

Abschlussbericht

- ÖFFENTLICH -



Verbundvorhaben:

SkyPower100

**Pilotanlage zur Energieerzeugung
aus Höhenwind**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Kennzeichen: 01180363/1

Zuwendungsempfänger und Titel der Teilvorhaben:

SkySails Power GmbH [SkySails / SkySails Power]

Realisierung einer vollautomatischen Flugwindkraft-Pilotanlage SkyPower100 mit einer Nennleistung von 100 kW.

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover [IAL]

Antriebsstrangkonzepete von Flugwindkraftanlagen für 1 bis 5 MW und deren Validierung an der Pilotanlage SkyPower100 mit einer Nennleistung von 100 kW.

Omexom Renewable Energies Offshore GmbH [Omexom]

Projektierung, Standortsuche, Genehmigung und Bereitstellung der Infrastruktur für eine Flugwindkraftanlage zur Verwendung der Höhenwindenergie. Die Omexom ist Geschäftsnachfolgerin des Verbundpartners EWE Offshore Service & Solutions GmbH.

EnBW Energie Baden-Württemberg AG [EnBW]

Kommerzialisierungsstrategie einer Flugwindkraftanlage zur Verwertung der Höhenwindenergie.

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2018 – 30.06.2022

Kurzfassung zum Schlussbericht

1. ISBN oder ISSN		2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)	
Nicht geplant		Schlussbericht	
3. Titel			
Abschlussbericht Verbundvorhaben SkyPower100			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]		5. Abschlussdaten des Vorhabens	
Junge, Patrick (SkySails)		30.09.2021, 30.06.2022	
Lohss, Martin (SkySails)		6. Veröffentlichungsdatum	
Röben, Olaf (SkySails)		01.01.2023	
Heide, Daniel (IAL)		7. Form der Publikation	
Kessler, Alois (EnBW)		-	
8. Durchführende Institution(en) [Name, Adresse]		9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
SkySails Power GmbH	Wendenstraße 375 20537 Hamburg	-	
Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz-Universität Hannover	Welfengarten 1 30167 Hannover	10. Förderkennzeichen	
		01180363/1; 0324217A	
		11. Seitenzahl	
Omexom Renewable Energies Offshore GmbH	Bahnhofstraße 7 26122 Oldenburg	93	
		13. Literaturangaben	
EnBW Energie Baden-Württemberg AG	Durlacher Allee 93 76131 Karlsruhe	7	
		14. Tabellen	
12. Fördernde Institution [Name, Adresse]		5	
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 53107 Bonn		15. Abbildungen	
		45	
16. Zusätzliche Angaben			
-			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
-			
18. Kurzfassung			
<p>Seit 2019 betreibt SkySails Power in Nordfriesland mit einer vollautomatisierbaren Flugwindkraftanlage Grundlagenforschung im Bereich der Höhenwindenergie. Nach Kenntnis der Autoren existiert zum Berichtszeitpunkt weltweit keine Flugwindkraftanlage, die mehr Flugstunden erreicht hat. Über den Projektverlauf wurden entscheidende Fortschritte im Bereich Anlagenautomation, Flugautomation und Kitekonstruktion erzielt. Der Markt für die SkySails-Anlagen liegt im ersten Schritt in Regionen, in denen die Stromgestehungskosten aufgrund von Dieselerzeugung sehr hoch sind. An diesen Standorten können Flugwindkraftanlagen eine ökonomisch sinnvolle und gleichzeitig nachhaltige Alternative darstellen.</p> <p>Nach Abschluss der schalltechnischen und avifaunistischen Untersuchungen konnten alle Genehmigungen eingeholt werden, die einen Weiterbetrieb der Pilotanlage in Nordfriesland auch nach Vorhabensende ermöglichen. Es handelt sich aktuell weltweit um den Teststandort mit den günstigsten Bedingungen zur Erforschung von Flugwindkraftanlagen.</p> <p>Durch die Pilotanlage konnte das Betriebskonzept umfänglich validiert, sowie wesentliche Erkenntnisse über die Haltbarkeit von Kites und Seilen im realen Flugbetrieb gesammelt werden. Durch verschiedene Laboruntersuchungen konnten insbesondere Naht- und Fügeverfahren bewertet und verglichen werden. Ebenso wurden verschiedene Kite-Materialien im Labor- und Realeinsatz geprüft.</p>			
19. Schlagwörter			
Höhenwindenergie, Flugwindkraftanlage, Airborne Wind Energy			
20. Verlag		21. Preis	
-		-	

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	7
I.1. Aufgabenstellung	7
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
I.3. Planung und Ablauf des Gesamtvorhabens	9
2018 – 1tes Vorhabensjahr	9
2019 – 2tes Vorhabensjahr	9
2020 – 3tes Vorhabensjahr	10
2021 – 4tes Vorhabensjahr	11
2022 – 5tes Vorhabensjahr	11
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde	12
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
II. Eingehende Darstellung	14
II.1. Vergleich der Ziele zu den erzielten Ergebnissen im Einzelnen	14
AP1: Projektmanagement	14
AP1: Projektmanagement – Stakeholder TenneT	14
AP1: Projektmanagement – Verkehrsrechtliche Anordnung	15
AP1: Projektmanagement – Standortplanung	16
AP2: Systemdefinition und Konzeptvalidierung	16
AP2.7: Testflüge	17
AP3: Konstruktion Station	18
AP3.1: Zugwindenkonstruktion	18
AP3.2: Reffwindenkonstruktion	18
AP3.3: Arrangementkonstruktion – Unterkonstruktion	18
AP3.3: Arrangementkonstruktion – Stauen und Bergen	19
AP3.4: Mastkonstruktion – Allgemein	20
AP3.4: Mastkonstruktion – Führungsleinenübergabe	20
AP4: Entwicklung fliegendes System	21
AP4: Entwicklung fliegendes System – Projekt „Variable Trim“	21
AP4.1: Gondelkonstruktion	22
AP4.1: Gondelkonstruktion – Ram-Air-Turbine	22
AP4.1: Gondelkonstruktion – Gondelprüfstand	22
AP4.2: Kitekonstruktion – Sollbruchstelle / Nottrennsystem	23
AP4.2: Kitekonstruktion – Kitematerialien	23
AP4.2: Kitekonstruktion – Materialprüfungen	24
AP4.3: Seilkonstruktion	26
AP5: Entwicklung Steuerung und Software	27
AP5.1: Autopilot-Entwicklung	28
AP5.2: Gondelsoftware	31
AP5.3: Software in der Bodenstation	32
AP5.3: Software in der Bodenstation – grafische Benutzeroberfläche	33
AP5.4: Anlagen-Automation	34

AP6: Elektronik-Entwicklung und Elektro-Konstruktion.....	36
AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Gondel.....	36
AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Funkstrecke	36
AP6.2: Elektro-Konstruktion	37
AP6.2: Elektro-Konstruktion – Energiemanagement Bodenstation	38
AP6.2: Elektro-Konstruktion – Netzanschluss	38
AP7: Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkonzeppte	39
AP8: Entwicklung Antriebstrang	45
AP9: Beschaffung und Fertigung der Pilotanlage	46
AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung.....	48
AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung – Luffahrt.....	49
AP11: Kommerzialisierungsstrategie einer Flugwindkraftanlage zur Verwertung der Höhenwindenergie.....	55
AP12: Aufstellung Forschungsanlage und AP13: Inbetriebnahme	57
AP14: Erprobung der Flugwindkraftanlage.....	58
AP14: Generierung von Testdaten.....	58
AP14: Weiterentwicklung Design und Automatisierung.....	60
AP14: Verbesserung der Effizienz des Energie-Erzeugungs-Zyklus	60
AP14: Dauerbetrieb der Pilotanlage	60
AP14: Verifizierung Volllaststunden und der prognostizierten Stromgestehungskosten.....	61
AP14: Prüfung der Haltbarkeit der Komponenten	62
AP14: Optimierung von Steuerungssoftware und Flugstrategien	62
AP14: Verbesserungsmaßnahmen an Bodenstation und fliegendem System.....	63
II.2. Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis.....	64
II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	64
II.4. Voraussichtliche Verwertbarkeit (im Sinne des Verwertungsplans)	64
II.5. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Vorhabensgebiet bei anderen Stellen	65
II.6. Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	66
Anhang A: Erneute Bekanntmachung der ED-R SkySails nach Evaluation.....	67
Anhang B: III. Erfolgskontrollbericht (vertraulich).....	69
III.1. Beitrag zu förderpolitischen Zielen	70
III.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und gesammelte Erfahrungen.....	70
AP2: Systemdefinition und Konzeptvalidierung	71
AP3: Konstruktion Station	71
AP3.2: Reffwindenkonstruktion.....	71
AP3.3: Arrangementkonstruktion – Unterkonstruktion	71
AP3.3: Arrangementkonstruktion – Stauen und Bergen	72
AP3.4: Mastkonstruktion – Führungsleinenübergabe	73
AP4: Entwicklung fliegendes System	73
AP4: Entwicklung fliegendes System – Projekt „Variable Trim“	74
AP4.1: Gondelkonstruktion.....	74
AP4.1: Gondelkonstruktion – Ram-Air-Turbine.....	74

AP4.1: Gondelkonstruktion – Gondelprüfstand	75
AP4.2: Kitekonstruktion – Sollbruchstelle / Nottrennsystem	76
AP4.2: Kitekonstruktion – Kitematerialien	77
AP4.2: Kitekonstruktion – Materialprüfungen	77
AP4.3: Seilkonstruktion	79
AP5: Entwicklung Steuerung und Software	80
AP5.1: Autopilot-Entwicklung	80
AP6: Elektronik-Entwicklung und Elektro-Konstruktion.....	80
AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Gondel	80
AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Funkstrecke	81
AP6.2: Elektro-Konstruktion – Energiemanagement Bodenstation	81
AP6.2: Elektro-Konstruktion – Netzanschluss	82
AP8: Entwicklung Antriebstrang	83
AP9: Beschaffung und Fertigung der Pilotanlage	84
AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung - Luffahrt.....	84
AP14: Erprobung der Flugwindkraftanlage.....	86
AP14: Verbesserung der Effizienz des Energie-Erzeugungs-Zyklus	86
AP14: Generierung von Testdaten	87
AP14: Weiterentwicklung Design und Automatisierung	87
AP14: Dauerbetrieb der Pilotanlage	89
AP14: Verbesserungsmaßnahmen an Bodenstation und fliegendem System	89
III.3. Fortschreibung des Verwertungsplanes	90
Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen/Schutzrechte	90
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	91
Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	92
Wissenschaftliche und technische Anschlussfähigkeit	92
III.4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	93
III.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	93
III.6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	93

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AWES	Airborne Wind Energy System, engl. für Flugwindkraftanlage
BMVI (bis 2021)	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMDV (ab 2021)	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
DRF	DRF Luftrettung, vormals „Deutsche Rettungsflugwacht e.V.“
dB	Maßeinheit des Schalldruckpegels in Dezibel
ED-R	Gebiet mit Flugbeschränkung (Flugbeschränkungsgebiet)
EnBW	EnBW Energie Baden-Württemberg AG
FWKA	Flugwindkraftanlage, s. AWES
GUI	Graphical User Interface, engl. für Software-Nutzeroberfläche
IAL	Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz Universität Hannover
LLUR	Immissionsschutzbehörde – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
LBV-SH	Luftfahrtbehörde – Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein
MELUND	Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein
NOTAM	Notice to Airmen
Omexom	Omexom Renewable Energies Offshore GmbH
RAT	Ram-Air-Turbine, Windturbine zur Stromversorgung der Steuergondel
SkySails	SkySails Power GmbH
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm

I. Kurze Darstellung

I.1. Aufgabenstellung

Das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Verbundvorhaben SkyPower100 hat eine Flugwindkraftanlage (*Airborne Wind Energy System – AWES*) zur Nutzung von Höhenwindenergie realisiert, mit der seitdem die Grundlagen für einen vollautomatischen Dauerbetrieb erforscht werden. Die Erprobung der Anlage sollte vor allem dem Nachweis und der Optimierung der Stromproduktion dienen, um das Potential der Technologie zu bestätigen und die Wirtschaftlichkeit späterer Anlagen der Megawatt-Klasse abzuschätzen. Außerdem sollten im Dauerbetrieb die Haltbarkeit der verwendeten Komponenten und Materialien geprüft werden.

Die Entwicklung der Bodenstation und des fliegenden Systems wurde eigenverantwortlich von der SkySails Power GmbH durchgeführt. Dies erforderte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Entwicklungsteams aus Mechanik, Software, Kite-Entwicklung, Elektrik, Elektronik, Systemengineering und Autopilot-Entwicklung.

Für einen wirtschaftlichen Flugbetrieb ist sowohl der generatorische (hohes Drehmoment, niedrige Drehzahl) wie auch der motorische Betrieb (niedriges Drehmoment, sehr hohe Drehzahl) in effizienter Weise abzubilden. Diese Spreizung ist mit kommerziell verfügbaren Antriebsträngen, die nicht für dieses Systemverhalten ausgelegt sind, mit hohen Verlusten verbunden bzw. schlicht nicht erreichbar. Hinzu kommt eine hohe Lastwechseldynamik am Umrichter, die insbesondere bei der Regelung und Integration in das Versorgungsnetz zu berücksichtigen ist.

Die Entwicklung des auf diese Herausforderungen angepassten Antriebsstrangs erfolgte federführend durch das Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz Universität Hannover. Die Erprobung des Antriebstrangs im Labor und dessen Feldeinsatz diente der Grundlagenforschung zur Skalierung in die MW-Klasse.

Die Verbundpartnerin Omexom Renewable Energies Offshore GmbH (ehem. EWE Offshore Service & Solutions GmbH) hat die Themen Standortsuche, Genehmigung und Infrastruktur der Pilotanlage verantwortet. Im Rahmen der Genehmigung wurden systematisch die Umwelteinflüsse untersucht.

Durch die EnBW Energie Baden-Württemberg AG wurden Genehmigungsvoraussetzungen, Umwelteinflüsse und Sicherheitsaspekte von Flugwindkraftanlagen untersucht. Dabei lag der Fokus auf einer generischen Untersuchung der internationalen Gegebenheiten.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Idee der Nutzung von Höhenwindenergie durch Flugwindkraftanlagen geht zurück auf eine 1980 von Miles L. Loyd publizierte Arbeit. Es dauerte anschließend noch zwei Jahrzehnte, bis in nennenswertem Umfang theoretische und experimentelle Untersuchungen von Flugwindkraftanlagen einsetzten. Ab dem Jahr 2000 ist ein nahezu exponentiell ansteigendes Interesse zu beobachten; zunächst bei universitären Einrichtungen und Instituten, seit 2010 jedoch auch stark zunehmend bei Wirtschaftsunternehmen. Derzeit beschäftigen sich weltweit über 50 Unternehmen und Forschungseinrichtungen mit dem Thema Höhenwindenergie. Zum Zeitpunkt des Vorhabenbeginns war weltweit noch kein AWES mit automatisierten Start- und Landekonzept demonstriert worden.

Flugwindenergieanlagen, die nach dem Pumping-Cycle-Prinzip funktionieren, durchlaufen alle einen Powercycle; dieser beginnt mit der reel-out-Phase (engl. für Auswischen), bei der das fliegende System im Achtenflug hohe Kraft erzeugt, wodurch am Boden Strom generiert wird. Erreicht das Seil eine bestimmte Länge, geht das System in die Top-Transition-Phase, bei der das fliegende System in eine kraftarme Position geflogen wird, die das Einwischen (reel-in) mit geringem Energieeinsatz ermöglicht. In der reel-in-Phase wird das fliegende System so schnell wie möglich eingezogen, um die Effizienz des Powercycles zu erhöhen. Sobald das System ausreichend eingewünscht ist, wird der Kite in der Bottom-Transition-Phase wieder in den Wind gesteuert, damit die nächste reel-out-Phase (und damit der nächste Powercycle) beginnen kann.

Eine Aufstiegserlaubnis für Flugwindkraftanlagen über 100 m ist nicht ohne Weiteres zu erlangen, weil alle bekannten AWES-Prototypen von bisher aufgestellten deutschen Kennzeichnungsvorschriften abweichen. Der Gesetzgeber fordert bei seilförmigen Hindernissen Fahnen bzw. Beleuchtungen am Seil. Dies mag eine realisierbare Anforderung späterer Anlagen sein, läuft aber dem Projektziel entgegen, die Leistungsfähigkeit des Anlagenkonzepts zu demonstrieren. Zum einen, weil die zu erwartende Ertragsminderung bei den ersten Prototypen sehr hoch wäre, zum anderen, weil für dieses zusätzliche Entwicklungsprojekt keine personellen und materiellen Ressourcen bereitstehen.

1.3. Planung und Ablauf des Gesamtvorhabens

2018 – 1tes Vorhabensjahr

Zu Beginn des Vorhabens nutzte die Forschungs- und Entwicklungsabteilung (F&E) von SkySails Power den als „Phase1-Anlage“ definierten Aufbau als Testanlage (s. Abbildung 1). Die von der genehmigenden Landesluftfahrtbehörde LBV-SH einzuholenden Aufstiegsgenehmigungen für den Einsatz des Drachens im Luftraum Golf (unkontrollierter Luftraum oberhalb 100 m) beschränkten den Flugbetrieb zunächst auf einzelne Tage. Hierbei konnten alle grundlegenden Funktionsprinzipien erfolgreich validiert werden (d.h. insbesondere Funkstrecke, Starten und Landen, Reffsystem).



Abbildung 1: Phase1-Anlage in Reinsbüttel (30 kW, 400 m Seillänge, max. Kitegröße 40 m²)

Parallel hierzu wurden Konzepte für das Autopilot- und Steuerungssystem erstellt, die Software-Architektur sukzessive iterativ entwickelt, sowie Komponenten für die skalierte Flugwindkraftanlage (Phase2-Anlage) entwickelt und ausgewählt. Die Anforderungen bzw. Auslegungsparameter wurden mit einem eigenentwickelten Simulator ermittelt.

Um den geplanten, umfassenden Anlagenbetrieb im Luftraum realisieren zu können sind zeitlich längerfristige bzw. unbefristete Genehmigungen notwendig. Nach umfassenden Erörterungen mit der Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) teilte die Landesluftfahrtbehörde SH mit, dass man einem zeitlich unbefristeten Flugbetrieb einer Flugwindkraftanlage bis 700 m Flughöhe nur zustimmen würde, wenn ein Flugbeschränkungsgebiet (sog. ED-R) durch den Bund eingerichtet wird. Der nicht-autorisierte Einflug in die ED-R stellt eine Straftat dar, wodurch ein hoher Sicherheitsstandard erreicht wird.

2019 – 2tes Vorhabensjahr

Auf der Grundlage der Einstufung der Höhenwindkraft als wirtschaftlich relevanten Forschungs- und Entwicklungsbereich durch das Bundeswirtschaftsministerium konnte das

Bundesverkehrsministerium die Einrichtung einer ED-R prüfen und umsetzen. Die DFS wurde angewiesen, unter Bewertung der aktuellen Luftraumnutzung und Nähe zu Flugplätzen, aus mehreren Standortvorschlägen den bestmöglichen Standort für einen zukünftigen Forschungsstandort vorzuschlagen. Nach eingehender Diskussion mit allen zuständigen Abteilungen des BMVI, der DFS und der LBV-SH wurde Klixbüll als der konfliktärmste Standort ausgewählt. Die DRF Luftrettung betreibt am Krankenhaus Niebüll eine Hubschrauber-Station; für die Aufstiegs Genehmigung war es notwendig, dass SkySails gemeinsam mit der DRF eine Betriebsabsprache ausarbeitet und formal implementiert. Diese erlaubt es den Rettungsfliegern zu jedem Zeitpunkt per Funk den Flugbetrieb von SkySails Power zu unterbrechen, und das Fluggebiet zu kreuzen. So wird sichergestellt, dass die medizinische Versorgung der Region nicht beeinträchtigt wird.

Es wurden von den Projektpartnern umfassende Einzelgenehmigungen eingeholt, die für den Beginn des Flugbetriebs in Klixbüll notwendig waren. Besonderes Augenmerk legten die Behörden auf die Teilsysteme, die die Sicherheit von Menschen am Boden und in der Luft erhöhen. Dazu gehören u.a. Alarmsystem, Transpondererkennung, Überlast-Sollbruchstelle inkl. Fangleine, und die manuelle Trennvorrichtung. Diese Systeme sollen verhindern, dass der Kite den Seilradius verlässt, oder dass Luftfahrzeuge in das Seil fliegen. Der Erstflug der Phase2-Anlage fand am Jahresende 2019 statt (s. Abbildung 2).

2020 – 3tes Vorhabensjahr

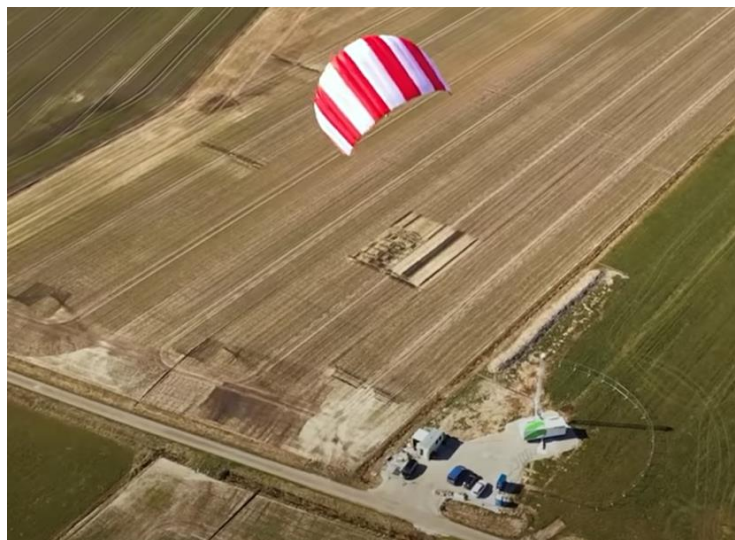


Abbildung 2: Phase2-Anlage (Größe des fotografierten Kites 90 m²)

Im ersten Jahr des umfassenderen Flugbetriebs konnten große Fortschritte bei der Parametrierung und Bedienung des Autopiloten durch die Flugcrew vor Ort erzielt werden. Die erzeugten Flugdaten und Erfahrungen vom Feld konnten unmittelbar für die Weiterentwicklung in den verschiedenen Abteilungen genutzt werden. Es wurde eine spezielle kaskadierte Softwarearchitektur entwickelt, die es ermöglichte, Software-Updates während der kurzen Flugpausen remote zu installieren, und direkt im zeitnahen Testbetrieb zu erproben. Dies beschleunigte den Testbetrieb erheblich.

Die zeitlich eingeschränkten Genehmigungen der Immissionsschutzbehörde LLUR und der Unteren Naturschutzbehörde erforderten ein Monitoring und die Untersuchung der Schallimmissionen sowie des Einflusses der Flugwindkraftanlage auf naturschutzrechtliche Belange. Beide Untersuchungen verliefen positiv und veranlassten die Behörden dazu, die Auflagen bzgl. der Begrenzung der Flugtage sowie den Nachtflügen fallen zu lassen.

2021 – 4tes Vorhabensjahr

Die mit der Ausbreitung von COVID-19 verbundenen Kontaktbeschränkungen und Hygieneauflagen haben den Testbetrieb an der Pilotanlage stark eingeschränkt, die sonstige Arbeit der F&E aber vergleichsweise wenig beeinträchtigt. Die Fertigung des Antriebstrangs, sowie des zugehörigen Antriebsprüfstands waren ebenfalls betroffen.

Aufgrund indirekter Nebeneffekte der Pandemie – z.B. Beschaffungsschwierigkeiten am Halbleitermarkt – wurde die Erreichung von Entwicklungsziele insgesamt jedoch erheblich verzögert. Aus diesem Grund wurde 2021 eine Projektverlängerung um neun Monate bis 30.06.22 beantragt. Hierdurch konnten trotz der Verzögerungen in den Fertigungsprozessen die folgenden Arbeitspakete zur Untersuchung des neuentwickelten Antriebstrangs wie geplant abgeschlossen werden.

Die Fokuse der F&E von SkySails Power lagen in der Automatisierung der Anlage, der Erhöhung des Energieertrags, und der Entwicklung des Stauen- und Bergen-Systems. Genehmigungsrechtlich stellte es eine unerwartete Herausforderung dar, dass 2022 am Rande des Flugbereichs die Westküstenleitung errichtet werden soll: eine Stromtrasse nach Dänemark, die die EU-Kommission als Vorhaben von gemeinsamem Interesse gekennzeichnet hat. Um der Betreibergesellschaft TenneT TSO GmbH versichern zu können, dass weder Bau noch Betrieb der Stromtrasse durch die Flugwindkraftanlage beeinträchtigt werden, wurde ein Gutachten des TÜV Süd in Auftrag gegeben.

2022 – 5tes Vorhabensjahr

Der TÜV Süd stellte in seiner gutachterlichen Stellungnahme vom 10.08.22 fest:

Die Auslegung der Komponenten erfolgte gemäß geeigneter Standards oder Regeln der Technik und die getroffenen Maßnahmen und Vorkehrungen werden als geeignet erachtet, das Risiko des Verlassens des Flugbereichs ausreichend zu reduzieren, um einen Betrieb befürworten zu können.

- Gutachterliche Stellungnahme 3555154-1-d Rev. 2

Da von allen beteiligten Trägern öffentlicher Belange eine Fortsetzung des Flugbetriebs bis mindestens Oktober 2024 genehmigt wurde, bleibt der Forschungsstandort Klixbüll auch nach Vorhabensende erhalten. Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner mit den beteiligten Behörden und Stakeholdern konnten in den vergangenen drei Jahren von allen Seiten positive Erfahrungen gesammelt werden.

Die für die wirtschaftliche Erfolgsaussicht notwendige positive Validierung der Ertragsprognosen konnte mit den neuentwickelten, voll skalierten Kite-Prototypen erreicht werden. Die Voraussetzungen für eine Skalierung der Technologie in die nächste Größenklasse ist gegeben (s. Seite 60, „AP14: Verbesserung der Effizienz des Energie-Erzeugungs-Zyklus“).

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Die SkySails Group zählte weltweit zu den führenden Experten auf dem Gebiet der Flugregelung automatisierter Drachen, insbesondere was Betriebserfahrung und Automation betrifft. Durch die von SkySails in den Vorjahren entwickelten Schiff-Systeme kann die SkySails Group auf langjährige Erfahrung im Bereich Flugregelung und Automation zurückgreifen. Auch das Start- und Landekonzept wurde früh validiert. In der Konstruktions- und auch Betriebserfahrung von hochfesten Kites aus Tuchmaterialien mit Größen bis zu 400 m² und Flächenlasten bis zu 1 kN/m² hat die SkySails Group ein weltweites Alleinstellungsmerkmal. Das Schiffsystem hat bis zu 2 MW Antriebsleistung ersetzen können.

Mit der Phase1-Anlage war die Implementierung und experimentelle Demonstration von vollautomatischen Energieerzeugungszyklen basierend auf dynamischen Achten und einer Rückholphase erfolgt. In Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg war die numerische Optimierung von Energieerzeugungszyklen demonstriert worden.

Konstruktive Detail-Beschreibungen sind und waren in der Literatur kaum zu finden. Viele technische Ideen konnten Patenten und Gebrauchsmustern entnommen werden, wie z.B. Details zu Setzen, Bergen und Stauen. Die meisten dieser patentierten Lösungsideen wurden nicht realisiert, und daher nicht umfassend auf Praxistauglichkeit geprüft.

Heute sind mehr öffentlich Informationen verfügbar als zu Projektbeginn. Insbesondere sei hier die Webseite des durch SkySails mitgegründeten Branchenverbands www.airbornewindeurope.org genannt, sowie die von Roland Schmehl veröffentlichten Bücher „*Airborne Wind Energy*“¹ und „*Airborne Wind Energy – Advances in Technology and Development*“², in denen Beiträge von diversen Akteuren zusammengestellt wurden - u.a. SkySails.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Standortgenehmigung war SkySails Power mit zahlreichen Stellen im Austausch, u.a.

- Luftfahrtbehörden bzw. -organisationen (Bundesverkehrsministerium, Landesluftfahrtbehörde Schleswig-Holstein, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH)
- Behörden des Landes Schleswig-Holstein (MELUND, LLUR)
- Behörden des Kreises Nordfriesland (Bauamt, Naturschutz, u.a.)

¹ Ahrens, Uwe\Moritz Diehl\Roland Schmehl: *Airborne Wind Energy*, Berlin, Deutschland: Springer-Verlag, 2013. (<https://doi.org/10.1007/978-3-642-39965-7>)

² Schmehl, Roland: *Airborne Wind Energy – Advances in Technology and Development*, Berlin, Deutschland: Springer-Verlag, 2018 (<https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0>)

- Gemeinde Klixbüll, Amt Südtondern, Stadt Niebüll
- Luftfahrt-Stakeholder (u.a. Bundeswehr, Bundespolizei, DRF Luftrettung, Sportfluggruppe Leck, Deutscher Aero Club)

Der Großteil der Vorprodukte und Bauteile wurde von deutschen Unternehmen bezogen. Zusammen mit regionalen Dienstleistern vor Ort konnte die Infrastruktur, sowie die Erschließung des Geländes und der Netzanschluss vorgenommen werden.

Erfahrungen vom Forschungsstandort werden fortlaufend mit Mitbewerbern in europäischen Gremien geteilt; dies geschieht über die aktive Zusammenarbeit in folgenden Gremien:

- International Energy Agency TCP Wind - Task 48 "Airborne Wind Energy"
- Branchenverband Airborne Wind Europe
- Fördergesellschaft Windenergie - Interessensgemeinschaft Flugwind

Die Schall- und Avifauna-Untersuchungen sind von SkyPower100 an Helena Schmidt (Arbeitsgruppe von Prof. Schmehl an der TU Delft) zur Nutzung in einem Forschungsprojekt zum Thema „Social Acceptance of AWES“ weitergegeben worden.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Vergleich der Ziele zu den erzielten Ergebnissen im Einzelnen

Die Arbeitsergebnisse der Projektpartner EnBW, IAL und Omexom werden in deren jeweiligen Abschlussberichten im Detail diskutiert.

AP1: Projektmanagement

AP1: Projektmanagement – Stakeholder TenneT

Die TenneT TSO GmbH (TenneT) ist damit beauftragt, die sog. Westküstenleitung zu planen, zu errichten, und zu betreiben. Diese Stromtrasse soll den Windstrom Richtung Süden transportieren und die Übertragungskapazität nach Dänemark erhöhen. Sie ist für den Wandel des deutschen Stromnetzes hin zu erneuerbaren Energien von überragender Wichtigkeit, und von der Europäischen Kommission als Vorhaben von gemeinsamem Interesse (PCI) gekennzeichnet, wodurch sie Priorität gegenüber nationalen Vorhaben hat.

Einer der möglichen Planungskorridore verlief 2019 exakt durch das Fluggebiet der Pilotanlage. Der TenneT wurde darum von SkySails schriftlich versichert, dass die Pilotanlage Ende 2021 zurückgebaut wird, um das Planungsverfahren nicht zu behindern. Die Errichtung der Stromtrasse würde frühestens 2022 beginnen; zumindest für den ursprünglich geplanten Vorhabenszeitraum hätte also kein Konflikt zwischen dem Forschungsbetrieb und der Trassenplanung bestanden.

Ein entwickeltes strukturiertes Sicherheitskonzept war die Grundlage des Betriebes der Anlage. Für die TenneT wäre es nicht akzeptabel, wenn Teile des fliegenden Systems (Kite oder Seil) den Sicherheitsradius um die Bodenstation verlassen und Teile der Stromtrasse beschädigen würden. Hier greift das Sicherheitskonzept von SkySails, dass ein Verlassen des Sicherheitsradius dadurch verhindert wird, dass die Bruchlast des Seils ein Vielfaches von der maximalen Last beträgt, die von einer Sollbruchstelle am Kite übertragen werden kann. Parallel zu der Sollbruchstelle verläuft eine Fangleine, die den Kite mit dem Zugseil verbindet. Sie ist so platziert, dass sie keine Zugkraft am Kite erzeugen kann. Dadurch hat das Auslösen der Sollbruchstelle ein sofortiges Absinken der Zugkraft am Hauptseil zur Folge; der Kite würde immer innerhalb des Sicherheitsradius zu Boden trudeln.

Bei einem Abstimmungstermin zwischen SkySails und TenneT wurde eine Einigung erreicht, die den Forschungsbetrieb über den September 2021 hinaus ermöglicht – mindestens bis Projektende von SkyPower100 am 30.06.22. Teil dieser Einigung war, dass SkySails sicherheitstechnische Nachweise erbringt. 2022 hat SkySails mit dem TÜV Süd einen Nachweis erarbeitet, dass durch den Flugbetrieb kein erhöhtes Risiko für die benachbarte Stromtrasse, ihren Betrieb, oder den beim Bau involvierten Monteuren und Arbeitern besteht (s. "2022 – 5tes Vorhabensjahr" auf Seite 11). Daraufhin hat die TenneT einem Betrieb der Anlage bis Oktober 2024 zugestimmt.

Zum Bau der Stromtrasse war es notwendig, dass von der TenneT beauftragte Hubschrauber in das Flugbeschränkungsgebiet einfliegen können. In Rücksprache mit den Zuständigen bei der deutschen Flugsicherung (DFS) wurde ein Prozess vereinbart, der dies rechtssicher ermöglicht.

AP1: Projektmanagement – Verkehrsrechtliche Anordnung

In Bezug auf die verkehrsrechtliche Anordnung wurde mit dem Amt Südtondern vereinbart, die Parametrisierungsphase in den ersten Monaten von dem längerfristigen Betrieb der Anlage zu trennen. Während der Parametrisierungsphase sollten die Betriebsgrenzen der Pilotanlage geprüft und Stresstests durchgeführt werden; hierbei konnte nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass das fliegende System innerhalb des Flugradius abstürzt. Aus Sicherheitsgründen waren in diesem Zeitraum während des Flugbetriebs die Zufahrtstraßen für Fahrzeuge und Fußgänger gesperrt. Landwirte hatten dabei trotz Sperrung die Möglichkeit, jederzeit nach telefonischer Anmeldung ihre Felder zu erreichen; entweder wurde der Flugbereich über dem entsprechenden Feld vermieden; im Zweifelsfall sollte der Kite gelandet werden. Da dieses Prozedere für beide Seiten im Ergebnis unkompliziert, effektiv und sicher war, wurde es danach nicht angepasst.

Nach dieser erfolgreichen Parametrisierungsphase wurde eine Anpassung der Verkehrsrechtlichen Anordnung in Hinblick auf den absehbaren Dauerflug vereinbart. Bis zum Ende der Projektlaufzeit wurde dauerhaft und unabhängig vom tatsächlichen Flugbetrieb mit Schildern „Achtung Gefahrenstelle, Testbetrieb – Flugwindkraftanlage“ gewarnt. Dies ähnelt dem Vorgehen bei konventionellen Windenergieanlagen, bei denen Warnschilder „Achtung Eiswurf“ vor der möglichen Gefahrenquelle warnen. Eine Sperrung fand nur dann statt, wenn aufgrund des Erprobens neuer Komponenten oder anderen bedeutenden Änderungen am System ein höheres Sicherheitsniveau erforderlich wurde. In 2021 und 2022 war dies nur noch selten nötig.



Abbildung 3: **Dauerhaft** aufgestellte Warnung vor Testbetrieb

AP1: Projektmanagement – Standortplanung

Die SkySails Power GmbH hat das Ingenieurbüro Struktur + Festigkeit Kiel beauftragt, das Bauvorhaben in Klixbüll zu planen. Dazu gehörten die Planung der Erdarbeiten, die Unterpallung der Anlage, die Erstellung der Unterlagen für den Bauantrag sowie die Begleitung des Bauvorhabens. Grund für die Wahl des Dienstleisters waren dessen Ortskenntnisse in Nordfriesland, dessen Erfahrung mit der Fundamentierung von herkömmlichen Windkraftanlagen, und die bereits erfolgte Zusammenarbeit.

AP2: Systemdefinition und Konzeptvalidierung

Um die Anforderungen an den Antriebstrang des IAL zu klären, hat SkySails 2018 eine Simulations- und Optimierungsumgebung programmiert, die Systemverbesserungen abbilden kann, um den zukünftig im Projektverlauf erreichten technischen Stand abschätzen zu können. Es wurde das bestehende Simulations- und Autopiloten-Modul der Phase1-Anlage verwendet, welches durch vergangene Flugversuche sehr gut validiert war. Hierzu musste das ursprünglich in Echtzeit laufende Autopilotmodul so in das System integriert werden, dass es um einen entsprechenden Faktor beschleunigt Simulationen durchführt. Ende Juni 2018 konnten erste Ergebnisse übermittelt werden. Um dem IAL Leistungs- und Dynamikanforderungen der Winde zur Verfügung zu stellen, wurden von SkySails analytische Berechnungen durchgeführt, die durch vorhandene Messdaten verifiziert wurden.

Anstelle des ursprünglich geplanten Mockups wurden, unter Zuhilfenahme des neu entwickelten Simulators, umfangreiche Konzeptstudien als Grundlage erstellt. Daraus wurde ein detaillierter 3D Entwurf für ein Arrangementkonzept der Phase2-Anlage erarbeitet. Dieses Vorgehen ermöglichte einen detailreicheren Vergleich von Konzepten und führte somit zu einer valideren Entscheidungsgrundlage.

Die Konzeptideen, wie eine Bodenstation aussehen könnte, wurden in 3D-CAD Modellen skizziert. In interdisziplinären Diskussions- und Bewertungsrunden wurden die Konzepte evaluiert und auch die Konzeptvielfalt nach einer Nutzwertanalyse reduziert. Ende Juni 2018 waren noch 3 Konzepte in der engeren Auswahl. Die Entscheidung wurde gefällt, als die Antriebsstrangkonstruktion weiter vorangeschritten war, und die Einbaugeometrie definiert vorlag.

Im Projektantrag war geplant, mittels eines Mock-Up-Modells aus Holz oder Kunststoff die Prozessabläufe festzulegen und daraus resultierende Erkenntnisse in das Arrangementkonzept der finalen Anlage einfließen zu lassen. Durch unerwartet rasche Fortschritte in der Mechanikabteilung wurde dieses Vorgehen obsolet. Die leitenden Ingenieure erkannten die Möglichkeit, durch vorgelagerte Versuche (Original-)Teile der Anlage frühzeitig unter Realbedingungen zu testen. Sollten bei diesen Versuchen Komplikationen auftreten, könnten diese Probleme bis zur Aufstellung der Anlage beseitigt werden. Auf diese Weise sollen Projektrisiken minimiert und der erfolgreiche Abschluss des Projektes im beabsichtigten Zeitraum sichergestellt werden.

Zur besseren Unterscheidung der fortschreitenden Entwicklungen wurden die Anlagen drei verschiedene Phasen zugeteilt:

- **Phase1-Maschine (ab 2018):** Das „kleine“ Funktionsmodell, das SkySails vor Projektbeginn für Testflüge und Flugshows verwendet hatte. Die Anlage besteht aus einem mobilen PKW-Anhänger, in dem der Generator und die gesamte Elektronik untergebracht sind. Als Teststandorte haben Reinsbüttel und Klixbüll im tageweisen Test gedient.
- **Phase2-Maschine (ab 2019):** Die 100 kW-Anlage, die im Dezember 2019 in Klixbüll in Betrieb ging. Es handelt sich um einen 30-Fuß-Container, der über eine Stahlkonstruktion drehbar auf drei Betonstreifen gelagert ist. In der Phase2 sollten insbesondere das Konzept des Holepunkt-Arrangements und das fliegende System validiert werden. Die Entwicklungen des IAL Hannover flossen noch nicht in die Entwicklung der Anlage ein. SkySails trug alle zusätzlichen Kosten, die durch diese Anlage entstanden.

Die Infrastruktur der Phase2-Maschine (z.B. Netzanschluss, Unterkonstruktion, Betonstreifen) war ebenfalls Grundlage für den Betrieb der Phase3-Maschine. Bis die Inbetriebnahme der Phase3-Maschine abgeschlossen war, waren in der Zwischenzeit mit der Phase2-Maschine umfangreiche Tests möglich. Äußerlich unterschied sich die Phase2-Maschine nur unwesentlich von der Phase3-Maschine.

- **Phase3-Maschine (ab 2022):** Diese 100 kW-Anlage beinhaltet alle Entwicklungen des IAL Hannover im Bereich Antriebstrang und Leistungselektronik.

Für einen wirtschaftlich attraktiven Transport muss die Anlage ein Standard-Containermaß einhalten. Die Verbindung zwischen Unterkonstruktion und dem Maschinencontainer ermöglicht die Drehung der Anlage um 360° und damit die Nachführung zum Wind. Ende 2018 waren die Geometrie sowie die wichtigsten mechanischen Komponenten abschließend festgelegt.

Durch die Inbetriebnahme der Phase2-Anlage Ende 2019 waren die Entwickler in der Lage, im Testbetrieb frühzeitig Probleme mit einzelnen Komponenten zu erkennen. So konnte auch das skalierte fliegende System sehr viel früher Praxistests unterzogen werden als geplant, was Weiterentwicklungen und Iterationen noch innerhalb des Projektzeitraums ermöglichte.

AP2.7: Testflüge

Im ersten Halbjahr 2019 wurden planmäßig mehrere Testflüge mit der Phase1-Anlage durchgeführt. Diese dienten in erster Linie dazu, fortwährende Entwicklungen am Autopiloten unter Realbedingungen zu testen und Parametrisierungen zu optimieren. Anschließend wurden keine Testflüge mehr mit der Phase1-Anlage unternommen, da der Fokus auf die Entwicklung der Phase2-Anlage gesetzt wurde.

AP3: Konstruktion Station

AP3.1: Zugwindenkonstruktion

Durch die Konstruktion des Motors (AP8, IAL Hannover) musste gleichzeitig die Konstruktion der Zugwinde angestoßen werden, was in dem ersten Halbjahr 2019 geschehen ist. Dabei mussten die besonderen Anforderungen an die Haltbarkeit des Seils berücksichtigt werden (Umlenkungen, Rillung, Wireguiding).

Der Hersteller der Phase2-Winde wurde beauftragt, die Winde für die Phase3-Maschine zu konstruieren. Die vom IAL Hannover entwickelten Motoren sollen von einem Dienstleister hergestellt werden. Die äußere Geometrie, die Lagerung und die Schnittstelle zwischen Anlagencontainer und Winde konnten im Voraus geklärt werden und waren für beide Phasen identisch. Im Inneren der Winde gibt es signifikante Unterschiede in der konstruktiven Gestaltung der Maschinen für beide Phasen. Die Zugwindenkonstruktion ist einer der zahlreichen Teilarbeitspakete, bei denen sich die Konstruktion der vorher nicht im Detail eingeplanten Phase2-Maschine positiv auf den Projektverlauf für die Phase3-Maschine ausgewirkt hat.

AP3.2: Reffwindenkonstruktion

Bei der in der Phase1-Anlage verwendeten Reffwinde wird das Seil in einer einzelnen Lage aufgewickelt; die Vorteile sind die unkomplizierte Realisierung, die geringe Fehleranfälligkeit, und dass man den Zustand des Seils und den Abspulvorgang leicht überwachen kann. Der Nachteil ist, dass die Windenlänge proportional mit der benötigten Seillänge ansteigt.

Aufgrund der höheren Seillänge war die Reffwinde der Phase1-Anlage nicht skalierbar, weswegen ein neues Konzept erarbeitet werden musste. Die Konstruktion einer neuen Reffwinde wurde 2019 begonnen und abgeschlossen. Das Konzept hat sich im anschließenden Testbetrieb bewährt.

AP3.3: Arrangementkonstruktion – Unterkonstruktion

Die Dimensionierung der Unterkonstruktion hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Anforderungen an die Betonstreifen, weswegen sich SkySails Power dazu entschieden hat, die Stahl-Unterkonstruktion ebenfalls von dem Ingenieurbüro konstruieren zu lassen, das auch den Bauantrag begleitet hat. Hierdurch verringerte sich der Abstimmungsbedarf zur Planung der Unterpallungen.

Alle Verbindungen der Unterkonstruktion lassen sich lösen, um einen einfachen und damit wirtschaftlich attraktiven Transport per LKW und Seecontainer zu ermöglichen. Die verwendeten Betonplatten sind ebenfalls so dimensioniert, dass man sie per LKW transportieren kann. Es wurde bewusst auf eine Bodenverankerung verzichtet, um den Installationsaufwand zu verringern. Die Anlage wurde so ausgelegt, dass sie durch ihr Eigengewicht und das der Betonplatten sicher lagert.

Die Phase2-Anlage wurde erfolgreich in Betrieb genommen; die technischen Zielvorgaben konnten erreicht werden. Die ergonomischen Anforderungen für Produktion, Service und Wartung waren ebenfalls erfüllt worden. Somit konnte das Arrangementkonzept mit der Phase2-Anlage erfolgreich validiert werden. Bei der Beschaffung war ersichtlich geworden, wie man Komponenten für die Phase3-Anlage fertigungsgerechter konstruieren kann.



Abbildung 4: Holepunktachse der Phase2-Anlage

AP3.3: Arrangementkonstruktion – Stauen und Bergen

Aufgabe des Stauen-und-Bergen-Systems ist es, das Kite-Material vor extremen Wettereinflüssen zu schützen: Sturm und Gewitter mit Starkregen und Hagel können dem Material zusetzen. Auch zusätzliche UV-Strahlung soll im gestauten Zustand vermieden werden. Verschiedene Konzepte wurden entwickelt und verglichen, wobei man sich für die Stauung des Kites in einem Kasten entschieden hat. Die Gondel ist Wettereinflüssen gegenüber deutlich robuster und soll zunächst nicht eingehaust werden. Die Stauung sieht vor, dass die Gondel zwischen Holepunkt und Leinenbaum unter dem Mast hängt.

Nach Einholen und Reffen des Kites sowie Legen des Mastes hängt der Kite für 15 Minuten am Mastadapter an der Mastspitze. Während dieses Zeitraums kann verbliebene Luft langsam aus dem Material entweichen, wodurch sich das Volumen des Kites reduziert. Dies geschieht im Windschatten des Containers der Bodenstation.



Abbildung 5: Behälter für die Kite-Stauung

Dieses Stauen-und-Bergen-System soll vollautomatisiert bis zu einer Windstärke von $20 \frac{m}{s}$ funktionieren. Die grundlegende Entwicklung im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde im März 2021 abgeschlossen. Es wurde eine Risikoanalyse und -bewertung des Stauprozesses durchgeführt, deren Ergebnisse in die weitere Entwicklung des Systems geflossen sind. Die Detailkonstruktion wurde im ersten Halbjahr 2021 abgeschlossen.

AP3.4: Mastkonstruktion – Allgemein

Der neue Mastadapter wurde 2019 entwickelt, gefertigt, und erfolgreich getestet. 2020 folgte eine erneute Überarbeitung.

AP3.4: Mastkonstruktion – Führungsleinenübergabe

Zunächst war keine Befestigung der Führungsleine an dem Hauptseil möglich; dies war erst nach Inbetriebnahme der Führungsleinenübergabe 2020 möglich. Die Führungsleinenübergabe befestigt und trennt die Verbindung der Führungsleine mit dem Hauptseil beim Start- und Landeprozess.

Die Montage und Inbetriebnahme der Führungsleinenübergabe erfolgen zu Beginn des zweiten Halbjahrs 2020. Der Holepunktarm und Holepunktscheibe mussten hierfür neu konstruiert bzw. angepasst werden. Bei der Inbetriebnahme konzentrierte man sich zunächst auf den Landeprozess, da das Landen (z.B. bei nahendem Unwetter) sicherheits- und zeitkritischer ist als das automatisierte Starten. Dabei wurden kleinere Mängel festgestellt, die in wenigen Wochen behoben werden konnten, so dass der Prozess ab dann zuverlässig unter Nennbedingungen funktionierte. Bei den nächsten Prototypen soll der Landeprozess noch robuster gestaltet werden, so dass das System auch unter widrigen Umständen seine Funktion erfüllt (z.B. wenn das fliegende System mit einer höheren Geschwindigkeit andockt, als man es im Nennbetrieb erwartet).

AP4: Entwicklung fliegendes System

Im Laufe des Projektzeitraums durchlief das fliegende System mehrere Iterationen und erfuhr stetige Weiterentwicklung, was weit über die Beschreibung des Arbeitspakets hinausging.

Es wurden nur Kites mit der Größe zwischen 40 - 160 m² für den Flugbetrieb verwendet. Prinzipiell sind große Leichtwindkites eher bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten effizient, kleine Starkwindkites bei hohen Windgeschwindigkeiten.

AP4: Entwicklung fliegendes System – Projekt „Variable Trim“

Für eine Steigerung der Energieausbeute des Pumping-Cycle-Prozesses ist es sinnvoll, die Flugeigenschaften im Energieerzeugungsprozess zyklisch zu verändern. An der Phase2-Anlage wurden verschiedene Mechanismen geprüft, um aerodynamische Veränderungen am Kite wie gewünscht einzustellen. Es stellte sich jedoch heraus, dass durch die geplanten Maßnahmen die Rückholphase nicht in dem Maß reduziert werden konnte, wie die Simulationen es vorhergesagt hatten.

Darum wurden 2021 grundlegend neue Steuerkonzepte entwickelt, deren Besonderheit darin besteht, dass neue, zusätzliche Aktuatoren die aerodynamischen Eigenschaften des Kites im Flug ändern. Der erste Prototyp verfügte neben dem Links-Rechts-Aktuator für den Kurvenflug, zusätzlich einen Vorne-Hinten-Aktuator zur Einstellung des Anströmwinkels. Hiermit konnte validiert werden, dass die aerodynamischen Änderungen zu den gewünschten Leistungssteigerungen führen. Eine Rollbewegung bei gleichzeitiger Trimmung war mit dem Konzept-Prototypen nur eingeschränkt durchführbar.

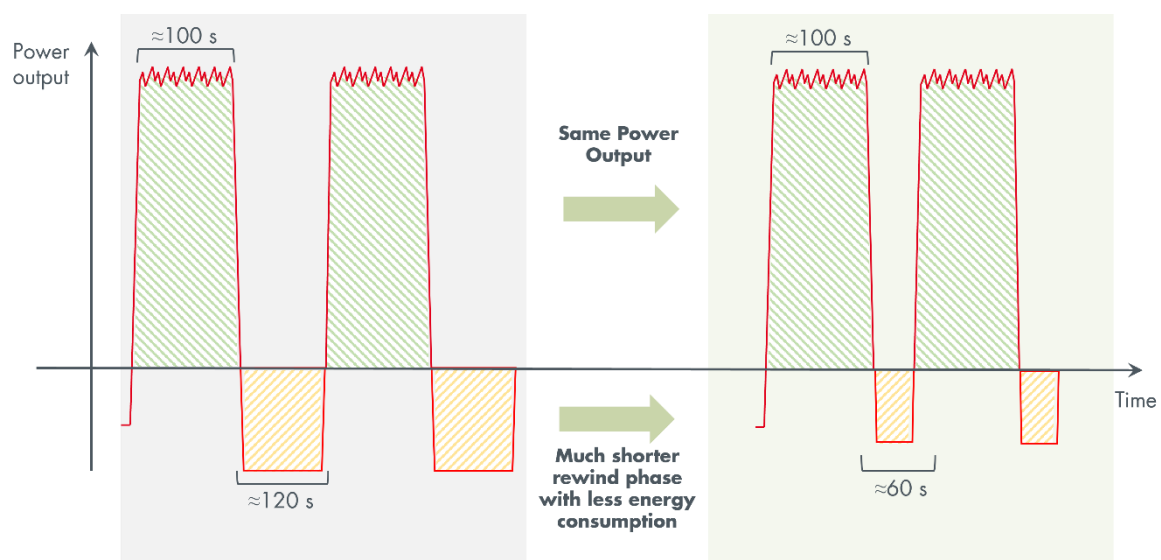


Abbildung 6: Prognostizierte Verbesserung der Effizienz des Powercycles durch Projekt „Variable Trim“

Um über den weiteren Entwicklungspfad zu entscheiden, wurden zwei verschiedene Steuerkonzepte entwickelt und im Feldeinsatz verglichen. Hauptsächlich erlaubt das neue Steuerkonzept eine schnellere und kraftärmere Rückholphase. Eine Absenkung des Energiebedarfs sowie eine zeitliche Verkürzung der Rückholphase bewirken eine deutliche Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades (s. Abbildung 6).

AP4.1: Gondelkonstruktion

Für den Gondelaufbau, den Antriebsriemen, den Gondelantrieb und das Material für den Kite wurden umfassende Entwicklungen und Abstimmungen mit Lieferanten vorgenommen. Es wurde die Konzeption und weitgehende Konstruktion von allen Teilen der Gondel vorgenommen: Struktur, Antriebsstrang Hauptantrieb, Antriebsstrang Aktor, Elektronikintegration sowie Sensorintegration.

Die lasttragende Gondelstruktur für die nächste Gondelgeneration wurde umfassend neu ausgelegt. Die veränderte Struktur hat Kosten gespart und ermöglichte eine schnellere Fertigung der Strukturbauteile. Aus Gewichtsgründen wurden die lasttragenden Bestandteile des Steuerriemens von Stahl auf Kohlefaser umgestellt. Es wurden ein entsprechender Riemen und Anschlusssteile spezifiziert, sowie Motor-Getriebe-Einheiten für die Bewegung des Steuerriemens besorgt.

Die Gondel für die Phase2 wurde erfolgreich beim Erstflug Dezember 2019 getestet. Eines der dringlichsten Testziele war festzustellen, ob das Flugverhalten der Gondel den Vorgaben entsprach, was durch Messung der Relativbewegungen zwischen Kite und Gondel überprüft wurde.

AP4.1: Gondelkonstruktion – Ram-Air-Turbine

Zunächst wurde die Gondel allein von Akkus mit Strom versorgt; später wurde eine *ram-air-turbine* (RAT) angeschlossen. Dabei handelt es sich um einen Windgenerator, der unter der Gondel befestigt wird und angetrieben vom Flugwind Strom erzeugt. Der Einfluss der RAT stellte sich erwartungsgemäß als unkritisch für Flugverhalten oder Systemleistung dar. Der Einsatz der RAT ermöglichte erstmals Dauerflüge, da die Akkus nicht am Boden geladen werden mussten. Dort zeigte sich, dass die RAT genügend Energie generierte, um die Batterie kontinuierlich auf einem hohen Ladezustand zu erhalten.

AP4.1: Gondelkonstruktion – Gondelprüfstand

Die Inbetriebnahme der Gondeln geschah während des Fördervorhabens im Feld, also direkt an der Pilotanlage. Dabei müssen die Gondeln für eine gewisse Zeitdauer fliegen und bestimmte Lastpunkte erreichen, damit die Entwickler die volle Funktionstüchtigkeit der Gondel garantieren können. Da man nicht mit einer ungeprüften Gondel in den regulären Stromerzeugungsbetrieb gehen kann, ist eine Inbetriebnahme nicht parallel zum Testbetrieb möglich.

Darüber hinaus wird der Forschungsbetrieb auch dadurch indirekt behindert, dass man keine geprüften und funktionsfähigen Gondeln in Reserve haben kann. Durch die schnelle, iterative Entwicklung werden sehr häufig Änderungen an den Gondeln vorgenommen, die eine erneute Inbetriebnahme erfordern würden. Es wäre also Ressourcenverschwendung, Gondeln an der Pilotanlage in Betrieb zu nehmen, die im Anschluss nicht eingesetzt werden. Fällt eine Gondel während des Betriebs aus, ist ein regulärer Testbetrieb erst nach Reparatur der defekten Gondel bzw. Inbetriebnahme einer neuen Gondel möglich – meistens aber nicht mehr am selben Tag.

Aus diesem Grund wurde ein Gondelprüfstand entwickelt und 2022 in Betrieb genommen, der Tests und Inbetriebnahme der Steuergondeln am Produktionsstandort in Seevetal ermöglicht.

AP4.2: Kitekonstruktion – Sollbruchstelle / Nottrennsystem

Zunächst verfügte das System über eine Sollbruchstelle, die unterhalb der Gondel lag. Bei Überlast reißt die Sollbruchstelle, aber das fliegende System bleibt durch eine Fangleine mit dem Hauptseil verbunden. Die Fangleine ist so am Kite angebracht, dass der Kite keine Kraft mehr auf das Hauptseil bringen kann; durch die Fangleine wird gleichzeitig verhindert, dass der Kite den definierten Flugbereich verlässt.

Als Teil des Sicherheitskonzepts wurde eine Trennvorrichtung entwickelt, die ferngesteuert das Hauptseil vom fliegenden System entkoppeln kann (ähnlich wie die Sollbruchstelle, die passiv auslöst). Das fliegende System würde in dem Fall zu Boden trudeln. Die Trennvorrichtung ist entsprechend nur als letzte Maßnahme im Notfall vorgesehen.

Obwohl das Seil sehr steif ist, dehnt es sich bei voller Länge über 750 Meter während des Flugbetriebs um einige Meter, wenn hohe Zugkräfte wirken. Wenn durch die Sollbruchstelle diese Zugkraft abrupt auf ein Minimum reduziert wird, zieht sich das Seil ruckartig zusammen, und der Kite würde ohne Fangsystem aufgrund der hohen Kraft zerstört werden, mit der er Richtung Anlage gezogen wird. Aus diesem Grund wurde ein Fangsystem entwickelt.



Abbildung 7: Test des Fangsystems am Forschungsstandort

Am Boden wurde ein Zugtest des Hauptseils durchgeführt, um die Sollbruchstelle und das Fangsystem zu validieren, und die Dynamik des Seils und des fliegenden Systems in einem solchen Falle besser einschätzen zu können (s. Abbildung 7). Das Fangsystem zur Aufrechterhaltung der Verbindung von Kite und Seil (im Fall der Auslösung der Sollbruchstelle) hat sich im Flugbetrieb bewährt.

AP4.2: Kitekonstruktion – Kitematerialien

Im ersten Halbjahr 2018 wurden zwei Ansätze zur Verbesserung der Materialeigenschaften zur Herstellung von SkySails Kites verfolgt. Für die kurzfristige Verbesserung wurden handelsübliche Materialien aus dem Kite- und Gleitschirm-Bereich verglichen und erforderliche Mengen für eine Prototypenfertigung bestellt. Für die langfristige Verbesserung wurden Muster von Herstellern von Hochleistungsmaterialien untersucht.

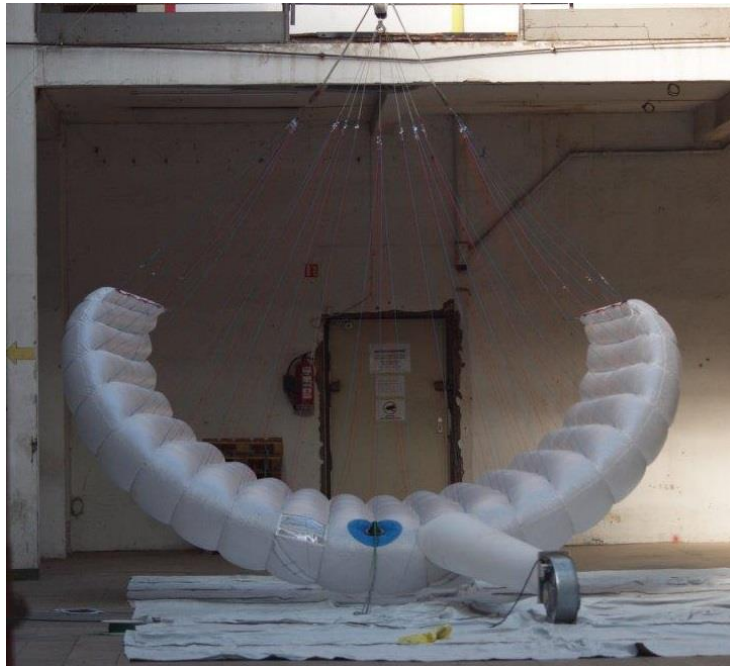


Abbildung 8: Kite-Prototyp in der Fertigungshalle

Eine der größten Herausforderungen bei der Kite-Entwicklung ist es, die Lebensdauer zu maximieren. Gewebte Materialien zeichnen sich durch eine rechtwinklige Verkreuzung der Fasern aus, die durch die Umlenkung der Fasern an den Kreuzungspunkten die Festigkeit des Gewebes senkt. Herkömmliche Materialien verschleißen häufig an den Kreuzungspunkten der Garne, an denen viel Reibung und somit Verschleiß auftritt. Dies wird in Kauf genommen, da die Verarbeitbarkeit des gewebten Halbzeugs sehr viel besser ist als das von Gelegen, die üblicherweise maschinell verarbeitet werden. Fasergelege weisen jedoch durch die fehlende Faserumlenkung sowie die Flexibilität in der Faserorientierung deutlich geeignetere mechanische Eigenschaften auf.

Da der eben beschriebene Verschleiß - neben der UV-Belastung - vermutlich zu einer verringerten Lebensdauer des Kites führt, hatte die Kite-Abteilung von SkySails Power 2019 einen neuen Kite-Prototypen entwickelt, der eine höhere Festigkeit bei deutlich geringerem Gewicht aufwies. Die Haltbarkeit der Kites aus herkömmlichen gewobenen Textilien konnte sukzessive verbessert werden.

AP4.2: Kitekonstruktion – Materialprüfungen

2019 wurde in Hamburg ein Teststand aufgebaut, mit dem die Lebensdauer der Kitematerialien und der Nähte unter zyklischer Belastung geprüft wurden. Neben dem herkömmlich verwendeten Textil wurden Hochleistungsmaterialien von unterschiedlichen Herstellern geprüft (s. Abbildung 9).



Abbildung 9: Berstkörper im Dauertest

Dabei wird der Luftdruck in den sog. Berstkörper zyklisch variiert, so dass sie pulsieren. Es wurden verschiedene Materialien und Nahttechniken geprüft. Die Berstkörper bestanden aus Stoffröhren, die in der Mitte einen festen Spanten haben. Damit ahmen die Stoffröhren prinzipiell die Kitestruktur nach. Die Belastungssituation der Naht im Powercycle konnte im Prüfstand nachgebildet werden – sowohl Richtung und Höhe der Belastung, als auch die zeitliche Varianz des Powercycles in Power- und Rückholphase.

Es liefen mehrere Testreihen parallel, um die Auswirkungen nach 1, 3 und 6 Monaten zu untersuchen. Im Mittelpunkt stand die Porosität des Materials sowie dessen Restfestigkeit, da diese für den Ertrag sowie der Verlässlichkeit des Systems entscheidend sind.

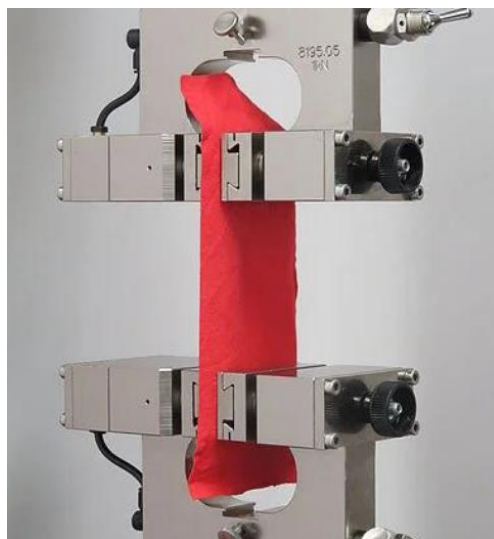


Abbildung 10: Zugversuch verschiedener Materialproben zum Prüfen von Füge- und Verstärkungstechniken

In Mauritius hat SkySails Power eine Witterungsprüfanlage installiert (s. Abbildung 11). Zwei Untersuchungen stehen im Vordergrund:

- Bei der Flächenwitterung wird eine Vielzahl von textilen Proben der Witterung ausgesetzt. Eine mechanische Belastung findet nicht statt.

- Die oben beschriebene Berstkörperbelastung wird unter freiem Himmel wiederholt. Parallel finden dieselben Prüfungen unter Laborbedingungen in Hamburg statt, dort jedoch unter künstlichem UV-Licht. Dabei soll geprüft werden, ob durch UV-Bestrahlung im Labor zukünftig auf Prüfungen unter Realbedingungen weitgehend verzichtet werden kann.

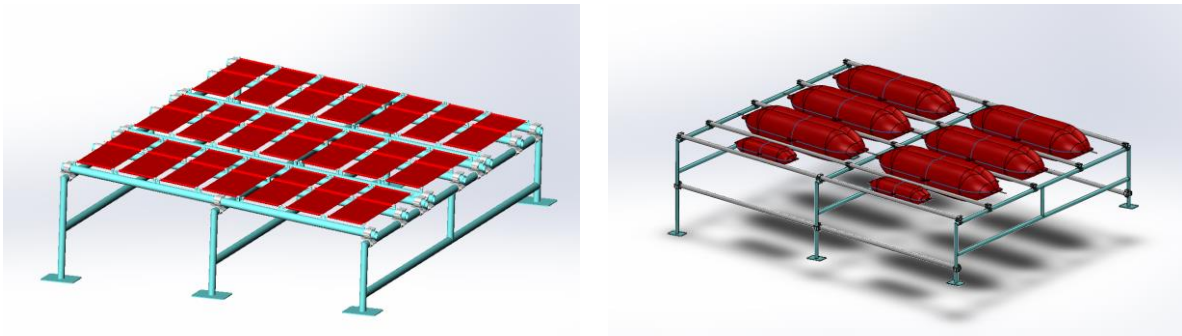


Abbildung 11: Flächenbewitterung und Berstkörperprüfung

Da man bereits Berstkörper-Prüfungen ohne UV-Bestrahlung durchgeführt hat, erhofft man sich, durch Vergleich der Proben die einzelnen Schadensmechanismen genauer untersuchen zu können.

AP4.3: Seilkonstruktion

Durch das typische Flugprofil während des Fliegens von Powercycles ergeben sich häufige Wechsel in der Biegerichtung des Seils, welche eine besondere Beanspruchung darstellen. Es wurden weltweit Hersteller von Spezialseilen evaluiert, und Seile von zwei verschiedenen Herstellern besorgt. Diese Seile wurden bis Vorhabensende an der Anlage verwendet.



Abbildung 12: Auf Biege-Wechsel-Belastung optimiertes Seil

Die gewählten Seile sind für Biege-Wechsel-Belastung optimiert, und verfügen über besondere Beschichtungen, die die Verschleißfestigkeit erhöhen. Neben der Biegewechsel-Belastung ist der Reibverschleiß an Winde und Umlenkrolle ein weiterer Faktor, der die Lebensdauer des Seils beeinflusst.

Je besser man den Zustand des Seils bestimmen kann (z.B. Überwachung der mechanischen Eigenschaften, optische Erfassung von Schädigungen, ggf. intelligente Bildverarbeitung), umso höher kann zukünftig die Lebensdauer des Seils ausgereizt werden. Bis dahin werden konservativen Berechnungsmethoden einen sicheren Betrieb gewährleisten, ohne den Zustand des Seils durch zusätzliche Methoden überwachen zu müssen.

AP5: Entwicklung Steuerung und Software

Das Steuerungssystem ist das „zentrale Nervensystem“ der SkyPower100 Anlage. Die Softwareentwicklung ist bei SkySails als eigenes Projekt strukturiert. Bei der Antragstellung für das Verbundvorhaben wurde angenommen, dass man die bereits vorhandene Softwarearchitektur von der Phase1-Anlage nur geringfügig anpassen müsste, um sie in der Phase3-Maschine verwenden zu können. Es stellte sich im zweiten Halbjahr 2018 heraus, dass man die Softwarearchitektur der Phase1-Anlage nicht nur geringfügig anpassen musste, sondern das Steuerungssystem komplett umgestellt werden musste. Der Grund war, dass viele der verwendeten Komponenten nicht mehr in derselben Form auf dem Markt erhältlich waren oder in absehbarer Zeit nicht mehr geliefert werden konnten, weil sie abgekündigt würden. Ein Beispiel war die SPS (*Speicherprogrammierbare Steuerung*)

Da ein Systemwechsel notwendig war, wurden mehrere alternative Konzepte der Softwarearchitektur erarbeitet, verglichen und bewertet. Nach umfangreichen Simulationen zur Konzeptvalidierung konnte zu Beginn 2019 das neue Steuerungssystem und das dafür notwendige Softwarekonzept ausgewählt werden. Die weit über das erwartete Maß aufwendige Entwicklung der Basis-Software – vereinfacht gesagt dem Betriebssystem aller kommunizierenden Komponenten (genannt *nodes*, engl. Knoten) – konnte im ersten Halbjahr 2019 abgeschlossen werden. Die Vernetzung dieser kommunizierenden Komponenten wurde erfolgreich getestet. Diese Tests betrafen sowohl die Stabilität des Systems wie auch dessen Leistungsfähigkeit. Aufgrund der besonderen Bedeutung im Gesamtsystem wurde die Netzwerkkommunikation besonderen Prüf-routinen unterzogen.

Im Bereich der Netzwerkkommunikation hatte es seit der Erstellung der ursprünglichen Softwarearchitektur sehr große Fortschritte gegeben, die in Bezug auf die Stabilität und Leistungsfähigkeit des neuen Systems voll genutzt werden sollten. Eins dieser technischen Neuerungen ist das Netzwerkprotokoll, auf dem das neue Kommunikationskonzept basiert. Es handelt sich um ein Netzwerkprotokoll, das auch bei beschränkten Netzwerken mit geringer Bandbreite und hohen Verzögerungen die Übertragung kritischer Informationen sicherstellt. Im Gegensatz zu den proprietären Lösungen des alten Systems werden nun Open-Source-Komponenten genutzt. So profitiert die Softwareentwicklung vom vorhandenen Know-how der breiten Nutzerbasis und den etablierten, erprobten Softwarelösungen. Dies dient der Stabilität und Qualität des Produktes.

Es wurde eine gemeinsame Konfigurationsinfrastruktur geschaffen in der festgelegt wird, welcher Wert von welchem Knoten gesendet und von welchem empfangen wird. Neben den normalen regelmäßigen Prozessdaten wurde eine Schicht für den schnellen, latenzarmen Versand von zeitkritischen Nachrichten geschaffen. Für den Test und die Evaluierung der Lösung wurde ein Testaufbau aus mehreren embedded Devices, einem Industrie-PC und einer SPS aufgebaut und eine Demo-Kommunikation aufgesetzt.

Viele der früheren Komponenten wurden als Mikrocontroller realisiert, die bereits heute nicht mehr baugleich zu beschaffen sind. Die neue auf SoC (*System on Chip*) basierende Lösung ist zukunftsfähiger, da sie deutlich leistungsfähiger ist und mit freien und weit verbreiteten

Standardtools entwickelt werden kann (im Gegensatz zu früheren speziellen und proprietären *embedded realtime tools*). Dies vereinfacht die Entwicklung und ermöglicht unkomplizierte und schnellere Anpassungen. Zur manuellen Steuerung der Pilotanlage wird eine neue Bedieneinheit genutzt. Die alte Bedieneinheit kommunizierte mittels eines seriellen Anschlusses mit dem Gesamtsystem; die neue Bedieneinheit ist als SPS realisiert und kommuniziert über das Netzwerk.

Ein Problem der bisher verwendeten Hardware-Komponenten war die mangelnde Flexibilität; die neue Softwarearchitektur soll in Zukunft verhindern, dass bei einer Änderung der Funktionalität einzelner Komponenten hohe Material- und Personalkosten entstehen. Ein Beispiel ist das Alarmsystem, das bei Fehlfunktionen oder anormalen Betriebszuständen den Steuerer warnt: statt in einer zentralen Hardwarekomponente (der alten SPS) wird das Alarmsystem softwareseitig implementiert werden, was weitreichende Anpassungen ermöglicht. Je nach Alarm können als Reaktion unterschiedlichste Prozesse in Gang gesetzt werden, von vollautomatischen Landemanövern über den Einsatz von Signalgebern bis zu einfachen Warnungen bei unkritischen (aber anormalen) Betriebszuständen. Die Entwicklung des neuen Alarmsystems wurde im ersten Halbjahr angestoßen und wird in Zukunft mehrere hundert Fehlermeldungen ausgeben können bzw. automatisch auf kritische Zustände reagieren.

AP5.1: Autopilot-Entwicklung

Im Bereich der Flugführung waren 2018 deutliche Fortschritte zu verzeichnen. Starts und Landungen wurden an der Phase1-Anlage optimiert. Weiterhin wurde kontinuierlich an der Verbesserung der Regler für den automatischen Energieerzeugungszyklus gearbeitet.

Der Simulator der Flugautomation wurde weiterentwickelt, um die Performance des Phase1-Systems zu simulieren und Verbesserungen sofort zu testen. Außerdem wurde die Möglichkeit geschaffen, veränderliche aerodynamische Eigenschaften des Kites zu simulieren – z.B. um in der Rückholphase weniger Energie zu benötigen. Damit war es möglich, die Anforderungen an die zukünftigen Phase2 und Phase3-Anlagen zu definieren.

Die Flugsteuerung ist die Grundlage für einen optimierten Energieerzeugungsprozess. Es wurde ein neuer Zugseilgeschwindigkeitsregler konzipiert und an der Phase1-Anlage erprobt, der wesentliche Grundlage für die Effektivität der Anlage ist.

In den ersten 6 Monaten nach Inbetriebnahme im Dezember 2019 wurden mit der Phase2-Anlage knapp über 200 Flugstunden absolviert. Der Autopilot steuerte dabei sowohl das fliegende System wie auch die Winde der Bodenstation. Zu Beginn wurde der Start über die manuelle Steuerung vollzogen; dann wurde mittels weniger Knopfdrücke der automatische Erzeugungsbetrieb gestartet. Die Landung wurde über den Autopiloten eingeleitet; erreichte der Autopilot die gewünschte Position, wurde manuell die Steuerung übernommen und die Landung vollzogen.

Die bei den Flügen gesammelten Daten dienen zur Validierung der Simulationen, der Messung der Leistungskurve, sowie der weiteren Optimierung des Autopiloten. Abweichungen zwischen Simulation und Messung können z.B. durch Thermiken hervorgerufen werden, die Turbulenzen

verursachen. Diese äußern sich in einer höheren Streuung der mechanischen Leistung der Winde während der reel-out-Phase (s. Abbildung 13).

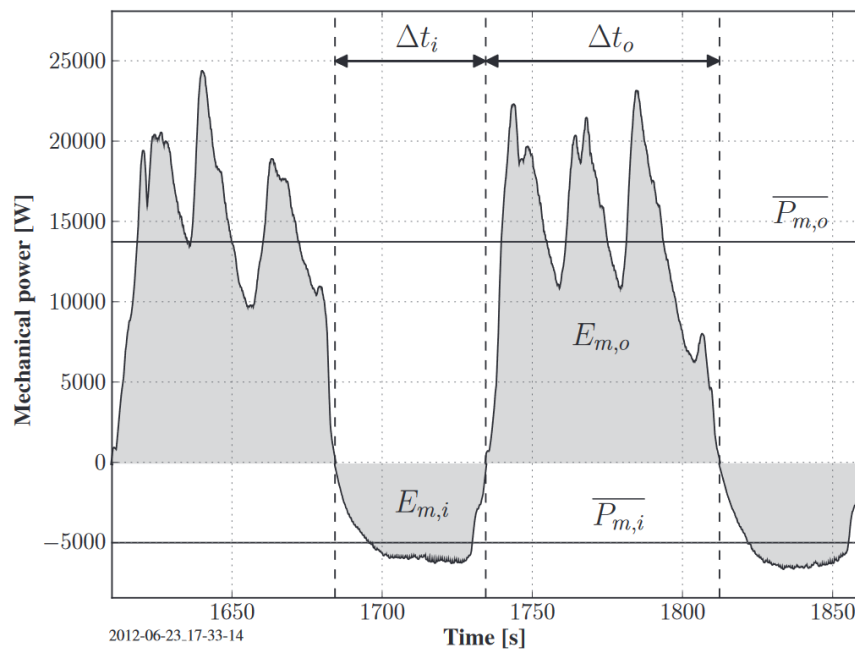


Abbildung 13: Literaturbeispiel³ eines Powercycles mit relativ hoher Leistungsstreuung während der reel-out-Phasen

Bei der Autopilot-Entwicklung lag der Fokus zu Beginn nicht bei der Ertragsoptimierung, sondern bei der Sicherheit und Stabilität des Flugbetriebs. Die Anlage wurde schrittweise zunehmend an die Leistungsgrenzen gebracht, die für den Autopiloten schwerer zu kontrollieren sind.

Im Laufe von 2020 beschränkten sich manuelle Eingriffe in den Flugbetrieb zunehmend auf die Änderung von Autopilot-Parametern. Der sichere autonome Flugbetrieb über längere Zeiträume wurde beherrscht. Beim Flugbetrieb werden ca. 700 Messwerte bei 10 Hz mitgeloggt, die u.a. von den Autopilot-Entwicklern zur weiteren Entwicklung analysiert und archiviert werden.

Als Grundlage für die Flugführung ist es notwendig, die tatsächliche Windgeschwindigkeit und -richtung auf Höhe des Kites zu kennen. Da sich diese nicht direkt messen lassen, müssen sie anhand der Fluggeschwindigkeit des Kites und dessen Position im Raum indirekt berechnet werden. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der basierend auf Messdaten von Gondel und Bodenstation in Echtzeit das bestehende Windprofil abschätzt.

Es wurde ein LiDAR-Gerät am Standort Klixbüll installiert, das in Echtzeit Windrichtung und -geschwindigkeit auf den verschiedenen Höhenebenen bestimmt – bis zu 290 m hoch. Mit den Messergebnissen des LiDAR konnten die Algorithmen validiert werden, die das Windprofil aus Betriebsdaten abschätzen.

³ Fechner, Uwe\Roland Schmehl, *Model-Based Efficiency Analysis of Wind Power Conversion by a Pumping Kite Power System*, in: Ahrens et. al, 2013, S. 256



Abbildung 14: An der Pilotanlage verwendetes LiDAR-Gerät

Eine Herausforderung der Autopilotentwicklung liegt darin, die manuellen Parameteränderungen zur Optimierung der Flugführung zu automatisieren, indem das System die spezifischen Windbedingungen in Echtzeit aus den vorhandenen Messdaten abschätzt. Aufbauend auf den Erfahrungen, die man mit dem LiDAR an der Pilotanlage sammeln kann, sollen an zukünftigen Pilotanlagen die Anlagenparameter direkt durch das Systemverhalten bestimmt werden. Zukünftige Anlagen sollen aus Sensorwerten die Windgeschwindigkeit in Höhe des Kites errechnen, und die dazu passenden Flugparameter des Autopiloten – ganz ohne LiDAR.

Das LiDAR ist darüber hinaus ein sehr wertvolles Werkzeug für die Entwickler. Die Zuhilfenahme des LiDAR hat zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Luftschichtungen und -scherungen in Bezug auf die Kite-Steuerung beigetragen. Durch Analyse der LiDAR-Wetterdaten konnte das Systemverhalten bei Start- und Landemanövern besser nachvollzogen werden. Durch die darauf basierende Weiterentwicklung des Autopiloten wurde es erstmals möglich, bei verschiedenen Wetterbedingungen zuverlässig automatisiert zu Starten und zu Landen. Es war von hoher Priorität, die Eingriffe durch die Autopilot-Entwickler zu minimieren, damit diese mehr Zeit für die Entwicklungsarbeit haben.

Das Absink-Manöver (s. AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung – Luftfahrt) wurde zunächst manuell durch die Service-Mitarbeiter über die Fernbedienung erprobt. 2021 wurde erfolgreich die Funktion des Autopiloten entwickelt und getestet, auf Befehl selbstständig ein Absink-Manöver durchzuführen. Hierbei handelt es sich um eine der Grundanforderungen, damit SkySails-Anlagen zukünftig automatisiert in den bemannten Luftraum integriert werden können.

Anfänglich waren im alltäglichen Flugbetrieb häufige Eingriffe der Autopilot-Entwickler in Hamburg notwendig. Die 2020 entwickelte Service-Nutzeroberfläche hat die Bedienbarkeit der Anlage durch den Anwender vor Ort stark erhöht. Über die Nutzeroberfläche können alle

relevanten Autopilot-Parameter eingestellt werden, statt das die Entwickler aus Hamburg eingreifen müssen.

Durch die Verbesserung der Windensteuerung, des Verbauens von Assistenzfunktionen sowie eines Sicherheitsmechanismus zur Vermeidung von Gondelüberlastung konnte die Leistung der Anlage deutlich optimiert werden.

AP5.2: Gondelsoftware

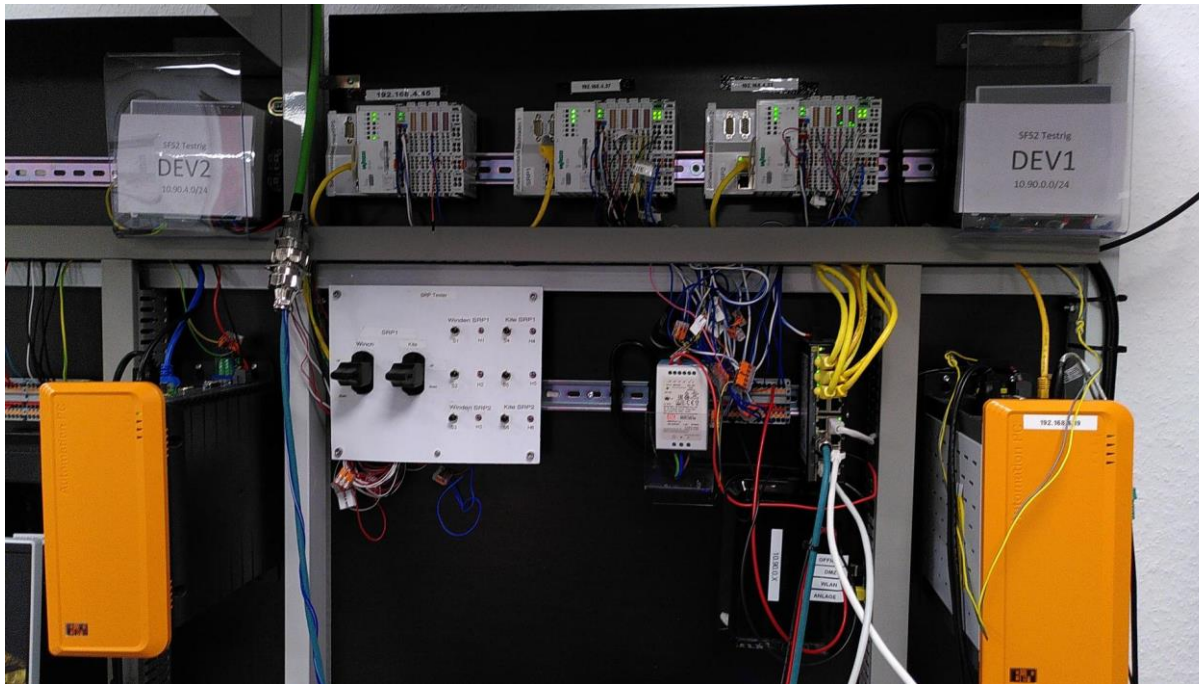


Abbildung 15: Laboraufbau für Gondelsoftware-Tests

An dem neuen Laboraufbau konnte das Zusammenspiel der Phase3-Gondelsoftware mit den mechanischen und elektronischen Komponenten getestet werden. Bis die neue Gondелеlektronik erfolgreich in Betrieb genommen wurde, wurden die Testflüge der Phase2-Anlage noch mit der Phase2-Gondelsoftware durchgeführt. In ersten Tests konnten alle Sensoren der Gondel über die neue Software in Betrieb genommen werden.

Für die neue Telemetrie-Platine wurde eine Software geschrieben, die erfolgreich mit den bestehenden Sensoren kommuniziert. Falls keine Steuerbefehle durch die redundanten Funkkanäle erhalten werden, soll die Gondel zukünftig in einen autonomen Steuermodus wechseln. Der Funktionsumfang der autonomen Not-Steuerung soll dann sukzessive erweitert werden.

Die Inbetriebnahme der neuen Telemetrie-Platine ermöglicht eine Ersatzfunkstrecke zu der Hauptfunkstrecke. Dies ist noch nicht umgesetzt; es ist weiterhin eine zusätzliche Fernsteuerung zur manuellen Steuerung notwendig. Die Steuerung über die Anlage verfügt über eine leistungsstärkere Funkstrecke im Vergleich zur externen Fernsteuerung.

AP5.3: Software in der Bodenstation

2019 wurde ein erster Prototyp des Datenbank-Systems fertiggestellt. Das System ist in der Lage Prozessdaten zu speichern; als nächster Schritt musste das Zielformat der Daten an die Schnittstellen-Spezifikation angepasst werden. Die Eigenschaften aller Messwerte müssen in einem Konfigurationssystem gelistet sein, damit die Messwerte weiterverarbeitet werden können. In dem System ist u.a. gespeichert, als welcher Typus die Zahl gespeichert werden soll (z.B. Ganzzahl, Gleitkommazahl), wie sie verarbeitet werden soll (z.B. Mittelwert speichern, Filter anwenden), und welche Einheit sie besitzt (z.B. Meter pro Sekunde, Newton).

Die Implementation der neuen Flugsteuerung in den neuentwickelten Zentralrechner konnte abgeschlossen werden. Zunächst konnten die neuentwickelten Versionen des Autopiloten nur über einen zweiten Prototypen-Rechner in den Flugbetrieb eingreifen, der parallel zum Zentralrechner lief. Diese zusätzliche Kommunikationsschnittstelle ist nun nicht mehr notwendig; der Abschluss dieses internen Meilensteins ist ein großer Erfolg.

Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Bodenstation wurde vollständig überholt. Die entscheidende Änderung ist, dass der neue Code stärker auf der objektorientierten Programmierung (OOP) basiert. Dadurch sind Codefragmente wiederverwertbar, und über die gesamte Struktur hinweg stringent. Wird nun eine Komponente zu dem System hinzugefügt, kann man auf bereits existierende Code-Fragmente zurückgreifen, die man dann wie benötigt kombiniert und in das Gesamtsystem einfügt. Das senkt die Menge an Code, was wiederum die Überprüfbarkeit und Wartbarkeit der Software erhöht. Der Gewinn dabei sind die reduzierte Entwicklungszeit, eine solidere Steuerung, und generell die Erfüllung von bestimmten Anforderungen, die an sicherheitskritische Software gestellt werden.

Ein Beispiel für OOP ist, dass z.B. „Drehzahl“ für das gesamte System als Variable definiert wird, die unabhängig von der angesteuerten Komponente immer bestimmte Eigenschaften aufweist. Im Fall der Drehzahl wären diese Eigenschaften u.A. die Einheit $\frac{U}{min}$, der Datentyp, Eigenschaften der Eingabe- und Ausgabewerte, die Berechnungsformel, die Bezeichnung. Diese Programmstruktur erweitert sich auf Schnittstellen, Algorithmen, und viele andere Elemente einer Software.

AP5.3: Software in der Bodenstation – grafische Benutzeroberfläche

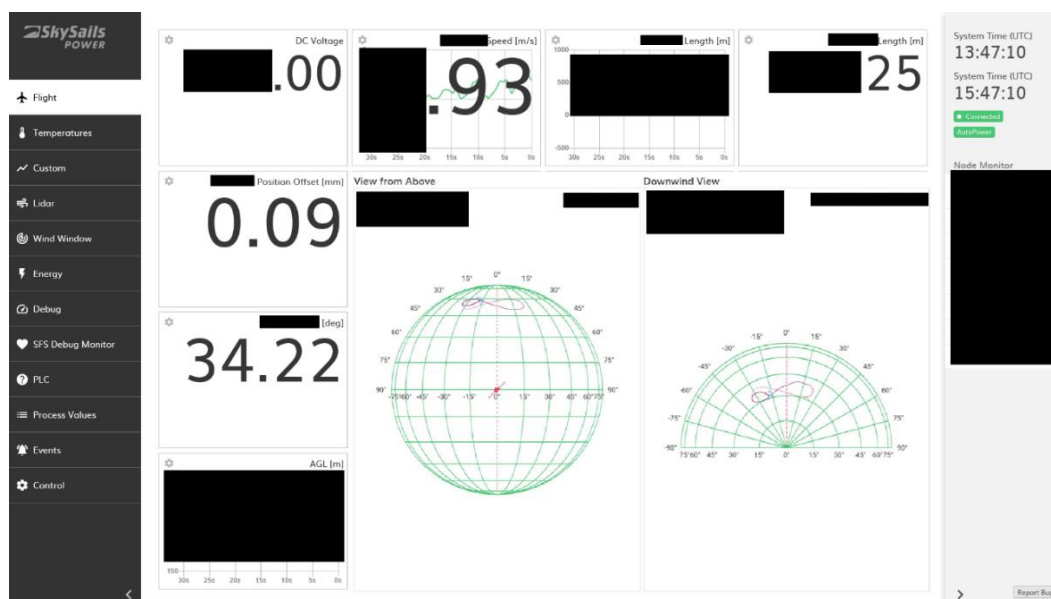


Abbildung 16: neugestaltete Benutzeroberfläche

Es wurde mit der Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI - graphical user interface) begonnen. Die Oberfläche soll die Anzeige sämtlicher Messwerte sowie die Steuerung aller wichtigen Systemfunktionen ermöglichen. Als Teil der neuen Software-Infrastruktur wurde sich für den Einsatz einer neuen Technologie entschieden, das *Wt* (*web toolkit*, gesprochen „witty“). Gegen Ende des Berichtszeitraumes wurde die Software erstmals in den Teststand eingebunden, wo im einen über Wochen dauernden Dauerlauftest die Stabilität der Software geprüft wird. Die grafische Benutzeroberfläche muss verschiedene Zwecke erfüllen können; der Steuerer benötigt z.B. Angaben wie Windgeschwindigkeit und Seillänge, während die Entwickler sich verschiedenste Prozessdaten anzeigen lassen können, um z.B. den Betriebszustand der Pilotanlage zu überwachen.

Dem Nutzer wurde es mittels einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) ermöglicht, sich verschiedenste sog. *Widgets* darstellen zu lassen, z.B. eine Darstellung der Kite-Position (s. Abbildung 16). Das Konzept ist allgemein von Smartphones bekannt, bei denen Anzeigen von verschiedenen Apps (z.B. Kalender oder öffentlicher Nahverkehr) auf das Haupt-GUI gezogen werden können. Neben den Widgets lassen sich weitere Zahlen und Graphen anzeigen, sowie Knöpfe zur Interaktion mit dem System bzw. der GUI platzieren. Die Ingenieure aus dem System-Engineering stellten in den folgenden Monaten die spezifischen Benutzeroberflächen so zusammen, wie sie die verschiedenen Nutzer an der Anlage auch benötigen (Entwickler, Service-Techniker, Endkunde).

Jede SkySails-Anlage hat eine Konfigurationsdatei, die anlageneigene Eigenschaften speichert. Diese können von den verwendeten Komponenten abhängen, aus der Produktion resultieren, oder standortabhängig sein. Ohne diese Neuerung wäre ein paralleler Betrieb zweier SkySails-Anlagen nicht möglich. In der Benutzeroberfläche sollen Servicemitarbeiter auf das Konfigurationsmanagement zugreifen und Betriebsstunden der einzelnen Komponenten ablesen können, wodurch Wartungspläne möglich werden. Auffälliges Anlagenverhalten wird dem Nutzer

unabhängig vom Konfigurationsmanagement unmittelbar über das optische und akustische Alarm-System gemeldet.

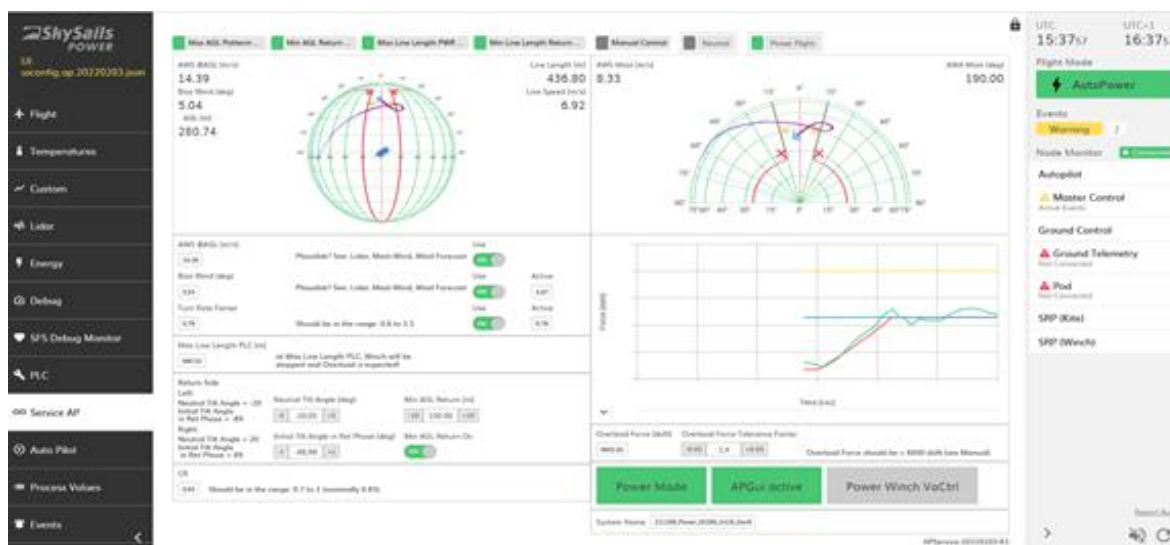


Abbildung 17: aktuelle Nutzeroberfläche 2022

2021 haben Ingenieure aus dem System-Engineering Nutzeroberflächen erstellt (s. Abbildung 17), die den Arbeitsablauf für das Servicepersonal vereinfacht haben. Die Nutzeroberfläche wird mit zunehmender Automatisierung fortwährend verschlankt; so geht die Entwicklung immer weiter von einer Entwicklungs-Oberfläche hin zu einer für neue Anwender verständlicheren Nutzeroberfläche.

AP5.4: Anlagen-Automation

Unabhängig von dem Autopiloten werden die meisten Komponenten der Bodenstation (u.a. Masthydraulik, Führungsleinenübergabe, Reffwinde, Azimutantrieb) durch die sog. Anlagen-Automation gesteuert. Diese beiden Teilsysteme sollen möglichst unabhängig voneinander arbeiten und lediglich Betriebszustände kommunizieren.

2018 wurde die übergeordnete Ablaufsteuerung der Phase1-Anlage auf die neu ausgewählte SPS-Umgebung portiert. Die Funktionalität wurde mit virtuellen Bedienelementen nachgewiesen. Weiterhin wurde die Datenschnittstelle zum neu entwickelten Steuerungssystem begonnen. Für die geplanten Bedienelemente wurden bereits erste Komponenten besorgt, um sowohl die Tauglichkeit der Benutzerschnittstellen sicherzustellen wie auch das Interface zum neuen Kommunikationsframework in Betrieb zu nehmen.

Während der Phase2 konnte das Steuerungssystem vollumfänglich getestet werden. es haben sich keine Probleme mit dem grundlegenden Konzept der Anlagen-Automation ergeben. Für die Phase 3 war eine Anpassung der SPS notwendig, um nach dem Umbau die neue Antriebsmaschine und Leistungselektronik des IAL Hannover anzusteuern.

Es gab zahlreiche Fortschritte bei der Automatisierung der Anlagensteuerung, die die Bedienbarkeit der Anlage erhöhen. Das Detailwissen, dass zur Bedienung der Anlage notwendig ist, nimmt stetig ab. Zum Beispiel fährt der Mast automatisch in Start- und Landeposition, wenn der

entsprechende Steuerbefehl von dem Autopiloten gesendet wird. Ein weiteres Beispiel ist, dass bei der Kupplung während des Start- bzw. Landeprozesses die Seilgeschwindigkeit der Führungsleine automatisiert begrenzt wird, anstatt dass der Bediener diesen Aspekt selbst berücksichtigen muss. Die fortlaufende Automatisierung des Kupplungsprozesses erfordert ein enges Zusammenspiel der Entwicklung in den Bereichen Mechanik und Systemengineering.

AP6: Elektronik-Entwicklung und Elektro-Konstruktion

Die Elektronik-Entwicklung der Bodenstation konnte früh abgeschlossen werden; es verblieben lediglich geringe Anpassungen für die manuelle Fernsteuerung.

AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Gondel

Bei der Entwicklung der Phase3-Gondel wurde nahezu die gesamte bestehende Elektronik ersetzt. Die Entwicklung von Soft- und Hardware fand parallel statt.

Für den Energiespeicher der Gondel wurden Spezifikationen definiert und Anfragen an Hersteller verschickt. Es wurden umfangreiche Evaluationsarbeiten für die Chipauswahl für die zukünftigen Platinen getätigt und ein Chipsatz ausgewählt. Ein Modell des Energiespeichers wurde mit der Phase1-Anlage erprobt. Es wurde eine Energiemanagement Platine für die Gondel entwickelt und grundlegend getestet. Weiterhin wurde eine Prototypenplatine für eine DC Spannungsversorgung entwickelt und gebaut.

Im Bereich Leistungselektronik wurden erste Testplatinen erstellt. Zu Testzwecken wurden zunächst vorhandene Servoplatinen mit höheren Stromflüssen verwendet. Die Entwicklung einer neuen Leistungsplatine hatte Ende 2019 begonnen. Die Anforderungen sind, dass die Leistungsplatine den Haupt- sowie den Zweitaktuator effizienter und akkurater steuert, sowie bei Kommunikationsausfall das Anfliegen einer kraftarmen Position ermöglicht.

Die anfänglich in der Gondel verbauten Steueraktuatoren waren zu schwach, um den Kite bei hoher Kraffteinwirkung wie gewünscht zu steuern. Dies wurde früh ausgebessert.

Die Umsetzung der entwickelten Leistungsplatine wurde 2020 von der Entwicklung einer sogenannten „Power-Platine“ überholt. Vorher wurde der Strom durch die Platine geleitet. Dies ist bei der neuentwickelten Platine nicht der Fall: sie überwacht und regelt, ohne dass hohe Ströme durch sie fließen.

AP6.1: Elektronik-Entwicklung - Funkstrecke

Die Datenübertragung der Phase1-Anlage wurde über ein Kabel realisiert. Die Kommunikationsstrecke zwischen Gondel und Bodenstation musste in der Phase2-Anlage über Funk erfolgen. Durch die Nutzung zweier sehr unterschiedlicher Funk-Technologien sollte die nötige Redundanz bei der Übertragung kritischer Informationen sichergestellt werden. Die Anforderungen an die Funkverbindung in Bezug auf Latenz und Stabilität sind sehr hoch. Zu diesem Thema wurden diverse umfangreiche Konzepte entwickelt und in Tests erprobt.

Es wurde bei der Antragserstellung die Schwierigkeit unterschätzt, mit zwei Funkstrecken eine redundante Kommunikation über eine Entfernung von 762 m aufrecht zu erhalten. Hierbei handelt es sich praktisch um ein eigenes Teilarbeitspaket, das basierend auf den bisherigen Erfahrungen nicht absehbar war. Diese Erkenntnis wurde durch die Testflüge der Phase2-Anlage gewonnen, was den iterativen Entwicklungsprozess bestätigte und die Notwendigkeit häufiger Tests unterstrich.

Auf Basis einer theoretisch-mathematischen Bewertung wurden 2020 zwei neue Funkmodule gewählt. Die Funkmodule wurden über die notwendige Distanz von bis zu 762 m getestet. Sie wurden den Anforderungen nicht gerecht: maximale Entfernung, Latenzen, sowie die generelle Signalqualität waren nicht zufriedenstellend. Aus diesen Gründen wurde die Gondel weiterhin über die bereits vorhandene Funkstrecke von der Bodenstation angesteuert, wobei eine zusätzliche Funkstrecke den Eingriff per manueller Fernbedienung ermöglichte (s. Abbildung 25).

Man untersuchte darum ein neues Produkt, das erste Labortests erfolgreich bestanden hatte. Nach intensiver Prüfung konnte bestätigt werden, dass die Spezifikationen erfüllt sind. Die Herstellung einer stabilen und performanten Funkstrecke war ein großer Meilenstein in der Elektronikentwicklung. Am Boden hat man sie erfolgreich in einer Entfernung von 1.000 m getestet, wodurch sie möglicherweise ebenfalls bei der nächsten Größenklasse der SkySails-Anlagen verwendet werden kann.

Hätte sich dieses Produkt bei späteren Tests als nicht ausreichend erweisen, waren Alternativen in Planung: so könnten bei den bereits getesteten Komponenten andere Frequenzbänder als bisher verwendet werden. Der Zukauf gewisser Frequenzen müsste allerdings mit der Bundesnetzagentur geklärt werden.

Die am Weltmarkt bestehende Halbleiterknappheit verzögerte bis Vorhabensende die Entwicklung und führte zu erhöhtem Arbeitsaufwand an verschiedenen Stellen.

AP6.2: Elektro-Konstruktion

Das elektrische System der Phase1-Anlage wurde komplett dokumentiert und Verbesserungen durchgeführt. Damit wurde eine umfassende Grundlage für die Entwicklung der folgenden Anlagen gelegt. Im Bereich Normen und Vorschriften wurden umfangreiche Gespräche mit den Partnern von Omexom, EnBW und dem IAL geführt.



Abbildung 18: Schaltschränke der Phase2-Anlage

Die Elektrokonstruktion der Phase2-Anlage konnte rechtzeitig abgeschlossen werden. Die Anforderungen waren zu dem Zeitpunkt fast identisch zu denen der Phase3-Anlage; so konnten die Flugtests in der Phase2 auch hier helfen, eventuelle Fehler oder Optimierungsmöglichkeiten frühzeitig zu erkennen. Das Not-Aus-Konzept konnte erfolgreich integriert werden.

AP6.2: Elektro-Konstruktion – Energiemanagement Bodenstation

Um auch in Falle eines Netzausfalls den Kite sicher einholen zu können, ist eine Notstromversorgung der Winde unerlässlich. Welche Spezifikationen der Energiespeicher der Pilotanlage haben muss, hängt wesentlich von den Einspeisebedingungen des Netzanschlusses ab. Die Minimallösung wäre eine Notstromversorgung für die Landung, falls das Netz ausfällt; am anderen Ende des Spektrums wäre ein großer Energiespeicher denkbar, der die ausgegebene Leistung der Anlage möglichst konstant hält (statt während der Auswischphase eine hohe Leistung abzugeben, und in der Einwischphase eine hohe Leistung aus dem Netz zu beziehen).

Für das Forschungsprojekt SkyPower100 war eine Notstromversorgung ausreichend, da es vom Netzbetreiber SH Netz keine Einschränkungen gab, wieviel Leistung dem Netz entnommen werden kann. Für die Dimensionierung des Notstromspeichers war die abzugebende Leistung in der Rückholphase maßgebend; die Gesamtkapazität der Batterie ist deutlich höher als der zur Landung notwendige Energiebedarf.

AP6.2: Elektro-Konstruktion – Netzanschluss

Mit dem Netzbetreiber SH-Netz wurden die Einspeisebedingungen für die Phase3-Anlage geklärt. Es gab zwei Optionen für den Netzanschluss der Pilotanlage: einen Anschluss an das Mittelspannungsnetz, oder an das Niederspannungsnetz. Dabei zu berücksichtigende Faktoren waren maximalen Einspeise- bzw. Bezugsleistung, die unterschiedlich langen Kabelstrecken, die elektrotechnischen Gegebenheiten bei den Niederspannungsanschlüssen und die Notwendigkeit eines eigenen Transformators beim Mittelspannungsanschluss.

Die Planung und Umsetzung des anlagenseitigen Netzanschlusses wurde durch einen von SkySails beauftragten Planer übernommen. Der Planer hat gemeinsam mit Omexom und dem Elektro-Team von SkySails die elektrische Infrastruktur zwischen dem Maschinenumrichter und dem Mittelspannungsanschluss entwickelt. Die Hauptverteilung wurde in einem 10'-Container untergebracht, von dem aus die Anlage sowie Büro- und Lagercontainer mit Strom versorgt werden. Von der Hauptverteilung verläuft unterirdisch ein Kabelrohr zu einer Übergabestation, die außerhalb des Drehradius des Maschinencontainers steht. Von dort wird überirdisch ein Kabel zum Drehkranz der Anlage gelegt, wo es durch eine Schleppkette nach innen geführt und am Schaltschrank angeschlossen wurde. Die Phase2-Anlage wurde mit einem Umrichter außerhalb des Maschinencontainers betrieben, weshalb der Anschluss dort von der Phase3 abwich.

2021 wurde an der Pilotanlage durch einen externen Dienstleister eine Leistungsmessung umgesetzt. Dadurch kann exakt bestimmt werden, wieviel elektrische Leistung die Anlage erzeugt und wieviel sie in der Rückholphase benötigt. Bis dahin war nur die Bestimmung der mechanischen Leistung mittels Drehzahl und -moment der Generatorwinde möglich. Die Leistungsmessung ermöglicht eine genauere Analyse des Gesamtwirkungsgrades.

AP7: Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkonzeppte

Im AP7 hat das IAL verschiedene Antriebskonzepte für die Flugwindkraftanlage untersucht. Im ersten Teilarbeitspaket wurden die expliziten Anforderungen an das Antriebssystem aus AP2 abgeleitet, die zur Dimensionierung benötigt werden. Aus dem Pumping-Cycle-Prinzip resultieren gegenüber konventionellen Antriebssystemen in der Windkraft andere Belastungen, die sich in transienten Lastwechseln ausdrücken. Die IEC 60034-1 bietet mit dem S8-Arbeitszyklus (Dauerbetrieb mit periodischem Betrieb und damit verbundenen Last-/Drehzahländerungen) eine geeignete Beschreibung, um das dynamische Betriebsverhalten bei der Dimensionierung zu berücksichtigen und die Maschine für eine ausgewählte Windgeschwindigkeit (z. B. den Erwartungswert der Windverteilung) zu optimieren. Dazu wurde eine statistische Analyse der Drehmoment-Drehzahl-Zeitverläufe für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten am vorgesehenen Einsatzort verwendet, um charakteristische Betriebsbereiche zu ermitteln. Die höchste Relevanz für die Wirkungsgradoptimierung sollten dabei die Daten bei häufigstem Wind haben. Um das Ziel hoher Energiewirkungsgrade für einen gesamten Flugzyklus zu erreichen, ist vor allem der Wirkungsgrad des Antriebs im generatorischen Betrieb entscheidend, da hier die größten Verweildauern und die größten Leistungsbeiträge vorliegen. Die Lasten des Antriebsstrangs in dynamischen Betriebszuständen wie Beschleunigung oder Bremsen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Im zweiten Teilarbeitspaket entstanden Grobentwürfe unterschiedlicher Antriebsstrangkonzeppte für den Einsatz in einer 1 MW bis 2 MW-Flugwindkraftanlage. Auf der Grundlage dieser Grobentwürfe wurden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte erarbeitet und vergleichend gegenübergestellt. Auf die Dimensionierungsziele und Randbedingungen wird im IAL-Bericht im Detail eingegangen.

Es wurden verschiedene Antriebstopologien wie integrierter Außenrotor-Direktantrieb, Direktantrieb mit Innenrotor, sowie Getriebeantriebe betrachtet. Weitere Aspekte betrafen die Anzahl der Maschinen und die Anzahl paralleler maschinenseitiger Umrichter. Auf Seite der Maschinenarten wurden neben Permanentmagnet-Axialflussmaschinen vor allem Radialflussmaschinen als Induktionsmaschinen (IM), elektrisch erregte (ESM) oder permanent erregte Synchronmaschinen (PSM), sowie synchrone Reluktanzmaschinen (RSM) untersucht. Das beste Betriebsverhalten wurde für PSM mit Hochenergiemagneten erzielt. Allerdings sind diese Maschinen auch am teuersten, und die benötigten Seltenerd-Magnetmaterialien gelten nicht als nachhaltig. Das zweitbeste Betriebsverhalten wurde gleichermaßen für ESM und Ferrit-PSM erzielt. Für ESM wären jedoch eine Rotorkühlung und eine zusätzliche Erregereinheit erforderlich. Die synchrone Reluktanzmaschine verzichtet vollständig auf den Einsatz von Magnetmaterial oder einer Rotorwicklung. Sie wies allerdings auch den schlechtesten Leistungsfaktor und das größte Gesamtgewicht auf. Die Induktionsmaschine mit Getriebe benötigte am wenigsten Material, da durch den Einsatz eines Getriebes die elektrische Maschine verkleinert werden konnte. Bei Berücksichtigung des Getriebe-Wirkungsgrads leidet allerdings der Gesamtwirkungsgrad dieses Systems. Die Direktantriebe bieten dagegen geringeren Wartungsaufwand und hohe Zuverlässigkeit.

Die Axialflussmaschinen waren hinsichtlich Bauraum, Masse, konstruktivem Aufwand/Realisierbarkeit und Kosten gegenüber den Radialflussmaschinen mit Außenrotor im Nachteil. Bei den Axialflussmaschinen war insbesondere ein Doppelrotor bzw. Doppelstator nötig, um bei

vorgegebenem Windendurchmesser überhaupt die Drehmomentanforderungen erfüllen zu können. Im Fall der Axialflussmaschine mit Ferritmagneten war dies sogar nur mit Einbußen bei Leistungsfaktor und Wirkungsgrad möglich.

Der Außenläufer-Direktantrieb als Ferrit-PSM und RSM wurde aufgrund der vollständigen Windenintegration, des geringen Wartungsaufwands, der hohen Zuverlässigkeit und der Nachhaltigkeit für die weitere Untersuchung im Teilarbeitspaket AP7.3 ausgewählt.

Die Vorteile der Ferrit-PSM sind

- das bei gleichem Volumen um mehr als 30 % leichtere Magnetmaterial im Vergleich mit gängigen Hochenergie-Seltenerdmaterialien,
- die um den Faktor 10 geringeren Kosten des Magnetmaterials,
- die geringen Magnetverluste. Das Ferritmaterial ist nicht elektrisch leitfähig; daher entstehen keine Wirbelstromverluste und nur sehr geringe Hystereseverluste durch Wechselfeldanteile.

Auf der Seite der Nachteile stehen u.a. die gegenüber Seltenerdmaterialien um den Faktor 10 kleinere Energiedichte, und die um den Faktor 3 kleinere Remanenzinduktion. Als Herausforderung bei diesem Konzept hat sich dadurch das Erreichen eines hohen Leistungsfaktors und Wirkungsgrads bei kleinen bis mittleren Drehzahlen erwiesen.

Die Reluktanz-Synchronmaschine wurde für die Untersuchung ausgewählt, da hier vollständig auf Magnetmaterialien verzichtet werden kann. Allerdings wird diese Maschinenart bisher nur bei geringen Drehmomentanforderungen in industriellen Anwendungen eingesetzt. Typisch sind in industriellen Anwendungen $6-10 \frac{\text{Nm}}{\text{kW}}$. Die Projektanforderungen erforderten im generatorischen Bemessungsbetrieb 60 Nm Drehmoment je kW mechanischer Leistung. Aufgrund des Außenrotor-Prinzips und der geringen Drehzahlen erhoffte man sich in diesem Projekt eine bessere Beherrschbarkeit der Sättigung des Rotors und der Fliehkräfte. Durch eine Reduktion der Ausnutzung um ca. 35 % und eine Verringerung des Luftspalts um den Faktor 2 wurde ein Einsatz grundsätzlich möglich, musste aber mit ca. 50 % größerer Maschinenlänge gegenüber der Ferrit-PSM und aufwändigen Maßnahmen zur Fertigung des kleineren Luftspalts erkauft werden, um einen ähnlichen Wirkungsgrad wie bei der Ferrit-PSM und einen Grundschwingungsleistungsfaktor von min. 0,7 zu erreichen. Durch die Überlänge steigt entsprechend auch der Materialbedarf an Elektroblech und Elektrokupfer, was dem Nachhaltigkeitsgedanken zuwiderläuft (Daten bezogen auf die Forschungsanlage).

Im Anschluss an den systematischen Entwurf wurden im Teilarbeitspaket AP7.5 die parasitären Effekte der Antriebskonzepte analysiert. Dies umfasste die Analyse der Magnetgeräusche und der Lagerströme der elektrischen Maschine mit Fokus auf dem ausgewählten Außenläuferkonzept sowie die thermische Untersuchung der elektrischen Maschine und die Dimensionierung des Kühlsystems. Weiterführend wurde untersucht, inwieweit der Angriff der Seilkraft an der Seiltrommel zu einer nennenswerten Exzentrizität in der Maschine führt, wodurch der Luftspalt der elektrischen Maschine nicht mehr konstant wäre.

Die Kühlung der elektrischen Maschine wurde als eine Herausforderung identifiziert, die besondere Beachtung erfordert, da keine Wärme von der elektrischen Maschine an die Seilwinde abgegeben werden darf, im Stator unter großer Last aber nennenswerte Verluste entstehen. Während eines Flugzyklus verändern sich die Verluste in der Maschine mit der Zeit. Im generatorischen Betrieb entstehen große Verluste in der Statorwicklung, im motorischen Betrieb bedeutend weniger. Diese Veränderung bremst im zeitlichen Mittel dabei die Erwärmung in der generatorischen Betriebsphase. Die motorische Phase führt zu einer gewissen Abkühlung der Maschine. Aufgrund der großen Wärmekapazitäten in der Maschine treten in der Wicklung nur Temperaturänderungen von einzelnen Kelvin zwischen den Betriebsphasen auf.

Um die Lärmbelastung der Umgebung durch die elektrische Maschine vor der Inbetriebnahme beurteilen zu können und die Anlagen-Genehmigung vorzubereiten, ist eine Untersuchung der Magnetgeräusche der elektrischen Maschine von hoher Bedeutung.

Für den Einsatz in Offshore-Windparks oder in der Nähe von Wohngebieten sind in Deutschland strenge Lärmschutzanforderungen einzuhalten. Aufgrund des dynamischen Verhaltens des Systems unterscheidet sich die Geräuschemission gegenüber konventionellen Windkraftanlagen. Während das fliegende System in großen Höhen arbeitet, befindet sich der Generator direkt am Boden und interagiert folglich eng mit seiner Umgebung. Neben den eher breitbandigen Geräuschquellen einer Maschine wie Lager, Kühlung und Aerodynamik zeichnen sich Magnetgeräusche oft durch eine unangenehme Tonhaltigkeit aus. Diese Einzeltöne werden besonders stark wahrgenommen und sind daher soweit möglich zu vermeiden. Eine Besonderheit im Fall des Außenrotors ist, dass die schall-abstrahlende Fläche rotiert. Es zeigte sich, dass dadurch die größten Kraftamplituden der Mode 0 im Rotor konstante Auslenkungen darstellen und nicht zu einer Schallerzeugung führen. Tangentialkräfte haben ebenfalls keinen Einfluss, da ihre Ordnungen groß sind, und die Amplituden im Vergleich mit den Radialkräften erheblich kleiner sind. Außerdem hat der Rotor der PSM eine sehr große Steifigkeit, sodass durch die Tangentialkräfte rotorseitig keine großen Verformungen entstehen können. Bei größeren Maschinen ist noch der Körperschall des Stators zu berücksichtigen. Insgesamt waren die Geräusche der Ferrit-PSM für die Forschungsanlage vergleichsweise leise und unauffällig (Schalldruckpegel max. 86 dB, viele Frequenzanteile). Innerhalb eines Flugzyklus variierten der simulierte Schalldruckpegel um bis zu ca. 40 dB; die lautesten Einzeltöne bewegen sich Drehzahlabhängig in einem Frequenzband zwischen 0 und ca. 900 Hz.

Bedingt durch hochfrequente Anteile in der Klemmenspannung bei Umrichterspeisung kann es in elektrischen Maschinen zu parasitären Strömen in den Lagern der Maschine kommen. Zunächst wurden für die vorliegende elektrische Maschine in der Seilwinde der kritische Lagertrompfad und mögliche weitere Ableit-/Erdungspfade identifiziert und mithilfe von Messungen der parasitären Ströme und der Lager Spannungen validiert. Durch die Messungen wurde die Existenz zirkularer Lagerströme nachgewiesen. Die größten Ströme von bis zu 10 A traten im Stillstand auf. Das entsprach einem Verhältnis von zirkularem Lagerstrom zu Erdstrom von 38 %. Unter Drehzahl reduzierten sich die Lagerströme. Angesichts der Lagergröße sind die gemessenen Lagerströme tendenziell als nicht kritisch einzustufen. Messtechnisch konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass durch einen hochfrequenztauglichen Verbindungsleiter vom linken

Wellenende über das Windenchassis zum rechten Wellenende die elektrische Lagerbelastung um 24 % reduziert werden kann. Es ist zu erwarten, dass diese Reduktion der Lagerströme in der Anlage auch allein durch die Wirkung des Windenchassis hergestellt werden kann, sofern HF-taugliche elektrisch leitende Verbindungen vorliegen.

Zur Untersuchung der Exzentrizitäten aufgrund der Seilkräfte wurde eine statisch-mechanische FEM-Analyse durchgeführt. Diese ergab, dass durch das „Doppelwand“-Prinzip des Generators, bei dem die Seilwinde nicht direkt auf dem Maschinengehäuse angebracht wird, die durch die Kraft bewirkte Verformung der Winde nur sehr gering an die Maschine weitergegeben wird. Die Verformung der Winde war davon abhängig, an welcher Position und wie konzentriert die Seilkraft auf die Winde einwirkte. Wird die Seilkraft über eine oder mehrere Seil-Schlingen verteilt an die Winde abgegeben, traten simulativ nur sehr geringe Verformungen im Bereich weniger μm auf. Verteilt sich die Kraft nur über einen Bruchteil einer Seilschlinge auf die Winde liegen die Verformungen im Bereich weniger 1/10 mm. Nachteile der räumlichen Trennung von Maschinengehäuse und Seilwinde ist eine Erhöhung des Trägheitsmoments des Gesamtsystems und eine Vergrößerung des erforderlichen Bauraums gegenüber einer Maschine, bei der die Seilwinde gleichzeitig als Maschinengehäuse dient. Ein Vorteil der Separierung besteht auch in einer besseren thermischen Entkopplung und Kühlbarkeit der Komponenten.

Im Rahmen des AP7 wurde eine Analyse möglicher Fehlerfälle durchgeführt mit dem Ziel, mögliche Fehlerfälle zu identifizieren und Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen zur Prävention und Fehlerbewältigung abzuschätzen und ggf. genauere Untersuchungen in die Wege zu leiten.

Elektrische Fehlerfälle sind Wicklungsunterbrechungen, Kurzschlüsse und thermische Überlastungen. Mechanische Fehlerfälle stellen z.B. Lagerschäden und Ermüdungsschäden im Rotor dar. Lagerschäden können dabei durch Lagerströme oder Verschleiß entstehen. Kurzschlüsse können zu einer thermischen Überlastung, zu großen mechanischen Stoßkräften und bei der PSM u.U. zu einer irreversiblen Entmagnetisierung der Magnete führen und wurden daher bei der magnetischen und mechanischen Dimensionierung der Maschine berücksichtigt. Ein unkontrolliertes Durchgehen der elektrischen Maschine in den anderen Fehlerfällen kann durch die mechanische Bremse der Seilwinde verhindert werden. Auch im Fehlerfall des elektrischen Antriebs kann SkySails damit im Forschungsbetrieb den Kite noch manuell landen. Aus Kostengründen wurde beim Forschungsdemonstrator auf eine redundante, zweite elektrische Maschine verzichtet.

Ein wesentliches Ziel des Projekts SkyPower 100 war es, die Funktionsfähigkeit des Antriebsstrangs auch praktisch nachzuweisen. Im Sommer 2020 wurde das Energiewandlungssystem bestehend aus Motor-Generator und den leistungselektronischen Komponenten am Großprüfstand des IAL, dem sogenannten GeCoLab (Generator Converter Laboratory) aufgebaut und umfangreichen Systemtests unterzogen. Insgesamt zeigten die Messungen am Forschungsgenerator, dass dieser wie vorausberechnet einen guten Wirkungsgrad im geforderten Bemessungsbetriebspunkt besitzt, wozu die geringe Auslastung und das Fehlen von Magnetverlusten in der Ferrit-PSM beitragen, einer ihrer großen Vorteile. Der gemessene Wirkungsgrad lag mit ca. 93 % aber etwas unter dem Entwurfsziel von 95 %, was darauf zurückzuführen ist, dass zum einen bei der Konstruktion und Kühlung des Rotors hohe Sicherheiten gewählt wurden, und außerdem

der Luftspalt zur erleichterten Fertigung vergrößert sowie ein schlechteres Magnetmaterial verbaut werden musste. Darüber hinaus verringerte sich der Wirkungsgrad durch die Verkleinerung der elektrischen Maschine im Rahmen der Anpassung von der MW-Ebene auf die Leistungsebene der Forschungsanlage (Antriebsleistung 300 kW). Es zeigte sich jedoch auch, dass der Wirkungsgrad insbesondere bei niedrigen Drehzahlen unterhalb von 25 % der Bemessungsdrehzahl unter 80 % fällt. Ursache dafür ist, dass der Forschungsgenerator für Starkwindzyklen mit höheren Drehzahlen optimiert wurde und auf eine höhere Ausnutzung im Rotor zugunsten von Kühlkanälen verzichtet wurde. Es zeigte sich aber, dass diese bei zeitlich begrenztem Betrieb unter maximaler Last und anschließender thermischer Entlastung im motorischen Betrieb nicht die Vorteile einer höheren Ausnutzung zugunsten von Magnetmaterial aufwiegen. Ein Vergleich mit den durchschnittlichen generatorischen Betriebspunkten für verschiedene Windgeschwindigkeiten macht deutlich, dass die Maschine dadurch bei schwachem Wind einen schlechteren Energiewirkungsgrad aufweist, wenn zum Erreichen eines Ernteoptimums des Drachens ein hohes Drehmoment und eine niedrige Drehzahl verwendet werden. Durch eine höhere Ausnutzung im Rotor (u.a. durch eine größere Polzahl) können insbesondere der Leistungsfaktor und der Wirkungsgrad verbessert werden. Für zukünftige Entwicklungen sollte der Generator auf die am Einsatzort häufigste Windgeschwindigkeit optimiert werden.

Die wichtigsten Ergebnisse der leistungselektronischen Teilarbeitspakete betrafen die Identifikation der Herausforderungen und Belastungsfaktoren, die eine Pumpzyklus-FWEA auf den elektrischen Antrieb ausüben kann. Darauf aufbauend wurden in AP7.6 verschiedene Antriebskonzepte und Steuerungsstrategien vorgeschlagen, um die identifizierten technischen Herausforderungen zu überwinden, wie z. B. die negativen Auswirkungen auf die Größe und die Lebensdauer der Frequenzumrichter und die Schwierigkeiten bei der Konformität mit den bestehenden Netzvorschriften.

Die wichtigsten identifizierten Herausforderungen und die vorgeschlagenen Lösungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Der elektrische Antrieb muss eine durchschnittliche Erzeugungsleistung bewältigen, die ein Vielfaches der durchschnittlichen Zyklusleistung beträgt. Die Spitzenleistung ist sogar noch höher.
2. Aufgrund des Zyklusverhaltens des Drachens leidet der maschinenseitige Umrichter unter einem thermischen Zyklusproblem, das seine Lebensdauer verkürzt. Infolgedessen muss der Umrichter erheblich überdimensioniert werden, was sich auf die Gesamtkosten des Systems auswirkt.
3. Der Wirkungsgrad während der Transferphase ist wie bei jedem Antrieb aufgrund der dann geringen Drehzahl sehr niedrig.

Diese Herausforderungen können teilweise gelöst werden, indem die thermischen Zyklen entweder durch eine modifizierte Kite-Steuerung (geringere Last in der Transferphase) oder durch eine reduzierte Schaltfrequenz während der Transferphase verringert werden. Beide Methoden ermöglichen die Verringerung der Verluste während der Transferphase und verbessern den

Wirkungsgrad des Antriebs, wobei die modifizierte Drachensteuerung den Nachteil hat, dass sie sich auf die Dauer des Pumpzyklus auswirkt, was die insgesamt gewonnene Energie verringern könnte.

Darüber hinaus kann durch die Entscheidung für ein paralleles Antriebskonzept die Leistung zwischen einem preiswerten Diodengleichrichter, der für die zyklische Leistung ausgelegt ist, und einem kleinen Vollumrichter aufgeteilt werden, der während des gesamten Zyklus mit nahezu konstanter Last arbeitet und den motorischen Betrieb und eine verbesserte Stromregelung ermöglicht. Das parallele Antriebskonzept und die Regelungsstrategien ermöglichen in Summe eine Verringerung der aktiven Chipfläche der schnell schaltenden Komponenten (IGBT/FWD) um 50 % und gleichen diese Verringerung durch eine zusätzliche Silizium-Chipfläche für langsame Gleichrichter von 30 % aus. Es wird erwartet, dass die Kosten aufgrund dieses Kompromisses sinken werden.

Eine weitere Herausforderung ist die zyklische Einspeisung von Energie in das Netz ohne Energiespeicher. Dieses Leistungsprofil erfordert den Verbrauch von Netzenergie, die in der Regel zu höheren Preisen verkauft wird als die ins Netz eingespeiste Energie, was die Kostenoptimierung des Zyklus verringert. Die zyklische Einspeisung behindert das System auch bei der Versorgung kleiner Lasten an abgelegenen Standorten, wo das Angebot den Bedarf innerhalb enger Grenzen decken muss. Der netzseitige Umrichter muss ebenfalls überdimensioniert sein, um die Spitzenleistung zu bewältigen, obwohl die durchschnittliche Leistung des Zyklus viel geringer ist als diese. Eine Einzelanlage kann dadurch ohne Energiespeicher in Summe die bestehenden Netzanschlussbedingungen nicht erfüllen, insbesondere nicht die Anforderungen an die Fehlerüberbrückung und die Netzfrequenzstützung.

Die vorgeschlagene Lösung für diese Herausforderungen ist die Einbindung von Energiespeichersystemen in den Gleichspannungszwischenkreis. In diesem Projekt wurden Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LFP), Ultrakondensatoren (UC), sowie Stahl- oder Kohlefaserschwungräder mit Hilfe einer technisch-ökonomischen Analyse auf der Grundlage von Optimierungsmethoden miteinander verglichen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass LFP-Batterien die niedrigsten Kosten pro Kilowattstunde aufweisen, was sie zu den besten Kandidaten für Anwendungen macht, bei denen die Bereitstellung von Hilfsdiensten für das Netz erforderlich ist. Andererseits bieten Stahlschwungräder die niedrigsten Kosten pro Kilowatt installierter Leistung und sind um 21 % günstiger als LFP-Batterien, was sie zur günstigsten Gesamtenergiespeicherlösung für solche Anwendungen macht.

Schließlich wurde im Rahmen dieses Projekts auch die Möglichkeit untersucht, mehrere Kites in einem Windpark zusammenzuschalten (AP7.7). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei Windparks mit 5 und mehr Einheiten die kollektive Ausgangsleistung immer positiv bleibt und ein Energiespeichersystem je nach Anwendung möglicherweise nicht erforderlich ist. Es wurde auch festgestellt, dass die Entscheidung für Gleichstromsammelnetze mit einem gemeinsamen netzseitigen Umrichter das Verhältnis von Spitzenleistung zu Durchschnittsleistung verringern kann, wodurch die Größe des netzseitigen Umrichters insbesondere bei großen Windparks stark reduziert werden kann.

AP8: Entwicklung Antriebstrang

Die Arbeitspakete AP8 bis AP9 wurden in Hauptverantwortung durch den Projektpartner IAL Hannover durchgeführt. In dessen Abschlussbericht sind die Ergebnisse im Detail diskutiert. In diesem Dokument wird sich auf die Zu- bzw. Mitarbeit von SkySails beschränkt.

Die beteiligten technischen Disziplinen haben ihre projektrelevanten Fragestellungen formuliert, welche dann im Rahmen von fachübergreifenden Konzept-Workshops diskutiert, ausgewertet und dokumentiert wurden. Als Ergebnis wurden die Schnittstellen zwischen den Fachdisziplinen festgelegt und die für das IAL notwendigen Anforderungen an den Antriebsstrang spezifiziert.

Der Meilenstein M2 „Entscheidung des Antriebsstrangkonzpts“ wurde im August 2018 erreicht: es sollten eine Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) sowie ein Synchron-Reluktanzmotor (SRM) entwickelt und produziert werden. Es konnte jedoch kein Hersteller gefunden werden, der den Synchron-Reluktanzmotor mit den geforderten Maßtoleranzen herstellen könnte. Außerdem hat das IAL unerwartet hohe Kosten für die Beschaffung des Teststands festgestellt. In Absprache mit dem Projektträger wurde entschieden, nur die permanenterregte Synchronmaschine zu fertigen.

In Zusammenarbeit mit dem Lieferanten der Winde und dem Lieferanten der Synchronmaschine wurde die Lagerung des außenliegenden Läufers sowie des innenliegenden Stators entwickelt. Die drehende Lagerung der Windentrommel wird mit dem Rotor auf der Statorwelle gelagert. Die Lagerung des Außenläufers musste in der Windentrommel liegen; dies wurde durch einen Schiebesitz und einen Adapterflansch realisiert. Als Antrieb für den Drehgeber dient ein innenliegender Zahnriemen.

AP9: Beschaffung und Fertigung der Pilotanlage

Der Synchrongenerator wurde im Juni 2020 an das IAL Hannover ausgeliefert, wo zunächst allgemeine Messungen am Antriebstrang auf dem Prüfstand des GeColabs vorgenommen wurden. Anders als im Förderantrag angenommen, ließ sich die vom IAL im Prüfstand genutzte Leistungselektronik aufgrund räumlicher Gegebenheiten nicht in der Bodenstation unterbringen. Der Schaltschrank für die Phase3-Anlage wurde darum vom Lieferanten entwickelt und konstruiert.

Der Phase3-Schaltschrank wurde beim Lieferanten der Winde erfolgreich zusammen mit dem Phase3-Generator in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme wurde durch Service-Techniker vom Lieferanten der Leistungselektronik begleitet, die SkySails Power auf eigene Kosten bestellt hat. An der Phase2-Anlage wurde festgestellt, dass der Schaltschrank mit den Frequenzumrichtern vibriert; dieses Problem wurde beim Umbau zur Phase3-Anlage behoben.

Für den Einbau der permanentenerregten Synchronmaschine in die Pilotanlage waren umfangreiche Anpassungen notwendig gewesen. Der Einbau des Umrichters in den Maschinencontainer erforderte aufgrund der beengten Verhältnisse enge Abstimmung zwischen den Projektpartnern und dem Lieferanten des Umrichters. Außerdem waren folgende Anpassungen an der Phase2-Anlage beim Umbau zur Phase3 notwendig: Änderung des Not-Aus-Konzeptes, Blitzschutz, Führungsleinenübergabe, Anpassung Kabel und Kabelwege, Anpassung Kühlsystem, Gondelfunk, Bauchläden zur manuellen Bedienung, sowie der Einbau einer Wetterstation. Der unerwartet hohe Aufwand beim Umbau der Phase2 zur Phase3-Anlage erklärte sich auch durch den gestiegenen Funktionsumfang; mit jedem weiteren Monat erhöhte sich die Anzahl der Komponenten, die man an der Pilotanlage durch eine verbesserte Version austauschen wollte.

Im Rahmen des Netzanschlusses aufkommende Problemstellungen bezüglich Leistungsschalter, Not-Aus-Konzept und Kabelauswahl konnten direkt zwischen dem Lieferanten und dem von SkySails beauftragten Planer geklärt werden.



Abbildung 19: Inbetriebnahme von Generatorwinde und Schaltschrank beim Lieferanten

Aufgrund des Umfangs der Änderungen kam es zu starken Verzögerungen im Projektverlauf, wodurch der Antriebstrang des IALs nicht wie ursprünglich geplant 9 Monate betrieben werden

konnte. Stattdessen erfolgte ein Probebetrieb über einen Zeitraum von 4 Monaten. Davon unberührt konnten aber alle anderen Entwicklungen fortgeführt werden. Für das Forschungsprojekt relevant waren besonders die Fortschritte im Bereich Automatisierung, Stauen-und-Bergen-System, Software-Infrastruktur und Elektronik-Entwicklung.

Vor dem Erstflug in Klixbüll wurden zahlreiche Tests des Antriebstrangs am Produktionsstandort in Seevetal (s. Abbildung 20) durchgeführt, um die Dauer der Inbetriebnahme zu minimieren und so den Flugbetrieb in Klixbüll möglichst nicht zu stören.



Abbildung 20: Neuer Produktionsstandort von SkySails Power

AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung

Das von Omexom bearbeitete Arbeitspaket 10 umfasste die Standortsuche, Genehmigung, und Infrastruktur der Forschungsanlage. Neben dem allgemeinen Genehmigungsverfahren für den Erstflug 2019 sind besonders die avifaunistische Untersuchung, das Schallgutachten, sowie der Netzanschluss als wesentliche Teil-Arbeitspakete hervorzuheben. Weitere Details können dem Abschlussbericht von Omexom entnommen werden.

Das Arbeitspaket 10 hat eine enge Zusammenarbeit der Projektpartner Omexom und SkySails erfordert. Aufgrund des hohen Arbeitsaufkommens – Unterlagen vorbereiten, Ministerien- und Behördentermine wahrnehmen – hat SkySails auf eigene Kosten einen Projektleiter eingestellt. SkySails hat zwar formal nicht das Arbeitspaket 10 bearbeitet, die Arbeit von SkySails wird aber der besseren Übersicht wegen in diesem Arbeitspaket zusammengefasst.

In einem aufwendigen Verfahren hat Omexom bundesweit geeignete Standorte untersucht, bis Klixbüll von den beteiligten Trägern öffentlicher Belange sowie Omexom als konfliktärmster Standort identifiziert wurde. In Folge der positiv verlaufenen Schallimmissionsmessung und der avifaunistischen Untersuchung darf die Pilotanlage 24 Stunden am Tag, und 7 Tage die Woche betrieben werden. Dabei darf der Kite bis zu 700 m weit aufsteigen. Klixbüll ist weltweit der einzige Standort, der die Erprobung und Weiterentwicklung von Flugwindkraftanlagen in diesem Umfang zulässt. Das in den schleswig-holsteinischen Behörden aufgebaute Wissen wurde in mehreren Fällen aus anderen Bundesländern angefragt. Es wurde eine Verlängerung der Standortgenehmigung bis Herbst 2024 erreicht.

Es wurde geprüft, wie man umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse zur Wirkung von Flugwindenergie auf die Avifauna generieren kann. Zum Berichtszeitpunkt existierten innerhalb der „Airborne Wind Energy“-Branche lediglich zwei Arten von Betrachtungen:

1. Schätzungen, die auf der Übertragung von Erkenntnissen aus vergleichbaren avifaunistischen Fragestellungen basieren (sog. Proxys, z.B. Letalität von Stahlseilen an Funktürmen oder Wirkung von Sport-Kites auf Vogelpopulationen)
2. Standortbezogene Gutachten mit geringer Aussagekraft für andere Regionen

Die Ergebnisse der avifaunistischen Untersuchungen weisen standortbezogen positive Ergebnisse auf. Generell werden Fledermäuse nicht als gefährdet eingeschätzt. Es ist anzunehmen, dass die Gefahr einer Kollision mit dem sich sehr langsam bewegenden Seil aufgrund ihrer Echoortung sehr gering ist. Im oberen Flugbereich des Kites kommen ortsansässige Fledermäuse in der Regel nicht vor. Vögel zeigen weiter keine deutliche Reaktion auf den Flugdrachen. Lediglich kleinere Aktivitätspausen bei Start und Landung sind zu beobachten. Diese Ergebnisse sind als sehr standortbezogen zu bewerten und variieren je nach vorkommenden Artenspektrum sowie Qualität des Umlandes für jeweiliges Artenvorkommen.

Die standortbezogenen Ergebnisse der Schallmessung zeigen, dass die Anlage am nächstgelegenen Wohnort als schalltechnisch irrelevant anzusehen ist. Immissionsrichtwerte nach TA Lärm in dB(A) werden eingehalten. Hier ist deutlich hervorzuheben, dass diese Ergebnisse stark

abhängig vom jeweiligen Standort sind. Die Entfernung zwischen Immissions- oder Emissionsort, Topografie, Oberflächenrauigkeit, die Anzahl der Anlagen und die schalltechnische Vorbelastung sind Punkte, die die Lärmbelastung stets individuell beeinflussen. Daher lässt sich durch diese Anlage in Klixbüll keine generelle Vereinbarkeit in Bezug auf Schallimmissionen feststellen. Jedoch bestehen in diesem Projekt aus der Sicht des Immissionsschutzes keine Bedenken.

AP10: Projektierung, Standortsuche und Genehmigung – Luftfahrt

Flugwindkraftanlagen und Flugzeuge teilen sich im Betrieb bis ca. 800 Meter den gleichen unkontrollierten Luftraum Golf. Zur Gewährleistung eines sicheren Luftraumes arbeitet SkySails derzeit an Möglichkeiten der Regulierung von Flugwindkraftanlagen im Luftraum. Als übergangsweise sichere Option zur Durchführung der Flugtests wurde von Beratern und Behörden die Einrichtung eines Flugbeschränkungsgebiets (im weiteren Text als ED-R bezeichnet) vorgeschlagen. Da umfassende Abstimmungen mit einer großen Anzahl an Behörden (Luftfahrtbehörde Schleswig-Holstein, Deutsche Flugsicherung, Bundesverkehrsministerium) und betroffenen Stellen (Rettungsflieger, Bundeswehr) eingebunden werden mussten, hat der Entscheidungsprozess über dieses Flugbeschränkungsgebiet viele Monate gedauert. Zur Erreichung der Aufstiegsgenehmigung hat es umfangreiche schriftliche Korrespondenz, Gespräche und Treffen mit Behörden und Fachberatern gegeben.

Die Erteilung einer angemessenen Luftfahrt-Genehmigung für den Testbetrieb wurde als eines der kritischen Projektziele identifiziert. Dies hat zum Hintergrund, dass der Wirtschaftsräum „Luft“ bisher nur von der Luftfahrt als bisher alleinigen Akteur geprägt ist. Flugwindkraftanlagen sind ein neuer, jedoch zukünftig wirtschaftlich relevanter Akteur, für den die Genehmigungsbehörden bisher keine bekannte Referenz heranziehen können.

Um eine effektive Erprobung der Technologie durchführen zu können, war es zentral, dass die Kennzeichnung des Seils entfällt. Obwohl technische Lösungen denkbar sind, würde deren Entwicklung und Umsetzung den Projektrahmen sprengen. Eine manuelle Befestigung von Fahnen oder Lampen auf der kompletten Länge wäre aus Gründen der Arbeitssicherheit nicht möglich, da das Seil im Regelbetrieb mit einer Geschwindigkeit von ca. $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ eingezogen wird. Durch das mit der ED-R erreichte hohe Sicherheitsniveau wurde von allen Beteiligten eine Kennzeichnung mittels Befehrerung von Bodenstation und Kite als ausreichend erachtet.

Mit der Unterstützung des Bundeswirtschaftsministeriums gelang es, von dem Bundesverkehrsministerium eine Zusage für die Einrichtung einer ED-R zu erhalten. Nachdem auch die Bundeswehr ihr Einverständnis zur Einrichtung der ED-R gegeben hatte, erhielt SkySails im Juni 2019 die schriftliche Zusage zur Aufstiegserlaubnis.

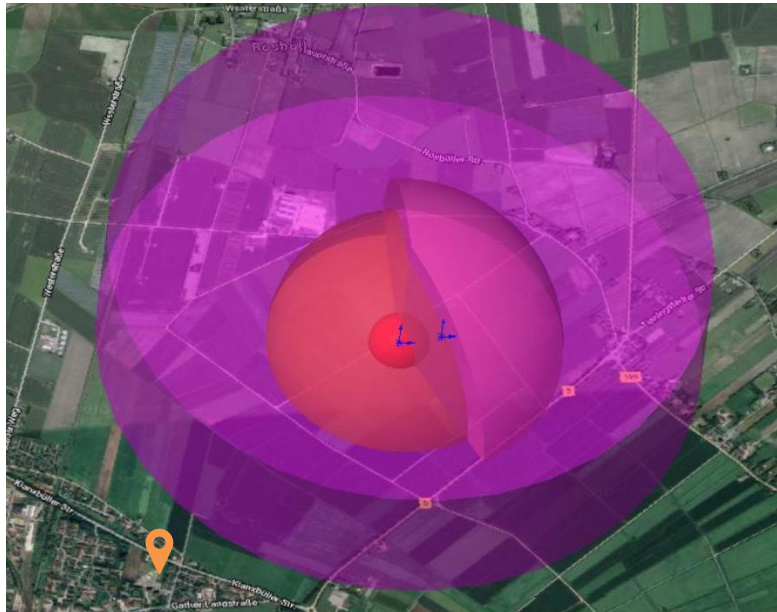


Abbildung 21: 3D-Visualisierung der Flugbereiche und des Flugbeschränkungsgebiets

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass das Flugbeschränkungsgebiet in unmittelbarer Nähe zum Hubschrauberlandeplatz (orangene Markierung) liegt. Aufgrund der vorherrschenden Wetterbedingungen und den umliegenden Wohngebieten fliegen die Piloten der DRF-Station Niebüll bei Start und Landung häufig über die Felder nordöstlich des Landeplatzes, die innerhalb des Flugbeschränkungsgebiets südwestlich der Pilotanlage liegen.

Zur Erlangung der Aufstiegsgenehmigung verlangte die Luftfahrtbehörde des Landes Schleswig-Holstein (LBV-SH) von den Projektpartnern, konkrete Absprachen mit den Rettungsfliegern in Niebüll zu treffen. Bei dem ersten Treffen im August 2019 wurde von dem Stationsleiter der DRF-Station in Niebüll gefordert, dass eine Abstimmung mit den Fachverantwortlichen der DRF Luftrettung stattfinden sollte. Daraufhin fand im selben Monat ein Treffen zwischen SkySails und den Fachverantwortlichen der Zentrale der DRF in Baden-Württemberg statt. Die dort getroffenen Absprachen wurden ausgearbeitet und im September in einer Endfassung abgestimmt und festgehalten. Weitere Details – z.B. welche Funksprüche zwischen der Pilotanlage und den DRF-Piloten verwendet werden sollen – wurden in den darauffolgenden Wochen zusammen mit der DRF-Station in Niebüll vereinbart.



Abbildung 22: Flugbeschränkungsgebiet (grün), Flugbereich (rote Linie) und DRF Station (Markierung)

Kernpunkte der Vereinbarung mit der DRF Luftrettung sind:

- Den Rettungsfliegern ist ein Durchflug des Flugbeschränkungsgebiets außerhalb des rot markierten Flugbereichs jederzeit gestattet (s. Abbildung 22)
- Wenn ein Durchflug des rot markierten Flugbereichs notwendig ist, kann die DRF-Station dem Leitstand der Pilotanlage per Funk oder Telefon anweisen, den Luftraum kurzzeitig freizugeben. Hierzu wird der Kite unter einer Höhe von 500 ft gesteuert, das sog. „Absink-Manöver“.

Mit anderen zum Einflug berechtigten Luftfahrtnutzern wie Bundespolizei oder Bundeswehr existieren keine solchen Absprachen. Der Einflug kann direkt per Funk oder indirekt über Kontaktaufnahme mit der DFS gefordert werden. Sollte dennoch ein nicht autorisierter Einflug festgestellt werden, muss sofort ein Absink-Manöver durchgeführt werden. Bei weiter bestehender Kollisionsgefahr hätte der Kite auf den Boden abgelegt werden sollen.

Gegen Ende der Evaluationsphase wurden die involvierten Stakeholder (u.a. DRF Luftrettung, Luftsportverband SH, Deutscher Aero-Club) um Stellungnahmen gebeten, die ausschließlich positiv ausfielen. Im März 2020 fand ein gemeinsamer Termin in Kiel mit der DFS dt. Flugsicherung GmbH und der Landesluftfahrtbehörde LBV-SH statt. Die getroffenen Vereinbarungen mit den Stakeholdern hatten sich bewährt; aufgrund der positiven Rückmeldungen wurde die ED-R SkySails offiziell bis zum 30.09.21 (Ende der Laufzeit des Forschungsvorhabens SkyPower100) verlängert.

In der Evaluationsphase waren die Flugtage einzeln bei der DFS angemeldet worden. Die DFS aktivierte die ED-R per NOTAM für den jeweiligen Tag. Da der Flugbetrieb im März 2020 bereits

regelmäßig stattfand, wurde die Gültigkeit des Flugbeschränkungsgebiets auf montags bis freitags erweitert (s. Anhang A „Erneute Bekanntmachung der ED-R SkySails nach Evaluation“).

Im Juni 2020 wurden erstmals Nachtflüge durchgeführt. Dies wurde eng mit der Bundespolizei-Fliegerstaffel Fuhlendorf abgestimmt, da diese bei ihren nächtlichen Einsätzen ggf. die Transponder abschalten, um ihre Position nicht zu verraten. Ziel dieser Nachtflüge war zum einen, das Verhalten der Anlage bei nächtlichen Windverhältnissen zu studieren und Daten zu erzeugen, und zum anderen, erste Erfahrungen zur Sichtbarkeit des Systems und des nächtlichen Flugbetriebs zu sammeln.

Im November 2020 fand ein Abstimmungstermin zwischen der Landesluftfahrtbehörde LBV.SH und SkySails Power statt, um den geplanten Dauerflugbetrieb ab 2021 zu besprechen. In diesem Termin konnte festgestellt werden, dass es von allen involvierten Beteiligten erneut ausschließlich positive Rückmeldungen zum Betrieb und den bereits getroffenen Vereinbarungen gab.

SkySails Power versendete ursprünglich wöchentlich einen Nutzungsplan für die voraussichtliche Nutzung der ED-R an zahlreiche Stakeholder. Aufgrund der Rückmeldung der adressierten Stakeholder, dass die Nutzungspläne nicht mehr nötig seien, wurde dieses Prozedere in Einverständnis aller Beteiligten eingestellt. Auch konnte die Einschränkung, dass der Kite stets unter der Wolkenuntergrenze zu betreiben ist, aufgegeben werden. Die DRF-Luftrettung Niebüll verzichtete aufgrund der guten gemeinsamen Erfahrungen auf diese zusätzliche Anforderung.

Zur Erhöhung der Sicherheit wurde ein System zur Luftraumüberwachung installiert, das sowohl ADS-B-Signale⁴ wie auch FLARM-Signale⁵ von aussendenden Flugzeugen empfängt. Nachts sind Flugzeuge in Deutschland im Luftraum Golf, in dem auch der Kite fliegt, zur Verwendung eines Transponders verpflichtet.

Da das SkySails-eigene Luftraumüberwachungs-System nicht alle Transpondersignale empfängt, wurden Angebote für kommerzielle Systeme eingeholt, die eigentlich dem Zweck der „Bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung“ (BNK) von konventionellen Windenergieanlagen⁶ dienen. Zur Erfüllung der Anforderungen der BNK werden drei unterschiedliche technische Ansätze verfolgt:

1. Aktiv-Radar: Eine Radarantenne am Standort sendet einen Radarimpuls aus. Das reflektierte Signal wird ausgewertet und Position, Höhe, Richtung und Geschwindigkeit eines Flugobjekts errechnet.
2. Passiv-Radar: Die Antenne des Passivradars registriert kontinuierlich vorhandene Fernseh- und Mobilfunkwellen (DVB-T1 und DVB-T2). Dabei werden Reflektionen von Radiowellen (z.B. durch Bauwerke, Fahrzeuge, Luffahrzeuge) mit dem direkt empfangenen Signal

⁴ System zur automatischen Aussendung von Flugdaten von Luftfahrzeugen, u.a. Position

⁵ Flight alarm, Kollisionswarnsystem für Segelflugzeuge

⁶ Bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung, siehe Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luffahrtshindernissen (AVV Kennzeichnung)

verglichen. Unter Berücksichtigung weiterer Empfangsstellen kann durch Multilateration ein dreidimensionales Bild des Flugverkehrs abgebildet werden (s. Abbildung 23).

3. Transponderbasiertes BNK-System: Bei diesem System empfängt die Antenne am Standort die Transpondersignale von Luftfahrzeugen. Dabei werden die notwendigen Daten zur Positionsermittlung meist selbst von Luftfahrzeugen übermittelt oder mit Hilfe von mehreren Antennen durch Multilateration errechnet.

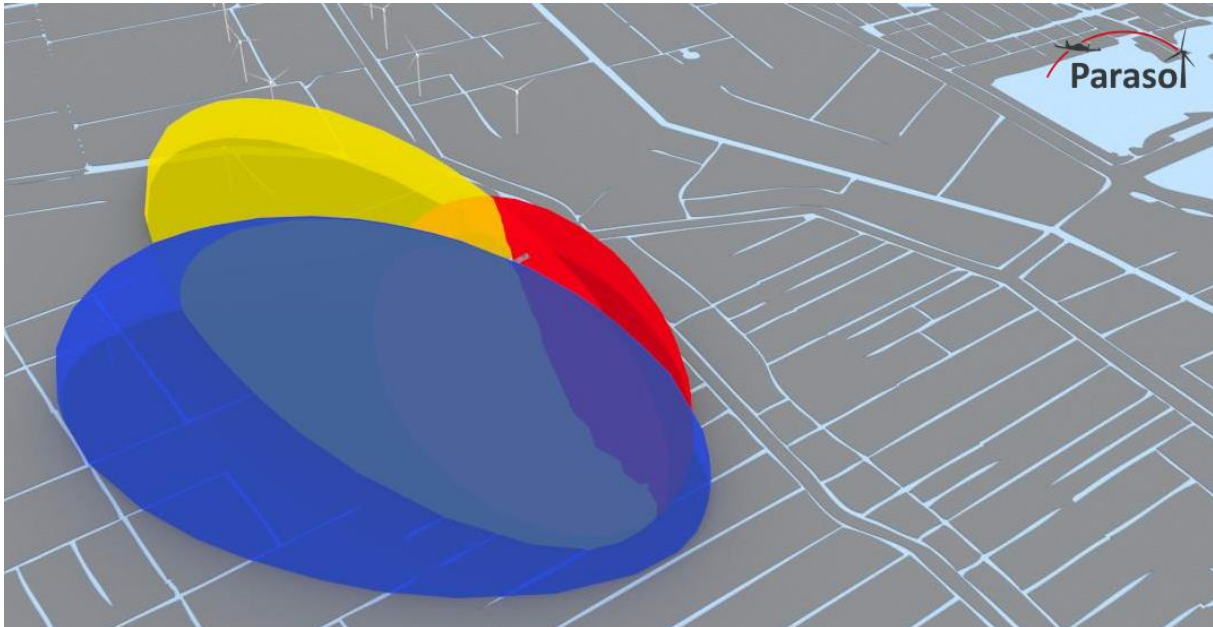


Abbildung 23: Dreidimensionale Ortung eines Luftfahrzeugs durch Multilateration⁷

Bei der DFS konnte im Dezember 2020 die Verlängerung und Ausweitung der Betriebszeiten des Flugbeschränkungsgebiets (ED-R SkySails) erwirkt werden (siehe Anhang A). Die Gültigkeit der ED-R erstreckt sich zunächst bis Ende September 2021. Seit Januar 2021 war das Gebiet Tag und Nacht durchgängig aktiv.

Obwohl das Flugbeschränkungsgebiet „ED-R SkySails“ länger als 12 Monate dauerhaft aktiv war, wurde es aufgrund des Status einer temporären Flugbeschränkung (im Gegensatz zu z.B. der ED-R um das Berliner Regierungsviertel) nicht in die ICAO-Luftfahrtkarte eingetragen. Dies wurde gegenüber dem BMVI mehrfach angemahnt, da es aus Sicht der DFS und der Projektpartner ein unnötig hohes Risiko für den Flugverkehr darstellt. Das Flugbeschränkungsgebiet wurde bis Oktober 2024 verlängert; ab 2023 soll die ED-R in der ICAO-Luftfahrtkarte eingetragen sein.

Eine vollautomatisierte Luftraumüberwachung wäre für zukünftige *airborne wind energy systems* eines der denkbaren Werkzeuge, um eine Luftfahrtgenehmigung zu erhalten, ohne dass ein Flugbeschränkungsgebiet errichtet werden muss. Dies würde allerdings voraussetzen, dass andere Luftraumnutzer ihre Position elektronisch kenntlich machen – wozu Piloten in Deutschland

⁷ Dirkshof: *Werbefroschüre „Passiv-Radar-System für Windkraftanlagen“*, in: Dirkshof-Website, 2019, [online] https://www.dirkshof.de/fileadmin/Dateien/Passivradar_Infos/Parasolbroschuere_2019.pdf [Abrufdatum: 07.10.2022]

tagsüber aktuell nicht verpflichtet sind, wenn sie im untersten Luftraum Golf fliegen, in dem die SkySails-Anlage in Klixbüll betrieben wird.

Zur Luftraumintegration von Flugwindkraftanlagen steht SkySails Power im Austausch mit Mitbewerbern aus der „Airborne Wind Energy“-Branche, sowie mit den Behörden, die an SkyPower100 beteiligt waren. Mehrere Mitbewerber verfolgen den Ansatz, Fluggenehmigungen mittels eines Specific Operational Risk Assessment zu erlangen. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Risikobewertung, mit dem europaweit Fluggenehmigungen für unbemannte Luftfahrzeuge vereinheitlicht werden.

Das Bundesverkehrsministerium kam in einem Schreiben im Herbst 2021 hingegen zu dem Schluss, dass es sich bei SkySails-Anlagen nicht um Luftfahrzeuge, sondern Luftfahrthindernisse handelt:

Unsere Prüfung zur luftrechtlichen Einordnung von Skysails kommt zu dem Ergebnis, dass es sich bei diesen Anlagen um Luftfahrthindernisse handelt.

Ein Skysail lässt sich zunächst nicht unter eines der historisch gewachsenen und in § 1 Absatz 2 Nummer 1 bis 10 des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) genannten Luftfahrzeuge fassen. Zu Recht verweisen Sie in diesem Zusammenhang bereits auf die Streichung von § 1 Absatz 2 Nummer 7 LuftVG im Rahmen des Vierzehnten Gesetzes zur Änderung des Luftverkehrsgesetzes vom 8. Mai 2012 (BGBl. I S. 1032). Eine Einordnung als Luftfahrzeug gemäß § 1 Absatz 2 Nummer 11 LuftVG kommt ebenfalls nicht in Betracht. Denn die Einordnung als Luftfahrzeug setzt einen Gegenstand voraus, der als Ganzes für die Benutzung im Luftraum bestimmt ist. Mit Blick auf die verwendete Bodenstation wird sowohl bei einer tatsächlicher als auch normativen Betrachtungsweise lediglich der dazugehörige (Lenk-)Drachen als Teil der Flugwindenergieanlage bestimmungsgemäß im Luftraum verwendet.

Die Drohnenindustrie und die Behörden der Flugsicherung arbeiten mit Hochdruck an Lösungen, um Drohnen ohne menschliche Überwachung am Boden zu verschiedenen Einsatzzwecken zu betreiben. Den Flug ohne Sichtkontakt zwischen dem unbemannten Luftfahrzeug und dessen Betreiber bezeichnet man dabei als BVLOS-Flug (*flight beyond visual line of sight*). Dem Grundsatz des von der EASA in Entwicklung befindlichen U-Spaces nach⁸ soll die sichere Integration der unbemannten Luftfahrt in erster Linie durch räumliche Trennung zur bemannten Luftfahrt geschehen. SkySails rechnet damit, dass Entwicklungen in diesem Bereich auf Flugwindkraftanlagen übertragbar sein könnten, bzw. dass man aus dem Ausgestaltungsprozess dieses neuen Luftraumkonzepts Erkenntnisse für die eigene Luftraum-Integration ableiten kann.

Aus Sicht der DFS bestanden zu Projektende keine Einwände gegen eine mehrjährige Verlängerung der ED-R SkySails. Das Bundesverkehrsministerium hat einer Entkopplung zwischen

⁸ Egis: *Military and U-Space: Guidelines - D1: U-Space Evaluation*, in: European Defence Agency, 12.09.2022, [online] <https://eda.europa.eu/docs/default-source/documents/d1-u-space-evaluation.pdf> [Abrufdatum: 06.10.2022]

Förderprojekt und Flugbeschränkungsgebiet zugestimmt, und damit einer vorläufigen Verlängerung der ED-R.

AP11: Kommerzialisierungsstrategie einer Flugwindkraftanlage zur Verwertung der Höhenwindenergie

EnBW hat im AP11 als wesentlichen Punkt einer Kommerzialisierungsstrategie die weltweiten Genehmigungsverfahren daraufhin untersucht, inwieweit sich daraus einhüllenden Anforderungen ableiten lassen.

Um einen weltweiten Überblick über Genehmigungsverfahren von Windenergieanlagen zu erhalten, wurden drei exemplarische Länder ausgewählt: Taiwan, Frankreich und Kalifornien. Bei der Auswahl waren drei Kriterien maßgebend: a) Attraktivität des Windenergiepotenzials, b) das Investitionsklima und c) Einschlägige Forschung im Bereich der Flugwindkraftanlagen (FWKA).

Für die Genehmigung sind insbesondere die Aspekte der zulässigen Schallemissionen, der Auswirkungen auf Fauna und Flora, des Schattenwurfs sowie der Luftraumsicherheit zu berücksichtigen. Weitere Kriterien betreffen Netzanschlussbedingungen und Raumbedeutsamkeit. Für die Kommerzialisierung wird auch die Typenzertifizierung nach IEC 61400 wichtig, weil damit aufwändige Sondergutachten zur technischen Zuverlässigkeit vermieden werden.

Hinsichtlich der Schallmissionen konnten aus einem Schallgutachten am Standort Klixbüll erste Erkenntnisse gewonnen werden. Die Schallbelastung ist während der Richtungswechsel des Kites am höchsten, liegt aber mehr als 6 dB unter dem Immissionswert im Nachtzeitraum und kann damit als nicht kritisch eingestuft werden. Eine Ton- und Impulshaltigkeit konnte nicht festgestellt werden. Diese Analyse bezieht sich konkret auf das untersuchte Projekt und ermöglicht noch keine allgemeine Ableitung der Schallmissionen für andere Standorte und Anlagen. Gleichzeitig gab es Stimmen der Anwohner, die sich durch Schall gestört fühlten. Im internationalen Vergleich sind bspw. in Taiwan auch strengere Vorschriften (nachts < 35dB für Frequenzen 20-200 Hz) einzuhalten. Es besteht demnach Forschungsbedarf, die Schallemissionen zukünftiger Kites zu reduzieren.

Die Einteilung von FWKA differiert zwischen EASA und FAA. Während die EASA „Tethered Aircraft“ als unbemanntes Flugobjekt anerkennt, schließt die FAA es explizit aus. In der EU unterliegen AWES also der Einordnung in die UAS (Unmanned Aircraft System) und den dazugehörigen Verordnungen, die derzeit vielen Veränderungen unterworfen sind. FWKA fallen voraussichtlich in die „specific“-Kategorie, d.h. vorher definierte Flugoperationen müssen genehmigt werden. Eine Risikoanalyse z.B. durch SORA (Specific Operations Risk Assessment) ist empfehlenswert, solange bis Handlungsvorschriften erarbeitet worden sind. Eine mögliche Genehmigung als Flughindernis spielt ebenfalls eine Rolle und wurde für die Testanlage in Klixbüll bereits erfolgreich durchgeführt. Wichtig ist, dass die Flugverbotszonen permanent in alle Luftfahrtkarten eingezeichnet werden.

Aufgrund personeller Engpässe bei EnBW wurden Teile der Untersuchung von DNV durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Genehmigungen beruhen auf regionalen, nationalen und internationalen Regeln.
- Internationale Standards (IEC-Normen, Flugsicherheit ...) bilden nur einen Teil der zu beachtenden Regeln.
- Nationale oder regionale Regeln (UVP/EIA, Abstandsregeln, Artenschutz für spezifische Flora und Fauna ...) sind zu vielfältig für eine einhüllende Betrachtung.
- Lokale Gegebenheiten (Artenschutz, Netzanschlusslänge, Hintergrundlärm, Erdbebenklasse ...) müssen ohnehin einzeln bearbeitet und begutachtet werden, auch wenn nur geringe Auswirkungen erwartet werden.
- Genehmigungsbedingungen sind außerdem größenabhängig. Für Einzelanlagen gelten weniger strenge Vorschriften als für Windparks.

Eine einhüllende Auslegung erscheint nach den bisherigen Erkenntnissen nicht zielführend.

Die Standardisierung für die Auslegung der Zugseile, der Kites etc. sollte intensiviert werden. Damit wird die Typ- und Projektzertifizierung erleichtert.

Windparks sind kommerziell deutlich attraktiver als Einzelanlagen. Bei Flugwindkraftanlagen werden sich die Flugbereiche einzelner Anlagen überschneiden. Bisher fehlen hierzu Auslegungsverfahren sowie Park-Steuerungen zur Ertragsoptimierung.

Zu den förderpolitischen Zielen im Bereich der Windenergie-Forschung gehören u.a. folgende Punkte:

- unternehmensübergreifende Standardisierung von Komponenten, Baugruppen und Schnittstellen
- Anpassung der Windenergieanlagen an Sicherheitsanforderungen der See- und Luftfahrt
- Übertragung von Erkenntnissen aus anderen Technologiebereichen (Luft- und Raumfahrt, Bionik etc.) auf die Technik der Windenergienutzung

Mit Bezug auf das AP11 sind folgende Punkte hervorzuheben:

Nicht nur die Standardisierung von Komponenten, Baugruppen und Schnittstellen, sondern auch die Standardisierung von entsprechenden Auslegungsverfahren in Form von Normen und Leitlinien ist für die Typenzertifizierung und für einen unbürokratischen Ablauf des Genehmigungsverfahrens kommerzieller Anlagen von entscheidender Bedeutung.

Gerade am Teststandort in Klixbüll war eine intensive Abstimmung zur Gewährleistung der Luftraum-Sicherheit notwendig, weil sich in unmittelbarer Nachbarschaft eine Helikopterbasis der Deutschen Rettungsflugwacht (DRF) befindet. Durch die Ausrüstung mit Transpondern kann sichergestellt werden, dass der Flugdrache immer sofort eingezogen wird, wenn sich ein Transponder (bzw. Helikopter) nähert.

Die zur Regulierung des Drohnenflugs von der Europäischen Luftfahrtbehörde EASA entwickelte „U-Space“-Vorschrift hat sicher dazu beigetragen, dass bei der EASA bereits eine Sensibilisierung hinsichtlich neuartiger Fluggeräte (UAV, „Unmanned Air Vehicle“) vorlag. Dies hat letztlich dazu geführt, dass die Einrichtung eines Flugbeschränkungsgebiets vereinfacht wurde.

AP12: Aufstellung Forschungsanlage und AP13: Inbetriebnahme

Mit Vorliegen der Baugenehmigung konnte das Bauvorhaben im November 2019 beginnen. In der ersten Bauphase wurden die Grabenüberfahrt und die Schotterfläche realisiert. Als die Schotterfläche befahrbar war, wurden die Betonplatten für die Unterkonstruktion platziert. Zwischen dem Bürocontainer und der Pilotanlage wurde ein Kabelrohr verlegt, durch das Strom- und Datenkabel gezogen werden können.



Abbildung 24: Montage der Pilotanlage inkl. Unterkonstruktion und ebenerdigen Betonplatten

Im Dezember 2019 begann die zweite Bauphase; die Phase2-Anlage wurde am Produktionsstandort in die einzelnen Komponenten zerlegt und am selben Tag nach Nordfriesland transportiert. In den darauffolgenden Tagen wurden die Komponenten zusammengefügt und Büro- und Lagercontainer auf dem Gelände platziert. Am 18.12.19 konnte der Erstflug erfolgreich absolviert, und damit erstmals die mechanische Funktionalität der Phase2-Anlage bestätigt werden.

AP14: Erprobung der Flugwindkraftanlage

Dieses Kapitel ist im Unterschied zu den vorherigen Kapiteln nach Teilzielen anstatt nach Teil-Arbeitspaketen geordnet. Von SkySails konnten in allen Teilzielen des Arbeitspakets 14 „Erprobung der Flugwindkraftanlage“ große Fortschritte erzielt werden.

Neben reinen Test- und Schulungsflügen fanden häufig Flüge statt, um die Technologie zu präsentieren. Auf politischer Ebene wurde die Pilotanlage von dem Energiewendeminister von Schleswig-Holstein, Jan Philip Albrecht, sowie dem Bundesvorsitzenden von B90/Die Grünen, Robert Habeck, besucht (s. Abbildung 25). Der Wirtschaftsminister von Niedersachsen, Dr. Bernd Althusmann (CDU), hat im Mai 2021 die Produktionsstätte von SkySails Power in Seevetal besucht (s. Abbildung 26).



Abbildung 25: Robert Habeck (Bundesvorsitzender B90/Grüne) steuert unter Aufsicht von Xaver Paulig (Systemingenieur) das fliegende System im Schulungsmodus



Abbildung 26: Bernd Althusmann (Wirtschaftsminister von Niedersachsen, CDU) besucht den Produktionsstandort von Skysails Power in Seevetal

Die Anlage wurde auch von Behördenseite besucht, u.a. von der Landesplanung des Innenministeriums Schleswig-Holsteins sowie der Immissionsschutzbehörde LLUR-SH. Durch diese Besuche haben die Behörden ein Urteil darüber fällen können, auf welche Weise die nächsten Pilotanlagen von SkySails Power raumplanerisch erfasst werden sollen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Genehmigung einzelner Anlagen auch außerhalb von Windvorrangflächen möglich ist. Ob eine Anlage an einem bestimmten Standort genehmigungsfähig ist, hängt natürlich weiterhin von den dortigen raumplanerischen Gegebenheiten ab.

AP14: Generierung von Testdaten

Es wurden zusätzliche Mitarbeiter für den Betrieb der Anlage eingestellt, um die Entwickler zu entlasten. Dazu gehören auch Freizeitpiloten aus der Region, die während des Flugbetriebs die Funkstation besetzen und den Luftraum überwachen. Der hohe Personalbedarf war durch das frühe Entwicklungsstadium bedingt, das noch diverse händische Tätigkeiten erforderte, und

konnte während des Vorhabens stark reduziert werden. Es ist ein priorisiertes Entwicklungsziel, so früh wie möglich eine Fernüberwachung zu ermöglichen.

Die ersten Monate stand die Inbetriebnahme aller mechanischen und elektrischen Komponenten im Fokus. Dabei wurden Hardwaretests durchgeführt, und die Steuerung aller Komponenten (u.a. Azimutantrieb, Haupt- und Reffwinde, Mast, Kühlung) geprüft und überarbeitet. Ebenso wurden die Sicherheitsmechanismen (u.a. Sollbruchstelle, Alarmsystem, Fangleine, Trennvorrichtung) überprüft und ggf. mechanisch getestet.



Abb. 27: Phase2-Anlage beim Beginn des Powercycles

Im nächsten Schritt wurden längere Flugtests an konstanter Seillänge unternommen. Dies wird als Propulsionsmodus bezeichnet und entspricht dem Betriebsmodus von Schiffsystemen von SkySails, die auf Yachten und Containerschiffen zur Treibstoffeinsparung eingesetzt werden können. Dabei konnten die Komponenten ersten Dauertests unterzogen werden und Daten gesammelt werden, die für die Weiterentwicklung des Autopiloten nötig waren. Die Sensorik und die automatische Steuerung des fliegenden Systems sowie der Bodenstation konnten erfolgreich validiert werden.

Nach Abschluss dieser Tests wurden sog. Powercycles geflogen, wobei die Anlage erstmalig Strom erzeugt hat. Die Flugdauer und -häufigkeit wurde bis Jahresende 2020 stetig erhöht. Ebenfalls wurden erste längere Flüge mit über 24 Stunden Flugzeit absolviert. Die Abnutzungserscheinungen von Kite, Zahnriemen (zur Kite-Steuerung) und Seil waren gering. Es konnten wertvolle Erkenntnisse zur Beseitigung von möglichen Schwachstellen gewonnen werden. Es wurden

schrittweise die Anforderungen an die Maschine erhöht und die sich ergebenden Problemstellungen bearbeitet.

Die erzielten Betriebs- und Startwindgeschwindigkeiten sowie der Haltbarkeit der Komponenten erfüllten die Erwartungen der F&E. Aus den erzielten Werten ist abzuleiten, dass der Vorteil der höheren Volllaststunden von AWES in der Größenklasse der Pilotanlage erreicht werden kann.

AP14: Weiterentwicklung Design und Automatisierung

Alle Komponenten einer automatisierbaren Flugwindkraftanlage konnten erfolgreich getestet werden: Bodenstation, fliegendes System, Autopilot, Stauen-und-Bergen, Führungsleinenübergabe. Viele dieser Funktionen konnten im Vorhabenszeitraum voll automatisiert werden. Im Projektverlauf konnte der Automatisierungsgrad sukzessiv erhöht werden.

Bei der Anlagenbedienung wurden die Anforderungen an die Bediener stetig gesenkt und Schritte automatisiert, um einen möglichst autonomen Betrieb zu ermöglichen und die Einbindung der Entwickler in den alltäglichen Flugbetrieb zu minimieren.

AP14: Verbesserung der Effizienz des Energie-Erzeugungs-Zyklus

Anfang 2023 soll das neuentwickelte fliegende System in Betrieb genommen werden, welches im Vergleich zum Vorgängersystem von 2021 eine vierfach höhere Zyklusleistung erzielen soll (s. AP4: Entwicklung fliegendes System – Projekt „Variable Trim“). Es wurde Mitte 2022 ein 40 m²-Prototyp getestet, der eine wesentlich energieärmere und schnellere Rückholphase ermöglicht. Dies maximiert die anteilige Dauer der Stromerzeugung am Flugbetrieb, senkt den Stromverbrauch, und erhöht dadurch signifikant den Ertrag. Im Herbst 2022 wurde der vollständig skalierte Prototyp geflogen; die aerodynamischen Eigenschaften konnten validiert werden.

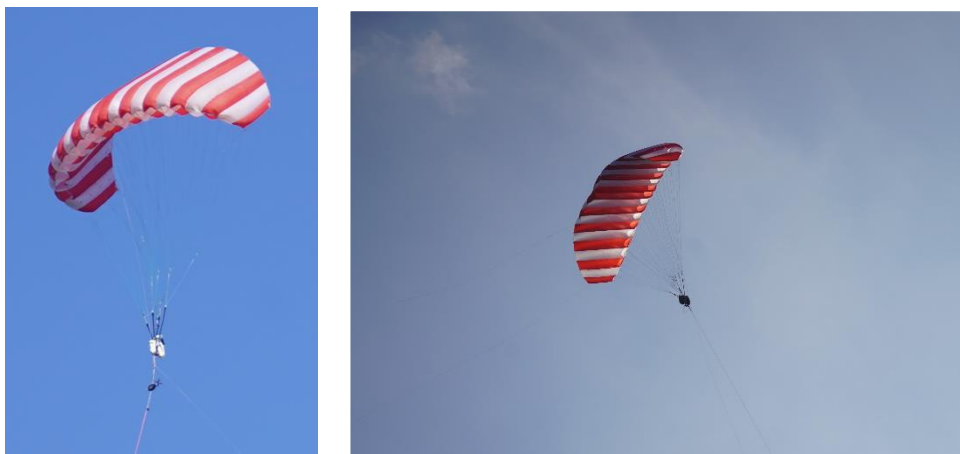


Abbildung 28: Prototyp „Variable Trim“ bei energiearmen Anstellwinkel

AP14: Dauerbetrieb der Pilotanlage

Aus praktischen Gründen fand der Flugbetrieb größtenteils werktags tagsüber statt. Zusätzlich wurden zahlreiche Nachtflüge unternommen, um die Anlage unter Realbedingungen über

längere Zeit zu erproben, sowie das Anlagenverhalten bei unterschiedlichsten Umweltbedingungen und Betriebsparametern zu untersuchen.

Bei den bisherigen Flugtests in Klixbüll gab es keine verschleißbedingten Ausfälle der Komponenten bei Bodenstation oder fliegendem System. Eine relevante Ausnahme ist der Steuerriemen, der in der vergangenen Gondel-Generation im Kurvenflug ungleichmäßig belastet wurde und dadurch frühzeitig verschliss. Dieses Problem ist konstruktiv in der nächsten Gondel-Generation behoben worden; der Gondelprüfstand (s. AP4.1: Gondelkonstruktion) kann diesen Lastfall simulieren.

AP14: Verifizierung Volllaststunden und der prognostizierten Stromgestehungskosten

Im Projektantrag begründete SkySails die hohe Anzahl der erwarteten Volllaststunden mit der niedrigen Startgeschwindigkeit, sowie dem höheren Energiegehalt in höheren Luftschichten. Die höhere Windgeschwindigkeit ermöglicht eine höhere Leistungsausbeute; ebenso bedeutsam für den Gesamtertrag ist aber die stetigere Verfügbarkeit hoher Windgeschwindigkeiten in 200 bis 400 m Höhe. Folgendes Diagramm, das auf Wetterdaten sowie Daten des Netzbetreibers 50Hertz basiert, verbildlicht die höhere Kapazität:

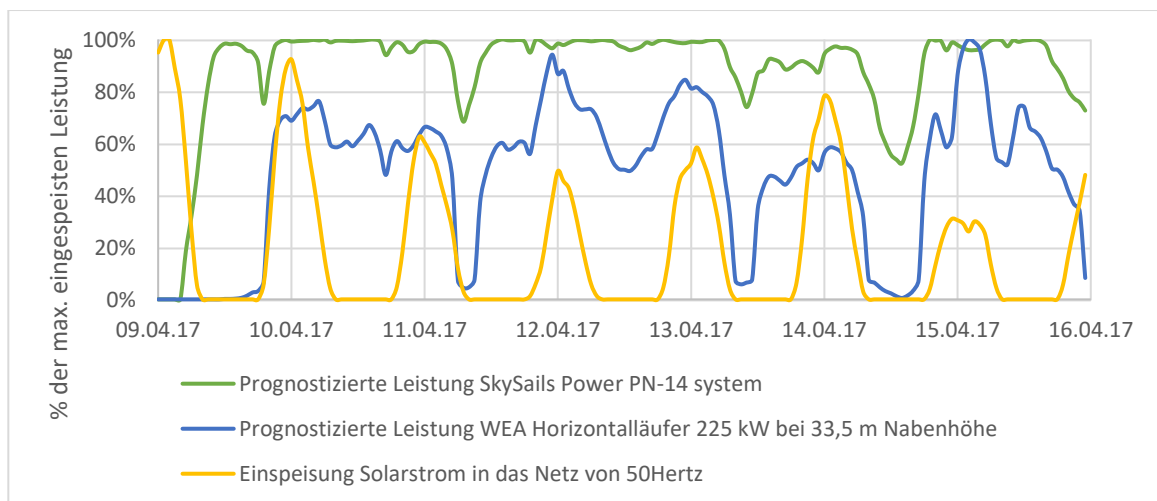


Abbildung 29: Vergleich der auf Basis von Wetterdaten prognostizierten Leistung einer Flugwindkraftanlage PN14 und einer Kleinwindkraftanlage mit der Einspeisung von Photovoltaik-Strom in das Netz von 50Hertz

Das Projekt „Global Wind Atlas“⁹ ermöglicht, weltweit die mittlere Windleistungsdichte in verschiedenen Höhen darzustellen. Abbildung 30 zeigt, dass in 200 m Höhe die mittlere Windleistungsdichte in weiten Teilen Norddeutschlands so hoch ist, wie sie in 100 m Nabenhöhe sonst nur Offshore zu erreichen ist:

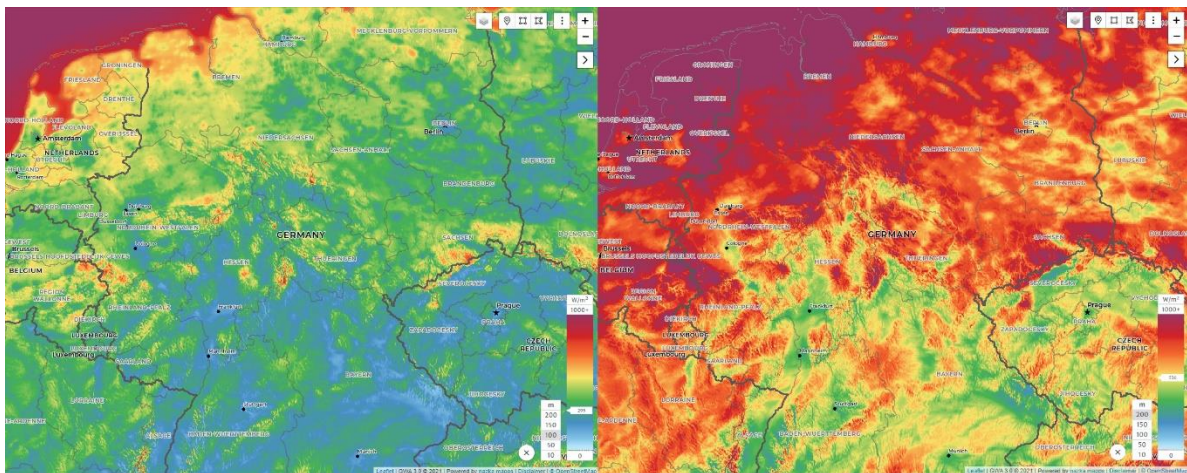


Abbildung 30: Mittlere Windleistungsdichte in 100 m Höhe (links) und 200 m Höhe (rechts)

In der Powerphase des vollautomatischen Flugbetriebs konnte die Leistung erreicht werden, die für die Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Flughöhe prognostiziert worden war. Flugwindkraftanlagen können erstmals die Luftschichten bis zu 400 m Höhe zur Stromerzeugung nutzen.

Im Betrieb zeigte sich, dass die für den Start notwendige Windgeschwindigkeit von $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ deutlich niedriger war als zu Projektbeginn angenommen ($6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Heute übliche 3-Blatt-Rotoren weisen eine Anlaufwindgeschwindigkeit von ca. $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf. Dabei ist zu beachten, dass die SkySails-Anlage – wenn sie erst in der Luft ist – auch unterhalb der Startgeschwindigkeit Strom erzeugen kann. Die Cut-Out-Windgeschwindigkeit beträgt $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; die maximale Windgeschwindigkeit im Flugmodus $35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Entscheidend ist dabei die Windgeschwindigkeit auf Höhe des Kites.

Nach aktuellen Modellrechnungen sind für zukünftige Megawatt-Anlagen Stromgestehungskosten von 4 bis 7 Eurocent pro kWh zu erwarten.

AP14: Prüfung der Haltbarkeit der Komponenten

Die Laborprüfungen ergaben, dass die geprüften Materialien und Fertigungsverfahren die Erwartungen an die Lebensdauer erfüllen (s. AP4.2: Kitekonstruktion – Materialprüfungen). Im Flugbetrieb gab es keine verschleißbedingten Ausfälle der Komponenten bei Bodenstation oder fliegendem System.

AP14: Optimierung von Steuerungssoftware und Flugstrategien

Die Flugstrategie konnte optimiert, und die Steuerungssoftware fortwährend an die Anforderungen der F&E angepasst werden (s. AP5.1: Autopilot-Entwicklung). Relevante Steigerungen der

⁹ <https://globalwindatlas.info/>

Zykluseffizienz sieht die F&E in nächster Zukunft in der textilen und elektrischen Weiterentwicklung, statt in der Weiterentwicklung des Autopiloten. Hier liegt der Fokus auf der Automatisierung und technischen Verlässlichkeit.

AP14: Verbesserungsmaßnahmen an Bodenstation und fliegendem System

Das Vorserienprodukt SKS PN-14, die erste kommerzielle Flugwindkraftanlage der Welt, stellt die eigenfinanzierte Weiterentwicklung der Pilotanlage dar. Äußerlich ähnelt sie der Pilotanlage, da sich das mechanische Konzept in allen Punkten bewährt hat. Außen montierte Hilfsaggregate wurden in die Anlage integriert. Die Teilsysteme Kite, Gondel, und Anlagensteuerung konnten in dem Vorhabenszeitraum mehrere Iterationen durchlaufen und dabei optimiert werden.

Beim Betrieb der Anlage an Designlast spielt die Reglergüte des gesamten Regelkreises inklusive Windenregler eine wichtige Rolle. Anfängliche Probleme, welche durch die Nutzung der zunächst verwendeten Motor-Generatoren der Phase2-Anlage in der Winde hervorgerufen wurden, konnten früh gelöst werden. Die beiden Motoren konnten erfolgreich synchronisiert und die Winde insgesamt stärker beansprucht werden.

Im Verlauf des Vorhabens konnte diese Reglergüte weiter verbessert werden, die Anlage dadurch näher an Ihrer Designlast betrieben werden und somit der Energieertrag in diesen Betriebspunkten gesteigert werden.

II.2. Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

2018 und 2019 wurden ein Teil der Personalkosten zur Entwicklung der Phase2-Anlage in den verschiedenen Abteilungen (Software, Elektronik, Mechanik, F&E) aus Projektmitteln finanziert. 2020 und 2021 wurde das Personalbudget hauptsächlich für die Erprobung der Pilotanlage, sowie der Weiterentwicklung der Automatisierung verwendet.

Die größten abgerufenen Positionen aus dem Material- und Reisebudget waren die zahlreichen Steuergondel- und Kite-Prototypen, der Generator, die Leistungselektronik, die Zugseilwinde, und die Übernachtungen in lokalen Hotels.

Die Förderhöhe für das Teilvorhaben von SkySails Power betrug 50 %. Der Großteil der Kosten der Forschungsarbeiten wurde nicht aus Projektmitteln getragen und entsprechend nicht gefördert. Im Projektantrag war der Aufwand unterschätzt worden, der für die Entwicklung einer vollautomatisierbaren, auf 100 kW skalierten Flugwindkraftanlage notwendig war. Besonders betroffen waren die Abteilungen Elektrik, Elektronik und Software. Der Personalbedarf für den Dauerbetrieb eines solchen Prototypen war ebenfalls unterschätzt worden.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die mit der Pilotanlage erzielten Erfolge wären ohne die zusätzlichen Ressourcen, die SkySails Power in die Entwicklung der Technologie investiert hat, nicht erreichbar gewesen. Die hierzu erbrachte Arbeit war zur Erreichung der Projektziele notwendig und angemessen. Das Forschungsprojekt profitiert unmittelbar von der von SkySails eigenfinanzierten Weiterentwicklung, da allein mit Fördermitteln nach dem Erstflug 2019 nur geringe Verbesserungen möglich gewesen wären.

II.4. Voraussichtliche Verwertbarkeit (im Sinne des Verwertungsplans)

Die jüngste Studie von BVG Associates aus Großbritannien bestätigt das hohe Potential: allein in Deutschland sind durch Höhenwindenergie 27 GW zusätzlicher installierter erneuerbarer Leistung erreichbar¹⁰.

In Deutschland könnten vollautomatische AWES von SkySails Power voraussichtlich ab 2023 zum Einsatz kommen. Bei einer Vergütung in Höhe von Geothermie wäre auch ein wirtschaftlicher Betrieb möglich; aktuell wird die für konventionelle Windenergie übliche Vergütung angesetzt. In abgelegenen Regionen im Ausland, in denen der Einsatz von Dieselgeneratoren zu hohen Stromkosten führt, sind SkySails-Systeme auch ohne Subvention eine wirtschaftliche Alternative, die zur Senkung der Stromkosten beiträgt.

In Deutschland sind insbesondere aufgrund der hohen Besiedelungsdichte noch Fortschritte im automatischen Betrieb, den Genehmigungsverfahren und -voraussetzungen sowie der Integration in den Luftraum zu erreichen. Sofern die Pläne der Bundesregierung zur Stärkung Erneuerbarer

¹⁰ BVG Associates: *Getting airborne – the need to realise the benefits of airborne wind energy for net zero*, in: Airborne Wind Europe, September 2022, [online] <https://airbornewindeurope.org/wp-content/uploads/2022/09/BVGA-37901-Getting-Airborne-White-Paper-r1-2209201.pdf> [Abrufdatum: 06.10.2022]

Energien und dem Abbau von Hemmnissen in Genehmigungsverfahren erfolgreich umgesetzt werden, bieten sich für Onshore-AWES relevante Potenziale neben konventioneller Windenergie. Mit Einführung der MW-Klasse ab 2027 wird ein wirtschaftlicher Einsatz von AWES auch in Deutschland zu Marktpreisen möglich.

II.5. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Vorhabensgebiet bei anderen Stellen

2019 präsentierte Makani Power die weltweit erste Offshore-Flugwindkraftanlage, sowie Aufnahmen vom Onshore-Testbetrieb in den USA. Im Jahr 2020 stellte Alphabet Inc. (Dachgesellschaft von Google) die Zusammenarbeit mit Makani Power ein. Aus dem Nachlass des Unternehmens ist erkenntlich, dass die Entwicklung hinter den gesteckten Zielen geblieben war. Das Münchner Start-Up KiteKraft arbeitet derzeit an einem vergleichbaren Konzept und berichtet, die größten Design-Probleme von Makani Power beseitigt zu haben (s. Abbildung 32).

Kitemill aus Norwegen betreibt seit 2020 ebenfalls eine 100 kW-Pilotanlage (s. Abbildung 31). Die Anlage befindet sich auf dem Flugplatz Lista. 2021 wurden 50 Flüge absolviert.



Abbildung 31: Pilotanlage von Kitemill



Abbildung 32: Flugtests von Kitekraft

Kitepower aus den Niederlanden hat 2021 eine Anlage auf Aruba installiert¹¹ und führt erfolgreich Flugshows durch, hat aber noch kein automatisierbares Start- und Landekonzept demonstriert.

EnerKite aus Kleinmachnow plant gemeinsam mit der BTU Cottbus in einem Förderprojekt die Realisierung einer 100 kW-Pilotanlage in den kommenden Jahren.

Ampyx aus den Niederlanden musste Mitte 2022 Insolvenz anmelden. Ampyx plante 2022 gemeinsam mit RWE die Inbetriebnahme einer Pilotanlage in Irland.

¹¹ Pressemeldung „Kitepower in Aruba - Airborne wind energy takes off in the Caribbean with Kitepower“, 26.08.2021, in: Kitepower, [online] <https://thekitepower.com/kitepower-in-aruba/> [Abrufdatum 06.10.2022]

II.6. Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die öffentlichen Ergebnisse des Gesamtvorhabens wurden als Vortrag auf der Airborne Wind Energy Conference in Mailand (22.06.22 – 24.06.22) präsentiert.

Entsprechend den Vorgaben des Projektträgers Jülich werden die Abschlussberichte von SkySails Power sowie der Projektpartner EnBW, Omexom und IAL Hannover bei der TIB Hannover veröffentlicht¹². Die Veröffentlichungen des Projektpartners IAL Hannover werden in dessen Abschlussbericht gelistet.

Verfasst von:



Patrick Junge (Projektleiter)

Geprüft von:

Stephan Wrage (Geschäftsführer)

Bitte kontaktieren Sie uns bei Rückfragen:

Name:	Patrick Junge
Telefonnummer:	040 / 702 99 – 0
Mailadresse:	power@skysails.de

¹² <https://www.tib.eu/de/>

Leibniz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften und Universitätsbibliothek.

Anhang A: Erneute Bekanntmachung der ED-R SkySails nach Evaluation



DFS Deutsche Flugsicherung

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND
FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

AIP SUP

VFR 11/20

07 MAY 2020

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (German Air Navigation Services)

Büro der Nachrichten für Luftfahrer (Aeronautical Publication Agency)

Am DFS-Campus 7 · 63225 Langen · Germany

Redaktion/Editorial office: desk@dfs.de

Vertrieb/Distribution: customer-support@eisenschmidt.aero

<http://dfs.de>

Flugbeschränkungsgebiet ED-R SkySails (26 MAR – 31 DEC 2020)

Restricted area ED-R SkySails (26 MAR – 31 DEC 2020)

1. Allgemeines

Für ein Forschungsvorhaben wird in der Bremen FIR vorübergehend ein Gebiet mit Flugbeschränkungen (NfL 1-1894-20) eingerichtet.

1. General

A temporary restricted area will be established for a research project within the Bremen FIR (NfL 1-1894-20).

2. Flugbeschränkungsgebiet "ED-R SkySails"

2.1 Seitliche Begrenzung

Kreis mit 0,8 NM Radius um
N 54 48 22 E 008 51 53.

2. Restricted area ED-R SkySails

2.1 Lateral limits

Circle with a radius of 0.8 NM centred on
N 54 48 22 E 008 51 53.

2.2 Vertikale Begrenzung

GND – 2500 ft AGL

2.2 Vertical limits

GND – 2500 ft AGL

2.3 Aktivierungszeiten

Vom 26 MAR – 31 DEC 2020

jeweils Mo 1100 (1000) – Fr 1700 (1600)

Die zeitliche Wirksamkeit erstreckt sich nicht auf gesetzliche Feiertage in Schleswig-Holstein.

Informationen über den aktuellen Status des Gebietes mit Flugbeschränkungen können über die Frequenz 125,100 MHz (LANGEN INFORMATION) erfragt werden.

2.3 Times of activity

From 26 MAR – 31 DEC 2020

from Mon 1100 (1000) – Fri 1700 (1600)

The times of activity do not include public holidays in the state of Schleswig-Holstein.

Information on the current status of the restricted area can be requested on the frequency 125.100 MHz (LANGEN INFORMATION).

2.4 Art der Flugbeschränkungen

In dem vorstehend beschriebenen Gebiet sind alle Flüge einschließlich des Betriebs von Flugmodellen und unbemannten Luftfahrtsystemen untersagt. Von den Flugbeschränkungen ausgenommen sind Staatsluftfahrzeuge, Einsatzflüge der Streitkräfte, Flüge der Polizeien, Flüge im Rettungs- und Katastrophenschutz, Ambulanzflüge sowie vom Unternehmen SkySails Power GmbH beauftragte Flüge, sofern

2.4 Type of flight restrictions

All flights, including the operation of model aircraft and unmanned aircraft systems, are prohibited in the above-mentioned area. These flight restrictions do not apply to State aircraft, mission flights by the armed forces, flights of the police forces, rescue and disaster relief flights as well as ambulance flights and flights commissioned by SkySails Power GmbH, provided that

- eine vorherige Absprache zwischen der für den durchzuführenden Flug zusätzlichen Einsatzstelle und der für die gefahrverursachenden Aktivitäten im Gebiet mit Flugbeschränkungen zuständigen Stelle erfolgt ist und
- eine vorherige Genehmigung durch die zuständige Flugverkehrskontrollstelle erteilt wurde.

Anfragen zum Durchflug können über Sprechfunk gestellt werden.

- prior agreement has been reached between the additional unit responsible for the flight to be conducted and the unit responsible for the dangerous activities in the restricted area and

- prior permission has been issued by the competent ATC unit.

Requests to cross the area can be made via radiotelephony.

