

Solarflieger



23.11.2022

Abstrakt

Im Rahmen dieser Maturaarbeit wurden die Anforderungen für ein Solarflugzeug erarbeitet. In einem zweiten Schritt wurde ein bestehendes Modellflugzeug umgerüstet und erfolgreich getestet.

Anhand von Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen im Internet wurde zuerst die Machbarkeit des Projektes abgeschätzt. Anschliessend, ausgehend vom Kräftegleichgewicht bei einem Flug mit konstanter Geschwindigkeit, wurde mithilfe von Formeln für Luftwiderstand und Auftrieb ein einfaches 1-D Modell erstellt, welches von einem Experten komplettiert wurde. Dadurch konnten die flugmechanischen Grundzusammenhänge visualisiert und die Ergebnisse aus dem ersten Schritt validiert werden. Mit der Grösse der Flügeloberfläche und dem Wirkungsgrad der Solarzellen konnte die Solarleistung abgeschätzt werden. In Berechnungen konnte gezeigt werden, dass es bei einem umgebauten Modellflugzeug möglich ist, autark mit Sonnenenergie zu fliegen. Für einen 24-Stunden Flug ist die Solarleistung eines einfachen Modellfliegers jedoch um den Faktor drei zu klein.

In einem zweiten Schritt wurde ein bestehender, gebrauchter Modellflieger zu einem Solarflugzeug umgebaut. Es wurden für die verschiedenen Komponenten Anforderungsprofile erstellt, um geeignete Zulieferer zu finden. Neben den technischen Anforderungen spielte Verfügbarkeit und Preis eine wichtige Rolle. Aus den 15 in Frage kommenden Modellfliegern wurden zunächst zwei gekauft und einer schlussendlich umgebaut. Drei Hauptkriterien haben die Anordnung der Solarzellen auf den Flügeln beeinflusst: a) eine grosse Belegungsichte um möglichst viel Energie zu erhalten; b) die Einschränkungen durch die begrenzte Flexibilität der Solarzellen; c) das Erfüllen der elektrischen Anforderungen der Solarzellen und des Systems. Für die Befestigung wurde die relativ einfache Methode gewählt, die Flügel mit Frischhaltefolie zu bespannen, da diese reversibel ist.

Die verschiedenen Komponenten wurden jeweils einzeln getestet und zum Schluss der Solarflieger als Ganzes. Entgegen den ursprünglichen Erwartungen, spielte die zusätzliche Masse der Solarzellen, Laderegler und Verkabelung eine geringere Rolle als angenommen. Die Aerodynamik der Flügel hingegen wird mit der benutzten Methode zur Befestigung der Solarzellen erheblich beeinträchtigt.

Neben vielen Zusatzfunktionen wie Telemetrie und Bordcomputer müsste in einem nächsten Optimierungsschritt ein spezifischer Flügel mit Berücksichtigung der Solarzellen entworfen werden.

Abstract

Within the scope of this Matura thesis, the requirements for a solar airplane were developed. In a second step, an existing model airplane was converted and successfully tested.

Using data from publicly available sources on the internet, the feasibility of the project was first assessed. Based on the equilibrium of forces during a flight at constant speed, a simple 1-D model was created using the formulas for drag and lift, which was then completed with the help of an expert. This allowed the basic flight mechanical correlations to be visualized and the results from the first step to be validated. With the size of the wing surface area and the efficiency of the solar cells, the solar power could be estimated. Calculations showed that it is possible for a converted model airplane to fly self-sufficiently on solar energy. However, for a 24-hour flight, the solar power of a simple model airplane is too small by a factor of three.

In a second step, an existing second-hand model airplane was converted into a solar airplane. Requirement profiles were created for the various components in order to find suitable suppliers. Apart from the technical requirements, availability and price played an important role. Out of the 15 model airplanes considered, two were purchased and one was finally converted. Three main criteria influenced the layout of the solar cells on the wings: a) a large occupancy density to obtain as much energy as possible; b) the constraints imposed by the limited flexibility of the solar cells; c) meeting the electrical requirements of the solar cells and the system itself. The relatively simple method of covering the wing with wrapping film was chosen for the mounting, as it is reversible.

The various components were tested individually and finally the solar plane as a whole. Contrary to original expectations, the additional mass of the solar cells, charge controller and wiring played a smaller role than originally assumed. The aerodynamics of the wings, on the other hand, are significantly affected by the method used to attach the solar cells.

In addition to the many additional functions such as telemetry and on-board computer, a specific wing with consideration of the solar cells would have to be designed in a next optimization step.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	4
2 Solarzellen.....	5
3 Kräfte auf ein Flugzeug.....	6
3.1 Gewicht.....	6
3.2 Auftrieb.....	6
3.3 Luftwiderstand.....	7
3.4 Schub.....	7
4 Benötigte Leistung.....	7
5 Autarker Flug.....	8
6 Luftwiderstand und Gewicht.....	10
6.1 Analyse Anhand des Flügelprofils.....	10
6.2 Schubleistung und Luftwiderstand.....	11
6.3 Auswirkungen von zusätzlichem Gewicht.....	12
7 Auswahl des Modellflugzeuges.....	13
7.1 Kauf des Flugzeuges.....	13
8 Stichwahl.....	14
9 Bau des Flugzeuges.....	16
9.1 Elektronik.....	17
9.2 Solarzellen.....	19
9.3 Flügel.....	20
10 Abschätzen der Flugzeit.....	22
10.1 Speichern von Energie.....	23
11 Funktionstest Solarflieger.....	24
12 Verbesserungen für weiterführende Projekte.....	26
13 Fazit.....	26
14 Danksagung.....	27
15 Anhang.....	28
15.1 Lötten der Solarzellen.....	28
15.2 Kosten des Solarfliegers.....	28
15.3 Arten von Solarzellen.....	29
15.3.1 Monokristallin.....	29

15.3.2 Polykristallin.....	29
15.3.3 Thin-Film.....	30
15.3.4 Weitere Solarpanels.....	30
15.4 Kriterien zur Auswahl der Flugzeugart.....	30
15.4.1 Bauart und Material.....	31
15.4.2 Flugzeugtyp.....	31
15.4.3 Steuerung.....	32
15.5 Auslegung Solarzellen.....	33
15.6 Schaltplan.....	34
15.7 Berechnungen Luftwiderstand.....	35
15.8 Vergleich Flieger.....	36
16 Literaturverzeichnis.....	37
17 Abbildungsverzeichnis.....	39

1 Einleitung

Zur Überwachung und Erfassung von grossen und/oder abgelegenen Regionen werden heutzutage meistens Satelliten verwendet. Diese sind aber immer noch sehr teuer und haben nur eine beschränkte Auflösung. Satelliten haben eine fixe Umlaufbahn, welche sie nicht verlassen können. Dies heisst Projekte müssen weit im Voraus geplant werden und spontanere Missionen sind kaum möglich. Das Reparieren oder Aufrüsten von Satelliten ist nur unter enormem Zeit- und Geldaufwand möglich. Man könnte heute auch viele von Satelliten bewältigte Missionen von einem mehr oder weniger hochfliegendem Flugzeug machen. Weitere Anwendung wären Mobilfunk-versorgung bei Katastrophen, Mobilfunkversorgung mit sehr kurzen Latenzzeiten, Meteorologie- und Umweltmessungen.

Hierbei stellt sich aber das Problem der Flugzeit, da solche Missionen Wochen, wenn nicht Monate dauern können. Solche Lücken könnten unbemannte, solarbetriebene Drohnen füllen. Durch Solarzellen können sie sich während dem Tag aufladen und so die Nacht durchfliegen. Heutzutage ist dies näher am Möglichen als je zuvor, da in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte in Photovoltaik- und Batterietechnologien gemacht wurden.

Die Idee eines von Solarstrom betriebenen Flugzeuges ist aber keinesfalls neu. Schon in den 1970er Jahren ist dies mit dem AstroFlight Sunrise¹ oder dem Nasa Pathfinder² in den 1980er Jahren gelungen. Diese konnten aber nur unter Tags, während es Sonne hat, fliegen. Neuere Projekte wie zum Beispiel das Atlantik Solar der ETH haben es geschafft länger als 24 Stunden zu fliegen.³ Der bisherige Rekord wird vom stratosphärischen Solarflugzeug Zephyr⁴ von Airbus mit 64 Tagen gehalten.



Abb. 1: Airbus Zephyr. 16.07.2021.

Ziel dieses Projekts ist zu analysieren und verstehen, wie man ein Solarflugzeug entwirft und was dabei beachtet werden muss. Anschliessend wurde ein Solarflugzeug mit 2.1 Metern Spannweite gebaut, welches dank Solarzellen die Flugdauer verlängert.

1 AstroFlight Sunrise, in: Wikipedia, 11.11.2022.

2 Gibbs: Pathfinder, 11.11.2022.

3 AtlantikSolar, in: ethz.ch, 11.11.2022.

4 Zephyr, in: airbus.com, 11.11.2022.

2 Solarzellen

Solarzellen sind eine der beliebtesten Quellen von erneuerbarer Energie und sind dazu auch vergleichsweise billig. Doch wie funktionieren sie?

Solarzellen wandeln die Strahlungsenergie, die von der Sonne auf die Erde kommt zu elektrischer Energie um. Hauptsächlich sind heute 3 Arten von Solarzellen kommerziell verfügbar: monokristalline, polykristalline und Thin-film⁵. In folgendem Abschnitt werden monokristalline Solarzellen behandelt, da solche für den Solarflieger benutzt wurden.

Diese Solarzellen bestehen aus einem Siliziumkristall mit zwei Schichten, nämlich einer P-Dotierten und einer N-Dotierten Schicht. Die P-Dotierte Schicht hat Elemente im Kristall eingebaut, welche eine Gruppe weiter links im Periodensystem sind und dadurch im Kristallgeflecht ein Elektronenloch pro Atom erstellen. Bei der N-Dotierten Schicht ist es genau umgekehrt, denn diese sind eine Gruppe weiter rechts im Periodensystem und haben daher ein Elektron im Überschuss pro Atom. Diese zwei Kristalle sind Halbleiter und dadurch Springen die Elektronen der N-Dotierten Schicht nicht herüber um die Löcher der P-Dotierten Schicht zu füllen. Weil es trotzdem eine Anziehung hat, reihen sich die Elektronen an der Kontaktstelle mit der P-Dotierten Schicht und die Löcher reihen sich ebenfalls an der Kontaktstelle an. Von sich selbst springen die Elektronen nicht rüber. Wenn es jedoch einen Einfluss von aussen gibt, wie zum Beispiel Sonnenstrahlen, werden die Elektronen angeregt und springen auf die P-Dotierte Schicht und füllen die Löcher. Falls es nun nichts weiteres hat, fallen die Elektronen wieder zurück auf die N-Dotierte Schicht. Deswegen wird die P-Dotierte Schicht mit einem Verbraucher verbunden um die gewonnene Energie zu nutzen. Nachdem das Elektron aufgebraucht wurde, wird es zurück in die P-Dotierte Schicht geleitet und fällt danach zurück in die N-Dotierte Schicht, wo es auf ein Neues wieder angeregt werden kann.

Diese Solarzellen sind jedoch nicht perfekt, denn es kommt oft vor, dass die Elektronen zurück auf die N-Dotierte Schicht fallen bevor sie verbraucht wurden. Dadurch geht Energie verloren. Die meisten monokristallinen Solarzellen haben lediglich eine Effizienz von rund 20 Prozent. Ein weiteres Problem ist, dass eine Solarzelle aus nur einem Kristall besteht und dadurch recht teuer zu produzieren ist. Dieses Problem wird mit polykristallinen Solarzellen gelöst, jedoch haben diese dadurch eine tiefere Effizienz.

5 Im Anhang unter Kapitel 14.3 findet man einen Vergleich zwischen monokristallinen, polykristallinen und Thin-film Solarzellen.

3 Kräfte auf ein Flugzeug

Es ist möglich die auf Flugzeuge wirkenden Kräfte in 4 Kräfte einzuteilen (Abb. 2). Bei einem Flug mit konstanter Geschwindigkeit, muss ein Kräftegleichgewicht herrschen. Das heisst der Luftwiderstand muss gleichgross wie der Schub und der Auftrieb gleich dem Gewicht sein.

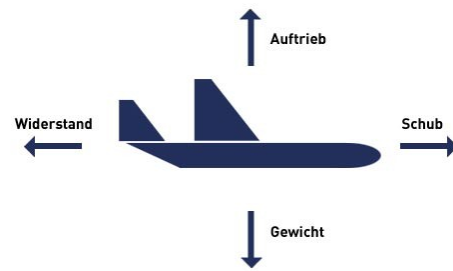


Abb. 2: Vier auf ein Flugzeug wirkenden Kräfte

Wenn in folgendem Kapitel die Geschwindigkeit erwähnt wird, ist nicht die Grundgeschwindigkeit (Groundspeed) sondern die relative Geschwindigkeit (Airspeed) zwischen Flugzeug und dem Fluid (Luft) gemeint. Die Grundgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit welche ein Beobachter vom Boden aus sieht.

3.1 Gewicht

Das Gewicht oder auch Normalkraft wird durch folgende Formel gegeben:

$$F_N = m * g$$

m	Gewicht [kg]
g	Gravitationskonstante 9.81 m/s ²

3.2 Auftrieb

Der Auftrieb zeigt nach oben und wirkt so der Normalkraft entgegen. In Flugzeugen wird der Auftrieb durch die Flügel generiert. Damit das Flugzeug nicht sinkt, muss der Auftrieb mindestens gleich der Normalkraft sein. Der Auftriebsbeiwert beinhaltet verschiedene Faktoren wie zum Beispiel das Flügelprofil.⁶

$$F_L = \frac{1}{2} c_L \rho v^2$$

c _L	Auftriebsbeiwert (auch c _A)
ρ	Luftdichte [kg/m ³]
v	Geschwindigkeit [m/s]

⁶ Benson: Lift Equation, 10.11.2022.

3.3 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand hängt von der Oberfläche, Querschnittfläche und Geschwindigkeit des Flugzeuges ab. Der Luftwiderstandskoeffizient hängt von der Form des Gegenstandes (hier Flugzeug) und wie er angeströmt wird ab.⁷

$$F_D = \frac{1}{2} c_D A \rho v^2$$

c_D	Luftwiderstandskoeffizient (auch c_w)
A	Referenzflächeninhalt [m ²]
ρ	Luftdichte [kg/m ³]
v	Geschwindigkeit [m/s]

3.4 Schub

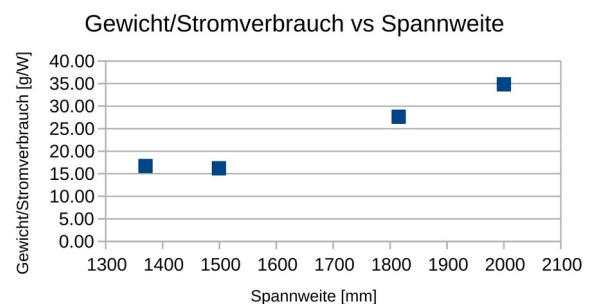
Der Schub wird durch die Propeller generiert und wirkt dem Luftwiderstand entgegen. Bei konstanter Geschwindigkeit sind diese gleich gross. Zum Beschleunigen muss der Schub grösser als der Luftwiderstand sein.

4 Benötigte Leistung

Die Leistungsaufnahme eines Modellflugzeuges schwankt stark über die Dauer eines Fluges. Zum Beispiel erfordert der Start mehr Energie für das Erreichen der nötigen Geschwindigkeit (kinetische Energie) und Höhe (potentielle Energie). Für einen Solarflieger ist es aber interessant den durchschnittlichen Stromverbrauch zu kennen. Solche Informationen sind aber auf dem Internet spärlich zu finden. Deshalb musste auf Annahmen und Abschätzungen zurückgegriffen werden. Mit der Flugdauer und der Batteriekapazität kann eine mittlere Leistung ermittelt werden:

$$\bar{P} = \frac{C_A * U_A}{t}$$

C_A	Akkukapazität [Ah]
U_A	Akkuspannung [V]
t	Flugdauer [s]



⁷ Hall: Drag Equation, 10.11.2022.

Abb. 3: Verhältnis zwischen Gewicht und Stromverbrauch bei ausgewählten Fliegern

Für 4 Modellflugzeuge wurden auf dem Internet diese Daten erhoben und in Abbildung 3 aufgetragen. Wie vermutet sind grössere Flugzeuge effizienter. Sie können pro Watt mehr Gewicht bewegen.

Die maximal vom Motor geforderte Leistung ist aber um einiges grösser. Zum starten muss der Propeller genug Schubkraft generieren um zu beschleunigen und an Höhe zu gewinnen. Hier wird für Modellsegler die 100 W/kg Regel verwendet.^{8 9}

5 Autarker Flug

Wir teilen den autarken Flug nach der Schwierigkeit in zwei Kategorien ein:

1. Es ist möglich unter guten Bedingungen genug Strom für den Flug zu produzieren.
2. Die Stromproduktion erlaubt genügend Energie zu speichern um 24 Stunden durchzufliegen. Diese Kategorie kann wiederum in gute (Sommer) und schlechte (Winter) Umweltingungen unterteilt werden.

In folgendem Abschnitt wird die erste Kategorie behandelt.

Für 4 kommerziell verfügbare Modellflieger wurde die mögliche Solarleistung anhand des folgenden Zusammenhanges berechnet. Die Leistungsaufnahme wurde auf gleiche Weise wie in Kapitel 4 abgeschätzt.

$$P = p_0 * \eta * A$$

p_0	Sonnenintensität 1000 W/m ²
η	Wirkungsgrad
A	Belegte Fläche [m ²]

Der Wirkungsgrad der Solarzellen und die belegte Oberfläche der Flügel sind ausschlaggebend für die Stromproduktion. Andere Faktoren wie zum Beispiel die Flügelform haben einen Einfluss auf wie dicht der Flügel belegt werden kann. Solche Faktoren sind aber schwer anhand von Daten aus dem Internet zu quantifizieren.

Monokristalline Solarzellen haben wie schon erwähnt einen Wirkungsgrad von ca. 20 %. Dies ist aber nur unter optimalen Bedingungen mit senkrechter Einstrahlung erreichbar. Da dies bei einem

8 Carpenter: Watts per Pound Rule, 07.11.2022.

9 Gespräch mit Modellflugpilot, 04.07.2022.

Solarflieger selten der Fall ist, wurde in den folgenden Berechnungen mit einem Wirkungsgrad von 18 % gerechnet. Für die Sonnenintensität wurde mit 1000 W/m^2 gerechnet, was ungefähr einem sonnigen Sommertag in der Schweiz entspricht.

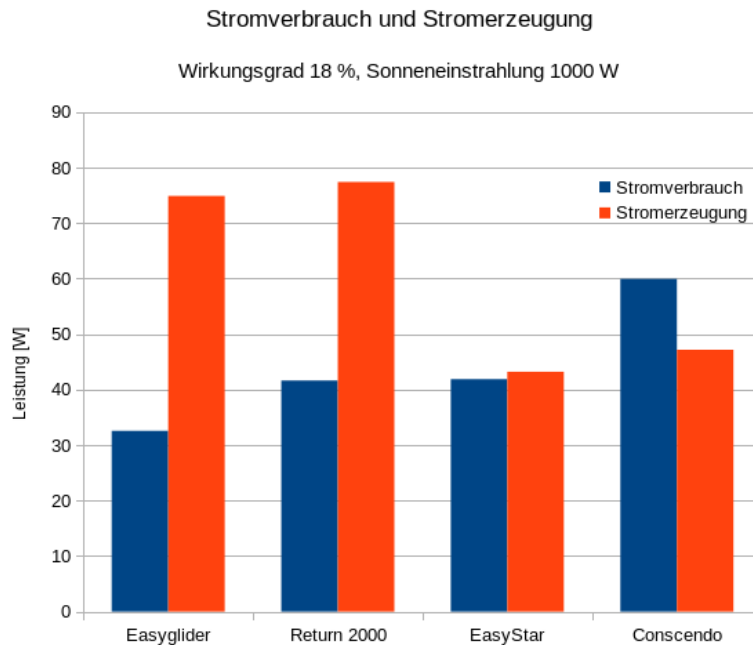


Abb. 4: Geschätzter Stromverbrauch und -erzeugung bei ausgewählten Fliegern

Abbildung 4 zeigt, dass bestimmte Modellflieger theoretisch die Kapazität hätten, mehr Strom zu produzieren als sie verbrauchen. Die Berechnung vernachlässigt aber ein paar wichtige Faktoren. Es wird angenommen, dass die Flügeloberfläche und das Höhenleitwerk perfekt mit Solarzellen bedeckt sind, was nicht möglich ist. Ausserdem werden mögliche Verluste durch die Modifizierung zum Solarflieger nicht beachtet (zusätzliches Gewicht, Einbussen in der Aerodynamik).

Es ist aber möglich abzuschätzen, dass ein autarker Flug der Kategorie 1 bei einer guten Fliegerauswahl möglich sein sollte.

6 Luftwiderstand und Gewicht

6.1 Analyse Anhand des Flügelprofils

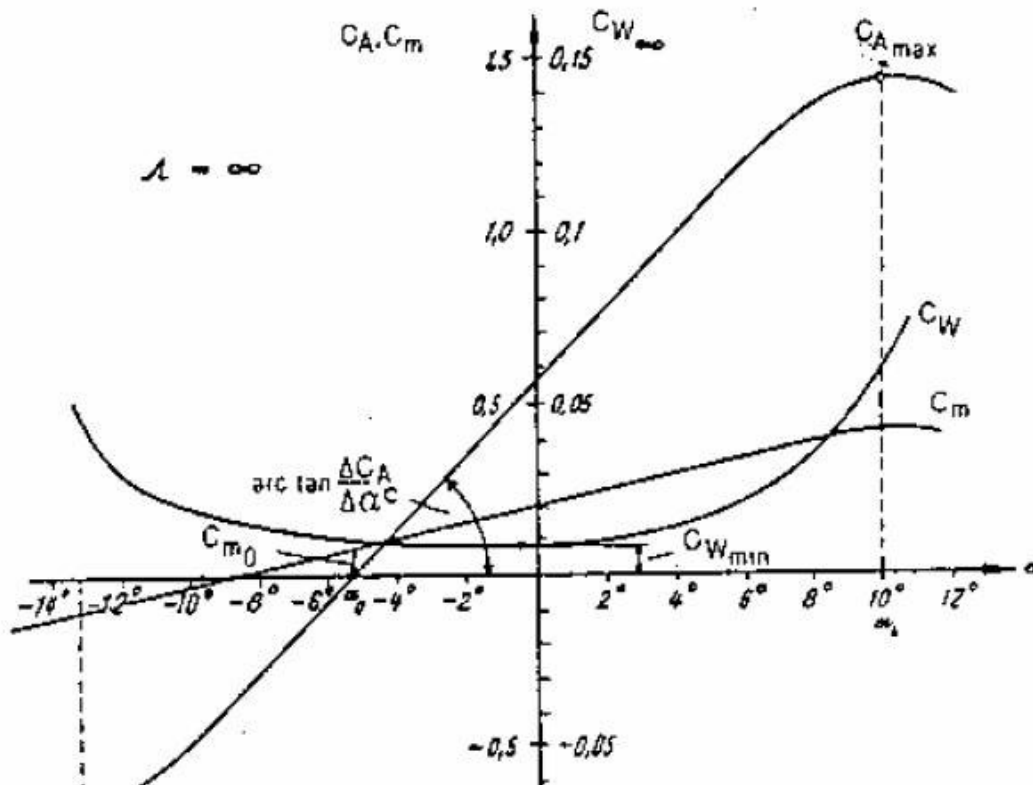


Abb. 5: C_A (C_L Auftriebsbeiwert) und C_W (C_D Luftwiderstandbeiwert) vs Anstellwinkel

Nach Kapitel 3 bedarf ein erhöhtes Flugzeuggewicht einen grösseren Auftrieb. Dies kann entweder durch eine erhöhte Geschwindigkeit oder einen grösseren Auftriebsbeiwert erreicht werden (siehe Kapitel 3.2). Jedoch nicht nur der Auftrieb erhöht sich quadratisch mit der Geschwindigkeit, sondern auch der Luftwiderstand. Deswegen empfiehlt es sich falls möglich zuerst den Anstellwinkel zu vergrössern. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass es bei zu grossen Anstellwinkeln zuerst der Luftwiderstandbeiwert steiler nach oben geht und es dann zu einem Strömungsabriss kommt (d.h. Flugzeug stürzt ab).

Die Optimierung des Leistungsbedarfs durch Anstellwinkel und Geschwindigkeit wird im folgenden Kapitel betrachtet.

6.2 Schubleistung und Luftwiderstand

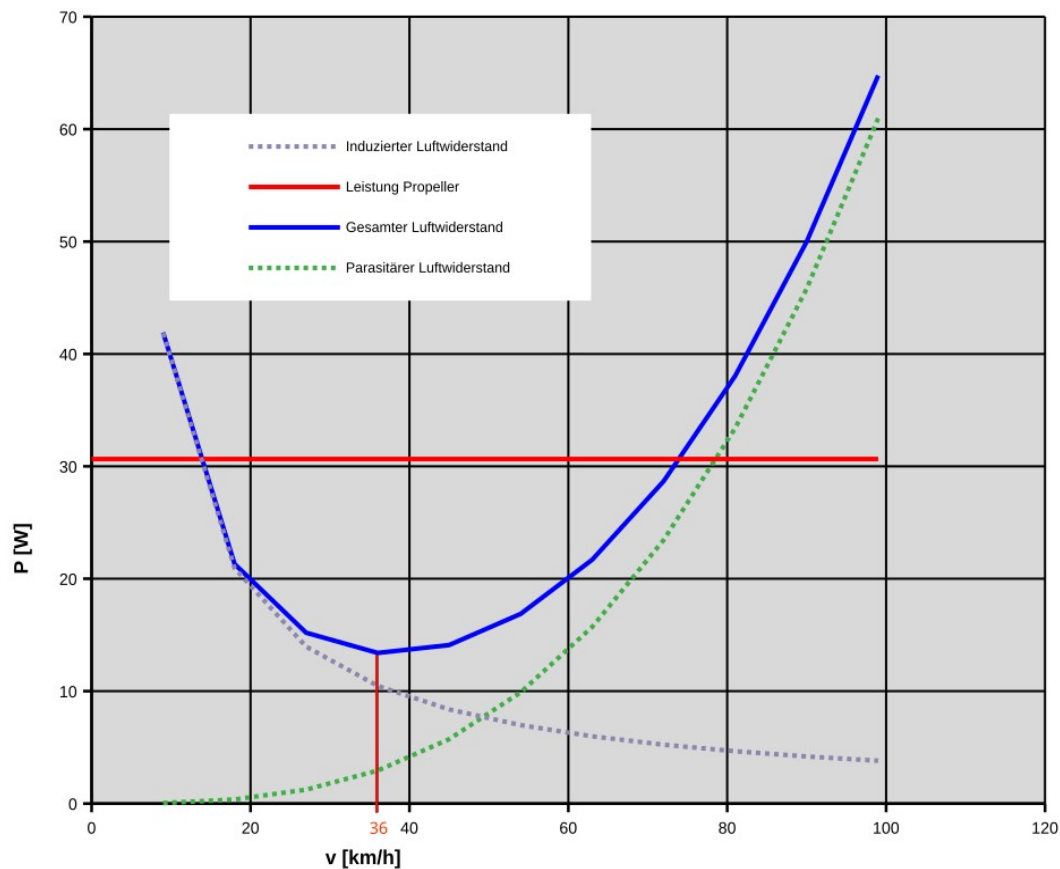


Abb. 6: Rechnerische Abschätzung von Leistung und Luftwiderstand beim Elektro Junior von Graupner

Mithilfe eines Experten von Ultraleichtflugzeugen¹⁰, wurde im Detail angeschaut ob es überhaupt möglich ist in unserem Fall ein autarkes Solarflugzeug der Kategorie 1 zu bauen. Mit Hilfe einer Simulationsberechnung (Anhang 14.7) wurden die Kurven in Abbildung 6 generiert. Mithilfe der Grundformeln aus Kapitel 3 wurde das Kräftegleichgewicht hergestellt und die nötige Schubleistung berechnet.

Die Leistung des Propellers muss grösser als der Luftwiderstand sein (siehe Kapitel 3). Es wurde abgeschätzt, dass die Solarzellen eine Leistung von 60 Watt haben. Aus Erfahrung wurde angenommen, dass der Propeller einen Wirkungsgrad von 50% hat, weshalb die effektive Schubleistung nur noch 30 W beträgt (rote Linie).

Es wurde angenommen, dass das Flugzeug 2.2 kg wiegt, was eine grosszügige Schätzung für den Solarflieger inklusive Solarzellen und Elektronik ist.

¹⁰ Vorlesung mit Experte Enseignant chercheur associé an der Université von Paris Nanterre, 20.07.2022.

Der gesamte Luftwiderstand eines Flugzeuges (blau) kann in den induzierten und in den parasitären Luftwiderstand unterteilt werden. Der induzierte Luftwiderstand (gepunktet grau) hängt mit dem Auftrieb und somit dem Anstellwinkel des Flugzeuges zusammen. Der parasitäre Luftwiderstand (gepunktet grün) hingegen wird z.B. durch die Reibung der Luft an der Oberfläche des Flugzeuges selber verursacht und ist unabhängig vom Anstellwinkel bzw. Auftrieb. Der parasitäre Luftwiderstand geht quadratisch mit der Geschwindigkeit.

Wenn das Flugzeug schneller fliegt generiert das Flügelprofil (siehe Kapitel 3.2) mehr Auftrieb. Das heisst, der Anstellwinkel kann reduziert werden und der induzierte Luftwiderstand wird kleiner. Diese Zusammenhänge sind mit den gepunkteten Grafen dargestellt. Durch die Addition ergibt sich die blaue parabelförmige Kurve, die bei 30 - 36 km/h mit 15 W ein Minimum hat.

Dieser Punkt mit dem tiefsten Luftwiderstand ist die Geschwindigkeit, bei der man am wenigsten Leistung braucht um in der Luft zu bleiben. Es ist aber nicht unbedingt der Punkt, mit welchem man am wenigsten Energie für eine gegebene Strecke braucht. Da aber Ziel dieses Projektes ist, möglichst lange in der Luft zu bleiben, spielt die Strecke keine Rolle.

Die Differenz zwischen der Schubkraft des Propellers und des gesamten Luftwiderstandes, auch ΔP , kann benutzt werden um den Flieger steigen zu lassen oder die Batterie zu laden. In diesem Fall ist ΔP beim kleinsten Luftwiderstand positiv, womit gezeigt wird, dass es möglich ist autark zu fliegen.

6.3 Auswirkungen von zusätzlichem Gewicht

Die Auswirkungen von zusätzlichem Gewicht wurden mit einem Modellflugpiloten besprochen: Es sei in den meisten Fällen möglich 10 – 20 % des Gewichts des Fliegers hinzuzufügen ohne, dass die Flugeigenschaften des Flugzeuges zu stark beeinträchtigt werden, da eine bestimmte Marge besteht. Dies bestätigt die Beobachtung von Kapitel 6.2, dass der Anstellwinkel um wenige Grade erhöht werden kann, ohne dass der Luftwiderstand zu gross wird.

Diese Marge bei Modellfliegern kommt unter anderem daher, dass je nach Konfiguration von Motor Batterie usw. das Flugzeug mehr oder weniger wiegt. Auch für Kunstflugformen und ähnlichen Flugmanövern brauchen Modellflieger diese Marge. Bei der Entwicklung eines Solarfliegers, ist das Gewicht bekannt, weshalb die Marge kleiner gestaltet werden kann und somit ein effizienteres Flugzeugdesign ausgewählt werden kann.

In unserem Fall sind die Eigenschaften des Flugzeuges bereits vorgegeben, da ein fertiges Modell gekauft wurde. Solange das hinzugefügte Gewicht der Solarzellen die 10 – 20 % nicht überschreitet, bringt eine Optimierung des Gewichts nur minimale Verbesserungen der Effizienz.

Das Solarflugzeug wiegt zwischen 1.5 und 2 kg. Die zusätzlich hinzugefügten Solarzellen und Elektronik, können also gut 200 g wiegen, was realistisch erscheint. Wider den Erwartungen am Anfang vom Projekt, spielt das Gewicht eine kleinere Rolle als gedacht.

Nach Aussagen von obigem Modellpiloten, spielt die Aerodynamik eine wesentlichere Rolle. Durch das Belegen des Flügels mit Solarzellen, wird die Aerodynamik des Flügels verändert und so der Auftrieb gemindert und der Luftwiderstand erhöht (siehe auch den Testflug in Kapitel 11).

7 Auswahl des Modellflugzeuges

7.1 Kauf des Flugzeuges

Das Flugzeug sollte stabil und effizient fliegen; Eigenschaften die ein Segler mit sich bringt. Mit einem Elektrosegler ist bereits ein Antrieb integriert. Im Anhang 14.4 werden weitere Argumente erläutert warum hierfür ein Segler geeignet ist. Um die vielen online verfügbaren Modelle zu vergleichen, wurden bestimmte Kriterien der Flieger erfasst:

Bauweise: Art des Materials und Konstruktionsweise. Die meisten Flieger sind entweder komplett aus Schaumstoff oder bestehen aus Balsaholz und sind somit bespannt oder beplankt. Bei den Holzbauweisen, war es aber nicht immer mit den auf dem Internet auffindbaren Daten ersichtlich, ob die Flügel bespannt oder beplankt sind.

Spannweite, Flügeltiefe, Flächeninhalt: Diese Kriterien geben eine Idee der Grösse des Fliegers. Durch diese Angaben kann auch abgeschätzt werden wie viele Solarzellen auf den Flieger passen.

Streckung: Dies ist ein Indikator wie gut der Flieger segelt. Desto grösser die Zahl umso länger und dünner sind die Flügel, was auf einen effizienteren Flug hindeutet.¹¹

Gewicht, Flächenbelastung: Anhand des Gewichts und des Flächeninhaltes kann bestimmt werden wie viel Gewicht ein cm² des Flügels tragen muss. Wenn diese Zahl kleiner ist, muss der Flügel weniger Auftrieb generieren, was heisst, dass der Anstellwinkel kleiner ist oder das Flugzeug langsamer fliegen kann. Dies resultiert in einem geringeren Luftwiderstand.

Topologie des Flügels: Ein Flügel mit einem eher flachem Flügelprofil, das sich über die Spannweite nicht ändert, eignet sich besser für das Aufbringen der Solarzellen. Im Gegensatz erschwert ein Flügel, der sich verjüngt und ein stark gewölbtes Profil hat, die Auslegung der Solarzellen, da diese nur zu einem bestimmten Grad biegsam sind.

¹¹ Aspect ratio aeronautics, in: Wikipedia, 27.10.2022.

Versorgungsspannung: Die meisten Modellflieger für Anfänger haben 2S (8.4V) oder 3S (12.6V) Lipos¹². Durch die Serienschaltung der Solarzellen muss diese Spannung mindestens erreicht werden. Deshalb ist eine geringere Spannung günstiger.

RC-Funktionen: Funktionen zur Steuerung des Flugzeuges. Die meisten Flugzeuge haben ein Seiten- und Höhenruder. Bestimmte haben noch ein Querruder. Dies verleiht dem Flieger mehr Manöverabilität, nimmt aber auf dem Flügel Platz weg.

Preis: Hier muss man aufpassen, dass man alle noch dazu benötigten Teile auch mit einrechnet. Es wurde auch geschaut, ob gebrauchte Modelle verfügbar sind.

Es wurden 15 verschiedene Flieger verglichen (Anhang 14.8). Viele andere Flieger fanden nicht Eingang in diese Tabelle, da sie ein «Showstopper-Merkmal» aufwiesen. Schlussendlich wurden 2 verschiedene gebrauchte Flieger gekauft: Den Fox von Hype ein leichtes Flugzeug aus Schaumstoff und ein Elektro Junior von Graupner. Dieser hat einen Plastikrumpf und beplankte Flügel.

8 Stichwahl



Abb. 7: Links Fox von Hype, Rechts Elektro Junior von Graupner

	Fox von Hype	Elektro Junior von Graupner
Spannweite [m]	1.8	2.1
Spannung Batterie [V]	12.6	8.4
Anzahl Solarzellen	11	18
Fluggewicht [g]	724	1380

¹² Lithium-Polymer-Akkumulator oder auch Lipo genannt.

Gramm pro Solarzelle	65.8	76.7
Flächenbelastung [g/dm ²]	33.5	38.8
Eignung Flügelprofil	gut	ok
Material	Schaumstoff	Balsaholz, beplankt
Benötigte Spannung [V]	12.6	8.4
Motor	Brushless	Bürstenmotor
Rc-Funktionen	Seite, Höhe, Querruder	Seite, Höhenruder
Platz im Rumpf	Weniger	Mehr

Der Elektro Junior ist ein grösserer und deutlich schwerer Flieger als der Fox von Hype. Das zusätzliche Gewicht liegt nicht nur an der Grösse, sondern an einer schwereren Bauweise, aus den 90er Jahren. Die Flächenbelastung des Elektro Juniors ist ungefähr 15 % grösser als beim Fox. Dies wirkt sich negativ auf die Effizienz des Fliegers aus. Das Verhältnis zwischen Fluggewicht und Solarzellenleistung ist besser beim Fox. Der Fox hat das bessere Grössen-Gewicht Verhältnis.

Das grössere Gewicht des Elektro Juniors ist aber bei Wind von Vorteil. Mit dem Fox von Hype konnte aufgrund seiner Windempfindlichkeit nie einen Testflug absolviert werden.¹³ Mit dem Elektro Junior war dies aber möglich. Da die Flüge des Solarfliegers eher im windreichem Herbst stattfinden sollten, ist der Elektro Junior hier im Vorteil.

Mit den 11 Solarzellen¹⁴ die auf den Fox passen, erreicht man 6.05 V (ca. 0.55 V pro Zelle), was um einiges kleiner ist als die benötigten 12.6 V für die 3S Lipo¹⁵ Batterie. Beim Elektro Junior erreichen die 18 Zellen 9.9 V, was über den 8.4 V der 2S Lipo liegt. Die Elektronik für die Spannungsversorgung ist damit für den Elektro Junior einfacher. Dieser Unterschied wird nicht nur durch die kleinere Flügelfläche des Fox getrieben, sondern auch durch dessen Querruder, die für seine aerodynamische Auslegung (Kunstflugmodel) benötigt werden.

Der Elektro Junior hat einen Bürstenmotor mit Getriebe, da es ein Innenläufer ist. Der Fox ist mit seinem bürstenlosen Aussenläufermotor hingegen effizienter, da er keine Verluste beim Getriebe und den Bürsten hat. Da die Motoren nicht ausgebaut und gewogen werden konnten, fehlt ein exakter Gewichtsvergleich. Es wird jedoch geschätzt, dass die Antriebseinheit des Elektro Juniors mindestens dreimal so schwer ist wie die des Fox.

Die benutzten Propeller konnten wegen mangelndem Wissen hier nicht beurteilt werden, obwohl sie eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen.

¹³ Testflüge wurden mit einem erfahrenem Modellflugpiloten gemacht.

¹⁴ Es wurden Sunpower C60 Solarzellen benutzt (siehe Kapitel 9.2).

¹⁵ Die S-Zahl bezeichnet wie viele Zellen in der Batterie Seriell geschaltet sind.

Schlussendlich ist die Wahl aus 2 pragmatischen Gründen auf den Elektro Junior von Graupner gefallen: a) Die einfachere Stromversorgung mit den bereits eingekauften Komponenten und b) das robustere Flugverhalten bei Wind.

9 Bau des Flugzeuges

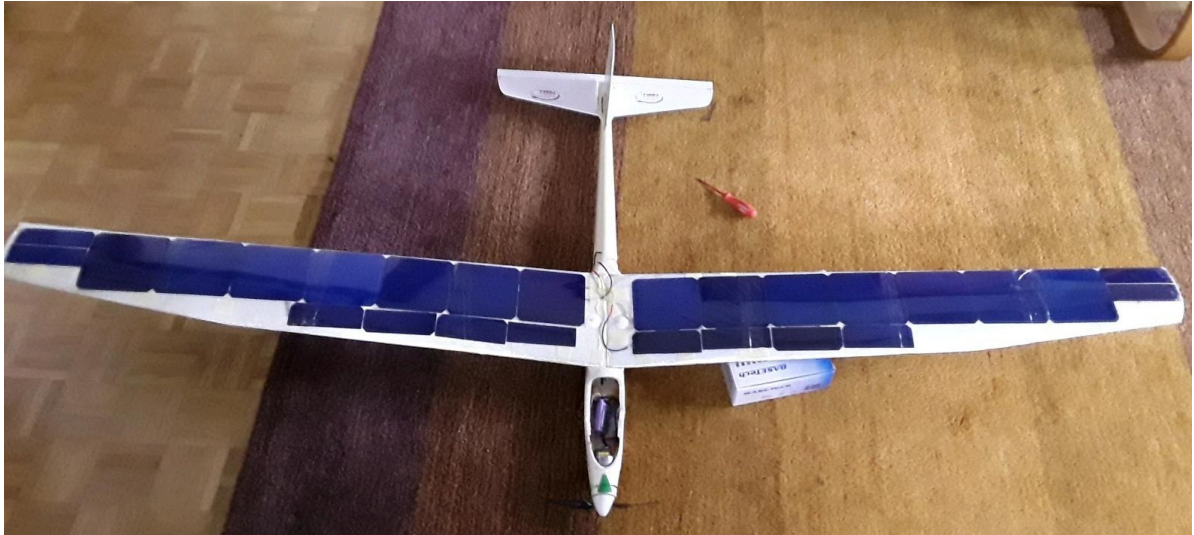


Abb. 8: Fertiger Solarflieger ohne Haube

Eckdaten fertiger Solarflieger:

Spannweite [m]	2.1
Fluggewicht [kg]	1.6
Anzahl Solarzellen	18
Max. Solarleistung [W]	60
Spannung [V]	8.4

9.1 Elektronik

Für die Elektronik im Flugzeug wurde das Rad nicht neu erfunden. Es wurde das bestehende System des Fliegers modifiziert. Angetrieben wird das Flugzeug durch einen in der Nase montierten Bürstenmotor. Dieser wird vom ESC (Electronic Speed Controller) geregelt. An ihm sind wiederum die Batterie und der Empfänger angeschlossen. Der ESC regelt die 6.6 – 8.4 V der Batterie auf 5 V für den Empfänger herunter. Am Empfänger sind 2 Servomotoren für Höhen- und Seitenruder angeschlossen. Insgesamt werden 3 (Motor, Höhen- und Seitenruder) von den 4 Kanälen des 2.4 GHz Empfängers benutzt. ESC, Batterie und die Solarzellen (über MPP-Controller) sind parallel geschaltet.

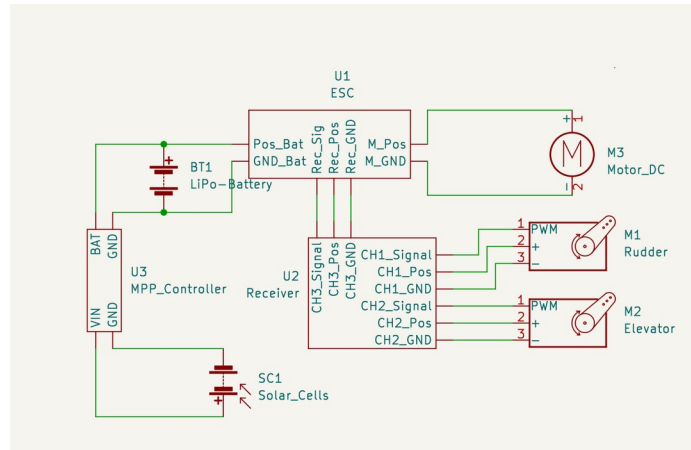


Abb. 9: Schaltplan der Elektronik im Solarflieger

Am Empfänger sind 2 Servomotoren für Höhen- und Seitenruder angeschlossen. Insgesamt werden 3 (Motor, Höhen- und Seitenruder) von den 4 Kanälen des 2.4 GHz Empfängers benutzt. ESC, Batterie und die Solarzellen (über MPP-Controller) sind parallel geschaltet.

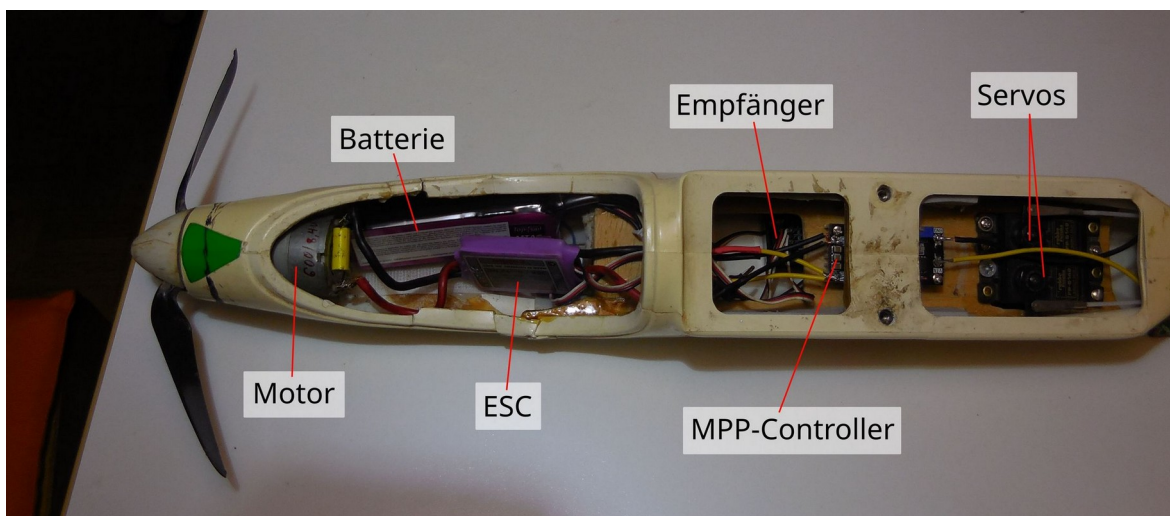


Abb. 10: Elektronik im Rumpf des Solarfliegers

Die im Solarflieger enthaltene Batterie dient als Energiespeicher und -puffer. Beim Starten muss der Motor unter Volllast laufen und zieht so bis zu 13 A. Die Solarzellen liefern aber maximal 6 A und dies nur unter guten Bedingungen. Wenn die Sonne von Wolken verdeckt ist, liefern die Solarzellen nur wenig Strom, welcher nicht genügt um den Propeller anzutreiben. In solchen Fällen wird die Energie aus der Batterie benutzt.

Der Motor des Solarfliegers läuft nicht während dem ganzen Flug. Sobald genügend Höhe erreicht wird, kann das Flugzeug segeln. In diesen Fällen wird die Batterie mit dem Solarstrom geladen.

Insgesamt sind 18 Solarzellen auf den Tragflächen verbaut worden. Alle Zellen wurden seriell geschaltet und erreichen so ungefähr eine MPP-Spannung von ca. 10 V. Diese werden dann im MPP Controller auf 8.4 V für die 2S Lipo heruntergeregelt. Es ist wichtig, dass die Spannung die 8.4 V nicht überschreitet, da sonst die Möglichkeit besteht, dass die Lipo-Batterie überladen wird. Lipos können deswegen explodieren oder anfangen zu brennen. Die Spannung darf aber auch nicht kleiner sein als die der Batterie, da die Batterie sonst nicht geladen wird.

Current-Voltage & Power-Voltage Curve (250S-20)

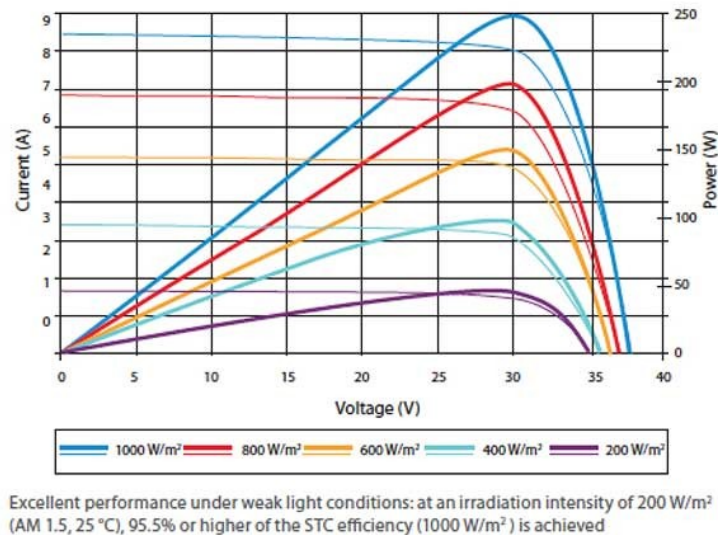


Abb. 11: Typische I-V (dünn) und W-V Kurven (dick) einer Solarzelle bei verschieden starken Sonneneinstrahlungen

Je nachdem wie stark eine Solarzelle belastet wird, ist die Stromstärke und Spannung verschieden (dünne Kurven). Wenn man die Spannung und Stromstärke multipliziert bekommt man die Leistung (dicke Kurven). Bei einer bestimmten Spannung und Stromstärke ist die Leistung am Grössten. Dieser Punkt wird MPP (Maximum Power Point) genannt. Je nachdem wie stark diese Einstrahlung ist, ändert sich dieser. Um die Solarzellen maximal auszunutzen werden bei Photovoltaikanlagen MPP-Tracker benutzt. Dieser sucht immer den MPP für die maximale Leistung, wandelt die Spannung aber schlussendlich so um, dass die Ausgangsspannung konstant ist. Da solche MPP-Tracker recht teuer sind, wurde ein günstigerer aber einfacher MPP-Controller benutzt. Dieser basiert auf dem BQ24650 Chip von Texas Instruments und benutzt den «constant voltage algorithm». Hier wird die Spannung für einen MPP an einem Potentiometer eingestellt. Der MPP-Controller belastet die Solarzelle so, dass die Spannung der Solarzellen immer auf der eingestellten Spannung bleibt. Sobald aber die Einstrahlungsintensität sich ändert, ändert sich der MPP und somit auch die MPP-Spannung. Dies wird zu Verlusten führen. Diese Lösung wird aber immer noch besser sein als ohne

MPP-Tracker, da wie man bei Abbildung 11 sieht, sind die MPPs nicht allzu weit voneinander entfernt liegen.

Der BQ24650 ist für das Laden verschiedener Batteriearten wie auch von Lipos vorgesehen. Deswegen besitzt er Funktionen welche das überladen der Batterie verhindern oder komplett leere Batterien schonend lädt. Der MPP-Tracker schaut also, dass die Spannung im richtigen Bereich für die Batterie liegt.

9.2 Solarzellen

Die benutzten Sunpower C60 Solarzellen haben nach dem Hersteller eine Leerlaufspannung von 0.687 V und eine Spannung von 0.582 V beim MPP. In unseren Breitengraden sind diese Werte nach unseren Messungen eher 0.62 V für die Leerlaufspannung und 0.55 V für die Spannung beim MPP. Die 2S Lipo hat eine Spannung von 8.4 V welche für das Laden der Batterien erreicht werden muss.

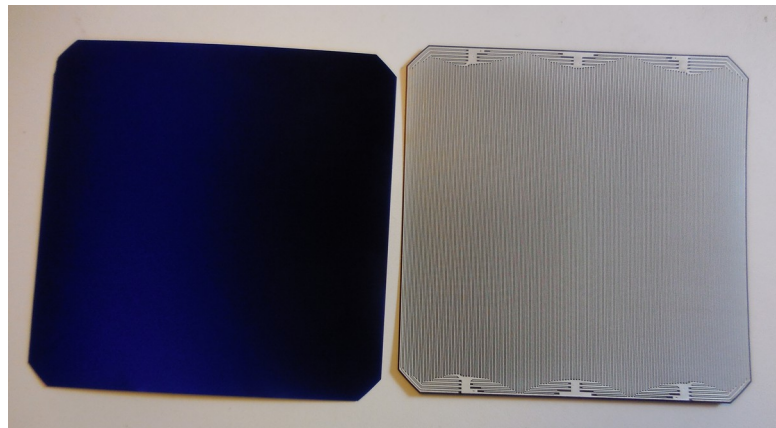


Abb. 12: Sunpower C60 Solarzellen, Vorderseite (l.) und Rückseite (r.)

Solarzellen verhalten sich in einer Schaltung wie Batterien oder sonstige Spannungsquellen. Wenn man sie seriell schaltet, addiert sich die Spannung und der Strom bleibt gleich. Wenn man sie parallel schaltet, addiert sich der Strom und die Spannung bleibt gleich. In Serie geschaltete Solarzellen liefern nur so viel Strom wie die schwächste Solarzelle. Wenn zum Beispiel alle bis auf eine Solarzellen 6 A liefern und die übrige nur 2 A liefert, kann das System maximal 2 A liefern wenn die Zellen seriell geschaltet sind.

Es wurden insgesamt 14 ganze Solarzellen seriell verschaltet. Zusätzlich sind 4 weitere Zellen gedrittelt worden. Mit den Drittel ist es möglich den Flügel besser auszunutzen. Je 3 dieser Drittel sind parallel verschaltet und anschliessend seriell an die restlichen angeschlossen. Dies macht insgesamt 18 Solarzellen, also eine Spannung von 9.9 V beim MPP. Dies genügt als Eingangsspannung für den MPP-Tracker.

Nach dem Hersteller haben diese Solarzellen eine Leistung von 3.42 W beim MPP. In Versuchen wurde eine Leistung von 3.2 W erreicht. Die 18 Solarzellen haben also eine Spitzenleistung von rund 60 W.

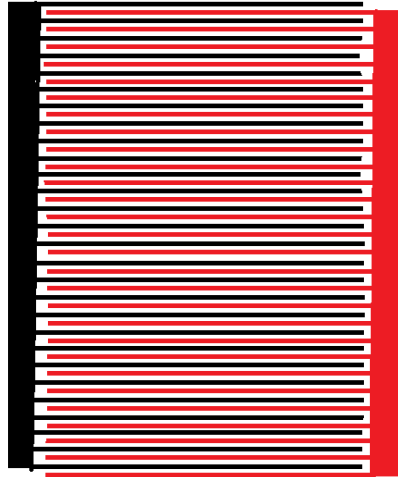


Abb. 14: Aufbau der Solarzelle mit Anode und Kathode

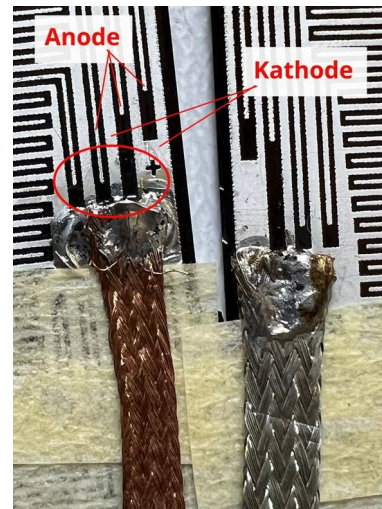


Abb. 13: Lötstelle an der Kathode. In Rot: Gefahrenstelle

Die Anode und Kathode der Solarzellen sind ein bisschen wie verschränkte Finger aufgebaut (siehe Abb. 14) Das heisst es passiert sehr schnell ein Kurzschluss, da die beiden Pole ungeschützt sehr nahe beieinander liegen. Beim verlöten der Zellen wurde nicht darauf geachtet. Deswegen wurden in der Nähe des Löt pads (Abb. 13) mehrere Kurzschlüsse verursacht. Da wir parallel an beiden Flügeln gearbeitet haben, ist uns das Problem erst aufgefallen als wir alle Solarzellen fertiggelötet hatten. Wir mussten deswegen einige der gelöteten Solarzellen neu befestigen oder auch ersetzen, wenn es einen Kurzschluss gab, den wir nicht entdecken oder rückgängig machen konnten. Am Ende jedoch ist es nochmals gut gelaufen.

9.3 Flügel



Abb. 15: Rechter Flügel, bespannt und mit Solarzellen belegt

Die Auslegung der Solarzellen ist nicht so trivial wie dies auf den ersten Blick erscheint. Ziel ist es den Flügel möglichst viel zu bedecken. Obwohl die Solarzellen zu einem bestimmten Grad biegsam sind, sind sie immer noch recht steif und können recht schnell brechen. Es wurde entschieden einzelne Solarzellen zu Dritteln, um die Ränder besser auszunutzen (siehe Abb. 15).

In Abbildung 15 sieht man immer noch freie Flecken auf dem Flügel. Es ist nicht möglich den ganzen Flügel mit den Sunpower C60 zu belegen, da der Flügel an der Profilmuse zu stark gewölbt ist. Entweder würden die Solarzellen brechen oder die Aerodynamik würde stark beeinträchtigt werden.

Obwohl die Solarzellen auf den flachsten Teilen des Flügels liegen, liegen sie an vielen Orten nicht perfekt auf und es hat einen Spalt zwischen Solarzelle und Flügel. Solche Unregelmäßigkeiten zerstören das Flügelprofil. Die Luft kann unter die Solarzellen strömen und diese sogar Beschädigen (Abb. 16).

Deswegen wird eine Lösung gebraucht, welche die Solarzellen möglichst schön an den Flügel andrückt und den Spalt zwischen Solarzelle und Flügel abdichtet. In unserem Fall wurde dies gemacht, indem Frischhaltefolie über Solarzellen und Flügel gespannt wurde.

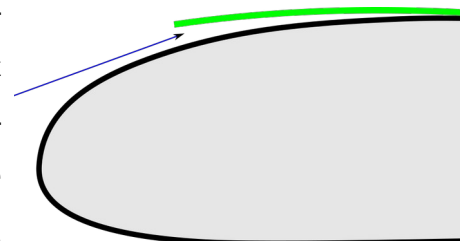


Abb. 16: Luft strömt unter die Solarzelle

Frischhaltefolie ist leicht, durchsichtig und ein wenig klebrig. Dank dieser Eigenschaften ist es möglich die Folie relativ glatt über die Solarzellen und den Flügel zu spannen. Nebst ein paar wenigen Klebstreifen ist nichts zusätzliches nötig. Nach unseren Experimenten sind die Verluste aufgrund der geminderten Einstrahlung ca. 0.1 W pro Zelle, wenn die Frischhaltefolie glatt über die Solarzelle gespannt ist. Wegen der Beschaffung des Flügels und der darauf liegenden Solarzellen war es aber nicht möglich die Folie perfekt über den Flügel zu spannen (Abb. 15).

Wie man aber in Abbildung 17 sehen kann, ist diese Lösung nicht perfekt. Das Flügelprofil ist recht stark verändert und somit weniger effizient und anfälliger auf Strömungsabriss. Auch lockert sich die Folie mit der Zeit ein bisschen.



Abb. 17: Spalt zwischen Flügel und Solarzelle bei Bespannung

Die Lötstellen und Kabel unter den Solarzellen bilden Unregelmässigkeiten. Wenn die Solarzellen gegen den Flügel gedrückt werden, sei es durch die Bespannung, Transport oder durch einen Absturz, besteht die Möglichkeit, dass die Solarzelle dort bricht oder beschädigt wird. Deswegen wurde eine dünne Schicht Schaumstoff zwischen Solarzellen und Flügel gelegt.

10 Abschätzen der Flugzeit

Unter voller Last verbraucht der Motor des Elektro Junior 85 bis 110 Watt. Zum Fliegen muss er aber nicht konstant beschleunigen. Segler gewinnen in der Regel bei maximaler Auslastung des Motors an Höhe, schalten den Motor aus und Segeln. Sobald das Modellflugzeug wieder zu tief ist wird es wieder hochgeflogen.

Unseren Abschätzungen¹⁶ nach, braucht der Flieger durchschnittlich zwischen 30 und 50 Watt elektrische Energie. Die 18 Solarzellen auf den Tragflächen machen eine Fläche von ungefähr 0.28 m² aus. Die Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von 22.5 %. Es wird aber mit 20 % Verlusten gerechnet, da die Solarzellen nicht immer gut beschienen werden und man sonstige Verluste hat. Der effektive Prozentsatz ist also 18 %.

Als Datenquelle für die Sonneneinstrahlung wurde die Datenbank des PVGIS der Europäischen Union genommen. Als Standort wurde Baden im Aargau gewählt.

¹⁶ Vorlesung mit Experte, 20.07.2022.

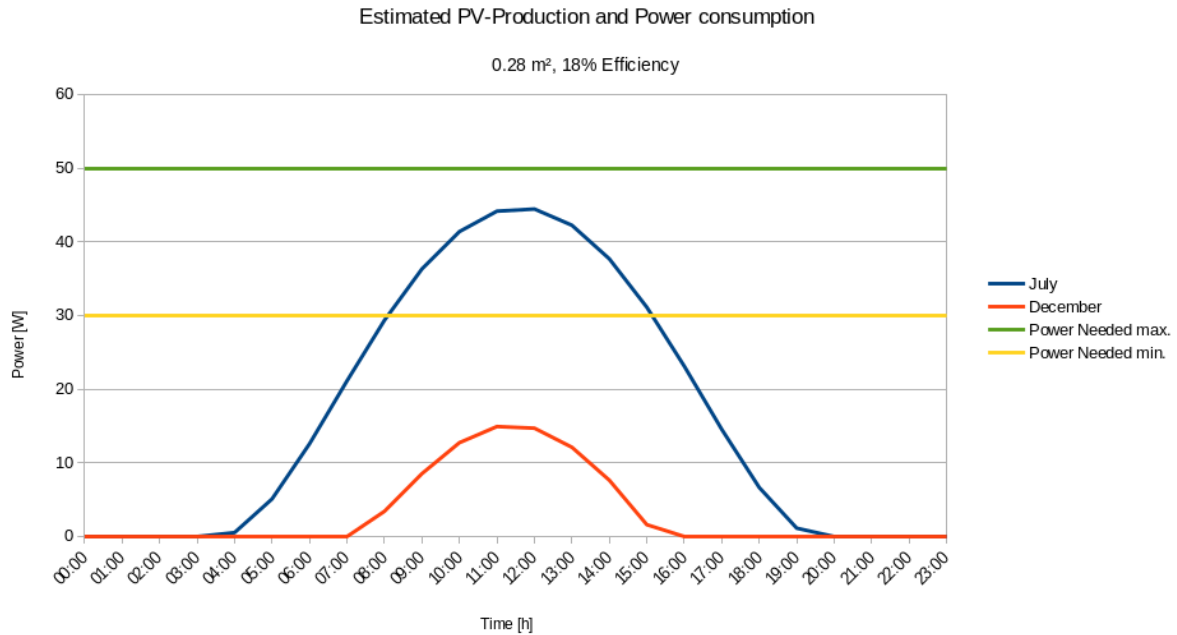


Abb. 18: Geschätzte Photovoltaik Produktion und Verbrauch des Fliegers über den Tag.
Datenquelle: PVGIS.

Durchschnittlich treffen 5.258 kWh Sonneneinstrahlung auf 1 m² an einem Julitag. Im Dezember sind dies 0.742 kWh pro m². Das heisst im Juli könnten die Solarzellen des Flugzeuges um die 242 Wh und im Dezember 34 Wh an einem Tag produzieren. Wenn man nun annimmt, dass das Flugzeug durchschnittlich 30 W verbraucht und unter guten Bedingungen fliegt, bräuchte es an einem Tag 720 Wh elektrische Energie. Um 24 Stunden am Stück zu fliegen müsste das Solarflugzeug also 3 mal mehr Strom produzieren. Mit diesem Solarflieger ist es also nicht möglich einen autarken Flug der Kategorie 2 (siehe Kapitel 10) zu erreichen.

10.1 Speichern von Energie

Wenn die Sonne genug stark scheint, können die Solarzellen mehr Strom produzieren als das Flugzeug im Moment verbraucht. Diese Energie kann abgespeichert werden um an einem späterem Zeitpunkt verwendet zu werden. Im Beispiel von Abbildung 18 wären dies im Juli bei einem Verbrauch von 30 Watt etwa 70 Wh an einem Tag.

Bei der im Solarflieger benutzten Batterie, handelt es sich um eine 2S Lipo (7.4 V Nominalspannung) Batterie mit 1.3 Ah. $E = 7.4 V * 1.3 Ah = 9.62 Wh$ Man bräuchte also 7 weitere solche Batterien um diese Energie zu speichern. Dies würde ca. 600 g hinzufügen und einiges mehr an Platz brauchen. Das benutzte Flugzeug wäre nicht im Stande dieses zusätzliche Gewicht zu tragen.

Es wäre auch möglich diese Energie in potentielle Energie zu speichern. Wenn ein Überschuss von Energie herrscht, kann das Flugzeug steigen und wieder sinken um Energie zu sparen. Man kann bei Flugzeugen ein sogenanntes Gleitverhältnis bei einer bestimmten Geschwindigkeit bestimmen: Wie viele Me-

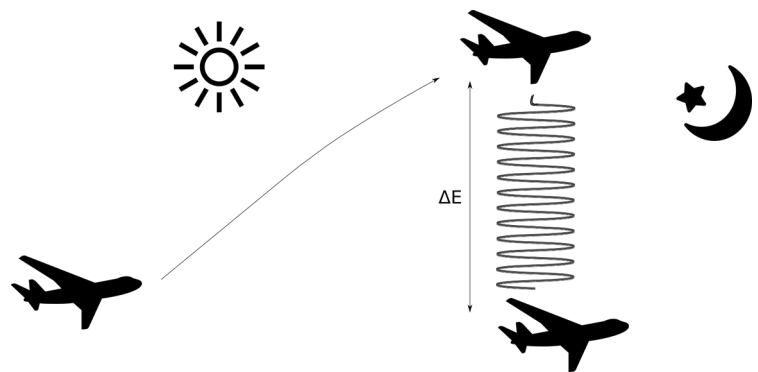


Abb. 19: Speicherung der Überschüssigen Energie in Höhe

ter kann ein Flugzeug segeln, bis es 1 Meter an Höhe verliert. Da dies recht aufwendig zu bestimmen ist, wird dies in den meisten Fällen nicht angegeben. Sehr groben Abschätzungen nach, hat unser Flieger ein Gleitverhältnis von 8:1^{17 18}. Um 100 Meter zu steigen werden 0.8 Wh elektrische Energie für das Flugzeug zusätzlich verbraucht.

$$E_H = \frac{E_{POT}}{\eta}$$

E_H	Zusätzlich benötigte elektrische Energie um an Höhe zu gewinnen [Wh]
E_{POT}	Potentielle Energie [Wh]
η	Wirkungsgrad Propeller 50 % ¹⁹

Das Flugzeug braucht 800 m Strecke um die 100 m Höhe zu verlieren. Mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h sind dies ungefähr 96 s Flugzeit welche gespeichert werden konnten.

Je nachdem was die Aufgabe des Solarflugzeuges ist, muss es in bestimmten Höhen bleiben und kann nicht allzu viel steigen.

11 Funktionstest Solarflieger

Wie in Kapitel 10 erwähnt, wird das Solarflugzeug am besten im Sommer geflogen, da im Winter die Sonnenintensität zu tief ist. Aus Zeitgründen aber, konnte der Solarflieger erst im Herbst fertiggestellt werden. Deshalb fand unser Erstflug mit dem Solarflieger im November statt. Zum Zeitpunkt des Fluges (in Nussbaumen), war die Sonnenintensität bei der nächsten Messtation (PSI Villigen) ungefähr 150 w/m². Dies würde eine Solarleistung von maximal 8 W machen, was sehr tief ist.

¹⁷ Glide Ratio, in: Reddit, 08.11.2022.

¹⁸ Glide Ratio, in: rcuniverse, 08.11.2022.

¹⁹ Vorlesung mit Experte, 20.07.2022.

Das Solarflugzeug hatte Mühe zu starten und ist sogar mehrere Male beim Start abgestürzt. Dies steht im Gegensatz zu den Flügen ohne Modifikationen. Dort hat ein leichter Schubs genügt, damit das Flugzeug starten konnte. Der Flug des unmodifizierten Flugzeugs war sehr gleichmässig und stabil. Der Flug des Solarflugzeuges war instabil und der Pilot musste auf Strömungsabriss achten. Auch die Motorleistung hat kaum gereicht, um die Fluggeschwindigkeit zu erreichen.



Abb. 20: Misslungener Start des Solarfliegers. Nussbaumen. 06.11.2022.

Die 140 g zusätzliches Gewicht spielen gegenüber dem Fluggewicht von 1.5 kg des Elektro Juniors kaum eine Rolle. Grund für die oben genannten Schwierigkeiten sind vielmehr Einbussen in der Aerodynamik. Durch das Aufbringen der Solarzellen wurde die Form des Flügelprofils verändert. Zusätzlich ist diese Änderung nicht gleichmässig über beide Flügel verteilt, was wahrscheinlich ein weiterer Grund der Instabilität des Flugzeuges ist.

Der Motor des Elektro Juniors zieht unter voller Belastung etwa 13 A. Je nach Ladungsstand der Batterie (6.6 – 8.4 V), sind dies 85 – 110 W, welche der Motor verbraucht. In der Theorie hätte man damit 6 Motorminuten bei Vollgas.

Es wurden insgesamt über 15 Minuten mit dem Solarflieger geflogen²⁰. Die meiste Zeit ist der Solarflieger gesegelt. Während dieser Flugsession, wurden ungefähr 50% des 1300 mAh Akku verbraucht, was ungefähr 5 Wh entspricht. Es wäre also kein Problem gewesen länger zu fliegen.

Theoretisch wäre es am einfachsten die Grundgeschwindigkeit mit einem GPS-Modul zu ermitteln. Aufgrund fehlender Zeit, war dies nicht möglich und es musste auf eine

einfachere Methode zurückgegriffen werden. Es wurde versucht zu messen wie lange das Flugzeug für eine Strecke von 150 m hat. Durchschnittlich hat das Flugzeug 21.04 Sekunden gebraucht. Die Geschwindigkeit des Flugzeuges beim Segeln war also um die 7.1 m/s oder 26 km/h. Die effektive Geschwindigkeit ist wahrscheinlich 1 – 3 km/h schneller, da die vertikal zurückgelegte Strecke



Abb. 21: Solarflugzeug im Flug. Nussbaumen, 06.11.2022.

²⁰ Es wurden 2 Flüge absolviert.

nicht berücksichtigt werden konnte. An diesem Tag war es fast windstill, weswegen die Grundgeschwindigkeit nicht allzu weit von der echten Geschwindigkeit liegen sollte. Dieses Ergebnis stimmt aber gut mit den Voraussagen aus Kapitel 6.2 überein. Hier wurden nämlich um die 30 km/h als optimale Geschwindigkeit ausgerechnet.

12 Verbesserungen für weiterführende Projekte

Während der Entwicklung und dem Bau des Solarfliegers, sind uns viele kreative Ideen eingefallen:

- Durch den Entwurf und Bau eines eigenen Flügels wäre es möglich ein besseres Optimum zu den Randbedingungen von Aerodynamik und Solarzellenlayout zu machen. Hierbei müssten auch neue Fertigungsmöglichkeiten entwickelt werden. Zum Beispiel das aufkleben/befestigen der Solarzellen.
- Für eine bessere Analyse der Flüge könnte ein Telemetriesystem mit GPS, Leistungsmessung usw. helfen. Es gibt im Modellbau fertige Systeme zu kaufen oder man könnte auch mit dem ESP32 eine kostengünstige und flexible alternative entwickeln.
- Das manuelle Fliegen eignet sich nur begrenzt für längere Flüge. Anhand schon bestehender Lösungen, wie zum Beispiel Ardupilot²¹, wäre es möglich einen Autopiloten für das Solarflugzeug zu implementieren.
- Für einen autarken Flug der Kategorie 2 müsste das ganze Flugzeug optimiert werden um Platz und Gewichtskapazität für die Batterien zu schaffen.

13 Fazit

In dieser Maturaarbeit ist es gelungen die nötige Theorie zu erarbeiten, mit dem Bau des Solarfliegers sie umzusetzen und mit Messungen und Versuchen die Annahmen zu validieren.

Es wurden zahlreiche Herausforderungen gemeistert: Die Definition und der Einkauf der benötigten Komponenten mit einem sehr begrenztem Budget hat unerwartet viel Aufwand erfordert.

Im Flugzeugbau spielt das Gewicht eine Schlüsselrolle. Deshalb wurde am Anfang der Fokus auf die Optimierung des Gewichts gerichtet. Während des Projektverlaufs zeigte sich jedoch, dass die Aerodynamik der Flügel mit den aufgebrauchten Solarzellen eine grössere Herausforderung darstellte.

²¹ Dabei handelt es sich um eine Open-Source Software: <https://ardupilot.org>.

Dank der üppigen Informationen auf dem Internet, war es möglich mit Zeitaufwand sich in das komplexe System zum Laden der Batterien mit einem MPP-Controller einzuarbeiten. Immer wieder überraschend, dass man solche elektronischen Komponenten günstig auf dem Internet erwerben kann.

Auf der Fertigungsseite stechen 3 Punkte heraus: Um möglichst viele Solarzellen aufzubringen mussten sie teilweise verschnitten werden. Aufgrund ihrer Zerbrechlichkeit musste ein geeignetes Schneidewerkzeug gefunden werden. Eine Schneidemaschine in der Werkstatt eines unserer Grosseltern hat sich als geeignet herausgestellt. Das Löten der Solarzellen erfordert viel praktische Erfahrung um Benetzungsprobleme zu lösen und Kurzschlüsse zu vermeiden. Mit der Benutzung eines Lötstopps hätten etliche Arbeitsstunden gespart werden können. Mit der Frischhaltefolie wurde eine einfache und effektive Methode gefunden um die Solarzellen auf dem Flügel zu fixieren. Dies genügt für einfache Prototypversuche, aber ist keine dauerhafte Lösung.

Keiner im Team hat Modellflugerfahrung, weshalb ein erfahrener Pilot angefragt wurde, der sich als sehr hilfreich beim Validierungsflug herausgestellt hat. Wetter und Zeitpläne mussten koordiniert werden.

Ein Solarflieger stellt ein relativ komplexes System aufgrund der Aerodynamik, des Flugzeugdesigns, der nötigen Fertigungstechnik, der Elektronik usw. dar. Mit diesem Projekt war es möglich die Grundlagen zu erarbeiten und somit ein Gefühl für die verschiedenen Grössenordnungen und Dimensionen zu bekommen. Jetzt wäre es interessant eine 2. Iteration zu starten und obige Vorschläge umzusetzen. Mit der Dokumentation wird gehofft, dass die Erfahrung zumindest Teilweise weitergegeben werden kann (<https://hackaday.io/project/188122-solarplane>).

14 Anhang

14.1 Löten der Solarzellen

Sunpower verkauft Kombinationsteile zum verlöten 2 Solarzellen. Diese können nur bei ganzen Solarzellen verwendet werden und es ist nicht klar wie biegsam diese sind. Die Biegsamkeit und Härte der Lötstelle spielt eine nicht zu vergessende Rolle. Wenn man direkt ein Kabel oder Litze an die Solarzelle lötet, geht diese schnell kaputt, da man die Solarzelle schnell verdreht wenn man nicht sehr vorsichtig ist. Zusätzlich sind solche Verbindungen nicht sehr Flach. Deshalb sind die Solarzellen mit Entlötlitze verbunden worden. Diese besteht aus sehr vielen feinen ineinander gewebten Drähte. Dadurch ist die Entlötlitze flexibel aber kann gut gelötet werden.

Um die Solarzellen über längere Distanzen zu verbinden wurde wieder Entlötlitze verwendet (Abb. 22). Es wurde Klebeband verwendet um die Solarzellen vom Draht zu isolieren, da sonst Kurzschlüsse entstehen können. Es wurde Entlötlitze verwendet, da sie Flach ist.

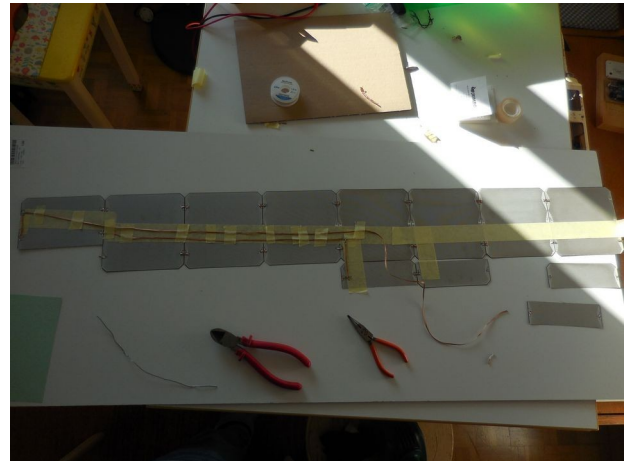


Abb. 22: Verbinden der Solarzellen mit Entlötlitze.

14.2 Kosten des Solarfliegers

Folgende Tabelle zeigt auf wie viel das Projekt ungefähr gekostet hat.

Was	Preis [CHF]
30 Solarzellen Sunpower c60	118.87
Modellflugzeug Elektro Junior, gebraucht	40.00
Modellflugzeug Fox, gebraucht	40.00
Fernsteuerung Futaba T4Y-2,4Ghz, gebraucht	30.00
Lipo Ladegerät, gebraucht	22.00
Plastikschrauben	10.95
Entlötlitze	18.00
2x Lipo Batterie	49.90
2x MPP-Controller	26.57

2mm Gold Stecker	11.80
Sonstiges	25.00
Total	CHF 393.09

14.3 Arten von Solarzellen

14.3.1 Monokristallin

Monokristalline Solarpanels sind zwar schwer vor allem wegen dem Schutzglas, jedoch kann man dazu einzelne Solarzellen kaufen. Jedoch sind diese viel seltener als einfache Solarpanels. Das Beste für unser Projekt sind dünne und biegsame Solarzellen. Monokristalline Solarpanels kann man anhand ihrer charakteristischen dunkelblauen



Abb. 23: Monokristallines Solarpanel. IBC SOLAR: Vor- und Nachteile von monokristallinen Solarmodulen, 08.06.2022.

Farbe erkennen und den Quadraten auf dem Panel (siehe links²²). Generell haben Monokristalline Solarpanels eine gute Leistung und sind die effektivsten Solarpanels mit einer Effektivität von rund 15-22%. Preislich sind diese Solarpanels in der Mitte.^{23 24 25}

14.3.2 Polykristallin

Polykristalline Solarpanels sind den Monokristallinen sehr ähnlich, jedoch haben sie eine andere Farbe. Sie sind meistens blau, weil sie nicht aus nur einem einzelnen Siliziumkristall aufgebaut sind, sondern aus mehreren, die zusammengeschmolzen wurden. Das reduziert den Preis, denn man muss nicht riesige makellose Kristalle züchten, sondern nur noch mehrere kleine. Polykristalline Solarpanels sind sehr ähnlich zu den monokristallinen Solarpanels, jedoch ist

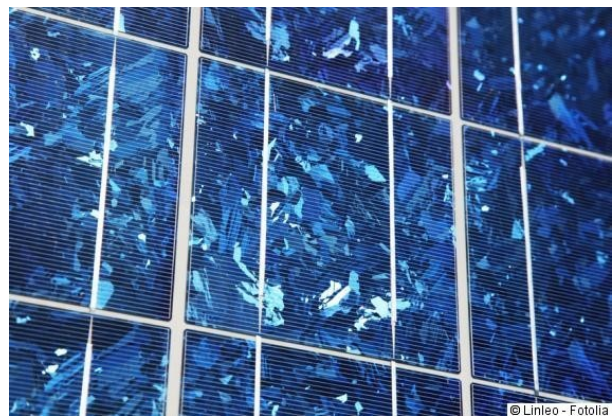


Abb. 24: Polykristallines Solarpanel. Fotolia: Polykristalline Solarzellen, 08.06.2022.

22 Vor- und Nachteile von monokristallinen Solarmodulen im Vergleich, in: Energie-Experten, 08.06.2022.

23 Monokristalline solar panel, in: Economictimes, 08.06.2022.

24 Polykristalline solar cells vs monokristalline, in: Geothermhvac, 08.06.2022.

25 100W Solarpanel 12V Monokristallin, in: Autosolar.ch, 08.06.2022.

die Farbe viel heller und man erkennt eine Mosaikstruktur bei diesen Zellen (siehe Abb. 24²⁶). Die Effektivität dieser Solarpanels ist zwar etwas kleiner als bei den Monokristallinen mit 13-16%, sie sind aber dafür billiger. Von den materiellen Eigenschaften (Biegsamkeit, Steifheit usw.) sind sie oft ähnlich wie die Monokristallinen.^{27 28 29}

14.3.3 Thin-Film

Dünnere Filme, oder auch Thin-Film, Solarpanels sind sehr dünn, leicht und biegsam, jedoch ist bei diesen Solarpanels die Effektivität nur sehr niedrig mit rund 10% Effizienz. Diese Solarzellen sind die seltensten und sind auf dem Internet nur sehr schwer zu finden, für den Kauf zumindest. Ausserdem sind diese Solarzellen die teuersten pro Watt. Das Gewicht-Leistungsverhältnis ist oft besser als bei den Kristallinen Solarzellen.^{30 31}



Abb. 25: Thin-Film Solarpanel. Wongsaita: *Using Thin Films for Solar Panels*, 08.06.2022.

14.3.4 Weitere Solarpanels

Es gibt noch unzählige weitere Solarpanel-Typen, jedoch sind diese noch nicht auf dem Markt, oder zu selten verfügbar. Es handelt sich bei denen um experimentelle Solarpanels/Solarzellen die grosse Leistung versprechen und einen billigen Preis vorführen, jedoch sind die meisten dieser Versprechen sehr suspekt.³²

14.4 Kriterien zur Auswahl der Flugzeugart

Folgendes Kapitel erklärt Kriterien, welche wir zur Auswahl des Modellflugzeuges benutzen. Wegen der Menge an Kriterien werden hier nur die wichtigsten vorgestellt.

26 Polykristalline Solarzellen, in: Solaranlage, 08.06.2022.

27 PolyCrystaline Solar Panels, in: Economicstimes, 08.06.2022.

28 Polykristalline solar cells vs monokristalline, in: geothermhvac.com, 08.06.2022.

29 SLP100-12U Silver Poly 12 Volt, in: Unboundsolar, 08.06.2022.

30 Thin film solar panels, in: Energysage, 08.06.2022.

31 Thin-Film Solar Panels, in: Ases, 08.06.2022.

32 Thin-film solar cell, in: Wikipedia, 08.06.2022.

14.4.1 Bauart und Material

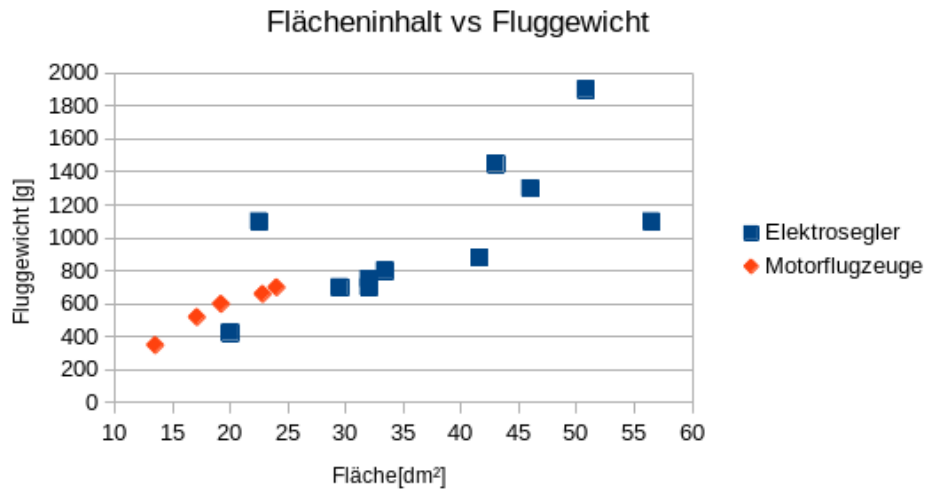


Abb. 26: Verhältnis Gewicht Fläche bei versch. Materialien

Es bieten sich drei Möglichkeiten an ein Flugzeug zu bauen: 1. Von Grund auf selbst bauen 2. auf ein Bausatz zurückgreifen 3. ein fast fertiges Modell kaufen. Die erste Option wurde verworfen, da im Team niemand Erfahrung mit Flugzeugbau hat. Es wurde entschieden einen einfachen Bausatz oder ein fast fertiges Modell zu benutzen. Beim Bausatz wird das Verbauen der Solarzellen besser/eleganter, es ist aber auch fehleranfälliger.

Auf dem Markt gibt es hauptsächlich zwei Materialarten/Bauweisen: Schaumstoffe und die traditionellen Holzrippchen. Flugzeuge mit Ripppchen kommen oft in Bausets vor, sind aber oft empfindlicher als die Flieger aus Schaumstoff. Wie man bei Abbildung 26 sieht, hat es zwischen den beiden Materialien keinen grossen Unterschied beim Gewicht. Flugzeuge aus Rippen sind aber oft ein bisschen grösser.

14.4.2 Flugzeugtyp

Der Vorteil von Flugzeugen mit Schwanz gegenüber ohne Schwanz (z.B. Nurflügler) ist, dass das Höhenleitwerk das Flugzeug automatisch mehr oder weniger gerade hält. Deswegen ist es einfacher «klassische» Flugzeuge mit Schwanz zu fliegen. Da dies zu weniger Abstürzen führt und somit klei-

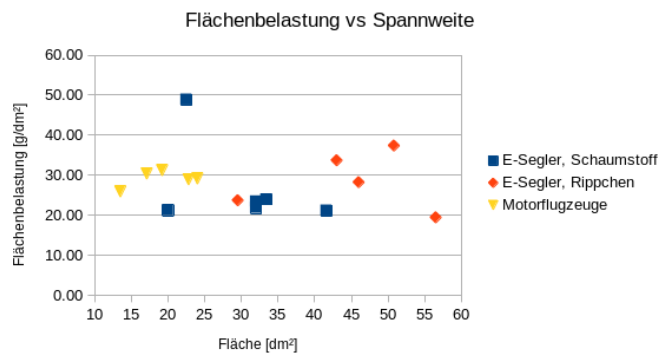


Abb. 27: Flächenbelastung bei div. Modellflugzeugen

neren Chancen hat, dass das Flugzeug kaputtgeht, empfiehlt es sich ein Flugzeug mit Schwanz zu nehmen.

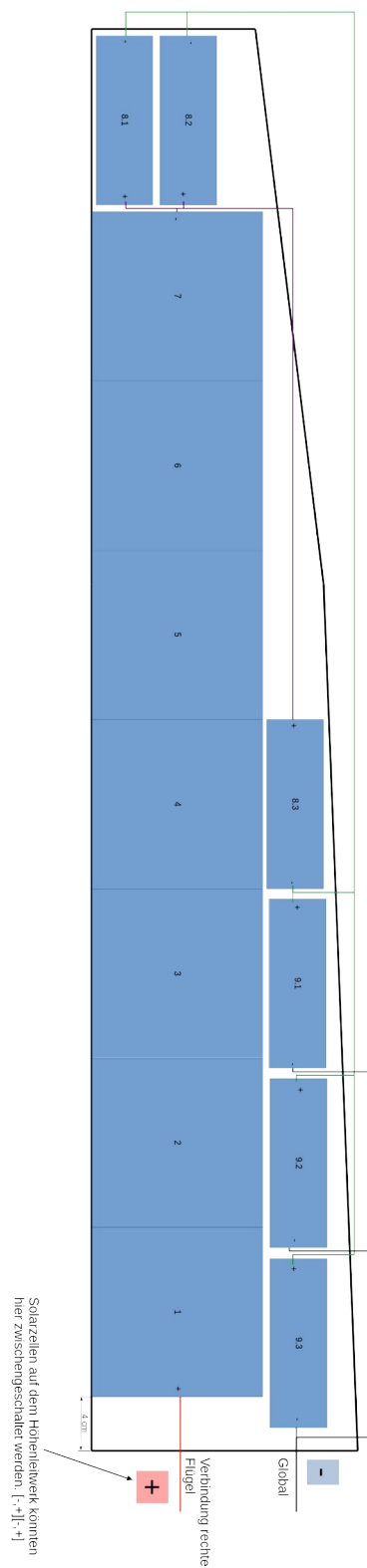
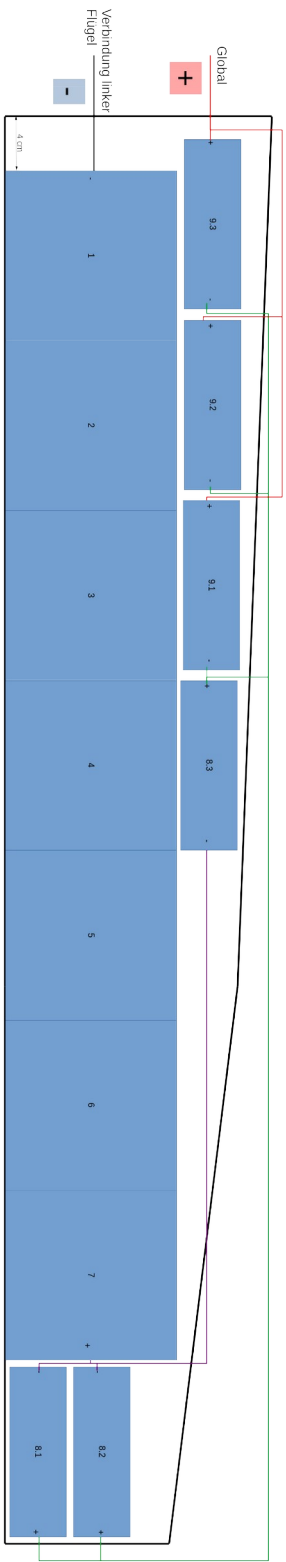
Je nach Ziel eines Modellflugzeuges variiert die Form und Grösse der Flügel. Am effizientesten sind Flügel mit einer grossen Streckung. Das heisst der Flügel soll möglichst lang und dünn sein, was oft bei Seglern der Fall ist.

Die Flächenbelastung, also Gewicht pro Flächeninhalt des Flügels, sollte auch tief sein. Wie man bei Abbildung 27 sieht, ist dies auch bei E-Seglern der Fall.

14.4.3 Steuerung

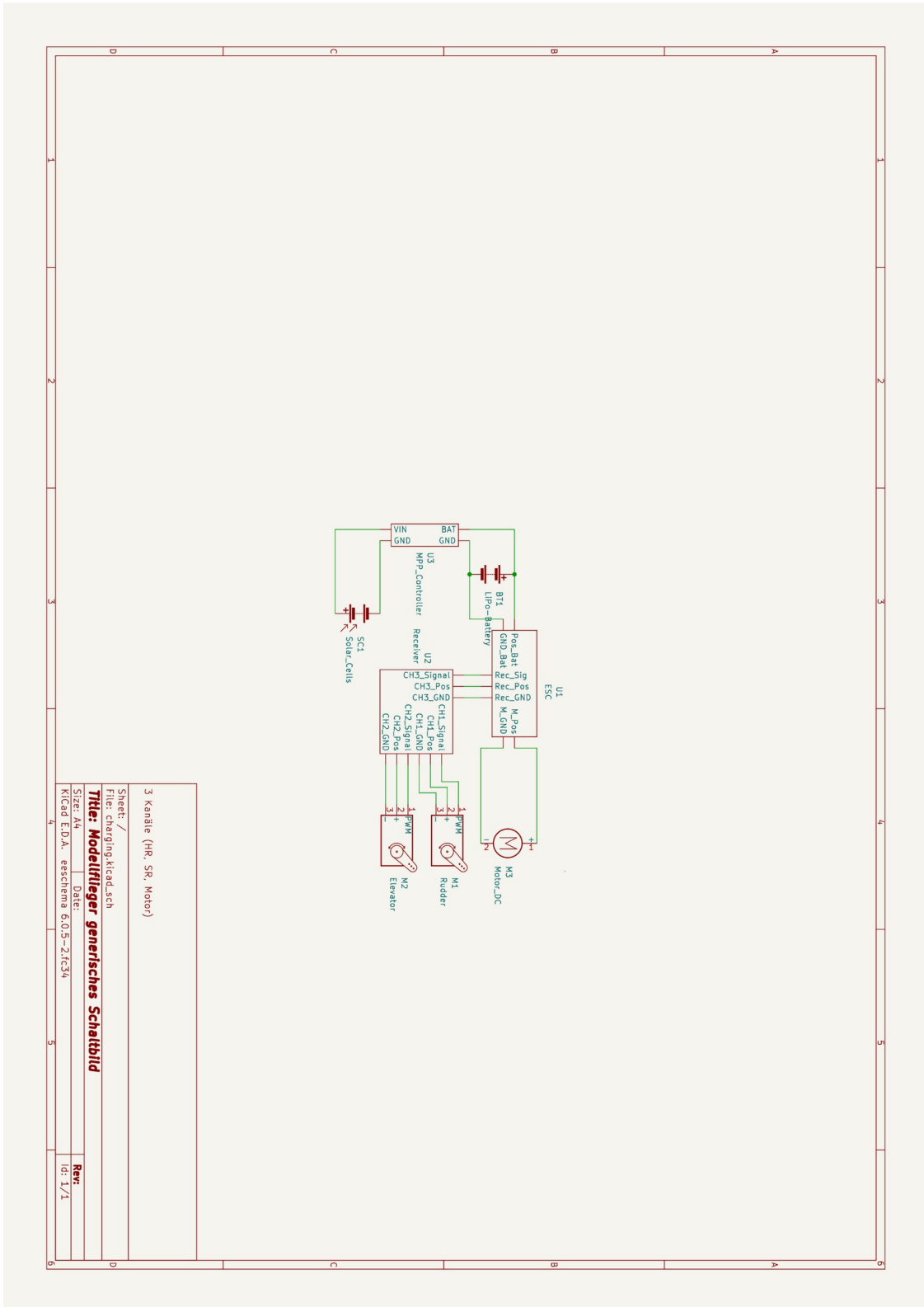
Ziel dieses Flugzeuges ist es nicht Kunststücke auszuführen, sondern möglichst effizient zu fliegen. Ausserdem sollte das Flugzeug nicht schwer zu fliegen sein. Deswegen soll es nur die nötigsten Funktionen haben wie zum Beispiel Seiten-, Höhen- und Querruder.

14.5 Auslegung Solarzellen



Auslegung und Verschaltung der Solarzellen auf den Flügeln
05.10.2022

14.6 Schaltplan



14.7 Calculs de la Résistance à l'Air

$$P_{d,Rhi} = P \text{ nécessaire} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot (SMT \cdot C_{fe} + S_a \cdot C_z^2 / \pi \cdot A \cdot e) \text{ avec } C_z = \frac{2 \cdot M \cdot g}{\rho \cdot v^2 \cdot S_a} \Leftrightarrow$$

$$P_{d,Rhi} = P \text{ nécessaire} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot SMT \cdot C_{fe} + \frac{2 \cdot (M \cdot g \cdot n)^2}{\rho \cdot v \cdot S_a \cdot \pi \cdot A \cdot e}$$

$$\text{avec } D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot SMT \cdot C_{fe} \text{ et } E = \frac{2 \cdot (M \cdot g \cdot n)^2}{\rho \cdot S_a \cdot \pi \cdot A \cdot e} \Rightarrow P_{d,Rh} = DV^3 + E/V$$

Avion solaire

SMT	0.82	m ²	Sa.2.1,2
Cfe	0.0065		Cfe pour NACA 0015 à une altitude de 1 km = 0,005 x 1,3 = 0,0065
Md	2.2		1,5 kg avion (comprend batterie) + 0,12 Mu + 0,12 bat + 0,24 cellules + 0,1 électronique charge batterie (MPPT max power point tracker) + 0,1 divers
g	9.81	m/s ²	1.0 n1
Sa	0.34	m ²	2.0 n2
A	10.10	/	
e	0.75	/	

Hypothèse simplificatrice à ce stade : Rh constant ce qui sera rectifié ultérieurement

P _{dmax}		W		0.10		0.0360		V		V		V		X				
km/h	m/s	Rho	DV3	E/V	Pn 1g =	Pn 2g =	"ascense	charge	N (Hz =	Dh	Cp	J	Rh (d	Pd	Pz 1g = Pd	Pz 2g = Pd	Vz 1g =	
				n1	DV3+E/V	E/V	ur" à	moteur	t/mn)				1,6...)	max.Rhi	max.Rhi -	max.Rhi -	Pz/M.g	
					[W]	n2	Pmax	(%)				NACA	640	[W]	Pt gl 1g	Pt gl 2g		
0	0	1.100					0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.000	0.50	1.00	30.7			
9	2.5	1.100	0.0	41.9	41.9	83.7	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.031	0.50	1.00	30.7	-11.3	-53.1	-0.52
18	5.0	1.100	0.4	20.9	21.3	41.9	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.062	0.50	1.00	30.7	9.4	-11.6	0.43
27	7.5	1.100	1.2	14.0	15.2	27.9	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.093	0.50	1.00	30.7	15.5	1.5	0.72
36	10.0	1.100	2.9	10.5	13.4	20.9	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.124	0.50	1.00	30.7	17.3	6.8	0.80
45	12.5	1.100	5.7	8.4	14.1	16.7	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.155	0.50	1.00	30.7	16.6	8.2	0.77
54	15.0	1.100	9.9	7.0	16.9	14.0	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.186	0.50	1.00	30.7	13.8	6.8	0.64
63	17.5	1.100	15.7	6.0	21.7	12.0	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.217	0.50	1.00	30.7	9.0	3.0	0.42
72	20.0	1.100	23.5	5.2	28.7	10.5	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.248	0.50	1.00	30.7	2.0	-3.3	0.09
81	22.5	1.100	33.4	4.7	38.0	9.3	0.00	100%	2200	2.2	0.0000	0.279	0.50	1.00	30.7	-7.4	-12.0	-0.34

15 Literaturverzeichnis

- AstroFlight Sunrise, in: Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/AstroFlight_Sunrise, heruntergeladen 11.11.2022.
- Gibbs, Yvonne: NASA Armstrong Fact Sheet: Pathfinder Solar-Powered Aircraft. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-034-DFRC.html>, heruntergeladen 11.11.2022.
- Atlantiksolar, in: ethz.ch, <https://www.atlantiksolar.ethz.ch/>, heruntergeladen 11.11.2022.
- Zephyr, in: airbus.com, <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>, heruntergeladen 11.11.2022.
- Aspect ratio (aeronautics), in: Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Aspect_ratio_\(aeronautics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Aspect_ratio_(aeronautics)), heruntergeladen 27.10.2022.
- Carpenter, Pete: The Watts per Pound Rule, <https://www.rc-airplane-world.com/watts-per-pound.html>, heruntergeladen 07.11.2022.
- Whats the best wing aspect ratio for a rc glider?, in: Reddit, https://www.reddit.com/r/radiocontrol/comments/9qzluv/comment/e8g112w/?utm_source=share&utm_medium=web2x&context=3, heruntergeladen 08.11.2022.
- Glide Ratio, in: rcuniverse, <https://www.rcuniverse.com/forum/rc-gliders-sailplanes-slope-soaring-112/4512838-glide-ratio.html>, heruntergeladen 08.11.2022.
- Benson, Tom: The Lift Equation. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/lifteq.html>, heruntergeladen 10.11.2022.
- Hall, Nancy: Drag Equation. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/>, heruntergeladen 10.11.2022.
- 100W Solarpanel 12V Monokristallin, in: autosolar.ch, <https://autosolar.ch/monokristalline-solarpanels/9-solarpanel-mono100-watt-7640429990426.html>, heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Critchley, Liam: Using Thin Films for Solar Panels, in: azocleantech.com, <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1056>, heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Energie-Sonnenklar: Photovoltaik: Technik und Infrastruktur, in: electrosuisse.ch https://www.electrosuisse.ch/wp-content/uploads/2019/03/Electrosuisse_Energie_Sonnenklar_Photovoltaike_Broschuere_2019-1-1.pdf, heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Energie-Sonnenklar: Photovoltaik: Technik und Infrastruktur, in: electrosuisse.ch https://www.electrosuisse.ch/wp-content/uploads/2019/03/Electrosuisse_Energie_Sonnenklar_Photovoltaike_Broschuere_2019-1-1.pdf, heruntergeladen am: 08.06.2022.

- How to Calculate Solar Panel Output, in: powerscout.com, [https://powerscout.com/site/how-to-calculate-solar-panel-output#:~:text=Most%20solar%20panels%20have%20efficiency,\(measured%20in%20square%20meters\)](https://powerscout.com/site/how-to-calculate-solar-panel-output#:~:text=Most%20solar%20panels%20have%20efficiency,(measured%20in%20square%20meters)) , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Monokristalline solar panel: Solar cells that have longevity up to 30 years, in: economictimes.indiatimes.com, <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/productline/power-generation/monocrystalline-solar-panel-solar-cells-that-have-longevity-up-to-30-years/articleshow/69140542.cms?from=mdr> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- PolyCrystalline Solar Panels: Cheap yet efficient long lasting solar panels, in: economictimes.indiatimes.com, <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/productline/power-generation/polycrystalline-solar-panels-cheap-yet-efficient-long-lasting-solar-panels/articleshow/69130611.cms> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Polykristalline solar cells vs monokristalline: Which is better?, in: geothermhvac.com, <https://geothermhvac.com/mono-vs-poly-better/#:~:text=Monocrystalline%20solar%20panels%20have%20the,more%20efficient%20in%20warm%20weather> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Polykristalline Solarzellen, in: solaranlage.eu, <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarzellen/polykristalline-solarzellen> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- SLP100-12U Silver Poly 12 Volt, in: unboundsolar.com, <https://unboundsolar.com/9433236/solarland/solar-panels/solarland-slp100-12u-silver-poly-12-volt-solar-panel> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Thin film solar panels: do they make sense for residential?, in: energysage.com, <https://news.energysage.com/thin-film-solar-panels-make-sense/> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Thin-film solar cell, in: wikipedia.org, https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Thin-Film Solar Panels, in: ases.org, <https://ases.org/thin-film-solar-panels/#:~:text=Thin%2DFilm%20solar%20panels%20are%20less%20efficient%20and%20have%20lower,%25%20and%20up%20to%2018%25> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Vor- und Nachteile von monokristallinen Solarmodulen im Vergleich, in: energie-experten.org, <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/monokristalline-module> , heruntergeladen am: 08.06.2022.

16 Abbildungsverzeichnis

- Titelbild: Elektro Junior im Flug. Nussbaumen. SchuelerX. Nussbaumen, 18.09.2022.
- Abb. 1: Airbus Zephyr. Otto Christian: Zephyr - Test Flight Campaign, https://mediacentre.airbus.com/mediacentre/media?mediaTitle=title_Zephyr+-+Test+Flight+Campaign+&mediaId=555973, heruntergeladen am 30.10.2022.
- Abb. 2: planet-schule: Warum fliegen Flugzeuge ?, <https://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s1.html>, heruntergeladen am 09.11.2022.
- Abb. 3: Verhältnis Gewicht Stromverbrauch. Datenquelle: Diverse Quellen aus dem Internet.
- Abb. 4: Stromverbrauch und -erzeugung beim Fliegen. Datenquelle: Diverse Quellen aus dem Internet.
- Abb. 5: Wikimedia: Aufgelöste Polare, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aufgel%C3%B6ste_Polare.jpg, heruntergeladen am 10.11.2022.
- Abb. 6: Abschätzung von Luftwiderstand und Leistung. Datenquelle: Experte, SchuelerX.
- Abb. 7: Fox von Hype und Elektro Graupner. Nussbaumen. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 06.10.2022.
- Abb. 8: Fertiger Solarflieger. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 05.11.2022.
- Abb. 9: Schaltplan Solarflieger. Datenquelle: SchuelerX.
- Abb. 10: Elektronik im Solarflieger. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 08.11.2022.
- Abb. 11: duurzaamaltrade: Wat is MPP-Tracking, <https://duurzaamaltrade.nl/energie/wat-is-mpp-tracking/>, heruntergeladen am 10.11.2022.
- Abb. 12: Sunpower C60 Zellen. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 08.11.2022.
- Abb. 13: Lötstelle an Solarzelle. Aufnahme SchuelerZ. Nussbaumen, 29.10.2022.
- Abb. 14: Aufbau der Solarzelle. Datenquelle: SchuelerZ.
- Abb. 15: Bespannter Flügel. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen. 01.11.2022.
- Abb. 16: Luft Strömt unter Solarzelle. Datenquelle: SchuelerX.
- Abb. 17: Spalt zwischen Flügel und Solarzelle. Aufnahme SchuelerX. 01.11.2022.
- Abb. 18: Geschätzte PV-Produktion. Datenquelle: SchuelerY, Experte, PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- Abb. 19: Speicherung von Energie in Höhe. Datenquelle: SchuelerX.
- Abb. 20: Misslungener Start Solarflieger. Nussbaumen. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 06.11.2022.

- Abb. 21: Solarflugzeug im Flug. Nussbaumen. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 06.11.2022.
- Abb. 22: Verbinden der Solarzellen. Aufnahme SchuelerX. Nussbaumen, 26.10.2022.
- Abb. 23: Monokristallines Solarmodul, IBC SOLAR: Vor- und Nachteile von monokristallinen Solarmodulen im Vergleich, <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/monokristalline-module> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Abb. 24: Polykristalline Solarzelle, Linleo, Fotolia: Polykristalline Solarzellen, Herstellung polykristalliner Module, <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarzellen/polykristalline-solarzellen> , heruntergeladen am 08.06.2022.
- Abb. 25: Dünner Film Solarpanels, Wongsaita, Soonthorn: Using Thin Films for Solar Panels, <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1056> , heruntergeladen am: 08.06.2022.
- Abb. 26: Verhältnis Gewicht Fläche. Datenquelle: Diverse Quellen aus dem Internet.
- Abb. 27: Flächenbelastung bei div. Modellflugzeugen. Datenquelle: Diverse Quellen aus dem Internet.