

DLR-IB-AE-GO-2018-62

Schlussbericht „ExpTurb“
Design einer Experimentalturbine

Leitung: Dr.-Ing. Holger Hennings

„Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325613 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel	Schlussbericht zum Vorhaben mit dem Kennzeichen 0325613
Projekttitel	Design einer Experimentalturbine
Institut	Institut für Aeroelastik
Erstellt von	O. Hach, H. Hennings, S. Hammen
Freigabe von	H. Hennings
Laufzeit	01.07.2013 – 30.05.2017
Datum	06.03.2018

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	2
I. Kurze Darstellung.....	4
I.1. Aufgabenstellung.....	4
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4. Kurze Darstellung zu wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere	6
I.4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,	6
I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	6
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
II. Eingehende Darstellung.....	7
II.1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,	7
II.2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,	22
II.3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,	22
II.4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	23
II.5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	23
II.6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.....	23

I. Kurze Darstellung

I.1. Aufgabenstellung

Das Projekt „Design einer Experimentalturbine“ bildet den ersten Teil des Gesamtprojektes Experimentalturbine, dessen Ziel es ist, eine für Forschungszwecke ausgelegte Windenergieanlage zu entwickeln und aufzubauen. In dem hier beschriebenen Projektabschnitt sollte zunächst das Design dieser Experimentalturbine entwickelt werden. Für ihre Verwendung als Versuchsträger für die Validierung von Werkzeugen und für die Erprobung von Technologien muss die Anlage

- geeignet sein, konstruktive Veränderungen mit vertretbarem Aufwand zu erlauben,
- eine Instrumentierung mit für Forschungsprojekte nötiger Messtechnik erlauben und
- in einem aus aerodynamischer Sicht relevanten Größenbereich liegen.

Die Ermittlung detaillierter Anforderungen an die Windenergieanlage ist Bestandteil des Vorhabens.

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

Die Experimentalturbine soll Teil des Forschungswindparks „Plattform Windenergie“ sein, der ein zentrales Element der Strategie der DLR-Windenergieforschung darstellt. Die Plattform soll aus folgenden Elementen bestehen:

- zwei Multimegawatt-Windenergieanlagen
 - Onshore-Anlagen auf dem Stand der Technik
 - als „Minimalwindpark“ aufgestellt zur Untersuchung von Nachlaufinteraktionen
- einer Experimentalturbine
 - Fokus auf Bekanntheit der Eigenschaften, Zugang zu Komponenten und Modifizierbarkeit
- der „virtuelle Anlage“
 - zur numerischen Vorbereitung und Begleitung der Experimente

Die Vorhaben werden unterstützt durch das Land Niedersachsen (MWK, Projekt „ProWIND“) und den Bund (BMW, Projekte „Design einer Experimentalturbine“, „DFWind“, „WindMUSE“).

Die Experimentalturbine stellt einen Versuchsträger für Experimente zur Gewinnung von Validierungsdaten für numerische Methoden und Modelle dar. Außerdem bildet sie in der Erprobung neuer Technologien das Bindeglied zwischen der virtuellen Anlage und den Multimegawattanlagen.

Die DLR-Windenergieforschung ist fokussiert auf den Rotor und bedient dort die gesamte Bandbreite des Themenfeldes: meteorologische Aspekte, Aerodynamik, Aeroelastik, Strukturentwurf und Fertigungsaspekte, Betriebsführung und Regelungstechnik. Nicht vorhanden sind jedoch die Systemkompetenz, die Kontakte zu Anlagenherstellern und letztlich die nötige Erfahrung, die die vollständige Entwicklung einer eigenen Anlage erfordert.

Der Idee folgend, einen Wissenstransfer aus der Luftfahrtforschung in die Windenergieforschung zu erreichen, wurden zur Definition der Anforderungen an die Experimentalturbine verschiedene DLR-Institute eingebunden: die Institute für Aeroelastik, für Flugsystemtechnik, für Aerodynamik und Strömungstechnik, für Faserverbundleichtbau und Adaptronik und das Institut für Physik der Atmosphäre.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Entwicklung des Experimentalturbinendesigns wurde im Auftrag des DLR durch die WINDnovation Engineering Solutions GmbH durchgeführt. Diese Auftragsvergabe bestimmte wesentlich den Projektablauf, der im Folgenden kurz geschildert ist.

In einer ersten Phase wurden Gespräche mit möglichen Anbietern des Anlagendesigns im Sinne einer Sondierung geführt. Anschließend wurde eine vorläufige Spezifikation von Anforderungen der Experimentalturbine entwickelt, die durch den Einsatz der Anlage als Versuchsträger deutlich von den Anforderungen an eine herkömmliche Windenergieanlage abweichen, und ausgewählte Anbieter wurden beauftragt, Projektstudien für ein Anlagendesign zu erstellen. Wesentliches Ergebnis dieser Projektstudien war, dass es wirtschaftlich und technisch sinnvoll ist, das Design der Experimentalturbine aus dem Design einer kommerziellen Basisturbine abzuleiten.

Darauf aufbauend wurden die ermittelten Anforderungen überarbeitet und in eine Leistungsbeschreibung überführt und die Erstellung des Designs wurde öffentlich ausgeschrieben. Der Auftrag für die Entwicklung wurde in der Folge an WINDnovation vergeben.

Der Entwurf baut auf der einer kommerziell verfügbaren 500-kW-Anlage auf. Zum Ablauf der Designentwicklung gehörten unter anderem:

- der Entwurf eines spezifischen Rotorblatts, das bei geringem Rotordurchmesser (40 m) die Vergleichbarkeit mit Rotorblättern aktueller Windenergieanlagen ermöglicht und das Blattspitzengeschwindigkeiten von 105 m/s erlaubt,
- die Integration einer Basisinstrumentierung und
- Modifikationen für die erleichterte Handhabung, den Zugang zu und den erleichterten Austausch von Baugruppen.

Die Erstellung des Designs wurde vom DLR begleitet, wozu regelmäßige Besprechungen stattfanden. Als wesentliches Ergebnis des Vorhabens wurden dem DLR die vollständigen Planungsunterlagen übermittelt, die für die Zulassung und die Realisierung der Experimentalturbine notwendig sind. Dazu gehören außerdem die Daten, die für die Auslegung der Anlage verwendet wurden (numerische Modelle, Lastrechnungen, etc.).

I.4. Kurze Darstellung zu wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

I.4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,

Das Design der Experimentalturbine wurde ausgehend von einer kommerziellen Windenergieanlage als Basis entwickelt. Diese Anlage befindet sich an einigen europäischen Standorten im Betrieb und es kann davon ausgegangen werden, dass das zugrundeliegende Design ausgereift ist. Die Erlaubnis zur uneingeschränkten Nutzung der Anlagendaten hat sich das DLR vertraglich zusichern lassen.

I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

keine

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- TÜV Nord: Gespräch über Möglichkeiten der Zertifizierung und rechtliche Rahmenbedingungen
- Gespräch mit dem Hersteller des Regelungssystems der Basisturbine über Möglichkeiten, die experimentelle Regelung mit ihren Produkten zu realisieren

II. Eingehende Darstellung

II.1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,

Als Ergebnis dieses Projektes ist das DLR im Besitz der kompletten Konstruktionsunterlagen der Experimentalturbine, der technischen Zeichnungen, der Dokumente und Daten der Lastrechnungen, CAD- und FEM-Datensätze und einem numerischen Modell für das Simulationswerkzeug Bladed. Mit diesem Datensatz ist das DLR in der Lage, einen Hersteller von Windenergieanlagen mit dem Bau der Experimentalturbine zu beauftragen und die erforderlichen Nachweise gegenüber einem Zertifizierer zu führen.

Tabelle 1: Themen der DLR Windenergieforschung und abgeleitete Anlageneigenschaften

	FORSCHUNGSTHEMEN	NÖTIGE ANLAGENVORAUSSETZUNGEN
Aeroakustik	Erforschung der Physik der Aeroakustik an WEA	Hohe Blattspitzengeschwindigkeiten, wechselbarer Blattaußenbereich
	Erforschung von Lärminderungsmaßnahmen an WEA	
	Untersuchung der akustischen Auswirkungen von Modifikationen und Fehlstellen an den Rotorblättern	
Aerodynamik	Erforschung der Physik der Aerodynamik	Messtechnik am/im Blatt (Zugangsmöglichkeiten, Datenübertragung)
	Entwicklung aerodynamischer Maßnahmen zur Leistungssteigerung	Wechselbarer Blattaußenbereich, einfacher Austausch der Rotorblätter
Aeroelastik	Beeinflussung der aeroelastischen Stabilität	Wechselbarer Blattaußenbereich oder erleichterter Rotorblattwechsel
	Tailoring zur passiven Lastreduktion	Erleichterter Rotorblattwechsel
Strukturdynamik	Health-Monitoring (Blattstruktur)	Blattzugang für regelmäßige Strukturtests
Regelungstechnik	Erprobung von Regelungsverfahren u.a. zur Lastreduktion	Offene Schnittstellen für Regelungskomponenten, Bekanntheit der Anlageneigenschaften
	Health-Monitoring (Antriebsstrang, Getriebe, Pitch Aktuatoren, Leistungselektronik)	Teilaufgelöster Antriebsstrang
	Systemidentifikation mit verschiedenen Verfahren	Bekanntheit der Anlageneigenschaften

Meteorologie	Untersuchung der Interaktion atmosphärischer Wirbelstrukturen mit dem Rotorblatt	Hochaufgelöste Atmosphärische Messungen, geringe Gondelbewegung durch steifen Turm und steife Gondel
	Untersuchung differentieller Anströmung	
	Nachlaufmodellierung	
alle	Validierung numerischer Modelle	Bekanntheit der Anlageneigenschaften
	Validierung numerischer Simulationsverfahren	Validierte Anlagenmodelle, Verfahren für zuverlässige und detaillierte Messung von dynamischen Lasten und Verformungen
	Entwicklung von Messtechnik, Kopplung verschiedener Messverfahren	

Für die Beauftragung der Designentwicklung wurde eine Leistungsbeschreibung erstellt, die die an die Experimentalturbine gestellten Anforderungen beinhaltet. Grundlage dafür waren die Themen, die das DLR in seinen Instituten im Bereich Windenergie zurzeit aktiv beforstet und die auch in Zukunft eine strategisch wichtige Rolle beim „Rotor der Zukunft“ einnehmen. Sie sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Anforderungen wurden gemeinsam von den DLR-Instituten für Aeroelastik für Flugsystemtechnik, für Aerodynamik und Strömungstechnik, für Faserverbundleichtbau und Adaptronik sowie dem Institut für Physik der Atmosphäre aufgestellt. In Tabelle 2 und Tabelle 3 finden sich Gegenüberstellungen dieser Anforderungen mit dem Designergebnis. An einigen Stellen war es sinnvoll, von den Anforderungen abzuweichen; auf diese wird ebenfalls in den Tabellen hingewiesen.

Tabelle 2: Anforderungen der Leistungsbeschreibung für das Design

ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN		BERÜCKSICHTIGUNG IM DESIGN
Anlagengröße	Ein Rotordurchmesser von 40 m wird gefordert. Die daraus resultierende Nabenhöhe wird ebenfalls auf 40 m angesetzt.	Das Design sieht einen 40-m-Rotor vor. Wegen Hindernissen am geplanten Standort wurde die Nabenhöhe auf 50 m festgelegt.
Blattspitzengeschwindigkeit	Die Anlage muss die Möglichkeit bieten bei einer Blattspitzengeschwindigkeit von 105 m/s betrieben zu werden.	Die Auslegung erfolgte für 105 m/s Blattspitzengeschwindigkeit.
Dynamische Eigenschaften	Es soll möglich sein, Rotorkonfigurationen mit besonders leichten, und sehr elastischen Rotorblättern zu	Das Design enthält einen Entwurf von sehr schlanken Rotorblättern, die entsprechend hohe Elastizität aufweisen. Die

	<p>untersuchen. Entsprechende dynamische Eigenschaften müssen von der Experimentalturbine toleriert werden können.</p>	<p>Anlage wurde für diese Rotorblätter ausgelegt.</p>
<p>Ausreichend Bauraum für Messsysteme und Messverkabelung</p>	<p>Eine Installation von Messverstärkern eines Experimental-Steuerungssystems und einer Datenspeicherung ist an geeigneten Orten vorzusehen. Im Rotorblatt ist ein Kabelsystem vorzusehen, das den Betrieb von Aufnehmern bis in die Blattspitze hinein ermöglicht. Sensoren müssen insbesondere im Rotorblatt anbringbar sein. Es muss hierfür ausreichend Platz im Blatt vorgesehen werden.</p>	<p>Das Design sieht für die Instrumentierung der Rotorblätter vor:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wartungsöffnungen im Blatt • Platz für Leitungen und Steckverbinder im Blatt • Schaltschrank in der Gondel
<p>Sekundärstrukturen für Messsystem</p>	<p>Es sind Befestigungsstrukturen, etwa Bodenplatten oder Vorsprünge, für die Fixierung von Messinstrumenten und damit zusammenhängenden Modulen vorzusehen. Darüber hinaus sind Wartungsluken mit einzuplanen, welche die Zugänglichkeit zu allen Sensoren ermöglichen. Schließlich sind auch konstruktive Vorbereitungen für Datenübertragungssysteme wie Schleifringe oder drahtlose Systeme zu treffen. Diese Datenübertragungssysteme sind nötig an Orten, an denen aus einem drehenden System in ein stehendes System übertragen werden muss. Die Übergänge Rotorblätter/Nabe, Nabe/Gondel und Gondel/Turm sind hier zu erwähnen</p>	<p>Es sind freie Kanäle auf allen Schleifringen vorgesehen und der Zugang zu allen Sensoren ist gewährleistet.</p>
<p>Robustheit der ExpTurb</p>	<p>Insgesamt ist es erwünscht, eine robuste Anlage zu erhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Einsatz von bewährten Komponenten ist erwünscht. • In Bezug auf Lasten sind große statische und dynamische Reserven erwünscht. • Idealerweise sollten sich 	<p>Die Verwendung der Basisturbine stellt Bewährtheit sicher und zugleich das Vorhandensein von Reserven bei auftretenden Lasten.</p>

	<p>Entwicklungen, die spezifisch für die ExpTurb geschehen, auf die Bereiche konzentrieren, die das DLR untersuchen möchte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Rotorblätter und ○ Anlagenregelung 	
Modifikation einer bestehenden Anlage	<p>Die Möglichkeit der Modifikation einer bewährten Windkraftanlage sollte in Betracht gezogen werden. Hieraus werden Vorteile bezüglich der Robustheit der ExpTurb erwartet.</p>	<p>Das Design verwendet eine bewährte kommerzielle Anlage als Basis.</p>
Zertifizierbarkeit	<p>Zertifizierbarkeit der Turbine und der beabsichtigten Modifikationen ist eine zwingend notwendige Voraussetzung. Die auszulegende Turbine muss in Deutschland zertifizierbar sein. Die vorgesehene Art der Zertifizierung, inklusive der notwendigen Schritte für Erweiterungen eines Basiszertifikats bei Modifikationen der Turbine, ist detailliert darzustellen.</p>	<p>Das Vorgehen bei der Zertifizierung ist dokumentiert und Details sind mit einem Vertreter des TÜV-Nord diskutiert worden.</p>
Triebstrang	<p>Die Kräfte im Triebstrang müssen messbar sein. Dies erfordert einen Anlagentyp mit aufgelöstem Triebstrang. Insbesondere sollen folgende Kräfte messbar sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> • stationäre Kräfte und Momente (Mittelwerte) aus <ul style="list-style-type: none"> ○ Rotorschub ○ Antriebsmoment ○ Eigengewicht • instationäre Kräfte und Momente (den Mittelwerten überlagert) aus <ul style="list-style-type: none"> ○ Böenbelastung, schräg- und ungleichförmiger Anströmung ○ Betriebsführung (Windnachführung, Regelung, Notabschaltung) <p>Auch ein aufgelöster Triebstrang ermöglicht nicht ohne weiteres die Rotorkräfte zu messen. Hierzu</p>	<p>Im Design ist Sensorik auf der Rotorwelle für Kraft-/Momentenmessung vorgesehen (DMS). Es war die Anpassung der Rotorwelle nötig, um die Montage der Sensorik zu ermöglichen und um sicherzustellen, dass die zu erwartenden Dehnungen messbar sein werden.</p>

	<p>ist ein geeignetes Konzept vorzulegen. Insbesondere muss geklärt sein, wie und ob die Schnittkräfte zwischen Rotornabe und Rotorwelle gemessen werden und ob/wie eine Instrumentierung des Rotor-Hauptlagers erfolgt.</p>	
Pitch-System	<p>Es sollen Lastbegrenzung und Steuerungsstrategien mittels Blattverstellung erforscht werden. Daher muss die Anlage für den Einzelblatt-Pitch-Betrieb vorbereitet sein. Darüber hinaus soll das Pitchsystem für einen intensiven Einsatz mit einer hohen Anzahl an Bewegungszyklen ausgelegt sein. Es ist daher eine entsprechende Pitch-Aktuatorik vorzusehen.</p>	<p>Es sind Pitchantriebe mit hoher Stellgeschwindigkeit vorgesehen. Zudem ist die Mechanik der Pitchantriebe gemessen an der Anlagengröße überdimensioniert.</p>
Austauschbarkeit der Blätter	<p>Die Anlage muss es erlauben, einfach und kostengünstig die Rotorblätter auszutauschen.</p>	<p>Der Blattwechsel erfolgt durch abnehmen des gesamten Rotors. Dies ist durch die geringe Nabenhöhe von 50 m mit einem Kran ohne weiteres möglich.</p>
Austauschbare Blattspitzen	<p>Der Blattentwurf soll die Austauschbarkeit der Blattspitzen (z.B. Winglets) berücksichtigen.</p>	<p>Im Blattentwurf ist eine Trennstelle vorgesehen, so dass die Blattspitze mit einer Länge von 1,20 m austauschbar ist.</p>
Austauschbarkeit der Nabe	<p>Die Experimentalturbine sollte durch auswechselbare Nabenaufbauten die Möglichkeit zur Untersuchung eines Zweiblatt- oder Dreiblattrotors bieten. Die Art der Zweiblattnabe (gelenkig oder starr) wird dabei nicht vorgegeben. Darüber hinaus sollte die Anlage die Möglichkeit der Untersuchung von Luv- bzw. Leeläufern erlauben, und daher einen</p>	<p>Mit dem Design ist keine Zweiblattrotnabe entwickelt worden. Durch Anpassungen am Pitchsystem und am Triebstrang wurde die Einsetzbarkeit im Downwindbetrieb sichergestellt.</p>

	entsprechenden Naben- und Gondelaufbau aufweisen.	
Design-Konfiguration	Die erste im Nachgang zu realisierende Konfiguration soll die einer Dreiblattrotkonfiguration als Luvläufer sein. Für diese soll das Design erfolgen.	Das Design ist für die Dreiblattkonfiguration erstellt worden, berücksichtigt jedoch die anderen Konfigurationen.
Turmausstieg auf Blattspitzenhöhe sowie halber Blattlänge	Die Zugänglichkeit zu den Blattspitzen soll durch einen Turmausstieg in entsprechender Höhe möglich sein. Neben der Tür an sich ist eine entsprechende Ausstiegskonstruktion vorzusehen, welche den Zugang zu den Blattspitzen ermöglicht. Gleiches gilt für einen entsprechenden Ausstieg auf einer Höhe, die von der Blattmitte passiert wird.	Die Anforderung wurde geändert. Stattdessen ist eine Befahranlage geplant, mit der ein senkrecht nach unten weisendes Rotorblatt auf ganzer Länge zugänglich ist.
Gondelbalkon	Unterhalb der Gondel ist ein Turmausstieg vorzusehen. Hier soll ein Begehen rund um den Turm möglich sein. Es soll ein sog. Balkon vorhanden sein.	Die Anforderung wurde fallengelassen, weil die vorgesehene Befahranlage den Zugang ermöglicht.
Rotorarretierung	Der Rotor muss in verschiedenen Positionen sicher arretiert werden können, sodass entsprechende Arbeiten an den Rotorblättern durchgeführt werden können.	Eine Arretierung des Rotors ist vorgesehen.
Konzept zum Rotorwechsel	Es ist ein Konzept zum Wechsel des vollständig bestückten Rotors vorzulegen.	Für den Rotorwechsel werden zwei Blätter an einer Traverse angeschlagen und der Rotor wird per Kran bewegt.
Konzept zum Lastenhub in Gondel	Es muss ein Konzept vorgelegt werden, wie modulare Elemente des Triebstrangs oder andere Maschinenteile bzw. Komponenten vom Boden in die Gondel gehoben bzw. aus dieser heraus auf den Boden gebracht werden können. Auch das Anheben von Lasten innerhalb der Gondel muss möglich sein. Ein Wartungskran im Bereich der	Auf der Rückseite der Gondel ist ein Portalkran vorgesehen, der den Transport von Lasten vom Boden ermöglicht.

	Gondel ist vorzusehen.	
Gondel als Arbeitsraum	Die Gondel muss in einer Weise dimensioniert sein, dass sie als Arbeitsraum genutzt werden kann. Genauer: es müssen sich zwei Personen gleichzeitig in ihr aufhalten können, und dabei ausreichend Bewegungsfreiraum haben, um etwa Arbeiten am Triebstrang durchführen zu können.	Bei der Auswahl der Basisturbine wurde darauf geachtet, dass die Gondel ausreichend Platz bietet.
Nabenzugänglichkeit	Die Nabe muss derartig gestaltet werden, dass sie in angemessener Weise für Wartungsarbeiten zugänglich ist. Zudem sollen Befestigungsmöglichkeiten vorgesehen werden, welche zur Sicherung der Arbeiter bei Arbeiten an den Blättern benötigt werden.	Das Innere der Nabe ist von der Gondel aus erreichbar.
Aktuatorik in den Rotorblättern	Es soll die Möglichkeit bestehen, sowohl elektrische Schleifringe als auch Pneumatikschleifringe installieren zu können. Beide müssen getrennt voneinander installierbar sein. Das betrifft den Übergang Gondel/Triebstrang, sowie den Übergang Nabe/Blatt. Entsprechende Bauräume müssen vorhanden sein. Elektrische Schleifringe sind mindestens einphasig bei 230 V vorzusehen. Pneumatikschleifringe im System sind so auszulegen, dass ein Volumenstrom von 10 l/min bei 10 bar übertragen werden kann.	Die Durchführung von Pneumatik- und Hydraulikleitungen aus der Gondel in die Rotorblätter ist vorgesehen.
Lidarsystem	Im Bereich der Gondel muss Bauraum vorgesehen sein, so dass ein Lidarsystem aufgebaut werden kann. Es ist von einer Masse von 250 kg auszugehen. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass dieses Lidarsystem „auf der Gondel-	Es ist eine Lidar-Plattform auf dem Dach vorgesehen und die Gondel wurde versteift, um das zusätzliche Gewicht zu tragen. Auf dem Gondeldach ist ein zusätzlicher Kran geplant, mit dem Lasten aus dem Inneren der Gondel bewegt werden

	<p>Verkleidung“ in verschiedenen Ausrichtungen angebracht werden soll. Eine entsprechende Unterkonstruktion ist vorzusehen und bei der Auslegung zu berücksichtigen.</p> <p>Der Transport des Lidarsystems vom Boden hinauf auf die Gondel ist darzustellen.</p>	können.
Zusatzaggregate	<p>Im Bereich der Gondel muss es möglich sein, Zusatzaggregate mit einer Masse von 300 kg zu installieren. Diese Zusatzmasse ist zusätzlich zur Masse des Lidarsystems zu betrachten.</p>	Die zusätzliche Masse von 300 kg wurde in der Auslegung berücksichtigt.
Profile für Rotorblätter	<p>Wenn es die Auslegung erlaubt, Aerodynamische Profile: Delft (DU), evtl. an der Spitze NACA64618, im Übergangsbereich zur Wurzel mit stumpfer Hinterkante („blunt airfoils“) sind gewünscht.</p>	Diese Profile wurden für die Form des Rotorblatts verwendet.
Beteiligung in der Realisierungsphase	<p>Der Anbieter soll explizit beschreiben, in welchem Rahmen er sich im Fall einer Design-Ausarbeitung (Realisierungsphase) beteiligen möchte bzw. kann.</p> <p>Es sollen zwei Fälle dargestellt werden: Der erste Fall ist derjenige, bei dem in der Realisierungsphase ein Zuschlag an das Unternehmen erfolgt, das der Bieter als Unterauftragnehmer vorgesehen hat. Hier bitte ggf. auch das genaue Konstrukt einer möglichen Anbietergemeinschaft beschreiben.</p> <p>Der zweite Fall ist derjenige, bei dem in der Realisierungsphase ein Zuschlag an ein bisher unbekanntes Unternehmen erfolgt.</p> <p>Dabei soll insbesondere folgendes dargestellt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wie kann sichergestellt werden, dass das für eine Realisierung und 	Für die Durchführung eines Realisierungsprojekts soll eine ARGE aus den beteiligten Firmen gebildet werden.

	<p>den späteren Betrieb der Experimentalturbine nötige Wissen vorhanden ist und bleibt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wie sichergestellt werden kann, dass der Anbieter für gegebenenfalls entstehende Rückfragen zur Verfügung steht. • In welchem Maß sich der Anbieter für die Beteiligung an der Umsetzung seines Designs interessiert. • Welche weitere Kosten für den Auftraggeber entstehen. Eine grobe Kostenkalkulation ist anzugeben. 	
--	---	--

Tabelle 3: Anforderungen der Leistungsbeschreibung an das Regelungssystem

ANFORDERUNGEN AN DAS REGELUNGSSYSTEM		BERÜCKSICHTIGUNG IM DESIGN
Struktur des Regelungssystems	<p>Es ist ein Regelungssystem bereitzustellen, welches den sicheren Betrieb der Anlage gewährleistet. Dieses System sollte im Hinblick auf den Experimentalbetrieb möglichst einfach strukturiert sein. Eine Optimierung auf den Energieertrag ist ausdrücklich nicht erwünscht.</p>	<p>Es wurde ein einfacher Regler für die Anlage entwickelt, der auch für Lastberechnungen zur Auslegung eingesetzt wurde.</p>
Hard- und Software-Schnittstellen	<p>Die Anlagensteuerung muss die Möglichkeit bieten, experimentelle (nicht zugelassene) Software bzw. Algorithmen zu erproben. Zu diesem Zweck müssen folgende Einrichtungen vorgesehen werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eine Schnittstelle für die Einbindung von Code in der Form von Matlab/Simulink-generierten C-Code • Eine Schnittstelle für den Zugriff auf die gesamten Sensordaten 	<p>Die Schnittstellen sind abhängig von dem verwendeten Regelungssystem, für das im Projekt keine Festlegung getroffen wurde.</p>

	der Anlage <ul style="list-style-type: none"> • Eine Schnittstelle für den Zugriff auf die gesamten Aktuatoren der Anlage • Ein zentraler Speicher zur zeitgenauen Aufzeichnung der Messdaten sowie der Aktuator-Befehle, -Positionen und -Daten 	
--	--	--

Beschreibung des Anlagendesigns

Das entwickelte Design der Experimentalturbine beschreibt eine pitchgesteuerte Windenergieanlage mit Dreiblattrotor. Die Nabenhöhe beträgt 50 m bei einem Rotordurchmesser von 40 m. Die Anlage ist für den Onshore-Betrieb bei einer Nennwindgeschwindigkeit von 11,5 m/s ausgelegt und erreicht eine Nennleistung von 500 kW. Die Basis bildet eine Serienwindenergieanlage mit der gleichen Nennleistung, die mit gleicher Gondel auch als 750-kW-Version existiert. Die Ableitung des Designs aus einer Basisanlage mit dieser höheren Nennleistung bringt Vorteile für den Experimentalbetrieb durch erhebliche strukturelle Reserven und für die Zugänglichkeit der mechanischen Komponenten. Außerdem ist geplant, bei der Zertifizierung der Anlage mit einem Lastvergleich zu argumentieren.

Gegenüber dieser Basisturbine wurden im Design Änderungen entwickelt, die zum einen die Verwendbarkeit der Anlage für Versuche ermöglichen und die zum anderen die Handhabung für Wissenschaftler erleichtern oder möglich machen. Die wichtigsten Modifikationen sind als Übersicht in Abbildung 1 dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung erfolgt anschließend.

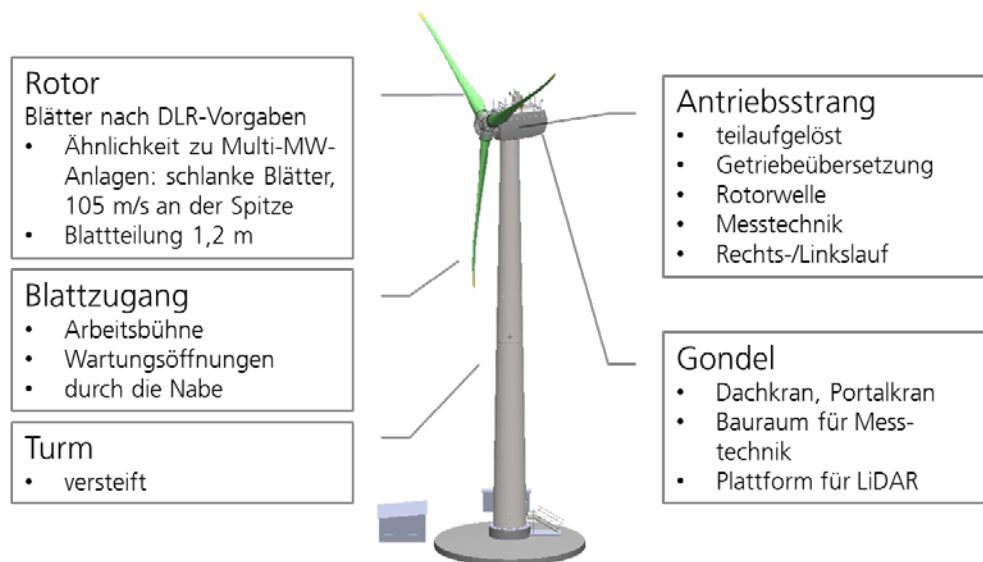


Abbildung 1: Wesentliche Anpassungen der Experimentalturbine

Rotorblätter

Die wesentliche Neuentwicklung des Designs der Experimentalturbine stellen die Rotorblätter dar. Diese Blätter sind kürzer als die der Basisturbine, um den geforderten Rotorradius von 40 m einhalten zu können, und vor allem wesentlich schlanker wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Schlankheit resultiert aus den aerodynamischen Anforderungen des DLR, denen unter anderem durch die hohe Blattspitzengeschwindigkeit von 105 m/s Rechnung getragen wurde. Üblich sind bei Onshore-Anlagen etwa 80 m/s. Sie ist notwendig für eine Ähnlichkeit der Profilaerodynamik zu der großer Multimegawattanlagen. Die mit der Blattspitzengeschwindigkeit verbundene Geräuschentwicklung ist außerdem Voraussetzung für die Durchführung aeroakustischer Experimente. Die schlanken Rotorblätter sind auch im Hinblick auf aeroelastische Fragestellungen interessant, da sie durch die große Elastizität im Betrieb größere Deformationen zulassen.

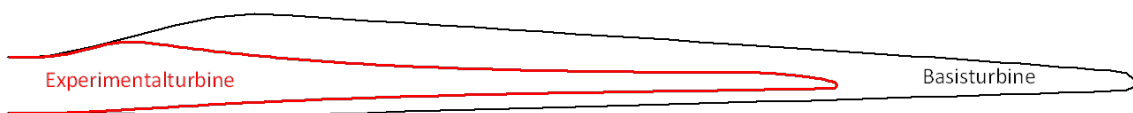


Abbildung 2: Rotorblätter von Basis- und Experimentalturbine im Vergleich (Quelle: WINDnovation)

Messungen der instationären Druckverteilungen werden mit im DLR aktuell noch in der Entwicklung befindlichen Messhandschuhen durchgeführt, die an den gewünschten Profilschnitten angebracht werden. Für diese und weitere Messtechnik, wie zum Beispiel Beschleunigungssensoren und Dehnmessstreifen, sind im Blatt Leerrohre als Kabelführungen vorgesehen.

Die weitere Besonderheit der Experimentalturbine besteht in den austauschbaren Rotorblattspitzen. Die äußeren 1,2 m der 19,4 m langen Rotorblätter können mit geringem Aufwand von der Blattbefahranlage aus ausgewechselt werden. Dies ermöglicht die schnelle und kostengünstige Umrüstung für neue Experimente. Beispiele sind die Untersuchung von speziell geformten Blattspitzen (Winglets), von Maßnahmen zur Lärmreduktion, von Einflüssen der Blattspitze auf das aeroelastische Verhalten und von Anti-Icing-Technologien.

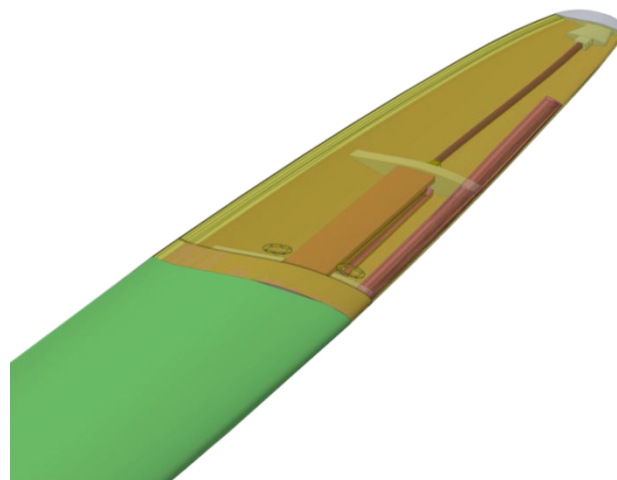


Abbildung 3: Wechselbare Blattspitze (Quelle: WINDnovation)

Zugang zum Rotorblatt

Für die Zugänglichkeit der Messtechnik im Rotorblatt ist eine Blattbefahranlage vorgesehen (geplant ist Käufer K-BP-1). Dieses Konzept stellt eine Abweichung von den Anforderungen der Leistungsbeschreibung dar, die Turmausstiege und einen Balkon unterhalb der Gondel enthielten. Die Befahranlage bietet allerdings den großen Vorteil, dass die Rotorblätter nicht nur an bestimmten radialen Positionen sondern auf der ganzen Länge erreichbar sind. Im Vergleich zu einer LKW-montierten Hubarbeitsbühne verursacht sie zudem geringere Kosten. Zudem sind in der Blatthaut Wartungsöffnungen integriert, die eine Änderung oder Wartung der im Blatt eingebauten Messtechnik ermöglichen. Von der Nabe aus ist außerdem die Wurzel der Rotorblätter erreichbar.

Antriebsstrang

Für die Messung von Rotorkräften und –momenten wurde im Design der Experimentalturbine die Rotorwelle modifiziert. Sie besitzt eine Ausdrehung, die aus zwei Gründen für die Verwendung von Dehnungsmessungen notwendig ist: zum einen gibt es auf der Welle der Basisturbine keinen geeigneten Ort für die Montage von Sensoren, so dass dieser geschaffen werden muss, zum anderen ist eine Verringerung des Wellenquerschnitts die Voraussetzung für das Auftreten messbarer Dehnungen im Betrieb der Anlage. Abbildung 4 stellt die Rotorwelle der Basisturbine (links) und der Experimentalturbine (rechts) im Vergleich dar.

Für die großen Drehzahlen des kleinen Rotors der Experimentalturbinen ist eine im Vergleich zur Basisturbine geänderte Getriebeübersetzung nötig. Diese Modifikation muss vom Getriebehersteller vorgenommen werden.

Getriebe und Generator lassen sich in beiden Drehrichtungen betreiben, so dass am Antriebsstrang keine weiteren Änderungen für Konfigurationsänderungen von Luv- auf Leebetrieb notwendig sind.

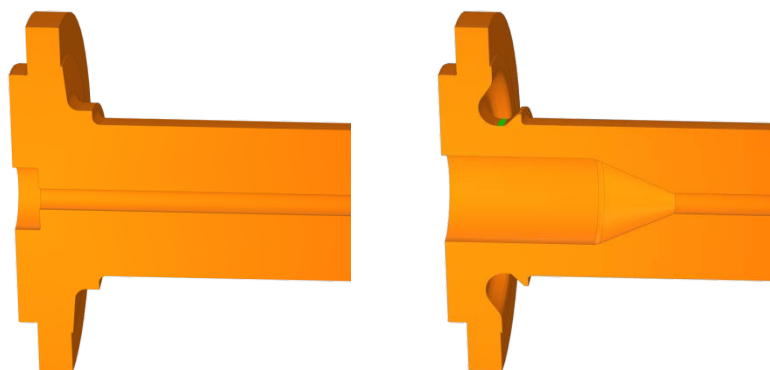


Abbildung 4: Rotorwelle der Basisturbine (links) und der Experimentalturbine (rechts), Quelle: WINDnovation

Gondel- und Gondelaufbauten

Die Gondel der Basisturbine bietet ausreichend Platz und Tragfähigkeit für 4 Personen. Im Design sind Versteifungen der Gondelstruktur zur Anbringung des Lidars auf dem Gondeldach vorgesehen. Das Gerät wird erhöht auf dem Gondeldach positioniert, um sicherzustellen, dass das Sichtfeld in einer Entfernung von 45 m vor dem Rotor mindestens einen Rotordurchmesser beträgt. Um die Sicht auch in Nachlaufrichtung zu gewährleisten und um Beeinflussungen zu vermeiden ist eine geänderte Konstruktion der Schalenkreuz-Anemometer vorgesehen. Die Gondel musste aus Gründen der Arbeitssicherheit zusätzlich modifiziert werden. Das Gondeldach wurde mit einem Geländer versehen, um notwendige Arbeiten auf dem Dach auch durch wissenschaftliche Mitarbeiter des DLR zu erlauben. Dies ist in erster Linie für den Betrieb des Lidars wünschenswert. Außerdem ist ein zusätzlicher Kran entworfen worden, der für den Lasttransport auf das Dach benötigt wird. Der Kran ist versenkbar konstruiert und die Geländer werden eingeklappt, wenn sie nicht benötigt werden. Die Anpassungen sind in der in Abbildung 5 gezeigten Gondel hervorgehoben.

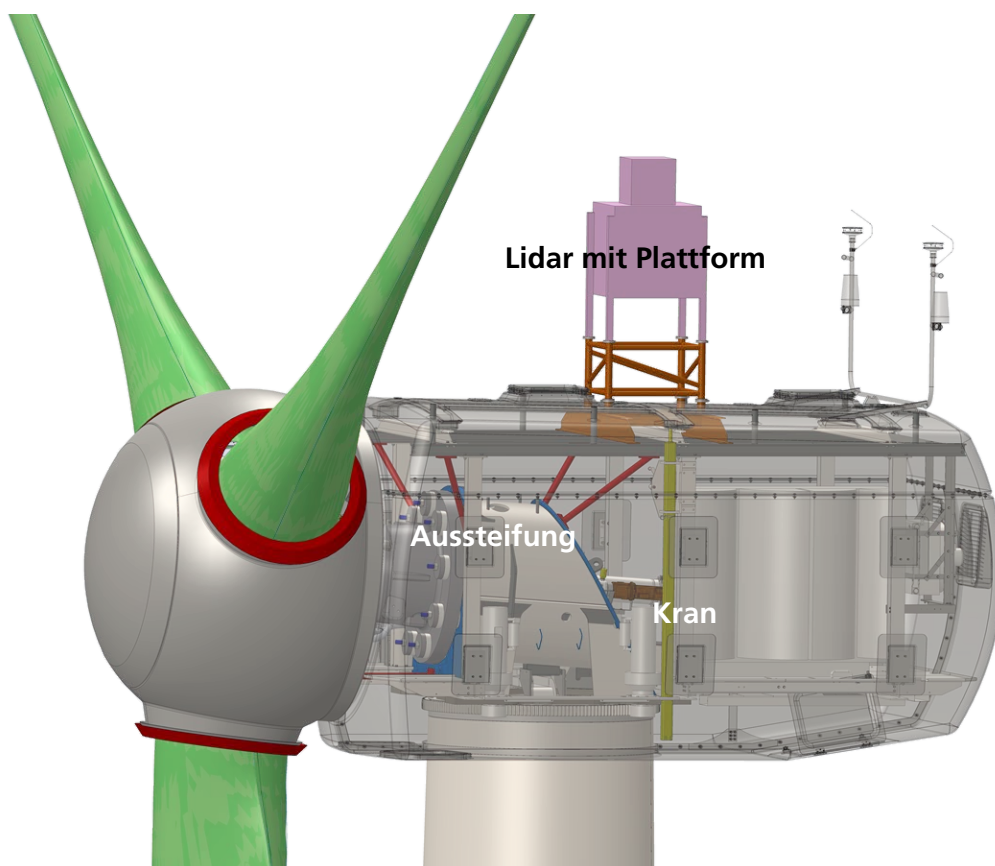


Abbildung 5: Gondel der Experimentalturbine (Quelle: WINDnovation)

Turm

Der Stahlrohrturm wurde im Design der Experimentalturbine gegenüber dem Turm der Basisturbine versteift indem die Blechdicken erhöht wurden, wohingegen Flanschdurchmesser

und Sektionslängen unverändert blieben. Mit der erhöhten Steifigkeit wurde den höheren Rotordrehzahlen der Experimentalturbine Rechnung getragen.

Das Lidar profitiert von dieser Auslegung des Turms. Die enorme Steifigkeit bedingt minimale Verschiebungen am Turmkopf im Anlagenbetrieb, sodass Messungenauigkeiten des Lidars durch Winkelabweichungen minimiert werden.

Im Turm ist außerdem eine elektrisch betriebene Aufstiegshilfe vorgesehen, die es auch unerfahrenem (wissenschaftlichem) Personal ermöglicht, die Gondel problemlos zu erreichen.

Anlagenregelung und Steuerungstechnik

Die Anlagenregelung ist ein wichtiges Gebiet, das mit der Experimentalturbine beforscht werden soll. Der Versuchsträger weist Eigenschaften auf, die ihn für die Erprobung experimenteller Regelalgorithmen geeignet machen:

- Gemäß dem Stand der Technik verfügt die Anlage über alle Voraussetzungen, um den Pitchwinkel der Rotorblätter unabhängig einstellen zu können (Individual Pitch Control).
- Die Verwendung der Pitch-Aktuatorik der Basisturbine bedingt erhebliche strukturelle Reserven sowie hohe Pitchraten und Pitchbeschleunigungen. Es wird davon ausgegangen, dass die Mechanik der Pitchsteuerung auch dem extremen Experimentalbetrieb standhält, weil sie für einen größeren Rotor ausgelegt ist.
- Die Anlage als Ganzes verfügt durch die reduzierte Rotorfläche über ausreichend Lastreserven, um unvorhergesehene Ereignisse bei der Erprobung von Regelverfahren zu tolerieren.
- Es ist die Verwendung eines Advanced Protection System als zusätzliches Sicherheitssystem vorgesehen, um die Anlage bei unvorhergesehenen Ereignissen vor Schäden zu schützen. Dem System schaltet bei Verlassen eines definierten „sicheren Operationsbereichs“ von der experimentellen auf die Standardregelung um. Damit soll verhindert werden, dass das Standardsicherheitssystem mit dem Auslösen von Notstops unnötige (Fatigue-) Lasten erzeugt.

Für die Realisierung der experimentellen Regelung sind Software- und Hardwareschnittstellen erforderlich, die den Einsatz zusätzlicher Regelalgorithmen und die ihren Zugriff auf die relevanten Messgrößen ermöglichen und die die Standard-Regelung und das Betriebsführungssystem unverändert lassen.

Konzepte zur Umsetzung der Anforderungen des DLR wurden mit Vertretern des Zulieferers der regelungs- und steuerungstechnischen Soft- und Hardwarekomponenten der Basisanlage diskutiert und als umsetzbar bewertet. Konkrete Planungen waren nicht Bestandteil des Vorhabens.

Konfigurationen

Die Konzeption der Experimentalturbine, zu der auch die Abmessungen zählen, lassen Modifikationen der Konfiguration verhältnismäßig einfach zu, sodass die Anlage als flexibler Versuchsträger eingesetzt werden kann. Im Wesentlichen ist es möglich:

- mit geringen Aufwand die Spitzen (1,20 m) der Rotorblätter zu wechseln. Dafür ist die vorgesehene Befahranlage ausreichend.
- den gesamten Rotor zu wechseln oder für die Instrumentierung am Boden abzunehmen. Mit einer entsprechenden Nabe ist der Betrieb mit einem Zweiblattrotor vorgesehen.
- den Betriebsmodus zu ändern (Luv- und Leebetrieb).
- die Anlage im Teillastbetrieb zu verwenden oder mit reduzierter Drehzahl. Damit ist eine Anpassung des Betriebsbereichs an die durchgeführten Experimente möglich.

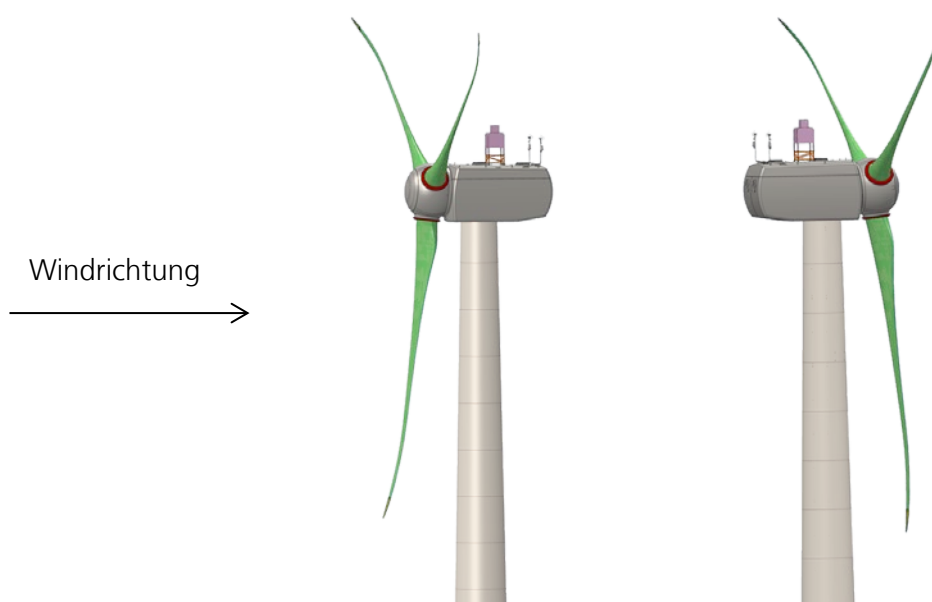


Abbildung 6: Lee- und Luvkonfiguration des Dreiblattrotors (Quelle: WINDnovation)

Lasten und Zertifizierung

Die Aufstellung der Experimentalturbine erfordert im Wesentlichen eine Genehmigung gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Zu den benötigten Unterlagen zur immisionsschutzrechtlichen Genehmigung gehört ein Standsicherheitsnachweis gemäß DIBt-Richtlinie.

Zum Design der Experimentalturbine gehört ein Konzept, wie dieser Nachweis erbracht werden soll. Zum einen sollen existierende Nachweise verwendet werden, die von der Basisturbine

übernommen werden können, für die ein Typzertifikat ausgestellt wurde. Für alle veränderten Bestandteile, insbesondere für den Turm und die Rotorblätter, sind neue Nachweise erforderlich.

Das Ingenieurbüro WINDnovation hat für die Experimentalturbine eine Lastberechnung nach IEC 61400-1 durchgeführt. Diese Berechnungen gehen einerseits in den Entwurf von Turm und Rotorblättern ein und sollen andererseits für die Zertifizierung verwendet werden. Dazu wurde ein Vergleich der Lasten von Experimentalturbine und Basisturbine durchgeführt. Die Lasten der Experimentalturbine sind stets kleiner oder gleich den Vergleichslasten, woraus die Gültigkeit der bestehenden Nachweise abgeleitet wird. Dieser Lastvergleich muss im Rahmen der Genehmigung ebenso wie die Lastberechnungen geprüft werden.

II.2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Während der Durchführung des Projekts sind Kosten angefallen für

- Personal,
- Reisen,
- die Aufträge für Projektstudien und
- die beauftragte Erstellung des Designs der Experimentalturbine,

wobei diese letzte Position einen Großteil der Gesamtkosten ausmacht. Der Verwendungsnachweis enthält eine detaillierte Aufstellung der Projektkosten.

II.3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Das DLR plant die Errichtung der „Plattform Windenergie“ mit der Experimentalturbine als essentiellen Bestandteil. Das im Vorhaben entwickelte Design soll direkt in die Realisierung dieses Versuchsträgers münden. Der ZE ist überzeugt, die beste technische Lösung für die aufgestellten Anforderungen gefunden zu haben. Dem ZE ist nicht bekannt, dass ein Design für eine vergleichbare Experimentalturbine vor Durchführung des Vorhabens existiert hätte. Als Ergebnis liegt das Design einer Experimentalturbine vor. Die Arbeit umfasste die Durchführung der Auftragsvergabe (Verhandlungsverfahren mit vorgeschaltetem Teilnehmerwettbewerb) und die Begleitung der Designerstellung beim beauftragten Ingenieurbüro. Dort fand die eigentliche Ausarbeitung des Designs statt. Dazu zählen die Entwicklung eines neuen Rotorblatts und die Anpassung der Basisturbine für den experimentellen Betrieb.

II.4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Vorhaben „Design einer Experimentalturbine“ ist der erste von zwei Schritten zur Errichtung des Versuchsträgers. Die Verwertung des Ergebnisses erfolgt in einem neuen Vorhaben zur „Realisierung der Experimentalturbine“, in das das Design eingeht.

II.5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem ZE ist kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens, dem Design einer für Forschungszwecke angepassten Windenergieanlage, bei anderen Stellen bekannt.

Daneben wurden die folgenden Windenergieanlagen zu Forschungszwecken errichtet oder befinden sich in Planung:

- Auf dem Stöttener Berg werden im Projekt WINSENT Windenergieanlagen und Windmessmasten aufgebaut, um den besonderen Einfluss der Hanglage zu untersuchen. Als Versuchsträger dienen Serienanlagen, die mit Messtechnik ausgerüstet sind.
- In Bremerhaven wurde der Prototyp einer 8-MW-Anlage von Adwen als Forschungsanlage aufgestellt.
- Im schottischen Levenmouth wurde der Prototyp einer 7-MW-Anlage von Samsung zu Forschungszwecken errichtet.

II.6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

keine