

Konstruktion eines Nurflüglers

Nach neuen Forschungsergebnissen des
NASA Armstrong Flight Research Centers



Remo F. Thalmann

Kantonsschule Rychenberg, Klasse 6eG

Betreuungsperson: Matias Meier
Zweitbetreuung: Brühlhart Priska
Abgabedatum: 8. Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
1.1	VORWORT	3
1.2	THEMA DER ARBEIT UND VORGEHEN	3
2	EINSATZGEBIET DES NURFLÜGLERS	4
3	SONDERFÄLLE BEIM BAU EINES NURFLÜGLERS	5
3.1	STABILER FLUG	5
3.1.1	<i>Längsstabilität</i>	5
3.1.2	<i>Querstabilität</i>	7
3.1.3	<i>Richtungsstabilität</i>	8
3.2	DAS WENDEMOMENT	9
3.2.1	<i>Was ist ein negatives Wendemoment?</i>	9
3.2.2	<i>Wie erreicht man ein positives Wendemoment?</i>	10
4	DOKUMENTATION DER PRODUKTION	12
4.1	ALS PLAN EIN 3D-MODEL	12
4.2	DAS SKELETT DES NURFLÜGLERS	15
4.2.1	<i>Grundlegende Überlegungen zum Bau von V-Form, Pfeilung, Schränkung und Profil</i>	15
4.2.2	<i>Segmentierung des Flügels</i>	17
4.2.3	<i>Fertigung der Rippen, Streben und Carbon Stangen</i>	18
4.2.4	<i>Zusammenbau und Verklebung der Rippen, Streben und Carbon Stangen</i>	19
4.2.5	<i>Überlegungen und Konstruktionen zur Gewährleistung einer möglichst glatten Flügelbespannung</i>	19
4.2.6	<i>Elektronik: Empfänger, Sender, Batterie, Servos und Kanalmischung</i>	21
5	SCHLUSSWORT	23
6	GLOSSAR	24
6.1	WORTERKLÄRUNGEN	24
6.2	ABKÜRZUNGEN	24
7	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	25
7.1	LITERATUR-QUELLEN:	25
7.2	ABBILDUNGS-QUELLEN:	26
8	ANHANG	27
8.1	TEILELISTE UND KOSTEN	27
8.2	SKIZZEN	28

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Von der Fokker Dr. I des Roten Barons bis zur F-14A Tomcat von Tom Cruise haben mich Flugzeuge schon seit meiner frühesten Kindheit fasziniert. Insbesondere die Nurflügler, die mit ihrer einfachen Ästhetik, wie Vögel zu fliegen scheinen. Weshalb ich mich für eine Maturarbeit im Themenbereich der Luftfahrt entschieden habe.

1.2 Thema der Arbeit und Vorgehen

Im Vordergrund meiner Arbeit steht der Bau eines ferngesteuerten Nurflügler Modells und die physikalische Erläuterung dessen Funktionsweise. Da stellt sich die Frage, was ist ein Nurflügler. Ein Nurflügler ist ein Flugzeug, das weder Heck noch Rumpf besitzt. Es besteht nur aus einem Flügel, deshalb wird es Nurflügler genannt. Aufgrund des fehlenden Hecks und Rumpfs kommt es zwangsweise zu anderen Bauweisen, um das Flugzeug stabil fliegen zu lassen. Der Aspekt der Stabilität wird im Kapitel 3 betrachtet. Dazu verwendet wird das Buch Schwanzlose Flugzeuge von Karl Nickel und das Paper der NASA zur Untersuchung des induzierten Luftwiderstandes.

Natürlich ist die Frage sehr berechtigt, warum man sich überhaupt mit dem Bau eines Nurflüglers herumschlagen soll, wenn es doch schon entwickelte Flugzeuge mit Heck und Rumpf gibt. Dieser Frage nehme ich mich in Kapitel 2 an. Dazu werden Vor- und Nachteile des Nurflüglers beleuchtet. Zum Beispiel werden der Luftwiderstand und die Probleme, die beim Einsatz von Nurflüglern als Linienflugzeuge auftreten, untersucht.

Schlussendlich habe ich mich auch mit dem Bau eines ferngesteuerten Modells befasst. Dazu werden die verschiedenen Konstruktionsmethoden des NASA Armstrong Flight Research Centers auf mein Modell übertragen und umgesetzt. Die Planung und der Bau sind ausführlich in Kapitel 4 beschrieben. Unter anderem wurden im Kapitel 4 die Verschiedenen Parameter des Fliegers in einem simples 3D-Modell zur Veranschaulichung integriert. Zusätzlich wurden die gewählten Bauweisen auf Vor- und Nachteile untersucht.

Aufgrund der Vorstösse in diesem Bereich entschied ich mich, trotz meiner nicht vorhandenen Modellbauerfahrung, selbst ein Nurflügler Modell zu bauen und die Bauweise physikalisch nachzuvollziehen.

2 Einsatzgebiet des Nurflüglers

Ein wichtiger Aspekt beim Bau eines Fliegers, oder allgemein eines Produktes, ist die Frage nach dem Anwendungsbereich, da die Eigenschaften dem Anwendungsbereich angepasst sein müssen. Ein Kampffjet hat nicht den gleichen Anwendungsbereich wie ein Passagierflugzeug und folglich auch nicht die gleichen Eigenschaften.

Der Prandtl d Nurflügler der NASA zeichnet sich vor allem durch seine Effizienzsteigerung und seinen geringeren Luftwiderstand aus. Dies aufgrund des fehlenden Hecks und der anderen Auftriebsverteilung. Durch die Auftriebsverteilung allein hat der Nurflügler gegenüber konventionellen Verkehrsflugzeugen eine Effizienzsteigerung von 12.5% erreicht und durch das fehlende Heck eine Widerstandsverringerng von 30% (*Aero-TV, 2016, Min 2:10–2:30*). Durch diese Effizienzsteigerung und Widerstandsverringerng ist das Nurflügler-Konzept besonders für Produzenten von Verkehrsflugzeugen interessant. In einer klimabewussten Welt ist das A und O die Optimierung bereits bestehender Flugzeuge, um den Treibstoffverbrauch und den damit zusammenhängenden CO₂-Ausstoss zu minimieren.

Leider ist der Nurflügler jedoch keine Wunderlösung, die alle bestehenden Probleme löst und hat auch seine Tücken. Will man zum Beispiel einen Nurflügler mit einer Druckkabine ausstatten, hat man das Problem, dass man keine zylinderförmige Kabine hat, auf der sich der Druck gleichmässig verteilt, sondern einen grossen, hohlen und flachen Flügel, der viel anfälliger auf Druckunterschiede ist. Dies führt dazu, dass man konstruktive Massnahmen zur Druckentlastung vornehmen muss, die das Gewicht des Flugzeuges erhöhen (*Kevin Bonsor, 2020*).

Auch bei der Konstruktion legt der Nurflügler einige Besonderheiten an den Tag. Diese Besonderheiten, bezogen auf mein Modell, beschreibe ich ausführlich im nächsten Kapitel. Durch diese Divergenz zur normalen Flugzeugbauprozedur stellt sich die Konstruktion und der Bau eines Nurflüglers als Herausforderung für die Luftfahrtindustrie dar und ist kostspielig, da nicht nur auf herkömmliche Methoden gesetzt werden kann, sondern auch eine ganze Menge an Innovation erforderlich ist.

3 Sonderfälle beim Bau eines Nurflüglers

3.1 Stabiler Flug

Ein Nurflügler ist aufgrund des fehlenden Höhen- und Seitenleitwerks anders zu stabilisieren als ein Schwanzflugzeug. In diesem Kapitel werde ich auf die Möglichkeiten eingehen, bei einem Nurflügler einen stabilen Flug zu erreichen. Weshalb ich zuerst die verschiedenen Stabilitäten erläutern werde und dann, wie man diese konstruktiv bei einem Nurflügler erreichen kann. Dies ist insofern wichtig, als das ein Flugzeug vereinfacht dargestellt, lediglich ein Kräftegleichgewicht darstellt. Um dieses Gleichgewicht zu wahren, benötigt es die folgenden Stabilitäten.

Ich habe alle konstruktiven Massnahmen, die ich hier erklären werden, in meinem Nurflügler integriert, ausser dem Seitenleitwerk, das ich im Kapitel Richtungsstabilität abhandeln werde.

3.1.1 Längsstabilität

Die Längsstabilität soll verhindern, dass der Nurflügler, ohne Kontrolleingabe in die Fernbedienung, an Höhe verliert oder gewinnt, indem sich die Nase des Nurflüglers aufbäumt oder abkippt. Des Weiteren soll sie kleine Störungen an der Querachse selbst, ohne Einschreiten des Piloten, ausgleichen können. Man kann eine möglichst hohe Längsstabilität erreichen, wenn der Massenmittelpunkt möglichst weit vor dem Neutralpunkt liegt. Wie zum Beispiel bei einem Pfeil, wo die Pfeilspitze den Massenmittelpunkt weit nach vorn bringt. Die Federn hinten am Pfeil bringen den Neutralpunkt weit nach hinten. Dadurch fliegt ein Pfeil pfeilstabil (*Nickel, 1990, S. 115, 116*). Diesen vorgeschobenen Massenmittelpunkt erreiche ich bei meinem Nurflügler, der auf den Plänen des Armstrong Flight Research Center der NASA basiert, mit Bleigewichten in der Nase. Dadurch kann ich den Massenmittelpunkt genau 17.4 cm hinter der Nase des Nurflüglers platzieren. Bei dieser Angabe des Massenmittelpunktes muss man jedoch berücksichtigen, dass die Flügelspannweite meines Flügels nicht dieselbe ist, wie die der NASA, wodurch der Schwerpunkt nur relativ zur Flügelspannweite gleichweit von der Nase entfernt ist (*Bowers, 2016, S. 7*). Durch das Verschieben des Massenmittelpunktes vor den Neutralpunkt entsteht ein kopflastiges Drehmoment, ein sogenanntes positives Nickmoment. Dieses ist in der Abbildung 1

als Kippmoment M_p bezeichnet. Da die Gewichtskraft, in der Abbildung 1 Gewicht G genannt, am vorgeschobenen Massenmittelpunkt angreift und der Auftrieb, in der Abbildung 1 Auftrieb A genannt, am nach hinten geschobenen Neutralpunkt. Der Neutralpunkt ist in Abbildung 1 als Ursprungspunkt des Auftriebs A und der Massenmittelpunkt als Ursprungspunkt von der Gewichtskraft G dargestellt (Nickel, 1990, S.121-123).

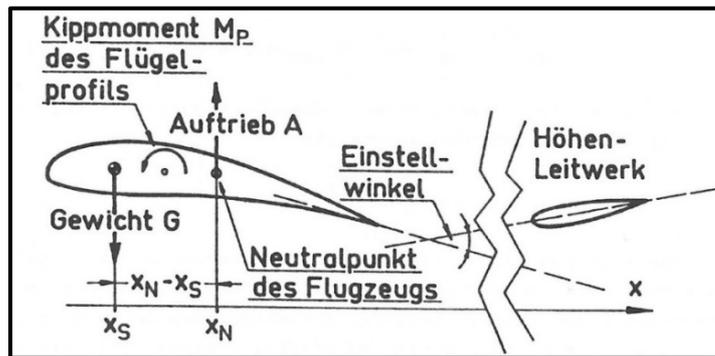


Abbildung 1 Kippmomente, Neutralpunkt und Massenmittelpunkt beim Schwanzflugzeug

Dieses positive Nickmoment kann man durch ein gleichstarkes, schwanzlastiges Drehmoment ausgleichen. Dieses schwanzlastige Drehmoment kann man bei Nurflüglern erzeugen, indem man den Flügel zurückpfeilt und schränkt. Durch die Pfeilung entsteht ein Hebelarm zur Querachse und durch die Schränkung entsteht an den Flügelspitzen ein leichter Abtrieb, die zusammen zu einem schwanzlastigen Drehmoment führen. Pfeilung und Schränkung funktionieren hier zusammen gleich wie ein positiver Einstellwinkel bei einem Schwanzflugzeug, wie in Abbildung 2 zu erkennen ist (Nickel, 1990, S.121-123).

Mein Nurflügler besitzt eine Pfeilung von 24° (Bowers, 2016, S.7) und eine Flügelschränkung von 10.5° (Bowers, 2016, S.10), wobei die Flügelschränkung nicht konstant über die Flügellänge verteilt ist.

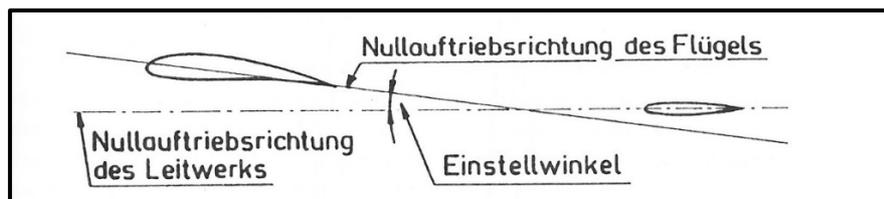


Abbildung 2 Anstellwinkel eines Schwanzflugzeugs

3.1.2 Querstabilität

Die Querstabilität soll verhindern, dass der Nurflügler, ohne Kontrolleingabe in die Fernbedienung, in eine Schiefelage kommt und sie soll Störungen an der Längsachse ohne Hilfe des Piloten korrigieren können. Bei der Querstabilität nutzt man aus, dass wenn der Nurflügler in eine Schräglage kommt, dabei zwangsweise seitwärts abrutscht und somit von der Seite angeströmt wird. Dieses seitliche Anströmen wird als Schieben bezeichnet. Das Schieben nutzt man, indem man ein Schieberollmoment generiert, ein Drehmoment, dass den Nurflügler um die Längsachse rollen lässt, wenn man in einen Schiebezustand gerät. Das Schieberollmoment lässt sich konstruktiv durch die V-Form, die in Abbildung 3 gezeigt wird, hervorrufen. Dabei kommt das Schieberollmoment dadurch zustande, dass bei einem Flügel mit V-Form der voreilende Flügelteil unter einem grösseren Anstellwinkel angeblasen wird als der nacheilende. Dadurch hat der voreilende mehr Auftrieb, und hebt den Nurflügler wieder in eine waagrechte Flugposition zurück (Nickel, 1990, S.136-138).

Mein Nurflügler wurde mit einer V-Form von 2.5° gebaut. Die 2.5° werden zwischen einem horizontalen Flügel und einem mit V-Form gemessen (Bowers, 2016, S.10).

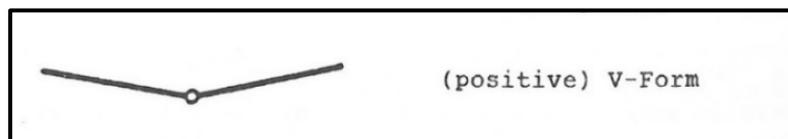


Abbildung 3 V-Form in Frontalansicht

Eine weitere Möglichkeit den Nurflügler konstruktiv querstabil zu machen, ist die Rückpfeilung, da bei ihr auch ein Schieberollmoment entsteht. Das Schieberollmoment kommt beim Pfeilflügel dadurch zustande, dass wenn der Nurflügler schiebt, der Flügelteil, der abgesackt ist, einen grösseren Hebelarm, relativ zur Anströmrichtung, erhält, im Gegensatz zum Flügel, der hochgeschneit ist. So kann sich der untere Flügelteil wiederaufrichten. Dies wird in Abbildung 4 dargestellt (Nickel, 1990, S.147,148).

Wie zuvor schon erwähnt hat mein Flügel, nach den Angaben des Armstrong Flight Research Center der NASA, eine Pfeilung von 24° (Bowers, 2016, S.7).

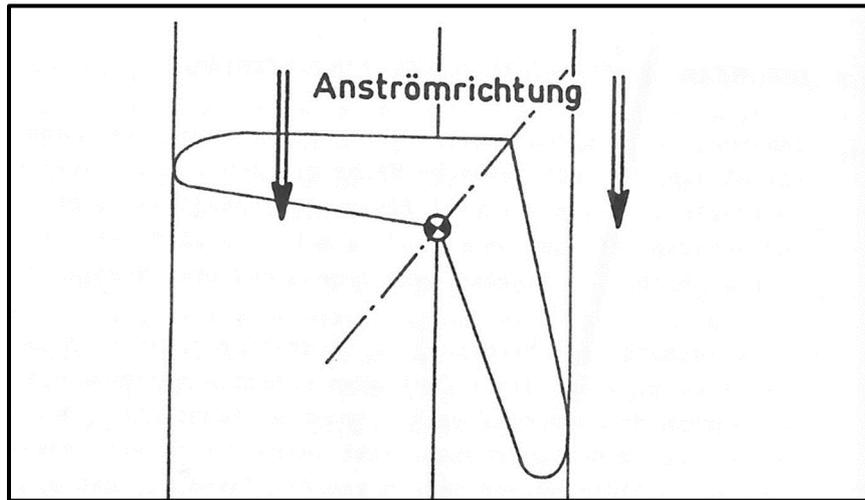


Abbildung 4 Entstehung des Schieberollmoments beim gepfeilten Flügel durch den Auftrieb und Hebellänge

3.1.3 Richtungsstabilität

Die Richtungsstabilität soll verhindern, dass der Nurflügler, ohne Kontrolleingabe in die Fernbedienung, in einen seitlichen Drift kommt, also nicht mehr in Anströmrichtung fliegt. Ausserdem soll die Richtungsstabilität kleine Störungen an der Höhenachse von allein ausgleichen. Die Richtungsstabilität wird manchmal auch Windfahnenstabilität genannt, da sich Fahnen stets nach der Anströmrichtung ausrichten. Um Richtungsstabilität zu erhalten, nutzt man aus, dass wenn der Nurflügler nicht mehr in Anströmrichtung fliegt, seitlich angeströmt wird, also schiebt. Durch dieses Schieben nutzt man das Schiebegiermoment, ein Drehmoment, das den Nurflügler um die Hochachse wendet, sobald dieser in einen Schiebe-Zustand gerät. Konstruktiv lässt sich das Schiebegiermoment durch ein Seitenleitwerk hervorrufen, da ein Seitenleitwerk beim seitlichen Anströmen eine Kraft produziert, welche den Flügel an der Hochachse in Anströmrichtung drehen will. Wird das Seitenleitwerk zum Beispiel von links angeströmt, produziert es eine Kraft nach rechts an der Hochachse, wodurch die Nase des Nurflüglers nach links an der Hochachse gerichtet wird und somit der Nurflügler wieder in Anströmrichtung fliegt. Jedoch ist ein Seitenleitwerk nicht sehr wirksam bei Nurflüglern, da sie kein Heck haben, das als langer Hebelarm an der Hochachse fungieren könnte (Nickel, 1990, S.142,143). Es gibt noch eine zweite, konstruktive Möglichkeit die Richtungsstabilität zu gewährleisten. Nämlich durch eine Rückpfeilung des Flügels. Durch die Rückpfeilung entsteht ein Schiebegiermoment, weil beim Schieben eines Pfeilflügels der induzierte Widerstand am Flügelende, der gegen die Anströmrichtung abgedriftet ist, einen grösseren Hebelarm erhält als der induzierte Widerstand des Flügels, der mit der Anströmrichtung abgedriftet ist. Wie in Abbildung 5 gezeigt (Nickel, 1990, S.147,148).

Wie zuvor schon erwähnt hat mein Flügel, nach den Angaben des Armstrong Flight Research Center der NASA, eine Pfeilung von 24° (Bowers, 2016, S.7).

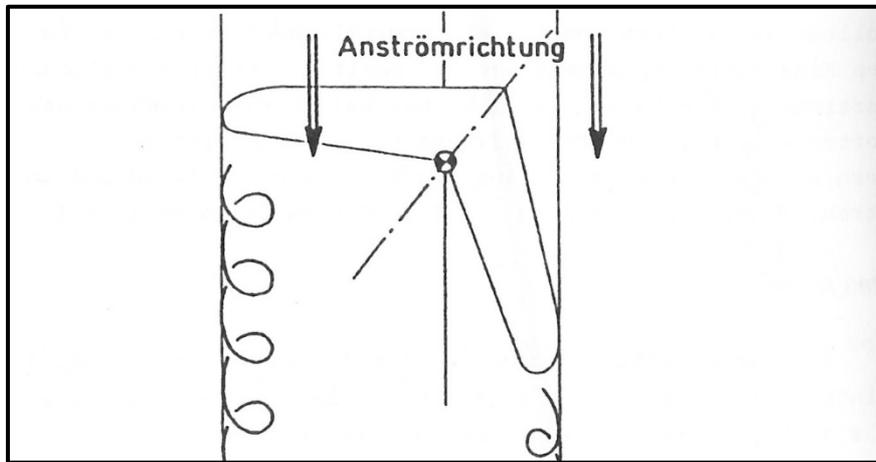


Abbildung 5 Entstehung des Schiebepiepmoments beim gepfeilten Flügel durch den induzierten Widerstand und Hebellänge

3.2 Das Wendemoment

In diesem Unterkapitel soll es um das negative Wendemoment gehen. Was es ist, und was man tun kann, um es zu vermindern oder gar zu einem positiven Wendemoment zu formen. Dies ist insofern wichtig, als man für einen Nurflügler, der nur 2 Ruder hat, wie der von mir gebaute, ein positives Wendemoment braucht, um eine koordinierte Kurve zu fliegen.

3.2.1 Was ist ein negatives Wendemoment?

Das negative Wendemoment ist schon seit jeher ein Ärgernis in der Luftfahrt. Denn schon die Gebrüder Wright hatten mit ihm bei ihren Erstflügen zu kämpfen. Es verhindert das Fliegen einer Kurve mit alleinigem Querrudereinsatz. Dieses Verhalten kommt daher, dass wenn man eine Kurve mit den Querrudern einleitet, also den Flügel gewollt in eine Schiefelage bringt, der nach oben drehende Flügelabschnitt logischerweise mehr lokalen Auftrieb durch das Querruder generiert als der nach unten sinkende. Das negative Wendemoment selbst kommt nun dadurch zustande, dass der Flügelabschnitt, der mehr lokalen Auftrieb generiert und folglich auch mehr lokalen induzierten Widerstand hat, mehr an der Hochachse, durch den lokalen induzierten Widerstand, nach hinten gezogen wird, als der sinkende Flügel. Die Wright Brüder haben dieses

Problem mit einem Seitenruder, das dem Effekt gegensteuert, behoben. Nurflügler sind von diesem Phänomen besonders betroffen, wegen der fehlenden Seitenleitwerke, die das Wendemoment ausgleichen könnten (Nickel, 1990, S.181, 182).

Daher ist mein Nurflügler auch stark betroffen, da er ebenfalls kein Seitenleitwerk besitzt. Glücklicherweise hat das Armstrong Flight Research Center der NASA eine Lösung zu diesem Problem gefunden, das ich im Kapitel 3.2.2 anschauen werde.

3.2.2 Wie erreicht man ein positives Wendemoment?

Wie erreicht man ein positives Wendemoment? Mit dieser Frage hat sich das Armstrong Flight Research Center der NASA auseinandergesetzt und ist zum Schluss gekommen, dass eine Glockenauftriebsverteilung nach Prandtl diesen gewünschten Effekt erbringt. Die Auftriebsverteilung ist in der 6. Abbildung dargestellt. $c_a \cdot l$ ist der örtliche Auftrieb und y/s die Spannweitenkoordinate.

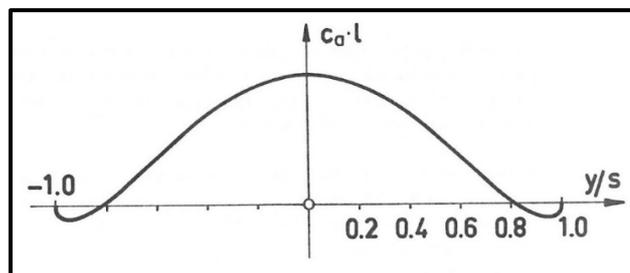


Abbildung 6 Auftriebsverteilung für ein positives Wendemoment

Eine Auftriebsverteilung kann man durch die Schränkung des Flügels beliebig manipulieren. Also ist es auch möglich eine Auftriebsverteilung mit positivem Wendemoment zu erhalten. Mein Nurflügler ist nach den Angaben des Armstrong Flight Research Center der NASA geschränkt, wodurch er genau so eine Auftriebsverteilung erhält (Bowers, 2016, S.10). Diese Auftriebsverteilung hat den Vorteil, dass bei einer lokalen Auftriebserhöhung an den Flügelspitzen kein induzierter Widerstand entsteht, sondern induzierter Schub. Der induzierte Schub führt zum positiven Wendemoment. Dieser induzierte Schub (eng. induced thrust) ist in Abbildung 7 auf dem rechten Flügel an der Flügelspitze zu sehen. Ausserdem kann man auf dem Bild den Aufwind (eng. upwash) an den Flügelspitzen erkennen.

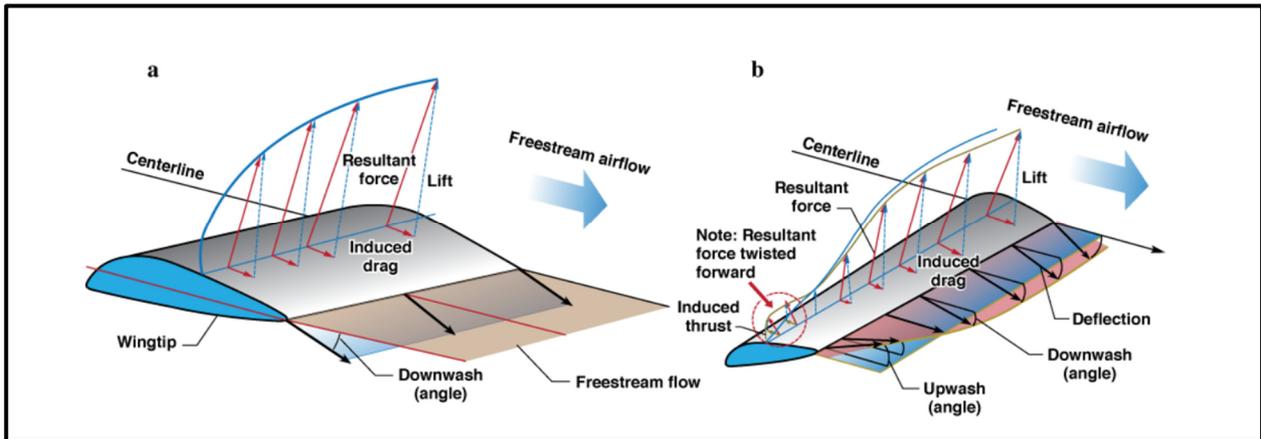


Abbildung 7 induzierter Schub durch Abtrieb und Aufwind

Dieser induzierte Schub entsteht dadurch, dass an den Flügelspitzen Aufwind, auf Grund des lokalen Abtriebes, herrscht. Wird nun mit einem positiven Ruderausschlag lokaler Auftrieb an den Flügelspitzen erzeugt, wird die Resultierende Kraft durch den Aufwind nach vorne abgelenkt. Dies kann man in Abbildung 7 erkennen. Aufgrund dieses induzierten Schubes, der entgegen des herkömmlichen induzierten Widerstands wirkt, entsteht ein positives Wendemoment. Dadurch kann man allein mit 2 Querrudern eine koordinierte Kurve fliegen (Bowers, 2016, S.3-5).

4 Dokumentation der Produktion

4.1 Als Plan ein 3D-Model

Um das erfolgreiche Funktionieren eines Produktes zu gewährleisten braucht es einen guten Plan zur Umsetzung. In meinem Fall war der Gebrauch der Freeware xflr5 naheliegend, da dieses Programm perfekt auf meine Bedürfnisse ausgelegt ist. Das Programm ermöglicht mir die Erstellung eines einfachen 3D-Modells eines Nurflüglers.

Des Weiteren könnte man mit xflr5 auch die Eigenschaften des erstellten Flugzeuges ergründen, jedoch war das nicht das Ziel meiner Arbeit. Wer mehr über die Anwendungszwecke und die Bedienung von xflr5 wissen will, sollte sich die 20 Teilige Tutorialreihe von techwinder auf YouTube ansehen. Darin wird nicht nur erklärt, wie man Flugzeugmodelle erzeugt, sondern auch, wie man aufgrund der Daten des Programmes, Rückschlüsse auf ihr Flugverhalten ziehen kann. Ich habe jedoch im Umfang meiner Arbeit xflr5 lediglich als Planungswerkzeug benutzt.

Als Plan für den Bau wurde ein 3D-Modell, basierend auf den Daten der NASA-Arbeit, erstellt. Um an die genauen Profile der Flügel zu gelangen wurde die xflr5 Datei des Google Drive-Ordners von Peter F. Klemperer zu dem Prandtl d Projekt verwendet. (*Klemperer, Google Drive-Ordner*). Die Flügelprofile sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Datei von Klemperer hatte zwar die richtigen Profile, jedoch stimmten die anderen Parameter, wie z.B. die Pfeilung nicht mit den Daten der NASA überein, weshalb nur die Profile übernommen wurden.

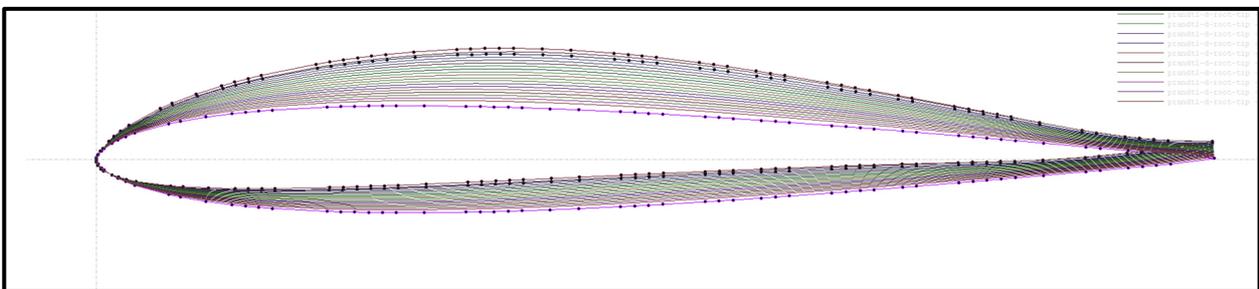


Abbildung 8 Alle Flügelprofile überlagert

Die Restlichen Parameter wurden wie folgt in das Programm eingegeben. Zuerst wurde das Menü zur Flügelbearbeitung in xflr5 geöffnet, wie in Abbildung 9 gezeigt.

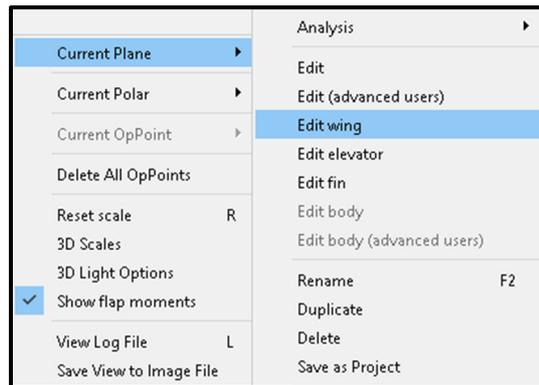


Abbildung 9 Bearbeitungs­menü von xflr5

Durch dieses Menü kommt man zum eigentlichen Bearbeitungsbereich, in dem man die gewünschten Parameter verändern kann. Dieser Bearbeitungsbereich ist in Abbildung 10 zu sehen.

	y (mm)	chord (mm)	offset (mm)	dihedral(°)	twist(°)	foil	X-panels	X-dist	Y-panels	Y-dist
1	0.000	213.000	0.000	2.5	8.32	prandtl-d-root-tip - 0%	11	Cosine	1	Uniform
2	50.000	205.012	24.258	2.5	8.55	prandtl-d-root-tip - 5%	11	Cosine	1	Uniform
3	100.000	197.025	48.517	2.5	8.72	prandtl-d-root-tip - 10%	11	Cosine	1	Uniform
4	150.000	189.037	72.775	2.5	8.44	prandtl-d-root-tip - 15%	11	Cosine	1	Uniform
5	200.000	181.050	97.033	2.5	8.90	prandtl-d-root-tip - 20%	11	Cosine	1	Uniform
6	250.000	173.063	121.292	2.5	8.89	prandtl-d-root-tip - 25%	11	Cosine	1	Uniform
7	300.000	165.075	145.550	2.5	8.25	prandtl-d-root-tip - 30%	11	Cosine	1	Uniform
8	350.000	157.087	169.808	2.5	8.68	prandtl-d-root-tip - 35%	11	Cosine	1	Uniform
9	400.000	149.100	194.066	2.5	8.45	prandtl-d-root-tip - 40%	11	Cosine	1	Uniform
10	450.000	141.113	218.325	2.5	8.14	prandtl-d-root-tip - 45%	11	Cosine	1	Uniform
11	500.000	133.126	242.583	2.5	7.75	prandtl-d-root-tip - 50%	11	Cosine	1	Uniform
12	550.000	125.137	266.841	2.5	7.25	prandtl-d-root-tip - 55%	11	Cosine	1	Uniform
13	600.000	117.150	291.100	2.5	6.66	prandtl-d-root-tip - 60%	11	Cosine	1	Uniform
14	650.000	109.162	315.358	2.5	5.96	prandtl-d-root-tip - 65%	11	Cosine	1	Uniform
15	700.000	101.175	339.616	2.5	5.14	prandtl-d-root-tip - 70%	11	Cosine	1	Uniform
16	750.000	93.187	363.875	2.5	4.19	prandtl-d-root-tip - 75%	11	Cosine	1	Uniform
17	800.000	85.200	388.133	2.5	3.13	prandtl-d-root-tip - 80%	11	Cosine	1	Uniform
18	850.000	77.212	412.391	2.5	1.94	prandtl-d-root-tip - 85%	11	Cosine	1	Uniform
19	900.000	69.225	436.650	2.5	0.66	prandtl-d-root-tip - 90%	11	Cosine	1	Uniform
20	950.000	61.237	460.908	2.5	-0.64	prandtl-d-root-tip - 95%	11	Cosine	2	Uniform
21	1'000.000	53.250	485.166		-1.67	prandtl-d-root-tip - 100%				

Abbildung 10 Bearbeitungsbereich von xflr5

In diesem Bearbeitungsbereich kann man, von der Mitte bis zur Flügel­spitze, einen Meter langen Flügel erstellen und mit Hilfe der y-Spalte in 21 Flügelabschnitte gliedern. Dies wurde gemacht, da das Armstrong Flight Research Center der NASA die Schränkung des Flügels an 21 Flügelabschnitten angibt (Bowers, 2016, S.10). Also wurde die Schränkung der NASA in die Spalte

des Twists (eng. für Schränkung) übertragen. Als nächstes wurde dort wo Dihedral (eng. für V-Form) steht bei allen Flügelabschnitten 2.5° eingegeben. Diese Zahl ist konstant, da die V-Form über den gesamten Flügel gleichbleibt. Ausserdem wurde die Profillänge bei Chord eingegeben. Die Profillänge ist auch bei der NASA zu finden (Bowers, 2016, S.10). Jedoch wurden die Längen so umgerechnet, dass sie mit meiner Flügelspannweite von 2m übereinstimmen. Mit Hilfe der Offset-Spalte habe ich die Pfeilung des Nurflüglers eingegeben. Der Offset beschreibt, wie weit nach hinten der Flügel gebogen ist. Um diesen Wert aus den bei der NASA angegebenen 24° zu erhalten, braucht es ein bisschen Trigonometrie (Bowers, 2016, S.7). Schlussendlich kommt man auf die Werte, die in der Abbildung 9, bei der Spalte Offset, eingetragen wurden. Wenn man all diese Parameter zusammen eingibt, ergibt sich daraus ein einfaches 3D-Modell des Nurflüglers. Das 3D-Modell kann man in Abbildung 11 sehen.

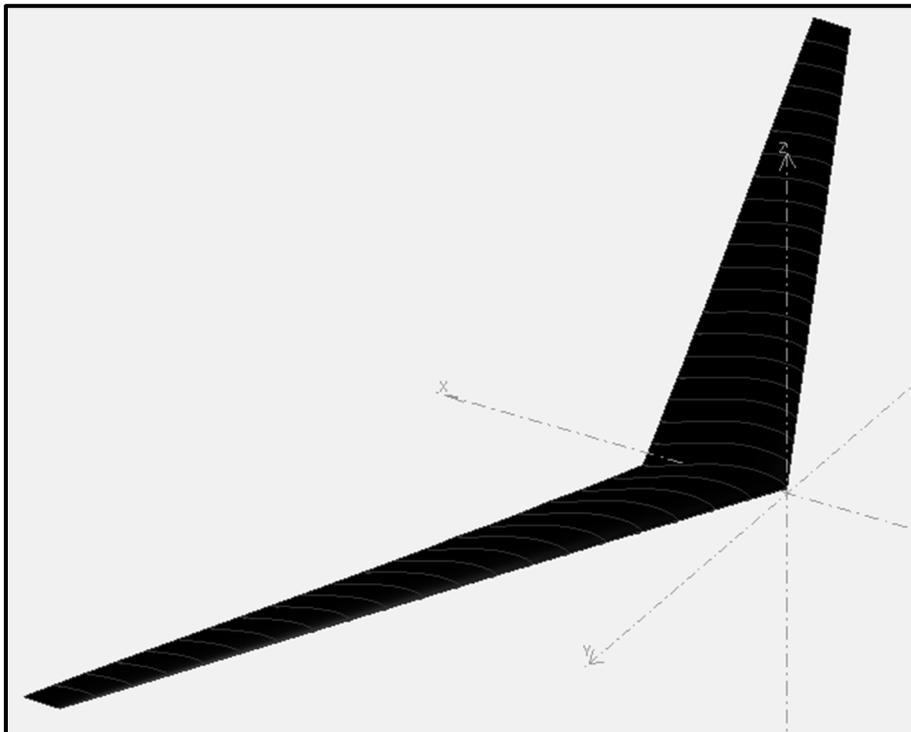


Abbildung 11 3D-Modell

Dieses vereinfacht den Bau enorm, da man die genaue Lage, Schränkung und V-Form der verschiedenen Flügelabschnitte kennt und zusätzlich bildlich vor sich hat. Auf Grund dieses 3D-Modells kann man sich ein Bild des Aufbaus des Skeletts des Nurflüglers machen und sich überlegt, wo die Rippen, Streben und Carbon Stangen möglichst sinnvoll platziert werden können.

4.2 Das Skelett des Nurflüglers

4.2.1 Grundlegende Überlegungen zum Bau von V-Form, Pfeilung, Schränkung und Profil

Die Wahl der Bauweise meines Nurflüglers war auf die der offene Rippenbauweise gefallen. Diesen Entschluss wurde aufgrund des geringen Gewichts und der relativ simplen Bauweise dieser Methode gefasst. Im Übrigen ist die Bauweise auch ideal für die Verwirklichung des 3D-Modells, da die 21 verschiedenen Profile, direkt als Rippen übernommen werden konnten.

Die konstante V-Form ist auch leicht zu übernehmen, indem man den Nurflügler in der Mitte in zwei Stücke teilt und dann so baut als wäre keine V-Form vorhanden und erst am Schluss die beiden Flügelstücke in der Mitte so zusammenfügt, dass die gewünschte V-Form entsteht.

Die Schränkung hingegen ist nicht so simpel aus dem 3D-Modell zu übernehmen. Man muss die Achse, an der die Schränkung gemessen wird, an allen Rippen markieren und die Schränkung an dieser Achse einzeichnen. Diese Achse befindet sich in der Mitte der Länge der Rippen und in der Mitte der Höhe der Rippen. Die genaue Position dieser Achse habe ich mit einem CAD-Programm ausfindig gemacht. Anschliessend habe ich die Schränkung an dieser Achse einmal horizontal und einmal vertikal eingezeichnet, wie in Abbildung 12 ersichtlich ist.

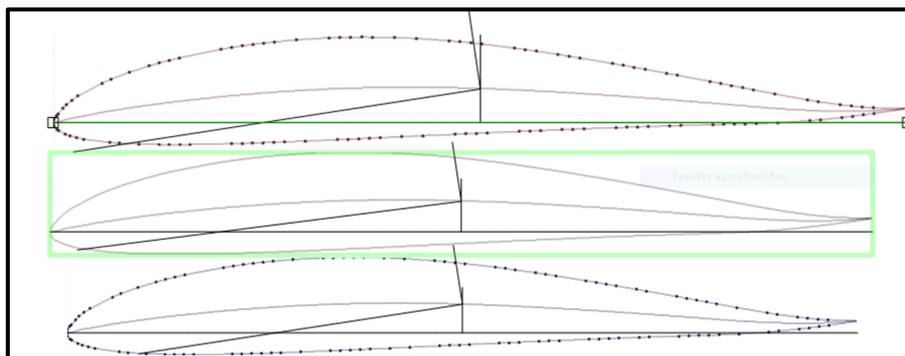


Abbildung 12 CAD-Programm Ausschnitt

Das Bohren eines Lochs an dieser Achse ermöglicht es eine Carbon Stange durch den Flügel zu stossen, an der dann die Rippen, mit Hilfe der horizontalen und vertikalen Markierungen, ausgerichtet werden. Eine möglichst grosse Präzision dieser Ausrichtung kann man dadurch gewährleisten, dass Streben durch die horizontalen und vertikalen Schränkungsmarkierungen

gezogen werden. Um eine möglichst stabile Verbindung zwischen Strebe und Rippe zu erhalten, wurde ein Schnitt in die Rippe, entlang dieser Markierungen gemacht. Dieser Schnitt reicht bis zur Hälfte der Markierung, da die Streben gleichermassen zugeschnitten wurden. Danach kann man die Rippen und Streben ineinander versenken und zusammenstecken. Dies erhöht die Stabilität immens. Diese Einschnitte sieht man in Abbildung 13 und 14.

Die vertikale Markierung wurden dann beim Bau nach vorn geschoben, da dort das Profil höher ist und so ein besseres Ineinandergreifen von Rippen und Streben erreicht werden konnte. Diese Einschnitte sind dabei gerade mal 2mm oder 3mm, je nach Streben Dicke, breit, was sich als Herausforderung zur präzisen Herstellung herausstellte. Die hellblauen Markierungen zeigen somit die Lage der vertikalen Markierungen an, sowohl auf den Rippen als auch auf den Streben, wie in Abbildung 13 und 14 ersichtlich ist.

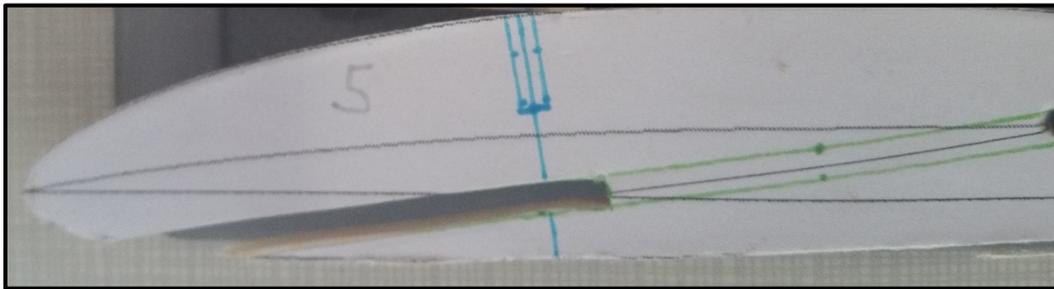


Abbildung 13 Rippen Einschnitt der 5. Rippe

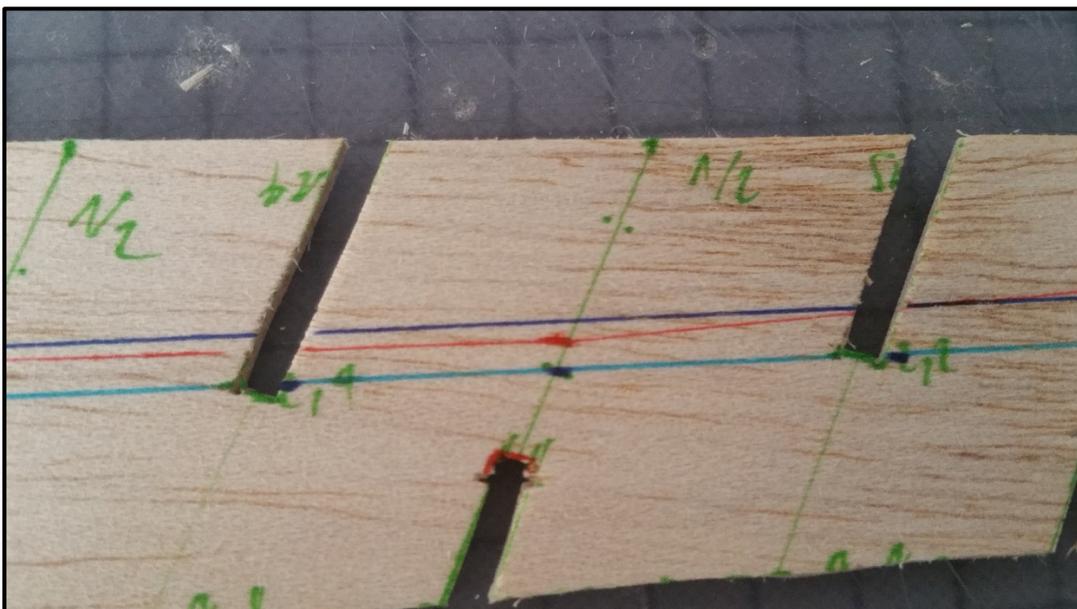


Abbildung 14 Streben Einschnitt einer horizontalen Strebe bei den Rippe 14 und 15

Diese Steckbauweise aus Rippen und Streben ist die grundlegende Bauweise des Nurflüglers und ermöglicht stabiles und präzises Bauen einer komplizierten Flügelstruktur mit ungleichmässiger Schrängung.

Um die Pfeilung des Nurflüglers umzusetzen, wurden die Einschnitte der horizontalen Streben nicht senkrecht, sondern durch den Flügel verlaufend Carbon Stange platziert, sondern um 24° mehr zur Flügelmitte geneigt, wie in Abbildung 14 zu sehen ist.

4.2.2 Segmentierung des Flügels

Der Nurflügler wurde in 3 Abschnitte gegliedert; in einen Mittelteil von der 1. bis zur 5. Rippe auf der linken und der rechten Seite und zwei Flügelabschnitte, einen linken und einen rechten, jeweils von der 5. bis zur 21. Rippe. Dies war nötig, da für die Flügelsegmente andere Anforderungen gelten als an den Mittelteil und deshalb auch verschiedene Konstruktionen zum Einsatz kamen. So hat der Mittelteil beispielsweise die V-Form schon eingebaut und anstatt einer Carbon Stange deren zwei, um die Kräfte des Aufpralls beim Landen besser auffangen zu können. Der Mittelteil ist auf Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15 Mittelteil während dem Klebprozess

Die Flügelsegmente haben nur eine Carbon Stange, um Gewicht einzusparen und sind ohne V-Form gebaut, da sie beim Zusammenstecken mit dem Mittelteil dessen V-Form übernehmen.

Ausserdem haben sie Aussparungen entlang der äusseren 25% der Flügel. Diese Aussparungen betragen $\frac{1}{4}$ der Profiltiefe. Zusätzlich haben die Flügelsegmente einen Stahldraht eingebaut, welcher entlang der Pfeilung im Flügel verläuft, um die Klappen bewegen zu können. Die Flügelsegmente sieht man zusammen mit dem Mittelteil in der Abbildung 16.



Abbildung 16 komplettes Flügelskelett aus Mittelteil und Flügelsegmente

Ausserdem erleichtert das Segmentieren auch den Bauprozess, da man nicht an einem 2m langen Flügelstück bauen muss, sondern nur an einem 90 cm Stück. Dadurch spart man Raum und muss auch nicht gigantische Teile herstellen und bewegen.

4.2.3 Fertigung der Rippen, Streben und Carbon Stangen

Die Fertigung der Rippen ist immer gleich abgelaufen. Zuerst wurden die Profilformen aus dem CAD Programm ausgedruckt, ausgeschnitten und auf Balsaholz geklebt. Dann wurden sie aus dem Balsaholz, mit einem Skalpell, ausgeschnitten. Darauf folgte noch das Abschleifen der Kanten der Rippen, um eine möglichst gleichmässige Verteilung der Bügelfolie zu erreichen. Danach haben die Rippen noch Einschnitte, entlang den Markierungen, für das Zusammenstecken erhalten.

Auch der Herstellungsprozess der Streben war immer derselbe. Die Dimensionen der Streben wurden auf ein Balsaholzbrett aufgezeichnet und dann mit Hilfe eines Skalpells ausgeschnitten. Falls sie nicht perfekt mit den Rippen zusammenpassten noch korrigiert.

Die Carbon Stangen waren am leichtesten herzustellen. Sie mussten schlicht mit einer Stahlsäge zugeschnitten werden.

Das schwierigste an der Herstellung war nicht der Prozess an sich, sondern die Präzision bei einem hohen Produktionsvolumen zu wahren.

4.2.4 Zusammenbau und Verklebung der Rippen, Streben und Carbon Stangen

Um die verschiedenen Rippen, Streben und Carbon Stangen unumkehrbar zu verbinden, wurden sie mit Holzleim verklebt. Damit man ein möglichst präzises Ergebnis erhält, wurden die verschiedenen Flügelsegmente einzeln geleimt. Ausserdem hielten Stecknadeln die verschiedenen Flügelteile in Position und verkleinerten den Spielraum. Den Mittelteil während dem Leimprozess kann man in der Abbildung 14 sehen.

4.2.5 Überlegungen und Konstruktionen zur Gewährleistung einer möglichst glatten Flügelbespannung

Um eine möglichst gleichmässige Verteilung der Bügelfolie auf dem Nurflügler zu erreichen, wurden folgende, in diesem Kapitel erwähnten, konstruktive Massnahmen ergriffen.

Als erstes wurde die Oberfläche des Flügels in Abschnitte unterteilt, damit man den Flügel leichter mit der Bügelfolie beziehen konnte. In vier lange Stücke von der 2. bis zur 16. Rippe, davon jeweils eine Folie pro Flügelsegment über dem Flügel und eine Folie unter dem Flügel. Dazu kommen noch vier kurze Folien an den Flügelspitzen von der 16. bis zur 21. Rippe. Wieder eine Folie über dem Flügel und eine Folie unter dem Flügel.

Die fehlende Bespannung von der ersten linken bis zur ersten rechten Rippe wurde extra so vorgesehen, da auf der Unterseite eine Balsaholzverkleidung angebracht wurde, die für extra Stabilität beim Landen sorgen soll. Auf der Oberseite ist Platz vorhanden für den Empfänger, die Batterie und die Servos.

Die Folie auf dem Flügel von der 2. bis zur 16. Rippe ist auf der Abbildung 17 zu sehen.



Abbildung 17 Foliestück von der 2. Bis zur 16. Rippe

Ausserdem wurden zwischen den Rippen, die im 3D-Modell dargestellt waren, noch halbe Rippen eingefügt, um zu verhindern, dass die Folie zwischen den Rippen wellig wird. Diese halben Rippen kann man in Abbildung 15 verbaut sehen und in Abbildung 18 im Herstellungsprozess.

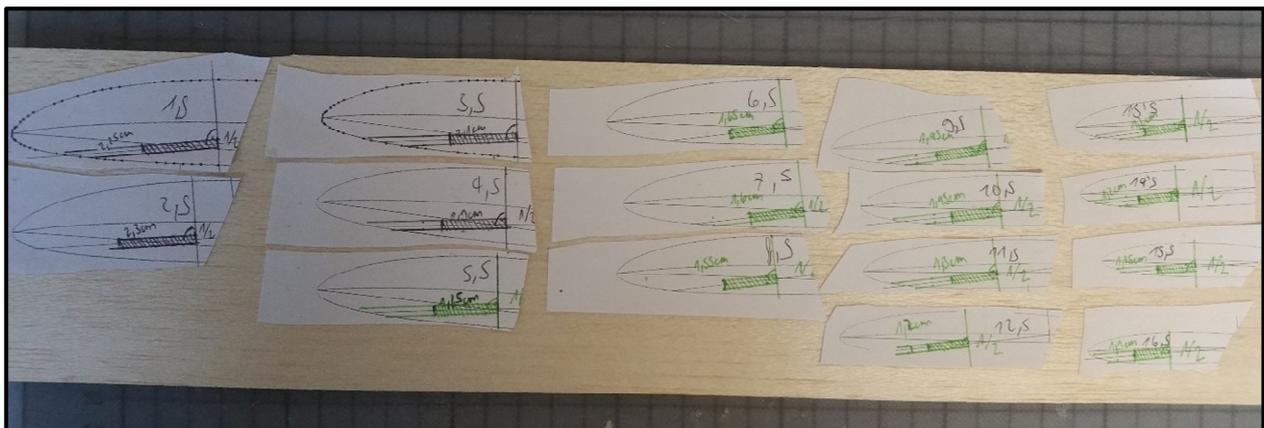


Abbildung 18 Halbrippen bei der Produktion

Zusätzlich waren noch Verbindungsstücke an der Vorder- und Hinterkante der Flügel nötig, an denen man die Foliestücke auf der Unterseite des Flügels mit denen auf der Oberseite verbinden

konnte. Die Verbindungen an der Hinterkante kann man in Abbildung 16 sehen. Die Verbindung an der Vorderkante sieht man auf der Abbildung 19.



Abbildung 19 Vorderkantenverbindung eines Flügelsegments beim Leimen

Schliesslich wurde der Nurflügler mit dem dazu vorgesehenen Werkzeug bezogen, nämlich einer Art Bügeleisen, das den Leim an der Unterseite der Bügelfolie schmelzen lässt und sie dadurch mit den Holzrippen verklebt.

4.2.6 Elektronik: Empfänger, Sender, Batterie, Servos und Kanalmischung

Damit man das Modell fernsteuern kann, musste ein Empfänger im Flugzeug eingebaut werden. Der Entschied fiel auf den AR6335 von Spektrum, aufgrund des geringen Gewichts von nur 2g. Ausserdem lässt sich dieser Empfänger mit Hilfe der Spektrum Software programmieren, wodurch man eine Kreuzmischung der Kanäle erreichen kann. Man braucht bei diesem Modell eine Kreuzmischung, da die 2 Ruder meines Modelles gleichzeitig als Höhen und Querruder fungieren. Der Name Kreuzmischung kommt daher: Da der maximale Ausschlag des Höhenruders nicht wie üblich auf der Fernbedienung Oben und Unten und der des Querruders nicht Rechts und Links ist. Sondern für das linke Ruder oben Rechts und unten Links und für das rechte Ruder oben Links und unten Rechts. Also verlaufen die Wege von Maximum zu Maximum übers Kreuz. Einfacher gesagt, wenn man den Steuerknüppel nach Unten und Oben bewegt, bewegen sich die beiden Ruder in die gleiche Richtung, wenn man jedoch den Steuerknüppeln nach links oder rechts bewegt, bewegen sich die Ruder gegengleich. Der Empfänger ist auf der Abbildung 20 links in der Mitte zu sehen.

Als Servos wurden zwei Reely Mini-Servos eingebaut. Damit man die Servos an meinem Empfänger anschliessen konnte, musste man ihr Steckersystem ändern. Also den Stecker und ein Stück Kabel abschneiden und dann den passenden Stecker anlöten. Die Servos wiegen zusammen 16g. Die Servos wurden mit Heissleim am Mittelteil des Flügels befestigt. Um die Ruder bewegen zu können muss man die Servos mit dem durch den Flügel verlaufenden Draht, an dem die Ruder befestigt sind, verbinden. Die Servos sind die blauen Blöcke in der Abbildung 20.

Um das ganze System mit Energie zu versorgen wurde ein 1s 220 mAh 45C LiPo-Akku von Tattu verbaut. Dieser Akku ermöglicht eine theoretische Flugzeit von über 20 Minuten. Mit gerade mal 5g ist der Akku auch extrem leicht. Der Akku ist in der Mitte der Abbildung 20 zu sehen.

Als Fernsteuerung dient eine Spektrum DXe mit einer Frequenz von 2.4 Ghz. Die DXe hat ein enorm gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und ist relativ billig, aber trotzdem mit viele Funktionen ausgestattet. So verfügt sie zum Beispiel auch über eine Trimmung.

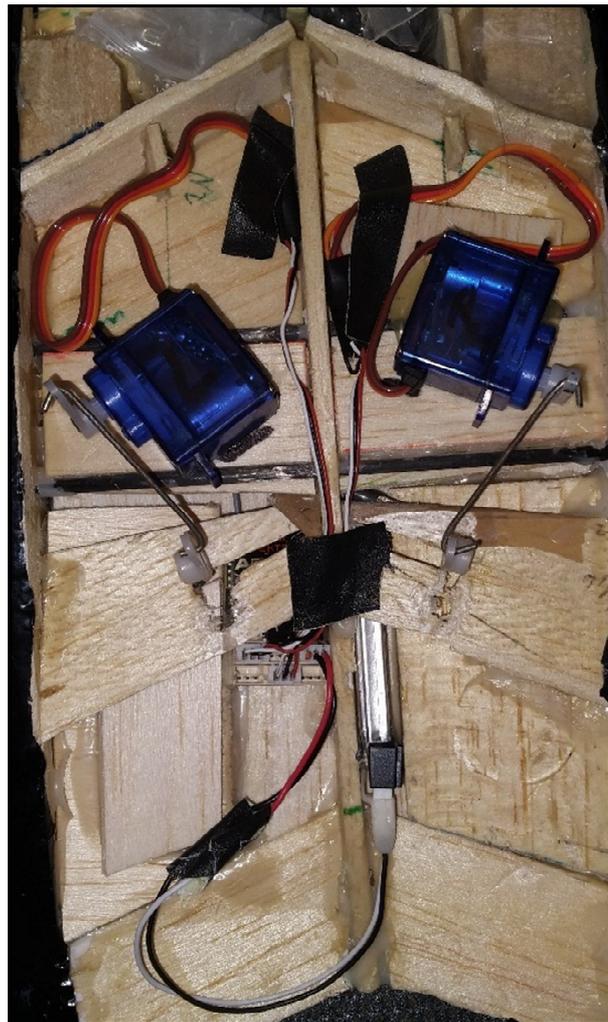


Abbildung 20 Elektronik

5 Schlusswort

Mir ist der Bau eines flugfähigen, ferngesteuerten Nurflüglers gelungen. Die Flugeigenschaften haben sich als erwartungsgemäss herausgestellt. Also gänzlich so wie sie im Theorieteil erklärt wurden. Das Flugzeug scheint über ein positives Wendemoment zu verfügen und fliegt stabil. Trotz der Abweichungen, die bei einem Bau von Hand entstehen, weist das Flugzeug keine relevanten Mängel im Flug auf. Ich habe damit gezeigt, dass meine Konstruktionen im Bau effektiv waren und man ohne grosse Kenntnisse im Modellbau einen flugfähigen Nurflügler bauen kann.

Die absolvierten Flüge sind unter www.mttm.ch/maturarbeit.html veröffentlicht.

Im Übrigen habe ich im Theorieteil die Bauweise des Prandtl d Gleiters des Armstrong Flight Research Center der NASA physikalisch im Umfang meiner Arbeit ergründet und nachvollzogen. Dies äussert sich dadurch, dass ich im Stande war einen flugfähigen Gleiter, basierend auf der Arbeit des Armstrong Flight Research Center der NASA, zu bauen. Dies wäre mir ohne Verständnis der Funktionsweise der verschiedenen Konstruktionsmethoden vermutlich nicht gelungen.

Ausserdem habe ich die Vor- und Nachteile des Nurflüglers im Einsatz als Linienflugzeug betrachtet. Durch die Abwägung der Eigenschaften des Nurflüglers bin ich zum Schluss gekommen, dass der Nurflügler zwar Vorteile bezogen auf seinen Luftwiderstand hat, jedoch noch nicht als Ganzes komplett ausgereift ist und noch einige technische Herausforderungen zu bewältigen sind.



Abbildung 21 Beim Zusammenbau des linken Flügels

6 Glossar

6.1 Worterklärungen

Pfeilung	Die Flügelspitzen des Flugzeuges werden an der Längsachse nach hinten verschoben. Dies resultiert in einen Flügel, der spitz zuläuft, z.B. ein Deltaflügel.
Schränkung	Der Flügel hat entlang der Querachse verschiedene Einstellwinkel.
Neutralpunkt	Punkt an dem der Auftrieb angreift.
Induzierter Widerstand	Widerstand der durch Luftverwirbelungen zustande kommt z.B. durch den Abwind an der Hinterkante des Flügels oder durch Verwirbelungen an den Flügelspitzen.
Auftriebsverteilung	Sie zeigt den lokalen Auftrieb $C_a \cdot l$ auf der Spannweite b .
Massenmittelpunkt	Die Gewichtskraft greift an ihm an. Er ist der Schwerpunkt des Fliegers.

6.2 Abkürzungen

NASA	National Aeronautics and Space Administration
CAD-Programm	Computer Aided Design
3D-Modell	Dreidimensionales Modell

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

7.1 Literatur-Quellen:

1. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“
2. Albion H. Bowers, and Oscar J. Murillo (2016) „On Wings of the Minimum Induced Drag: Spanload Implications for Aircraft and Birds“
3. Stern.de, 2020, Die Airbus Maveric sieht aus wie ein Stealth-Bomber, soll aber Passagiere transportieren, 14.11.2020, <https://www.stern.de/digital/technik/die-airbus-maveric-sieht-aus-wie-ein-stealth-bomber--soll-aber-passagiere-transportieren-9134904.html>
4. AeroTV, 2016, NASA's Prandtl-D Project - Preliminary Research Design to Lower Drag, 14.11.2020, <https://www.youtube.com/watch?v=0Oh0Q0Dv28I>
5. Peter F. Klemperer, Googledrive-Ordner, 14.11.2020, <https://drive.google.com/drive/folders/1w0mqoF0hQTzyGBWCoJZplOxfypovmP2X>
6. Kevin Bonsor, How Flying Wings Will Work, 2020, 14.11.2020, <https://science.howstuffworks.com/transport/flight/modern/flying-wing.htm>

7.2 Abbildungs-Quellen:

1. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 123
2. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 121
3. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 138
4. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 148
5. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 148
6. Karl Nickel, Michael Wohlfahrt, (1990) „Schwanzlose Flugzeuge“ S. 296
7. Albion H. Bowers, and Oscar J. Murillo (2016) „On Wings of the Minimum Induced Drag: Spanload Implications for Aircraft and Birds“ S. 4
8. Xflr5 Version 6.47, Alle Flügelprofile überlagert, Screenshot
9. Xflr5 Version 6.47, Menü durch Rechtsklick hervorgerufen, Screenshot
10. Xflr5 Version 6.47, Bearbeitungsbereich, Screenshot
11. Xflr5 Version 6.47, 3D-Modell, Screenshot
12. Xflr5 Version 6.47, Rippenmarkierungen, Screenshot
13. Rippen Einschnitt der 5. Rippe, Foto
14. Streben Einschnitt einer horizontalen Strebe bei den Rippe 14 und 15, Foto
15. Mittelteil während dem Klebeprozess, Foto
16. komplettes Flügelskelett aus Mittelteil und Flügelsegmente, Foto
17. Foliestück von der 2. Bis zur 16. Rippe, Foto
18. Halbripen Herstellung, Foto
19. Flügel Vorderkantenverbindung beim Leimen, Foto
20. Elektronik, Foto
21. Zusammenbau des linken Flügels, Foto

8 Anhang

8.1 Teileliste und Kosten

10x	Balsaholz 2 mm Bretter an 10 cm mal 1 m	21 Fr.
8x	Balsaholz 3 mm Bretter an 10 cm mal 1 m	18 Fr.
4x	Carbon Stangen 3 mm Durchmesser	3 Fr.
1x	Empfänger AR6335	59 Fr.
1x	Fernsteuerung Spektrum DX	65 Fr.
2x	Servos Reely Mini-Servos	6 Fr.
1x	Abdeckung und Ruder Depron 3 mm Platte	2 Fr.
2x	Abdeckung Oracover Bügelfolie	40 Fr.
1x	Bügeleisen für Bügelfolie	41 Fr.
2x	Drahtstangen	1 Fr.
1x	Leim	15 Fr.
1x	Packung Stecknadel	4 Fr.
1x	Skalpell	5 Fr.

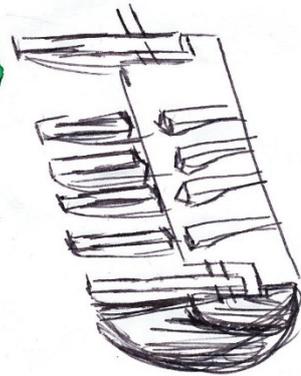
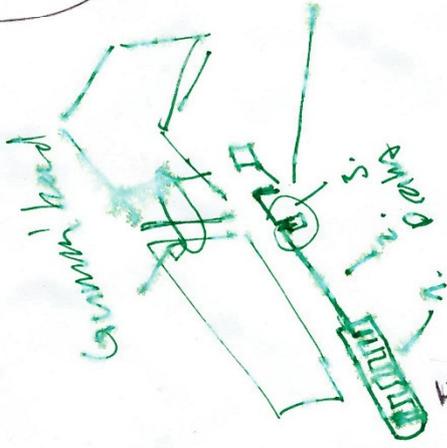
Total Baukosten

336 Fr.

25° dihedral

25%

2A - 15

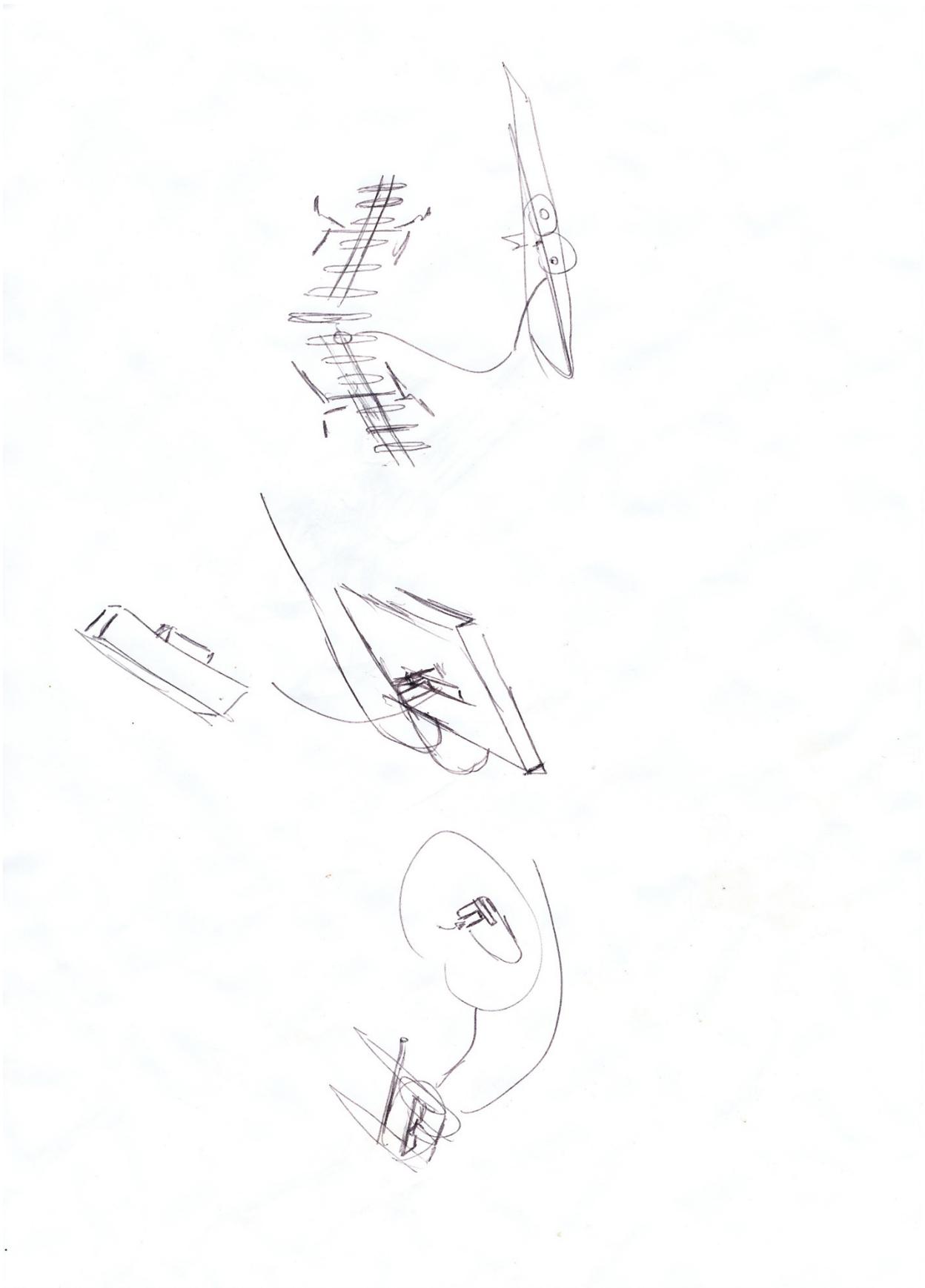


$$\frac{x}{\sin(25^\circ)} = \frac{s_1 s}{\sin(87.5^\circ)}$$

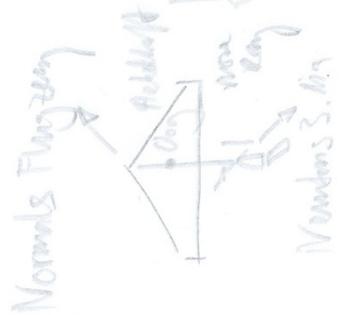
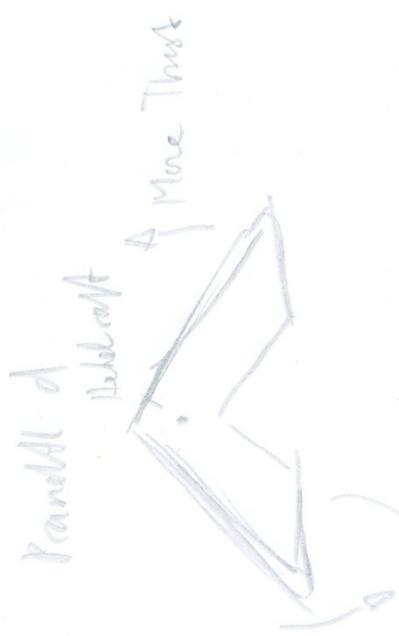
$$x = \frac{s_1 s}{\sin(87.5^\circ)} \cdot \sin(25^\circ)$$

x = 0.74 cm

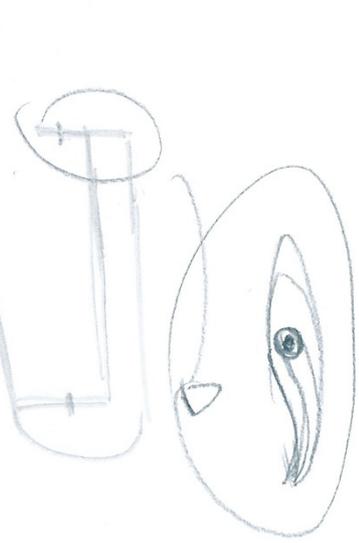
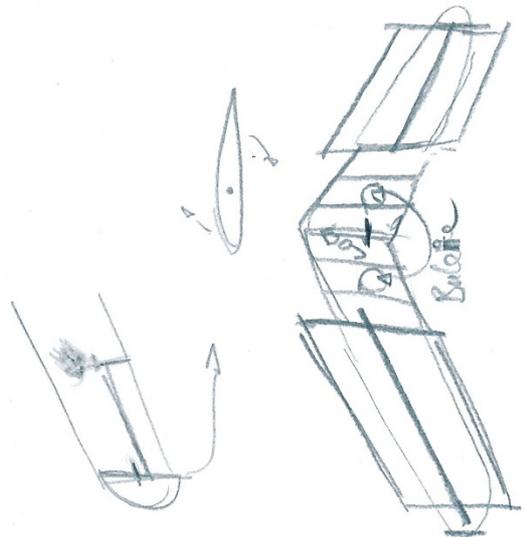


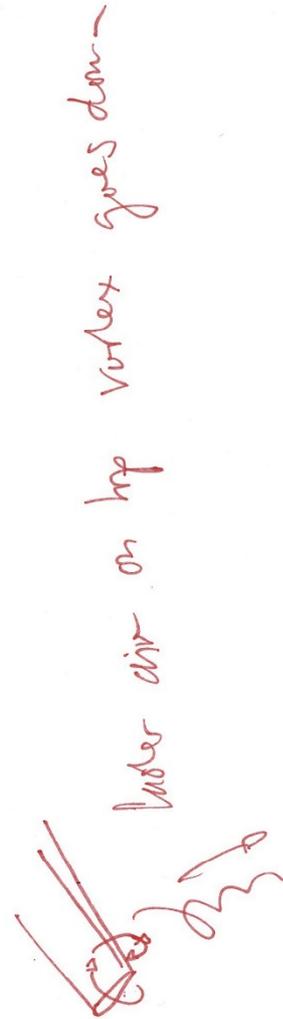
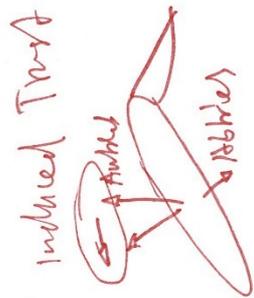
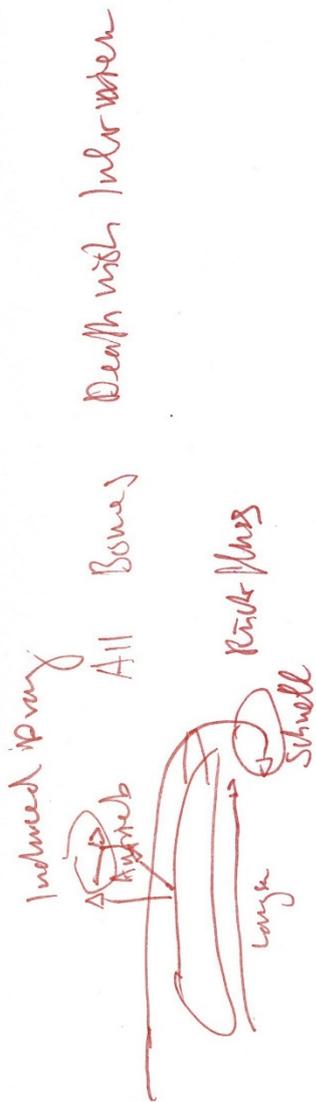


Wasserm



Am Boot, da weniger Luftwiderstand
verursacht wird





Induktion

Schnell

Induktion

Schnell

