

# Mit der Sonne die Erde umrunden

## Technische Besonderheiten des Solarflugzeugs Solar Impulse

Nach dem 26-Stunden-Flug im letzten Sommer will Solar Impulse als erstes bemanntes Solarflugzeug, das sich auch über Nacht in der Luft halten kann, zum Flug rund um den Globus aufbrechen. Bertrand Piccard und André Borschberg wollen damit nicht nur die Öffentlichkeit für erneuerbare Energien sensibilisieren, sondern auch ein Zeichen setzen für eine konsequente Energieeffizienz. Ein Blick hinter die Verschalung des erfolgreichen Prototyps HB-SIA und auf die nächsten Etappen.

### Andreas Renggli

Entstanden ist die Idee von Solar Impulse 1999, und zwar am Ende von Bertrand Piccards drittem und schliesslich erfolgreichem Versuch, die Erde im Ballon zu umrunden. Als er zusammen mit seinem Kopiloten Brian Jones nach knapp 20 Tagen und 45 755 km in der Breitling Orbiter 3 auf ägyptischem Boden landete, blieben von den beim Start in Château-d'Ex zugeladenen 3,7 t Propan gerade noch 40 kg übrig. Die Abhängigkeit von diesem fossilen Energieträger wurde damit in der Endphase der Mission besonders augenfällig. Aus diesem Grund versprach sich Bertrand Piccard, den Globus ein weiteres Mal zu umrunden – jedoch völlig ohne Treibstoff und ohne Schadstoffemissionen.

Nach einer ermutigenden Machbarkeitsstudie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) gab Bertrand Piccard im November 2003 sein jüngstes Vorhaben öffentlich bekannt, und im Juni 2004 gründete er zusammen mit seinem Projektpartner André Borschberg die Solar Impulse SA. Weitere grosse Meilensteine waren bisher der Jungfernflug des ersten Prototyps HB-SIA im Frühling 2010 sowie der erste Nachtflug im vergangenen Sommer.

### Im Tagesverlauf steigen und sinken

Wer das Flugzeug elegant durch die Lüfte fliegen sieht, gerät leicht in Versuchung anzunehmen, der Flieger könne problemlos unendlich lange der Sonne folgen. Doch dem ist nicht so. Damit das Solarflugzeug sich über 24 h mit Sonnenenergie selber antreiben kann, müssen fundamen-

tale Voraussetzungen erfüllt sein. Neben guten meteorologischen Bedingungen gehört dazu insbesondere das Einhalten eines klar vorgegebenen Tagesablaufs.

Im Normalfall erzeugen die Solarzellen knapp eine Stunde nach Sonnenaufgang genügend Strom, damit das Flugzeug – bereits seit dem Vortag oder länger in der Luft – mit seinem Steigflug und dem Wiederaufladen der Batterien beginnen kann. Bis am Nachmittag wird das Flugzeug auf 8000–9000 m steigen und seine Akkumulatoren vollständig laden. Sobald die Sonne untergeht, schaltet der Pilot die Motoren aus und geht in den Gleitflug über. Dank seiner gewaltigen Spannweite von gut 63 m und dem tiefen Gewicht verfügt das Flugzeug über aus-

gezeichnete Gleiteigenschaften. Mit einer Gleitzahl von 35 sinkt es während der Nacht bis auf ungefähr 1500 m ü. M. Nun startet der Pilot die Motoren wieder und hält mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 70 km/h die Flughöhe bis zum erneuten Sonnenaufgang.

### Radikale Gewichtsoptimierung

Die grösste Herausforderung für das Entwicklungsteam stellte zweifellos die Gewichtslimite dar. Trotz seiner gigantischen Spannweite, die gleich gross ist wie die eines Airbus A340, wiegt der Prototyp HB-SIA nicht mehr als 1600 kg. Gefragt waren deshalb bisher unerreichte konstruktive und aerodynamische Eigenschaften.

Zwar griff Solar Impulse bei vielen Komponenten auf Produkte aus industrieller Herstellung zurück, doch sämtliche Einzelteile wurden in den eigenen Labors und Werkstätten einer rigorosen Gewichtsoptimierung unterzogen. Abgesehen vom Rumpf und den Tragflächen galt dies insbesondere auch für die Solarzellen, die Batterien, die Motoren sowie die Technik zur Navigation und Kommunikation. In vielen Fällen wurde in enger Zusammenarbeit mit den Herstellern geprüft, wie bei jeder einzelnen Komponente unnötige Elemente weggelassen und Funktionen vereinfacht werden



Jean Revillard, Solar Impulse

Die HB-SIA während ihres Flugs nach Genf über dem Greizersee und vor der Kulisse der Freiburger Voralpen.

konnten. Damit ist Solar Impulse nicht nur ein Innovationstreiber erneuerbarer Energien, sondern auch ein mustergültiges Projekt für Energieeffizienz.

### Die Flügel als aerodynamische Solaranlage

Für die Energieversorgung setzt Solar Impulse auf monokristalline Silizium-Rückseitenkontakt-Solarzellen von Sunpower. Das US-amerikanische Unternehmen ist ein führender Hersteller von Solarzellen und hat bereits 2001 das unbemannte Solarflugzeug Helios der Nasa ausgerüstet. Insgesamt sind 11 628 einzelne Solarzellen installiert worden: 10 748 auf dem Flügel und 880 auf dem horizontalen Stabilisator. Daraus ergibt sich eine Fläche von 216 m<sup>2</sup>.

Die pseudoquadratischen Solarzellen haben eine Kantenlänge von 12,5 cm, sind durchschnittlich 145 µm dick und erreichen einen Wirkungsgrad von 22 %. Pro m<sup>2</sup> erzeugen sie bis zu 1000 W, über 24 h sind es im Durchschnitt 250 W. Auf der HB-SIA sind momentan acht leicht unterschiedliche Modelle von Solarzel-

len eingebaut, damit sich die beste Variante eruieren lässt.

Noch effizienter als die verwendeten Solarzellen wären solche aus Galliumarsenid, wie sie in der Raumfahrt oft eingesetzt werden. Sie erreichen einen Wirkungsgrad von über 40 %, doch sind sie zu schwer für das Solarflugzeug.

Da die Solarzellen fest mit dem Flügel verklebt sind und sich somit seinem aerodynamischen Profil anpassen, strahlt die Sonne nie gleichzeitig alle Zellen im optimalen Einstrahlungswinkel an. Die Stärke der Einstrahlung variiert nicht nur nach Sonnenstand, sondern auch aufgrund der Fluglage. Für längere Strecken ist es deshalb möglich, dass sich die Flugroute nach dem Sonnenstand richten muss.

### Gewichtige Energiespeicher

Zur Zwischenspeicherung der Solarenergie verwendet Solar Impulse vier Lithium-Polymer-Batterien. Sie bestehen aus je 70 Akkumulatoren, wiegen je 100 kg und verfügen über eine Energiedichte von 240 Wh/kg. Sie alleine sorgen also bereits für ein Viertel des Gesamtgewichts. Die

Batterien hängen zusammen mit den Motoren in isolierten Gondeln unterhalb der Flügel. So wird nicht nur ihr Gewicht gut verteilt, sondern auch die eigene Abwärme sowie die der Motoren gezielt dazu genutzt, die Temperatur der äusserst empfindlichen Batterien möglichst konstant zu halten. Ein Steuersystem sorgt zudem dafür, dass die Akkumulatoren jeweils alle gleichzeitig geladen werden und Beschädigungen durch Überladen, Tiefentladen oder zu hohe Ströme unter allen Umständen verhindert werden können.

### Zuverlässiger Antrieb mit 6 kW

Den Antrieb des Flugzeugs stellen vier bürstenlose Elektromotoren des Neuenburger Unternehmens ETEL sicher. Anstelle des sonst für die Stromwendung üblichen mechanischen Kommutators mit Bürsten ist somit zwar eine zusätzliche elektronische Schaltung notwendig. Dafür sind die bürstenlosen Elektromotoren sehr zuverlässig, verzeichnen kaum Abnutzung und haben einen Wirkungsgrad von 90 %. Bei Solar Impulse leisten sie maximal 4000 Umdrehungen pro Minute. Ein Getriebe begrenzt die Drehzahl der Propeller auf höchstens 400 Umdrehungen pro Minute und erhöht die Kraftübertragung. Die Flugzeugmotoren erzeugen im Durchschnitt eine Leistung von 6 kW bzw. 8 PS, was über die gesamte Antriebskette gerechnet einem Wirkungsgrad von 12 % entspricht.

Da die Propeller der HB-SIA im Vergleich zu solchen gewöhnlicher Propellerflugzeuge sehr langsam drehen, mussten die Ingenieure für die zwei Propellerblätter ein spezielles Profil entwickeln. Entstanden sind schliesslich vier Propeller aus Kohlenstofffasern mit einem Durchmesser von 3,5 m. Hergestellt hat sie die Decision SA. Die Firma hat bereits beim Bau der Segelyacht Alinghi mit der EPFL zusammengearbeitet und auch Bauteile für den Rumpf sowie die Flügel der HB-SIA hergestellt.

### Ständiger Kontakt zum Boden

Aufgrund der Leichtigkeit sowie der empfindlichen Beschaffenheit des Flugzeugs muss der Pilot während des Flugs jegliche meteorologischen Störungen wie Wolkenfelder, Turbulenzen und Gewitter vermeiden. Damit er das Flugzeug jederzeit stabil in der Luft und auf Kurs halten kann, stehen ihm an Bord eine Reihe von Instrumenten zur Verfügung: zwei elektronische Fluginstrumentensysteme

## Pioniere

### Geschichte der aviatischen Solarprojekte

Mit einfachen Modellen nahm die Solarluftfahrt in den 70er-Jahren, als die ersten erschwinglichen Solarzellen auf dem Markt erhältlich waren, ihren Anfang. Die ersten bemannten Flüge erfolgten erst 1980. In den USA entwickelte das Team von Paul MacCready die Gossamer Penguin, die zur Solar Challenger führte. Diesem Fluggerät mit einer Spitzenleistung von 2,5 kW gelang es 1981, den Ärmelkanal zu überqueren und Distanzen von mehreren Hundert Kilometern zurückzulegen. Zur gleichen Zeit führte in Europa Günter Rochelt seine ersten Flüge mit der Solair 1 durch. Sie war mit 2500 photovoltaischen Zellen ausgerüstet, die eine Spitzenleistung von 2,2 kW erzeugten.

1990 überquerte der Amerikaner Eric Raymond mit der Sunseeker die USA in 21 Etappen und 121 h, verteilt auf etwa 2 Monate. Die längste Etappe betrug 400 km. Die Sunseeker war ein Solar-Motorsegelflugzeug mit einer Gleitzahl von 30 auf ein Leergewicht von 89 kg und ausgestattet mit Solarzellen aus amorphem Silizium.

Mitte der 90er-Jahre wurden mehrere Flugzeuge gebaut, um am Berlinger-Preis teilzunehmen. Das Ziel bestand darin, mithilfe der in Batterien gespeicherten Energie auf 450 m Höhe aufzusteigen und dann bei einer Sonneneinstrahlung von mindestens 500 W/m<sup>2</sup> einen allein durch Solarenergie getriebenen Horizontalflug durchzuführen. 500 W/m<sup>2</sup> entsprechen ungefähr der Hälfte der Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit über dem Äquator. Der Preis wurde 1996 vom Team des Professors Rudolf Voit-Nitschmann von der Universität Stuttgart mit Icare 2 gewonnen (25 m Spannweite, Solarzellenoberfläche von 26 m<sup>2</sup>).

Obwohl nur für unbemannte Flüge konzipiert, muss hier auch die Helios erwähnt werden, die durch die amerikanische Gesellschaft Aerovironment im Auftrag der Nasa entwickelt wurde. Dieser ferngesteuerte Nurflügel mit einer Spannweite von mehr als 70 m hat 2001 einen Höhenrekord von fast 30 000 m aufgestellt.

2005 ist es Alan Cocconi gelungen, einen 48-stündigen Nonstop-Flug durchzuführen. Dies mit einem vollständig solarbetriebenen unbemannten Flugzeug mit einer Spannweite von 5 m. Es war das erste Mal, dass ein solches Fluggerät eine ganze Nacht durchfliegen konnte, angetrieben von der in den Solarzellen auf der Flugzeuoberfläche eingefangenen und in Batterien gespeicherten Energie. Im Juli 2010 realisierte die englisch-amerikanische Gesellschaft Quine-tiQ mit ihrer Drohne Zephyr (53 kg bei einer Spannweite von 22,5 m) einen Flug von 14 Tagen und eine Höhe von 21 562 m.



Pilot André Borschberg (Mitte) und Bertrand Piccard (rechts) vor dem Start zum ersten Nachtflug.

(EFIS), zwei Computer zur Energieregung (Solarzellen, Batterien, Motoren), ein mit einem GPS gekoppeltes Funkgerät, ein Geschwindigkeits- und Höhenmesser, ein Kompass und eine LED-Anzeige zur Kontrolle des Seitenneigungswinkels sowie der Flugrichtung.

Für die geplanten Flüge über längere Strecken im Ausland soll künftig eine zusätzliche Kommunikationslösung zur Verfügung stehen, mit der der Pilot einen ständigen Kontakt zur Crew am Boden aufrechterhalten kann. Über sie soll er Sprechverbindungen aufbauen, Videos streamen und Wetterbilder empfangen können. Ebenfalls über diese Leitung werden regelmässig mehr als 100 Messwerte ins Kontrollzentrum übermittelt. Von den Motorentemperaturen über die Spannung der Akkumulatoren bis hin zur Position des Flugzeugs sowie seine Rotation um die Längs-, Quer- und Vertikalachse.

Da kein bestehendes Produkt einen solchen Informationsaustausch zwischen Flugzeug und Boden sicherstellen kann, engagiert sich Swisscom als Telekommunikationspartner und entwickelt momentan eine entsprechende Kommunikationslösung. Das Team von Swisscom Innovations arbeitet seit einem Jahr mit sieben Personen an einem System, das höchstens 5 kg wiegen darf. Verfügbare Lösungen mit einem weit geringeren Funktionsumfang liegen bei über 20 kg. Weitere Anforderungen sind ein durchschnittlicher Strombedarf von nicht mehr als 50 W, während Datentransfers maximal 100 W. Alle im Cockpit montierten Komponenten müssen Temperaturen bis  $-10^{\circ}\text{C}$  standhal-

ten, ausserhalb der Kabine angebrachte Teile sogar solchen bis  $-40^{\circ}\text{C}$ . Erschwerend kommt hinzu, dass der Luftdruck auf 8000–9000 m ü. M. ungefähr noch einem Drittel des Luftdrucks auf Meereshöhe entspricht. Bei elektronischen Bauteilen, die nicht speziell für die Luftfahrt zertifiziert sind, besteht deshalb die Gefahr, dass Lufteinschlüsse expandieren und zu Beschädigungen führen.

Für die Datenübertragung haben sich die Entwickler für das satellitengestützte Breitbandnetzwerk von Inmarsat entschieden. Alle anderen Anbieter können entweder keine globale Abdeckung sicherstellen oder verfügen wie Iridium nur über geringe Bandbreiten. Mit dem

Service Swift Broadband von Inmarsat sind bis zu 432 kbit/s möglich. Doch weil dazu eine 4 kg schwere Antenne nötig wäre, muss sich Solar Impulse mit einer theoretischen Datenübertragungsrate von 332 kbit/s begnügen. Effektiv werden es bis 300 kbit/s sein.

Kürzlich eingetroffen im Prüflabor von Swisscom in Ostermundigen ist die weltweit leichteste Kommunikationseinheit für Swift Broadband von der südafrikanischen Firma Cobham Satcom. Sie wiegt in der Originalversion 7–8 kg. Für Solar Impulse wurde das Produkt weiter abgespeckt, zum Beispiel durch den Verzicht auf gewisse Schnittstellen. Nun wiegt die Einheit mit Antenne, Verstärker und Modem noch rund 4 kg. Hinzu kommen 800 g für das Display mit einer Auflösung von  $1024 \times 768$  Pixel (Extended VGA), die CPU, der Flashspeicher und die Tastatur. Weitere 50 g wiegen die Webcam und die selber entwickelte Telefonsteuerung mit Headset-Anschluss für Sprachverbindungen. Sämtliche Komponenten werden in den eigenen Labors von Swisscom ausgedehnten Temperatur-, Luftdruck- und Strahlungstests unterzogen. Dabei ausgeschlossen sind Geräte wie der Amazon Kindle, ein Subnotebook oder auch ein Mini-Monitor zur Montage am Helm des Piloten.

Momentan feilen die Entwickler unter Hochdruck an letzten technischen Details. Denn Mitte März soll die Kommunikationslösung fertig sein und in die HB-SIA eingebaut werden. Ab Mai folgen voraussichtlich erste internationale Flüge, wo Solar Impulse auf die neue Kommunikationslösung angewiesen sein wird.

## Résumé

### Faire le tour du monde grâce au soleil

#### Les particularités techniques de l'avion solaire Solar Impulse

Solar Impulse de Bertrand Piccard est le premier avion solaire habité à avoir pu réaliser un vol de nuit. En 2012, il devrait faire le tour du monde. Le plus grand défi à relever est au niveau du poids. D'une envergure d'un Airbus A340, le prototype HB-SIA ne pèse que 1600 kg. L'approvisionnement en énergie est garanti par 11 628 cellules photovoltaïques d'une surface totale de 216 m<sup>2</sup>. 1000 W au maximum sont produits par mètre carré, il s'agit en moyenne de 250 W par 24 h. Pour stocker l'énergie, Solar Impulse a recours à quatre batteries au lithium polymère pesant chacune 100 kg. A elles seules, elles font déjà un quart de la masse totale. L'avion est activé par quatre moteurs électriques d'une puissance moyenne de 6 kW. En vue des futurs vols de plus longue durée, Swisscom développe actuellement une solution de communication par laquelle le pilote peut établir une connexion vocale, échanger des données et des images en temps réel ainsi que transmettre des valeurs de mesure au centre de contrôle. Le système qui doit être installé à la mi-mars ne doit pas peser plus de 5 kg alors que le poids des produits disponibles actuellement est d'environ 20 kg. Entre-temps, les ingénieurs travaillent d'arrache-pied à un modèle d'avion perfectionné possédant des cellules photovoltaïques plus minces et plus performantes et de meilleures batteries pour pouvoir un jour faire le tour du monde.

AES



LeTuc, Solar Impulse

Grosse Spannweite:  
HB-SIA und Airbus  
A340 im Vergleich.

### Noch effizienter, noch längere Strecken

Während die HB-SIA im Frühjahr also erstmals über die Schweizer Grenze hinausfliegt, arbeiten die Ingenieure von Solar Impulse intensiv an der Entwicklung eines neuen Modells, mit dem in Zukunft mehrtägige Flugeinsätze, die Überquerung des Atlantiks und schliesslich auch die Weltumrundung in Angriff genommen werden soll.

Für dieses zweite Flugzeug, die HB-SIB, rechnen die Entwickler mit noch

dünnen Solarzellen. Erwartet wird eine Stärke von 100–110  $\mu\text{m}$ . Zudem wird sich ihr Wirkungsgrad noch steigern lassen. Weitere Verbesserungen sind auch bei den Batterien absehbar. Neben der Optimierung bisheriger Komponenten erwägt das Team von Bertrand Piccard und André Borschberg auch einen grossen Schritt in eine andere Richtung: Wenn das Flugzeug tagsüber sogar auf 12 000 m steigen könnte, wären die meteorologischen Einflüsse kleiner und die Luftströme stabiler. So könnte das Flug-

zeug längere Strecken auf einmal fliegen. Ebenfalls die Reichweite erhöhen würde ein zweiter Pilot an Bord.

Beide Varianten sind jedoch mit beträchtlichen Herausforderungen verbunden. Für den Flug auf über 10 000 m wäre eine Druckkabine nötig und nicht nur eine Sauerstoffversorgung wie bisher. Zusammen mit einem zweiten Piloten würde dies zu einer beträchtlichen Gewichtserhöhung führen. Zurzeit beschäftigen sich die Ingenieure genau mit diesen Fragen, rechnen verschiedene Varianten durch und wägen Vor- und Nachteile ab. Noch ist jedoch offen, wohin genau die technische Reise führt.

### Weblinks

- Webseite des Projekts Solar Impulse: [www.solarimpulse.com](http://www.solarimpulse.com)
- Berichterstattung von Swiscom über das Projekt: [www.swiscom.ch/solarimpulse](http://www.swiscom.ch/solarimpulse)

### Andreas Renggli

**Andreas Renggli**, MSc in Kommunikation, ist Redaktor und Inhaber der Kommunikationsagentur Polarstern, die sich auf Themen der nachhaltigen Entwicklung spezialisiert.

Polarstern GmbH, 6004 Luzern  
[andreas.renggli@polarstern.ch](mailto:andreas.renggli@polarstern.ch)