



akademische fliegergruppe berlin e.v.
vereinigung an der technischen universität

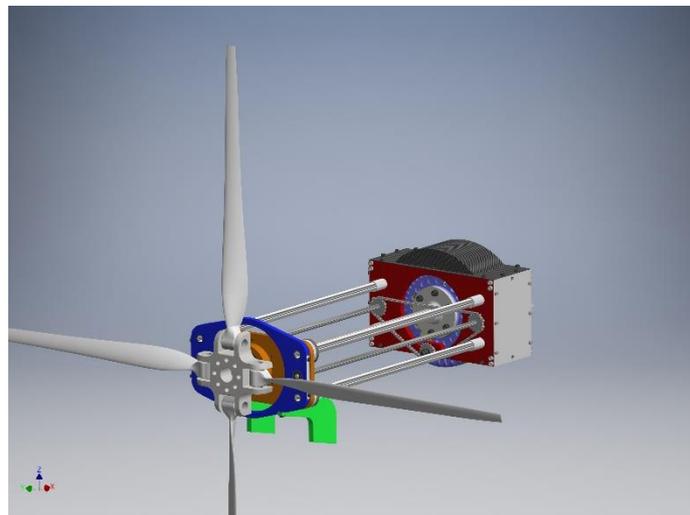
Mitglied der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
der Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol à Voile
und der Interessengemeinschaft Deutscher Akademischer Fliegergruppen

DGLR
OSTIV
IDAFLEIEG

B 13 - ELEKTROANTRIEB

[BELASTUNGSVERSUCH PROPELLER]

[VERSION 06]



AKADEMISCHE FLIEGERGRUPPE BERLIN
VEREINIGUNG AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BERLIN
STRASSE DES 17. JUNI 135
D-10623 BERLIN

INFO@AKAFLIEG-BERLIN.DE
WWW.AKAFLIEG-BERLIN.DE

	NAME	DATUM	UNTERSCHRIFT
ERSTELLT	PHILIP DÖRING	04.12.2017	
GEPRÜFT	ULRICH SEEGER	11.01.2018	

ÄNDERUNGSHISTORIE

Version	Datum	Änderung	Autor
01	04.12.2017	Dokument erstellt	Philip Döring
02	23.12.2017	Redaktionelle Bearbeitung	Hendrik Kramer
03	03.01.2017	Redaktionelle Bearbeitung	Hendrik Kramer
04	07.01.2017	Redaktionelle Bearbeitung	Hendrik Kramer
05	10.01.2017	Bilder hinzugefügt	Philip Döring
06	11.01.2017	Redaktionelle Bearbeitung	Philip Döring

Inhalt

1. Technische Daten des Propellers	4
2. Technische Daten der Propellernabe	7
3. Versuchsdurchführung.....	9
4. Versuchsauswertung.....	10
5. Ergebnisse	12
6. Zusammenfassung.....	13
7. Referenzen.....	14

1. Technische Daten des Propellers

Der Propeller wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Entwurf eines 4-Blatt-Faltpropellers für das Motorsegelflugzeug B13“ berechnet (Hofmann, 2016). Im folgenden Abschnitt wird näher auf Rechnungen bezüglich der Zentrifugalkraft auf das im Nennbetrieb laufende Propellerblatt eingegangen.

Der Festigkeitsverbund des Propellers wurde auf die doppelte Zentrifugalkraft und Sicherheit 2 dimensioniert. Aufgrund des gewählten Rotorprofils liegt die kritische Belastungsstelle des Propellerblatts an dessen Blattfuß, d.h. die höchste Belastung bei Motorbetrieb ist im Übergang zwischen Blatt und Messingbuchse zu erwarten. Diese Übergangsstelle ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

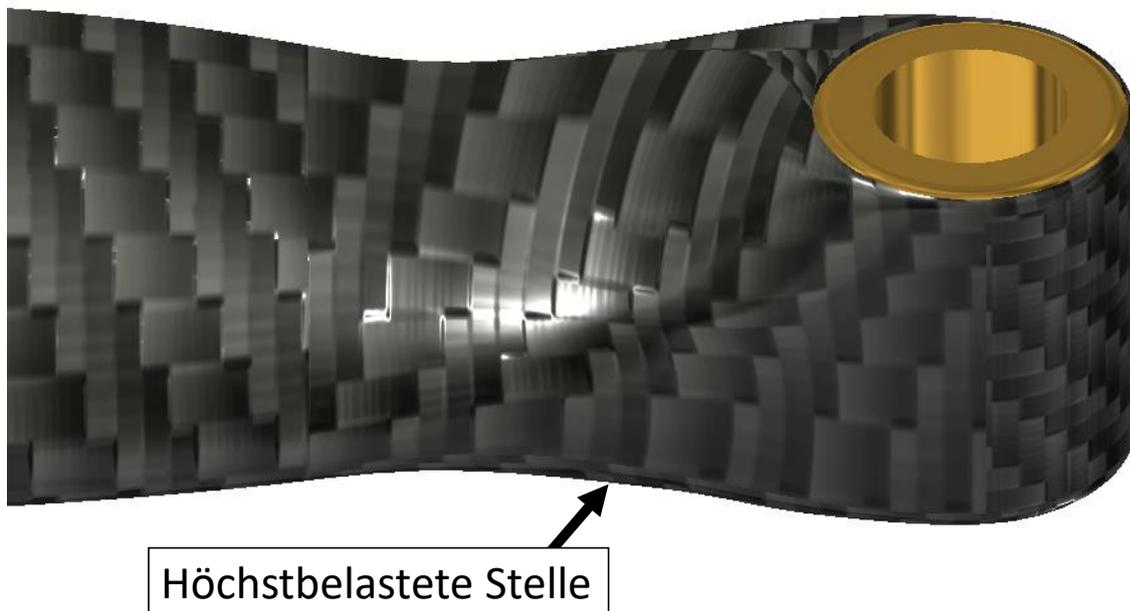


Abbildung 1: kritische Belastungsstelle des Propellerblatts

Über die Länge des Propellerblatts wirken bei Auslegungsdrehzahl insbesondere Zentrifugalkräfte. In der Arbeit (Hofmann, 2016) wurden die Zentrifugalbelastungen auf das darin entworfene Propellerblatt berechnet. Gemäß Abbildung 2 ist die Längskraft entlang des Propellerblatts in der Nähe der Drehachse höher als an der Propellerspitze. Dies liegt daran, dass die weiter außen im Propellerblatt befindliche Masse zusätzlich die Zugkraft auf die Querschnitte nahe der Nabe erhöht. Aus der Graphik ist erkennbar, dass die Zugkraft an der kritischen Stelle (nahe der Propellernabe) den größten Wert annimmt.

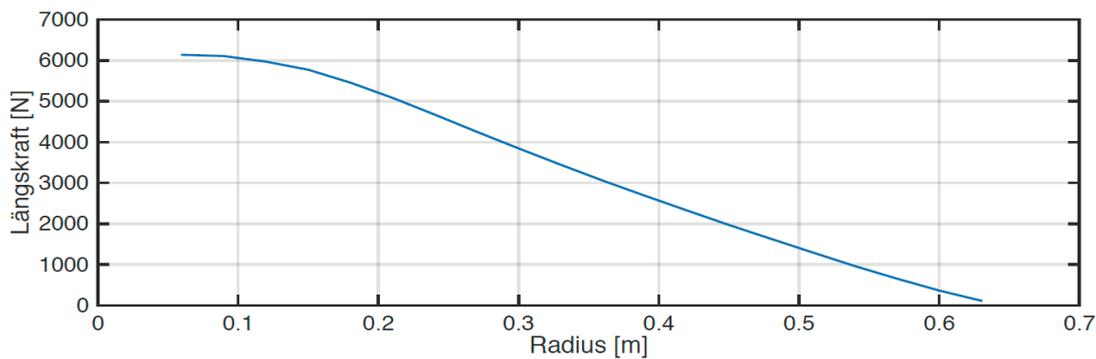


Abbildung 2: Zentrifugalbelastungen auf das Propellerblatt

Allgemein berechnet sich die auf das Propellerblatt wirkende Zentrifugalkraft $F_{Z\text{Propellerblatt}}$ nach physikalischen Gesetzen (s.u.). Dabei wird die Masse des Propellerblatts als Punktmasse am Propellerblatt-Schwerpunkt betrachtet.

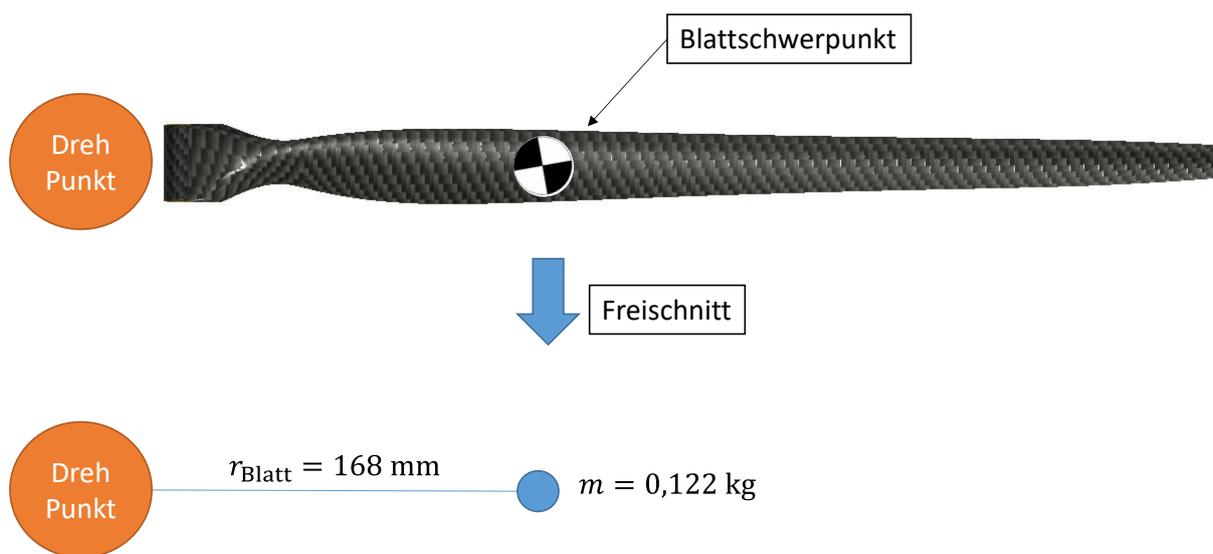


Abbildung 3: Freischnitt Propellerblatt

$$F_{Z\text{Propellerblatt}} = m \cdot r \cdot \omega^2$$

Die Masse m im vorliegenden Anwendungsfall beträgt

$$m = m_{\text{Propellerblatt}} - m_{\text{Messingbuchse}} = 192 \text{ g} - 70 \text{ g} = 122 \text{ g} = 0,122 \text{ kg}$$

Die Distanz bis zum Schwerpunkt des Propellerblatts r_{Blatt} beträgt

$$r_{\text{Blatt}} = 168 \text{ mm} = 0,168 \text{ m}$$

Da jedoch das Propellerblatt mit einem Abstand r_{Nabe} vom Drehpunkt an der Nabe angebracht ist, ergibt sich ein größerer Gesamtradius r_{ges} .

$$r = r_{\text{Blatt}} + r_{\text{Nabe}} = 0,168 \text{ m} + 0,055 \text{ m} = 0,223 \text{ m}$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω ergibt sich aus der Nenn-Drehzahl des Motorbetriebs.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1}} = 314,16 \text{ s}^{-1}$$

Die im Betrieb maximal zu erwartende insgesamt wirkende Zentrifugalkraft auf das Propellerblatt bei einer Sicherheitszahl von $J = 1$ ergibt sich schließlich zu

$$F_{Z\text{Propellerblatt}} = m \cdot r_{\text{ges}} \cdot \omega^2 = 0,122 \text{ kg} \cdot 0,223 \text{ m} \cdot (314,16 \text{ s}^{-1})^2 = 2685,14 \text{ N}$$

Um jedoch eine Sicherheitszahl von $J = 4$ zu erreichen, muss die Kohlefaserstruktur mindestens den vierfachen Kraftbetrag übertragen können. Eine vierfache genannte Sicherheitszahl wurde gewählt, um eine doppelte Bauteilsicherheit, sowie eine um den Faktor Zwei erhöhte Zentrifugalkraft abzusichern.

$$F_{Z\text{Propellerblatt}_4} \cdot J = 2685,14 \text{ N} \cdot 4 = 10740 \text{ N}$$

2. Technische Daten der Propellernabe

Ebenfalls muss die Belastung der Propellernabe berechnet werden. Wie im Fall des Propellerblatts, ergibt sich die Belastung durch die angelegten Zentrifugalkräfte. Neben der bereits in Abschnitt 1 berechneten Längskraft müssen weiterhin die Zentrifugalkräfte von Propellerbuchse, Propellerbolzen und Scheiben kalkuliert werden.

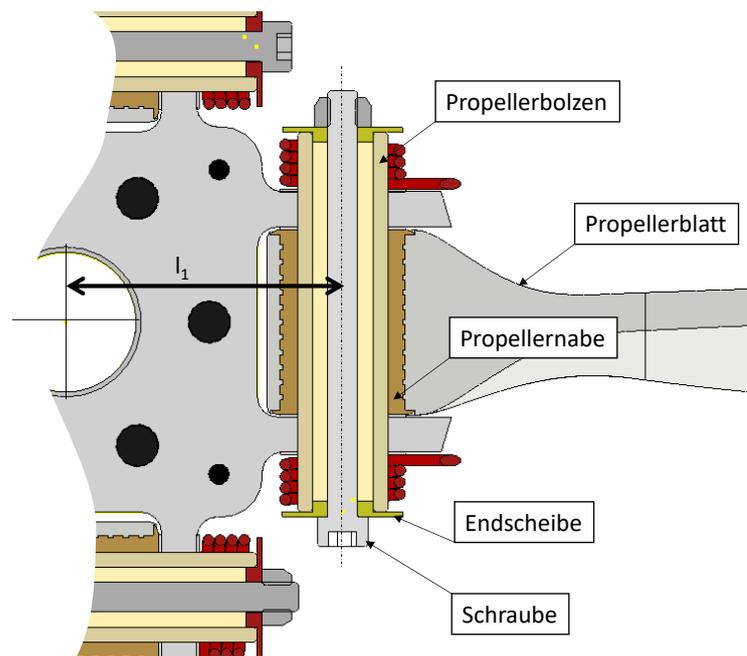


Abbildung 4: Schnittzeichnung Propellerverbindung

Die Einzelmassen der Bauteile der Nabe sind der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Einzelmassen Propeller

Propellerbolzen	$m_{\text{Propbolzen}} = 83 \text{ g}$
Schraube mit Mutter	$m_{\text{Schraube}} = 25 \text{ g}$
Endscheibe (2x)	$m_{\text{Scheibe}} = 2 \cdot 5 \text{ g} = 10 \text{ g}$
Propellernabe	$m_{\text{Nabe}} = 70 \text{ g}$
Feder	$m_{\text{Feder}} = 21 \text{ g}$
Summe	$m_{\text{Zusatz}} = 209 \text{ g} = 0,209 \text{ kg}$

Um die weitere Rechnung zu vereinfachen, wird abgeschätzt und angenommen, dass alle oben genannten Teile den gleichen Abstand von $r_1 = 55 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$ zur Drehachse besitzen.

Die Zentrifugalkraft der Zusatzmassen ergibt sich folglich zu

$$F_{ZZusatz} = m_{Zusatz} \cdot r_1 \cdot \omega^2 = 0,209 \text{ kg} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot (314,16 \text{ s}^{-1})^2 = 1031,34 \text{ N}$$

Die auf die Nabe wirkende Zentrifugalkraft addiert sich aus den in Abschnitt 1 berechneten Lasten der Propellerzentrifugalkraft, wodurch sich eine gesamt wirkende Zentrifugalkraft F_{Nabe} ergibt.

$$F_{Nabe} = F_{ZPropellerblatt} + F_{ZZusatz} = 2685,14 \text{ N} + 1031,34 \text{ N} = 3716,48 \text{ N}$$

Bei einer angestrebten Sicherheit von $J = 4$ ergibt sich eine durch einen Zugversuch nachzuweisende Last von

$$F_{Nabe_4} \cdot J = 14.865,92 \text{ N} = 14,86 \text{ kN}$$

3. Versuchsdurchführung

Um die Lasten auf den Propeller nachzuweisen, wurde ein Zugversuch auf einer Zugprüfmaschine durchgeführt. Hierbei wurde der Festigkeitsverbund von Propellernabe und Propellerblatt untersucht.

Vor dem Zugversuch wurde ein adäquates – der zu benutzenden Propellernabe entsprechendes – Teststück aus dem gleichen Material gefräst. Das Teststück, vgl. Abbildung 5, enthält die Aufnahme für eines der vier Propellerblätter. Der Prüfling entspricht folglich einem Viertel der originären Propellernabe. Am Propellerblatt wurde ein Aufleimer aus GfK angebracht, damit dieser in der Zugmaschine fixiert und die Kraft in das Teststück übertragen werden kann. Weitere technische Details aus Abbildung 5 entnommen werden.

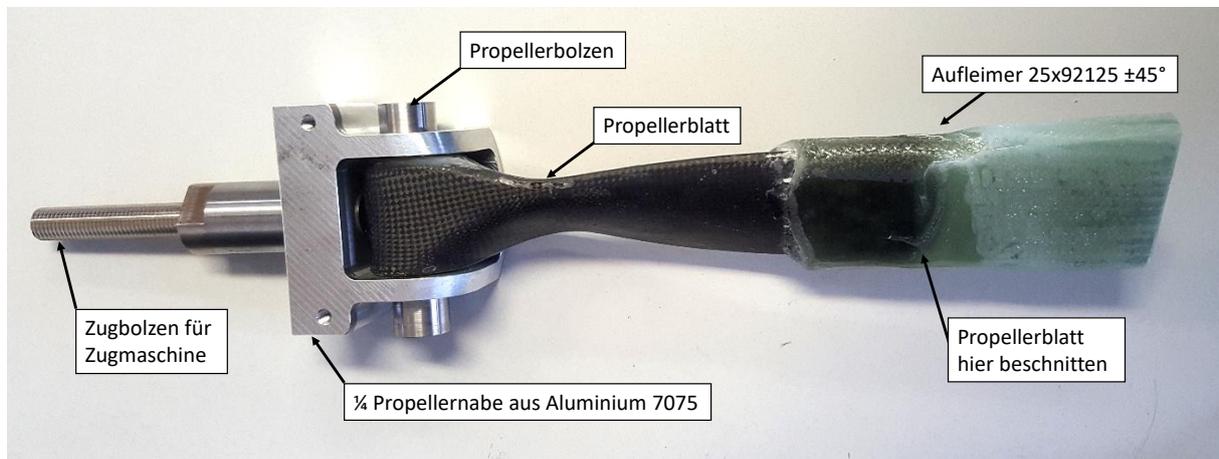


Abbildung 5: Test-Propellernabe für den Zugversuch

Während des Zugversuchs wurde die Zugkraft auf das Teststück kontinuierlich erhöht. Die gemessenen Kräfte wurden elektronisch aufgezeichnet. Zusätzlich wurde der Belastungsversuch gefilmt, vgl. Abbildung 6.



Abbildung 6: Belastungsversuch

4. Versuchsauswertung

Nach dem Versuch wurden die gemessenen Daten mittels der Software Microsoft Excel weiterverarbeitet und analysiert.

Das Zugkraft-Weg-Verhältnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Zugkraft von $F_{\text{Nabe},4 \cdot J} = 14,86 \text{ kN}$ wird bei einer Streckung von ungefähr 14,68 mm erreicht. Nach kontinuierlichem Erhöhen der Zugkraft wurden bei rund 25 kN die ersten Weißbrüche im Aufleimer sichtbar. Im weiteren Verlauf des Versuchs kam es zu weiteren Weißbrüchen im Aufleimer. Die Weißbrüche sind auch dem Zugkraft-Weg-Diagramm zu entnehmen; die Zugkraft wurde nach einem Anreißen kurzzeitig reduziert. Bei rund 32,5 kN brach der Aufleimer vollständig ab. In Abbildung 8 ist das Teststück nach dem Versuch abgebildet.

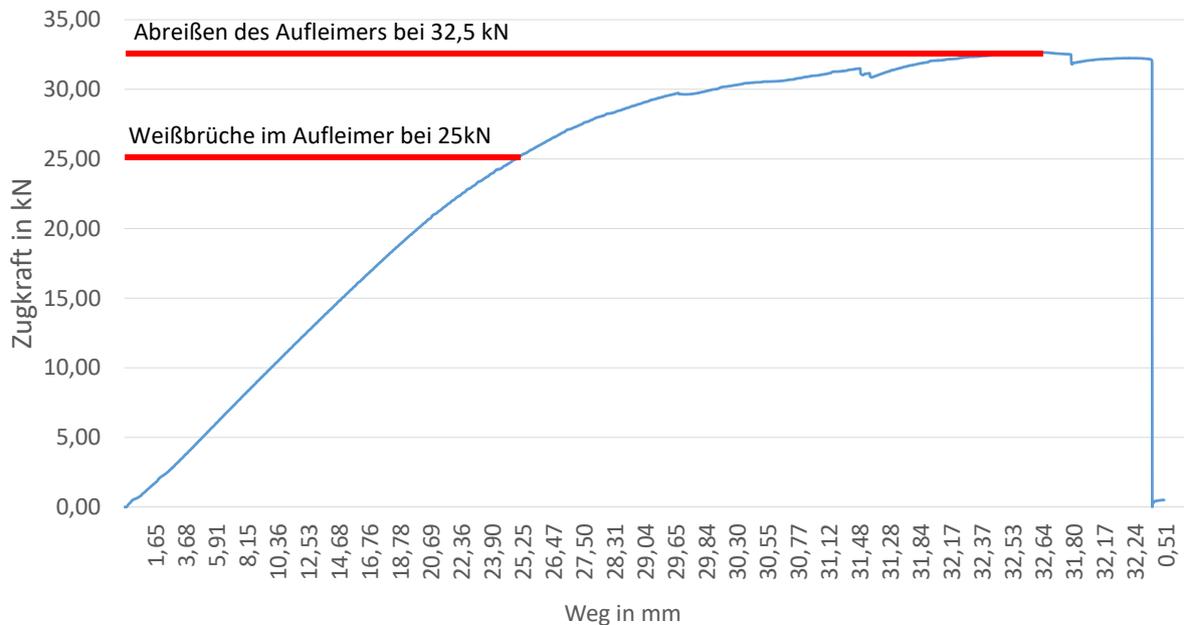


Abbildung 7: Zugkraft-Weg-Diagramm des Belastungsversuchs



Abbildung 8: Versuchsanordnung nach dem Zugversuch

5. Ergebnisse

Bis zu einer eingebrachten Kraft von ungefähr 25 kN weist der gemessene Quotient aus Zugkraft zu Weg annähernd einen linearen Verlauf.

Anschließend zeigt die Messreihe ein flacheren Verlauf. Die Dehnung des Teststücks in diesem Bereich kann auf die weniger feste Struktur des Aufleimers zurückgeführt werden. Dieser beginnt ebenfalls in diesem Bereich einzureißen. Schlussendlich konnte die Kraft von 32,5 kN nicht mehr vom Aufleimer übertragen werden. An dem Propellerblatt selbst waren keine Veränderungen sichtbar.

Das Teststück hielt die geforderten vierfachen Belastungen von 10,74 kN (Propellerblatt) und 14,84 kN (Propellernabe) ohne Weißbrüche aus. Zum Ende des linearen Bereichs von rund 25 kN ergeben sich daher die Sicherheiten $J_{\text{Propellerblatt}}$ und $J_{\text{Propellernabe}}$ gegenüber der maximal zu erwartenden Betriebslast.

$$J_{\text{Propellerblatt}} = \frac{25 \text{ kN}}{2,68 \text{ N}} = 9,33$$

$$J_{\text{Propellernabe}} = \frac{25 \text{ kN}}{3,72 \text{ kN}} = 6,72$$

6. Zusammenfassung

Mit dem Belastungsversuch konnte nachgewiesen werden, dass das konstruierte Propellerblatt und die Propellernabe den Sicherheitsanforderungen ausreichend entsprechen. Das Propellerblatt kann eine bis zu 9,33-fach erhöhte Kraft gegenüber der ausgelegten Betriebskraft aufnehmen, ehe sie den linearen Bereich verlässt. Die Festigkeit der Propellernabes ist ebenfalls mit dem Faktor 6,72 ausreichend dimensioniert.

7. Referenzen

Hofmann, Peter (2016): Bachelorarbeit: Entwurf eines 4-Blatt-Faltpropellers für das Motorsegelflugzeug B13. Berlin: Technische Universität Berlin.