. Die Verformung war bis zum Versagen des Trägers trotz der Durchbiegung des Druckstabes mit

knapp 46 mm vergleichsweise gering.

Nach der Belastung kehrte der Druckstab nahezu vollständig in seinen Ausgangszustand zurück. Außer den beiden Unterlegscheiben blieben alle anderen Elemente des Trägers unversehrt. Nach dem Bruchversuch ließ sich eine Leichtbaukennzahl von 608,7 ermitteln.

Die Ergebnisse des Bruchversuchs lagen somit unter unseren Erwartungen.

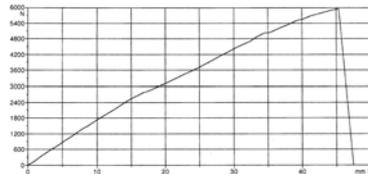


Abb.3: Last-Verformungsdiagramm

1.8. Versagensursache

Es hat nicht wie vorher prognostiziert und während des Bruchversuchs erwartet der Druckstab nachgegeben.

Die Unterlegscheiben, von denen schließlich eine nachgegeben hat, schienen ausreichen stark gewesen zu sein. Jedoch wird nach einigen Überlegungen klar, dass sie als einzige Elemente der Konstruktion auf Biegung belastet wurden. Während sie, unter Vernachlässigung der Reibung, in der Mitte mit reichlich dem 2,5-fachen der in den Träger eingetragenen Last in Richtung Trägermitte gezogen wurden, drückten sich ihre Ränder mit nahezu der gleichen Kraft gegen den Druckstab. Die Unterlegscheiben verformten sich so lange, bis sich die Mutter am Ende des einen Gewindestabes, an denen die Zugseile befestigt waren, durch die Unterlegscheibe durchstanzte.



Abb. 4: durchstanzte Unterlegscheibe

1.9. Fazit

Der Träger hat nicht vollständig unsere Erwartungen erfüllt, allerdings hat sich gezeigt, dass

die Trennung der zug- und druckbeanspruchten Glieder und die Vermeidung von Biegung erfolgsversprechend sind. Allerdings wären bei einem erneuten Versuch einige Details unseres Trägers zu überarbeiten: Zum einen die Unterlegscheiben von denen eine versagte. Sie müssten stärker dimensioniert werden und zum anderen die Führung des Druckstempels durch die Dreiecke um so eine Verkantung noch mehr zu reduzieren. Die bewusst in Kauf genommene geringfügige Verschiebung der Kraftflusslinien in den Auflagern war sicherlich auch ein Grund dafür, dass es zu einer leichten Biegung des Trägers kam. Dies verdeutlichte sich bei der Begutachtung des Trägers nach dem Bruchversuch. Die Verschiebung betrug 10 mm (siehe oben) und erzeugte ein kleines Moment was ausreichte, den Druckstab zum Knicken nach unten zu „verleiten“. Allerdings ist nicht ganz klar, wie sich der Druckstab ohne dieses kleine Moment verhalten hätte. Höchstwahrscheinlich hätte er versucht nach seiner schwächsten Seite, nach oben (da hier der seitlich angeklebte Flügel fehlt), auszuweichen. Möglicherweise hätte der Druckstempel ab einer bestimmten Durchbiegung des Druckstabes die Last direkt in diesen eingeleitet und somit seiner Durchbiegung entgegengewirkt. Eine unsichere Größe für uns waren die geklebten Verbindungen. Hier sind unsere Erwartungen von den Ergebnissen übertroffen worden. Der Karosseriekleber ist nicht nur extrem zugfest sondern auch sehr elastisch. Er machte alle Verformungen des Druckstabes mit, ohne dass nur eine Klebestelle nachgab.



Abb. 5: Ansicht des Trägers



Abb.3: Der Druckstempel, Detail