

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 108 (2017)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Windenergie einmal anders  
**Autor:** Wiesemüller, Fabian  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-791362>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



Erstes Team mit dem Clara-Prototypen - Carbon Lightweight Autonomous Rope-fixed Aircraft.

# Windenergie einmal anders

**Strom aus angebundenen Leichtbauflugzeugen** | Wird Windenergie statt mit stationären Windanlagen mit «Airborne Wind Energy»-Systemen genutzt, kann das Fluggerät grosse Höhen erreichen, in denen der Wind meist stärker und beständiger weht. Der theoretische Grundstein dieser Technologie wurde bereits 1980 gelegt. Ein ETH-Projekt zeigt Chancen und Herausforderungen auf.

TEXT FABIAN WIESEMÜLLER

**B**ei «Airborne Wind Energy»-Systemen (AWE) gibt es zwei Ansätze: Den «Ground-Generation»- und den «Onboard-Generation»-Ansatz. Bei ersterem wird der Strom in einem am Boden befestigten Generator erzeugt, bei letzterem wird Strom auf dem Fluggerät selbst generiert und über ein Kabel zum Boden geleitet. Das Fluggerät muss dazu über Windgeneratoren verfügen.

## Hohe Ambitionen

An der ETH Zürich arbeitet ein Team an einem solchen AWE-Konzept, dem Ftero-Projekt. Ziel ist ein optimiertes

System, das autonom operieren kann. Das ETH-Team bestand zuletzt aus acht Maschinenbau- und zwei Elektrotechnikstudenten. Zwei Semester lang wurde jenes Ziel unter der Anweisung eines Professors und zweier Doktoranden des Labors für Verbundwerkstoffe und adaptive Strukturen intensiv verfolgt. Im nächsten Jahr wird das Projekt von neuen Studenten weitergeführt.

Dabei wurde der «Ground-Generation»-Ansatz gewählt: Strom wird mittels Bodengenerator generiert. Während der ersten Phase (der sogenannten Arbeitsphase) wird der Auftrieb des Flügels über ein Seil auf einen Genera-

tor übertragen. Dazu wird das am Fluggerät befestigte Seil über eine Seilrolle unter Zug bis zur optimalen Höhe abgerollt. Dabei wird der Generator angetrieben. In der zweiten Phase (der sogenannten Einziehphase) wird der Flügel wieder eingezogen. Dafür wird das Fluggerät durch autonome Steuerung in die Ausgangslage gebracht. Das Seil, welches in dieser Phase nicht unter Zug steht, wird eingerollt. Netto wird somit mehr Energie generiert als eingespeist.

## Effizient und mobil

Die Vorteile solcher Systeme sprechen für sich. Allgemein können sie durch

eine bessere Tragflächenausnutzung um ein Vielfaches effizienter Strom generieren als konventionelle Windkraftwerke. Diese Systeme sind zudem kompakt und relativ mobil. Sie sind deshalb infrastrukturunabhängig einsetzbar und eignen sich auch für Krisengebiete, abgelegene Gegenden oder Regionen, in denen die elektrische Infrastruktur durch Naturkatastrophen beschädigt wurde. Denn gerade hier wird meist auf die Stromproduktion mit klimaschädlichen Dieselgeneratoren gesetzt. Hinzu kommt, dass die Landschaft durch die begrenzten Abmessungen in einem kleineren Ausmass beeinträchtigt wird. Zudem können sie im Verbund – egal ob an Land oder auf dem Meer – genutzt werden. Durch Synchronisation der Arbeitsphasen lässt sich der notwendige Abstand zwischen den Systemen minimieren und eine kontinuierliche Leistungsausgabe realisieren.

### Schweizer Projekte

Auch in der Schweiz tut sich einiges im Bereich von Höhenwindkraftanlagen. Das Schweizer Start-up Twingtec hat mit ihrem Artikel im «Tagesanzeiger» («Das fliegende Kraftwerk») einiges an Aufmerksamkeit auf sich, aber auch auf das ganze Gebiet solcher Systeme ziehen können. Genau wie Ftero verfolgt auch Twingtec den «Ground-Generation»-Ansatz.

Obwohl beide Ansätze zunächst ähnlich erscheinen, gibt es einige fundamentale Unterschiede im Aufbau und der Funktionsweise. Die ETH-Fluggeräte – d.h. Clara (Carbon Lightweight Autonomous Rope-fixed Aircraft) sowie Emma (Energy-generating Mobile Morphing Aircraft) – verfügen über Klapppropeller, die sich jeweils am Ende eines der beiden Rümpfe befinden. Sie sind in der Lage, sich in der Arbeitsphase strömungsoptimiert dicht an den Rumpf zu legen und somit die Aerodynamik kaum zu beeinträchtigen. Zwei der drei Propeller von Twingtec sind dagegen direkt in den Tragflächen eingelassen. Im Flug treten deshalb störende Turbulenzen auf und die Effizienz des Gesamtsystems wird vermindert. Ausserdem verfügen alle Ftero-Prototypen über optimierte Tragflächenprofile, die dafür sorgen, dass möglichst viel Auftrieb produziert und daher möglichst viel Energie aus dem Wind extrahiert wird. Ein weiterer



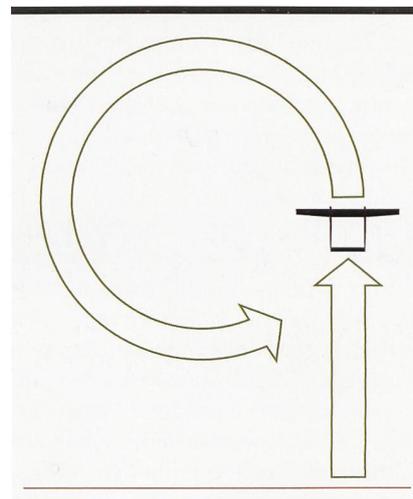
Bodenstation mit Seilführung, Seilwinde, Generator, Leistungselektronik und Bremswiderstand.

Unterschied ist die Start- bzw. Landephase. Twingtecs Fluggeräte führen diese Phase in einer waagerechten Position durch. Während des Starts steigt das Fluggerät auf die nötige Höhe und muss dann durch komplexe Steuerung in den in einer senkrechten Ebene liegenden Kreis der Arbeitsphase manövriert werden. Diese Transition ist komplex.

Das entgegengesetzte Manöver muss bei der Rückkehr zum waagerechten Sinkflug zur Landung durchgeführt werden. Die Systeme bei Ftero starten und landen bereits in einer aufrechten Position. Das Fluggerät befindet sich stets in der nötigen Ebene zur Ausführung der Arbeitsphase. Die Regelung der Übergänge fällt so einfacher aus. Als weiteres Merkmal verfügt Emma über ein implementiertes Morphingkonzept: Die Aktuation des Fluggeräts wird nicht von konventionellen Klappen übernommen, sondern die komplette Profilgeometrie verändert sich im Flug und sorgt so für die Steuerung des Fluggeräts. Durch den Wegfall schwerer Mechanik und einer Vielzahl von Spalten in der möglichst laminar umströmten Flügeloberfläche kann die Effizienz so zusätzlich erhöht werden.

### Einige Herausforderungen

Die in der Theorie einfache Arbeitsweise dieser Systeme stellt nicht nur die zwei erwähnten Teams, sondern auch Ingenieure und Forscher weltweit vor Herausforderungen. Bei Ftero gibt es Bereiche, beispielsweise die Regelungstechnik, bei denen geeignete Lösungen



Vertikale Startphase der Ftero-Systeme.

noch nicht gefunden werden konnten. Denn es ist schwierig, die beiden Komponenten so in den verschiedenen Flugphasen aufeinander abzustimmen, dass das Optimum der Energieproduktion erreicht werden kann. Die genaue Bestimmung der Position des Fluggeräts sowie die relative Lage zwischen der fliegenden Komponente und der Bodenstation birgt noch offene Fragen. Zudem ist die Übermittlung dieser Daten zwischen den beiden Komponenten hier noch nicht gelöst, und auch bei der kompletten Automatisierung des Starts, der Arbeits- und Einziehphase sowie der Landung ist mit weiteren Schwierigkeiten zu rechnen. Windböen stellen hohe Ansprüche an Soft- und Hardware. Der Weg bis zur kompletten Autonomie sowie einer gewissen

Sicherheit, dass Abstürze nicht eintreten, ist noch lang. Die Entwicklungsdauer wird zusätzlich durch rechtliche Auflagen verlängert, die erfordern, dass Tests meist an abgelegenen Orten durchgeführt werden.

Bis heute konnten zwei Funktionsprototypen mit je 5 m Spannweite hergestellt werden. Diese Fluggeräte sind in der Lage, bis 1000 kg Zug zu generieren. Dabei wurden sie in der ersten Hälfte des Projekts im manuell gesteuerten Horizontalflug getestet. Kleinere Prototypen konnten die einzelnen Phasen (Start-, Lande- und Arbeitsphase) erfolgreich selbstständig durchführen.

Das nächste Team wird daran arbeiten, dass die Phasenübergänge autonom ablaufen und die endgültige Software mit den Prototypen Clara und Emma getestet und verfeinert wird. Zusätzlich werden Konzepte zur besseren Ortung des Fluggeräts an der Bodenstation implementiert und die Kommunikation zwischen den Komponenten verbessert. Strukturell wird das Morphingkonzept weiterentwickelt und optimiert.

Zur Weiterentwicklung der Hard- und Software sind weitere Testkampagnen notwendig. Um Zeit zu sparen, wurden alle selbst entworfenen Regler zunächst auf konventionellen Modellflugzeugen getestet und erst später auf Holzprototypen übertragen. Diese sind zwar kleiner, weisen aber dieselbe Geometrie und damit ein ähnliches Flug-

verhalten auf. Erst nach dem Bestehen dieser Schritte wurden Tests an grösseren Carbon-Modellen durchgeführt. Bisher konnten halbautomatische Tests der Start- und Landephase am Seil, welches zur Bodenstation führt, durchgeführt werden. Dabei musste lediglich die gewünschte Steig- bzw. Sinkrate vorgegeben werden. Schliesslich ist es nach der Modellierung am Computer und dem Übertragen auf den Autopiloten gelungen, die Arbeitsphase mit Modellflugzeugen autonom auszuführen – bisher jedoch ohne Seil und ohne Kraftübertragung auf den Generator. Die Carbon-Fluggeräte wurden im manuellen Horizontalflug sowie im halbautomatischen vertikalen Steig- und Sinkflug ausführlich getestet.

### Risiken

Da es sich bei AWE-Systemen um relativ komplexe Systeme handelt, können beim Einsatz gewisse Risiken auftreten. Wie bei allen Fluggeräten stellt der Verlust der Steuerbarkeit und somit der Absturz die grösste Gefahrenquelle dar. Auch wenn durch den Einbau sicherheitsrelevanter Komponenten und der Implementierung von eigentlich fehlerfreier Software das Risiko reduziert wird, ist eine vollkommene Sicherheit nie gegeben. Deshalb wird die Benutzung solcher Systeme wohl stets nur über unbebautem und unbevölkertem Gelände möglich sein. Neben der visuellen Beeinträchtigung der Landschaft

benötigt deren Verwendung stets die Akzeptanz der Bevölkerung und insbesondere des Gesetzgebers. Hier müssen Gesetze angepasst werden, die den Betrieb erst ermöglichen. Auch eine Kollisionsgefahr mit Sportflugzeugen, Paragliden usw. kann nicht ausgeschlossen werden, d.h. die genutzten Lufträume müssen zwangsläufig zu Flugverbotszonen erklärt werden. Zudem muss dafür gesorgt sein, dass beim Gebrauch mehrerer Einheiten im Verbund die fliegenden Geräte nicht kollidieren. Daher ist zumindest bei den ersten AWE-Systemen – bei denen die Arbeitsphasen nicht untereinander synchronisiert werden – davon auszugehen, dass rund um eine Bodenstation im Umkreis der maximalen Seillänge keine Überschneidungen mit anderen Systemen vorhanden sein dürfen.

Trotz dieser Schwierigkeiten stellen solche Systeme eine Alternative zu den bekannten Formen der Energieproduktion dar, denn sie bestechen durch ihre hohe Effizienz. Da eine stetig wachsende Community weltweit von der Idee überzeugt ist, wird sich noch vieles in den nächsten Jahren verändern.

#### Links

→ [www.ftero.ch](http://www.ftero.ch)  
→ [www.facebook.com/fteropower](https://www.facebook.com/fteropower)

#### Autor

**Fabian Wiesemüller** ist Projektleiter im Ftero-Team.  
→ ETH Zürich, 8092 Zürich  
→ [fabian@ftero.ch](mailto:fabian@ftero.ch)

## RÉSUMÉ

### Exploiter l'énergie éolienne autrement

De l'électricité à partir d'avions légers raccordés

Lorsque l'énergie éolienne est exploitée par des systèmes « Airborne Wind Energy (AWE) » plutôt que par des éoliennes stationnaires, l'avion atteint une altitude plus élevée à laquelle le vent souffle plus fort et de manière plus constante. La base théorique de cette technologie est déjà établie depuis 1980.

Ce faisant, il existe deux principes: la « Ground-Generation » et la « Onboard-Generation ». Avec le premier, le courant est produit par un générateur fixé au sol, et avec le deuxième, le courant est généré par l'appareil lui-même et transféré au sol par le biais d'un câble. Pour cela, l'avion doit disposer d'aérogénérateurs. Grâce à une meilleure exploitation de la surface portante, les systèmes AWE peuvent générer de l'électricité beaucoup plus efficacement que les

centrales éoliennes conventionnelles. Dans la mesure où de tels systèmes sont compacts et relativement mobiles, ils peuvent être utilisés sans infrastructure. Ils sont également adaptés pour les zones de crise, les régions isolées ou les régions dont les infrastructures électriques ont été endommagées par des catastrophes naturelles. Un projet de l'ETHZ s'est penché sur le défi que représente la complexité du système. Comme pour tous les avions, la perte de contrôle, et ainsi la chute de l'appareil, représente la plus grande source de danger. Même si l'installation redondante de composants essentiels et l'implémentation de logiciels sans faille peut réduire le risque, la sécurité absolue ne peut jamais être garantie. C'est pour cette raison que de tels systèmes ne seront installés que sur des terrains non bâtis. NO

## ABB Technikerschule

Technik, Informatik, Wirtschaft, Management →



WEITER WISSEN →

### VORBEREITUNGSKURS ZUR "PRAXISPRÜFUNG GEMÄSS NIEDERSPANNUNGS- INSTALLATIONSVERORDNUNG (NIV)"

Mit dieser berufsbegleitenden Weiterbildung werden dipl. Techniker HF sowie Ingenieure FH/ETH auf die Praxisprüfung zur Erlangung der Fachkunde für Elektroinstallationen - nach Art. 8 NIV (Niederspannungs-Installationsverordnung) - vorbereitet.



- ▶ **KURSYNHALT**  
Normen, Sicherheitskontrolle, Messtechnik, Projektierung und technische Projektanalyse
- ▶ **KURSSTART**  
Freitag, 12. Januar 2018
- ▶ **KURSDAUER**  
Januar bis November 2018  
jeweils am Freitag (total 280 Lektionen)
- ▶ **KURSORT**  
ABB Technikerschule, Wiesenstrasse 26, 5400 Baden
- ▶ **ANMELDESCHLUSS**  
5. Dezember 2017
- ▶ **ANMELDUNG**  
ABB Technikerschule, Administration, Stefania Romito  
Telefon 058 585 67 82, Fax 058 585 36 68, s.romito@abbts.ch
- ▶ **AUSKUNFT**  
Electrosuisse, Projektleiter, Thomas Hausherr  
Telefon 044 956 14 91, Fax 044 956 11 22,  
thomas.hausherr@electrosuisse.ch



GOSSEN METRAWATT  
CAMILLE BAUER

## MESSUNG UND STEUERUNG

KOMPAKTGERÄT FÜR FLEXIBLE LÖSUNG IM STARKSTROM-NETZ

Der **CENTRAX CU3000** vereinigt in einem Gehäuse für den Panel-Einbau die Funktionalität eines hochgenauen Messgerätes für Starkstrom-Anwendungen mit den Möglichkeiten einer frei programmierbaren SPS. Damit entfällt in vielen Fällen der Bedarf für eine separate Steuerung, ein Leitsystem, eine abgesetzte Anzeige oder einen zusätzlichen Datensammler.



**CENTRAX CU3000**  
CENTRAL UNIT

Camille Bauer Metrawatt AG • 5610 Wohlen • TEL +41 44 308 80 80  
www.gmc-instruments.ch • salesch@cbmag.com

## PFISTERER



### Altbewährt in neuem Gewand: PFISTERER FILENIT- Kabelverteilkabine

Steigern Sie die Energieeffizienz Ihrer Niederspannungsanlagen durch den Einsatz bewährter Kontakttechnologien von PFISTERER. Die Neuauflage der bewährten FILENIT-Kabelverteilkabine startet mit überzeugenden Vorteilen. Sie erfüllt die Anforderungen der neuesten Schaltanlagen-Norm SN EN 61439-1 und SN EN 61439-5 (Normgerechter Stand per 01.11.2015)

#### Die Vorteile der optimierten FILENIT-Kabelverteilkabine

- Aus Hochleistungsblech gefertigt, für erhöhte mechanische Stabilität und Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen
- Kabinengehäuse komplett aus einem Guss gefertigt
- Kabelverteilkabine in fünf unterschiedlichen Grössen erhältlich
- Hochwertiges, neuentwickeltes und nach SN EN 61439-1 und SN EN 61439-5 geprüftes Sammelschienensystem bis 630A mit einer Kurzschlussfestigkeit von sehr hohen 30kA/1s
- Komplettsystem Kabine, Sammelschienensystem und Lastschaltleisten (geprüft nach SN EN 60947-1 und SN EN 60947-3) mit garantierter Konformität



+41 41 499 72 72  
ch.pfisterer.com

the power connection