Ballooning-Simulation

Der Ballooning-Effekt aus wissenschaftlicher Sicht

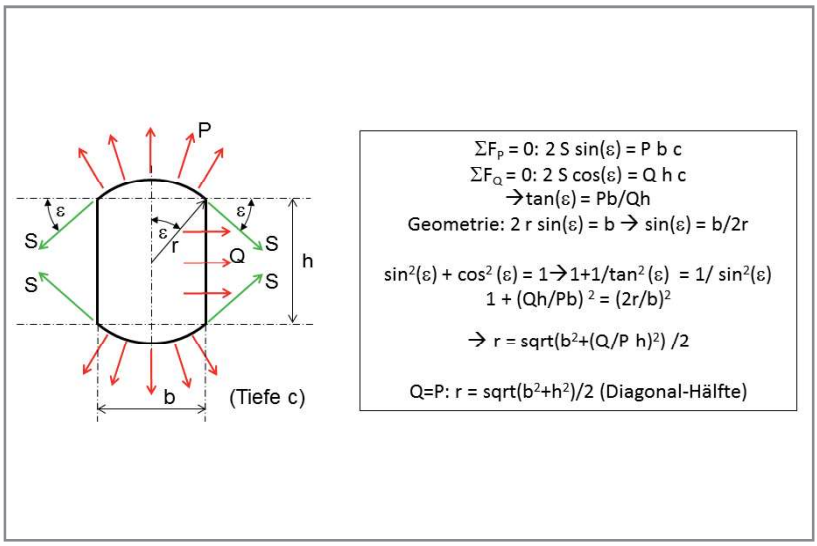
Text und Bilder: Horst Altmann

Der Gleitschirm ist ein genial einfach konzipiertes Luftsportgerät mit einzigartigen Eigenschaften. Wir können ihn auf ein kleines Volumen mit geringem Gewicht zusammenfalten und bequem im Rucksack auf den Berg transportieren. Beim Start wird im Inneren des Flügels Staudruck aufgebaut und im Flug möglichst aufrechterhalten, der den Flügel aufpumpt und so Formstabilität verleiht. Der Druckunterschied zwischen Flügelinnerem und den Flügelaußenflächen hat dabei ein Aufblähen der Zellen zur Folge, kurz Ballooning genannt. Dieses Phänomen wird mit diesem Artikel genauer untersucht und Grundsätzliches mittels gekoppelter Struktur/Aerodynamik-Simulation (FSI = fluid/structure interaction) aufgezeigt.

Grundsätzliches zum Ballooning

Ein Gleitschirm ist eine textile Angelegenheit: Der Flügel mit Unter- und Obersegel sowie Rippen, Bändern und Verstärkungen besteht aus orthogonalem, luftundurchlässig beschichtetem Gewebe. Gurtbänder und daran befestigte hochfeste Leinen, die sich zum Flügel hin aufgabeln, stellen die Verbindung

von Pilot zum Flügel dar. Daneben haben flexible, biegeweiche Kunststoffstäbchen zur lokalen Verstärkung und auch zum Vorspannen im Nasenbereich Einzug in die Konstruktion gefunden. Im Gegensatz zu den flexiblen Hängegleitern und Starrflüglern kennt das Gleitschirm-Design keine starren Strukturelemente wie Stäbe (Querrohr) oder Balken (Flügelrohr). Die Festigkeit des Gleitschirm-Flügels wird durch Einfangen des Staudrucks über die Öffnungen an der Nasenunterseite erzielt, was den Flügel aufpumpt und so möglichst unter Spannung und damit belastungsfähig hält. Mit dem hohen Innendruck ergibt sich so auf das Unter- und Obersegel eine normal gerichtete Druckkraft von innen nach außen. Da die dünne, flexible Segelhaut diese Druckkraft nicht wie eine steife Platte aufnehmen kann, muss sie mit zwei Dingen reagieren: erstens eine gekrümmte Form einnehmen und zweitens durch elastische Dehnung Spannungen aufbauen. Dabei bleiben die Dehnungen aufgrund der hohen Festigkeit der in das Segeltuch eingearbeiteten Fäden gering – die flexible, gekrümmte Auswölbung der Oberfläche ist allerdings deutlich! Dieses notwendige und unvermeidliche Aufblähen der Stoffmembran wird als Ballooning bezeichnet. In der Technik findet man dieses Phänomen an allen dünnwandigen Membran-Strukturen, die mit einer Druckdifferenz belastet werden, z. B. Luftmatratze, Fahrradschlauch oder auch Luftballon (klein wie auch groß).

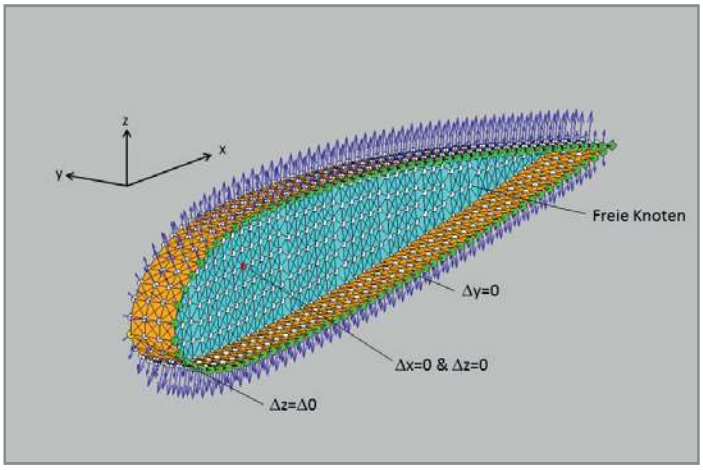


1: 2D-Theorie Ballooning

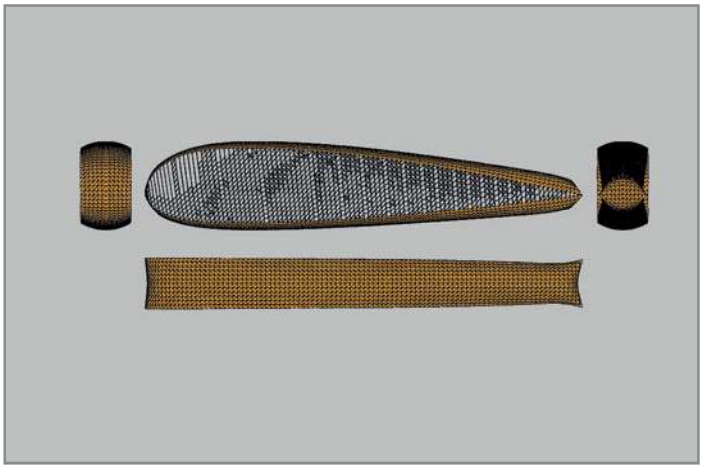
Abbildung 1 zeigt eine einfache 2D-Theorie zum Ballooning, die mit Ausnahme von gekrümmter Flügelnase und spitzer Hinterkante das Ballooning entlang einer Gleitschirm-Zelle (Breite b, Höhe h, Tiefe c) gut beschreiben sollte. P ist dabei die Druckdifferenz am Segeltuch, Q die Druckdifferenz an einer Rippe und S steht für die Zugkraft im Segel. Der Kasten enthält die herrschenden Kräftegleichgewichte und den geometrischen Zusammenhang zwischen Krümmungsradius und Zellengeometrie, so dass sich folgende wesentlichen Aussagen ableiten lassen: Für Q=P fällt das Ballooning-Zentrum mit dem Zellen-Mittelpunkt zusammen und der Krümmungsradius ist gleich der halben Zellen-Diagonale. Am Gleitschirm-Flügel findet man diese Konstellation an der äußersten Zelle, wo es über die Rippe hinweg wegen des freien Flügelendes tatsächlich zu einer Druckdifferenz kommt. Wer mal genau hinschaut, kann an der letzten Zelle das deutlich ausgeformte Ballooning erkennen – am besten sieht man das an einer angehängten letzten Zelle, die nicht mehr über die Stabilo-Leinen belastet wird. Für Q=0 (oder auch h=0) ist der Ballooning-Radius gleich der halben Zellbreite – die Oberfläche formt einen Halbkreis aus. Diese Verformung findet man an einer klassischen Röhren-Luftmatratze, bei der die Rippen von beiden Seiten mit gleichen Druck beaufschlagt werden (oder die Rippen praktisch nicht vorhanden sind: h=0). Im Gleitschirm-Flügel sind die Rippen wegen des konstanten Innendrucks auch kräftefrei, allerdings ergibt sich aus der Flügelzuspitzung und der spannweitigen Kappenkrümmung eine Zugkraft, die das übertriebene halbkreisförmige Aufblähen deutlich verringert. Mehr dazu später bei der Modellierung einer realistischen Gleitschirm-Zelle.

Modellierung der Struktur

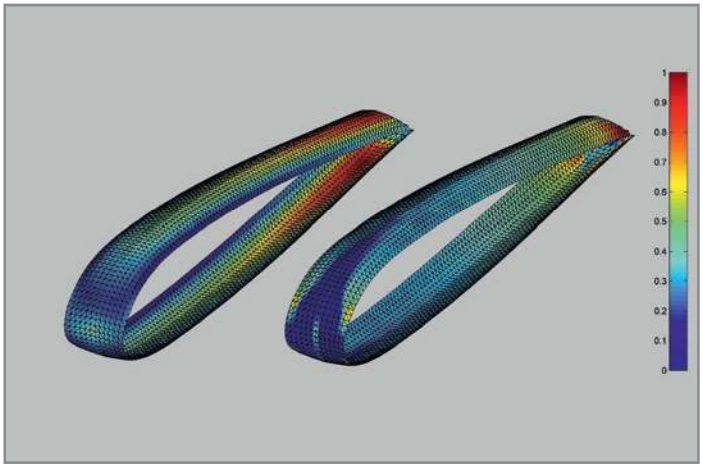
Die Geometrie der im Folgenden betrachteten Struktur ist an eine zentrale Zelle eines typischen EN-A Flügels angelehnt mit Abmessung 3 m x 0,35 m (Tiefe x Breite) bei 17% Dicke und 2% Wölbung. Die Auflösung dieser Geometrie für eine numerische Behandlung erfolgt über eine Repräsentierung von sog. Knoten, die hier strukturiert im Segel und Rippe definiert sind, siehe Abbildung 2. Jeder Knoten ist über seine drei räumlichen



2: Finite-Element-Modell der Zelle



3: Die aufgepumpte Zelle in Mehrseitenansicht



4: Verformung (links) und Krümmung (rechts)

Koordinaten erfasst und bezüglich seiner Bewegungsfreiheit definiert. So gilt z.B. für die Knoten in der Symmetrieebene der Zelle, dass die y-Koordinate mit 0 fixiert ist. Zur Simulation der Struktur sind nun zwischen den Knoten elastische Elemente definiert. Bei dem vorliegenden Problem mit großen flexiblen Verformungen (aber nur kleinen elastischen Dehnungen) ist das Segeltuch lokal auf Einzelfäden in Tiefen-, Quer- und Diagonalrichtung zusammengefasst (schwarze Linien in der Abbildung). Diese Modellierung erlaubt eine robuste Verformungsrechnung und Isolation von rein druckbeaufschlagten Elementen. Flächenhaft verteilte Druckkräfte sind lokal zusammengefasst und als Einzelkraft auf einen Knoten aufgebracht (blaue Pfeile in der Abbildung).

Isolierte Zelle unter Innendruck

Als erstes Beispiel wird die Zelle allein unter Innendruck untersucht: Dabei herrscht im Inneren der Staudruck bei typischer Fluggeschwindigkeit, außen am Profil ist gleichmäßiger Umgebungsdruck angenommen. Dies entspricht eigentlich einer aufgepumpten Zelle und dient hier als anschaulicher Testfall zur Validierung der Methodik und Aufzeigen erster wesentlicher Ergebnisse. Damit die Rippe wie im Fall einer real verbauten Zelle eben bleibt, ist die Druckkraft auf die Rippe nicht flächig verteilt, sondern am Rand entlang angeordnet. Die statische Lagerung der Zelle besteht wie in Abbildung 2 gezeigt aus einem in x und z fixierten Knoten inmitten der Rippe (roter Knoten), einer in z fixierten Nase (gelber Knoten) und den in der Symmetrieebene y-fixierten Knoten (grün).

Abbildung 3 zeigt die sich unter der beschriebenen Belastung einstellende Geometrie in verschiedenen Ansichten. Das zentrale Aufblähen des Stoffes (Ballooning) ist sehr deutlich zu erkennen – hieraus resultiert dann auch an der Nase eine mittige Eindellung. Zur Hinterkante nimmt das Ballooning extrem zu und wird fast halbkreisförmig, wie von der einfachen 2D-Theorie (siehe Abbildung 1) vorhergesagt. An der Hinterkante selbst ergibt sich dann aufgrund der Verbindung von Ober- und Untersegel eine komplexe Gestalt mit extremen Einschnürungen. An der Stelle maximaler Profildicke zeigt die Ansicht von vorne ein kreisförmiges Ballooning von Ober- und Untersegel mit Zellendiagonale als Durchmesser – in Übereinstimmung mit der weiter oben vorgestellten 2D-Theorie. An diesem einfachen Beispiel der aufgepumpten Zelle werden bereits die Problembereiche Nase und Hinterkante auffällig. Moderne Gleitschirm-Designs nutzen daher 3D-Shaping im Nasenbereich und Mini-Ribs an der Austrittskante zur Optimierung. Die Verschiebung jedes Knotens in Referenz zu seiner ursprünglichen Position ist in Abbildung 4 links als Farbwert dargestellt. Entlang des Rippenumfangs wie auch an der Nase ist die Verfor-

mung gering (blaue Einfärbung) – zur Hinterkante hin wird die Ballooning-Verformung extrem (rote Einfärbung). Die 3D-Darstellung in Abbildung 4 zeigt die Krümmung in Spannweitenrichtung. Besonders auffällig ist hier die markante Abflachung im Nasenbereich, die sich mittig solange fortsetzt, wie bereits Membrankrümmung durch die ursprüngliche Profilform gegeben ist. Diese spezielle Verformung ist typisch für Gleitschirme und kann gut am fliegenden Exemplar beobachtet werden.

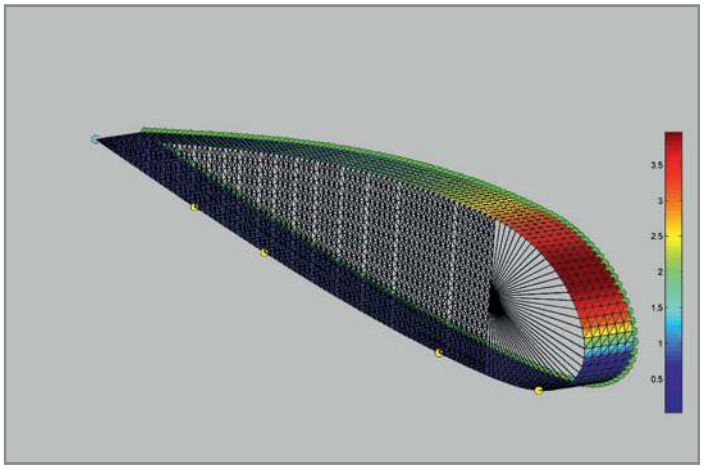
Isolierte Zelle bei Anstellwinkel 8°

Im nächsten Schritt wird die homogene Belastung durch eine aerodynamische Druckverteilung, wie sie bei 8° Anstellwinkel am Profil wirkt, ersetzt. Dies ist in Abbildung 5 als Farbwert dargestellt, die Skala rechts zeigt die Zuordnung von Farbe und lokaler Cp-Differenz. Zur realistischen Simulation wird das Profil an der Unterseite in vertikaler Richtung gefesselt (gelbe Knoten) – sie stehen für die Anbindung der Leinen am Untersegel. Die Hinterkante ist zusätzlich in x-Richtung fixiert (hellblauer Knoten), um das System statisch ausreichend zu lagern. Erste Simulationsversuche zeigten, dass bei dieser Anordnung die weiche Nase unrealistisch stark durch den Auftrieb nach oben gezogen wird. Moderne Designs beinhalten eine Nasen-Versteifung in Form von Mylar-Einlagen oder Stäbchen. Dies wird bei der vorliegenden Modellierung ebenfalls aufgegriffen, indem die bisherige netzartige Struktur im Nasenbereich der Rippe durch radiale Stäbe ersetzt wird (steife Nase).

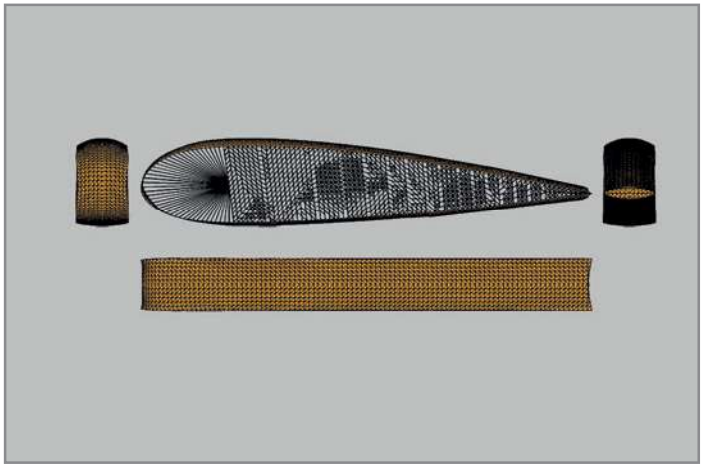
Die beiden folgenden Abbildungen zeigen das Rechenergebnis. Im Vergleich zur aufgepumpten Zelle fällt das Ballooning nun insgesamt geringer und asymmetrisch aus: Die Krümmung der schwach belasteten Unterseite ist deutlich geringer als das Ballooning am Obersegel. Auch nimmt das Ballooning nun zur Hinterkante hin nicht mehr extrem zu, das Verformungsmuster bleibt ab der maximalen Dicke etwa gleich. Der vorderste Nasenbereich zeigt eine moderate Eindellung und das Abflachen im mittleren, oberen Nasenbereich ist auch da.

Zusammenfassung

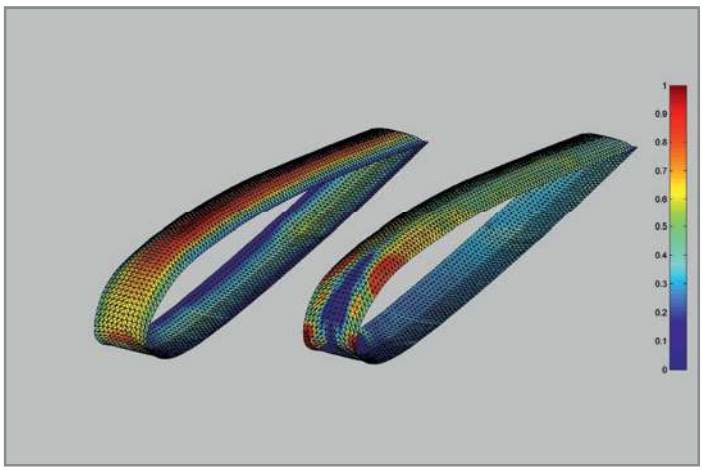
Mit der vorgestellten Methode einer gekoppelten Struktur/Aerodynamik-Rechnung lässt sich die Verformung einer isolierten Gleitschirm-Zelle recht realistisch bestimmen. Man bekommt die bekannten Phänomene des Ballooning – an der Oberseite stärker als an der Unterseite, Eindellen der Nasenspitze und Abflachen der Nasenoberseite. Weitere Analyseschritte, z.B. Untersuchung von Mini-Ribs an der Hinterkante und Optimierung der Segelbahnen hinsichtlich Vermeiden einer Querkontraktion (bekannt als 3D-Shaping) können damit in Angriff genommen werden.



5: Finite-Element-Modell der Zelle mit steifer Nase und Aufhängung



6: Die isolierte, aerodynamische Zelle in Mehrseitenansicht



7: Verformung (links) und Krümmung (rechts)