



Himmelsstürmer

Ressourcen Können fliegende Kraftwerke die Windenergie attraktiver machen? Die ersten Anlagen werden gerade marktreif. Visionäre träumen bereits von Turbinen im Jetstream.

Unten am Erdboden weht nur eine leichte Brise. Hier oben aber tost Windstärke sieben aus West. Marc Hauser schiebt die Tür der DHC-6 »Twin Otter« auf. Eisige Luft dringt in die Kabine. Kurz hält sich Hauser noch mit beiden Händen an einer Stange über der Luke fest und blickt hinunter auf das glitzernde Meer vor der Costa Brava.

Dann lässt er seinen Körper aus 5300 Meter Höhe in die Tiefe fallen.

Schnell stabilisiert sich der Fallschirmspringer mit ausgestreckten Armen und Beinen, dann beschleunigt er wie Superman im Angriffsmodus. 20 Sekunden vor dem Boden öffnet Hauser den Fallschirm. Sanft setzt er auf dem kleinen Flugplatz im katalonischen Ampuriabrava auf.

»Ich brauche etwa 2000 Höhenmeter, um auf Geschwindigkeit zu kommen«, berichtet Hauser später. Der Abenteurer betreibt »Speed Tracking«, eine Fallschirmspringerdisziplin, bei der es darum geht, im freien Fall horizontal die höchste Geschwindigkeit über Grund zu erreichen.

304 Stundenkilometer schnell jagte Hauser 2012 über Katalonien hinweg. Seitdem versucht er, seinen eigenen Rekord zu brechen. »Je stärker der Wind in der Höhe ist, desto schneller kann ich werden«, sagt der Mann aus dem schweizerischen Bern.

Hauser hält Vorträge über seine Leidenschaft. Und er verbindet den Sport mit einer Vision: »Jedes Mal, wenn ich da oben bin, frage ich mich, warum wir Höhenwinde nicht als Energiequelle nutzen.« Ungenutzt umtosten Stürme Tag und Nacht den Planeten, »dabei könnten sie die ganze Welt mit Strom versorgen«.

Hauser ist ein Botschafter für die ungestüme Kraft der Höhenwinde. Mit seinem Enthusiasmus ist er nicht allein; Start-ups und Konzerne weltweit schicken sich an, jene Stürme zu ernten, die fern der Erdoberfläche toben. Monströse Flugdrachen, filigrane Flügelkonstruktionen und sogar komplette Turbinen bringen die Ingenieure in die Luft, um die Energie aus der Höhe nutzbar zu machen. Viel heiße Luft, um Investoren zu ködern? Mit Sicherheit; doch da entsteht auch etwas Neues, Vielversprechendes, das über den Energiemix der Zukunft mitbestimmen könnte.

Allein in Europa forschen mehr als zehn Firmen und Universitäten an solchen Höhenwindkraftanlagen. In Deutschland ist die Technik dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie rund zehn Millionen Euro Fördergeld wert. Stromhersteller wie E.on oder EnBW investieren.

Mitte Oktober trifft sich die Branche im schottischen Glasgow zur Airborne Wind

Energy Conference. In diesem Jahr wird es dort besonders spannend: Der Einsatz der ersten kommerziellen Flugwindkraftanlagen steht unmittelbar bevor.

»Diese Technologie könnte schon in naher Zukunft Millionen von Menschen klimaneutralen Strom liefern – kostengünstig und quasi unabhängig vom Standort«, sagt Alexander von Breitenbach, Windkraftforscher von der TU Berlin. Auch Paula Echeverri schwärmt von der »nächsten Generation von Windkraftanlagen«; sie ist Chefingenieurin der kalifornischen Firma Makani, die zum Google-Mutterkonzern Alphabet gehört. »Wir wollen der ganzen Welt den Zugang zu sauberer Energie ermöglichen«, verspricht sie. Bislang liefere Windenergie nur etwa vier Prozent des Weltstrombedarfs.

Der mögliche Energiegewinn aus Höhenwinden ist gewaltig. Hoch oben ist der Wind viel beständiger und kräftiger als am Boden. Die Leistung des Windes erhöht sich proportional zur dritten Potenz seiner Geschwindigkeit. Verdoppelt sich die Windstärke, steigt die Leistung um das Achtfache. Auch über Europa weht es bereits in 500 Meter Höhe fast überall, berichtet die Industrielobbygruppe Airborne Wind Europe. Mehr als siebeneinhalb Terawatt Leistung könnten fliegende Kraftwerke global bereitstellen, haben Forscher



der University of Delaware berechnet. Das ist etwas mehr als die Leistung aller heutigen stromerzeugenden Kraftwerke zusammengekommen.

Eine große Verlockung für die Branche – nur wie lässt sich diese Energie abschöpfen? Die Naben gängiger Windkraftanlagen liegen auf etwa hundert Meter Höhe. Erheblich längere Masten sind wirtschaftlich kaum zu realisieren.

Die Entwickler der Flugwindkraftanlagen haben dafür eine überraschend einfache Lösung: Sie lassen die Masten einfach weg. Und die Fundamente gleich mit. Keine Windräder mehr verschandeln dann die Landschaft; kein Surren von Rotorblättern treibt Anwohner in den Wahnsinn.

Als ferne Punkte am Himmel schwebten solche Anlagen dahin, angeleinten Kinderdrachen gleich. Im steten Höhenwind, so die Vision, erzeugten sie gleichmäßig Strom – ein neuer, zuverlässiger Baustein im Energiemix, der sogar die Grundlast von Kohle- oder Atomkraftwerken übernehmen könnte.

»Dadurch, dass wir nicht mehr auf 100 Meter beschränkt sind, kann Windkraft zum ersten Mal eine hochverfügbare Energie sein«, sagt Stephan Wrage, Chef der Firma SkySails Power aus Hamburg. »Selbst in Schwachwindgebieten findet sich in drei-, vier-, fünfhundert Meter Höhe so gut wie immer Wind.«

SkySails stellt bislang mit mäßigem Erfolg Zugdrachen her, die Frachtschiffe über die Weltmeere schleppen und so deren Treibstoffverbrauch senken. Nun hat das Unternehmen die ersten kommerziellen Flugwindkraftanlagen verkauft: nach Mauritius, dem Inselstaat im Indischen Ozean,

der ansonsten Öl oder Kohle teuer importieren muss. Ab kommendem Jahr sollen die ersten höhergelegten Windkraftwerke über Mauritius fliegen.

SkySails' 100 Quadratmeter großer Powerkite wird ähnlich wie ein normaler Drachen gestartet. Auf Höhen zwischen 200 und 800 Metern fliegt er dann in Achten quer zum Wind und zieht dabei ein Seil von einer Trommel am Boden, die mit einem Generator gekoppelt ist. Sobald das Seil komplett ausgelassen ist, wird der Drachen aus dem Wind genommen und zurückgezogen. Dann beginnt der Prozess von Neuem. Das Einholen verbraucht dabei laut Wrage nur etwa vier Prozent der Energie, die zuvor erzeugt wurde.

200 Kilowatt könne eine solche Anlage leisten, genug, um Dutzende Haushalte gleichzeitig mit Strom zu versorgen. Kosten: zwischen fünf und zehn Cent pro Kilowattstunde, schätzt Wrage, deutlich günstiger als konventioneller Windstrom in der 200-Kilowatt-Leistungsklasse. Bei größeren Anlagen mit mehreren Megawatt Leistung erwartet er künftig gar einen Strompreis um 3,5 Cent.

Bald sollen die SkySails-Drachen autonom arbeiten und zum Beispiel eigenmächtig landen können, wenn ein Sturm anrückt; noch bedarf die Entwicklung der neuen Technik allerdings teurer For-

»Zwei Drittel der Küstengewässer der Erde sind zu tief für herkömmliche Windräder.«

Flugwindkraftanlagen der Firmen Enerkite, SkySails (Simulation), Makani
Monströse Drachen, filigrane Konstrukte

schungsgelder: »SkyPower100« heißt ein vom Bundeswirtschaftsministerium gefördertes Projekt. Beteiligt sind der Stromgigant EnBW, die Offshore-Firma EWE und die Universität Hannover.

An einer ähnlichen Technik arbeitet die Brandenburger Firma Enerkite. Kein Drachen, sondern ein ultraleichter Carbonflügel mit Textilbespannung zieht dabei drei Seile aus der Generatorwinde (siehe Grafik Seite 110). Seit 2012 erprobt die Firma die Technik in Kleinmachnow mit einer 30-Kilowatt-Anlage. Eine mobile 100-Kilowatt-Anlage wird derzeit entwickelt.

Firmenchef Alexander Bormann sieht die Technologie als Baustein einer zukünftigen, dezentralen Energieversorgung. »Wir können die besten Elemente des Systems – Kite-Technologien, Solarmodule und Stromspeicher – zusammenfassen und Strom auch dort liefern, wo heutige Windräder nicht wirtschaftlich sind«, sagt er. So ließen sich Enerkites mit Fotovoltaikanlagen kombinieren, Energiegleiter fliegen über Stromtankstellen. Auch große Dieselgeneratoren ließen sich mit den Nurflüglern ersetzen, besonders auf Inseln oder in weniger besiedelten Regionen ohne stabiles Stromnetz.

Herkömmliche Kleinwindanlagen seien weltweit auf weniger als zwei Prozent der Landfläche wirtschaftlich, sagt Bormann. Höhenwindkraftwerke dagegen könnten an rund 80 Prozent aller möglichen Standorte konkurrenzfähig Strom

produzieren. Und auch offshore könnten die fliegenden Windkraftwerke reüssieren. Darauf setzt die Firma Makani, eine Ausgründung des Innovationslabors Google X. Gerade hat die Windturbine des Unternehmens Probeflüge vor der norwegischen Insel Karmøy absolviert. Obschon einer der Testflüge im Crash endete, soll ab nächstem Sommer eine kommerzielle Demoanlage bereitstehen. Partner ist der Ölkonzern Shell, der viel Erfahrung mit Offshoretechnik mitbringt.

Makani hat – anders als Enerkite oder SkySails – die Turbine zur Stromerzeugung nicht am Boden, sondern im Fluggerät selbst untergebracht. Das einem Kleinflugzeug ähnelnde Gerät hat eine Spannweite von 26 Metern und trägt acht Rotoren an den Flügeln, die während Start und Landung als Antrieb dienen. Auf Betriebshöhe angelangt, segelt das Fluggerät auf einer kreisförmigen Bahn, getragen von den Winden. Dabei erzeugen die Turbinen Strom, der über das Halteseil zum Boden geleitet wird.

Eine Leistung von 600 Kilowatt hat Makanis Windkraftanlage – wenig im Vergleich zu modernen Offshorewindrädern, die bis zu zwölf Megawatt leisten. Doch der große Vorteil gegenüber herkömmlichen Systemen: Der Gleiter lässt sich auf hoher See verankern.

»Die meisten Offshorewindräder brauchen Fundamente am Meeresboden«, sagt Makani-Chefingenieurin Echeverri. Konventionelle Windräder könnten deshalb nur bis etwa 40 Meter Wassertiefe installiert werden. Die Makani-Technik dagegen arbeitet von großen Bojen aus, die sich in mehreren Hundert Meter Wassertiefe am Meeresboden verankern lassen.

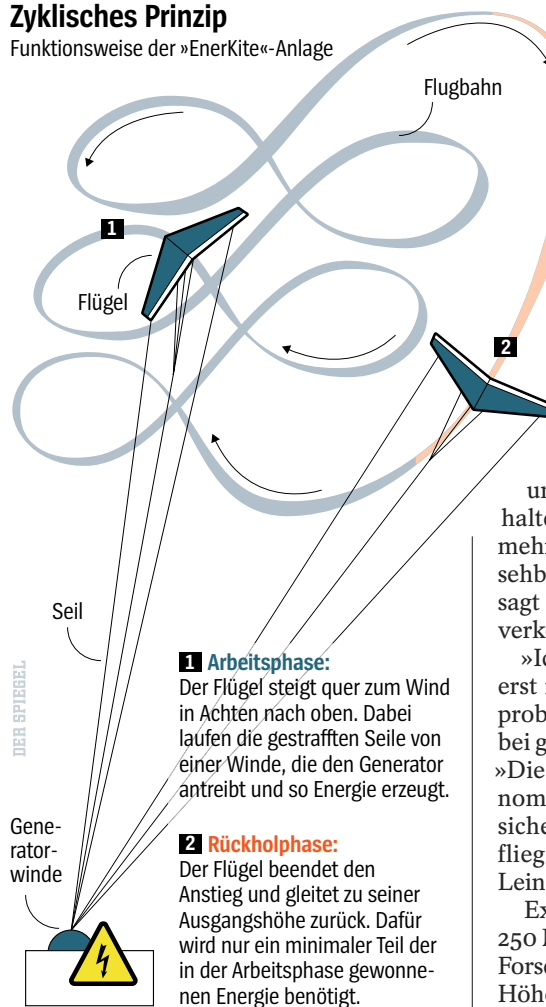
»Zwei Drittel der Küstengewässer der Erde sind zu tief für herkömmliche Windräder«, sagt Echeverri, »unser System erschließt diese Gebiete.«

Alexander von Breitenbach von der TU Berlin attestiert den neuen Himmelsstürmern beste Chancen: »Der Ausbau der konventionellen Windkraft stagniert in Deutschland«, sagt er, »gleichzeitig brauchen wir Windenergie immer dringender als stabilen Pfeiler der Energiewende.«

Während der Energiebedarf der Menschheit steigt, ist immer weniger Fläche verfügbar, um neue Ökostromkraftwerke zu errichten. Was liegt da näher, als in die Höhe auszuweichen? »Wir erschließen die dritte Dimension«, sagt von Breitenbach. Und je höher hinauf es geht, desto stürmischer wird es. Manche Visionäre träumen bereits von Propellern an den windigsten Orten der Erde. Sieben bis zwölf Kilometer über Normalnull tost es mancherorts fast immer. Dort verschieben die Jetstreams gewaltige Luftmassen, Starkwindbänder, in denen Windgeschwindigkeiten von bis zu 500 Stundenkilometern erreicht werden können.

Zyklisches Prinzip

Funktionsweise der »EnerKite«-Anlage



1 Arbeitsphase:

Der Flügel steigt quer zum Wind in Acht nach oben. Dabei laufen die gestrafften Seile von einer Winde, die den Generator antreibt und so Energie erzeugt.

2 Rückholphase:

Der Flügel beendet den Anstieg und gleitet zu seiner Ausgangshöhe zurück. Dafür wird nur ein minimaler Teil der in der Arbeitsphase gewonnenen Energie benötigt.

Schier unermessliche Energiemengen wären im Jetstream zu ernten. Doch ist das überhaupt möglich? Der Höhenwindfan Marc Hauser kennt sich aus mit dem großen Gebläse. Er war schon einmal mitdrin: Seine Rekordjagd führte ihn 2018 über Australien auf 7400 Meter Höhe. In einem Heißluftballon stieg er auf, um mit dem Jetstream im Rücken möglichst schnell zu werden. Ein Himmelfahrtskommando, im Wortsinn.

Bis auf 7000 Meter verlief die Ballonfahrt ohne Probleme. »Dann fiel die Temperatur drastisch«, erinnert sich Hauser. Ein Teil des Sauerstoffsystems vereiste. Kurz darauf erloschen die drei Brenner des Ballons. Der Pilot des Ballons versuchte, sie wieder zu entzünden. Ohne Erfolg.

»Dann sagte er, ich solle springen«, berichtet Hauser. Bei minus 40 Grad Celsius ließ sich der Sportler in den orkanstarken Windstrom fallen. Auf die eigene Geschwindigkeit konnte er sich jedoch nicht konzentrieren. »Ich dachte immer nur an die Ballonfahrer«, erinnert sich Hauser. »Ohne Brenner drohte ihnen eine äußerst harte Landung.« Sein eigener Sturzflug endete nach 90 Sekunden gut und sanft im Schirm, auf einer Schafweide. Eine Vier-

telstunde später kam der erlösende Anruf: Es war dem Piloten gelungen, die Brenner wieder zu entzünden. »Wir hatten sehr großes Glück«, sagt Hauser.

Lassen sich Windkraftwerke unter solchen Extrembedingungen im Himmel verankern? Noch sind die Experten skeptisch. »Die verfügbare Energie dort oben ist natürlich gigantisch«, sagt Stephan Wrage von SkySails. »Aber bislang kennen wir keine Materialien, mit denen so etwas realisiert werden könnte.« Schon ein mehrere Kilometer langes Seil mit Stromkabel würde so viel wiegen, dass es unmöglich erscheint, es in der Luft zu halten. Wirtschaftlich sei ein Projekt in mehreren Tausend Meter Höhe »auf absehbare Zeit auf keinen Fall zu machen«, sagt Wrage. Und wie solle man den Flugverkehr drum herumführen, regulieren?

»Ich finde es sinnvoll, die Technologie erst mal unter 1000 Höhenmetern zu erproben«, sagt von Breitenbach. Schon dabei gebe es noch genug Forschungsbedarf. »Die größte Herausforderung ist die autonome Flugkontrolle«, sagt er. So müsse sichergestellt werden, dass die Energieflieger nicht abstürzen, etwa wenn die Leine reiße oder der Wind nachlasse.

Experimente im Windkanal und in einer 250 Meter langen Schlepprinne führen die Forscher an der TU Berlin durch, um die Höhenwindkraftwerke zu optimieren. Sie feilen an Flügelprofilen und entwickeln Steuersoftware, die für ein möglichst stabiles Flugverhalten sorgen soll.

Die Jagd auf die Höhenwinde geht also weiter, auch für Marc Hauser im spanischen Ampuriabrava: Im 45-Grad-Winkel muss Hauser fallen, um die optimale Geschwindigkeit über Grund zu erreichen. Dabei versucht er, unbedingt »auf Linie« zu bleiben. »Jede Bewegung, jede kleinste Kurve bremst«, sagt er.

An diesem Tag ist der kontrollierte Absturz aus dem Flugzeug nach 60 Sekunden zu Ende. Das GPS-Gerät, das der Fallschirmspringer am Körper trägt, verrät seine Höchstgeschwindigkeit: 244 Stundenkilometer. Kein Rekordflug.

Aufgeben will er nicht. »Mit dem richtigen Rückenwind kann ich noch viel schneller sein«, sagt er. »Das weiß ich.« Hauser blickt in den fast wolkenlosen Himmel über Katalonien. »Es gibt unfassbar viel Energie dort oben – und wir fangen gerade erst an, sie zu nutzen.« Philip Bethge

Video
So funktionieren die
Höhenwindkraftwerke

spiegel.de/sp412019kraftwerk
oder in der App DER SPIEGEL

