

DISS. ETH NO. 18010

# **Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight**

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by

**André NOTH**

Ingénieur en Microtechnique  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

Born February 10, 1980  
Citizen of Zumholz, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Roland Siegwart, Principal Advisor  
Prof. Peter Corke, Member of the Jury  
Ing. Dipl. EPFL André Borschberg, Member of the Jury  
Prof. Claude Nicollier, Member of the Jury

ETH Zürich  
September 2008

# Abstract

This thesis deals with airplanes using solar energy as their only source of energy for more than 24 hours flight. Using solar panels, they collect it during the day for immediate use but also store the remaining part for the night flight. This work presents a new analytical methodology for the conceptual design of such airplane. Its major advantage lies in the fact that it is simple and versatile, which makes it applicable to a large range of airplanes of different wingspans, from the small MAV to the large manned aircraft.

The design methodology is based on power and mass balances occurring during level flight. An extensive study was done on the mathematical modeling of the subparts, for example concerning electric motors the question being to know how their mass and their efficiency vary with power. Empirical data over a large range were used in this study. Finally, the analytical method contains 5 mission parameters and 25 others linked to the various technologies involved that the user can vary in order to see on a graph the dependencies between the 3 layout variables (aspect ratio, wingspan and total mass) for all the feasible solutions. The final selection can then be easily made.

Sky-Sailor, a 3.2 meters wingspan solar powered airplane, was then designed using this methodology. A prototype, with an ultra lightweight structure covered by silicon solar cells was built in order to validate the process. We also developed in this framework dedicated electronics for the autonomous navigation and the efficient solar power management. The final 2.44 kg airplane was tested with success during several autonomous flights, showing capabilities that were very close to the one calculated in theory. The longest flight achieved lasted more than 27 hours within a circuit length of more than 874 kilometers and proved the feasibility of solar powered continuous flight.

In addition to the first application example on Sky-Sailor, other designs are presented and discussed, like the case of a 70 cm solar UAV but also a 60 m manned solar airplane. It is then very interesting to see how things evolve with scaling. In fact, going in each direction removes and adds its batch of

new problems : the poor efficiencies of aerodynamics and propulsion group prove very unfavorable when down-scaling whereas the weight and fragility of the enormous wing structure become the nightmare of engineers working on large-sized models.

Finally, various additional possibilities to improve or enhance the endurance of a solar airplane are addressed, such as gaining altitude to store energy, taking benefit of ascending thermal winds or using a swiveling solar tracker.

**Key words:** Solar powered UAV, Solar Energy, Solar Airplane, Sustainable Flight, Sky-Sailor, MPPT, Conceptual Design Methodology

# Version abrégée

Cette thèse traite des avions utilisant l'énergie solaire comme unique source d'énergie pour des vols de plus de 24 heures. A l'aide de panneaux solaires, ils collectent cette énergie durant le jour pour les besoins immédiats et stockent le surplus pour le vol de nuit. Ce travail présente une nouvelle méthodologie analytique pour le design de ces avions solaires. Son principal avantage réside dans le fait qu'elle est simple et versatile, pouvant être appliquée à une très large gamme d'avions de différentes envergures, du micro-drone jusqu'à l'avion habité.

La méthodologie de design est basée sur les équilibres de puissance et de poids ayant lieu durant le vol palier. Une importante recherche a été effectuée sur la modélisation mathématique de tous les éléments constituant l'avion, par exemple dans le cas des moteurs électriques, s'agissant de savoir comment leur masse et leur efficacité varient avec leur puissance. Des données empiriques sur une très grande échelle ont été utilisées dans cette optique. Finalement, la méthode analytique contient 5 paramètres de mission et 25 liés à la technologies des différents composants qui peuvent être modifiés afin de visualiser sur un graphique les dépendances entre les 3 variables de configuration (allongement, envergure et masse totale) pour toutes les solutions réalisables. La sélection finale en est ensuite facilitée.

Sky-Sailor, un avion solaire de 3.2 mètres d'envergure, a été conçu avec cette méthodologie. Un prototype, avec une structure ultra-légère recouverte de cellules solaires en silicium, a été réalisé afin de valider le processus. De l'électronique dédiée à la navigation autonome ainsi qu'à la gestion efficace de l'énergie solaire a aussi été développée dans ce cadre. L'avion final de 2.5 kg fut testé avec succès durant plusieurs vols autonomes, démontrant des caractéristiques très proches de celles calculées en théorie. Le plus long vol dura plus de 27 heures sur un parcours de 874 kilomètres ce qui prouva la faisabilité du vol continu solaire.

En plus du premier exemple d'application sur Sky-Sailor, d'autres exemples sont présentés et discutés. C'est le cas d'un drone solaire de 70 cm mais

aussi d'un avion solaire habité de 60 m d'envergure. Il est ainsi très intéressant de voir comment les choses évoluent lors du changement d'échelle. En effet, le fait d'aller dans chaque direction ôte et ajoute son lot de nouveaux problèmes : les faibles efficacités de l'aérodynamique et du groupe propulseur s'avèrent très défavorables à petite échelle alors que le poids et la fragilité de l'énorme structure de l'aile deviennent le cauchemar des ingénieurs travaillant sur des modèles de grandes dimensions.

Finalement, plusieurs possibilités supplémentaires d'améliorer l'endurance des avions solaires sont abordées, comme l'utilisation de panneaux solaires orientables ou la recherche de thermiques ascendantes.

**Mots clés** : Propulsion solaire, Energie solaire, Avion solaire, Vol continu, Sky-Sailor, MPPT, Méthodologie de design conceptuel

# Kurzfassung

Diese Doktorarbeit befasst sich mit Flugzeugen, die Sonnenenergie als ihre einzige Energiequelle für Flüge von mehr als 24 Stunden verwenden. Die Energie wird mittels Solarzellen Tags durch gesammelt und für den unmittelbaren Flugbetrieb eingesetzt, wobei überschüssige Energie für den Nachtbetrieb gespeichert wird. Diese Arbeit stellt eine neue analytische Methode für die konzeptuelle Auslegung solcher Solarflugzeuge vor. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, dass sie einfach und vielseitig anwendbar ist, so dass sie einen weiten Bereich von Flugzeugen – vom kleinen, unbemannten bis zum grossen, bemannten Flugzeug – abdecken kann.

Die Auslegungsmethode basiert auf der Abstimmung von Leistung und Gewicht während eines Schwebefluges. Eine umfangreiche Untersuchung zur mathematischen Modellierung aller Elemente eines Flugzeuges wurde durchgeführt. So zum Beispiel wurde untersucht, wie das Gewicht und der Wirkungsgrad von Elektromotoren sich mit der Leistung verändern. Zur Untersuchung wurden empirische Daten von grosser Vielfalt herangezogen. Schlussendlich verwendet die Auslegungsmethode fünf Parameter zur Beschreibung der Flugmanöver und 25 andere, die mit den verwendeten Technologien der verschiedenen Flugzeugkomponenten zusammenhängen. Mittels einer Software können die Parameter durch einen Benutzer verändert werden, so dass der Einfluss auf die drei Auslegungsvariablen (Längenverhältnis, Spannweite und Gesamtgewicht des Flugzeuges) für alle Lösungsmöglichkeiten direkt in einem Diagramm sichtbar wird. Die endgültige Wahl der Parameter ist so einfach zu bewerkstelligen.

Sky-Sailor, ein Solarflugzeug mit 3.2 Meter Spannweite, wurde mit Hilfe dieser Auslegungsmethode entwickelt. Ein Prototyp mit einer extraleichten Flügelstruktur überzogen mit Siliziumsolarzellen wurde gebaut, um die theoretische Auslegungsmethode zu validieren. Ebenfalls wurde die dazugehörige Elektronik zur autonomen Navigation und effizienten Energieverwaltung entwickelt. Das resultierende Solarflugzeug mit einem Gewicht von 2.44 Kilogramm wurde mit Erfolg getestet. Es vollzog mehrere autonome Flüge, wobei

die gemessenen Parameter sehr gut mit den berechneten übereinstimmen. Der längste Flug dauerte mehr als 27 Stunden auf einer Strecke von mehr als 874 Kilometern, womit die Durchführbarkeit von solargetriebenen Schwebeflügen bestätigt wurde.

Zusätzlich zum Sky-Sailor werden in dieser Arbeit andere Entwürfe vorgestellt und diskutiert, so zum Beispiel ein unbemanntes Solarflugzeug mit 70 cm, aber auch ein bemanntes Solarflugzeug mit 60 m Spannweite. Dabei ist die Entwicklung der Parameter in Funktion der Baugrösse sehr interessant. Beide Grössenrichtungen bieten dabei ihre eigenen Probleme : der schlechte Wirkungsgrad der Aerodynamik und der Antriebsgruppe machen sich bei der Skalierung nach unten bemerkbar, hingegen bereiten Gewicht und Zerbrechlichkeit von grossen Flügelstrukturen bei der Skalierung nach oben den Ingenieuren Kopf zerbrechen.

Am Schluss der Arbeit werden verschiedene zussätzliche Möglichkeiten behandelt, die die Reichweite von Solarflugzeuge verbessern können, wie zum Beispiel eine gesteigerte Flughöhe um Energie zu speichern, das Ausnützen von Thermik oder das Verwenden von ausrichtbaren Solarzellen.

**Schlüsselwörter:** Solarangetriebene Flugzeuge, Solarenergie, Solarflugzeug, Ununterbrochener Flug, Sky-Sailor, MPPT, Konzeptuelle Auslegungsmethode