

Test Deckblatt

Projektarbeit auf dem Gebiet des Flugzeugbaus und Leichtbaus

Bearbeitungsdauer: 13 Wochen

Brack Tristan  
Golombek Hannes  
Kammler Hendrik  
Scholz Ole

Matr.-Nr.  
Matr.-Nr.  
Matr.-Nr.  
Matr.-Nr.

Ausgegeben am: 15.10.2020

Abgegeben am:

## Auslegung eines alternativen Modellflügels für das Flugzeug „Zaunkönig“ in Glasfaserverbund -Holm-Bauweise

### 1. Einleitung

Im Rahmen dieser Projektarbeit soll der Flügel des LF1 „Zaunkönig“ (siehe Abbildung 1) im Modellmaßstab 1:4,7, d.h. die Halbspannweite beträgt ca. 848 mm, ausgelegt werden. Aus der Auslegung des Gesamtflugzeuges resultieren entsprechende Anforderungen an den Flügel, welche im Zuge der Auslegung und Fertigung berücksichtigt werden müssen. Sowohl die konstruktiven als auch die strukturmechanischen Maßnahmen sollen mit Hilfe geeigneter Ingenieursmethoden erfolgen und begründet werden.

Zur Überprüfung der Auslegung sollen die Ergebnisse der Berechnungen mit Messergebnissen aus vorangegangenen Tests verglichen werden.



Abbildung 1: Seitenansicht LF1 "Zaunkönig"

## 2. Anforderungen/Vorgaben

### 2.1. Geometrische Vorgaben des Flügels

Bei dem Flügel des Zaunkönigs handelt es sich um einen Rechteckflügel (Zuspitzung  $\tau = 0$ , Pfeilung  $\phi = 0^\circ$ ). Vorflügel und Hochauftriebsklappen erstrecken sich über die gesamte Spannweite und sind jeweils an der Flügelwurzel, -mitte und -spitze mit dem Hauptflügel verbunden (bei  $\eta = \{0,0; 0,5; 1,0\}$ ). Darüber hinaus ist der Hauptflügel gegenüber dem Rumpf mit Verstrebungen am Punkt ( $\eta = 0,50$ ;  $\xi = 0,25$ ) abgestützt. Die Maße des Gesamtflügels sind Abbildung 2 sowie den beigefügten Anlagen zu entnehmen. Im Gegensatz zu dem originalen, abgestrebten Flügel des Zaunkönigs soll eine alternative Bauweise ohne Streben umgesetzt werden.



Abbildung 2: Bemaßte Front- und Draufsicht des LF1 "Zaunkönig"

### 2.2. Strukturmechanische Anforderungen

Für die strukturmechanischen Tests soll das Modell eines Halbflügels in Glasfaserverbund-Holm-Bauweise gebaut werden, der bei einer möglichst geringen Eigenmasse eine Prüfkraft von 500 N ohne Bruch erträgt. Dabei soll der Flügel sowohl auf Festigkeit als auch auf Steifigkeit ausgelegt werden. Eine hinreichende Steifigkeit ist gegeben, wenn sich der Flügel bei einer senkrechten Belastung von  $F_{\text{Prüf}} = 100 \text{ N}$  an der Flügelspitze (L/4-Punkt) um nicht mehr als  $z_{100\text{N}} = 22 \text{ mm}$  durchbiegt. Um die Hautdicke ausschließlich auf Festigkeit zu dimensionieren, aber frühzeitiges Beulen der Haut zu vermeiden, kann ein Sandwich-Aufbau an kritischen Bereichen und/oder Rippen gewählt werden. Es sind geeignete konstruktive Mittel zu überlegen um diese Vorgaben zu erreichen. Die Einhaltung der Anforderungen ist rechnerisch nachzuweisen.

Darüber hinaus soll der Torsionswinkel der Flügelaußenkante in Abhängigkeit einer exzentrischen, senkrechten Prüflast mit Hilfe der Theorie nach St. Venant berechnet werden.

### 2.3. Konstruktive Anforderungen

Der Hauptflügel des Zaunkönigs ist als Modellflügel in Glasfaserverbund-Holm-Bauweise umzusetzen. Vorflügel und Hochauftriebsklappen sind nicht auszuführen. Das aerodynamische Profil des Hauptflügels ist zu bewahren. Die V-Stellung des Flügels ist zu vernachlässigen. Als Kernmaterial steht Styrodur und Depron zur Verfügung. Die Faserorientierung der Gewebe ist im Einklang mit den durchgeführten Rechnungen belastungsgerecht zu wählen.

Die rumpfseitigen Einspannverhältnisse sind wie in Anlage C ausgeführt. Diese sehen eine wie bei Klein- und Segelflugzeugen übliche Konstruktion vor: Der Holm wird dabei im Rumpf mit der anderen Flügelhälfte verstiftet und jede Flügelhälfte stützt sich gegen den Rumpf wobei die Torsion mit Querkraftbolzen aufgenommen wird. Für den Flügelbau bedeutet dies, dass der Holm entsprechend Anlage C aus dem Flügel herausgezogen werden muss. Es sollte außerdem berücksichtigt werden, dass der Holm geeignet getapert wird, um Versagen im Einspannungsbereich zu vermeiden. An der freien Flügelspitze ist zur Lasteinleitung eine Endrippe vorzusehen, die die lösbare Montage der Endscheibe aus Anlage D erlaubt.

Der Flügel darf ein maximales Gewicht von 0,750 kg nicht überschreiten. Auf eine fertigungsgerechte Konstruktion ist zu achten.

### 3. Bewertungskriterien

Das Hauptaugenmerk der Konstruktion sollte, unter Einhaltung der zuvor genannten Randbedingungen, auf einem möglichst geringen Eigengewicht des Flügels liegen. Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Gruppen untereinander soll anhand der Masse  $m_{\text{Flügel}}$  entsprechend des gewichtsnormalisierten Festigkeitskriteriums  $m_{\text{Belastung,max}}/m_{\text{Flügel}}$  erfolgen, welches die ertragene Bruchlast mit dem Eigengewicht der Konstruktion ins Verhältnis setzt.

### 4. Aufgabenstellung

Um die oben beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

1. Einarbeitung in die Fragen der Anforderungen
2. Entwicklung konstruktiver und strukturmechanischer Lösungsansätze für die Faserverbund-Bauweise
3. Festlegung einer konstruktiven Lösungsvariante
4. Dimensionierung und Nachweis der gewählten Lösungsvariante mittels
  - a. Handbuchmethoden, sowie
  - b. Numerischer Methoden
5. Detailentwurf der dimensionierten Lösungsvariante
6. Auswertung, Vergleich und Diskussion der berechneten Daten (Biegung, Torsion, max. Bruchlast, Schubmittelpunkt)
7. Vergleich mit im Strukturtest ermittelten Daten und denen anderer Gruppen
8. Diskussion der Ergebnisse
9. Bewertung der eigenen Konstruktion und Diskussion einer Optimierung

Arbeitsteilung und -ablauf ist durch die Gruppe selbstständig zu organisieren. Theoretische Hintergründe, erstellte Modelle, sowie Vorgehensweisen, Entscheidungskriterien und gewonnene Ergebnisse sind sorgfältig zu dokumentieren. Die Verfasser der einzelnen Abschnitte des Abschlussberichtes sind zu kennzeichnen.

## 5. Literatur

- [A] Horst, P., (2013) 'Leichtbau I – Ingenieurtheorien des Leichtbaus' Vorlesungsskript. Braunschweig: Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
- [B] Ostermeyer, G.-P. (2010) 'Mechanik I' Vorlesungsskript. Braunschweig: Institut für Dynamik und Schwingungen
- [C] Horst, P., (2013) 'Finite Elemente Methoden I' Vorlesungsskript. Braunschweig: Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
- [D] Schürmann, H., (2007) 'Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden' Springer-Verlag Berlin Heidelberg

## 6. Anlagen

- [A] Merkblatt für die Anfertigung studentisch-wissenschaftlicher Arbeiten
- [B] Flügelkontur, Technische Zeichnung
- [C] Einspannung, Technische Zeichnung
- [D] Endscheibe, Technische Zeichnung

---

(Ort, Datum)

---

(Prof. Dr.-Ing. P. Horst)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bezeichnungen</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Hauptteil</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
3.1	Glasfaser . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Modellierung des Holms</b>	<b>7</b>
4.1	Annahmen zur Modellierung . . . . .	7
4.2	Analytische Lösung der Modellierung . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Auslegung des Holms nach VDI 2013</b>	<b>8</b>
5.1	Dimensionierung der Gurte . . . . .	10
5.2	Nachrechnung der angepassten Gurte . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>

## 1 Bezeichnungen

Alphabetische Ordnung!

Lateinisch vor griechisch, jeweils Groß- vor Kleinbuchstaben  
(lat. Großbuchstaben)

$A$  : Festlager

$B$  : Loslager

$E_{11}$  : Elastizitätsmodul des Verbundes in Faserlängsrichtung  $E_{f,11}$  : Elastizitätsmodul der Fasern in Faserlängsrichtung

$E_{f,22}$  : Elastizitätsmodul der Fasern in Faserquerrichtung

$E_M$  : Elastizitätsmodul der Matrix

$F_{pruef}$  : Prüfkraft an der Flügelspitze

$F_Q$  : Kraftaufnahme der Querkraftbolzen

$R_{||}^{(+)}$  : Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung des UD-Handlaminats  $R_{||}^{(-)}$  : Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung des UD-Handlaminats

(lat. Kleinbuchstaben)

$l_0$  : Länge des freien Endes

$l_1$  : Abstand der Lager A und B

$l_2$  : Abstand zwischen Lager B und den Querkraftbolzen

$l_3$  : Abstand zwischen den Querkraftbolzen und der Flügelspitze

$s$  : Halbspannweite

$w$  : Absenkung der Flügelspitze in negative z-Richtung

(griechische Kleinbuchstaben)

$\phi$  : Faservolumengehalt  $\rho_f$  : Dichte der Fasern  $\rho_m$  : Dichte der Matrix

## 2 Hauptteil

TEst Hauptteil

## 3 Grundlagen

### 3.1 Glasfaser

Test

## 4 Modellierung des Holms

### 4.1 Annahmen zur Modellierung

Das Koordinatensystem des Flügels entspricht dem Flugzeugkoordinatensystem, sodass die Flügellängskoordinate durch  $y$  definiert ist. Der Koordinatenursprung ist im Lager A positioniert.

Der Holm inkl. des Holmstummels wird für die Belastung durch eine Prüfkraft  $F_{pruef}$  in negative z-Richtung als Biegebalken ausgelegt. Dafür ist er an zwei Stellen gelagert, dem Lager A und Lager B, dabei repräsentieren sie die Verstiftungen (siehe Bauteil Ü-Profil). Um eine Überbestimmung des Systems zu vermeiden, wird das Lager B als Loslager angenommen. Die Querkraftbolzen werden nicht durch ein Lager, sondern durch eine zusätzlich angreifende Kraft  $F_Q$  simuliert, da keine Absenkung, sondern lediglich eine Kraftaufnahme der Wurzelrippen möglich ist.

Als Randbedingungen der Modellierung sind die Halbspannweite  $s$  und die Absenkung  $w$  gegeben. Für die Absenkung  $w$  soll eine Sicherheit  $j = 1,1$  gesetzt werden. Zwischen Lager  $A$  und  $B$  wird die Länge  $l_1$  angenommen, zwischen Lager  $B$  und der Wurzelrippe  $C$  die Länge  $l_2$ . Die verbleibende Länge bis zur Flügelspitze, an der die Prüfkraft  $F_{pruef}$  wirkt, wird  $l_3$  bezeichnet. Die Halbspannweite  $s$  wird beginnend in der Mitte der Verstiftungen bis zur Flügelspitze gemessen. Das Holmstummelende wird ab dem Lager  $A$  mit  $l_0$  als Länge definiert. Diese Länge ist jedoch unerheblich für die Modellierung, sondern wird erst für die Massenbestimmung benötigt.

Anhand der Randbedingungen und der Einspannvorrichtung für den Versuchsaufbau ergeben sich folgende Längen (ebenfalls in Abb. 1 dargestellt):

$$s = 0,848m \quad (1)$$

$$l_0 = 0,03m \quad (2)$$

$$l_1 = 0,076m \quad (3)$$

$$l_2 = 0,037m \quad (4)$$

$$l_3 = s - \frac{l_1}{2} - l_2 = 0,773m \quad (5)$$

$$w_{j=1,1} = \frac{1}{j} * w = \frac{1}{1,1} * 0,022m = 0,02m \quad (6)$$

## 4.2 Analytische Lösung der Modellierung

## 5 Auslegung des Holms nach VDI 2013

Auf Basis der in der Balkenberechnung bestimmten Parameter Biegesteifigkeit, maximales Biegemoment und der maximalen Querkraft, sollen die Gurte und der Steg dimensioniert werden. Die Vorauslegung soll dabei anhand der VDI- Richtlinie 2013 erfolgen, diese enthält in einem Unterkapitel Informationen speziell zur Auslegung eines I-Trägers. Dabei ist zu beachten, dass bei einigen Berechnungen Vereinfachungen angenommen werden, die an den betreffenden Stellen spezifiziert werden. Zusätzlich sei angemerkt, dass die erste Auslegung nur an ausgewählten Stellen Sicherheitsfaktoren ungleich eins berücksichtigt. Grund dafür ist die Annahme, dass in den bereitgestellten Materialkennwerten ausreichende Sicherheiten verrechnet worden sind.



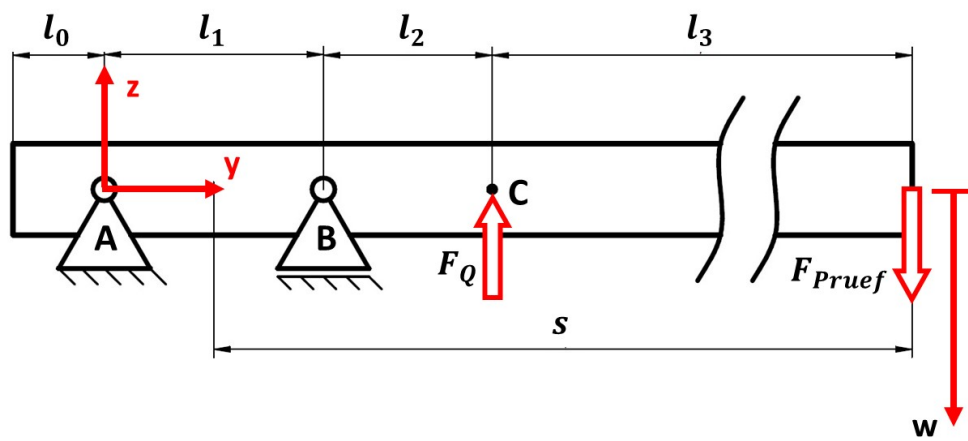


Abbildung 1: Modellierung des Holms

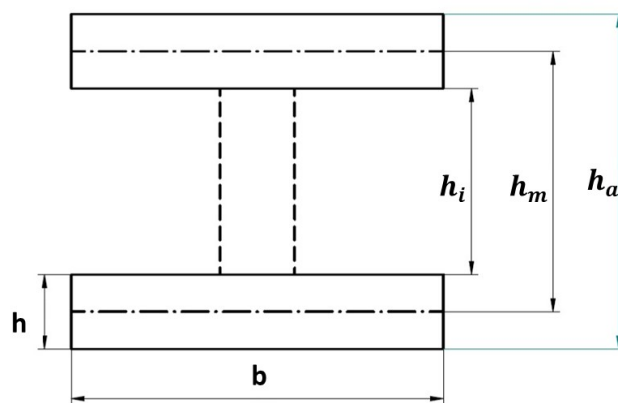


Abbildung 2: Maße des rechteckigen I-Holms

## 5.1 Dimensionierung der Gurte

Bei der Auslegung der Gurte auf Steifigkeit wird angenommen, dass der Steg des I-Trägers keine Längskräfte aufnimmt und der Biegung nicht entgegenwirken kann. Die in der Balkenberechnung ermittelte Biegesteifigkeit  $EI_x = 952,55 Nm^2$ , die erforderlich ist, damit bei einer Kraft  $F_{pruef} = 100N$  die Flügelspitze eine Absenkung von  $w_{j=1,1} = 20mm$  erfährt, muss allein durch die Gurte aufgebracht werden. Im Sinne der kraftflussgerechten Gestaltung sollen die Glasfasern unidirektional in Längsrichtung des Gurtes angeordnet werden. Die Bezeichnungen der Längenangaben des Holmes orientieren sich an Abb. 2.

Die Gurte werden zur Bestimmung der notwendigen Lagenanzahl als rechteckig angenommen, erst in einem späteren Schritt soll die Form der Kontur der vorgegebenen Haut angepasst werden. Die Maße sind über die gesamte Länge des Holmes als konstant anzusehen.

Zur Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes  $I_x$  wird der E-Modul in Längsrichtung der Fasern nach der Mischungsregel nach [3] berechnet.

$$E_{11} = \phi * E_{f,11} + (1 - \phi) * E_M \quad (7)$$

Mit den gegebenen Materialkennwerten bestimmt sich  $E_{11} = 31580 MPa$ . Damit ergibt sich ein benötigtes Flächenträgheitsmoment von  $I_x = 3,01631 * 10^{-8} m^4$ .

Das Flächenträgheitsmoment der Gurte bestimmt sich aus den Flächenträgheitsmomenten der beiden Rechteckquerschnitte und ihren zugehörigen Steiner-Anteilen.

$$I_x = 2 * \left( \frac{b * h^3}{12} + b * h * \left( \frac{h_m}{2} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Es wird nach einer Kombination aus Gurtbreite  $b$  und Gurthöhe  $h$  gesucht, die die Anforderungen an das Flächenträgheitsmoment erfüllt, aber dennoch zu einer möglichst geringen Gurtquerschnittsfläche und damit zu einer möglichst geringen Masse der Gurte führt. Um die Steiner-Anteile der Gurte zu maximieren, sollen die Gurte in einem möglichst großen Abstand zur neutralen Faser angeordnet werden. Vorgegeben ist eine Profildicke von  $37,5mm$ , allerdings muss berücksichtigt werden, dass die nach innen gelegte Haut, die Wölbungsrücklage und die Dickenrücklage die maximale Höhe des Holmes einschränken. Deshalb wird die gesamte Gurthöhe auf  $h_a = 36mm$  abgeschätzt.

Tabelle 1: Verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von  $b$  und  $h$

$h$	$b$	$2 * b * h$
$1mm$	$38,3mm$	$76,6mm^2$
$1,25mm$	$31,1mm$	$77,7mm^2$
$1,5mm$	$26,3mm$	$78,8mm^2$
$2,25mm$	$18,3mm$	$82,3mm^2$

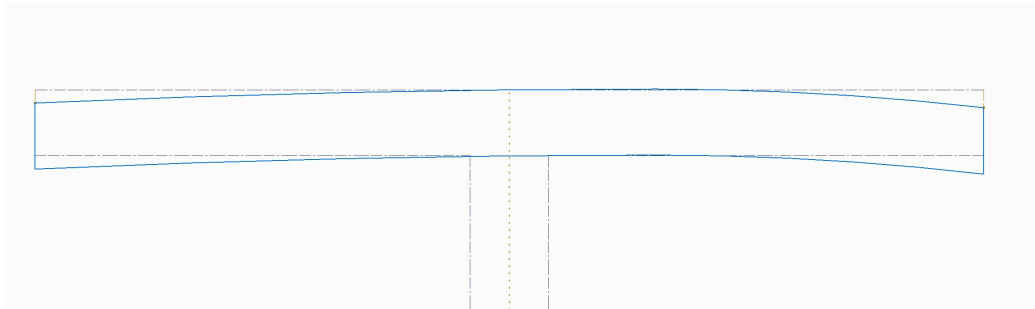


Abbildung 3: Der rechteckige Gurt ist gestrichelt dargestellt, der angepasste gekrümmte Gurt mit einer durchgezogenen Linie.

Die nachstehende Tabelle 1 enthält Werte der Gurtquerschnittsfläche bei verschiedenen Kombinationen von  $b$  und  $h$ , die zu einem gesamten Flächenträgheitsmoment von  $I_x = 3,01631 * 10^{-8}m^4$  führen.

Den Daten ist zu entnehmen, dass breite Gurte geringer Dicke bei gleichem Flächenträgheitsmoment geringere Querschnittsflächen aufweisen. Aus diesem Grund sollen die Gurte möglichst breit gewählt werden. Die Breite der Gurte ist durch die vorgegebene Konstruktion der Platte zur Aufnahme der Tragfläche am Teststand begrenzt. Die vorgesehene Aussparung weist eine Breite von  $30mm$  auf. Für die weitere Berechnung soll  $b = 28mm$  gelten. Diese Annahme wird dadurch begründet, dass die Fertigung des Holms im Bereich des Modellbaus von Hand erfolgen würde, womit nur grobe Toleranzen einhaltbar sind.

Mithilfe eines Solvers bestimmt sich aus dem Flächenträgheitsmoment und der Gurthöhe die Gurthöhe  $h = 1,845mm$ .

Im nächsten Schritt wird die zu stapelnde Lagenanzahl ermittelt. Als unidirektionales Material steht das Glasgewebe Interglas 92145 mit einem Flächengewicht von  $220 \frac{g}{m^2}$  zur Verfügung. Nach [3] berechnet sich die Lagenanzahl  $n$  für eine

Dicke des Verbundes  $t_{soll}$  zu:

$$n = t_{soll} * \frac{\phi * \rho_f}{\left(\frac{m_f}{L*b}\right)} \quad (9)$$

Mit  $\left(\frac{m_f}{L*b}\right) = 220 \frac{g}{m^2}$  und  $t_{soll} = h$  ergibt sich  $n = 8,55$ . Es sind also 9 Lagen des Gewebes 92145 für jeden Gurt vorzusehen. Die sich aus 9 Lagen ergebende Gurthöhe kann durch Umstellen von Gleichung 9 zu  $\tilde{h} = 1,941mm$  bestimmt werden. Für den zunächst angenommenen Fall von Gurten mit rechteckigen Querschnitten ist die Auslegung zur Einhaltung der Anforderungen an die Steifigkeit damit abgeschlossen.

## 5.2 Nachrechnung der angepassten Gurte

Die Modellierung der Haut und der Holmgurte in einem CAD-Programm zeigt, dass die Gurte mit den berechneten Bemaßungen nicht innerhalb des Profils mit der als  $0,75mm$  dick angenommenen Haut liegen. Die Anpassung der Konstruktion der Gurte erfolgt so, dass sich die Gurtoberseite der Innenseite der Haut anschmiegt. Die Gesamtbreite von  $28mm$ , sowie die Gurtdicke bleiben dabei gleich. Da die Wölbungsrücklage ungleich der Dickenrücklage ist, muss die Gesamthöhe  $h_a$  auf  $\tilde{h}_a = 35,8mm$  leicht verringert werden. Abbildung ?? veranschaulicht die gekrümmte Form des oberen Holmgurtes.

Die angepasste Krümmung der Gurte führt zu einem veränderten Flächenträgheitsmoment  $\tilde{I}_x$  des Balkens, dass mithilfe des CAD-Programms exakt zu  $\tilde{I}_x = 3,075406 * 10^{-8}m^4$  bestimmt werden kann. Da  $3,075406 * 10^{-8}m^4 > 3,01631 * 10^{-8}m^4$  ist, genügen auch die veränderten Gurte der Steifigkeitsanforderung. Abschließend wird gezeigt, dass die Festigkeit der Gurte einer Belastung der Flügelspitze durch  $F_{pruef} = 500N$  standhält. Die aus der Biegung resultierenden und betragsmäßig gleichen Zug- und Druckspannungen werden dazu mit den vorhandenen UD-Festigkeitskennwerten des Handlaminats verglichen. Die Resultate der Balkenberechnungen zeigen, dass das maximale Biegemoment im Holm an Punkt C auftritt und  $M^b = 500N * 0,773m = 386,5Nm$  beträgt. In den Randfasern der Gurte resultieren Spannungen, die sich nach

$$\sigma_b = \frac{M_b * \tilde{h}_a}{\tilde{I}_x * 2} \quad (10)$$

zu  $\sigma_b = 224,96 \text{ MPa}$  berechnen. Da  $\sigma_b < R_{||}^{(+)} = 597,9 \text{ MPa} < R_{||}^{(-)} = 650,0 \text{ MPa}$ , ist der Festigkeitsnachweis erbracht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Gurte bei einer Prüfkraft von  $F_{pruef} = 500 \text{ N}$  nicht versagen.

## 6 Zusammenfassung

Test Zusammenfassung

## 7 Quellenverzeichnis

### Literatur

- [1] H. Hertel : *Leichtbau: Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen u.a.* . Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg , 1960.
- [2] Mises, R. V. : *Fluglehre: Vorträge über Theorie und Berechnung der Flugzeuge in elementarer Darstellung* . Springer Verlag , 1936.
- [3] Helmut Schürmann : *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* . Springer Verlag , 2005.
- [4] Elmar Witten : *Handbuch Faserverbundkunststoffe, Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen* . Springer Vieweg , 2014.

## 8 Abbildungsverzeichnis

## 9 Anhang

Test Anhang

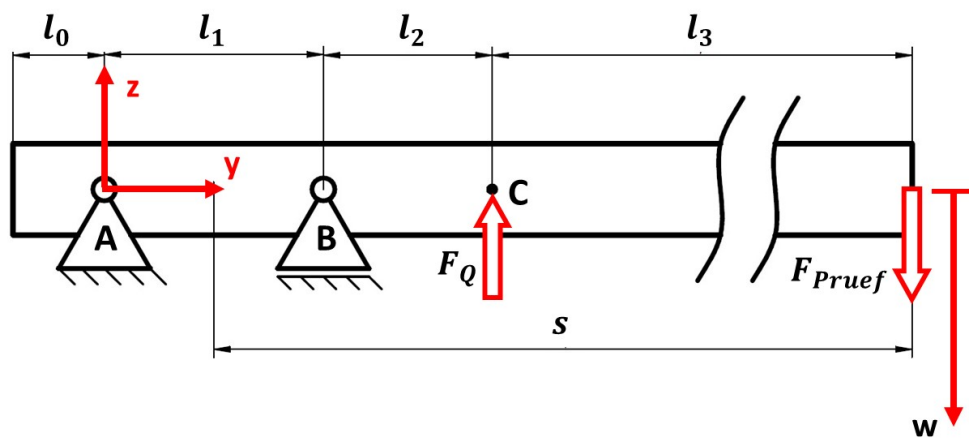


Abbildung 4: Modellierung des Holms