

## Entwicklung einer Kleinwindanlage mit Segeln (SAILWIND bzw. Smartwind-Power)

Autor: D. Schwechten

### 1 Projektidee und -Ziele (technische, kulturhistorische Ziele, Umweltkriterien)

Im ganzen Mittelmeerraum waren Windmühlen mit Segeln wie in Abb. 1 sehr verbreitet. Alleine in Griechenland gibt es heute noch mehr als 2500 Mühlen. Jedoch sind viele dieser alten Anlagen verfallen und ungenutzt. Segelwindmühlen könnten als lokale Kleinkraftwindanlagen zur Erzeugung von Strom genutzt und würden als Kulturdenkmäler erhalten werden.



Abb. 1: Historische griechische Segelwindmühle in Betrieb /8/

Unsere Zielsetzung ist, diese Windkraftanlagen mit neuen Technologien zu automatisieren, um dadurch eine Steigerung des Anteils an Erneuerbaren Energien zu erreichen. Auch neue Segelwindmühlen könnten an exponierten Standorten gebaut werden. Kleinwindanlagen gelten allgemein als eine ideale Ergänzung zu PV.

Griechenland mit seinen Inseln gehört zu den windreichsten Regionen Europas mit mittleren Windgeschwindigkeiten von teilweise über 9 und 10 m/s. Der Ausbau von Windkraft gehört zu den strategischen Zielen Griechenlands. Allerdings regt sich zunehmend Widerstand gegen große Windräder, besonders in touristischen Gegenden, wo man bemüht ist, die authentischen Landschaften und Ortsbilder zu erhalten. Segelwindmühlen werden dagegen als ästhetisch wahrgenommen und akzeptiert. Aus diesem Grund wird Griechenland für das Projekt als Pilotland gewählt, jedoch ist eine spätere Skalierung auf andere Regionen vorgesehen. In vielen Ländern des Mittelmeerraums besteht großer Nachholbedarf im Bereich der erneuerbaren Energien. So wird Strom auf nicht mit dem Festland verbundenen Inseln durch die Verstromung von Primärenergie (Öl, Diesel) erzeugt. Die damit einhergehenden Luftverschmutzungen, sowie erhebliche Lärm- und Geruchsemissionen könnten vermieden und die Lebensqualität nachhaltig verbessert werden.

Der Markt der Kleinkraftwerke unter 50 bis 100 kW boomt, wird aber dominiert von schnell laufenden 3-Blatt-Rotoren, die stärkere Windgeräusche erzeugen. So könnten sich langsam laufende Segelwindrotoren generell als eine besonders

vorteilhafte, geräuscharme Kleinkraftwerksvariante für dicht besiedelte Gebiete herausstellen (Innovation) und durchaus auch für Mitteleuropa interessant sein (Alleinstellungsmerkmal).

## 2 Umsetzung

Nach dem Vorbild historischer Segelwindmühlen soll ein mechatronischer Segelrotor entwickelt, gebaut und erprobt werden, der vollautomatischen Betrieb ermöglicht. Zur Begrenzung des Risikos ist ein in allen Details verkleinerter Prototyp einer Segelwindmühle im Maßstab 1:2,5 mit 4 m Rotordurchmesser geplant, der unter realen Windbedingungen (Staub, Starkwind, Seeluft – Santorini, GR) vermessen werden soll. Er wird vollständig instrumentiert und mit einer kontinuierlichen Datenerfassung ausgerüstet sein. Alle Daten dieses Prototyps (Windlasten, Schwingungen, Geräusch, Leistungen, Drehzahlen usw.) werden zum sicheren Scale-up auf eine Segelwindmühle in Realgröße (typ. 12 m Rotordurchmesser) herangezogen, die in der letzten Projektphase konzipiert und konstruiert werden soll.

Die Anpassung der Segelfläche soll mit einem motorischen Rollvorgang der Segel (Art Rollreff auf Segelbooten) realisiert werden. Dies hat den Zweck der Leistungs-optimierung, der Leistungsbegrenzung (Generator-Nennleistung), der Wartung und der Notabschaltung bei Sturm oder Havarie. Auch die Trimmung der Segel soll nach seglerischem Vorbild über Zug auf Schoten erfolgen, damit die Windleistung auch bei mäßigen und schwachen Winden optimal genutzt werden kann. Für die Mechatronik sind Servomotoren erforderlich: 1. Segelrollung / -trimmung, 2. Sicherheitsbremse für den Rotor, 3. Gondeldrehung (Yaw) und 4. Gondelbremse.

## 3 Wissenschaftliche Zielsetzung, Bau und Untersuchungen eines Prototyps

Wichtigster Parameter bei der Auslegung und Optimierung von Windkraftanlagen ist der Leistungsbeiwert  $c_p$  in Abhängigkeit der Schnelllaufzahl  $\lambda$ . Das theoretische Maximum dieses Wertes liegt bei 59,3%. Moderne 3-Blatt-Windanlagen erreichen  $c_p$  von bestenfalls knapp 50 % bei hohen Drehzahlen ( $\lambda=7$ ). Flächige Rotoren wie SAILWIND laufen dagegen bedeutend langsamer (ca.  $\lambda=1,2$ ), siehe Abb. 2. Die  $c_p$ -Werte sind mit ca. 30% zwar kleiner, die Geräuschentwicklung wird dafür aber aller Wahrscheinlichkeit nach bedeutend geringer sein. Dabei wird der um 20% schlechtere Wirkungsgrad von Segelrotoren durch nur um 7,7% höhere mittlere Windgeschwindigkeiten sehr schnell ausgeglichen ( $\sim w^3$ ) – also kein Problem in windreichen Gegenden.

Die historische griechische Segelwindmühle wird in der Literatur zwar häufig erwähnt. Aufgrund ihrer Technik stand sie jedoch nie im Fokus exakter wissenschaftlicher Forschung. Im Rahmen des Projektes soll diese Lücke geschlossen werden. Die hinreichend genaue Abschätzung von Leistungen und Kräften an einer Segelwindanlage über die Analogie zu dreiecksförmigen Segeln von Segelbooten ist nicht möglich, weil sich die Segel rotierend bewegen. Bei Rotation

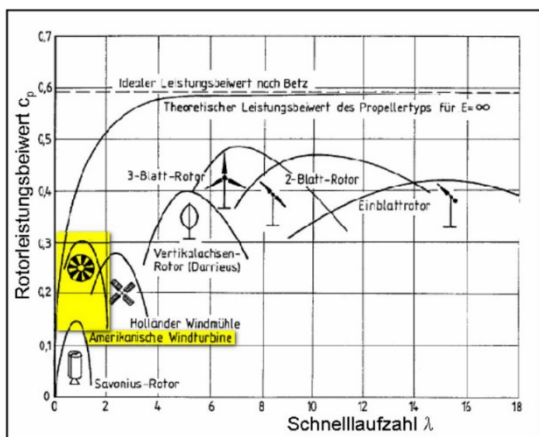


Abb. 2: Leistungskennlinien von Windrotoren unterschiedlicher Bauart [7]

verändert sich die Anströmung der Segel mit dem Radius. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden andere Segelschnitte als auf Booten, erforderlich. CFD-Strömungssimulationen werden zeigen, wie optimale Segel für Segelwindmühlen geschnitten werden müssen.

Die verkleinerte Kleinwindanlage mit 4 m Rotordurchmesser soll für Grundlagenuntersuchungen der Segelmechanik gebaut werden. Die Nennleistung des Generators beträgt 5 kW. Oberhalb von ca. 14 m/s Windgeschwindigkeit werden die Segel gerollt, um die Leistung bei konstant 5 kW zu halten. Bei ca. 20 bis 25 m/s wird die Segelfläche vollkommen eingerollt sein, und der Generator kann durch hydraulische Bremsen still gesetzt werden. Die Testanlage wird alle Sicherheits-einrichtungen und Merkmale einer zukünftigen Windanlage aufweisen. Messdaten werden lokal gespeichert und über Internet oder Telefon/ GSM übertragen. Damit ist zunächst *Condition Monitoring* vorgesehen, später sollen auch *smart controls* auf Basis von KI zum Einsatz kommen. Letztere vor allem mit dem Ziel, mehrere SAILWIND Maschinen im Verbund (auch für Windparks) effizient zu vernetzen.

#### 4 Vorarbeiten der Antragsteller

Durch Vorarbeiten seit 2015 entstand eine nahezu vollständige CAD-Konstruktion des 5kW-Windgenerators, einschließlich der elektronischen Steuerung der drehbaren Gondel mittels  $\mu$ -Controller. Weitere studentische Arbeiten laufen oder sind geplant.



Abb. 3: CAD-Modell des unverkleideten 4m-Prototyp mit ausgerollten Segeln

## 5 Ziele des Projektes und Beitrag zur Umweltentlastung

- Erhalt und Nutzung historischer Windmühlen (Kulturdenkmäler) zur dezentralen Energiegewinnung für entlegene Regionen, Dörfer, Inseln
- Erhalt authentischer Orts- und Landschaftsbilder, zugleich:
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie in Griechenland (Beitrag zur Erreichung der Klimaziele)
- Erhöhung der generellen Akzeptanz von Windkraftwerken (Signalwirkung für andere Mittelmeerländer); kleinere und wesentlich leisere Windrotoren (Innovation / Marktnische)
- Neue Arbeitsplätze in Griechenland (durch Firmengründung und Kooperation)
- Verringerung der Abhängigkeit von Primärenergieträgern
- Vermeidung von Luftverschmutzung (CO<sub>2</sub>, Partikel, Schadstoffe), Lärm- und Geruchsemissionen durch die vielerorts vorhandenen Dieselgeneratoren und Öl-Kraftwerke zur Stromversorgung
- Der flächige Rotor mit kleineren Drehzahlen wird von Vögeln/Fledermäusen besser wahrgenommen (Naturschutz). Anmerkung: Die griechischen Inseln liegen auf den Routen vieler Zugvögel, Schutzgebiete!
- *Leuchtturm*-Projekt in Bezug auf Denkmalschutz, Förderung der Akzeptanz von Kleinwindkraftanlagen als dezentrale und mit anderen Energiequellen kombinierbare Lösung, neues Windpark-fähiges Kleinwindkraftwerk

## 6 Maßnahmen zur wirtschaftlichen Verwertung und Risiko

Das Projekt SAILWIND wird von diversen Firmen in Deutschland durch Rabatte oder kostenlose Komponenten für den Prototyp im Wert von ca. 10.000 € unterstützt, (3x Letter of Intent: Lol).

Es bestehen Kontakte der Antragsteller zur polytechnischen Universität Athen NTUA (Prof. Spyros Voutsinas) und der staatlichen Forschungsstelle CRES, Athen (Dr. Nikolaos Stefanantos, Gruppenleiter Windenergie) zur wissenschaftlichen Kooperation und Austausch.

Nach Abschluss des Projektes ist eine Firmengründung für das Engineering und den Vertrieb von Segelwindanlagen in GR geplant. Auf der Seite der Herstellung, Montage, Marketing und Verkauf wird eine Zusammenarbeit mit einer griechischen Firma angestrebt. Die Deutsch-Griechische Handelskammer DGIHK/ AHK in Thessaloniki und Athen ist bei der Suche nach einem Kooperationspartner involviert.

Nach ersten Abschätzungen wird eine SAILWIND Maschine mit 12 m Durchmesser ca. 40 kWp erzeugen, genug für mehrere Haushalte oder einen Kleinbetrieb (z.B. Restaurant, Hotel). Windkraft und PV ergänzen sich ideal hinsichtlich des Wettergeschehens. Der Einsatz moderner Wechselrichter gestattet den Anschluss von Batteriemodulen zur Speicherung der Energie, die zunehmend günstiger werden. Mehrere SAILWIND Maschinen im Verbund könnten Dörfer und Ansiedlungen

vollständig mit erneuerbarer Energie versorgen. Im „smart“ gesteuerten Verbund kann eine Effizienzsteigerung gegenüber der Einzelmaschine erwartet werden.

Die Rahmenbedingungen des Projektes sind als ausgezeichnet einzustufen. Ein Pilotkunde DEYA zur Erprobung von SAILWIND für Trinkwasserversorgung, Meerwasserentsalzung auf Santorini wurde gefunden (LoI). Die Erprobung auf Santorini wird von behördlicher Seite befürwortet (LoI). Die Durchführung des Projektes seitens der HTWG Konstanz kann als gesichert angesehen werden.

Ein technisches Risiko liegt in der Ausführung des mechatronischen Segelwindrotors. Ob der Segelwindrotor mit den Schiebehülsen auf der Rotorwelle funktioniert und sich unter Realbedingungen dauerhaft bewährt, soll erprobt und verifiziert werden. Für den Fall, dass die Schiebehülsen nicht die richtige Lösung darstellen, gibt es bereits eine technische Alternative (Plan B). Sie wurde aus Kostengründen jedoch zunächst nicht weiterverfolgt.

## 7 Arbeitsschritte und Meilensteine, Projektplan über 2 Jahre

Arbeitspaket	2021 Q1	2021 Q2	2021 Q3	2021 Q4	2022 Q1	2022 Q2	2022 Q3	2022 Q4	
1 Koordination Fertigung, Bestellungen	■		M1						
2 Fertigstellung und Funktionstests			M2						
3 Inbetriebnahme und Erprobung				■		M3			
4 Transport und Erprobung in GR						■		M4	
5 Scale-up und Konzeptphase (1:1)						■		M5	
6 Konstruktionsphase (1:1)						■			
7 Wiss. Auswertungen				■					M6

## 8 Finanzplanung über 2 Jahre

Das SAILWIND-Projekt soll über Eigenmittel und Fördermittel finanziert werden. Zu dem Eigenanteil ist die Bezahlung des Projektleiters aus Landesmitteln zu zählen (Forschung als Dienstaufgabe), ebenso die Bereitstellung der gesamten Infrastruktur durch die HTWG Konstanz (Labore, Personaladministration, Controlling etc.).

Jahr		2021	2022	Summe 2 J.
Monate	( )	12	12	
3.1 Personalmittel				
wiss. MA (Bachelor) - Masterand	E 10, Stellenumfang 50%	30.102,00	30.704,00	60.806,00
wiss. MA (Bachelor) - Masterand	E 10, Stellenumfang 50%	30.102,00	30.704,00	60.806,00
Hilfskräfte	stud. Hilfskraft (SHK)	8.592,00	8.592,00	17.184,00
<b>Personalmittel gesamt</b>		<b>68.796,00</b>	<b>70.000,00</b>	<b>138.796,00</b>
3.2 Mittel zur Freistellung von Lehrverpflichtungen		2.200,00	2.200,00	4.400,00
3.3 Sachmittel ( <b>Baukosten des Prototyps</b> )		45.000,00	5.000,00	50.000,00
Verbrauchsmaterial		1.000,00	1.000,00	2.000,00
Dienstreisen/ Reisekosten		1.500,00	3.100,00	4.600,00
Sachmittel gesamt		47.500,00	9.100,00	56.600,00
3.4 Investitionen		-	-	-
3.5 <b>Summe 3.1 - 3.4</b>		<b>118.496,00</b>	<b>81.300,00</b>	<b>199.796,00</b>
3.6 abzüglich Barleistungen Kooperationspartner		-	-	-
3.7 <b>Beantragte Mittel</b>		<b>118.496,00</b>	<b>81.300,00</b>	<b>199.796,00</b>

Die Fördersumme von 199.796 € für den Zeitraum von 24 Monaten setzt sich aus Personalmitteln 138.796 € (69,5 %), Sachmitteln 56.600 € (28,3 %) vorwiegend für Teile zum Bau des Prototyps und Ersatzlehraufträgen 4.400 € zusammen (2,2 %). Investitionen sind nicht vorgesehen.