

F max = 6141,2 N

Kraft-Durchbiegungs-Diagramm ::  
Verformung durch Dehnung und Schlupf des Dyneema®-Seils

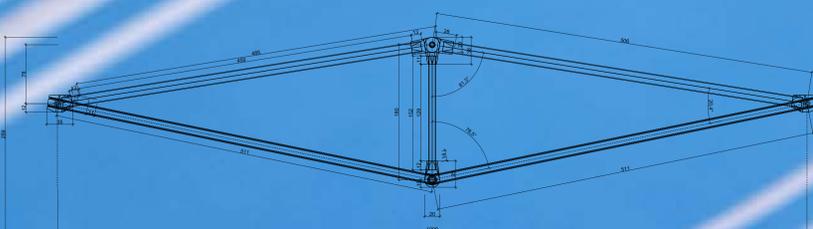


Auflager :: Symmetrie durch doppelt geführte Seilschlaufen (oben)  
Zugseldurchführung :: gegenläufig geführte Seile steifen aus (unten)



Der "Twin Power" ::  
Doppelt geführte Konstruktionsebenen

Konstruktionszeichnung :: Abgabemodell des "Twin Power"  
ansicht m\_1:3.3



aufsicht m\_1:3.3



seitenansicht m\_1:3.3



### 1. Konzept und Entwicklung

Wir entschieden uns, das System des Vorjahressiegers auf seine Schwachstellen hin zu untersuchen und zu optimieren. Knackpunkte waren 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. So konnten wir die Knicklänge dieser materialintensiven Druckkomponenten halbieren und deren Masse deutlich reduzieren. Die Ausgangsgeometrie verwandelte sich dabei vom Tensegrity zum einfachen Dreieck. Wir ergänzten das System um einen weiteren gelenkig angeschlossenen Druckstab, der die Last vertikal auf das Zugseil überträgt, und verdoppelten so bei geringem Gewichtszuwachs die statische Höhe des Trägers. Aus dem Dreieck wurde ein einfaches Fachwerk.

### 2. Materialauswahl

Bei der Wahl der Materialien entschieden wir uns hinsichtlich des 1000g-Limits für bewährte Materialien aus der Drachenbauszene. Versuche am Arbeitsmodell zeigten Defizite in der Konstruktion: das Seil schürfte 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 riss an der Stelle mit dem stärksten Knick, da der Umlenkradius zu klein war.

#### 2.1. 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 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.

#### 2.2. Druckstäbe

Die Hauptdruckstäbe sind aus gewickeltem CFK-Rohr, um Längsrisse zu vermeiden und die Widerstandsfähigkeit gegen Knicken und Beulen zu erhöhen. Ihr Durchmesser beträgt 16/14mm (1mm Wandstärke), der Faseranteil beträgt 60-65%. 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 ein gezogenes CFK-Rohr mit 10/8mm Durchmesser. Die Rohre sind mit Epoxidharz in die Gelenke eingeklebt.

#### 2.3. Gelenke

Da die von uns gewünschte hochfeste Aluminiumlegierung AlZnMgCu1,5 nicht kurzfristig erhältlich war, verwendeten wir für die Herstellung der Gelenke AlMgSi1 als 25 mm Vierkantprofil. Die Gelenke sind in Handarbeit gefertigt und weitestgehend gewichtsreduziert.

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

### 4. Bruchversuch

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. 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 bei 6141,2 Newton zum Ausknicken der Hauptdruckstäbe und damit zum unmittelbaren mittigen Bruch zuerst eines, dann auch des benachbarten Druckstabes.

### 5. Resümee

Die Topologie des "Twin-Power" versagte an der erwarteten schwächsten Stelle. Die langen CFK-Druckstäbe sind das labilste Glied, da sie der Knickbeanspruchung mit ihrem Rohrquerschnitt widerstehen müssen. Eine aufgesteckte Rohrhülse hätte die Tragfähigkeit des Systems also noch weiter erhöht. Durch eine andere Zugseil-Variante 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". Diese Verbindung zeigte unter voller Beanspruchung viel Schlupf. Das AlMgSi1 hat sich zwar als Material für die Auflager und Gelenke bewährt. 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.