

Gleitschirm-Design 2.0

oder: Wie man die Interaktion von Aerodynamik und Strukturverformung simulieren kann

TEXT DR.-ING. HORST ALTMANN

Der Autor ist begeisterter Gleitschirm-Pilot und beschäftigt sich nebenher als promovierter Luftfahrt-Ingenieur mit einer innovativen Methode zur Berechnung von Gleitschirmen.

TEIL 2: OPTIMIERUNG DER LEINEN-GEOMETRIE

Im ersten Beitrag dieser Artikelserie ging es um die Vorstellung einer Rechenmethode zur realitätsnahen Untersuchung des Gleitschirms unter Berücksichtigung der Verformung, die sogenannte Fluid-Struktur-Kopplung. Nach all der grauen Theorie soll nun mit diesem zweiten Beitrag versucht werden, etwas „Nützliches“ für den allgemeinen Gleitschirm-Entwurf aufzuzeigen – schauen wir mal auf die Leinen.

Was ist das Leinen-Problem?

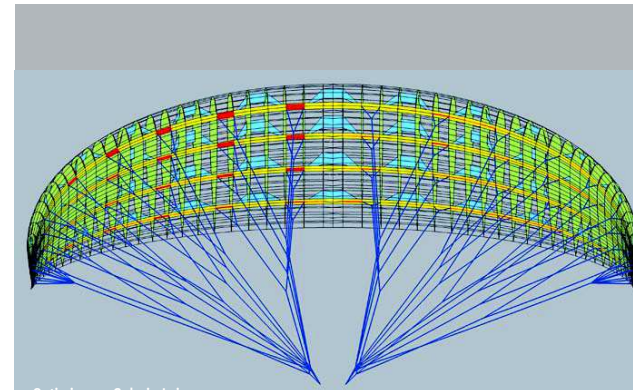
Die Funktion der Aufhänge-Leinen (inkl. Stammgurte) ist die Verbindung von (dem schweren) Pilot mit der auftriebserzeugenden Kappe. Die biegeweiße Leine hat die schöne mechanische Eigenschaft, dass sie nur Zug-Kräfte aufnehmen kann, und dabei ist die Richtung dieser Zug-Kraft durch die Orientierung der Leine selbst vorgegeben. Und das ist eigentlich schon das simple, aber entscheidende Design-Prinzip: Im Entwurf sollte das Leinen-Fachwerk vom Konstrukteur idealerweise genau so „getroffen“ werden, dass sich die aus der aerodynamischen Belastung resultierenden Aufhängkräfte genau parallel zu den konstruierten Leinenstücken einstellen.

Der Konstrukteur kennt aber nun beim Gleitschirm-Entwurf die Belastung der Leinen nicht genau und legt die Gabelungs-Punkte mithilfe des CAD-Programms eher nach geometrischen Gesichtspunkten. Diese Näherung kann dann dazu führen, dass die

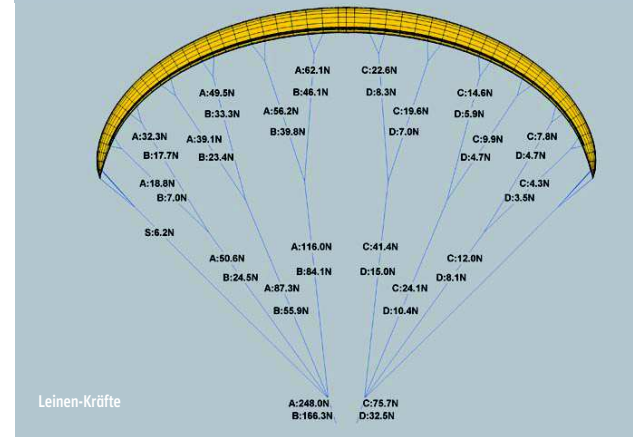
Orientierung einiger Leinenstücke nicht sauber zur tatsächlichen Aerodynamik passt. Als Konsequenz wird die Kappe ausweichen und damit die Gabelungsknoten so weit verrücken, bis die Leinen-Geometrie mit der Beanspruchung ausbalanciert ist. Im Ergebnis hat man dann aber eine verformte Kappe. Ich hoffe, ein Beispiel kann diesen komplexen Zusammenhang deutlich machen. Dem Beispiel-Schirm wurde ein völlig verunglücktes Leinen-Design verpasst: Anstatt z.B. die Zwischenleine (gemeint ist das Leinenstück zwischen Stammeine und Top-Gabel) mittig auf eine tragende Zelle auszurichten, wurde sie auf die innere tragende Rippe geführt. Zur Verdeutlichung dieses Design-Murks zeigt die Abbildung den unverformten Entwurf als schwarzes, durchsichtiges Gitter mit schwarzen Leinen. Die Simulations-Rechnung verdeutlicht, wie der Schirm (hellbraune Kappe, blaue Leinen) darauf reagiert: Es stellen sich unschöne Verformungen ein, die aber die Gabelungsknoten wieder in die Mitte rücken und so das System ins Gleichgewicht bringen.

Ansatz zur Optimierung

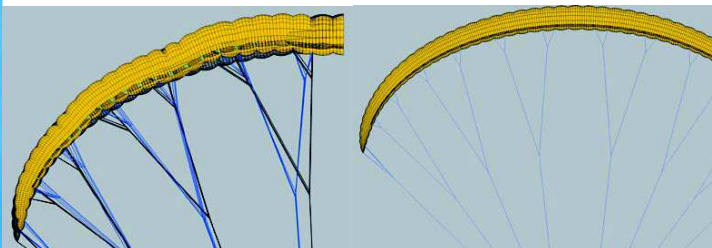
Die Modellierung und Simulation am Rechner ermöglicht die Realisierung eines step-by-step Ansatzes, der ein beanspruchungsgerechtes Design der Leinen verspricht: In einem ersten Schritt wird ein Flügel definiert, bei dem jeder Aufhängungspunkt am Segel mit einer durchgehenden Leine bis zur Einhängeschleufe verbunden ist (so ähnlich sahen die



Optimierung Galerie-Leinen



Leinen-Kräfte



Leinen-Murks

Optimal platzierte Leinen

ersten Gleitschirme aus). Mit der Simulations-Rechnung sind dann alle Leinen-Kräfte in Größe und Richtung bekannt. Bildet man nun die Resultierende aller Kräfte der Leinen, die mit dem A-Gurt verknüpft werden sollen, hat man schon die optimale Richtung für den A-Gurt. Gleiches gilt für die restlichen Stammgurte.

Im nächsten Schritt wird ein Flügel definiert, bei dem die Aufhängungspunkte am Segel mit durchgehenden Leinen an den jeweiligen Gurtschlössern verbunden sind. Durchrechnen und Zusammenfassen liefert so die optimalen Richtungen der Stammleinen. Der nächste Schritt liefert die Zwischenleinen und mit der Top-Gabelung ist das Leinen-Design schließlich komplett.

Die Durchführung dieser Rechnungen hat gezeigt, dass z.B. die äußeren Galerie-Leinen der D-Ebene durch die Kappen-Aerodynamik kaum belastet sind. Erst mit Berücksichtigung des Luftwiderstands an den Leinen (auch Leinen-Gewicht ist im Modell dabei) kommt es dort zu nennenswerten Zugkräften in

den Leinen. Bei vielen modernen Schirmen findet man tatsächlich eine Zusammenfassung der äußeren Top-Leinen der C- und D-Ebenen auf eine gemeinsame Zwischen-Leine.

Die nächste Abbildung zeigt als Ergebnis des vorgestellten step-by-step Ansatzes exemplarisch die Leinen der B-Ebene mit Stabulo. An dieser Stelle sollte man ein Lineal an die äußere Stammeine legen und den Schnittpunkt mit der Kappe überprüfen. Das ist eventuell deutlich weiter innen als „aus dem Bauch heraus“ vermutet?

Optimierung der Top-Leinen

Eine von vielen Eigenheiten des Gleitschirms ist die Transformation von flächig wirkenden Drücken am Segel auf diskrete Leinenkräfte an den Anleimpunkten. Der innere Aufbau des Schirms unterstützt diese Aufgabe wesentlich, indem die Leinenkräfte am Übergang von Top-Leinen ins Segel in Rippen, V-Tapes und (falls im Design vorhanden) quer verlaufende Zugbänder weitergegeben werden. Eine

Analyse der Struktur-Rechnung zeigt, dass die Kräfte in den V-Tapes relativ hoch sind. Sind dann (zu lang gewählte) Top-Leinen stumpf auf das Segel angeordnet, können die Kräfte der V-Tapes nicht vollends von den Leinen aufgenommen werden, so dass der Bereich zwischen den beiden Anleimpunkten (also der Bereich innerhalb der Gabelung der Top-Leinen) unter Zug steht. Verzichtet das Design an dieser Stelle auf ein Zugband, wird das ballooning (Aufblähen der Zellen) lokal behindert und damit die Anpassung des Segels an die Belastung gestört.

Der Optimierungs-Ansatz für die Top-Leinen besteht somit darin, den Öffnungswinkel gerade so zu bestimmen, dass die Leinenkraft sauber in Rippe und V-Tape übergeht und das Segel nicht zusätzlich beaufschlagt wird. Mit etwas Mechanik und Mathematik, das will ich hier aber den Lesern ersparen, lässt sich der optimale Gabelungs-Winkel berechnen und ins Design einbringen. Dieser Gabelungs-Winkel nimmt durchaus große Werte an, so dass auffällig kurze Top-Leinen resultieren (mit einem kleinen, positiven Nebeneffekt auf Gesamt-Widerstand).

Die nächste Abbildung verdeutlicht die Auswirkung optimierter Top-Leinen auf die Kappe: Die betrachtete linke Flügelhälfte hat typische, lange Top-Leinen; die rechte Flügelhälfte entspricht der Optimierung mit den kurzen Top-Leinen. Beide Flügelhälften sind an den Leinen-Ebenen mit durchgezogenen Zugbändern (gelb) ausgestattet, deren Belastung über die Strichstärke der eingezeichneten roten Linien wiedergegeben ist. Wie man sieht, führen die optimierten Top-Leinen zu einem effektiveren Kraftfluss mit Entlastung der Segel-Unterseite.

Beanspruchung der Leinen

Nach all den Überlegungen zur Optimierung der Leinen-Geometrie fehlt jetzt natürlich noch eine Übersicht zur Belastung der Leinen im Normalflug. Die nächste Abbildung zeigt am linken Halbfügel die Leinen-Kräfte für A-Ebene (obere Zahlen) und B-Ebene inklusive Stabulo (untere Zahlen). Rechts die entsprechenden Ergebnisse für C (oben) und D (unten). Die Werte machen es deutlich: Das Verhältnis von A-Leinen zu D-Leinen ist ca. 8:1. Da kann man schon drüber nachdenken, die D-Ebene einzusparen.

Was kommt noch?

Für das nächste Heft ist ein dritter Artikel angedacht, bei dem es dann schließlich um Aufblähen der Zellen (ballooning) und Flügel-Verformung geht. Es wird versucht, ballooning als notwendigen Mechanismus für die Kraftübertragung zu erklären, eine „optimale“ ballooning-Vorgabe zu identifizieren und einer ungewollten Verformung des Flügels mit „Vorspannen“ entgegenzuwirken. ▽