

GLEITSCHIRM-DESIGN

# Interaktion von Aerodynamik und Strukturverformung

## Teil 3: Ballooning and Flügel-Verformung

TEXT DR.-ING. HORST ALTMANN

Nachdem im ersten Beitrag dieser Artikelserie die Fluid-Struktur-Kopplung als realitätsgerechte Rechen-Methode vorgestellt wurde, folgte im zweiten Beitrag gleich die Anwendung auf Leinen-Analysen hinsichtlich beanspruchungsgerechtem Design der Leinen, optimierte Galerieleinen und Leinenkräfte. In diesem Beitrag wollen wir auf eine spezielle Eigenheit des Gleitschirms schauen: Das Aufblähen der Zellen (Ballooning).

### Warum Ballooning?

Der Mechanismus des Aufblähens ist nicht auf den Gleitschirm beschränkt. Aufblähen tritt überall dort auf, wo eine Druckdifferenz (allgemeiner gesagt: normal wirkende Kräfte) mithilfe einer flexiblen, elastischen Haut gehalten wird. Typische Beispiele sind das Stoffdeck eines Cabrios, Schlauchboot und Luftmatratze oder ein Luftballon. Bei diesen Beispielen gilt: Die biegeweiße, dünne Membran kann die Belastung nicht direkt wie eine steife Platte aufnehmen, sondern reagiert mit Dehnung und Krümmung (Luftballon macht dies sehr deutlich). Infolge der Dehnung bauen sich in der Membran Spannungen auf. Die Krümmung sorgt dafür, dass diese Spannungen mit ihren kleinen normalen Anteilen die Druckdifferenz halten.

Ist die Druckdifferenz konstant und das Material gleichmäßig, wie z.B. bei der Luftmatratze, resultiert eine gleichmäßige Krümmung und damit kreisbogenförmige Aufblähungen. Wer einen Gleitschirm-Flügel im Landeanflug etwas genauer betrachtet, erkennt leicht das ungefähr kreisbogenförmige Ballooning des Ober- und Untersegels. Das Flügeltuch ist recht steif, so dass die notwendigen Dehnungen für das Erzeugen der Tuch-Spannungen sehr klein bleiben und auf die Verformung deutlich weniger Einfluss haben als das flexible Ballooning.

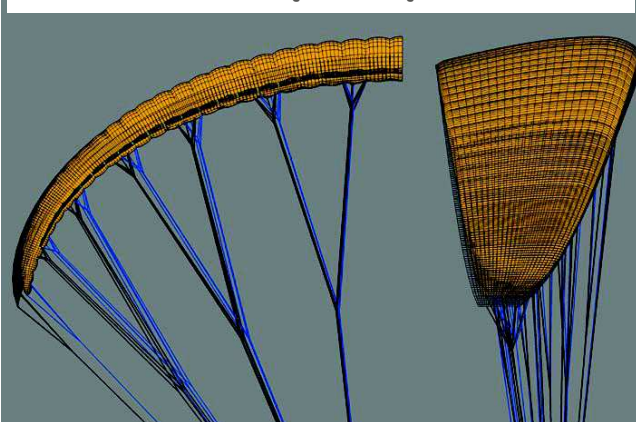
### Wie verändert Ballooning den Flügel?

Zur Untersuchung des grundlegenden Ballooning-Phänomens ist der Beispiel-Flügel (vorgestellt im 1.

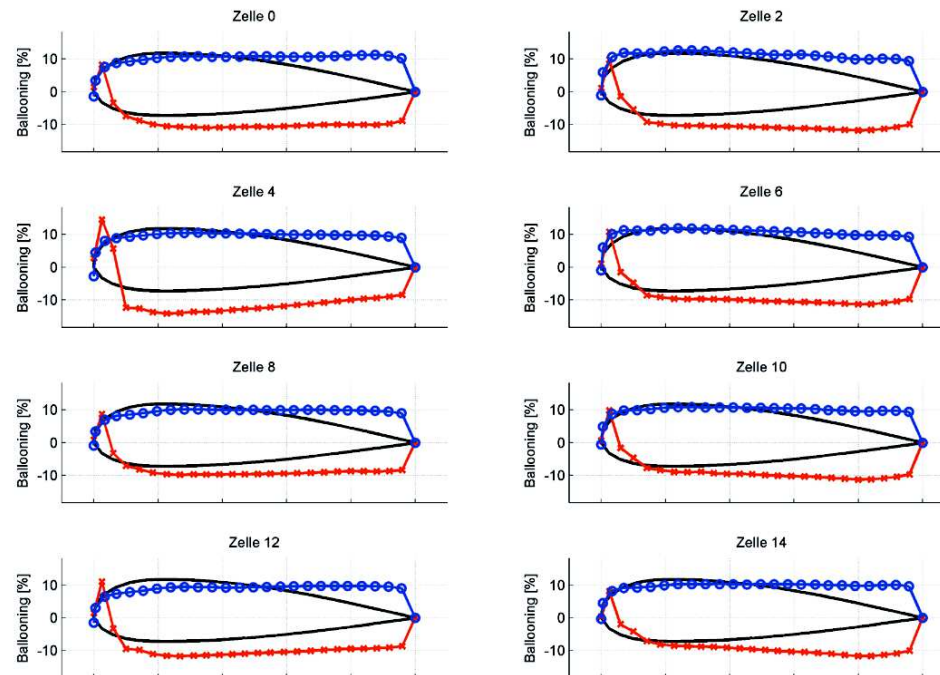


Foto: Martin Schöfel

Ballooning und Verformung



Charakteristik des Ballooning



Artikel, DHV-Info 163) in jeder Zelle mit 5 Ebenen von Zwischen-Knoten modelliert. Die gekoppelte Rechnung liefert am Ende den aufgeblähten, verformten Flügel und aus den bestimmten Knoten-Koordinaten kann das lokale Ballooning abgelesen werden. Das Bild zeigt den verformten Flügel in Front- bzw. Seitenansicht. Als Referenz ist die ursprüngliche Design-Geometrie als schwarzes Gitter unterlegt.

Aus dem Bild kann man im Wesentlichen zwei Verformungs-Arten erkennen: Man hat ein deutliches Ballooning, was sich natürlich auch in einer Spannweitenverringering (ca. 3% ausgelegte Spannweite) mit einhergehender Verschiebung der Leinen zeigt (blau sind die Leinen mit Flügelverformung, schwarz die Referenz). Zudem ergibt sich auch ein „Vorbiegen“ des Flügels, wie die Seitenansicht zeigt (gut 50 mm am Stabilo). Untersuchungen an verschieden stark zurückgefeilten Flügel-Variationen zeigen, dass an dem moderat zurückgefeilten Beispiel-Flügel der Zug an den am Außenflügel bereits leicht nach vorne ausgerichteten Leinen zum „Vorbiegen“ führt. Nicht so gut sichtbar, aber vorhanden ist ein Zusammenziehen der Profile in Längsrichtung (ca. 1%).

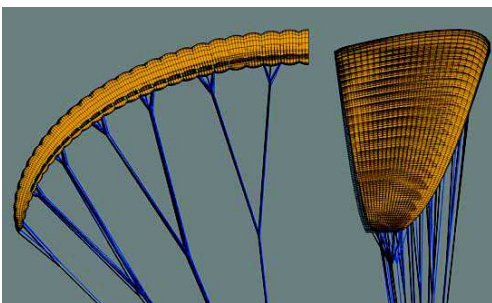
### Charakteristik des Ballooning

Eine detaillierte Auswertung des Ergebnisses zeigt in der Mitte der Zellen eine über den Flügel leicht inhomogene Dickenzunahme im Rahmen von 2,2% bis 3,1%. Die Form der Aufblähung quer über eine Zelle ist generell ein flacher Kreisbogen. Bezieht man die maximale „Höhe“ der Kreisbögen auf die lokale Zellbreite, erhält man im Schnitt als Maximalwert pro Zelle ca. 12% Ballooning sowohl an der Ober- wie auch an der Unterseite (hier tendenziell etwas mehr). Am Stabilo nimmt das Ballooning zu, wobei das stärkste Ballooning in der hinteren Hälfte des Profils auftritt und die Unterseite deutlich stärker aufbläht als die Oberseite (das kann man bei Gleitschirmen meist gut erkennen).

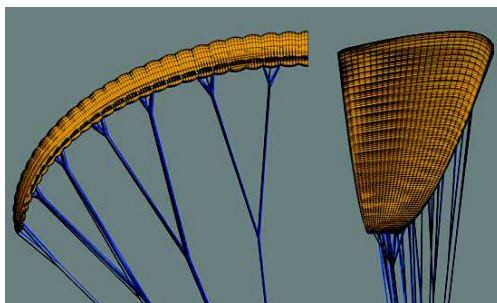
Das nächste Bild zeigt an ausgewählten Zellen das Ballooning (immer als Verhältnis von Kreisbogenhöhe zu lokaler Zellbreite) der Ober- und Unterseite entlang des Profils. Dabei gilt die blaue Kurve für die Oberseite und die rote für die Unterseite (mit negativen Werten geplottet für verbesserte Darstellung). Die Nummerierung der Zellen läuft von der zentrale Mittel-Zelle (Nummer 0) aufsteigend nach außen.

Auffällig ist sofort der relativ flache Verlauf ent-

lang der Ober- wie auch Unterseite außerhalb von Nase und Hinterkante. An der spitzen Hinterkante ist Ballooning nicht möglich, in welche Richtung sollte sich die Hinterkante auch aufblähen. Die Verläufe fallen daher dort spitz gegen Null ab. An der Nase ist das Ballooning ganz leicht negativ, weil dort das Segel sogar leicht eingedrückt ist (vergleiche auch das Titelfoto zum 1. Artikel im DHV-Info 163). An der Oberseite steigt das Ballooning über die ersten ca. 10% der Profiltiefe auf seinen typischen Wert an. Von der Nase weg nach unten hat man erst eine zunehmende Eindellung (Staupunkt), die sich dann bald (unterhalb der Eintrittsöffnung) in ein Aufblähen nach außen umkehrt und bis ca. 20% der Profiltiefe ansteigt. Der weitgehend flache Verlauf des Ballooning lässt sich in der hinteren Hälfte des Profils durchaus mit einer dort herrschenden relativ konstanten Druckverteilung erklären (siehe auch das Bild mit der Cp-Verteilung im 1. Artikel/DHV-Info 163). Wie kommt es aber im oberen, vorderen Drittel des Profils zu diesem weitgehend flachen Verlauf, obwohl doch dort die Sogspitze herrscht? Weiter oben wurde ausgesagt, dass das Segeltuch zur Aufnahme der normal wirkenden Drücke Dehnung und Krümmung braucht. Wo der Flügel wenig



Eingeschränkte Verformung dank Ballooning-Vorgabe



Kaum Verformung dank Ballooning-Vorgabe und Vorspannen

„natürliche“ Krümmung besitzt, ist Ballooning die notwendige Reaktion. An der Nase aber hat der Flügel bereits eine starke Krümmung infolge des Profils (diesmal aber in Längsrichtung) und kann dies auch ausnützen, um die Sogkräfte nicht quer über den Flügel sondern vielmehr leicht diagonal nach vorne über die Rippen in die A-Leinen einzubringen. Das Ergebnis der Strukturrechnung zeigt im Nasenbereich auch diese Diagonal-Spannungen (auf das komplexe Bild verzichte ich hier mal). Bestätigt wird dieses Ergebnis auch aus der Beobachtung, dass das Obersegel an diesen Stellen quer zu diesen Diagonal-Spannungen Falten wirft. Manche Hersteller gehen auch dazu über, die Struktur des Segelmaterials an der Nase entsprechend diagonal auszurichten.

### Flügelverformung mit Ballooning-Vorgabe

Die modernen CAD-Tools erlauben den Designern, die schädlichen Auswirkungen des Ballooning bereits im Ansatz zu kompensieren, indem man im Entwurf auf die berechneten Segelbahnen das erwartete Ballooning addiert. Welches Verbesserungspotential drin ist, kann man mit der hier vorgestellten FSI-Methode theoretisch bestimmen. Dazu wurde aus der obigen Ballooning-Charakteristik ein etwas vereinfachter Verlauf abgeleitet und als Ballooning-Vorgabe in das Struktur-Modell eingebracht. Das nächste Bild zeigt wieder die resultierende Verformung des Flügels.

Aus dem Vergleich mit dem Flügel ohne Ballooning-Vorgabe sieht man schnell, dass nun der Spannweiten-Verlust deutlich geringer ausfällt. Damit bleibt auch die Leinen-Geometrie weitgehend unbeschadet erhalten und der Flügel steht und fliegt besser. Interessant ist noch zu bemerken, dass sich auch mit erhöhtem Ballooning ein Spannweiten-Ver-

lust kaum vermeiden lässt, es kommt hauptsächlich zu verstärktem, unschönen und wirkungslosen Ausblähen. Die Rechnung zeigt nun aber auch, dass der Außenflügel verstärkt vor biegt. Und dagegen ist was zu tun.

### Vorspannen und eine Alternative dazu

Die Ballooning-Vorgabe führt weiterhin zum Vor-Biegen des Flügels. Um den Flügel wieder gerade zu rücken, kann man mit Gegenspannung dem übermächtigen Zug der A-Leinen entgegenwirken. Die Hersteller greifen dazu in die Trickkiste und verkürzen als Gegenmaßnahme die Hinterkante. Man kann dies einbringen, indem man zum Beispiel ein entsprechend gekürztes Band in die Hinterkante einnäht oder alternativ die Segelbahnen am hinteren Ende verjüngt. Damit wären Ballooning-Vorgabe und Vor-Spannung mit der gleichen Technik (Anpassen der Segelbahnen) gelöst. Dieses Vorspannen der Hinterkante lässt sich leicht simulieren und mit ca. 1,5% Verkürzung bekommt man wieder einen ausgeglichenen Flügel.

Diese Methode verursacht aber hohe Spannungen an der Hinterkante mit evtl. ungünstigen Hand-

ling-Eigenschaften. Eine Design-Alternative dazu wäre, die nominelle Leinen-Geometrie mit dem Segelschnitt eines stärker rückgepflegten Flügels zu kombinieren. Die Rechnungen zeigen, dass man schon einiges an Rückpfeilung dazugeben muss, um am Ende wieder einen ausgeglichenen Flügel zu erhalten. Der Beispiel-Flügel hat eine nominelle Rückpfeilung von 50 % (100% würden eine gerade Hinterkante bedeuten). Erhöht man für den „vorgespannten“ Flügel die Rückpfeilung auf 65 %, liefert die Rechnung am Ende einen Flügel, der unter Verformung dem idealen Design recht nahe kommt, siehe letztes Bild.

### Ausblick

Die vorgestellte Rechen-Methode mit Kopplung von Aerodynamik und Struktur erlaubt vieles, aufgezeigt wurden: Leinen-Optimierung, Ballooning und Segel-Vorspannung. Weitere mögliche Anwendungsgebiete wären zum Beispiel beschleunigter Flug (dazu müsste man im Modell nur die Tragegurte kürzer definieren) oder Konzepte mit minimierter Leinen-Anzahl.

Jetzt ist aber erst mal gut, der Laptop soll abkühlen und ich will fliegen gehen ...

Anzeige

**Gleitschirm- und Drachen-Beschriftungen. Perfekt und sicher.**  
 Infos: +49(0)8051 63676 [www.gh-werbeschriftungen.de](http://www.gh-werbeschriftungen.de)

Anzeige

GO FURTHER. GIN

**sprint** Produkt entwickelt von Red Bull

**SPRINT X-alps** LTF 1-2 EN B  
 Jetzt Probefliegen bei allen GIN Partnerdistributoren.

**FREUEN SIE SICH AUF FLUGSPASS DER EXTRAKLASSE UND TECHNISCHE PERFEKTION BIS IN KLEINSTE DETAILS**

Sprint X-alps, die perfekte Kombination von Flugstabilität, hoher Leistung, Strapazierfähigkeit und Leichtigkeit für Paratrekking und Crosscountry Flüge.

**NEU! Der BOLERO 4** LTF 1 EN A übertrifft alle Erwartungen...  
 easy - präzise - stark - hochwertig - elegant  
 ein verlässlicher Partner vom Übungshang bis zu echten Streckenflügen.

ideal in Kombination mit GIN's neuem, leichtem Komfort-Wendegurtzeug VERSO

GIN Partner Deutschland  
 GLEITSCHIRMSCHULE TEGERNSEE GMBH · [www.gleitschirmschule-tegernsee.de](http://www.gleitschirmschule-tegernsee.de) | SKY TEAM PARAGLIDING · [www.sky-team.de](http://www.sky-team.de)  
 DASE FLUGSCHULE PETER GEG GMBH · [www.oase-paragliding.de](http://www.oase-paragliding.de) | SÜDDEUTSCHE GLEITSCHIRMSCHULE · [www.einfachfliegen.de](http://www.einfachfliegen.de)

GIN Partner Österreich  
 FLUGSCHULE STEIERMARK · [www.flugschule-steiermark.at](http://www.flugschule-steiermark.at) | parateam Pannonia · [www.parateam-pannonia.at](http://www.parateam-pannonia.at)  
 FLIGHT CONNECTION ARLBERG · [www.fca.at](http://www.fca.at) | FLUGSCHULE AUFWIND · [www.aufwind.at](http://www.aufwind.at) | FLUGSCHULE TERNBERG · [www.flugsport.com](http://www.flugsport.com)