

Bachelorarbeit

am Institut für Berufliche Lehrerbildung
der Fachhochschule Münster im Studiengang
„Bachelor – Lehramt an Berufskollegs (BB, Berufliche Bildung)
mit der beruflichen Fachrichtung Maschinenbautechnik“

Airborne Wind Energie zur Stromerzeugung und als Antriebshilfe - Funktionsweise der Techniken und exemplarische Anwendung in der beruflichen Bildung

vorgelegt bei:

Prof. Dr. phil. Franz Stuber

vorgelegt von

Bernd Oettigmann
Tinge 14
48624 Schöppingen

Matrikelnummer: 601646
Telefon: 02555 / 475
E-Mail: b.oettigmann@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Struktur und Aufbau	2
2	Konventionelle WKA und AWE-Technologie.....	4
2.1	Energiestruktur in Deutschland	4
2.2	Vergleich der AWE-Technologie mit konventionellen WKA	6
3	Höhenwindkraft	11
4	Prinzipien der Stromerzeugung durch Höhenwindkraft.....	14
4.1	Stromerzeugung in der Luft.....	14
4.2	Stromerzeugung am Boden	15
5	Prinzipielle Ansätze der AWE-Technologie.....	17
5.1	Flugwindkraftwerke [Sky Windpower]	18
5.2	Pumping-Kite-Systeme [TU Delft]	19
5.3	Tragflügel-Systeme [Makani Power]	23
5.4	Leichter-als-Luft-Systeme [Magenn Power]	25
5.5	Kites als Antriebshilfe [SkySails]	28
5.6	Weitere Akteure der AWE-Technologie	30
6	Herausforderungen für die Markteinführung der AWE-Technologie	31
7	Bedeutung der AWE-Technologie für die berufliche Bildung	33
7.1	Mögliche Konsequenzen.....	33
7.2	Exemplarische Anwendung.....	35
8	Zusammenfassung und Ausblick	38
9	Literaturverzeichnis.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Position des Generators	16
Tabelle 2: Lernfeld 1 - Mechatroniker/Mechatronikerin	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strommix 2010	4
Abbildung 2: Strommix 2020	5
Abbildung 3: Konventionelle WKA und AWE-Technologie	7
Abbildung 4: Leistungskurve - WKA und AWT	9
Abbildung 5: Prozentualer Anteil der Windgeschwindigkeit - WKA und AWT	9
Abbildung 6: Kapazitätsfaktor.....	10
Abbildung 7: Optimale Windenergiedichte	12
Abbildung 8: Pumpzyklus.....	15
Abbildung 9: Darstellung des Vier-Rotoren-Prototypen.....	18
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Laddermill	21
Abbildung 11: Mechanische Leistung.....	22
Abbildung 12: Aerodynamisches Prinzip der AWT.....	23
Abbildung 13: Vergleich WKA und AWT	24
Abbildung 14: Darstellung der AWT	24
Abbildung 15: Funktionsprinzip des MARS	26
Abbildung 16: Darstellung des MARS	26
Abbildung 17: Geschätzte Leistungsfähigkeit der MARS 100 kW Einheit	27
Abbildung 18: Systemkomponenten des SkySails-Systems	28

Abkürzungsverzeichnis

AWE	Airborne Wind Energy
AWEC	Airborne Wind Energy Conference
AWT	Airborne Wind Turbine
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FEGs	Flying Electrical Generators
IBL	Institut für berufliche Lehrerbildung
MARS	Magenn Air Rotor System
WKA	Windkraftanlage(n)

1 Einleitung

Durch die verheerende Atomkatastrophe infolge des schweren Erdbebens in Japan hat sich der Blick auf die Energieerzeugung speziell in Deutschland, aber auch auf der ganzen Welt gewandelt.

Daraufhin hat auch die Politik in Deutschland ihre Meinung zur derzeitigen Energiesituation geändert. Am 07. Juni 2011 wurde nun die Energiewende von der deutschen Regierung beschlossen. Bis zum Jahr 2022 sollen alle Atomkraftwerke in Deutschland vom Netz gehen (vgl. Westfälische Nachrichten 2011a). Neben der Schädlichkeit für Umwelt und Gesundheit spielen hierbei auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Durch die Energiewende hat Deutschland als Wirtschaftsstandort für regenerative Energieerzeugung die Chance, auf dem Weltmarkt eine Vorreiterrolle einzunehmen.

Hinsichtlich dieser Aspekte ist der Wunsch die erneuerbaren Energien auszubauen sehr groß. Eine aktuelle Forsa-Umfrage zur Energiepolitik bestätigt dies:

„Die Deutschen stehen mit großer Mehrheit hinter Plänen der Bundesregierung, den beschleunigten Atomausstieg mit deutlich mehr Klimaschutz zu verbinden. 90 Prozent sprechen sich - quer durch die Parteien - dafür aus, dass die Bundesregierung jetzt die erneuerbaren Energien ausbaut“ (100 Prozent Zukunft).

Allerdings bringt diese Umstellung auch höhere Energiekosten mit sich. Wirtschaftsminister Rösler schätzt, dass die Stromkosten für eine vierköpfige Familie um bis zu 40 Euro im Jahr steigen könnten (vgl. Westfälische Nachrichten 2011b).

Während die weltweite Umweltverschmutzung zunimmt und die daraus resultierende Klimaerwärmung die Weltbevölkerung in Zukunft vor enorme Schwierigkeiten stellen wird, kann man die Erde auch aus einem anderen Blickwinkel betrachten. Der ehemalige Raumfahrer Wubbo Ockels beschreibt diesen Blickwinkel wie folgt: „Von draußen betrachtet, ist die Erde wunderbar schön. Zugleich spürt man sofort die Zerbrechlichkeit der Erde. Man kann sie kaputtmachen“ (3sat 2010). Diese Erkenntnis macht die Entwicklung umweltfreundlicher Technologien zur Energiegewinnung absolut notwendig.

Airborne Wind Energy (AWE) zur Stromerzeugung und als Antriebshilfe bietet einen vielversprechenden Ansatz, umweltfreundlich und zugleich kostengünstig

Energie zu erzeugen. Der Begriff der AWE steht hier für die Nutzung der Höhenwindkraft, die in großen Höhen auftritt. Konventionelle Windkraftanlagen (WKA) werden in einer Höhe von derzeit bis zu 200 m betrieben. Bei der AWE-Technologie soll der Wind in Höhen von 500 - 12.000 m genutzt werden. Weltweit sind über 40 Firmen und akademische Forschungsgruppen mit der Entwicklung neuer Technologien zur Nutzung der regenerativen Windkraft beschäftigt.

Auch das Institut für Berufliche Lehrerbildung (IBL) der Fachhochschule Münster verfolgt die Entwicklung dieser Technologie. Das vom IBL betreute Kite&Tech-Wiki¹ thematisiert die AWE im Rahmen der industriellen Verwendung. Hierdurch soll ein weiteres Fachthema für die Anwendung in der beruflichen Bildung im Kite&Tech-Wiki dargestellt werden. Auf dieser Grundlage hat sich die für diese Arbeit wesentliche Aufgabenstellung ergeben.

1.1 Aufgabenstellung

Die Technologie der Energieerzeugung durch AWE ist eine moderne Form der Windenergienutzung. Sie umfasst viele unterschiedliche Techniken, die zwar alle auf der Nutzung der Höhenwindkraft beruhen, sich allerdings in Funktion und Bauweise sehr stark unterscheiden.

Wesentliche Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, den komplexen Umfang der AWE-Technologie für die berufliche Bildung greifbar zu machen.

Um eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschungs- und Entwicklungsfortschritte in diesem Bereich zu geben, werden Grundlagen der Höhenwindkraft beleuchtet sowie die essentiellen Funktionsweisen der im Einzelnen beschriebenen Techniken dargestellt.

1.2 Struktur und Aufbau

Das Ziel dieser Arbeit ist es einen Einblick in die unterschiedlichen Ansätze der Energiegewinnung durch AWE zu geben.

In Kapitel zwei werden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten konventioneller WKA und der AWE-Technologie dargestellt. Aus diesem Zusammenhang werden auch die wesentlichen Vorteile der AWE-Technologie aufgeführt. Einführend wird hier die gegenwärtige und zukünftige Energiestruktur in

¹ „Ein Wiki [...] ist ein Hypertext-System für Webseiten, deren Inhalte von den Benutzern nicht nur gelesen, sondern auch online direkt im Browser geändert werden können“ (Wiki 2011).

Deutschland beschrieben.

Kapitel drei beinhaltet die Höhenwindkraft. Auf dieser Grundlage beruhen alle Technologien der Energiegewinnung durch AWE. In diesem Abschnitt wird zudem auf die globale Verfügbarkeit der Höhenwindkraft eingegangen.

In Kapitel vier wird anfangs die Nutzung der AWE zur Stromerzeugung näher beschrieben. Die grundsätzlichen Prinzipien der einzelnen Ansätze in diesem Bereich werden in zwei Gruppen klassifiziert. Daran anknüpfend folgen eine Erläuterung und eine nähere Beschreibung der wesentlichen Merkmale der Prinzipien.

Der fünfte Abschnitt befasst sich mit den prinzipiellen Ansätzen der AWE-Technologie. Aufgrund der Vielzahl der Akteure in diesem Bereich - immerhin über 40 Firmen und akademische Forschungsgruppen - wird sich in dieser Arbeit auf insgesamt fünf Ansätze beschränkt.

Im sechsten Kapitel werden die maßgeblichen Herausforderungen für die Branche der AWE genannt.

Der siebte Gesichtspunkt greift die AWE-Technologie im Bezug auf mögliche Konsequenzen und die Anwendung in der beruflichen Bildung auf. Aufgrund der ausführlichen Beschreibung der verschiedenen Ansätze mit dem Ziel, diese im Detail darzustellen, wird in dieser Arbeit nur in einem eingeschränkten Rahmen auf diesen Aspekt eingegangen. Allerdings ist es aufgrund der Tatsache, dass einige Ansätze kurz vor einer möglichen Marktreife stehen, trotzdem jetzt schon wichtig, sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen.

2 Konventionelle WKA und AWE-Technologie

Um hier diese beiden Technologien der Stromerzeugung miteinander vergleichen zu können, ist es sinnvoll sich zunächst die heutige Energiestruktur in Deutschland vor Augen zu führen. Auch der in Zukunft geplante Strommix spielt hier eine Rolle. Wie könnten die prognostizierten Ziele erreicht werden?

Konventionelle WKA nutzen im Vergleich zur Energieerzeugung durch AWE bodennahe Winde. Es bestehen allerdings trotzdem einige Gemeinsamkeiten im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft zwischen der AWE-Technologie und den WKA. Aus diesem Grund ist es notwendig zunächst Parallelen und Unterschiede beider Technologien darzustellen.

Hierbei wird auch ein Leistungsvergleich zwischen einem Ansatz der AWE-Technologie und einer konventionellen WKA dargestellt.

2.1 Energiestruktur in Deutschland

Betrachtet man die Energiestruktur in Deutschland im Hinblick auf den Stromverbrauch lässt sich in Abbildung 1 erkennen, dass im Jahr 2010 der

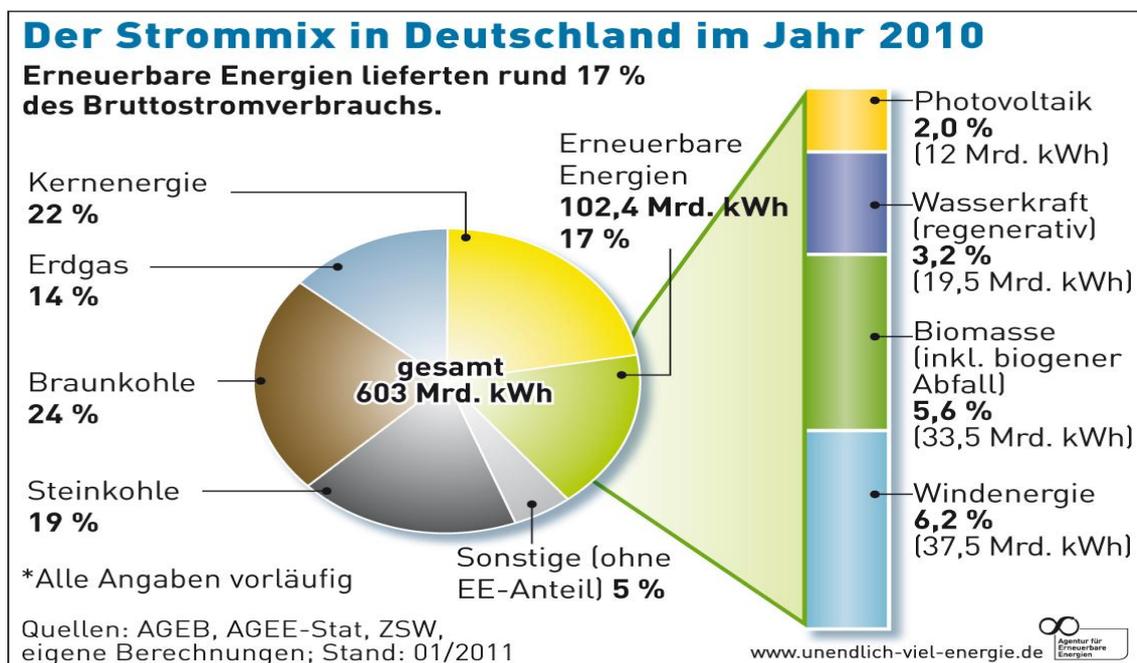


Abbildung 1: Strommix 2010 (Agentur für Erneuerbare Energien)

Anteil erneuerbarer Energien 17 % des gesamten Bruttostromverbrauchs gedeckt hat. Der größte Anteil hierbei wurde durch die Windenergie erzeugt. Mit einem Beitrag von 6,2 % lieferte die Windenergie eine Energiemenge von 37,5 Milliarden kWh. Aus diesem Diagramm lässt sich der enorme Stellenwert der Windenergie im Hinblick auf die heutige Stromversorgung durch

erneuerbare Energien festmachen.

Durch das Inkrafttreten des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG) hat Deutschland eine Maßnahme entwickelt, wodurch die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas oder Kohle sowie von Kernkraft verringert werden soll (vgl. EEG 2011).

Der Bundesverband Erneuerbarer Energien e.V. hat daraufhin einen Strommix bis zum Jahr 2020 prognostiziert (s. Abbildung 2), aus dem hervorgeht, dass in Zukunft erneuerbare Energien 47 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs decken.²

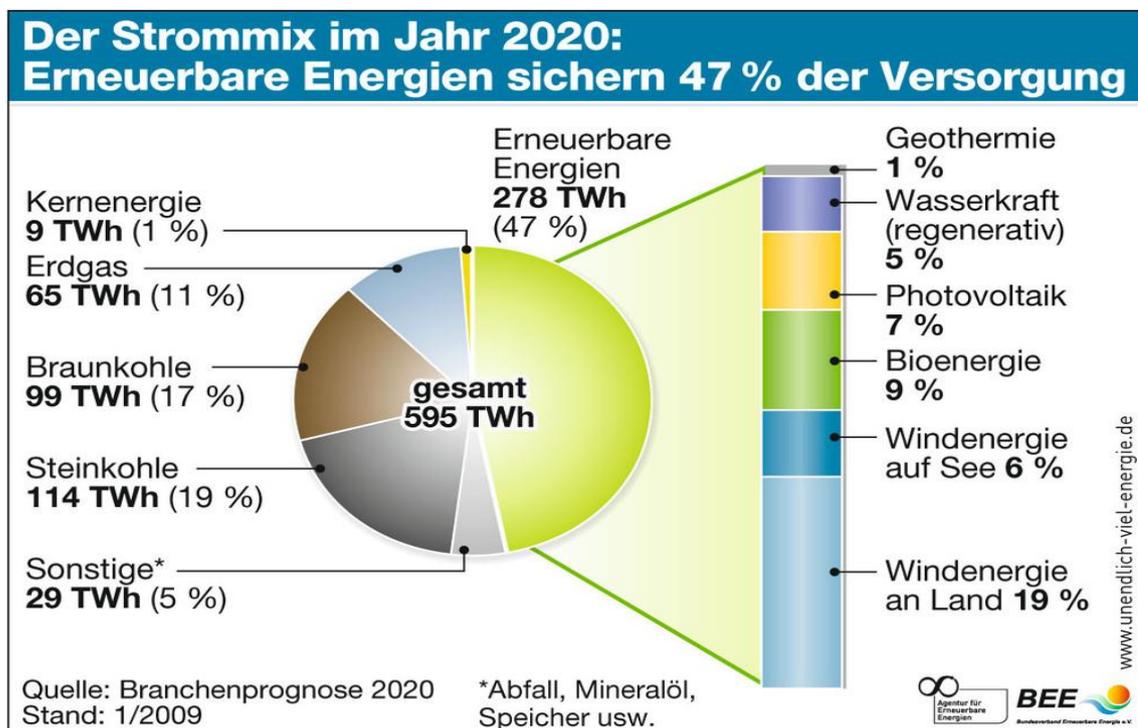


Abbildung 2: Strommix 2020 (Agentur für Erneuerbare Energien)

Aus dieser Prognose wird deutlich, dass die Windkraft in Zukunft ein Viertel der gesamten Stromversorgung durch erneuerbare Energien ausmacht. Um dieses Ziel zu erreichen, ist unter anderem angedacht die derzeit installierte Leistung an Land zu verdoppeln (Agentur für Erneuerbare Energien o.J).

Hierzu sollen bereits bestehende Anlagen mit neuen, leistungsstärkeren Maschinen ausgestattet werden. Dieses sogenannte Repowering hat eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Standorte und die Erhöhung der

² „Diese Ausbauprognose beruht auf konservativen und fundierten Annahmen hinsichtlich des Stromverbrauchs (Rückgang um nur ca. 3 Prozent), des Ausbaus Erneuerbarer Energien, der Entwicklung konventionellen Kraftwerksparks und der Netzinfrastruktur. Sie unterstellt, dass die politischen Rahmenbedingungen günstig bleiben und der Vorrang für Erneuerbare Energien nicht angetastet wird" (Agentur für Erneuerbare Energien o.J.).

installierten Leistung bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl der Anlagen zum Ziel (vgl. Wind-Energie).

Außerdem soll die Windenergie im Offshore-Bereich weiter ausgebaut werden (Agentur für Erneuerbare Energien o.J.).

Betrachtet man nun allerdings dieses Ziel, darf man auch einen anderen Gesichtspunkt nicht ignorieren.

Das Größen- und Leistungswachstum konventioneller WKA ist beschränkt. Sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Grenze konventioneller WKA scheint mit einer Leistung von 5 - 7,5 MW und einer Höhe von fast 200 m erreicht zu sein. Die maximale Höhe des nutzbaren Windes wird durch die Nabenhöhe sowie des Durchmessers der Rotorblätter beschränkt. Des Weiteren werden in Ländern wie Deutschland erstklassige Flächen für WKA knapp (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

Eine andere Möglichkeit, das prognostizierte Ziel, im Jahr 2020 47 % der Versorgung durch erneuerbare Energien, zu sichern, kann die Technologie der AWE sein. Vergleicht man hierbei die AWE-Technologie mit konventionellen WKA, wird das enorme Potential deutlich.

2.2 Vergleich der AWE-Technologie mit konventionellen WKA

Die Nutzung der Höhenwindkraft durch die AWE-Technologie beruht auf denselben aerodynamischen Prinzipien wie die Technologie einer konventionellen WKA (vgl. MacCleery 2011, S.25).

Brian MacCleery beschreibt diesen Zusammenhang wie folgt:

„Wie bei der herkömmlichen Windenergie ist die Energieerzeugung proportional zur Hälfte der Luftdichte multipliziert mit der Windgeschwindigkeit hoch drei.

$$P_0 \propto \frac{1}{2} \rho_{Luft} v_{Wind}^3 \quad (1)$$

[P_0 = im Wind enthaltene Leistung; ρ = Luftdichte; v =Geschwindigkeit, B.O.]
Dadurch ergibt sich aus einer kleinen Zunahme der Windgeschwindigkeit ein großer Unterschied bei der Leistung - eine Verdopplung führt zur achtfachen Leistung. Ähnlich der Spitze eines konventionellen Rotorblattes bewegt sich auch die Tragfläche mit hoher Geschwindigkeit durch die Luft und gewinnt aus dem aerodynamischen Auftrieb effizient Energie“ (MacCleery 2011, S.25).

Der Grundgedanke der AWE-Technologie liegt nun darin die Türme konventioneller WKA, die zur eigentlichen Energieerzeugung nichts beitragen,

abzuschaffen. Es sollen nur noch die beweglichen Teile zur Energiegewinnung genutzt werden (vgl. Berkel 2010, S.25).

Eine wesentliche Rolle spielt hierbei die Tatsache, dass die Spitzen der Rotorblätter der effektivste Teil einer WKA sind. Die äußersten 25 % der Rotorblätter sind in manchen Fällen für 75 % der generierten Energie verantwortlich (vgl. Makani Power).

Wie in Abbildung 3 dargestellt, bewegt sich die Tragfläche bei der AWE-Technologie gewissermaßen wie die Spitze des Rotorblattes quer zur Windrichtung in Kreisform oder in Form einer Acht. Dabei werden Geschwindigkeiten erreicht, die um ein Vielfaches höher sind als die eigentliche Windgeschwindigkeit (vgl. McCleery 2010, S.15).

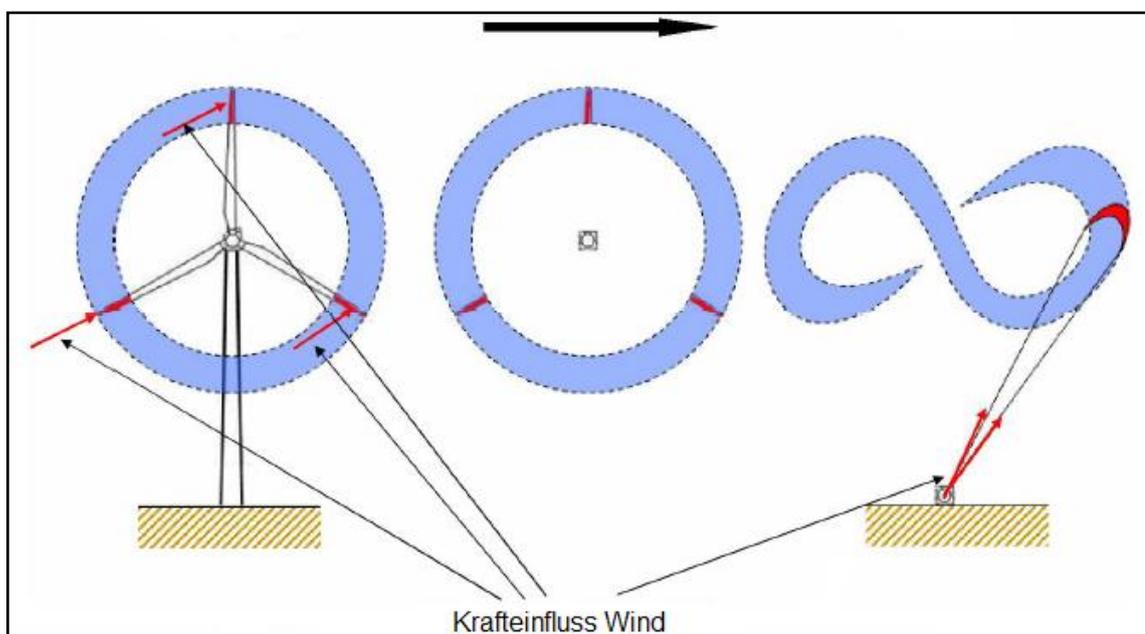


Abbildung 3: Konventionelle WKA (links) und AWE-Technologie (rechts) (vgl. Kite Gen)

Die gegenwärtig größte WKA der Welt ist die E-126 der Firma Enercon mit einer Nabenhöhe von 135 m, einem Rotordurchmesser von 127 m und einer Gesamthöhe von 198,5 m. Damit hat die E-126 ein Gewicht von 7.000 t und kostet elf Millionen Euro. Die Nennleistung dieser Anlage beträgt 6 bis 7,5 MW. Sie produziert zwischen 15 - 18 Millionen kWh pro Jahr und stellt so Strom für 15.000 - 18.000 Haushalte bereit (vgl. Energieblog24).

Aus diesem Zusammenhang lässt sich erkennen, welcher enorme Materialaufwand für die Errichtung einer WKA notwendig ist.

Die Ansätze der AWE-Technologie hingegen werden aus leichteren Materialien als WKA gebaut und können mit einem geringeren Materialaufwand pro

Leistungseinheit realisiert werden (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

Ein weiteres Merkmal der AWE-Technologie ist, dass im Vergleich zu konventionellen WKA größere Höhen erreicht werden können. Winde in Höhen von 500 - 12.000 m wehen stärker und stetiger. Außerdem ist der Energiegehalt um ein Vielfaches höher (s. Formel (1)) als bei bodennahen Winden (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

Weitere Vorteile der AWE-Technologie sind (vgl. Schmehl 2011c):

- geringe Investitionskosten
- hohe Mobilität
- geringer Einfluss auf die Umwelt
- hoher Leistungsfaktor

Diese Punkte lassen sich anhand der von der Firma Makani Power geplanten Airborne Wind Turbine (AWT), die später noch genauer beschrieben wird, verdeutlichen.

Die geplante 1 MW AWT wird zirka zwei Tonnen wiegen. Das Halte- und Leitungskabel wird mit einer Tonne Gewicht angegeben. Für die Errichtung einer für den Betrieb benötigten Basisstation müsste mit einem Materialaufwand von zirka 100 Tonnen Beton gerechnet werden (vgl. Heuer 2010). Dies würde ein Gesamtgewicht von ungefähr 103 Tonnen bedeuten. Schätzungen zufolge könnten die Systemansätze der AWE-Technologie in Zukunft einen Nutzungsgrad von 60 - 80 % erreichen, während konventionelle WKA am Boden auf einen Nutzungsgrad von 30 - 40 % kommen (vgl. Heuer 2010).

Dieser Zusammenhang lässt sich durch einen Leistungsvergleich³ einer konventionellen WKA mit der AWT von Makani Power erläutern:

Die in Abbildung 4 auf der nächsten Seite dargestellte Kurve zeigt, wie viel Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit produziert wird. In diesem Beispiel erreicht eine konventionelle WKA (blaue Kurve) ihre 1 MW Nennleistung bei einer Windgeschwindigkeit von 12,5 m/s.

Die vorgesehene AWT mit der gleichen Nennleistung erreicht diese sehr viel früher, nämlich bei einer Windgeschwindigkeit von 9 m/s. Dies bedeutet, dass bei weniger Wind mehr Leistung produziert werden kann.

³ Der Leistungsvergleich beruht, sofern nicht anders angegeben, auf den Angaben der Internetpräsenz von Makani Power. Es ist ein exemplarischer Vergleich, der auf theoretischen Berechnungen beruht, da die 1 MW AWT bisher noch nicht fertiggestellt wurde.

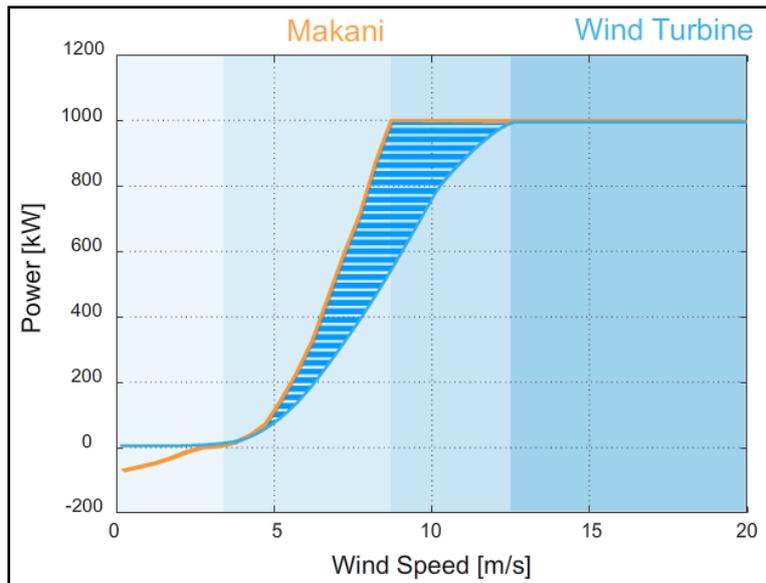


Abbildung 4: Leistungskurve - WKA und AWT (Makani Power)

Um nun festzustellen wie viel Energie produziert wird, wurde die Häufigkeit, die der Wind mit einer bestimmten Geschwindigkeit weht, mit der bei dieser Geschwindigkeit erzeugten Leistung verglichen. In Abbildung 5 ist dieser Vergleich dargestellt:

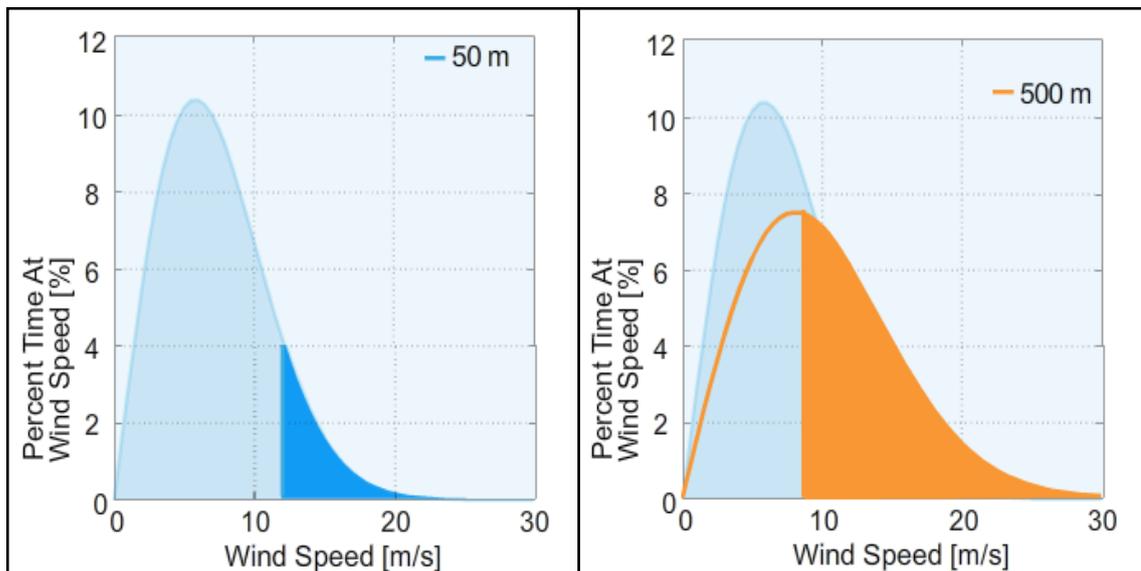


Abbildung 5: Prozentualer Anteil der Windgeschwindigkeit - WKA und AWT (Makani Power)

Der Graph auf der linken Seite zeigt den prozentualen Anteil bei dem der Wind mit einer bestimmten Geschwindigkeit in einer Höhe von 50 m weht. Man kann erkennen, dass die meiste Zeit (hellblaue Fläche) der Wind nicht stark genug ist, um eine konventionelle WKA mit voller Leistung zu betreiben.

Der Prozentsatz der Zeit, an dem die maximale Leistung zur Verfügung steht, ist im rechten Graphen höher. Da der Wind in 500 m stärker weht und die AWT schon bei 9 m/s die volle Leistung erreicht, wird hiermit deutlich, dass eine

konventionelle WKA mit einer Höhe von 50 m viel mehr Zeit benötigt, um die volle Leistung zu erzeugen.

Dieser Unterschied äußert sich in dem Kapazitätsfaktor. Dieser drückt die durchschnittlich abgegebene Leistung zu angegebener Nennleistung aus.

Abbildung 6 zeigt, dass die von Makani Power geplante 1 MW AWT einen fast doppelt so hohen Kapazitätsfaktor wie eine konventionelle WKA hat. Daher produziert sie bei gleicher Nennleistung ungefähr doppelt so viel Energie.

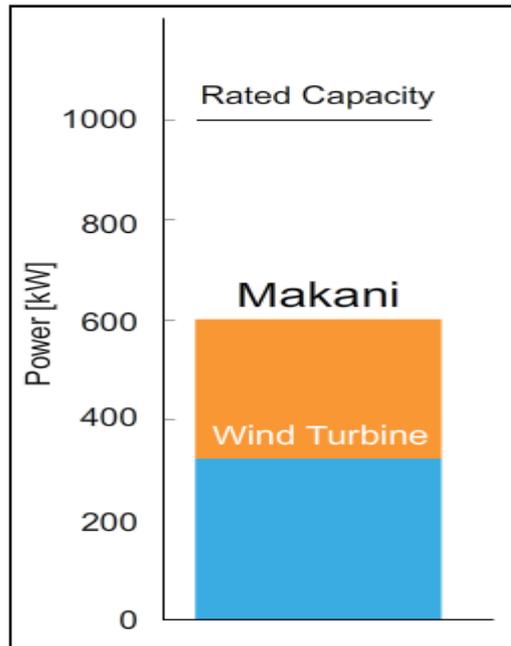


Abbildung 6: Kapazitätsfaktor (Makani Power)

Dies bedeutet, dass eine 1 MW AWT im Jahresdurchschnitt dieselbe Leistung erzeugen kann, wie eine konventionelle 2 MW WKA (vgl. Heuer 2010).

Zusammenfassend könnten somit drei 1 MW AWT die gleiche Energie wie die weiter oben beschriebene 6 MW WKA E-126 erzeugen.

Dies wäre mit einem erheblich geringeren Materialaufwand möglich. Drei 1 MW AWT, wie sie von Makani geplant sind, würden ein Gesamtgewicht von ungefähr 310 t haben. Betrachtet man hingegen das angegebene Gesamtgewicht der E-126 mit 7.000 t, wird der erheblich geringere Aufwand an Ressourcen sowie für den Aufbau einer solchen Anlage deutlich.

Rückblickend auf den prognostizierten Strommix im Jahr 2020 lässt sich schlussfolgern, dass die Nutzung der AWE-Technologie in Zukunft einen nicht unerheblichen Beitrag zur Realisierung dieser Ziele leisten kann.

Ungeachtet dessen muss man berücksichtigen, dass der beschriebene Leistungsvergleich nur eine angenommene Vorhersage ist. Darüber hinaus wurde diese Form der Stromerzeugung in der Prognose von der Agentur für Erneuerbare Energien nicht berücksichtigt.

Somit sind nur Potentialabschätzungen für den Ausbau und die Verdopplung der bereits installierten Leistung konventioneller Windenergiemaßnahmen mit eingeflossen (vgl. Agentur für Erneuerbare Energien o.J.).

3 Höhenwindkraft

Als Höhenwindkraft ist hier generell die Windkraft gemeint, die in größeren Höhen auftritt. Sie ist das essentielle Merkmal der AWE-Technologie. Durch die verschiedenen Systemvarianten soll diese Windkraft „geerntet“ werden. Hierbei spielt sowohl der Energiegehalt als auch die globale Verfügbarkeit der Höhenwindkraft eine Rolle.

Verfügbarkeit der Höhenwindkraft:

Die Technologie der Windenergienutzung mit Flugdrachen und die Nutzung der Kites als Antriebshilfe liegen einem gemeinsamen Prinzip zu Grunde:

Sie fliegen in großen Höhen und nutzen dadurch den dort vorherrschenden stetigeren und stärkeren Wind.

„Es gibt in großen Höhen genug Windenergie um das Hundertfache des Energiebedarfs der gesamten menschlichen Zivilisation zu erzeugen“ (Roberts u.a. 2007, S.2).

Archer und Caldeira haben durch die Auswertung von Winddaten des „Department of Energy“ (DOE)⁴ und des „National Centers for Environmental Prediction“ (NCEP)⁵ einen Atlas erstellt, der die globale Verfügbarkeit der Höhenwindkraft aufzeigt. Die von 1979 bis zum Jahr 2006 ausgewerteten Daten zeigen die weltweite Verfügbarkeit der Windenergie in Höhen zwischen 500 m und 12.000 m über der Erde (Archer/Caldeira 2009, S.307).

Hierdurch konnte bewiesen werden, dass in großen Höhen eine enorme Menge an Windenergie vorhanden ist (Breukels 2010, S.16).

Archer und Caldeira haben in Bezug auf die ausgewerteten Daten auch die optimale Höhe mit der dort herrschenden optimalen Windenergiedichte kalkuliert. Die Idee hierbei war, dass der stärkste Wind nicht unbedingt nur in den größten Höhen weht (Archer/Caldeira 2008, S.88).

In Abbildung 7e auf der nächsten Seite lässt sich erkennen, dass in 95 % der Zeit die weltweite Energiedichte des Windes größer als $0,2 \text{ kW/m}^2$ ist. Die optimale Höhe liegt unter 6.000 m. Dies bedeutet, dass die verfügbare Windenergiedichte in diesen Höhen größer ist, als die mittlere Windenergiedichte, die beispielsweise von Offshore-Anlagen in Bodennähe genutzt wird (vgl. Archer/Caldeira 2009, S.313).

⁴ Energieministerium der USA

⁵ Nationale Zentren zur Umweltvorhersage der USA

Sie führen hierzu aus:

„Flächen mit der größten, mittleren, optimalen Energiedichte sind auch, im Allgemeinen, diejenigen mit dem zuverlässigsten Wind, da die hohe Energiedichte in 95 % der Zeit erwartet werden kann. Zum Beispiel hat die Fläche östlich von Asien in der Nähe von Japan mit der optimalen Energiedichte von $>10 \text{ kW/m}^2$ in 95 % der Zeit eine Windenergiedichte von 1 kW/m^2 [Abbildung 7e] und das undenkbar nah am Boden [...]. Die optimalen Höhen liegen jedoch generell hoch, oberhalb von 6 km in 95 % der Zeit [Abbildung 7f]“ (Archer/Caldeira 2009, S.313).

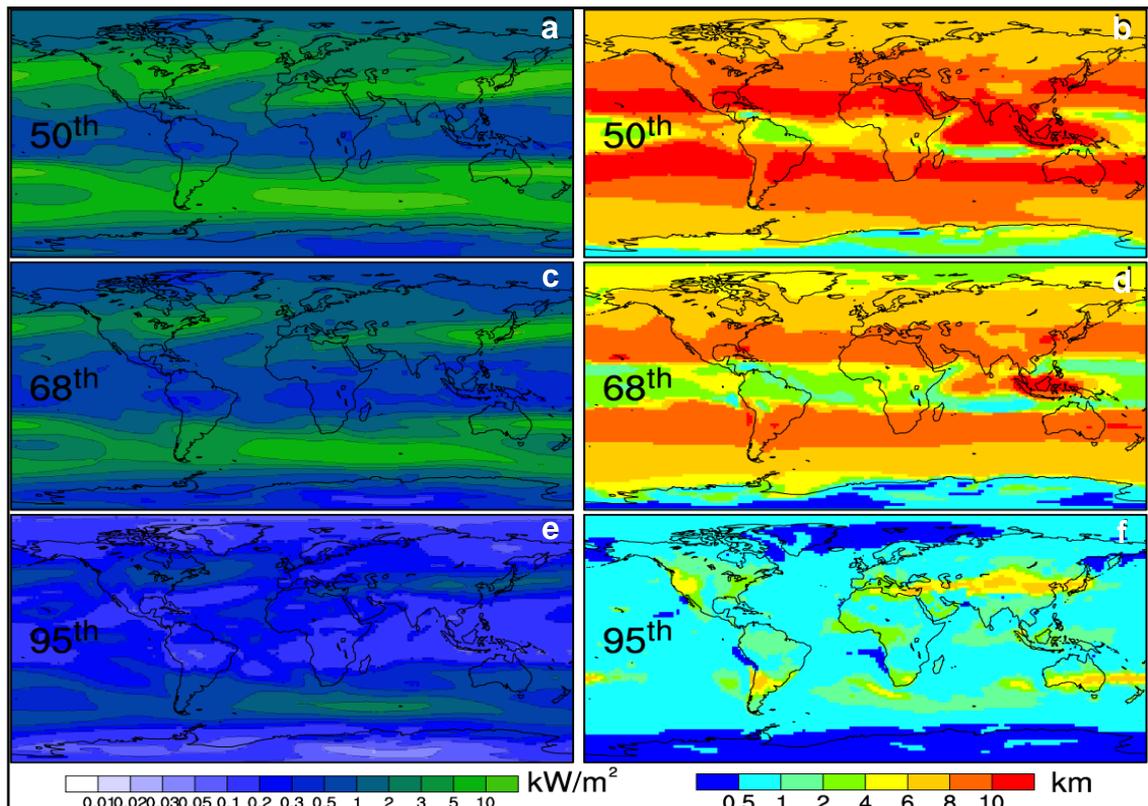


Abbildung 7: Optimale Windenergiedichte (in kW/m^2 , links) und optimale Höhe (in km, rechts) die in 50 %, 68 % und 95 % der Zeit während den Jahren 1979-2006 überschritten wurden (Archer/Caldeira 2009, S.313).

Welche Höhe in Zukunft die richtige ist, hängt auch von der Art des Systems ab. Ob einige Techniken wirklich später in der Jetstream⁶-Höhe von zehn bis zwölf Kilometern operieren, ist gegenwärtig noch Teil der Forschung und zudem stark von der Bauweise des Systems abhängig. Sinnvoll wären diese großen Höhen eventuell für Flugwindkraftwerke, die über windgetriebene Rotoren den Generator in der Luft antreiben.

⁶ „Ein Jetstream [...] ist ein schmales Starkwindband im Bereich der oberen Troposphäre bis zur Stratosphäre. Jetstreams bilden sich infolge globaler Ausgleichbewegungen zwischen verschiedenen Temperaturregionen bzw. Hoch- und Tiefdruckgebieten [...]“ (Jetstream 2011). Ein Jetstream entsteht im Wesentlichen aufgrund von zwei Kräften: „Die Druckgradientkraft verursacht Luftbewegungen vom hohen zum niedrigen Druck. Je geringer der Abstand zwischen den [...] Flächen gleichen Drucks ist, desto grösser ist die Gradientkraft. Die Corioliskraft entsteht durch die ablenkende Kraft der Erdrotation“ (RAOnline).

Andere Systeme welche durch gezielte Flugmanöver, wie das „Quer zum Wind Fliegen“ in Kreisform oder in Form einer Acht die Geschwindigkeit des Kites oder des Tragflügels erhöhen, können auch in geringeren Höhen von 500 bis 1.000 m verwendet werden.

„Zurzeit bewegen sich alle [Prototypen, B.O.] in einem Bereich unter einem Kilometer, da das für das Testen einfacher ist“ (Schmehl 2011a). Insgesamt wird durch diese Ausführungen das gesamte Energiepotential der Höhenwindkraft deutlich. „Man hat unendlich viel Energie da oben, die einfach vorbeirast. Man kann sie benutzen [...]. Also haben wir kein Energieproblem, wir müssen es einfach nur schlauer tun“ (3sat 2010).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Prinzipien und Ansätze vorgestellt, mit denen versucht wird, diese Energie nutzbar zu machen und effektivere Erträge zu erzielen.

4 Prinzipien der Stromerzeugung durch Höhenwindkraft

Die Technik der Stromerzeugung ist bei den einzelnen Ansätzen unterschiedlich. Hierbei wird unterschieden, an welcher Position des Systems sich der Generator zur Umwandlung der Energie in elektrischen Strom befindet. Sie lassen sich in zwei grundlegende Systeme klassifizieren:

Zum einen gibt es Systeme, bei denen der Stromgenerator direkt an dem Gerät angebracht ist und der erzeugte Strom über ein Kabel direkt zum Boden geleitet wird. Zum anderen werden aber auch Prototypen getestet, bei denen sich der Generator in einer Bodenstation befindet (vgl. Schmehl 2011b).

Bei diesen Systemen wird die durch den Wind erzeugte mechanische Energie zum Boden geleitet und dann in elektrische Energie umgewandelt (Archer/Caldeira 2009, S.308).

4.1 Stromerzeugung in der Luft

AWE-Systeme, welche die Windenergie direkt in der Luft in elektrischen Strom umwandeln, weisen zwei grundsätzliche Systemkomponenten auf.

Wie bereits angemerkt, werden bei dieser Art der Stromerzeugung die Generatoren in der Luft mitgeführt. Bei den Konstruktionen sind Rotoren, die entweder durch den Wind (Sky Windpower) oder durch die kreisförmige Flugbewegung des Tragflügels (Makani Power) angetrieben werden, an einen Generator angeschlossen. Ein weiteres Merkmal ist hierbei, dass der erzeugte Strom über ein in das Halteseil eingearbeitetes Stromkabel zum Boden geleitet wird.

Aufgrund der direkt mitgeführten Stromgeneratoren und des elektrisch leitenden Halteseils haben diese Systeme dementsprechend besondere Anforderungen bezüglich des Gewichts und der Leistungsdichte der Generatoren (vgl. Schmehl 2011b).

Ein Nachteil ist daher, dass diese Konstruktionen schwerer sind. Außerdem sei angemerkt, dass angesichts der großen Höhen in denen die Systeme operieren, die Halteseile bei einem Gewitter anfällig für Blitzeinschläge sein könnten (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

Ein wesentlicher Vorteil dieser Konstruktionen besteht allerdings darin, dass der Start und Landevorgang auch bei am Boden herrschender Windstille erfolgen kann. Der Generator wird hierbei als Motor genutzt und sorgt dafür, dass das System, ähnlich wie ein Hubschrauber, gestartet und auch sicher gelandet werden kann. Aufgrund dieser Gesichtspunkte ist eine Automatisierung des Start- und Landevorgangs leichter zu realisieren (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

4.2 Stromerzeugung am Boden

Eine andere Technik der Stromerzeugung durch Höhenwindkraft verfolgen die AWE-Systeme, die durch einen sich am Boden befindlichen Generator die Windkraft in elektrischen Strom umwandeln.

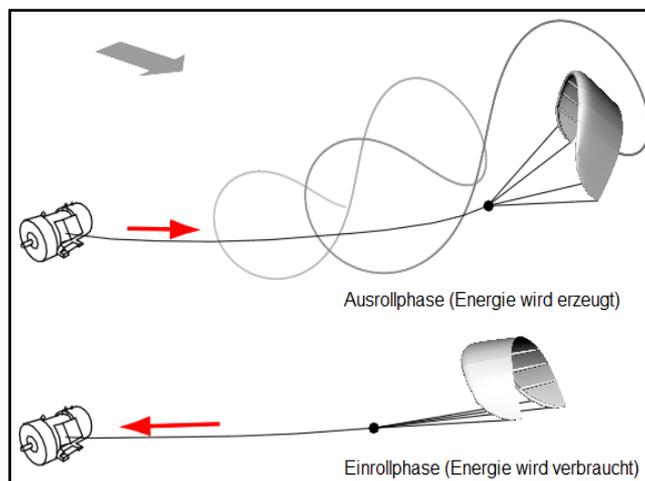


Abbildung 8: Pumpzyklus (vgl. Schmehl 2011b)

Die Idee dieser Konzepte ist es, wie in Abbildung 8 dargestellt, nach dem JoJo-Prinzip einen periodischen Pumpzyklus zur Energieübertragung zu nutzen. Hierbei ist der Generator am Boden positioniert und mit einer Winde verbunden. Die Leine, die auf der Winde aufgewickelt und mit dem Flugdrachen verbunden ist, wird periodisch aus- und wieder eingerollt. Durch die

Leinenzugkraft beim ausrollen kann im Generator elektrischer Strom erzeugt werden (vgl. Diehl/Houska 2009, S.527).

Wird die Leinenzugkraft mit der Ausrollgeschwindigkeit multipliziert, ergibt sich dabei die mechanische Leistung, welche dann im Generator umgesetzt wird (Schmehl 2011a).

Nachteilig bei diesen Systemen ist allerdings, dass die Stromerzeugung während der Einrollphase zeitweise unterbrochen ist und sogar Strom verbraucht wird (vgl. Schmehl 2011b). Des Weiteren ist die Automatisierung des Start- und Landevorgangs der Flugdrachen schwerer zu realisieren (vgl. Awec 2011).

Dagegen befinden sich die schweren und für die Stromgenerierung benötigten elektrischen Bauteile komplett in der Bodenstation. Aufgrund dessen haben die Flugdrachen ein geringeres Gewicht. Hierdurch zeichnet sich eine höhere Mobilität ab. Darüber sei angemerkt, dass, bis auf die Kontrollgondel, alle in der Luft fliegenden Bauteile aus flexiblen, weichen Materialien bestehen (vgl. Schmehl 2011a).

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht weiterer Vor- und Nachteile bezüglich der Position des Generators bei der AWE-Technologie (vgl. MacCleery 2010, S.16).

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Position des Generators

Generator am Boden	Generator an Bord
Vorteile	Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> - Kostengünstigeres Kabelseil - Stromübertragung nicht nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - Automatisches Anfahren; strombetriebene Turbinen für vertikales Abheben
<ul style="list-style-type: none"> - Kostengünstigerer am Boden befindlicher Generator; Größe und Gewicht variabel 	<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuierliche Stromerzeugung; regelmäßiges Ein- und Ausfahren nicht nötig
<ul style="list-style-type: none"> - Einfacher kostengünstigerer Flugdrachen - Steuerung vom Boden aus möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringer Platzbedarf in der Luft durch feste bzw. kreisförmige Flugbahn
Nachteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Unterbrochene Stromerzeugung 	<ul style="list-style-type: none"> - Kostenintensiveres Verankerungsseil, muss Strom übertragen
<ul style="list-style-type: none"> - Größerer Platzbedarf in der Luft 	<ul style="list-style-type: none"> - Kostenintensivere Generatoren; geringes Gewicht und hohe Leistungsdichte notwendig
<ul style="list-style-type: none"> - Automatisches Ausfahren bei geringem Windaufkommen nur mit Hilfsmitteln möglich (z.B. mit einer Winde wie bei Segelflugzeugen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tragfläche komplizierter; besteht aus Generatoren, Steuerung und Flugsteuerungssystemen

5 Prinzipielle Ansätze der AWE-Technologie

Es gibt viele unterschiedliche Ansätze der Energienutzung durch AWE. Zum einen werden Prototypen auf der Idee entwickelt, AWE zur Stromerzeugung zu nutzen. Die Forschungskonzepte, die von verschiedenen Firmen und universitären Instituten verfolgt werden, sind breitgefächert. Der gesamte Bereich befindet sich noch in der Entwicklungs- und Testphase.

Sie alle beruhen auf Basis der Idee, nach dem „ein abhebender Flugkörper am Boden angebunden ist“ (vgl. Breukels 2010, S.16). Zum anderen gibt es die Idee, AWE durch Kites als Antriebshilfe in der Hochseeschifffahrt zu nutzen. Dieser Ansatz wird, im Gegensatz zu den Stromerzeugungstechniken, auch schon in der Praxis angewendet.

Man kann diese Ansätze in Flugwindkraftwerke, Pumping-Kite-Systeme, Tragflügel-Systeme, Leichter-als-Luft-Systeme und in Kites als Antriebshilfe klassifizieren. Die Kriterien für die Auswahl der hier aufgeführten Firmen bzw. Forschungsinstitute werden im Folgenden kurz erläutert:

Sky Windpower wurde ausgewählt, da sie zum einen in der Entwicklung der Flugwindkraftwerke sehr weit fortgeschritten sind. Zum anderen haben sie als eine der wenigen Firmen das Ziel, mit ihrem System in Jetstream-Höhe zu operieren.

Aufgrund eines persönlichen Interviews in Delft, sowie der Teilnahme an einem Testflug des Prototypen, wird für die Ansätze der Pumping-Kite-Systeme hier der Laddermill-Prototyp der Technischen Universität exemplarisch dargestellt.

Für den Ansatz der Stromerzeugung durch Tragflügel-Systeme hat die Firma Makani Power einen vielversprechenden Prototypen entwickelt. Zudem haben sie in diesem Bereich eine absolute Vorreiterrolle eingenommen. Demnach wird dieser Prototyp für den Bereich der Tragflügel-Systeme beschrieben.

Die Firma Magenn Power steht mit ihrem Prototypen für die Leichter-als-Luft-Systeme. Ausschlaggebend für die Wahl war hierbei, dass laut eigenen Angaben der Firma, die ersten Exemplare schon in diesem Jahr auf dem Markt erhältlich sein werden.

SkySails ist im Bereich der Nutzung von Kites als Antriebshilfe für die Schifffahrt weltweit Marktführer. Demzufolge wird dieser Ansatz der Energienutzung durch AWE vorgestellt. Die genannten Ansätze werden anknüpfend dargestellt.

5.1 Flugwindkraftwerke [Sky Windpower]⁷

Das kalifornische Unternehmen Sky Windpower arbeitet an der Entwicklung von „Flying Electric Generators“ (FEGs). Diese Fluggeräte sind durch ein einzelnes Halteseil mit dem Boden verbunden und sollen die starken Winde des Jetstreams in einer Höhe von vier bis zehn Kilometern zur Stromerzeugung nutzen.

Die derzeit geplante Variante besteht aus vier identischen Rotoren, welche an einem H-förmigen Metallgestell angebracht sind. Diese Rotoren werden durch den vorherrschenden Wind in Rotation versetzt, und Generatoren wandeln diese dann in elektrischen Strom um.

Der generierte Strom wird dann durch ein in das Halteseil integriertes Stromkabel zum Boden geleitet.

Beschreibung des Prototypen:

Sky Windpower hat die Konstruktion eines Vier-Rotoren 240 kW Prototypen abgeschlossen. Die grundlegenden Systemkomponenten werden im Folgenden beschrieben.

Der Prototyp (s. Abbildung 9) ist mit vier Zweiblatt-Rotoren ausgestattet. Diese haben einen Durchmesser von 10,7 m und sind auf einem widerstandsarmen H-Gestell aus einem Faserverbundstoff angebracht. Vorne und hinten befinden sich jeweils zwei Rotoren.

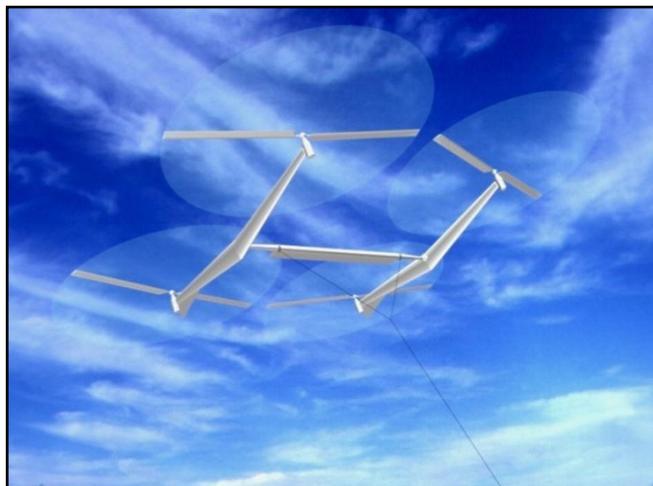


Abbildung 9: Darstellung des Vier-Rotoren-Prototypen (Sky Windpower)

Die nebeneinander liegenden Rotoren drehen sich in unterschiedliche, die diagonal gegenüber liegenden Rotoren in gleiche Richtungen.

Die Rotoren sind mit vier separaten Getriebegehäusen verbunden. Diese treiben vier in Reihe geschaltete Motor/Generator-Einheiten an. Zusätzlich sind diese Geräte elektrisch miteinander verbunden. Hierdurch soll sichergestellt

⁷ Diese Darstellung beruht auf den Ausführungen im Artikel von Roberts u.a. (2007): Harnessing High Altitude Wind Power.

werden, dass die Geschwindigkeit der Rotoren nicht variiert. Typische Laufgeschwindigkeiten liegen hier bei 24.000 Umdrehungen pro Minute. Die Rotoren können gleichzeitig Auftrieb und Elektrizität erzeugen. Für den Auftrieb werden die Generatoren dann als Motoren genutzt. Hierbei werden sie vom Boden aus mit Strom versorgt. Somit kann der Prototyp im Prinzip wie ein angebundener Hubschrauber auf- und abgeflogen werden.

Das elektromechanische Kabelleil verbindet das Fluggerät mit dem Boden. Es ist so konzipiert worden, dass eine Leistung von 240 kW bei einer Übertragungsspannung von 15 kV transferiert werden kann. In dem Seil befinden sich zwei isolierte Aluminiumleitungen, die in einem hochfesten Vectran-Faserverbund eingebettet sind. Das spezifische Gewicht des Kabelleils liegt bei 115 kg/km und es hat einen Durchmesser von 10 mm. Je nach Flughöhe liegen die elektrischen Verluste bei der Übertragung des Stroms vom Kabelleil zum Boden voraussichtlich bei 20 %.

Die Nennleistung des Prototypen wurde für eine Windgeschwindigkeit von 18,4 m/s entwickelt. Der Energieverbrauch im Betrieb bei Windstille beträgt voraussichtlich 75 kW. Die Drehgeschwindigkeit der Rotoren liegt hierbei in einem Bereich von 130 - 300 Umdrehungen pro Minute. Der Prototyp ist so konstruiert worden, dass er Windgeschwindigkeiten bis zu 35 m/s bei einer Höhe von 4.600 m standhalten kann. Das Gesamtgewicht des Prototypen wird auf 520 kg geschätzt.

In Zukunft könnten industriell angelegte Anlagen durch die Verwendung einzelner FEGs mit einer Nennleistung von zirka 30 MW realisiert werden. Hierdurch könnten ganze Windparks entstehen. Diese hätten dann einen etwa dreimal so hohen Kapazitätsfaktor im Vergleich zu konventionellen Windparks.

5.2 Pumping-Kite-Systeme [TU Delft]⁸

Das technische Prinzip, dem das Pumping-Kite-System zugrunde liegt, beruht auf der Funktionsweise eines JoJo's. Wie bereits erläutert, ist hierbei ein einzelner Kite an einem Halteseil befestigt und steigt durch schnelles Quer-zum-Wind fliegen in die Luft. Der Kite fliegt sogenannte „Figure-of-eight“-Manöver. Durch ein solches Flugmanöver wird die Fluggeschwindigkeit am Kite erzeugt. Diese hängt somit nicht nur von der vorherrschenden Wind-

⁸ Sofern nicht anders angegeben, beruht diese Darstellung auf den Ausführungen des Interviews mit Dr.-Ing. Roland Schmehl, Leiter der Laddermill Forschungsgruppe TU Delft.

geschwindigkeit ab. Hieraus folgt ein sehr starker Effekt zur Kraftmultiplizierung, der durch die folgende Ausführung von Diehl und Houska erläutert wird.

„Die Ursache dafür ist, dass die Zugkraft des Tragflügels F_L , mit dem Quadrat der Geschwindigkeit v steigt:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L v^2 \quad (2)$$

mit ρ der Luftdichte, A der Flügeloberfläche und C_L dem Auftriebsbeiwert. Fliegt man also einen Drachen an einer Leine in Querrichtung z.B. 10 mal schneller als den Wind, steigt die Leinenspannung um den Faktor 100 an, verglichen mit dem gleichen Drachen, wenn er in Ruhe hoch oben am Himmel schwebt“ (Diehl/Houska 2009, S.525f).

Durch die Zugkraft wird das Halteseil, das mit einer Winde verbunden ist, ausgerollt. Wie oben bereits dargestellt, ergibt die Kabelkraft multipliziert mit der Ausrollgeschwindigkeit die erzeugte Leistung. Da die Winde mit einem Generator verbunden ist, kann dieser die Energie in elektrischen Strom umsetzen. Sobald das Kabel ganz ausgerollt bzw. der Kite seinen Hochpunkt erreicht hat, wird er im Wind angestellt und gelangt so in einen Gleitmodus. In dieser Phase ist die Kraft auf dem Kabel sehr gering und man versucht den Kite möglichst schnell einzuholen.

Wird die Kabelkraft mit der Einrollgeschwindigkeit multipliziert, ergibt sich dabei nun die Leistung, die vom Motor aufgebracht werden muss. In dem System wird demzufolge einmal Energie produziert und einmal muss Energie investiert werden.

Berechnungen haben ergeben, dass die Ausrollgeschwindigkeit des Halteseils zirka 1/3 der Windgeschwindigkeit betragen sollte, so dass der Kite noch mit 2/3 der Windgeschwindigkeit angetrieben werden kann. Da während der Einrollphase weiterhin eine Zugkraft auf das Halteseil wirkt, sollte dieser Vorgang auch leicht unterhalb von 1/3 der Windgeschwindigkeit liegen (vgl. Diehl/Houska 2009, S.527f).

Mit dem gegenwärtig in Delft verwendeten Kite konnten die vorherrschenden Zugkräfte im Kabel bei einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s von 320 kgf⁹ während der Ausrollphase auf 60 kgf in der Einrollphase verringert werden (vgl. Schmehl 2011b).

⁹ kilogram-force, physikalische Einheit für die Kraft. Dies entspricht einer Kraft, die hier eine Masse von 320 bzw. 60 kg hervorruft.

Beschreibung des Prototypen:

Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung des derzeit für die Testflüge verwendeten Prototypen. Dieser besteht aus folgenden Systemkomponenten:

Der aufblasbare Flugdrachen besteht aus flexiblen Nylonmaterialien und hat eine Größe von 25 m². Momentan wird das System in Höhen von 150 - 300 m eingesetzt. An dem Kite

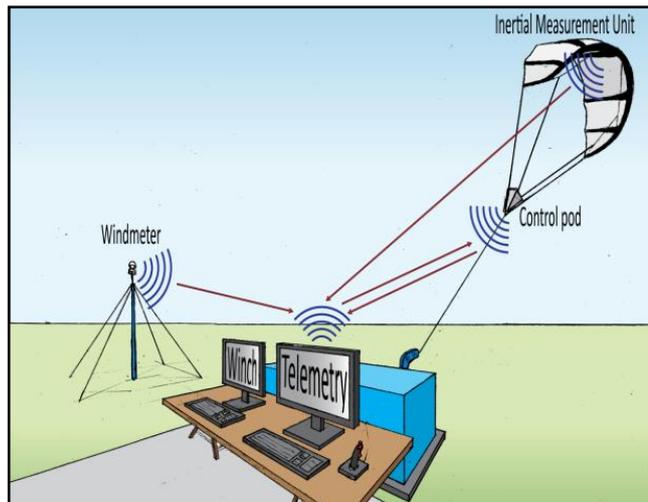


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Laddermill (Schmehl 2011b)

befinden sich vier Leinen. Zwei Power-Leinen sind am vorderen Teil des Kites befestigt, zwei Steuer-Leinen befinden sich am hinteren Teil. Der Kite ist über diese vier Leinen mit einer Kontrollgondel verbunden. In der Kontrollgondel befinden sich zwei Motorwinden, die für die Steuerung des Kites notwendig sind. Dies geschieht durch gezieltes ziehen an den Steuer-Leinen. Von der Kontrollgondel geht das für die Kraftübertragung notwendige Hauptkabel aus Dyneema® zur Bodenstation, wo es auf einer Winde aufgewickelt ist.

Für die Kontroll- und Steuerungsprozesse des Flugdrachens befinden sich ein Windenoperator und ein Kiteoperator an der Bodenstation. Beide haben einen eigenen Computer und einen eigenen Joystick, die zum steuern dieser zwei Geräte verwendet werden.

Der erzeugte Strom wird über den Generator, der auch als Motor genutzt wird, in eine Batterie gespeist. Dieser gespeicherte Strom wird wiederum für die Einrollphase des Kites verwendet. Dies bedeutet, dass die Energiekette im Grunde genommen zweimal durchlaufen wird. Einmal vom Generator zur Batterie, anschließend für die Einrollphase von der Batterie zum Motor und wieder zum Generator zurück. An der Batterie und am Generator treten elektrische sowie mechanische Verluste auf. Da die Kette zweimal durchlaufen wird, werden diese Verluste auch doppelt so hoch. Dieses ist momentan noch eine der Schlüsselschwierigkeiten der pumpenden Systeme.

Abbildung 11 zeigt die erzeugte mechanische Leistung als Produkt der am Boden herrschenden Kabelkraft und der Rollgeschwindigkeit in fünf aufeinanderfolgenden Pumpzyklen (vgl. Schmehl 2011b).

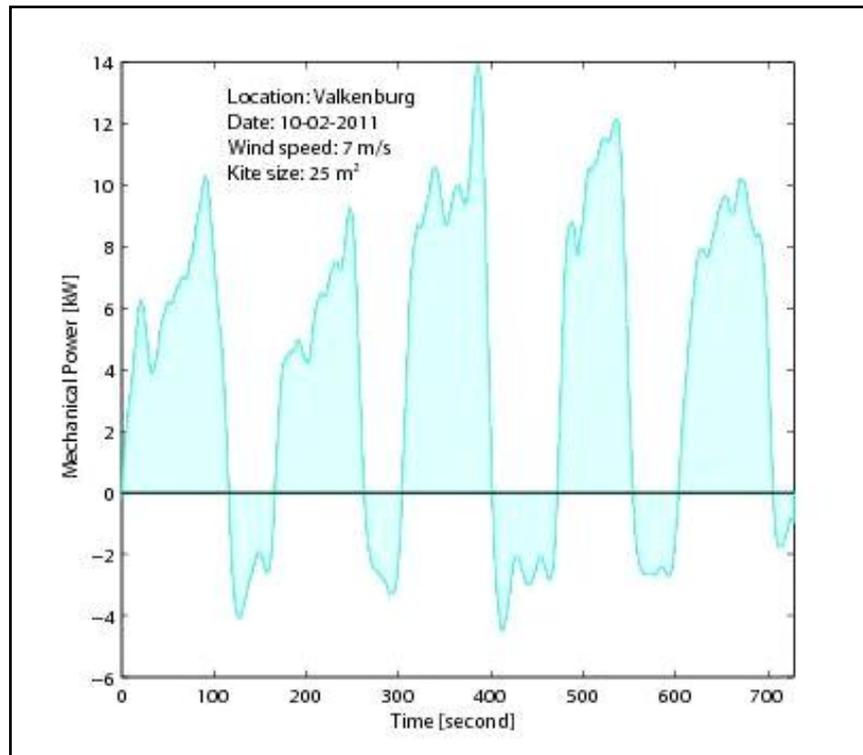


Abbildung 11: Mechanische Leistung (Schmehl 2011b)

Es lässt sich erkennen, dass ungefähr viermal mehr Energie erzeugt als verbraucht wird.

Momentan befindet sich der 20 kW Prototyp in der Testphase. Das System wird noch manuell betrieben. Die Automatisierung der Steuerung des Kites in eine stabile Parkposition wird derzeit getestet. Dies bedeutet, dass der Kite in die Zenitposition geht und dort von einem Autopiloten gehalten wird, indem er ständig steuert. Hierbei wird der Rollwinkel des Kites gemessen. Sobald dieser in eine Richtung abfällt, gibt der Autopilot ein Steuersignal in die Gegenrichtung. Ziel ist es, bis Ende 2011 / Anfang 2012 ein System mit 30 - 40 kW mit einer Kitegröße von 50 m² in Betrieb zu nehmen.

5.3 Tragflügel-Systeme [Makani Power]¹⁰

Die Airborne Wind Turbine (AWT) des amerikanischen Unternehmens Makani Power arbeitet nach demselben aerodynamischen Prinzip wie eine konventionelle Windkraftanlage.

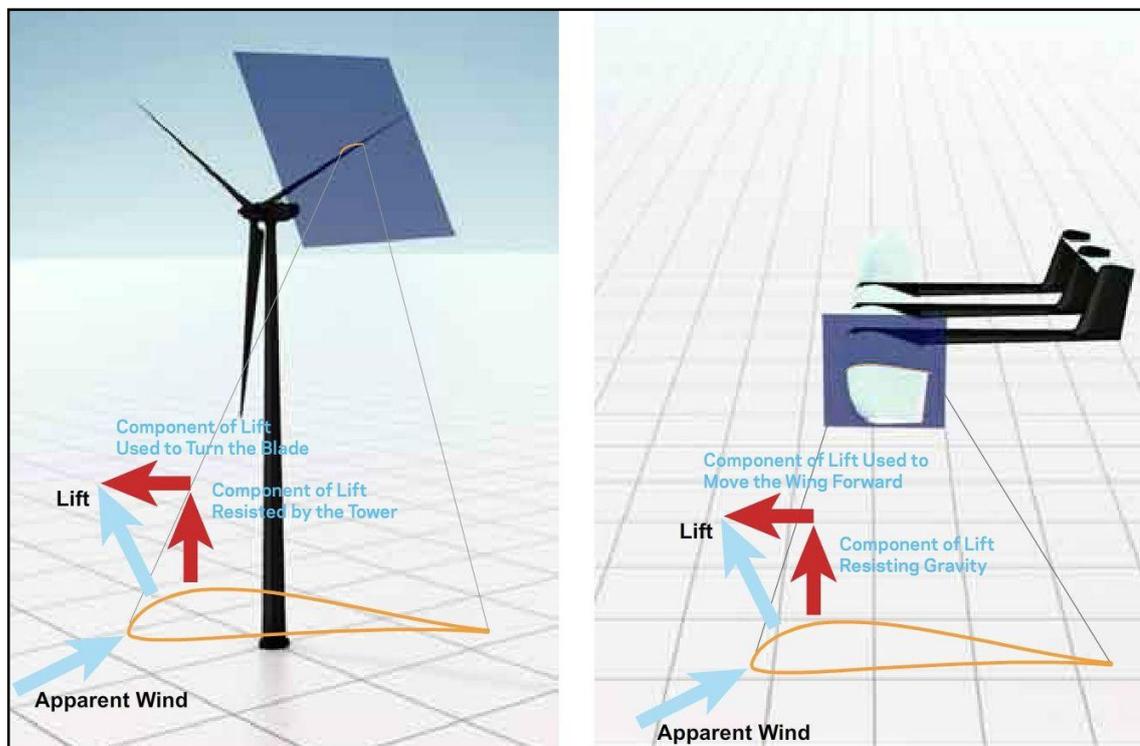


Abbildung 12: Aerodynamisches Prinzip der AWT (Makani Power)

Die Flügel einer WKA werden durch den Wind in Drehung versetzt. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, kann die hierdurch erzeugte Auftriebskraft in zwei Kraftkomponenten aufgeteilt werden. Zum einen die Kraft, die für die Drehbewegung der Rotorblätter verantwortlich ist. Zum anderen wird eine Zugkraft erzeugt, welche bei konventionellen WKA durch den Turm aufgenommen wird.

Auf die gleiche Weise wird bei dem Tragflügel von Makani Power Auftrieb erzeugt. Dieser Auftrieb hält den Tragflügel in der Luft und erzeugt zugleich die Vorwärtsbewegung. Der Tragflügel ist über ein Halteseil mit dem Boden verbunden. Um nun die Windenergie nutzbar zu machen, navigiert die Bordelektronik den Tragflügel in kreisförmigen Flugbewegungen, wodurch die Bewegung der Rotorblattspitzen einer konventionellen WKA simuliert wird (s. Abbildung 13).

¹⁰ Die folgende Darstellung, sofern nicht anders angegeben, beruht auf den Angaben der Internetpräsenz von Makani Power.

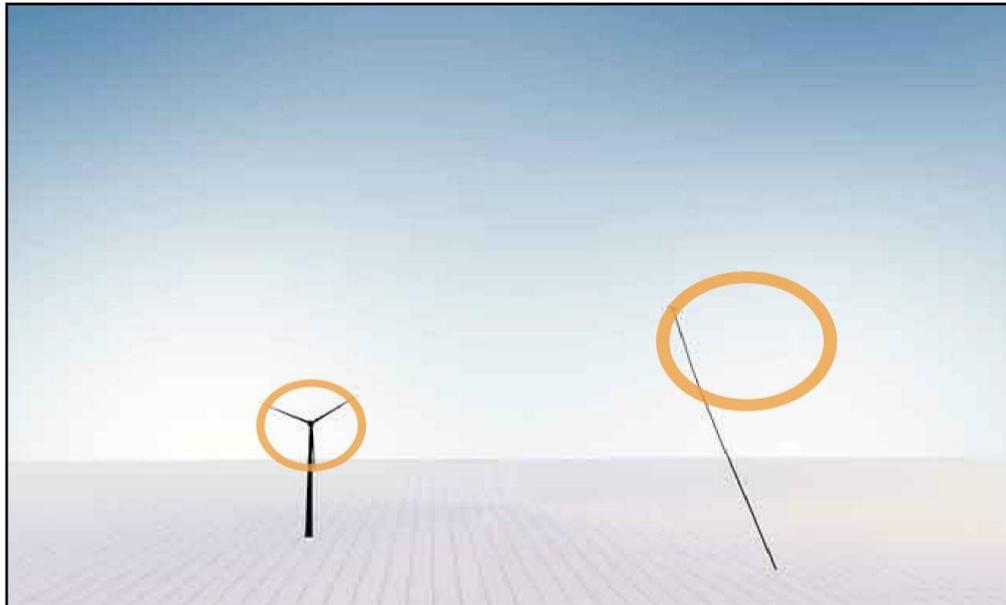


Abbildung 13: Vergleich WKA und AWT (Makani Power)

Wie bereits dargelegt, sind die Spitzen der Rotorblätter der effektivste Teil einer WKA. Die äußersten 25 % der Rotorblätter sind für 75 % der generierten Energie verantwortlich. Der Tragflügel nutzt genau diesen Vorteil, allerdings bei einem weitaus geringeren Materialaufwand. Es wird hierbei nur ein Bruchteil des Materials, das für die Errichtung einer WKA benötigt wird, verwendet.

Beschreibung des Prototypen:

An dem in Abbildung 14 dargestellten Tragflügel sind drei Rotoren angebracht. Diese rotieren durch die kreisförmige Flugbewegung und treiben dadurch die an Bord befindlichen Hochgeschwindigkeitsgeneratoren an. Die Generatoren wandeln die Energie in elektrischen Strom um. Die Elektrizität wird nun über ein in das Halteseil integriertes Stromkabel zur Erde geleitet.

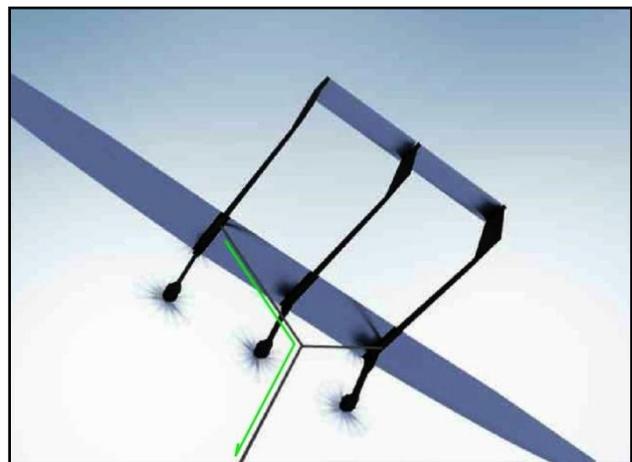


Abbildung 14: Darstellung der AWT (Makani Power)

Makani Power arbeitet zurzeit an der Entwicklung des inzwischen siebten Prototypen. Der „Makani Wing 7“ besteht aus einem Carbon-Faser-Flügel mit einer Spannweite von acht Metern. Die Fertigung des Prototypen ist abgeschlossen, und die Testphase hat begonnen.

Hauptaugenmerk der Testflüge ist es, den Übergang von der Flugbahn des Tragflügels in den eigenständigen Schwebeflug zu automatisieren.

Im September 2010 konnte das Entwicklerteam mit dem sechsten Prototypen die ersten Flugübergänge, zum einen vom Schwebeflug in den Crosswind Flug und zum anderen den Übergang vom Crosswindflug in den Schwebeflug, demonstrieren. Aufgrund dieser Testresultate konnte bewiesen werden, dass es möglich ist, dieses schwierige Manöver zu fliegen.

Mit dem „Makani Wing 7“ konnten während eines Testflugs bereits zwei einminütige Schwebeflüge während eines über zehn Minuten andauernden Flugmanövers erreicht werden.

Ziel des Unternehmens ist es, in naher Zukunft einen Tragflügel mit einer Leistung von einem Megawatt zu betreiben. Die vollautomatische Version befindet sich dann auf einer Bodenstation. Sobald der Wind in einer Höhe von 200 m auf eine Geschwindigkeit von 3,5 m/s ansteigt, positioniert die Station den Tragflügel für den Startvorgang. Um den Tragflügel, zu starten wird dieser vom Boden aus mit Druckluft angeströmt. Sobald der natürliche Wind genug Auftrieb erzeugt, steigt der Tragflügel auf die gewünschte Flughöhe (vgl. Heuer 2010). Zusätzlich können die Rotoren als Propeller genutzt werden, um den Tragflügel vom Boden abheben zu lassen. In 300 - 500 m Höhe fliegt der Tragflügel kreisförmige Bahnen. Durch das Abbremsen des Tragflügels durch die Rotoren wird Strom generiert. Dieser wird durch das Halteseil zur Bodenstation geleitet und von dort in das Stromnetz eingespeist. Der Landevorgang läuft in zwei Schritten ab: Zunächst wird der Tragflügel in einen Schwebeflug geleitet. Sobald sich der Tragflügel im Schwebeflug befindet, wird er mit einer Winde zurück zur Bodenstation gezogen.

5.4 Leichter-als-Luft-Systeme [Magenn Power]¹¹

Das Magenn-Air-Rotor-System (MARS) des kanadischen Unternehmens Magenn Power besteht aus einer mit Heliumgas gefüllten Ballontrommel, die sich um die eigene Achse dreht. Durch diese Rotation werden zwei an den Außenseiten befindliche Generatoren angetrieben, die die Rotationsbewegung in elektrischen Strom umwandeln.

¹¹ Die folgende Darstellung beruht auf den Angaben der Internetpräsenz von Magenn Power.

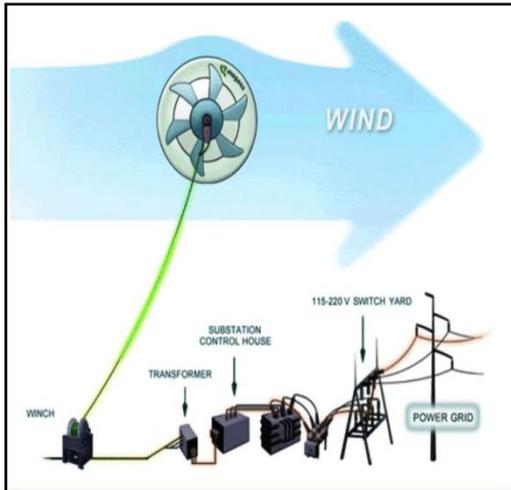


Abbildung 15: Funktionsprinzip des MARS (Magenn Power)

Der Strom wird, dann über ein gleichzeitig zur Verankerung genutztes Kabelseil zur Bodenstation geleitet. Hier wird der erzeugte Strom in einem Transformator umgewandelt und in das Stromnetz eingespeist (s. Abbildung 15). Das MARS wird als ein Leichter-als-Luft-System beschrieben, das in Höhen von bis zu 300 m operiert. Durch das Helium steigt die Ballontrommel in die Luft. Zusätzlich wird aufgrund der Rotationsbewegung der Ballontrommel eine Auftriebskraft erzeugt. Dieser Auftrieb beruht auf dem Magnus-Effekt.¹² Die Kombination dieser zwei Auftriebskräfte wird zusätzlich genutzt, um das gesamte System stabil zu halten. Da der Magnus-Effekt mit steigender Windgeschwindigkeit zunimmt, wird eine vertikale Schiefelage der Ballontrommel vermieden. Diese wird aus leichten, aber gleichzeitig widerstandsfähigen Materialien gefertigt. Sie hat rippenförmige Schaufeln, in denen sich der vorherrschende Wind fängt. Dadurch wird die Ballontrommel in Rotation versetzt.

Beschreibung des Prototypen

Magenn Power arbeitet gegenwärtig an der Entwicklung einer 100 kW Anlage. Das von Magenn Power vorgesehene System ist in Abbildung 16 zu sehen und wird im Folgenden beschrieben:

Die Größe der Ballontrommel beträgt 13,7 x 30,5 m, und das Gesamtgewicht liegt bei zirka 5.900 kg. Um die Ballontrommel aufzublasen werden zirka 5.700 m³ Helium benötigt. Das System ist mit zwei 100 kW Generatoren

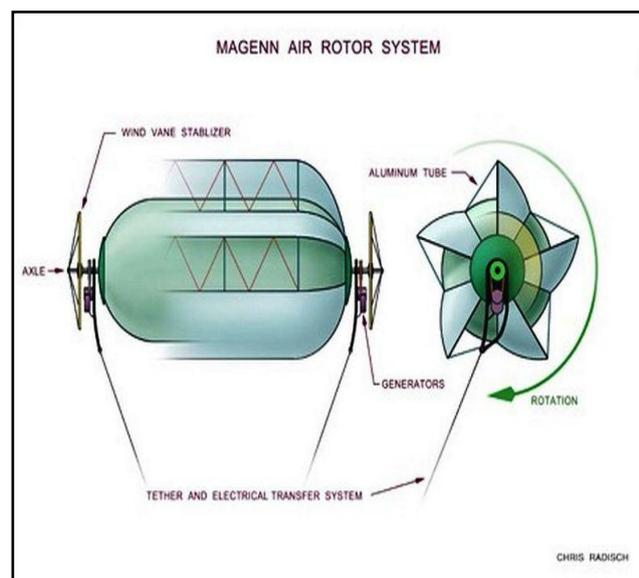


Abbildung 16: Darstellung des MARS (Magenn Power)

¹² Bei dem Magnus-Effekt entsteht eine Kraftwirkung bei rotierenden Objekten. Dadurch werden diese im rechten Winkel zur Anströmrichtung abgelenkt (vgl. Magnus-Effekt 2011).

ausgestattet. Neben der an Bord befindlichen Elektronik wird zusätzlich ein Entlüftungssystem eingebaut für den Fall, dass das Kabelleil reißen sollte. Die Länge des Kabelleils wird mit ungefähr 230 m angegeben. Das Kabelleil ist mit einer Winde verbunden. Zum einen kann somit die Höhe der Ballontrommel geregelt werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit bei schlechten Wetterbedingungen oder extrem starkem Wind das System zurück zum Boden zu ziehen.

Abbildung 17 zeigt die von Magenn Power abgeschätzte Leistungsfähigkeit, die die 100 kW Einheit erreichen könnte. Der obere Graph zeigt die produzierte Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Die beiden unteren Graphen zeigen die jährlich produzierte Leistung für verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten des Windes.

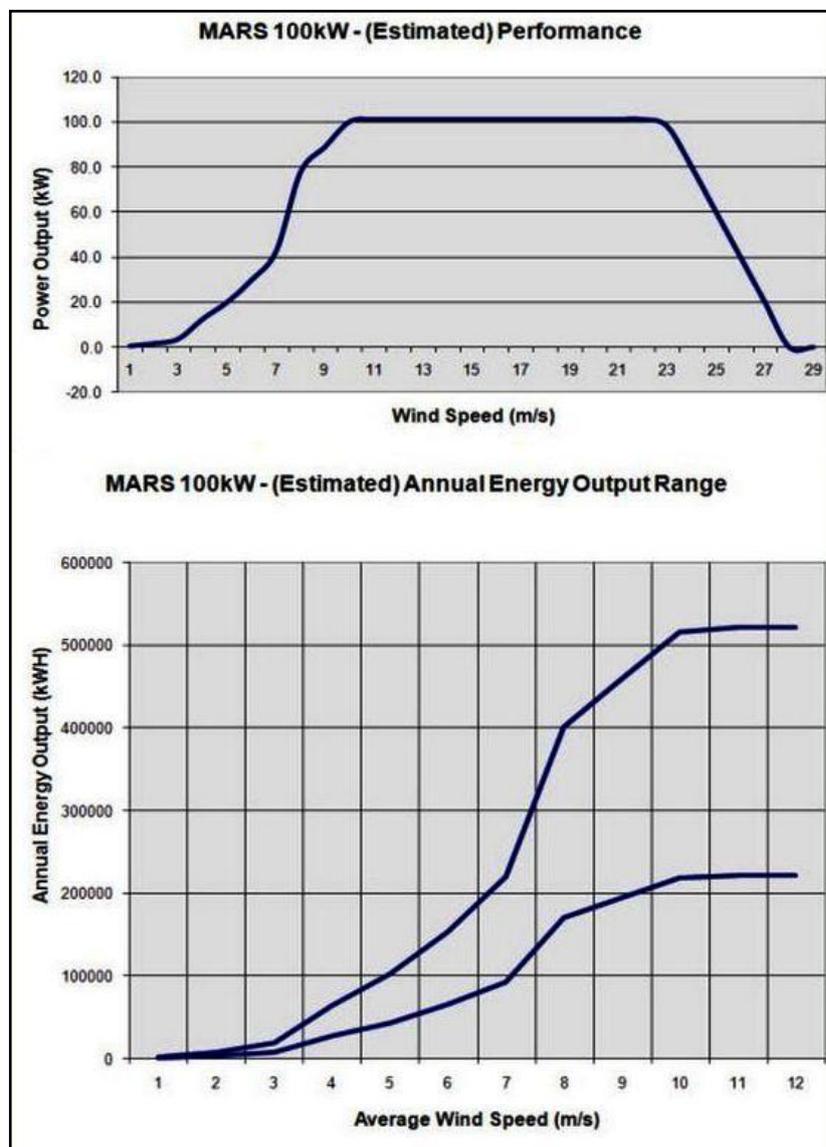


Abbildung 17: Geschätzte Leistungsfähigkeit der MARS 100 kW Einheit (Magenn Power)

5.5 Kites als Antriebshilfe [SkySails]¹³

Das in Hamburg ansässige deutsche Unternehmen SkySails hat ein automatisiertes Zugdrachensystem für die moderne Hochseeschifffahrt entwickelt. Das SkySails-System basiert auf einem Zugdrachen, der mit einem Seil an einem Schiff befestigt ist. Durch gezielte Flugmanöver dient dieser als zusätzliches Antriebssystem, wodurch der Treibstoffverbrauch eines Schiffes gesenkt wird.

Das SkySails-System besteht aus drei Hauptkomponenten:

Einem Zugdrachen mit Seil, einem Start- und Landesystem sowie einem Steuerungssystem für den automatischen Betrieb. In Abbildung 18 ist die Anordnung dieser Systemkomponenten dargestellt. Diese werden im Folgenden beschrieben:

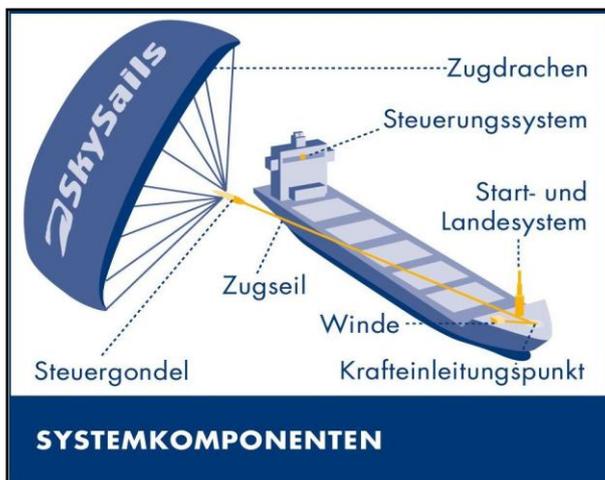


Abbildung 18: Systemkomponenten des SkySails-Systems (SkySails)

Der aus hochfesten und witterungsbeständigen Materialien bestehende Zugdrachen wird in Höhen von 100 - 300 m über dem Meeresspiegel eingesetzt. Dabei fliegt der Zugdrachen Flugmanöver in Form einer Acht. Wie bereits dargelegt, wird hierdurch eine enorme Vortriebskraft erzeugt. Er ist doppelwandig aufgebaut und mit Längskammern und Öffnungen an der Stirnseite ausgestattet. Die zur Zeit von SkySails angebotenen Zugdrachen für Frachtschiffe weisen Flächen von ca. 150 - 600 m² auf. Ein speziell für das SkySails-System entwickeltes hochreißfestes Seil aus Dyneema®-Fasern überträgt die Zugkräfte auf das Schiff. Die Zugkraft wird, über den auf dem Backdeck installierten Krafteinleitungspunkt, in den Vorschiffsbereich eingeleitet.

Das Steuerungssystem des SkySails-Systems arbeitet voll automatisch. Es besteht aus einer Steuergondel sowie einem Control-System. Die Steuergondel befindet sich unter dem Zugdrachen. Sie verkürzt oder verlängert die Steuerleinen rechts oder links. Dadurch wird das aerodynamische Profil des Zugdrachens verändert und damit seine Flugbahn beeinflusst.

¹³ Die folgende Darstellung beruht auf den Angaben der Internetpräsenz von SkySails.

Die Aufgabe des auf dem Schiff installierten Control-Systems besteht darin, die automatische Steuerung des SkySails-Systems zu regeln. Sie ist mit dem Autopiloten eines Flugzeugs vergleichbar. Dazu werden über Sensoren Daten aufgenommen und von einer Autopilot-Software verarbeitet. Im Anschluss sendet die Software die Steuerbefehle an die Aktoren im System, z.B. die der Steuergondel.

Das Start- und Landesystem des SkySails-Antriebs übernimmt das Ausbringen und Einholen des Zugdrachens. Es ist auf dem Vorschiff installiert und besteht aus einem Teleskopmast mit Reffvorrichtung, die den Drachen beim Start- und Landevorgang entrefft und refft.¹⁴ Zum Start wird der ähnlich einer Ziehharmonika zusammengefaltete Zugdrachen mit dem Teleskopmast aus der Zugdrachenstauung gehoben. Anschließend fährt der Teleskopmast auf seine Maximalhöhe aus. Dort entfaltet sich der Zugdrachen bis auf seine vollständige Größe und kann gestartet werden. Mit der Winde wird das Zugseil ausgefahren, bis die Arbeitsflughöhe erreicht ist. Der Landevorgang läuft in umgekehrter Reihenfolge ab: Die Winde fährt das Zugseil ein und der Zugdrachen wird an den Start- und Landemast angedockt. Danach wird der Zugdrachen gerefft. Der Teleskopmast fährt ein und der Zugdrachen sowie die Steuergondel werden im Lagerbehälter verstaut. Der Start- und Landevorgang des Zugdrachens erfolgt weitgehend automatisch und dauert jeweils zirka 10 - 20 Minuten.

Durch den Einsatz des SkySails-Systems können die Treibstoffkosten eines Schiffes im Jahresdurchschnitt, abhängig von den Windverhältnissen, zwischen 10 und 35 % gesenkt werden. Herrschen optimale Windbedingungen, kann der Treibstoffverbrauch zeitweise um bis zu 50 % reduziert werden.

Für Frachtschiffe bietet SkySails derzeit Zugdrachen-Antriebssysteme mit einer effektiven Zugkraft zwischen 80 und 160 kN an. SkySails-Systeme mit einer effektiven Zugkraft von 320 kN befinden sich in der Entwicklung. Das geplante Produktprogramm umfasst Zugdrachen-Antriebssysteme mit einer effektiven Zugkraft von bis zu 1300 kN.

¹⁴ Reffen bezeichnet den Vorgang, die Fläche des Drachens zu verkleinern (vgl. Reffen 2011).

5.6 Weitere Akteure der AWE-Technologie

Abschließend zu diesem Kapitel wird an dieser Stelle auf weitere Akteure in der AWE-Technologie verwiesen. Diese Auflistung hat keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit und ist nach Ländern sortiert. Außerdem werden noch weiterführende Internetseiten zu diesem Thema genannt.

Akteure:

K.U. Leuven (Belgien):	www.kuleuven.be/optec/research/projects/kitepower
Aeroix (Deutschland):	www.aeroix.de
Assystem GmbH (Deutschland):	www.airborne-wind-turbine.com
EnerKite (Deutschland):	www.enerkite.com
NTS Energiesysteme (Deutschland):	keine Angabe
Windward (Deutschland)	www.windward-energy.de
Kite Gen (Italien):	www.kitegen.com/en
KITEnrg (Italien):	www.kitenergy.net
Ampyx Power (Niederlande):	www.ampyxpower.com
Airplay Kitesailing (Niederlande):	www.airplaykitesailing.com
EMPA (Schweiz):	www.empa.ch/css
SwissKitePower (Schweiz):	www.swisskitepower.ch
ALTAEROS Energies (USA):	www.altaaerosenergies.com
Joby Energy (USA):	www.jobyenergy.com
KiteShip (USA):	www.kiteship.com

Weiterführende Internetseiten:

AWE-Konferenz 2010:	www.awec2010.com
AWE-Konferenz 2011:	www.awec2011.com
AWE-Consortium:	www.aweconsortium.org

6 Herausforderungen für die Markteinführung der AWE-Technologie

Insbesondere für die Akteure im Bereich der Stromerzeugung durch AWE gilt es, bestimmte Sicherheitsaspekte zu gewährleisten sowie einige rechtliche und technische Herausforderungen zu lösen.

Besonders wichtig ist hier die Nutzung des Luftraums. Da man es mit fliegenden Objekten zu tun hat, dürfen sich in dem Bereich keine anderen Luftfahrzeuge befinden. Die Gefahr einer Kollision mit einem Flugzeug wäre angesichts der veranschlagten Höhen viel zu groß (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

„Hier haben auch Veranstaltungen wie die Airborne Wind Energy Conference (AWEC) das Ziel, die Behörden mit einzubinden, um Bereiche festzulegen und gemeinsam mit den Akteuren auszuarbeiten, wo großflächige Gebiete für die Nutzung der AWE zugewiesen werden könnten. Hier wird gegenwärtig auch die Federal Aviation Administration (FAA)¹⁵ mit eingebunden. Gerade Firmen, aber auch Forschungsinstitute im Bereich der AWE möchten die notwendigen Rahmenbedingungen für eine Markteinführung der Technologie herstellen, sodass diese auch verkauft werden kann“ (Schmehl 2011a).

Des Weiteren können extreme Wetterlagen, wie zum Beispiel Gewitter, den Technologien Probleme bereiten. Gerade bei den in großen Höhen eingesetzten Flugwindkraftwerken besteht zudem die Gefahr der Vereisung bei kalten Witterungsbedingungen. Darüber hinaus könnte ein Reißen des Halteseils einen Absturz des Systems zur Folge haben (vgl. Flugwindkraftwerke 2010).

Derzeit sind alle Gruppen im Bereich der Stromerzeugung durch AWE im Bereich der Automatisierung der Systeme tätig. Es ist beispielsweise bei den Pumping-Kite-Systemen gegenwärtig noch nicht vollautomatisch möglich, die Achter-Figuren zu fliegen und den JoJo-Zyklus zu erreichen (vgl. Schmehl 2011a). Um diese Systeme wirklich kommerziell nutzen zu können, müssten sie mehrere Tage lang ohne menschlichen Eingriff in der Luft bleiben können (vgl. Berkel 2010, S.26).

¹⁵ Bundesluftfahrtbehörde der USA

Als kommende Maßnahme beschreibt MacCleery daher folgerichtig:

„Im Laufe der Zeit wurde mit den entwickelten Prototypen die Nutzbarkeit der Höhenwindkraft bewiesen und eine Leistung im kW-Bereich erzielt. Im nächsten Schritt müssen die Branchenführer nun zeigen, dass ihre Systeme auch über einen längeren Zeitraum hinweg zuverlässig arbeiten“ (MacCleery 2010, S.14).

Daher ist es zwingend notwendig, dass weiter an der Entwicklung der Prototypen gearbeitet wird.

Betrachtet man hier die Entwicklung der Firma SkySails, lässt sich erahnen, wie lange es dauert bis ein solches Produkt die Marktreife erreicht hat. SkySails begann im Jahr 2001 mit der Entwicklung erster Zugdrachen-Systeme. Heute, zehn Jahre später, hat das Produkt Marktreife erreicht (vgl. SkySails). Ob dieser Entwicklungsprozess der hier vorgestellten Ansätze genauso lange dauert, lässt sich noch nicht abschätzen.

Eine weitere Herausforderung ist der Bekanntheitsgrad der AWE. Trotz zahlreicher Veröffentlichungen in Zeitungen, Internet und Fernsehen ist diese Technologie noch nicht der breiten Öffentlichkeit bekannt.

Veranstaltungen auf internationaler Ebene (z.B. die AWEC) erreichen durch die wachsende Anzahl an Teilnehmern schon politische Ebenen. Auch gibt es mehrere Forschungsprojekte, die mit Fördergeldern unterstützt werden. Trotz allem muss die Technologie mehr in der Gesellschaft sichtbar werden. Hierdurch könnte man auch mehr Unterstützung von privaten Investoren oder Förderprogrammen erhalten (vgl. Awec 2011). „Um ein solches Produkt zur Marktreife zu bringen, benötigt man in der Regel rund 100 Millionen Dollar“, sagt Hardham. „Im internationalen Markt für erneuerbare Energien ist das keine große Summe.“ [...] (Breuer 2010).

Es wird deutlich, dass sich die AWE Branche zukünftig noch verschiedenen Herausforderungen stellen muss. Neben der Weiterentwicklung der Prototypen gilt es, Sicherheitsaspekte zu garantieren, gesetzliche Regelungen zu schaffen und gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen.

7 Bedeutung der AWE-Technologie für die berufliche Bildung

Nachdem nun die verschiedenen Systemansätze beschrieben und die Funktionsweisen der AWE-Technologie erläutert wurden, befasst sich dieser Abschnitt mit der Bedeutung der AWE für die berufliche Bildung.

Welche Konsequenzen könnte diese neue Form der Energiegewinnung für die Aus- und Weiterbildung an Berufskollegs haben? Des Weiteren stellt sich die Frage, wie die AWE im beruflichen Unterricht Anwendung finden könnte.

7.1 Mögliche Konsequenzen

Betrachtet man die AWE-Technologie im Zusammenhang mit der beruflichen Bildung, kann ein denkbarer Durchbruch auf dem Markt der erneuerbaren Energien erhebliche Konsequenzen haben. Es ist durchaus vorstellbar, dass sich diese Technologie in den nächsten Jahren bis zu dem Punkt weiterentwickelt, an dem die Stromproduktion in großem Maße machbar ist.

Mit Blick auf den wachsenden Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften, der sich in der konventionellen Windenergienutzung eingestellt hat, lassen sich deutliche Gemeinsamkeiten erkennen:

„Das enorme Wachstum der regenerativen Energien, insbesondere der Windenergie, hat auch dazu geführt, dass die Ausbildungsinhalte in den Bereichen der Elektro- oder Maschinenbaubranche nicht mehr ausreichen, um den Anforderungen eines Servicetechnikers für Windenergieanlagen gerecht zu werden, da hier ein spezielles Knowhow und ein hohes Maß an Flexibilität gefordert wird“ (Wind-Energie).

Auch die Branche der AWE-Technologie verzeichnet ein enormes Wachstum. „[...] zum Vergleich: die Anzahl an Institutionen, die aktiv beteiligt sind, ist von 3 im Jahr 2000 auf gegenwärtig über 40 gestiegen [...]“ (Schmehl 2011b). Alle Akteure in diesem Bereich sind zuversichtlich, dass es in den nächsten Jahren machbar ist, die Höhenwindkraft zur Stromerzeugung kommerziell nutzbar zu machen. Dies hätte zur Folge, dass derzeit getestete Prototypen in Serienfertigung produziert werden. Auch die Entstehung groß angelegter Windparks, wie bei konventionellen WKA, ist vorstellbar. Angesichts der unterschiedlichen Systemansätze würden sich vielfältige Anforderungen auf beruflicher Ebene ergeben.

Der Bereich der Elektro- und Steuerungstechnik, sowie die Sensorentwicklung in der Messtechnik kann hier genannt werden. Die Fertigung sowie Montage der Systeme fällt in das Gebiet der Maschinenbaubranche. Für die technischen Systeme mit Kites oder Ballons spielt die Entwicklung und Verarbeitung von Textilien eine Rolle. Die Softwareentwicklung für die Automatisierung kann in der Informationstechnik Anwendung finden.

Dies sind einige mögliche Anwendungsgebiete für die berufliche Bildung. Es lässt sich erkennen, dass AWE von der Entwicklung der Technologie, über die Produktion bis hin zur Projektierung und Inbetriebnahme reicht. Auch die weitere Wartung und Instandhaltung der Anlagen kann hier genannt werden. Aus diesen Zusammenhängen wird deutlich, dass es durchaus vorstellbar ist, dass dieser Bereich für die berufliche Bildung in Zukunft eine wichtige Rolle spielen kann. Daher ist es auch jetzt schon wichtig, über Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten auf der beruflichen Ebene nachzudenken.

Für die konventionelle Windenergie hat beispielsweise das Bildungszentrum für erneuerbare Energien e.V. auf das eben schon erwähnte Wachstum in diesem Bereich reagiert. Es wurden gezielte Qualifikationen erarbeitet, die in Aus- und Weiterbildung eines Service-Technikers für Windenergieanlagen vermittelt werden müssen (vgl. Wind-Energie).

Bisher wird in der AWE-Technologie nur auf universitärer Ebene ausgebildet. Die Technische Universität Delft bietet als einzige Universität weltweit Vorlesungen zu der Kite-technik mit Inhalten über Steuerung und Energieproduktion, an (Schmehl 2011a). Auf beruflicher Ebene besteht gegenwärtig noch nicht die Notwendigkeit Facharbeiter für diese Branche aus- oder weiterzubilden, da sich die Technologie noch in der Testphase befindet. Allerdings ist die AWE eine zukunftsorientierte Branche, die in einigen Jahren durchaus einen Bedarf an qualifizierten Facharbeitern haben kann. Ob dieser Bedarf später mit Weiterbildungsmöglichkeiten gedeckt werden kann oder spezialisierte oder auch neue Ausbildungsberufe entstehen, ist noch nicht abzusehen. In jedem Fall werden dann die berufliche Bildung, sowie die Branche der AWE gefordert sein, auf eine solche Entwicklung einzugehen und in dieser Hinsicht geeignete Maßnahmen zu gestalten.

Demzufolge müssten Anforderungsprofile erstellt und notwendige fachliche Qualifikationen sowie Kernkompetenzen für den Umgang mit diesen neuen Technologien erarbeitet werden. Auch die Entwicklung neuer Curricula für die

Aus- und Weiterbildung kann hier genannt werden. Hierdurch würden die Rahmenbedingungen für fachliche und schulische Lehrinhalte geregelt. Diese Konsequenzen können in Zukunft eine Herausforderung, aber auch eine Chance für die berufliche Bildung sein, ein neues technisches Anwendungsgebiet als Ausbildungsmaßnahme hervorzubringen.

7.2 Exemplarische Anwendung

Besonders in technischen Ausbildungsberufen könnte die AWE-Technologie im beruflichen Unterricht eingesetzt werden.

Sie bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Ausbildungsberufen. Betrachtet man hier exemplarisch den Ausbildungsberuf Mechatronikerin/Mechatroniker, wird deutlich, dass die AWE-Technologie für eine vielfältige physikalische und technische Unterrichtsgestaltung verwendet werden kann.

Dieser Ausbildungsberuf ist eine Kombination aus den Bereichen Mechanik und Elektrotechnik und wird durch die Informations- und Steuerungstechnik ergänzt (vgl. Mechatroniker 2011).

Der Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Mechatronikerin/Mechatroniker sieht im Lernfeld 1 das Analysieren von Funktionszusammenhängen in mechatronischen Systemen vor (Schulministerium NRW 2005, S.22).

Tabelle 2: Lernfeld 1 - Mechatroniker/Mechatronikerin (Schulministerium NRW 2005, S.23)

Lernfeld 1: Analysieren von Funktionszusammenhängen in mechatronischen Systemen	1. Ausbildungsjahr Zeitrichtwert: 40 Stunden
<p>Zielformulierung:</p> <p>Die Schülerinnen und Schüler wenden Vorschriften und Regelwerke bei der Untersuchung technischer Anlagen an. Sie arbeiten mit technischen Unterlagen und nutzen deren Aussagen für die Lösung. Sie beherrschen Verfahren zur Analyse und Dokumentation von Funktionszusammenhängen und führen Gespräche über technische Realisierungsmöglichkeiten im Team.</p> <p>Sie arbeiten mit Blockschaltplänen und erkennen anhand dieser Pläne den Signalfluss, den Stofffluss, den Energiefluss und die grundsätzliche Wirkungsweise.</p> <p>Die Möglichkeiten der Datenverarbeitung zur Aufbereitung von Arbeitsergebnissen werden von ihnen erkannt.</p> <p>Die Schülerinnen und Schüler sind für Probleme der Ökologie und Ökonomie dieser Systeme sensibilisiert.</p> <p>Die Bedeutung der englischen Sprache für die technische Kommunikation ist ihnen bewusst.</p>	
<p>Inhalte:</p> <ul style="list-style-type: none">• Anforderungsprofile technischer Anlagen• Systemparameter• Blockschaltbilder• Signal-, Stoff- und Energieflüsse• Bedeutung kundenspezifischer Anforderungen für die technische Realisierung• Bedeutung und Möglichkeiten der Datenverarbeitung• Dokumentation und Präsentation von Arbeitsergebnissen• Ökologische und ökonomische Aspekte	

Um den Zielformulierungen sowie den inhaltlichen Anforderungen für dieses Lernfeld gerecht zu werden, bietet die AWE-Technologie diverse Optionen für die Ausgestaltung entsprechender Lernsituationen.

Exemplarisch können hier die Pumping-Kite-Systeme genannt werden. Mit Blick auf die verwendeten Komponenten kann die Bodenstation als mechatronisches System angesehen werden.

Die Bodenstation besteht aus mechanischen sowie elektrischen Bauteilen. Es gibt Messsensoren für die Ein- und Ausrollgeschwindigkeit des Halteseils. Daten wie zum Beispiel Flughöhe, Windgeschwindigkeit und Kraftwirkung auf das Halteseil werden an einen Computer weitergeleitet und verarbeitet. Die Winde wird in einem mechanischen Spindelgetriebe geführt und mechanische Energie wird über einen Generator in elektrischen Strom umgewandelt und in einer Batterie gespeichert.

Diese Funktionszusammenhänge der Bauteile können analysiert sowie grundsätzliche Wirkungsweisen erkannt werden. Mögliche Systemverbesserungen können im Hinblick auf ökonomische und ökologische Aspekte erarbeitet und diskutiert werden.

Das hier aufgeführte Beispiel macht das enorme Aufgabenpotential der AWE-Technologie deutlich. Hinsichtlich der physikalischen und technischen Unterrichtsgestaltung in der beruflichen Bildung ist dieses Thema gut geeignet. Speziell in den handwerklichen Berufsfeldern, wie der Metall- und Elektrotechnik, können praxisnahe Lernsituationen kreiert werden.

Durch den derzeit noch geringen Bekanntheitsgrad der Technologie, könnte den Schülerinnen und Schülern zusätzlich eine alternative Form der Stromerzeugung aufgezeigt werden.

„Die Berufsschule hat eine berufliche Grund- und Fachbildung zum Ziel und erweitert die vorher erworbene allgemeine Bildung. Damit will sie zur Erfüllung der Aufgaben im Beruf sowie zur Mitgestaltung der Arbeitswelt und Gesellschaft in sozialer und ökologischer Verantwortung befähigen“ (Schulministerium NRW 2005, S.18).

Die AWE-Technologie kann im beruflichen Unterricht eingesetzt werden und somit diese Zielvorgaben der Berufsschule abdecken. Die Grund- und Fachbildung kann mit Lernsituationen vermittelt werden und die allgemeine Bildung wird durch die Anwendung im Unterricht erweitert. Diese Technologie bietet zudem Gesichtspunkte auf, Schülerinnen und Schülern ihre ökologische Verantwortung aufzuzeigen.

Somit sollte die Didaktik im Bereich der Forschung und Entwicklung das Thema der AWE-Technologie zukünftig in der Ausgestaltung geeigneter Lernsituation aufgreifen. Dies könnte als Gegenstand in einer weiterführenden Arbeit behandelt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die AWE zur Stromerzeugung und als Antriebshilfe anhand von unterschiedlichen Systemansätzen betrachtet.

Mittels eines Vergleichs zu konventionellen WKA ist das Potential der AWE-Technologie verdeutlicht worden.

Die maßgeblichen Unterschiede der Techniken zur Stromerzeugung konnten in zwei Bereiche klassifiziert werden und die grundlegende Technologie der Höhenwindkraft wurde durch die Darstellung der Funktionsprinzipien der einzelnen Systemansätze erläutert.

Durch die Ausführungen zu der automatisierten Zugdrachentechnik des Unternehmens SkySails ist auf eine weitere Nutzung der AWE eingegangen worden. Dieses vielversprechende Zusatzantriebssystem hat mittlerweile die Produktreife erreicht, und steht kurz vor dem Übergang in die Serienproduktion. Die Technologie der AWE bietet vielversprechende Systemmöglichkeiten im Bereich der Stromerzeugung. Durch die Vielzahl der Akteure kann sich hieraus in Zukunft eine echte Alternative zur konventionellen Stromerzeugung entwickeln. Sofern das Ziel der großflächigen Stromerzeugung nicht erreicht wird, bieten diese Systeme trotzdem vielseitige Verwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise wäre hier die Stromerzeugung in Entwicklungsländern, weit entfernt von Infrastruktur zur Treibstoffzufuhr, denkbar. Oder auf militärischer Ebene könnten einzelne Systemansätze aufgrund sehr hoher Mobilität an Kriegsfrenten oder in Krisengebieten eingesetzt werden (vgl. Schmehl 2011a).

Betrachtet man die in dieser Arbeit in ersten Ansätzen beschriebene mögliche Bedeutung der AWE-Technologie für die berufliche Bildung, wird deutlich, dass diese Technologie zukünftig die Bereiche der Aus- und Weiterbildung hinsichtlich dessen fordern wird, qualifizierte Facharbeiter hervorzubringen.

Die exemplarische Anwendung der AWE in der beruflichen Bildung zeigt auf, dass sich aus diesen Technologien eine Vielzahl von Varianten ergeben, die für die Ausgestaltung von Lernsituationen geeignet sind.

Im Rahmen der betrieblichen Praxisstudien wird das hier behandelte Thema zeitnah in dem vom Institut für Berufliche Lehrerbildung der Fachhochschule Münster betreuten Kite&Tech-Wiki dargestellt.

Ziel ist es, die in dieser Arbeit aufgeführten, aber auch weitere Akteure und Prototypen dieser Branche, in einem angebrachten technischen Niveau im Wiki

zu beschreiben. Das Wiki kann dann in absehbarer Zeit von Studentinnen und Studenten, Lehrerinnen und Lehrern, aber auch von Schülerinnen und Schülern als Informations- und Austauschportal über diese Technologie genutzt werden.

Hieraus können Nutzer des Wikis Informationen über den jeweiligen Stand der Entwicklung der verschiedenen Ansätze sowie die grundsätzlichen Funktionsweisen bekommen.

Ein weiterer Vorteil ist, dass sich beispielsweise Lehrerinnen und Lehrer für die Ausgestaltung von Lernsituationen anregen lassen können. Solche Lernsituationen gilt es zukünftig zu entwickeln. Betrachtet man die fachwissenschaftlichen und didaktischen Gesichtspunkte, die die AWE-Technologie zu bieten hat, stellt sich heraus, dass diese Thematik ein vielversprechender Gewinn für die berufliche Bildung ist.

Mit dieser Arbeit wird deutlich, dass die Entwicklung der AWE-Technologie gegenwärtig, aber vor allem in naher Zukunft, viele Chancen und Anwendungsmöglichkeiten bietet. Auf wirtschaftlicher Ebene ist es wichtig, technologisch eine neue Form der Energieerzeugung zu etablieren. Aber auch auf Bildungsebene oder für die Realisierung politischer und gesellschaftlicher Ziele spielt die AWE-Technologie eine wichtige Rolle.

Durch diese umweltfreundliche Form der Energiegewinnung kann zudem auf die Zerbrechlichkeit der Erde Rücksicht genommen und der weltweiten Klimaerwärmung begegnet werden.

9 Literaturverzeichnis

Agentur für Erneuerbare Energien (o.J.): Stromversorgung 2020.

In: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Stromversorgung_2020_Flyer_druck.pdf (letzter Zugriff 07.06.2011)

Archer, C. L.; Caldeira, K. (2008): Atlas of high altitude wind power.

In: http://www.awec2010.com/public/img/media/atlas_of_airborne_wind_energy.pdf (letzter Zugriff 30.05.2011)

Archer, C. L.; Caldeira, K. (2009): Global Assessment of High-Altitude Wind Power.

In: http://www.awec2010.com/public/img/media/archer_caldeira.pdf (letzter Zugriff 30.05.2011)

Berkel, M. (2010): Strom aus den Wolken.

In: http://www.kitepower.eu/images/stories/mediaPage/press/lux_03_2010.pdf (letzter Zugriff 01.06.2011)

Breuer, H. (2010): Erneuerbare Energie - Strom aus Wolken ernten.

In: <http://www.sueddeutsche.de/wissen/erneuerbare-energie-strom-aus-wolken-ernten-1.980509> (letzter Zugriff 09.06.2011)

Breukels, J. (2010): An Engineering Methodology for Kite Design. Oisterwijk

Diehl, M.; Houska, B. (2009): Windenergienutzung mit schnell fliegenden Flugdrachen: eine Herausforderung für die Optimierung und Regelung.

In: <http://www.kuleuven.be/optec/files/Diehl2009d.pdf> (letzter Zugriff 31.05.2011)

EEG (2011): Erneuerbare-Energien-Gesetz.

In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz> (letzter Zugriff 10.06.2011)

Flugwindkraftwerke (2010): Wikipedia:Zedler-Medaille/Zedler-Medaille 2010/Flugwindkraftwerke.

In: http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Zedler-Medaille/Zedler-Medaille_2010/Flugwindkraftwerke (letzter Zugriff 09.05.2011)

- Heuer, S.** (2010): Strom aus dem Luft-Karussell.
In: <http://www.heise.de/tr/artikel/Strom-aus-dem-Luft-Karussell-1124287.html> (letzter Zugriff 02.06.2011)
- Jetstream** (2011): Jetstream.
In: http://de.wikipedia.org/wiki/Jetstream#cite_note-0 (letzter Zugriff 15.06.2011)
- MacCleery, B.** (2010): Höhenwindkraft.
In: <http://digital.ni.com/worldwide/germany.nsf/web/all/72BE33C10BD4C90EC125781B00370240> (letzter Zugriff 28.05.2011)
- MacCleery, B.** (2011): The Advent of Airborne Wind Power.
In: http://windsystemsmag.com/media/pdfs/Articles/2011_January/0111_NI.pdf (letzter Zugriff 02.06.2011)
- Magnus-Effekt** (2011): Magnus-Effekt.
In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnus-Effekt> (letzter Zugriff 05.06.2011)
- Mechatroniker** (2011): Mechatroniker.
In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Mechatroniker> (letzter Zugriff 12.06.2011)
- Reffen** (2011): Reffen.
In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Reffen> (letzter Zugriff 06.05.2011)
- Roberts, B. W. u.a.** (2007): Harnessing High Altitude Wind Power.
In: http://www.awec2010.com/public/img/media/roberts_et_al.pdf (letzter Zugriff 30.05.2011)
- Schmehl, R.** (2011b): Handreichung Artikel Kite Power
- Schmehl, R.** (2011c): Handreichung Broschüre Green Energy
- Schulministerium NRW** (2005): Mechatroniker/Mechatronikerin Fachklassen des dualen Systems der Berufsausbildung.
In: http://www.berufsbildung.schulministerium.nrw.de/cms/upload/_lehrplaene/a/mechatroniker.pdf (letzter Zugriff 13.06.2011)

Westfälische Nachrichten (2011a): Jetzt sind sie alle begeistert.

In: http://www.westfaelische-nachrichten.de/aktuelles/politik/inland/1561652_Jetzt_sind_sie_alle_begeistert.html (letzter Zugriff 17.06.2011)

Westfälische Nachrichten (2011b): Atom-Ausstieg kostet Familie 40 Euro.

In: http://www.westfaelische-nachrichten.de/aktuelles/politik/inland/1561650_Atom_Ausstieg_kostet_Familien_40_Euro.html (letzter Zugriff 17.06.2011)

Wiki (2011): Wiki.

In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wiki> (letzter Zugriff 17.06.2011)

Sonstige Quellen:

Dokumentation:

3sat (2010): Drachen statt Atomkraft.

In: <http://www.3sat.de/page/?source=/nano/technik/146919/index.html> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Fachgespräch:

Awec (2011): Fachgespräche auf der Airborne Wind Energy Conference in Leuven (Belgien), 24. - 25. Mai 2011

Internetseiten:

100 Prozent Zukunft: <http://100prozentzukunft.de/> (letzter Zugriff 07.06.2011)

Agentur für Erneuerbare Energien: <http://www.unendlich-viel-energie.de/> (letzter Zugriff 07.06.2011)

Energieblog24: <http://www.energieblog24.de> (letzter Zugriff 02.06.2011)

Magenn Power: <http://www.magenn.com> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Makani Power: <http://www.makanipower.com/> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Kite Gen: <http://www.kitegen.com/en/> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Kite&Tech-Wiki: <http://www.ibl.fh-muenster.de/kitewiki/index.php?title=Hauptseite> (letzter Zugriff: 15.06.2011)

RAOnline: <http://www.raonline.ch/pages/edu/cli/strahl01c.html#end> (letzter Zugriff: 15.06.2011)

SkySails: <http://www.skysails.info> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Sky Windpower: <http://www.skywindpower.com> (letzter Zugriff 13.06.2011)

Wind-Energie: <http://www.wind-energie.de/> (letzter Zugriff 11.06.2011)

Interview:

Schmehl, R. (2011a): Leiter der Laddermill Forschungsgruppe, Technische Universität Delft, Interview mit Dr.-Ing. Roland Schmehl am 11.05.2011

Bildquellen:

Logo - Institut für berufliche Lehrerbildung:

In: www.fh-muenster.de/ibl/ (letzter Zugriff 13.06.2011)

Logo - Fachhochschule Münster:

In: www.fh-muenster.de/ibl/ (letzter Zugriff 13.06.2011)

Logo - Kite & Tech Wiki:

In: http://www.ibl.fh-muenster.de/kitewiki/images/c/c8/Kite%26Tech_logo.jpg (letzter Zugriff 15.06.2011)