

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

on the basis of a decision  
by the German Bundestag

# Schlussbericht



## SmartBlades2

### Bau, Test und Weiterentwicklung intelligenter Rotorblätter

**FKZ 0324032 A/B/C/D/E/F/G/H**  
**01.06.2016 – 30.09.2020**



## **Ansprechpersonen und Autoren**

Dr. Jan Teßmer (DLR)	.....	Projektkoordinator
Zhuzhell Matilde Montano Rejas (DLR)	.....	Projektmanager
& Dr. Michael Rose (DLR)	.....	
Dr. Elia Daniele (IWES)	.....	Technologiekordinator Technologie 1
& Dr. Bernhard Stoevesandt (IWES)	.....	
Dr. Johannes Riemenschneider(DLR)	.....	Technologiekordinator Technologie 2
Dr. Michael Hölling (FW OL)	.....	Technologiekordinator Technologie 3
Dr. Claudio Balzani (FW H)	.....	Technologiekordinator Technologie 4
	.....	

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324032 A-H gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Koordinator des Verbundprojektes



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Faserverbundleichtbau und

Adaptronik

Prof. Dr. Martin Wiedemann

Telefon: 0531 295 2300

Email: [martin.Wiedemann@dlr.de](mailto:martin.Wiedemann@dlr.de)

---

Braunschweig, den

15. März 2021



---

Martin Wiedemann

Bremerhaven, den 15.03.21



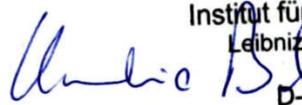
---

Andreas Reuter

Dr.-Ing. Claudio Balzani (Projektleiter)  
Institut für Windenergiesysteme  
Telefon: 0511 762 5612  
Email: [claudio.balzani@iwes.uni-hannover.de](mailto:claudio.balzani@iwes.uni-hannover.de)

Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes (SC-Mitglied)  
Institut für Statik und Dynamik  
Telefon: 0511 762 2992  
Email: [r.rolfes@isd.uni-hannover.de](mailto:r.rolfes@isd.uni-hannover.de)

Hannover, den 15.03.2021

  
Institut für Windenergiesysteme  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstraße 9 a  
D-30167 Hannover

Claudio Balzani

  
Institut für Statik und Dynamik  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 9A · D-30167 Hannover

Raimund Rolfes

ForWind – Zentrum für Windenergieforschung  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Prof. Dr. Joachim Peinke  
Telefon: 0441 798 5050  
Email: [peinke@uni-oldenburg.de](mailto:peinke@uni-oldenburg.de)

Oldenburg, den *15.09.2020*

  
Joachim Peinke

# Inhaltsverzeichnis

<b>Schlussbericht Projekt SmartBlades2</b>	
<b>Schlussbericht DLR</b>	..... <b>Anhang A</b>
<b>Schlussbericht Fraunhofer IWES</b>	..... <b>Anhang B</b>
<b>Schlussbericht ForWind Hannover</b>	..... <b>Anhang C</b>
<b>Schlussbericht ForWind Oldenburg</b>	..... <b>Anhang D</b>
<b>Schlussbericht WRD</b>	..... <b>Anhang E</b>
<b>Schlussbericht GE</b>	..... <b>Anhang F</b>
<b>Schlussbericht Suzlon</b>	..... <b>Anhang G</b>
<b>Schlussbericht SSB</b>	..... <b>Anhang H</b>
<b>Technologiebericht</b>	..... <b>Anhang I</b>
<b>Publikationsliste SmartBlades2</b>	..... <b>Anhang J</b>
<b>Deliverables</b>	..... <b>Anhang K</b>

## Vorwort

In der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird der Aufbau des Schlussberichts grafisch dargestellt.

### Ausgewähltes Abkürzungsverzeichnis

AE	DLR – Institut für Aeroelastik
AEP	Annual Energy Produktion (Jährliche Energieproduktion)
AP	Arbeitspaket
AS	DLR – Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
BEM	Blattelement-Impuls-Theorie (engl.: Blade Element Momentum Theory)
BTK	Biege-Torsions-Kopplung
CAA	Computational Aero-Acoustics
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffverbunde
CPC	Kollektive Blattverstellung (engl.: Collective Pitch Control)
DEL	Schadensäquivalente Belastung (engl.: Damage Equivalent Load)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FA	DLR – Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik
FEM	Finite Elemente Methode
FSI	Fluid-Struktur-Interaktion
FT	DLR – Institut für Flugsystemtechnik
FW-H	ForWind – Hannover
FW-OL	ForWind – Oldenburg
ForWind	Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten H, HB und OL
GBTK	Geometrische Biege-Torsions-Kopplung
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffverbunde
IPC	Individuelle Blattverstellung (engl.: Individual Pitch Control)
ISD	FW-H, Institut für Statik und Dynamik
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Bremerhaven
iwes	FW-H, Institut für Windenergiesysteme
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LiDAR	Light Detection And Ranging
PIV	Particle Image Velocimetry
SBTK	Strukturelle Biege-Torsions-Kopplung
TFD	FW-H, Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik
TRL	Technology Readiness Level
TWiSt	FW-OL, Institut für Physik, AG Turbulenz, Windenergie und Stochastik
WEA	Windenergieanlage
WESys	FW-OL, Institut für Physik, AG Windenergiesysteme

## Übersicht

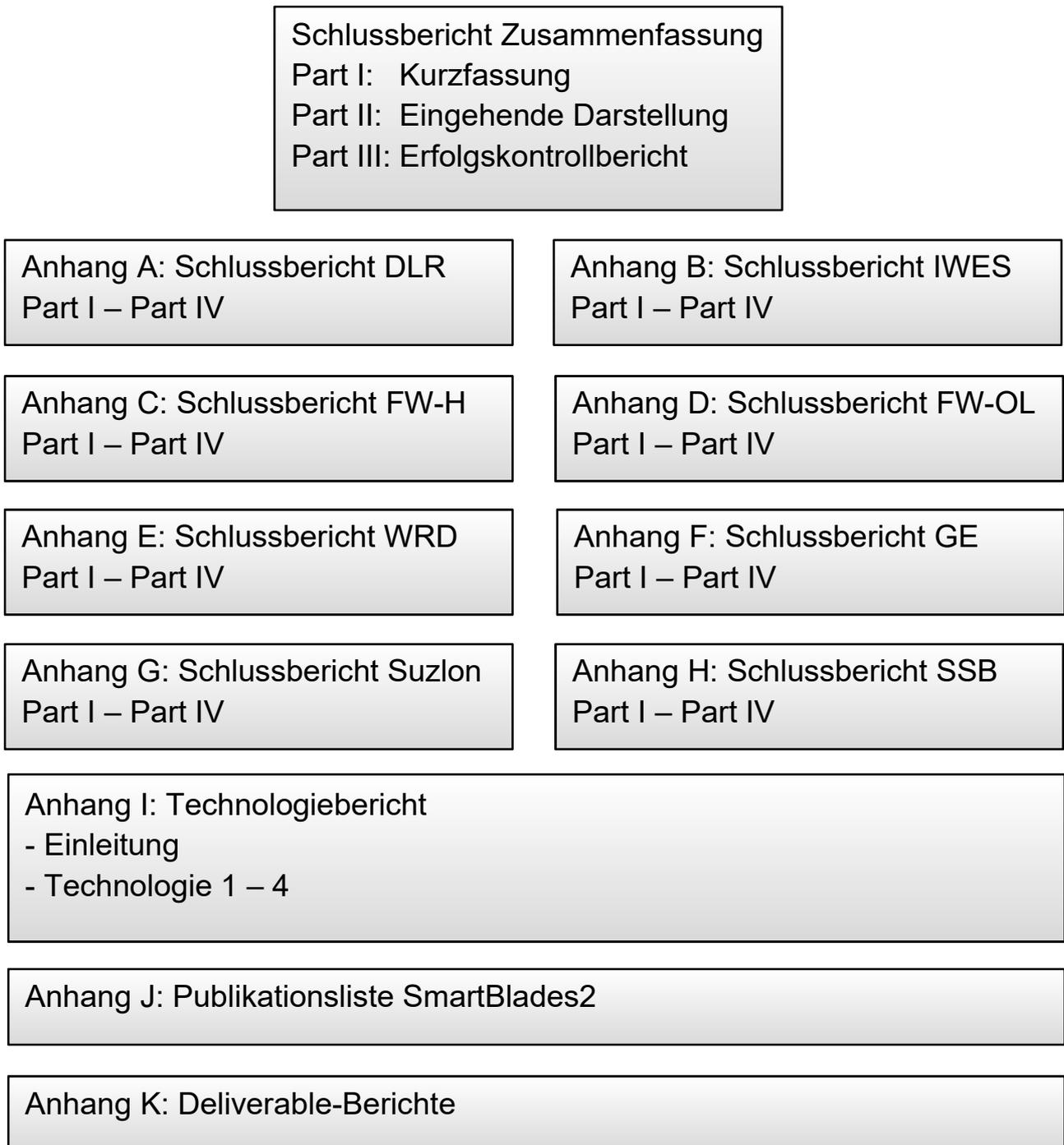


Abbildung 1: Aufbau des SmartBlades Schlussberichts

# Schlussbericht SmartBlades2

Zuwendungsempfänger SmartBlades2 Konsortium	Förderkennzeichen: 0324032 A/B/C/D/E/F/G/H
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

Part I: Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Der Trend zu immer größeren Rotorblättern, mit denen zukünftige Windenergieanlagen ausgerüstet werden sollten, um über Effizienzgewinn diese Energiebranche im Wettbewerb nachhaltig zu festigen, wurde bereits im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ festgestellt und stellt auch in diesem Verbundprojekt „SmartBlades2“ die zentrale Motivation, um drei verschiedene Rotorblattkonzepte in drei Technologien zu untersuchen, mit denen die aerodynamischen Verhältnisse am Rotorblatt durch aktive und passive Mechanismen positiv beeinflusst werden können. In der Technologie 1 steht die passive Biege-Torsions-Kopplung im Mittelpunkt, die Technologie 2 befasst sich mit aktiven Hinterkanten und in der Technologie 3 werden passive und aktive adaptive Vorflügel untersucht. Eine vierte Technologie befasst sich mit Klebstoffen, einer intensiven Bewertung der Technologien und nimmt nun auch akustische Bewertungsfunktionale in die Betrachtung mit auf. Verschiedene Messkampagnen in Freifeldversuchen an realen Anlage dienen zur Evaluierung der Konzepte unter realistischen Bedingungen. Für weitere Details siehe bitte Anhang I, Kapitel 1.

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

Die zunehmend globaler agierende Windenergiebranche benötigt auch eine international aufgestellte begleitende und unterstützende Forschung, um eine innovative und nachhaltige Produktentwicklung gewährleisten zu können, die auch in der Zukunft diese Branche wettbewerbswirksam macht. Die immer stärker ins Gewicht fallenden Umwelt- und Betriebsbedingungen stellen ebenfalls höchste Anforderungen an die zukünftige komplexe Produktpalette, deren Beherrschbarkeit und Verständnis eine übergreifende Zusammenarbeit zwischen diversen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen erfordert.

Der Forschungsverbund Windenergie (FVWE), bestehend aus den Partnern Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), ForWind – Zentrum für Windenergieforschung (bestehend aus zwei Partnern ForWind Hannover und ForWind Oldenburg) und Fraunhofer IWES Nordwest, stellt sich genau diesen Anforderungen. Im Unterschied zum Vorgängervorhaben „Smart Blades“ sind ebenfalls die vier Industriepartner SSB WindSystems, Suzlon, WRD Enercon und GE General Electric Global Research an diesem Forschungsvorhaben als geförderte Partner beteiligt. Die drei assoziierten Partner Henkel, Nordex Acciona und Servion haben das Projekt ebenfalls aktiv begleitet. Aufgrund einer Insolvenz ist allerdings der assoziierte Partner Servion bereits 2019 aus dem Projekt ausgeschieden. Diese Bündelung von Ressourcen aus der Industrie und Forschung liefert ein weltweit einmaliges Innovationspotenzial für die Windenergiebranche, in der Hersteller, Zulieferer und Betreiber von Windenergieanlagen direkt mit dem idealen Partner bei Technologieentwicklungen interagieren und kommunizieren. Dies ermöglicht unter anderem den praxiskonformen Test von großen Rotorblättern mit Biege-Torsions-Kopplung im Freifeldversuch, passive und aktive zusätzliche Rotorblattkomponenten, die Modellvalidierung, das Design virtueller Methoden, die Bewertung mit direktem Link zu der Produktion. Auch systemische Fragestellungen dieser global wachsenden Säule der Energieversorgung können vom FVWE mit seinen mehr als 600 Forscherinnen und Forschern in voller Tiefe und Breite kompetent bearbeitet werden. Die Forschung schafft dabei quantifizierbare und kostensenkende Mehrwerte – durch Effizienzerhöhungen, die Beschleunigung abgesicherter Entwicklungen bis hin zu Zertifizierungsaspekten, Fertigungsoptimierung und der Steigerung von Ausfallsicherheit im Betrieb.

Die Kooperation der vier Forschungspartner, vier Industriepartner nebst den drei assoziativen Industriepartnern ermöglicht den unkomplizierten Zugriff auf eine weltweit einmalige Infrastruktur, gewährleistet Technologietransfer zwischen der Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr und stellt die Verknüpfung mit der universitären Forschung und Lehre und auch der Industrie sicher.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens bei der jeweiligen Organisation

Der Ablauf des Vorhabens erfolgte gemäß kontinuierlich angepasstem Zeit- und Arbeitsplan. Die übergeordneten Projektziele (siehe Anhang I, Kapitel 1) wurden weitestgehend erreicht.

## 4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen.

10

Im Projekt SmartBlades2 wurden die vier Technologien unter sehr unterschiedlichen wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen begonnen. Diese sind im Anhang I technologieweise dargestellt.

- Technologie 1 → Kapitel 2.3
- Technologie 2 → Kapitel 3.3
- Technologie 3 → Kapitel 4.3
- Technologie 4 → Kapitel 5.3

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben der engen Zusammenarbeit der verschiedenen Projektpartner im Verbundprojekt SmartBlades2 gab es signifikante Unteraufträge an NREL, DTU und die Firma Deharde GmbH. Die Details sind den entsprechenden Abschnitten der Schlussberichte in den Anhängen A-D zu entnehmen.

Part II: Eingehende Darstellung

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

Die im Antrag gesetzten Ziele wurden im Wesentlichen erreicht. Eine eingehende Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Anhang I und Anhang K.

### **2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die veranschlagten Sachmittel und Personalmittel wurden planmäßig eingesetzt. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind die Personalmittel (Siehe bitte Anhang A – H).

### **3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Wie unter II.1 beschrieben wurden die geplanten Arbeiten durchgeführt und waren zur Erreichung der Ziele notwendig und angemessen.

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

Siehe bitte Bericht der einzelnen Organisationen (Anhang A – H).

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

Siehe bitte Bericht der einzelnen Organisationen (Anhang A – H).

### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Siehe bitte Bericht der einzelnen Organisationen (Anhang A – H).

# Erfolgskontrollbericht

## SmartBlades2

Zuwendungsempfänger SmartBlades2 Konsortium	Förderkennzeichen: 0324032 A/B/C/D/E/F/G/H
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

Part III: Erfolgskontrollbericht

**Dieser Abschnitt des Abschlussberichts ist vertraulich**

**Anhang A**  
**Schlussbericht DLR**

# Schlussbericht DLR

Zuwendungsempfänger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Förderkennzeichen: 0324032 A
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

## Part I: Kurze Darstellung

### 1. Aufgabenstellung

#### 1.1 Gesamtziel (der Organisation)

Ziel des Projekts SmartBlades2 ist die Untersuchung unterschiedlicher Technologien zur Entwicklung „intelligenter Rotorblätter“ und die Erhöhung der technologischen Reife der einzelnen Ansätze. Im Einzelnen sind das im DLR:

- Der Bau und der Test von vier Rotorblättern mit geometrischer Biege-Torstions-Kopplung von ca. 20 m Länge, sowie die Nutzung der daraus gewonnenen Daten zur Validierung der Simulationen. Parallel sollten auch aussichtsreiche Alternativkonzepte zur geometrischen Kopplung gefunden werden.
- Untersuchung des Potentials von aktiven Hinterkanten für Windkraftanlagen mit Hilfe einer Rotationsprüfung im Freifeld sowie eines Windkanalversuchs, sowie die Nutzung der daraus gewonnenen Daten zur Validierung der Simulationen. Außerdem sollten die akustischen Auswirkungen der Hinterkanten untersucht werden.
- Weiterentwicklung der Technologie des Vorflügels für Windkraftblätter. Dazu sollten diverse Auslegungsarbeiten und sowie der Aufbau von Versuchshardware umgesetzt werden.
- Außerdem sollten numerische und experimentelle Analysen von Kläbnähten sowie Nachweise von aeroelastischer Stabilität von SmartBlades erbracht werden.

#### 1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen (der Organisation)

Siehe bitte Anhang I, Kapitel 1.

#### 1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele (der Organisation)

Die einzelnen Disziplinen sind gut miteinander vernetzt und bieten die Möglichkeit von gekoppelten Rechnungen mit sehr hochwertigen Tools. Darüber hinaus haben die beteiligten Partner bereits langjährige einschlägige Erfahrungen auf diesem komplexen Forschungsgebiet. Derzeit sind keine Patentrechte Dritter bekannt, die einer Durchführung des Vorhabens oder der Verwertung der Vorhabenergebnisse entgegenstehen.

Da es sich in diesem Teilvorhaben um eine extrem interdisziplinäre Aufgabe handelt, bringen mehrere DLR Institute ihre Kompetenzen mit ein, was eine Kopplung von sehr hochwertigen Tools der einzelnen Disziplinen ermöglicht. Beteiligt sind im Einzelnen: Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA), Institut für Flugsystemtechnik (FT), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik (AS) und Institut für Aeroelastik (AE).

Einen Schwerpunkt der Arbeiten stellt die strukturelle Auslegung der einzelnen Konzepte dar. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) besitzt Kompetenzen und umfangreiche Erfahrungen entlang der gesamten Prozesskette für Faserverbundstrukturen von der Materialauswahl über die Auslegung und Konstruktion bis zur Fertigung im industriellen Maßstab. Einen Schwerpunkt stellen dabei Fertigungsverfahren wie das Preforming von trockenen Faserhalbzeugen dar, wie es auch zur hochpräzisen Fertigung von Faserverbundbauteilen gerade auch mit Verformungs-kopplungen notwendig ist. Das Institut verfügt mit dem Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade sowohl über Anlagentechnologien zur Herstellung von sehr großen Faserverbundstrukturen (zum Beispiel Flügel) als auch über Anlagen für die schnelle Fertigung von komplexen Strukturbauteilen in großer Stückzahl. Die Auslegung von „Smarten Strukturen“ im Sinne der Formadaption ist ein weiterer Schwerpunkt des Instituts, was an Beispielen wie einer spaltfreien absenkbaren Flügelvorderkante (DroopNose), bei der die Haut elastisch deformiert wird, demonstriert wurde. Die Integration von verteilter Piezoaktuatorik wurde für die Anwendung in verwindbaren Hubschrauberrotorblättern entwickelt. Diese Blätter sind in der Lage ihren Anstellwinkel an der Spitze um bis zu  $\pm 2^\circ$  zu verändern und damit die Aerodynamik des Hauptrotors hochdynamisch zu beeinflussen. Diese Vorarbeiten stellen eine hervorragende Ausgangssituation für die Entwicklung von adaptiven Systemen von Windkraftanlagen dar.

Die CFD-Rechnungen zur Strömungs-Struktur-Kopplungen haben am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik stattgefunden. Jahrzehntelange Kenntnisse im Bereich des Entwurfs von Flugzeugen, Propellern und Rotoren bilden die Grundlage

für die Entwicklung leistungssteigernder aerodynamischer Maßnahmen und Lärminderungstechnologien für Windenergieanlagen und deren Erprobung an Versuchs-Windenergieanlagen. Eine weitere Kernkompetenz des Instituts ist die Entwicklung von hochwertigen numerischen Berechnungsmethoden für die multidisziplinäre Strömungs-Simulation und Vorhersage der Schallemissionen sowie die konfigurative Optimierung. Der am Institut entwickelte Computational Fluid Dynamics (CFD)-Löser TAU ist bei der europäischen Luftfahrtindustrie fest im Entwurfsprozess etabliert und kam auch in die-sem Projekt in der Strömungs-Struktur-Kopplung zur Vorhersage der aerodynamischen Lasten unter Berücksichtigung der Strukturdeformationen zum Einsatz.

Aeroelastic Tailoring der Blätter sollte gerade für die strukturell gekoppelten Blätter in Technologie 1 untersucht werden, was die Expertise des Instituts für Aeroelastik (AE) darstellt. Es befasst sich mit industrierelevanten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich der Strömungs-Struktur-Kopplung. Am Institut werden experimentelle und numerische Methoden entwickelt und angewendet. Eine Hauptaufgabe ist das Erbringen von Nachweisen für die Zulassung von Luftfahrtsystemen durch Flatterrechnungen, Standschwing- und Flugversuche. Weitere Forschungsgebiete sind aeroelastische Effekte an rotierenden Systemen, insbesondere an Drehflüglern und Turbomaschinen, und die Vorhersage von dynamischen Lasten im Flugzeug-Entwurfsprozess.

Für Windkraftanlagen kann das Institut wichtige Beiträge leisten zur genauen Bestimmung der aeroelastischen Verformung der Rotorblätter, der Flattergrenze (Einzelblatt-flattern, Whirflattern) in komplexen Strömungen und der dynamischen Lasten von Rotorblättern und vom Gesamtsystem.

Die Berechnungen des Gesamtrotors und der entsprechenden Lasten wurden vom Institut für Flugsystemtechnik (FT) beigetragen. Es betreibt einen eigenen Simulations-Code für Rotoren, der die Wechselwirkung von Rotordynamik und Aerodynamik von Drehflüglern beschreibt. Dieser Code bietet diverse Schnittstellen zu anderen Werkzeugen zum Beispiel für Computational Fluid Dynamics, Lärmberechnung oder Regleroptimierung und ist für Hubschrauber mit Messdaten validiert. Dieser Code lässt sich auch für Windkraftanlagen nutzen. Deshalb beschäftigt sich das Institut aktuell mit aktuellen Fragestellungen der Windenergieanlagen wie z.B. der Lastreduktion.

Die wissenschaftlichen und technischen Ziele des DLR ergeben sich direkt aus den oben genannten Gesamtzielen des DLR und lassen sich aus der folgenden Liste ablesen:

Technologie 1:

- Bau von vier Rotorblättern mit geometrischer Biege-Torsions-Kopplung
- Test eines einzelnen Rotorblattes mit geometrischer Biege-Torsions-Kopplung
- Test eines Blattsatzes mit Biegetorsionsblättern an einer Anlage
- Validierung von Simulationsketten mit den Daten der Versuche
- Untersuchung besonders aussichtsreicher alternativer Konzepte

Technologie 2:

- Inbetriebnahme eines Segmentdemonstrators mit flexibler Hinterkante am Rotationsprüfstand im Freifeld
- Validierung von Tools der Simulation von flexiblen Hinterkanten mit Hilfe von experimentellen Daten aus dem Rotationsprüfstand
- Experimentelle und numerische Untersuchung zum Ermüdungsverhalten von flexiblen Hinterkanten
- Strukturelle und aerodynamische Simulationen des gesamten Blattes mit flexibler Hinterkante
- Untersuchung akustischer Auswirkungen an Blättern mit aktiven Hinterkanten
- Weiterentwicklung von Regelungskonzepten für Blätter mit aktiver Hinterkante
- Messung von Polaren am Segmentdemonstrator im Windkanal

Technologie 3:

- Entwicklung und Erprobung von Regelungen für einen aktiven Vorflügel im turbulenten Windkanal (2D-Modell)
- Strukturkonzept für aktiven Vorflügel für Blattsegment mit 1m Profiltiefe (2D-Modell)
- Auslegung, Bau und Test eines passiven Vorflügels mit autonomer Kinematik (2D-Modell)
- Untersuchung des Einflusses starrer Vorflügel auf Anlagendynamik an WEA-Modell im Windkanal
- Auslegung, Bau und Test eines starren Vorflügels an einer realen Multi-MW WEA

Technologie 4 / Querschnitt:

- Numerische und experimentelle Analyse von Klebnähten
- Nachweis der aeroelastischen Stabilität von SmartBlades

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben bei der jeweiligen Organisation durchgeführt wurde**

Das DLR legt auf Grund seiner Kompetenzen den inhaltlichen Fokus der Forschungsaktivitäten im Bereich der Windenergie auf die Elemente von der Ressource Wind über die Rotorblätter bis hin zum Gesamtsystem Rotor. Dieser Bogen erstreckt sich vom Verständnis und Anwendung der Meteorologie und Windcharakteristik über den Entwurf und die Konzeption neuer Bauweisen am Rotor und Produktionstechnik bis hin zum Systemverständnis. Damit lassen sich die DLR-Forschungsthemen in mehrere Module gliedern:

- Neue Konzepte für Aerodynamik, Aeroelastik und aktiver Rotor
- Leichtbau und neue Produktionsweisen
- Meteorologie und Betriebsstrategien
- Systemische Betrachtung und Modellierung

Im Sinne einer modularen Versuchskette bearbeitet das DLR alle Themenfelder vom Material und Strukturen bis hin zur realen Anlage und verfügt über das notwendige Knowhow und die Infrastruktur, die zur Durchführung des Vorhabens erforderlich sind.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens bei der jeweiligen Organisation

Der Ablauf des Vorhabens erfolgte gemäß angepassten Zeit- und Arbeitsplan.

### 4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen.

Siehe bitte Anhang I.

Technologie 1 -> Siehe bitte Kapitel 2.3

Technologie 2 -> Siehe bitte Kapitel 3.3

Technologie 3 -> Siehe bitte Kapitel 4.3

Querschnittsthemen -> Siehe bitte Kapitel 5.3

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Für die Versuchsdurchführung wurde in Technologie 1 ein Unterauftrag an NREL vergeben. Für die Versuchsdurchführung in Technologie 2 wurde ein Unterauftrag an die DTU vergeben.

Für den Bau von Windkanalmodellen wurde Fa Deharde unterbeauftragt.

Part II: Eingehende Darstellung

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

Task 1.1.1: Beschaffung von Hilfswerkzeugen

Ziele des Tasks waren die Zusammenstellungen und Beschaffung aller notwendigen Hilfs- und Fertigungseinrichtungen zur Rotorblattherstellung in Task 1.1.7. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

Task 1.1.2 Validierung / Kalibrierung von Sensoren

Ziele dieses Tasks waren die Bestimmung von Harzkennwerten als Input für die Fließsimulation und die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Sensorsignal des dielektrischen Sensors und Vernetzungsgrad des verwendeten Harzsystems. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

Task 1.1.3 Bewertung der Fertigbarkeit und Strukturdesign

Ziel des Tasks war die Überprüfung und Bewertung der Bauunterlagen der Rotorblätter hinsichtlich der Umsetzung in der Fertigung in Task 1.1.7. Hierzu sollten fertigungsrelevante Kategorien in einer Bewertungsmatrix untersucht und in Hinblick auf die fertigungstechnische Machbarkeit bewertet werden.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

Task 1.1.5 Fließsimulation für die Infusion

Ziel dieses Tasks war die Ermittlung und Verifizierung eines Konzeptes für das Anguss- und Harzmanagement der Blattinfusion mit Hilfe der Fließsimulationssoftware RTM-Worx, inklusive Bestimmung der benötigten Halbzeugparameter.

Das Ziel wurden mit leichtem Zeitverzug im beantragten Kostenrahmen erreicht.

Task 1.1.7 Blattherstellung: Bau von vier 20m Rotorblättern mit Bieg- Torsions-Kopplung, Blitzschutz und Nachbearbeitung

Ziele dieses Tasks waren der Bau von vier Rotorblättern mit geometrischer Biege-Torsions-Kopplung, deren Nachbearbeitung hinsichtlich Blattanschluss und Lackierung zum Einsatz an einer Testanlage sowie die Unterstützung bei der Instrumentierung der einzelnen Rotorblätter.

Die ursprüngliche Aufgabenstellung sah die Beauftragung der Fertigung der Rotorblätter bei einem Zulieferer vor. Im Projektverlauf wurde diese Aufgabenstellung dahingehend geändert, dass die Fertigung durch das DLR im ZLP Stade erfolgte.

Durch verspätete Übermittlung der Bauunterlagen kam es zu weiteren Verzögerungen. Aus diesen Gründen konnte der beantragte Zeit- und Kostenrahmen nicht eingehalten werden. Eingeleitete Maßnahmen wie Personalerhöhung und Schichtarbeit konnten den Zeitverzug zwar minimieren jedoch nicht aufholen. Die Ziele des Tasks wurden erfolgreich abgeschlossen.

Task 1.1.10 Auswertung der Herstellungsschritte und Bewertung hinsichtlich der Herstellungskosten

- Prozessmodell zur (Kostenabschätzung und Auswertung der Herstellungsschritte) (Ö)
  - In einer hierarchischen Prozessstruktur
- Bericht zur Kostenabschätzung (K)
  - Mit dem Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM): Bottom-Up
- Anhand der Ergebnisse der Kostenbewertung unter anderem im Projekt SB2, wurde eine Ökobilanzbewertungsstrategie realisiert
- Im Bereich Datenerhebung wurde das Konzept der Smart-Work-Station (SWS) entwickelt um bestimmte Prozessdaten automatisch zu erheben
- Der Unterschied zwischen Kostenschätzung und -Bewertung erfordert datenbasierende Abschätzungsmodelle

Task 1.1.12 und C2 Transport der Rotorblätter

Ziele dieses Tasks waren die Planung, Organisation, Beauftragung und Überwachung der notwendigen Transporte der Rotorblätter sowie die Beschaffung geeigneter Transportvorrichtungen für den See- und Landtransport. Folgende Transporte sollten durchgeführt werden:

1. Vier Rotorblätter zur Nachbearbeitung und Lackierung an Auftragnehmer
2. Ein Rotorblatt zum IWES, Bremerhaven
3. Drei Rotorblätter zur Testanlage, NREL, USA

Die Aufgabenstellung wurde im Projektverlauf um den Rücktransport der Anlagenblätter zum ZLP in Stade erweitert. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

#### Task 1.1.16 Qualitätsgesicherte Fertigung und Dokumentation

Ziele dieses Tasks waren die Beschaffung, Integration und Validierung geeigneter Messsensorik für die Fertigungsüberwachung beim Bau der Rotorblätter. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen, Messdaten aufgenommen und ausgewertet.

#### Task 1.2.1 Aeroelastic Testing – strukturdynamischer Test (Ground Vibration Test) am fertigen Rotorblatt

Ziele:

- Identifikation der strukturdynamischen Eigenschaften aller Blätter zur Bestimmung des Einflusses von Fertigungsunsicherheiten
- Bestimmung des nichtlinearen strukturdynamischen Verhaltens unter großen Verformungen und Ermittlung von Moden im höheren Frequenzbereich mit elektrodynamischen Shakern
- Bereitstellung einer Datenbasis zur Validierung des Strukturmodells.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen bzw. übererfüllt. Fertigungsunsicherheiten konnten am DLR in Stade vor Finish und am NREL in Colorado untersucht werden mit einem höchst effizienten Setup für Modaltests. Die Tests erfolgten an jeweils drei Blättern mit ca. 100 Beschleunigungssensoren innerhalb 1 Woche. Die Datenbasis in dieser Sensordichte zur Modellvalidierung ist weltweit einmalig.

Durch die dynamischen Tests mit elektrodynamischen Shakern am Prüfstand konnte das Verhalten im vibroakustisch relevanten Bereich untersucht werden und ermöglichte die Identifikation von wissenschaftlich relevanten Schallenschwingungen (Blattovalisierungen).

Tasks: 1.2.3, 1.3.5, 1.3.12, 1.3.13 Vorbereitungen für den Betrieb des Blattspitzensensors im Windkraftblatt Integration der Blattspitzensensorik in die Anlagenblätter Torsionsmessung im Anlagenbetrieb Auswertung der Blattspitzensensordaten aus dem Anlagenbetrieb

Die Tasks 1.2.3, 1.3.5, 1.3.12 und 1.3.13 dienten der Entwicklung, Fertigung, Integration und Erprobung einer neuartigen Sensorik zur Erfassung des Blatteinstellwinkels nahe der Blattspitze. Das übergeordnete Ziel dieser Tasks war die Messung und Bereitstellung von Einstellwinkeldaten aus der bei NREL durchgeführten Messkampagne.

Da es sich um eine vollkommen neuartige Sensorik handelt, waren diese Tasks mit einem hohen Risiko verbunden. Die Sensorik wurde zwar erfolgreich entwickelt, in die Anlage integriert und lieferte erste Messwerte, das übergeordnete Ziel konnte jedoch aufgrund des frühzeitigen Endes der Messkampagne im beantragten Zeit- und Kostenrahmen nicht erreicht werden.

#### Task 1.4.3 und 1.4.5 Validierung der Simulations- und Dimensionierungswerkzeuge - Analyse der Anschlusssteifigkeiten

Ziele dieses Tasks waren die Validierung der Simulations- und Dimensionierungswerkzeuge für die strukturelle Auslegung von Rotorblättern (T1.4.3). Weiterhin wurden Modellannahmen der Einspannung untersucht (T1.4.5)

Die Ziele von Task 1.4.3 wurden angepasst, da das Rotorblatt beim Prüfstandstest nicht geschädigt wurde. Es wurde vertiefte strukturmechanische Analysen durchgeführt und ein Referenzmodell für das Rotorblatt erstellt.

Die Biegebelastungen und Biegeschwingformen konnten für die Prüfstandstest und den Anlagentest sehr gut abgebildet werden. Das gilt sowohl für die globalen Verformen als auch für die lokal gemessenen Dehnungen. Die Torsionsbelastungen und die Torsionschwingformen weisen Fehler im Bereich von ~10% auf.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 1.4.9 FE-Modellanpassung - Computational Model Updating (CMU)

Ziele:

- Vorbereitung FE-Modell zur Validierung
- Korrelation Modaltest-FEM
- FE-Modell Fehlerlokalisierung
- Computational Model Updating
- Bereitstellung validiertes Modell

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

Durch die in Task 1.2.1 gewonnenen Erkenntnisse über die experimentell ermittelten strukturdynamischen Eigenschaften des Demoblatts, konnte das numerische Ausgangsmodell deutlich verbessert und für gekoppelte Rechnungen bereitgestellt werden. Ein angepasstes Modell wurde allen Partnern zur Verfügung gestellt.

#### Task 1.5.3 Modellierung unkonventioneller Bauweisen

Ziele dieses Tasks waren die Modellierung und strukturmechanische Analyse von unkonventionellen Holmdesigns, um eine Biege-Torsionskopplung zur Lastreduktion zu ermöglichen. Die Arbeiten fanden in enger Zusammenarbeit mit den Tasks 1.5.4 und 1.5.5 statt.

Der Modellgenerator musste angepasst wurden, um die in 1.5.4 geforderten Designs stabil in der Analyseketten in 1.5.5 zu erzeugen.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 1.5.4 Lastrechnungen für Blatt mit BTK und unkonventionellen Bauweisen

Ziele dieses Tasks waren der Aufbau von Mehrkörper-Modellen, die Definition von Lastfällen, die Durchführung von Lastberechnungen und deren Postprocessing. Dafür wurde der automatisierte Prozess aus den am DLR entwickelten Programmen TurbGen und TurbLoads angepasst und eingesetzt. Die Lasten und die dimensionierten Rotorblattmodelle wurden über die Umgebung RCE iterativ mit Softwarekomponenten zur Strukturauslegung (Tasks 1.5.3/1.5.5) ausgetauscht. Die Arbeiten wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

#### Task 1.5.5 Bewertung unkonventioneller Bauweisen

Ziele dieses Tasks war die Auslegung alternativer Rotorblattdesigns mit struktureller Biege-Torsionskopplung. Dabei wurden 3 unterschiedliche Konzepte untersucht: ein gekrümmter Holm, ein C-Holm und die Verwendung von rotierten Gurtlagen. Die größte Reduktion der Extremlasten von 27% konnte mit einem C-Holm Konzept erzielt werden. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

#### TZ-A1.1 Strukturdynamische Validierung und Modalanalysen - Gradientenbasierte FE-Modellanpassung (Updating) des gesamten Rotorblattsatzes

3 separat validierte Strukturmodelle die für weiterführende Simulationen unter Einbeziehung des Gesamtanlagenverhaltens. Das Ziel wurde im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen. Durch die in Task 1.2.1 gewonnenen Erkenntnisse über die experimentell ermittelten strukturdynamischen Eigenschaften des Blattsatzes durch strukturdynamische frei-frei Tests, konnten die numerische Ausgangsmodelle individuell verbessert und für gekoppelte Rechnungen bereitgestellt werden. Drei angepasste Modelle wurden allen Partnern zur Verfügung gestellt.

#### TZ-A1.2 Modalanalysen - Experimentelle Modalanalyse von Schalenschwingungen an Rotorblättern

Ziele:

- Erfassen der strukturdynamischen Eigenschaften aller Blätter nach Beendigung der Frei-feldkampagne, ggf. Detektion von Änderungen
- Gezielte Anregung und Identifikation von Eigenformen der Rotorblattschalen

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen. Die Modaltests des Blattsatzes nach Rückholung der Blätter konnten am DLR in Stade abgeschlossen werden. Die Tests erfolgten an jeweils drei Blättern mit ca. 100 Beschleunigungssensoren innerhalb 1 Woche.

Die Modaldatenbasis konnte allen Projektpartnern über die Teamsite zur Verfügung gestellt werden.

#### Tasks 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6 Rotationsprüfung der flexiblen Hinterkante

Ziel aller dieser Tasks war die Instrumentierung, Inbetriebnahme und Montage des Segmentdemonstrators mit flexibler Hinterkante an der Rotationsversuchsanlage der DTU in Risø mit dem Ziel, Messungen an der Rotationsversuchsanlage in relevanter Umgebung durchzuführen. Dazu wurden die in SmartBalde 1 erstellte Hinterkante an den passiven Profiltail montiert, Messtechnik und Datenerfassung installiert und erprobt sowie bei der DTU Druckmesstechnik eingebaut und getestet. Im April 2018 erfolgte die Montage an der Anlage sowie die Messungen. Im Anschluß wurden die Daten gesichtet, auf Plausibilität getestet und ein Datenpaket für die Projektpartner erstellt.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Tasks 2.1.7, 2.1.8, 2.1.9 und 2.1.10 Simulation Rotationsprüfung

Ziele des Tasks 2.1.7 war die Erstellung eines Modells des DTU-Schleuderteststandes in Risø in SIMPACK auf Basis zur Verfügung zu stellender Struktur-, Geometrie- und Aerodynamikdaten.

Ziele des Tasks 2.1.8 waren die nichtlineare Simulation des Schleuderteststandes ohne und mit aktiver Hinterkantenklappe, basierend auf dem in Task 2.1.7 erstellten SIMPACK/S4 Modells. Hierbei sollten vornehmlich die Lastfälle und Szenarien simuliert werden, die im geplanten Versuchsprogramm am Schleuderprüfstand aktiv wie passiv gemessen werden sollten.

Ziel des Tasks 2.1.9 war die Validierung der Simulationsergebnisse und damit der Berechnungsmethode der Aerodynamik eines rotierenden Flügelsegmentes kurzer Streckung sowie deren Beeinflussung durch die aktive Hinterkante mit den Messdaten der Versuche am Schleuderprüfstand.

Ziele des Tasks 2.1.10 war die Erweiterung und Anpassung sowie ggf. Neuentwicklung von Simulationsmodellen basierend auf den Ergebnissen aus Task 2.1.9 und ggf. neuen Erkenntnissen bei FT und ggf. auch anderen Partnern im Verbund.

Alle Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

#### Task 2.3.2: Laborversuch Dauerfestigkeit

Ziel dieses Tasks war die experimentelle Dauerfestigkeitsuntersuchung der flexiblen Hinterkante. Dazu wurden zwei Versuchsstände aufgebaut, die noch aus SmartBlades 1 stammenden Demonstratoren eingespannt und über mehrere Wochen vermessen. Es wurden keine Schäden an der Struktur im Rahmen der Dauerfestigkeitsuntersuchung gefunden.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 2.4.1 Vorentwurf eines Blattes mit Klappe unter Berücksichtigung der Ruderwirksamkeit

Ziele dieses Tasks waren die Generierung der Simulationsmodelle des Rotorblatts für detaillierte Studien, Erweiterung eines Aeroelastic-Tailoring-Verfahrens für die Strukturoptimierung des numerischen Modells – Verkettung mit dem Lastenprozess TurbLoads, Durchführung verschiedener Strukturoptimierungs-Studien.

Die Arbeiten wurden im beantragten Kostenrahmen mit Zeitverzögerung erfolgreich abgeschlossen.

#### Task 2.4.4 Dimensioniertes Blatt mit Hinterkantenausschnitt

Ziel dieses Tasks war die Auslegung eines Rotorblattes mit Hinterkantenausschnitt für die Integration einer aktiven Hinterkantenklappe zur Reduktion von Lasten. In einem automatisierten Dimensionierungsprozess wurde ein Design erstellt bei dem der hintere Steg zum Blattausschnitt in Richtung Hinterkante verschoben wurde zur Übertragung der Klappenlasten. Da zum

Zeitpunkt der Auslegung keine Lasten der Hinterkantenklappe selbst vorlagen konnte der Entwurf nur auf Basis eines Lastenprozesses ohne aktive Klappe erfolgen. Die Strukturmasse erhöht sich um 5t durch die entsprechend größere Gurtbreite. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 2.4.5 Auslegung der aktiven Hinterkante für ein Fullscale-Blatt

Ziel dieses Tasks war die Erweiterung der bestehenden Finite-Element-Modelle auf die Anforderungen eines realen Rotorblattes, d.h. der Implementierung von Zuspitzung, Vorverwindung, verschiedenen Profilschnitten und Profilpositionen. Abgeschlossen wurde das Arbeitspaket mit einer Testrechnung auf dem Maßstab des SmartBlades Referenzblattes und einer Spannweite der flexiblen Hinterkante von 10m.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 2.5.1 Akustische Bewertung Technologie 2

Ziel dieses Tasks war die Übertragung der im AWB gemessenen Zusatzgeräuschanteile auf die Gesamtanlagensituation und darauf basierend die akustische Bewertung von Technologie 2.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

- Die DLR-Simulationsmethode FRPM/FMCAS konnte mittels der AWB-Experimente an Technologie 2 erfolgreich validiert werden.
- Sowohl die Messungen als auch die Simulationen haben ergeben, dass unter Auslegungsbedingungen (d.h. anliegende Strömung und Klappenausschläge von  $|\delta_f| = 5^\circ$ ) keine akustischen Nachteile infolge Technologie 2 an der Anlage zu erwarten sind. Spezifische Geräuschminderungsmaßnahmen sind lediglich an der Hinterkante zu empfehlen.

Maßnahmen an der Seitenkante sind weitestgehend unwirksam und nicht notwendig, solange (wie hier) klassisches Hinterkantengeräusch dominiert. Lediglich für größere „off-Design“-Klappenausschläge von  $\delta_f = 10^\circ$  wird das Klappenseitenkantengeräusch relevant.

#### Task 2.6.1 Weiterentwicklung von Regelungskonzepten

Ziele dieses Tasks war die Auslegung mehrerer Reglerstrukturen zur Lastreduktion mittels der mehrzieligen Optimierungsumgebung MOPS. Ferner war eine Parameterstudie zum Einfluss der Aktuatorik auf die Regelung geplant. Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen nicht vollständig abgeschlossen.

#### Task 2.8.1: Anpassung des Segmentdemonstrators für WK-Versuch

Ziel dieses Arbeitspaketes war, den Segmentdemonstrator, der für die Rotationsversuche in den Tasks 2.1.1 bis 2.1.6 verwendet wurde, für einen Windkanalversuch an der Universität Oldenburg anzupassen. Dazu wurde ein Kanalwaagenadapter entworfen und gebaut sowie Druckmesstechnik in den Demonstrator installiert. Die Versuche fanden im Oktober 2019 statt. Die erwartete aerodynamische Wirkung der flexiblen Hinterkante konnte bei den Versuchen nachgewiesen werden.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

#### Task 3.2.1 Aerodynamisch-kinematischer Entwurf eines passiv adaptiven Vorflügels für ein WEA-Profil

Das Hauptziel dieses Tasks war der detaillierte Entwurf eines passiv-adaptiven Vorflügels inklusive Vorflügelkinematik. Darüber hinaus sollten sowohl das aerodynamische Leistungsvermögens des Rotorblattprofils sowie das dynamische Öffnungsverhalten des entworfenen Vorflügels mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen vorhergesagt werden.

Die Ziele wurden im beantragten Kostenrahmen und innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit erreicht.

Die Vorflügelgeometrie sowie zwei verschiedene Vorflügelkinematiken wurden entworfen und gefertigt. Der entwickelte Vorflügel öffnet und schließt sich sowohl in der numerischen Simulation als auch im realen Experiment (siehe Task 3.2.2) lediglich aufgrund der vorherrschenden aerodynamischen Kräfte, wodurch sich die Vorflügelposition passiv-adaptiv an die Anströmung anpasst.

Das untersuchte Rotorblattprofil weist mit dem entwickelten passiv-adaptiven Vorflügel unter den meisten Bedingungen eine bessere aerodynamische Leistungsfähigkeit im Vergleich zum gleichen Rotorblattprofil mit einem starren Vorflügel und im Vergleich zum ursprünglichen Rotorblattprofil ohne Vorflügel auf.

#### Task 3.3.4 Aerodynamische Auslegung eines starren Vorflügels und Validierung

Die Ziele dieses Tasks waren zum einen der aerodynamische Entwurf einer starren Vorflügelgeometrie für den Einsatz an einer realen Windenergieanlage der Firma SUZLON und zum anderen die Übertragung dieser Geometrie auf eine Modellanlage („MoWITO“). Darüber hinaus sollten die dabei gemachten Leistungsvorhersagen durch numerische Strömungssimulationen mittels Vergleich zu experimentellen Daten aus den Tasks 3.3.7 und 3.3.8 validiert werden.

Die Ziele wurden im beantragten Kostenrahmen und innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit erreicht. Die Vorflügelgeometrien wurden erfolgreich entworfen und anschließend in Task 3.3.5 strukturell ausgelegt und gefertigt.

Die Strömungssimulationen der Rotorblätter der Windenergieanlage der Firma SUZLON mit und ohne Vorflügel wurden erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen des Referenzblattes an einer realen Windenergieanlage wurden ausgewertet und mit den Ergebnissen der numerischen Simulation verglichen. Die Ergebnisse der Messung stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der numerischen Simulation überein, weshalb die Simulation mittels CFD (DLR-TAU) als sehr gute Vorhersagemethodik bewertet werden kann.

#### Task 3.3.9 Akustische Bewertung Technologie 3

Ziel dieses Tasks war die Vorhersage des Vorflügelgeräusches für die Gesamtanlage und darauf basierend die akustische Bewertung von Technologie 3.

Das Ziel wurde im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

- Die Simulationsergebnisse dokumentieren die Dominanz des klassischen Hinterkantengeräusches für moderate Windgeschwindigkeiten bis 9 m/s, d.h. Schallbeiträge des Vorflügels sind relativ unbedeutend, jedoch nur für 4 m/s komplett vernachlässigbar im Hinblick auf den Gesamtanlagenschall.
- Für die höchste analysierte Windgeschwindigkeit (16 m/s, Off-Design-Bedingung) ist allerdings mit deutlicher Zusatzgeräuschentstehung infolge der Vorflügelinstallation zu rechnen.
- Der im Projekt zunächst rein aerodynamisch getriebene Entwurf weist in der nachgeschalteten Analyse noch akustisches Verbesserungspotential auf.

- Im Rahmen des Projekts wurden aeroakustische Vorhersagemethoden entwickelt und erstmalig zur Anwendung gebracht, die zukünftig einen integrierten aero-akustischen Entwurf in iterativen Designzyklen ermöglichen.

Task 4.1.2 Validierung der Zentrifugentechnologie als kosteneffiziente Charakterisierungsmethode für WEA-Klebungen  
Ziele des Tasks waren die Validierung der Zentrifugentechnologie zur Charakterisierung eines WEA-Klebstoffsystems in SLS und Kopfzugkonfiguration, der Abgleich der mittels der Zentrifuge ermittelten Kennwerte mit konventionellen Proben sowie die Analyse der Kostenstruktur der Zentrifugentechnologie.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen

Task 4.2.1 Flatterbewertung für SmartBlades

Ziele dieses Tasks waren der Aufbau von Mehrkörper-Modellen (Bladed, Simpack) und die Bewertung des Einflusses von Smart-Blade-Technologien auf das vorhergesagte aeroelastische Verhalten der Anlage.

Es fand ein systematischer Code-zu-Code-Vergleich mit den Partnern des AP statt. Zunächst wurden die Modelle mit Hilfe von Testfällen steigender Komplexität verifiziert. Im Anschluss wurden Runaway-Analysen durchgeführt, die Unterschiede zwischen den Tools und zwischen Referenzblatt und Blatt mit Rückwärtspeilung sichtbar machen.

Die Arbeiten wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich abgeschlossen.

Task: 4.1.1 Material- und Komponentenversuche

Ziel des Tasks 4.1.1. ist die Bereitstellung der notwendigen technischen Unterstützung bei Planung von Material- und Komponentenprüfungen im statischen und servohydraulischen Prüffeld des Institutes FA. Im Task 4.1.3: „Analyse von Subkomponenten“ nutzen Mitarbeiter der Abteilung Strukturmechanik (DLR-FA-STM) experimentelle Daten, aus dem BMWi geförderten Projekt DFWind Phase 1 um ein experimentalgestütztes Transferschema zu entwickeln, das es erlaubt das Strukturverhalten von Ergebnissen vom 20m auf das 80m Rotorblatt zu übertragen. Zur Bewertung von ggf. aus der Biege-Torsionskopplung entstehenden höheren Belastungen innerhalb der Klebschicht, wäre es wünschenswert diese zusätzlich mit faseroptischen Dehnungssensoren zu instrumentieren. Um die Möglichkeit einer solchen Messung näher zu untersuchen wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich Versuche im Coupon-Maßstab im statischen Prüflabor des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik durchgeführt.

Task 4.1.3 Analyse von Subkomponenten

Ziele dieses Tasks war die Entwicklung eines experimentalgestützten Transferschemas für das Strukturverhalten.

Es wurde ein Transferschema erarbeitet, welches die Belastungen von einem Rotorblatttest und/oder einer Analyse auf eine Subkomponente mappen kann. Das Schema wurde numerisch verifiziert.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erfolgreich nicht komplett abgeschlossen.

Es gab technische Probleme bei den experimentellen Untersuchungen, sodass der Bericht zu den experimentellen Daten keine zerstörenden Prüfung enthält. Eine erste Validierung der Versagensbewertungsmodelle der Klebschicht konnte nicht erfolgen.

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die veranschlagten Sachmittel und Personalmittel wurden planmäßig eingesetzt. Den genauen Nachweis der verwendeten Mittel bitten wir dem Schlussverwendungsnachweis zu entnehmen.

Die veranschlagten Sachmittel und Personalmittel wurden planmäßig eingesetzt. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind

- ca. 4.895.000 Euro Personalmittel, und
- Sachmittel
  - ca. 136.600 Euro Material,
  - ca. 2.700 Euro FE Fremdleistungen,
  - ca. 93.100 Euro Reisekosten,
  - ca. 138.300 Euro Vorhabensspezifische AfA,
  - ca. 1.379.000 Euro sonstige unmittelbare Vorhabenkosten,
  - ca. 116.130 Euro Kosten innerbetriebliche Leistungen – GA-Nutzung.

Den genauen Nachweis der verwendeten Mittel bitten wir dem Schlussverwendungsnachweis zu entnehmen.

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

Wie unter II.1 beschrieben wurden die geplanten Arbeiten durchgeführt und waren zur Erreichung der Ziele notwendig und angemessen.

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

Task 1.1.1: Beschaffung von Hilfswerkzeugen

Die in diesem Task bereitgestellte Infrastruktur versetzt das DLR in die Lage zukünftige Projekte in dem Bereich der Rotorblattfertigung durchzuführen. Im BMWi Projekt Segblade wurden die beschafften Hilfs- und Fertigungseinrichtungen angepasst und erfolgreich eingesetzt.

Task 1.1.2 Validierung / Kalibrierung von Sensoren

- Verbreitung der Projektergebnisse im Konsortium insbesondere als Input in Task 1.1.5
- Die in diesem Task aufgenommen Messdaten fließen in die Materialdatenbank des Instituts ein und können als Basis und Referenz für weitere Projekte genutzt werden
- Im Rahmen des Tasks wurden Methoden entwickelt, die zum Zweck der Prozessoptimierung in der Industrie und in weiteren Projekten eingesetzt werden können

- In den Projekten Protec NSR (DLR) und LEITWERK (NiFö) erfolgt ein Transfer der erarbeiteten Technologie in den Bereich der Luftfahrtforschung

#### Task 1.1.3 Bewertung der Fertigbarkeit und Strukturdesign

Die in diesem Task erarbeitete Bewertungsmatrix kann als Vorlage für weitere Vorhaben mit Fertigungshintergrund genutzt werden. Durch leichte Anpassungen wurde dieses Bewertungssystem bereits im BMWi Projekt Segblade erfolgreich eingesetzt.

#### Task 1.1.5 Fließsimulation für die Infusion

Das Fließsimulationsmodell wurde erfolgreich aus den vorhandenen Daten des strukturmechanischen Modells generiert. Die entwickelten Importskripte reduzieren den Zeitaufwand zur Modellierung einer Fließsimulation auf ein Minimum. Eine Weiterführung der Taskergebnisse insbesondere mit den Industriepartnern – ggf. in bilaterale Projekten ist wünschenswert.

#### Task 1.1.7 Blattherstellung: Bau von vier 20m Rotorblättern mit Bieg- Torsions-Kopplung, Blitzschutz und Nachbearbeitung

Die in diesem Task erarbeiteten Kenntnisse im Bereich der Rotorblatfertigung, Fertigungsbegleitung und -dokumentation versetzen das DLR in die Lage weitere Forschungen im Bereich der qualitätsgesicherten Fertigung von Rotorblättern durchzuführen. Die gesammelten Erfahrungen in diesem Task bezüglich der Bauweisen und Fertigungsverfahren eröffnen gerade in Hinblick auf den Technologietransfer zwischen Luftfahrt- und Windkraftforschung neue Möglichkeiten zur Qualitätserhöhung und Kostenminimierung auf beiden Seiten. Diese Kenntnisse wurden bereits im BMWi Projekt Segblade umgesetzt. Die Fertigung im ZLP Stade erlaubte eine weitaus intensivere und einfachere Unterstützung bei der Instrumentierung und Durchführung der Ground Vibration Tests der Rotorblätter im Vergleich zu einer Beauftragung der Arbeiten.

#### Task 1.1.10 Auswertung der Herstellungsschritte und Bewertung hinsichtlich der Herstellungskosten

Anhand der Ergebnisse der Kostenbewertung unter anderem im Projekt SB2, wurde eine Ökobilanzbewertungsstrategie im Projekt ViSion realisiert

#### Task 1.1.16 Qualitätsgesicherte Fertigung und Dokumentation

- Anmeldung einer Erfindungsmeldung bereits erfolgt: „Optisch basierte Dickenmessung von Faserverbundbauteilen“
- Verbreitung der Projektergebnisse und Nutzung für weiterführende Projekte
- Wissenschaftliche Veröffentlichung bei der „Wind Turbine Blade Manufacture 2019“ in Düsseldorf

#### Task 1.2.1 Aeroelastic Testing – strukturdynamischer Test (Ground Vibration Test) am fertigen Rotorblatt

- Verbreitung der Projektergebnisse im Konsortium insbesondere mit den Industriepartnern – ggf. bilaterale Projekte mit einzelnen Partnern
  - Die Ergebnisse wurden auf 6 Projekttreffen sukzessive vorgestellt und mit allen Industriepartnern diskutiert.
- Verbreitung der Projektergebnisse auf Konferenzen
  - 9. VDI Fachtagung: Schwingungen von Windenergieanlagen, Bremen, 2018
  - EERA DeepWind'2019, 16th Deep Sea Offshore Wind R&D conference, Trondheim, 2019
  - TORQUE 2020
  - Pressemeldung: [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180524\\_windenergie-innovative-schwingungstests-an-rotorblaettern\\_27829.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180524_windenergie-innovative-schwingungstests-an-rotorblaettern_27829.html)

#### Tasks 1.2.3, 1.3.5, 1.3.12 und 1.3.13

dienen der Entwicklung, Fertigung, Integration und Erprobung einer neuartigen Sensorik zur Erfassung des Blatteinstellwinkels nahe der Blattspitze. Das übergeordnete Ziel dieser Tasks war die Messung und Bereitstellung von Einstellwinkeldaten aus der bei NREL durchgeführten Messkampagne.

- Die Schutzrechte waren zur Projektstart bereits angemeldet.
- Die entwickelte Sensorik wurde im Konsortium insbesondere den Industriepartnern im Rahmen von Projektmeetings sowie im Rahmen einer separaten Veranstaltung zur Sensorik vorgestellt.
- Alle Ergebnisse wurden den Projektpartnern in Form von Deliverables (1.2.3.1, 1.3.5.1, 1.3.12.1, 1.3.13.1) die auf der Teamsite abgelegt wurde zugänglich gemacht.
- Das Konzept der Sensorik wurde im Rahmen eines Übersichtsvortrags auf der ECCOMAS SMART2019 vorgestellt: Montano Rejas, Zhuzhell et. al. (2019) SELECTED RESULTS ON THE DEVELOPMENT AND TESTING OF SMART BLADES TECHNOLOGIES FOR WIND TURBINES. In: Proceedings der ECCOMAS SMART 2019, 08.-11. Jul. 2019, Paris, Frankreich. ISBN 978-84-949194-6-6
- Weitere Veröffentlichungen erfolgten im Innovationsbericht 2019 des Instituts (Opitz, Steffen; Zeigt, dass sich etwas dreht - Felderprobung einer Sensorik für Windkraftrotorblätter) und auf [www.leichtbau.dlr.de](http://www.leichtbau.dlr.de), [https://leichtbau.dlr.de/zeigt\\_sensorik\\_windkraftrotorblaetter](https://leichtbau.dlr.de/zeigt_sensorik_windkraftrotorblaetter).

#### Task 1.4.3 und 1.4.5 Validierung der Simulations- und Dimensionierungswerkzeuge - Analyse der Anschlusssteifigkeiten

Gemeinsame Publikation mit Nordex und SSB geplant

#### Task 1.4.9 FE-Modellanpassung - Computational Model Updating (CMU)

- Verbreitung der Projektergebnisse im Konsortium insbesondere mit den Industriepartnern – ggf. bilaterale Projekte mit einzelnen Partnern
  - Die Ergebnisse wurden auf 6 Projekttreffen sukzessive vorgestellt und mit allen Industriepartnern diskutiert.
- Verbreitung der Projektergebnisse auf Konferenzen
  - EURO DYN 2020 - XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 2020

#### Task 1.5.4 Lastrechnungen für Blatt mit BTK und unkonventionellen Bauweisen

Anschluss in Form eines Forschungsvorhabens wird angestrebt, Vorhabensskizze „SegTwist“ wurde eingereicht

#### Task 1.5.5 Bewertung unkonventioneller Bauweisen

Die Ergebnisse wurden im Smart Blades Konsortium zum Teil auch mit Industriepartnern diskutiert und fließen in weitere geplante und aktuell laufende Windenergieprojekte mit ein.

#### TZ-A1.2 Modalanalysen - Experimentelle Modalanalyse von Schalenschwingungen an Rotorblättern

- Verbreitung der Projektergebnisse im Konsortium insbesondere mit den Industriepartnern – ggf. bilaterale Projekte mit einzelnen Partnern
  - Bereitstellung der Ergebnisse über Teamsite
- Verbreitung der Projektergebnisse auf Konferenzen
  - In Vorbereitung für WESC2021

#### Tasks 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6 Rotationsprüfung der flexiblen Hinterkante

Die Projektdaten wurden folgenden Projektpartnern für die weitere Untersuchung zur Verfügung gestellt:

- ENERCON
- General Electric
- DLR FT
- Universität Hannover ISD

Mehrere Konferenzveröffentlichungen, siehe Liste der Veröffentlichungen

Da mit den Messungen an der Rotationsversuchsanlage nachgewiesen werden konnte, dass sich zyklische Lasten reduzieren lassen, wurde hier im Rahmen von Smartblades 2 die Basis für weitere Projekte bereitet, in denen die Technologie der flexiblen Hinterkante in relevanterem Maßstab, z.B. an einer realen Windenergieanlage, erprobt werden kann.

#### Tasks 2.1.7, 2.1.8, 2.1.9 und 2.1.10 Simulation Rotationsprüfung

Entwickelt wurde ein Strukturmodell der Anlage in SIMPACK und eine aerodynamische Simulation in S4. Beide Modelle zusammen bilden die Grundlage für die nichtlineare Simulation des Schleuderprüfstandes mit Hilfe der SIMPACK/S4-Kopplung.

In Task 2.1.8. wurde der grundsätzliche Nachweis erbracht, dass mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells des Schleuderteststandes eine Nachrechnung der Schleuderversuche mit und ohne aktive Hinterkantenklappe möglich ist.

Bei der Validierung in Task 2.1.9 konnte gezeigt werden, dass die Simulation das gemessene Verhalten des Schleuderprüfstandes ohne weitere Modifikationen/Verbesserungen bereits sehr gut widerspiegelt.

Verbesserungen an der Ergebnisgüte konnten trotz diverser Simulationsmodell-modifikationen in Task 2.1.10 nicht erzielt werden. Verwertung:

Die Taskergebnisse wurden im Konsortium verbreitet.

Die mit Hilfe der lauffähigen Simulation erzeugten Daten sind grundsätzlich veröffentlichungswürdig

#### Task 2.3.2: Laborversuch Dauerfestigkeit

Teilung der Messdaten mit Universität Hannover, ISD

Ermüdung und Dauerfestigkeit sind ein zentrales Thema bei Windenergieanlagen, die mehrere Jahrzehnte in Betrieb bleiben sollen. Insbesondere für eine flexible Hinterkante, die mehrfach pro Umdrehung des Rotors betätigt wird, spielt dieser Lastfall eine Rolle. Mit dem Nachweis der Schadfreiheit der Struktur im Rahmen der Messung in Smartblades 2 liegt eine tiefere Untersuchung des Themas in einem Folgeprojekt nahe, bei dem höhere Zyklenzahlen zu erreichen sind.

#### Task 2.4.1 Vorentwurf eines Blattes mit Klappe unter Berücksichtigung der Ruderwirksamkeit

- Weitere Nutzung des Modells und des Prozesses für anschließende Entwicklungen von Analyseverfahren
- Verbreitung der Projektergebnisse auf Konferenzen

#### Task 2.4.5 Auslegung der aktiven Hinterkante für ein Fullscale-Blatt

Die Tasks 2.1.1 bis 2.1.6 haben die experimentelle Bestätigung für die Wirksamkeit der Hinterkante zur Verringerung von zyklischen Lasten erbracht. Logischer nächster Schritt ist die Erprobung des Konzeptes auf einem realen Rotorblatt. Dafür wurde in diesem Arbeitspaket die Grundlage für die Beantragung eines Folgeprojektes mit dem Ziel der experimentellen Untersuchung der flexiblen Hinterkante an einem realen Blatt gelegt.

#### Task 2.5.1 Akustische Bewertung Technologie 2

- Nach Abschluss des Projektes liegt eine teilvalidierte Schallvorhersagemethodik vor, die zukünftig einen integrierten aero-akustischen Entwurf in iterativen Designzyklen ermöglicht. Solcherart designunterstützende Vorhersagemethoden in der Aeroakustik sind industriell nachgefragt und eröffnen die Perspektive für Unteraufträge und aufbauende Projektaktivitäten. Parallel zu SMARTBLADES2.0 wurde bereits eine Industriepatenschaft gestartet, um eine entsprechende 3D-Schallvorhersage für komplexe Geräuschminderungsmaßnahmen wie Hinterkantenzahnungen zu entwickeln.
- Die Ergebnisse werden auf der WIND TURBINE NOISE 2021, Dublin, sowie auf der WIND ENERGY SCIENCE CONFERENCE 2021, Hannover, publiziert (Abstracts in Arbeit). Darüber hinaus erfolgte ein regelmäßiger Informationsaustausch über den IEA Wind TCP Task 39 „Quiet Wind Turbine Technology“.

#### Task 2.8.1: Anpassung des Segmentdemonstrators für WK-Versuch

Die Kanalmessdaten wurden mit folgenden Projektpartnern geteilt:  
ENERCON

#### Task 3.2.1 Aerodynamisch-kinematischer Entwurf eines passiv adaptiven Vorflügels für ein WEA-Profil

- Die Projektergebnisse aus dieser Task wurden mit den Industriepartnern geteilt (insb. Enercon und SUZLON).
- Es ist geplant auf der Konferenz „WESC2021“ die Ergebnisse zum passiv-adaptiven Vorflügel vorzustellen, um somit die Technologie weiter zu verbreiten.
- Die Ergebnisse wurden zum Teil bereits in Journalen veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen sollen folgen (siehe Folie 5).
- Geplant ist, den passiv-adaptiven Vorflügel in einem Nachfolgeprojekt weiterzuentwickeln und bei rotierender Strömung näher zu untersuchen.

#### Task 3.3.4 Aerodynamische Auslegung eines starren Vorflügels und Validierung

- Die Projektergebnisse aus dieser Task wurden mit den Industriepartnern geteilt (insb. in enger Zusammenarbeit mit der Firma SUZLON).
- Es ist geplant die Ergebnisse zum starren Vorflügel bei einem Journal einzureichen, um somit die Technologie weiter zu verbreiten.
- Darüber hinaus besteht seitens der Firma SUZLON das grundsätzliche Interesse ein Nachfolgeprojekt einzuleiten.

#### Task 3.3.9 Akustische Bewertung Technologie 3

- Nach Abschluss des Projektes liegt eine teilvalidierte Schallvorhersagemethodik vor, die zukünftig einen integrierten aero-akustischen Entwurf in iterativen Designzyklen ermöglicht. Solcherart designunterstützende Vorhersagemethoden in der Aeroakustik sind industriell nachgefragt und eröffnen die Perspektive für Unteraufträge und aufbauende Projektaktivitäten. Parallel zu SMARTBLADES2.0 wurde bereits eine Industriepatenschaft gestartet, um eine entsprechende 3D-Schallvorhersage für komplexe Geräuschminderungsmaßnahmen wie Hinterkantenzahnungen zu entwickeln.
- Die Ergebnisse werden auf der WIND TURBINE NOISE 2021, Dublin, sowie auf der WIND ENERGY SCIENCE CONFERENCE 2021, Hannover, publiziert (Abstracts in Arbeit). Darüber hinaus erfolgte ein regelmäßiger Informationsaustausch über den IEA Wind TCP Task 39 „Quiet Wind Turbine Technology“ .

Task 4.1.2 Validierung der Zentrifugentechnologie als kosteneffiziente Charakterisierungsmethode für WEA-Klebungen  
Die Ergebnisse des Tasks wurden im Konsortium, insbesondere mit dem Klebstoffhersteller Henkel geteilt und diskutiert.

#### Task: 4.1.1 Material- und Komponentenversuche

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden allen Projektpartnern in Form des Deliverable: 4.1.1.1 „Materialversuche und Komponentenversuche: Konzept zum Versuchsaufbau unter Berücksichtigung der Prüflaborinfrastruktur“ über die Ablage auf der Teamsite zur Verfügung gestellt.

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

#### Tasks 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6 Rotationsprüfung der flexiblen Hinterkante

- DTU: INNWIND [http://www.innwind.eu/-/media/Sites/innwind/News/36729101\\_INNWIND\\_V4.ashx?la=da&hash=AD5C83160E3AB36FCA33A3F5772DA3B3C07308E6](http://www.innwind.eu/-/media/Sites/innwind/News/36729101_INNWIND_V4.ashx?la=da&hash=AD5C83160E3AB36FCA33A3F5772DA3B3C07308E6), S. 45-48
- Induflap 2 [https://www.researchgate.net/publication/327405837\\_Wind\\_Turbine\\_Flap\\_Technology\\_Development\\_-\\_from\\_laboratory\\_to\\_full\\_scale](https://www.researchgate.net/publication/327405837_Wind_Turbine_Flap_Technology_Development_-_from_laboratory_to_full_scale)

#### Task 3.3.4 Aerodynamische Auslegung eines starren Vorflügels und Validierung

Seitens der Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang, China, wurden numerische Untersuchungen zu starren Vorflügeln an einer Windturbine veröffentlicht. Die durchgeführte Untersuchung befasst sich mit der Analyse verschiedener Stellungen eines Vorflügels an einem Profil der NREL-Turbine, wobei das Profil des Vorflügels selbst nicht Teil der Studie ist. Die erreichten Steigerungen des Auftriebsbeiwerts und des maximalen Anstellwinkels zeigen deutlich geringere Werte als in diesem Projekt erreicht:

Tao Chen, Xiao Jiang, Haipeng Wang, Qian L, Mingzhou Li and Zhou Wu: Investigation of leading-edge slat on aerodynamic performance of wind turbine blade, Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science, DOI:10.1177/0954406220941883 (2020)

Seitens der TU Delft, Niederlande, wurde eine Studie zum numerischen Entwurf eines Vorflügels für ein Windkraftprofil veröffentlicht. Die Ergebnisse sind gut vergleichbar mit den ursprünglichen Vorflügelentwürfen im Vorgängerprojekt SmartBlades.

Julia Steiner, Axelle Viré, Francesco Benetti, Nando Timme<sup>4</sup>, and Richard Dwig<sup>5</sup>: Parametric slat design study for thick base airfoils at high Reynolds Numbers, Wind Energ. Sci., 5, pp. 1075–1095, (2020) DOI:10.5194/wes-5-1075-2020

### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

#### Task 1.1.5 Fließsimulation für die Infusion

Andres, Marcel und Bertling, Dominic (2017) Validierung eines Infusionskonzeptes für biege-torsions-gekoppelte Rotorblätter von Windkraftanlagen DLR-IB-FA-BS-2017-232, 103 S.

#### Task 1.1.7 Blattherstellung: Bau von vier 20m Rotorblättern mit Biege- Torsions-Kopplung, Blitzschutz und Nachbearbeitung

Stüve, Jan und Kühn, Michael und Brohme, Lars und Zapp, Philipp (2019) Projekt SmartBlade2 – ein innovatives DLR-Rotorblatt. AG Faserverbund in der Windenergie, 24.10.2019, Aalen-Ebnat.

Montano Rejas, Zhuzhell und Daniele, Elia und Kühn, Michael und Stüve, Jan (2018) Biege-Torsionskopplung an Rotorblättern für Windenergieanlagen. Lightweight Design, 4/2018, Seiten 46-51. Springer. ISSN 1865-4819

Stüve, Jan und Kühn, Michael, und Akin, Deniz, und Brohme, Lars (2017) CONSTRUCTION OF ROTOR BLADES WITH TWIST-BEND-COUPPLING USING INNOVATIVE ONLINE QUALITY ASSURANCE METHODS. Wind Turbine Blade Manufacture 2017, 12-14 December 2017

Task 1.2.1 Aeroelastic Testing – strukturdynamischer Test (Ground Vibration Test) am fertigen Rotorblatt

J. Gundlach and Y. Govers, "Experimentelle Modalanalyse an einem aeroelastisch optimierten Rotorblatt mit Biege-Torsions-Kopplung im Projekt SmartBlades2," in 9. VDI Fachtagung Schwingungen von Windenergieanlagen, Bremen, Germany, 2018, vol. VDI-Berichte Nr. 2324, pp. 91-103: VDI Wissensforum GmbH.

J. Gundlach and Y. Govers, "Experimental modal analysis of aeroelastic tailored rotor blades in different boundary conditions," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1356, p. 012023, 2019/10 2019.

J. Gundlach, J. Knebusch, Y. Govers, and B. Haller, "Model-based displacement estimation of wind turbine blades using strain modal data," in TORQUE 2020, Delft, Netherlands, 2020.

Die Tasks 1.2.3, 1.3.5, 1.3.12 und 1.3.13 dienen der Entwicklung, Fertigung, Integration und Erprobung einer neuartigen Sensorik zur Erfassung des Blatteinstellwinkels nahe der Blattspitze. Das übergeordnete Ziel dieser Tasks war die Messung und Bereitstellung von Einstellwinkeldaten aus der bei NREL durchgeführten Messkampagne.

Montano Rejas, Zhuzhell und Opitz, Steffen und Riemenschneider, Johannes und Werthen, Edgar und Pohl, Martin und Govers, Yves und Gundlach, Janto und Petrovic, Vlaho und Unguán, Robert und Neuhaus, Lars und Balzani, Claudio und Wentingmann, Michael und Haldar, Ayan und Rolfes, Raimund und Bätge, Moritz (2019) SELECTED RESULTS ON THE DEVELOPMENT AND TESTING OF SMART BLADES TECHNOLOGIES FOR WIND TURBINES. In: Proceedings der ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials - SMART 2019, Seiten 102-117. International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). 9th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, ECCOMAS SMART 2019, 08.-11. Jul. 2019, Paris, Frankreich. ISBN 978-84-949194-6-6

Innovationsbericht des Instituts: Opitz, Steffen (2019) Zeigt, dass sich etwas dreht - Felderprobung einer Sensorik für Windkraftrotorblätter

Beitrag auf leichtbau.dlr.de: [https://leichtbau.dlr.de/zeigt\\_sensorik\\_windkraftrotorblaetter](https://leichtbau.dlr.de/zeigt_sensorik_windkraftrotorblaetter)

Task 1.4.3 und 1.4.5 Validierung der Simulations- und Dimensionierungswerkzeuge - Analyse der Anschlusssteifigkeiten

Validation of a 20m wind turbine blade model (wird publiziert, wenn die Messdaten veröffentlicht worden sind)

Utilizing field test calibration data for validation of a 20m wind turbine blade (geplant)

Masterarbeit, R. Ravi: Structural Analysis and Validation of a 20m Wind Rotor Blade Model

Task 1.4.9 FE-Modellanpassung - Computational Model Updating (CMU)

J. Knebusch, J. Gundlach, and Y. Govers, "A SYSTEMATIC INVESTIGATION OF COMMON GRADIENT BASED MODEL UPDATING APPROACHES APPLIED TO HIGH-FIDELITY TEST-DATA OF A WIND TURBINE ROTOR BLADE," in EURO DYN 2020 - XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece, 2020.

Task 1.5.5 Bewertung unkonventioneller Bauweisen

Geplant ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit 1.5.4 (AE, Oliver Hach) zum Thema Last-Struktur gekoppelte Auslegung von Smart Blades mit struktureller Biege-Torsions-Kopplung bei der WESC 2021

Tasks 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6 Rotationsprüfung der flexiblen Hinterkante

Pohl, Martin, and Johannes Riemenschneider. "Konzipierung, Auslegung und Vermessung einer formveränderlichen Hinterkante für ein Windenergie rotorblatt." (2017): 4SmartS 155-165.

Monner, Hans P., et al. "Smart structures for wind energy turbines." 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2017.

Pohl, Martin, and Johannes Riemenschneider. "Designing and testing a flexible trailing edge for wind energy turbine blades." 2018 AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2018.

Riemenschneider, Johannes, et al. "Smart Trailing Edges for Wind Turbines." *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. Vol. 51944. American Society of Mechanical Engineers, 2018.

Pohl, Martin. "Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy blades." WESC (2019).

Pohl, Martin et al.: "Design and Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy turbine blades " 2020 AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2020.

Task 2.4.1 Vorentwurf eines Blattes mit Klappe unter Berücksichtigung der Ruderwirksamkeit

Veröffentlichung geplant: Konferenzbeitrag WESC 2021

Task 2.5.1 Akustische Bewertung Technologie 2

Die Ergebnisse werden auf der WIND TURBINE NOISE 2021, Dublin, sowie auf der WIND ENERGY SCIENCE CONFERENCE 2021, Hannover, publiziert (Abstracts in Arbeit). Darüber hinaus erfolgte ein regelmäßiger Informationsaustausch über den IEA Wind TCP Task 39 „Quiet Wind Turbine Technology“.

Task 2.8.1: Anpassung des Segmentdemonstrators für WK-Versuch

Pohl, Martin et al.: "Design and Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy turbine blades " 2020 AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2020.

Task 3.2.1 Aerodynamisch-kinematischer Entwurf eines passiv adaptiven Vorflügels für ein WEA-Profil

Schmidt, F.N., Wild, J., *Development of a passive-adaptive slat for a wind turbine airfoil*, Wind Energy, Wiley (als Journal Paper eingereicht am 01.09.2020)

Geplante Veröffentlichung: Untersuchung des Öffnungsverhaltens sowie des Antwortverhaltens eines passiv-adaptiven Vorflügels bei Böeneinströmung

Task 3.3.9 Akustische Bewertung Technologie 3

Die Ergebnisse werden auf der WIND TURBINE NOISE 2021, Dublin, sowie auf der WIND ENERGY SCIENCE CONFERENCE 2021, Hannover, publiziert (Abstracts in Arbeit). Darüber hinaus erfolgte ein regelmäßiger Informationsaustausch über den IEA Wind TCP Task 39 „Quiet Wind Turbine Technology“.

Task 4.2.1 Flatterbewertung für SmartBlades

[Konferenzvortrag] „Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools for wind turbines“, Wind Energy Science Conference 2019, Cork, Irland

[Zur Veröffentlichung angenommen] “Wind turbine stability: Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools“, TORQUE 2020, online

Task 4.1.3 Analyse von Subkomponenten

Masterarbeit, A. Mir Determination of local loads for the testing of subcomponents of a wind turbine blade

# Erfolgskontrollbericht

DLR

Zuwendungsempfänger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Förderkennzeichen: 0324032 A
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

Part III: Erfolgskontrollbericht

**Dieser Abschnitt des Abschlussberichts ist vertraulich.**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht
3. Titel Schlussbericht SmartBlades2	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Riemenschneider, Johannes Teßmer, Jan Rose, Michael	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2020
	6. Veröffentlichungsdatum /
	7. Form der Publikation keine
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.</b>  Programmdirektion Energie (PD-E) Linder Höhe, 51147 Köln  Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik (AS) Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA, Federführend) Institut für Flugsystemtechnik (FT) Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig  Institut für Aeroelastik (AE) Bunsenstr. 10, 37079 Göttingen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution /
	10. Förderkennzeichen 0324032 A
	11. Seitenzahl
	12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin
13. Literaturangaben	
14. Tabellen	
15. Abbildungen	
16. Zusätzliche Angaben Part III ist vertraulich zu behandeln	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) S. Hackhofer, Jülich	
18. Kurzfassung In der Windenergiebranche geht der Trend zu immer größeren Rotorblättern, die aufgrund des fluktuierenden und heterogenen Windfeldes sehr starken dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden drei verschiedene Rotorblattkonzepte untersucht, deren Wirkprinzipie darin bestehen, die aerodynamischen Verhältnisse am Rotorblatt durch aktive und passive Mechanismen zu verändern und die Struktur zu entlasten. Nachdem in der Vergangenheit die Demonstration der Machbarkeit durch Subkomponenten-Hardwaretests und der numerische Nachweis der Effizienz von SmartBlade-Methoden im Fokus stand, bestand der Fokus dieses Projektes darin, Smart Blades fullscale zu demonstrieren. So wurden großskalige Tests von Biege-Torsions-Blättern sowie von aktiven Hinterkanten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur Validierung herangezogen und stehen auch nach dem Projekt für Validierungen zur Verfügung. Im Einzelnen wurden folgende Technologien untersucht: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biege Torsions Kopplung</li> <li>• Aktive Hinterkanten / Klappen</li> <li>• Vorflügel</li> <li>• Klebung und Aeroelastische Stabilität</li> </ul>	

19. Schlagwörter Rotorblatt; Rotor; Lastreduktion; Regelung; Passive Regelung; Biege-Torsions-Kopplung; Geometrische BTK; Strukturelle BTK; Aktive Regelung; Aktive Hinterkante; Moveables; Starrer Vorflügel, Adaptiver Slat; Integrierter Vorflügel; Bewertung; Zuverlässigkeit; Demonstrator; Bauform; Fertigung, Anlagentest	
20. Verlag /	21. Preis /

**Anhang B**  
**Schlussbericht Fraunhofer IWES**

# Schlussbericht Fraunhofer IWES

Zuwendungsempfänger Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme	Förderkennzeichen: 0324032 B
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

## Part I: Kurze Darstellung

### 1. Aufgabenstellung

#### 1.1 Gesamtziel

Das Fraunhofer IWES fokussierte sich im Projekt SmartBlades2.0 auf die Untersuchung der passiven Lastreduktionstechnologien auf die Durchführung der experimentellen Untersuchungen im Blattprüfstand, sowie an einer Versuchsanlage mit einem BTK-Rotor. Die Vermessung der sogenannten Biege-Torsions gekoppelten Blätter und die Messdaten dienen als Grundlage für die Validierung der Entwicklungsprogramme für die Technologien aus dem vorhergegangenen Projekt. Weiterhin wurden neue Phänomene die durch die Kopplung entstehen vermessen und im Bereich der strukturellen Auslegung untersucht, um diese in Zukunft berücksichtigen zu können.

Des Weiteren wurden in den Technologien mit aktiver Hinterkantenklappe und Vorflügel die aerodynamischen Effekte für das gesamte Rotorblatt untersucht, um bei der Implementierung der Technologien auf einer Windenergie die Einflüsse der Technologien genau berücksichtigen zu können.

Insgesamt verfolgte das Fraunhofer IWES auch die Gesamtziele,

- Der Demonstration & Erprobung der unterschiedlichen „Smart-Blades“ Technologien, wenn möglich im Freifeld oder an Testständen,
- die Validierung der entwickelten Tools und Methoden, um auf (industrieller) Anwendungsseite ein höheres Maß an „Confidence“ in die Technologien und ihre Auslegung zu erlangen und somit die Chance der wirtschaftlichen Verwertung deutlich zu erhöhen,
- die Weiterentwicklung von Methoden und Teilkonzepten, die sich als besonders relevant und aussichtsreich herausgestellt haben und bei denen noch ein signifikanter Forschungsbedarf besteht und
- Bewertungsaussagen für die sinnvolle Anwendung der untersuchten Technologien zu ermöglichen.

#### 1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen (der Organisation)

Der Bezug der Aufgabenstellung zu den förderpolitischen Zielen des IWES lässt sich im Anhang des Technologie-Berichts finden.

#### 1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele (der Organisation)

Die Ziele des Fraunhofer IWES in dem Projekt sind nicht zu trennen von den Zielen des Gesamtprojekts, insbesondere der realen Evaluation von BTK – Blättern in Blatttests und einem Freifeldexperiment. Zentrale Aufgaben für die Erreichung dieses Ziels wurden vom Fraunhofer IWES übernommen. Dazu gehörten:

- Die Koordination der Arbeiten für die Technologie 1 – der Forschung an BTK-Blättern,
- die Finalisierung und Überwachung des Strukturdesigns an Fertigungsrestriktionen der zu bauenden Blätter,
- der Test eines der gebauten BTK Blätter am Rotorblattprüfstand
- die Erweiterung, Simulation und Adaption des Betriebsführung und Steuerung für die Versuchsanlage mit Demonstrationsblätter,
- die Instrumentierung der Versuchsanlage und der Rotorblätter,
- die Durchführung der Messung im Betrieb der Versuchsanlage und Datenauswertung der Messergebnisse,
- der Vergleich mit Versuchsdaten zur Validierung der Modelle in aeroelastischen und CFD-Simulationen und
- die Untersuchung der Möglichkeiten des Retrofitting an existierenden Windenergieanlagen

Zudem wurden über die BTK-Technologie hinaus noch Ziele in Bezug auf andere Technologien untersucht:

- die Komponentenprüfungen zur Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebverbindung unter komplexer Beanspruchung,
- Aerodynamische Effekte zwischen starrem Blatt und flexibler Hinterkante in Rotation in Technologie 2,
- Effekte instationärer turbulenter Anströmung bei dynamischer Vorderklappe in Technologie 3 und
- eine Reglerstruktur für adaptive Steuerungen.

Ein Schwerpunkt der Zielsetzungen des Fraunhofer IWES lag also in der Vermessung und Überwachung der BTK-Blätter im Projekt. Dies sollte sowohl in Testständen als auch im freien Feld erfolgen. In beiden Fällen sollten sowohl Messungen nach standardisierten Verfahren erfolgen, als auch zusätzliche Informationen gewonnen werden. Damit einhergehend mussten begleitende Arbeiten durchgeführt werden um diese Messungen zu ermöglichen. Dazu gehörten auch Lastrechnungen der Versuchsanlage, welche mit neuen Blättern ausgestattet werden sollte. Durch die genaue Kenntnis der Konstruktion des Blatts zielte insbesondere der Blatttest darauf die bisherigen Methoden auf ihre Eignung für die Validierung von Berechnungsformen zu

überprüfen und ggf. daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, wie Blatttests in Zukunft verbessert werden können, um die Anforderungen der Validierung zu verbessern.

Doch die Zielsetzung war auch allgemeiner gefasst. Denn in dem Projekt ging es vor allem darum die Technologien für „Smarte“, sich selbst regelnde Rotorblätter voran zu bringen. Dies geht einher mit einer Vielzahl von Fragestellungen, die das Fraunhofer IWES im Verbund mit den Projektpartnern verfolgt hat. Zu diesen Themen gehören Fragen, wie solche Blätter in ein Gesamtreglersystem einzubinden sind. In Technologie 2 sollte zu dem eine Auswertung der aerodynamischen 3D-Effekte durch die Existenz von aktiver Hinterkante zur Vermeidung von ungewollten aerodynamischen Lasten erfolgen. Da es sich um ein rotierendes System handelt ist nicht zwangsläufig von der Validität von 2D-Entwurfsansätzen auszugehen. Wie konkret turbulente Anströmung auf Vorderklappen in Technologie 3 reagieren, sollte zudem auch untersucht werden.

Gleichzeitig war das Ziel auch über die konkreten Technologien hinaus zu schauen und im Retrofitting durch einen Strukturentwurf für Blattverlängerungen zum Nachrüsten bestehender Anlagen der 1.5MW-Klasse andere Entwicklungen zu ermöglichen. Diese bietet Betreibern die Möglichkeit der Ertragsteigerung. Eine Feldmontage der entsprechenden Bauteile ist wirtschaftlicher als das deutlich aufwendigere Repowering des Windparks. Die Steigerung der überstrichenen Rotorfläche generiert zusätzliche Belastungen der Rotorblätter. Diese könnte durch geometrische Biege-Torsions-Kopplung der Blattverlängerung (Sweep) minimiert werden.

Abgesehen von den einzelnen Arbeiten gehört auch das Zusammenspiel der Arbeiten an einer eigenen gemeinsamen Blattproduktion mit allen Partnern zu einem wichtigen technischen Ziel. Erst durch den Gesamtprozess konnte deutlich werden, welche praktischen Schwierigkeiten auftreten können und wie diese zu bewältigen sind. Hier hat das Fraunhofer IWES maßgeblich durch die Finalisierung und Überwachung des Strukturdesigns an der weiteren Entwicklung im Projekt beigetragen.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben bei der jeweiligen Organisation durchgeführt wurde

Bereits im SmartBlades Projekt konnten die Potentiale der einzelnen Technologien für die Windenergieanlagen hervorgehoben werden. Es wurde gezeigt: Die Reduzierung von Lasten oder die Erhöhung der aerodynamischen Charakteristiken des Rotors können Materialeinsparungen am Gesamtsystem der WEA, sowie Ertragssteigerungen erzielt werden. Beide Punkte ergeben eine Reduktion der Energieerzeugungskosten und wirken sich positiv für den zukünftigen Ausbau der erneuerbaren Energien aus. Das Fraunhofer IWES konzentriert bei dieser Forschung auf die Technologie 1 mit passiver Lastreduktion, führt aber auch ergänzende Arbeiten in anderen Technologien aus, basierend auf den Kompetenzen des Instituts.

In Technologie 1 sollte eine Marktreife erreichen und somit einen unmittelbareren Anschluss der Technologie an die Windbranche ermöglicht, so dass bereits nach Abschluss des Projekts die Einführung der Technologie in die Industrie möglich wird. Um das wirtschaftliche und technische Risiko zu minimieren und den Technologietransfer zu sichern wurden die Aspekte der Fertigung, Installation, Betrieb und Validierung in enger Zusammenarbeit mit den industriellen Projektpartnern durchgeführt.

Als Grundlage für die Untersuchung der Technologie 1 diente das in SmartBlades entwickelte Demonstrationsblatt mit 20m Länge. Wesentliche Teile der im Projekt erfolgten Forschung basieren auf Know-How und Infrastruktur, welches zuvor am Fraunhofer IWES aufgebaut wurde. Dazu zählen Know-How in der Vermessung von Windenergieanlagen und das Testen von Rotorblättern. Die Ergebnisse besonders zum dreidimensionalen Vorformungsverhalten und der strukturellen Eigenschaften konnten ab 2018 auch von den Industriepartnern weiterverwendet werden.

Aufgrund der Erfahrung in der Analyse bestehender Anlagen und Blätter wurden mögliche Retrofittings von aktuellen Bestandsanlagen mit Biege-Torsions gekoppelten Blättern untersucht. Dies kann eine große Anzahl bereits installierter Anlagen durch die passive Lastenreduktion effektiver gestalten und somit einen höheren Energieertrag durch höhere Leistungswerte oder längere Lebensdauer zu erzielen. Durch das Retrofitting ergibt sich ein großes Potential zur Erschaffung von Arbeitsplätzen durch Dienstleister, die sich auf die Anbringung ebendieser Technologie spezialisieren kann. Eine Verwertung wurde ab dem Ende des Projekts erwartet.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens bei der jeweiligen Organisation

Der Ablauf des Projekts erfolgte nach dem festgelegten Ablaufplan, der im Verlauf des Projekts an die Begebenheiten neu angepasst wurde. Zudem war das Projekt in verschiedene Aufgaben (Tasks) aufgeteilt. Das Fraunhofer IWES beteiligte sich an folgenden Tasks:

Task Nr.	Task - Titel
1.0.0	Projektkoordination in Technologie 1
1.1.4	Finalisierung und Überwachung des Strukturdesigns an Fertigungsrestriktionen
1.2.2	Test eines BTK-Blattes am Prüfstand
1.3.1	Erweiterung, Simulation und Adaption des Supervisory Controls für die Versuchsanlage mit Demonstrationsblättern
1.3.4	Instrumentierung der Versuchsanlage und der Rotorblätter
1.3.10	Durchführung der Messung im Betrieb der Versuchsanlage und Datenauswertung
1.4.2	Aeroelastische Simulationen; Vergleich mit Versuchsdaten zur Validierung der Modelle

1.4.8	Validierung von Methoden zur Simulation von instationären Effekten der Pitchregelung auf die Aerodynamik
1.5.2	GBTC Retrofitting
2.4.6	Aerodynamische Effekte zwischen starrem Blatt und flexibler Hinterkante in Rotation
3.1.4	Untersuchung der Effekte instationärer turbulenter Anströmung bei dynamischer Vorderklappe
4.1.4	Komponentenprüfungen zur Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebverbindung unter komplexer Beanspruchung
4.3.1	Regler Struktur für Adaptive Control
TZ-A2	Schwerpunktverteilung des Testblattes
TZ-C1	Projektkoordination – Technologie 1

#### 4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen

Der Stand der Wissenschaft an den das Projekt anknüpfte und technische Entwicklungen, die außerhalb des Projekts während dessen Laufzeit aufkamen sind in den Berichten der jeweiligen Technologien aufgeführt (siehe Anhang I)

Technologie 1 -> Siehe bitte Kapitel 2.3

Technologie 2 -> Siehe bitte Kapitel 3.3

Technologie 3 -> Siehe bitte Kapitel 4.3

Zu übergreifenden Themen -> Siehe bitte Kapitel 5.3

#### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Innerhalb des Projekts ergab sich eine enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Projektpartnern. Doch das Projekt erforderte auch zusätzliche intensive Zusammenarbeiten. So wurde das Design des Blatts durch die externe Firma Aerodynamic Consult in einem Auftrag überprüft und intensiv diskutiert. Eine weitere intensive Zusammenarbeit gab es zudem mit dem NREL in den USA an dessen Anlage die Messkampagne stattfand.

Part II: Eingehende Darstellung

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

Die im Antrag gesetzten Ziele wurden im Wesentlichen erreicht, auch wenn manche Ziele nicht vollumfänglich erreicht werden konnten. Eine eingehende Beschreibung der Ergebnisse befindet sich im Anhang des Technologie-Berichts.

Eine zusammenfassende Beschreibung der Ergebnisse lässt sich im Erfolgskontrollbericht, Part III-52 finden. Abweichungen von der Planung fanden sich vor allem in den folgenden Tasks:

- Task 1.2.2 bzw. TZ-A2: Um die Modalanalyse der Blätter zu verbessern wurde im Aufstockungsantrag eine erneute Wiegung des getesteten Blatts in Subkomponenten vorgenommen. Diese war ursprünglich nicht vorgesehen erwies sich jedoch als sehr hilfreich.
- In Task 1.3.1 war es am Ende nicht möglich die korrekte Funktion des entworfenen Reglers in den Messkampagnendaten zu überprüfen. Durch den Getriebeschaden und damit einhergehenden Abbruchs der Messkampagne lagen für eine sinnvolle Überprüfung am Ende zu wenig Daten vor.
- In Task 1.3.4 wurde das aerodynamische Messsystem sowie die DMS-Instrumentierung des Anwendungszentrums für Windenergie-Feldmessungen konnten wie geplant installiert, plausibilisiert und kalibriert. Allerdings konnte die Plausibilisierung der Blattspitzensensorik sowie die Kalibrierung des Systems BladeVision wegen technischer Schwierigkeiten nicht vollständig abgeschlossen werden.
- In Task 1.3.10 wurde festgestellt, dass aufgrund von unerwartet hohen Schallemissionen des aerodynamischen Messsystems, die mutmaßlich von den an der Vorderkante von Blatt Nr. 3 der CART3 Forschungsanlage installierten aerodynamischen 5-Loch-Sonden emittiert werden, die Durchführung dieser Schallmessungen nicht mehr zweckmäßig sei. Die Schallmessungen wurden insofern nicht durchgeführt. Während dem Berichtszeitraum standen nicht ausreichend Messdaten für die Erstellung von Berichten gemäß IEC 61400-12 und -13 zur Verfügung.
- Für Task 1.4.2 hatte dies zur Auswirkung, dass die Validierung der Lastrechnungen nur eingeschränkt möglich waren. Daher konnten auch aus der Freifeld-Kampagne keine Schritte zur Anpassung des Modells gewonnen werden. Vor dem Hintergrund wurde das Strukturmodell auf Basis der Daten des Prüfstandsversuchs validiert.
- Task 1.4.8 konnte die umfassende Validierung nicht durchführen, da durch den Abbruch der Messkampagne die Menge an Daten deutlich reduziert war. Es wurde sich deshalb auf eine Validierung in bestimmten Lastfällen beschränkt.

- Task 1.5.2 konnte die Modellvalidierung nur für die quasi-statische nicht aber für die zyklische Belastung durchführen, da ein Lastrahmen aufgrund von fertigungsbedingten Einflüssen der Ermüdungsbeanspruchung nicht standhielt. Daraufhin wurden alternative Lastrahmenkonzepte untersucht.

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die veranschlagten Sachmittel und Personalmittel wurden größtenteils planmäßig eingesetzt. Kleine Abweichungen ergaben sich durch das etwas geschrumpfte Reisebudget, durch den Abbruch der Messkampagne, wodurch wiederum ein etwas höherer Aufwand an Personalkosten entstand, um die geringen Datenmengen doch für Validierungen verwerten zu können. Der größte Teil der Kosten wurde auf die Positionen „Personal“ und „technische Anlagen“ aufgeteilt. Die Personalkosten des IWES belaufen sich auf ca. 3.380.000 EUR. Die Sachkosten für Material, Reisen, Investitionen, Fremdleistungen etc. beliefen sich auf den Gesamtbetrag von ca. 560.000 EUR. Den genauen Nachweis der verwendeten Mittel bitten wir dem Schlussverwendungsnachweis zu entnehmen.

## 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie unter II.1 beschrieben wurden die geplanten Arbeiten durchgeführt und waren zur Erreichung der Ziele notwendig und angemessen. Auch wenn aufgrund des Abbruchs der Messkampagne nicht alle Ziele so erreicht werden konnten, wie geplant, so wurde dennoch ein Umgang mit den veränderten Bedingungen gefunden, die Arbeit geleistet, um damit noch die gesteckten Ziele zu erreichen.

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

Wegen der Vielfältigkeit der Arbeiten in dem Projekt, sind auch die Verwertungsmöglichkeiten groß und in der Projektbeschreibung nur sehr verkürzt dargestellt. Vor diesem Hintergrund sei im Sinne der Fortschreibung des Verwertungsplans hier dargestellt, welche weiteren Formen der Verwertung in den einzelnen Tasks erwartet werden.

Die Finalisierung und Überwachung des Designs des Rotorblatts in Zusammenhang mit einer professionellen externen Firma in **Task 1.1.4** hat einen Abgleich zwischen dem Stand der Forschung und der Arbeitsweise professioneller Blattentwickler ermöglicht. Die Erfahrung aus dem Task kann nun in weitere Entwicklungen, insbesondere für die automatisierte Fertigung von Rotorblättern einfließen.

In **Task 1.2.2** wurde das BTK-Blatt am Teststand des Fraunhofer IWES im herkömmlichen Testverfahren untersucht. Durch das eigene Blattdesign und dem Vorhanden sein, aller Daten des Blatts, ermöglicht der Test nun verschiedenste Strukturanalysen auf numerischer Basis an den gewonnenen Daten in Zukunft zu untersuchen. Da die Daten öffentlich zur Verfügung gestellt wurden, ist dies auch der Industrie für Fragen, die sich auf dieses Blatt beziehen aus dem Projekt möglich, ohne selbst aufwendige Tests durchführen zu müssen.

Für **Task 1.3.1** liegt der voraussichtliche Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans Das im Rahmen des Projekts entwickelte effiziente modale Strukturmodell für Rotorblätter wurde im Rahmen einer Verifikation überprüft und gegenüber den Messdaten teilweise validiert. Dies versetzt uns/das IWES in die Lage, unseren Kunden und/oder Projektpartnern belastbare Simulationsergebnisse anbieten zu können. Insbesondere für einen Hardware-in-the-Loop-Betrieb im Rahmen der zahlreichen Prüfaktivitäten des Fraunhofer IWES ist dies ein wichtiger Fortschritt für zukünftige Aktivitäten

In **Task 1.3.4** wurden die Blätter für den Feldversuch instrumentiert und die Ergebnisse in **Task 1.3.10** ausgewertet. Die darin gemachten Erfahrungen in der Messtechnik und Methodik stehen nun für weitere Projekte der Windenergiebranche zur Verfügung. Dies ist insbesondere in Bezug auf die Vermessung der BTK-Eigenschaft der Blätter von großer Bedeutung, da die Torsion eine zunehmende Bedeutung in der Auslegung der Blätter hat.

Die im Rahmen des Projekts implementierte Vorbiegung des modalen Strukturmodells für Rotorblätter wurde in **Task 1.4.2** im Rahmen einer Verifikation überprüft und gegenüber den Messdaten teilweise validiert. Dies versetzt uns/das IWES in die Lage, unseren Kunden und/oder Projektpartnern belastbare Simulationsergebnisse anbieten zu können. Insbesondere für einen Hardware-in-the-Loop-Betrieb im Rahmen der zahlreichen Prüfaktivitäten des Fraunhofer IWES ist dies ein wichtiger Fortschritt für zukünftige Aktivitäten.

Auch wenn nicht alle gewünschten Fälle in **Task 1.4.8** zur Validierung herangezogen werden konnten, so konnte mit der Validierung von Einzelfällen doch die Relevanz in der Kopplung von Strömung und Regelung untersucht und überprüft werden. Die Validität des Ansatzes erlaubt nunmehr auch gegenüber industriellen Partnern eine Nutzung der Technologie mit hoher Validität. Damit werden hochauslösende Verfahren für die Industrie nutzbarer und verwertbarer.

**Task 1.5.2** ermöglicht es dem Fraunhofer IWES in Zusammenarbeit mit Betreibern von Windparks bei Bestandsanlagen einen quantitativen Vergleich zwischen Ertragsgewinn durch Blattspitzenverlängerung im Vergleich zum Weiterbetrieb durchzuführen und somit den Ertrag von Bestandsparks optimal auszunutzen.

Die Untersuchung der Strömungseffekte von rotierenden Rotorblättern mit flexiblen Hinterkanten in **Task 2.4.6** hatte vor allem den Zweck, unerwünschte aerodynamische Nebeneffekte durch die Rotation auszuschließen. Während flexible Hinterkanten oder Klappen meist nur zweidimensional in der Aerodynamik eingerechnet werden, hätte ein Rotationseffekt ungewünschte 3D Strömungen zeitigen können, welche sich negativ auf das Verhalten ausgewirkt hätten. Dies konnte mit den erfolgten Rechnungen ausgeschlossen werden. Eine Verwertung erfolgt daher im Rahmen der weiteren Nutzung von flexiblen Hinterkanten.

Vorderklappen, insbesondere dynamische Vorderklappen, zielen darauf den sogenannten linearen Bereich der Kraftkurven von Rotorblattprofilen zu verlängern und Strömungsabriss zu vermeiden. Da der Wind generell turbulent ist, kommt es bei Windenergieanlagen immer zu Schwankungen im Anstellwinkel, was zu genau solchen Abrissen führen kann. In **Task 3.1.4**

Wurde daher die Auswirkungen von turbulenter Anströmung auf die Aerodynamik von Profilen mit dynamischem Vorflügel verglichen mit der in einer laminaren Anströmung. Dabei wurde wesentliche Entwicklungen zur Generierung kleinskaliger Turbulenzfelder in numerischen Strömungssimulationen gewonnen. Zudem konnten Erkenntnisse über die Auswirkung turbulenter Strömung in der Aerodynamik gewonnen werden. Diese Ergebnisse sollen nun in Folgeprojekten, wie z.B. HighRe, verwertet werden. Die Komponentenprüfungen zur Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebverbindungen unter komplexer Beanspruchung in **Task 4.1.4** hat zu einer Weiterentwicklung der Testmöglichkeiten von Klebverbindungen für Rotorblätter geführt, welche im Weiteren für Forschungsprojekte aber auch der Industrie für Untersuchungen von neuen Materialien bei der Verklebung und neuen Ansätzen zur Verfügung steht.

In **Task 4.3.1** wurde eine Regelung für eine Windenergieanlage mit BTK-Blättern entwickelt und an der Testanlage implementiert. Da BTK-Blätter den Regelungsbedarf von Windenergieanlagen reduzieren, bietet eine spezielle Regelung für solche Blätter große

Vorteile. Die Strategien wurden mit der Industrie diskutiert und die Erkenntnisse aus dem Konzept werden in Zukunft in der Regelung von Windenergieanlagen mit BTK-Blättern voraussichtlich zum Tragen kommen.

Im zusätzlichen Task **TZ-A2** wurde das im Teststand getestete Rotorblatt in Segmente zersägt und gewogen. Dies erlaubte den Validierungsrechnungen für die strukturellen Simulationen des Blattes, die Unsicherheiten in der Masseverteilung deutlich zu reduzieren. Der Task hat also primär anderen Tasks zugearbeitet.

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

Die Forschung in dem Projekt erfolgt nicht isoliert. Vielmehr ist die Entwicklung von Smarten Rotorblättern ein Gegenstand der weltweiten Forschung in der Windenergie. Vor diesem Hintergrund sind dem ZE bekannt gewordenen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen in der folgenden Liste erläutert:

- Task 1.1.4: Die Empfehlungen von dem Bericht DNVGL-ST-0376 von DNV-GL wurden betrachtet, um die Dokumentation der Fertigungsprozess zu erstellen.

- Task 1.2.2: Durchführung der Ganzblatttests gemäß Zulassungs-Richtlinie für Rotorblätter (DNVGL-ST-0376 und IEC 61400-23).

- Task 1.3.4-10: In einer Fachpublikation [Alexander R. Stäblein, Morten H. Hansen, Georg Pirrung, 2017, "Fundamental aeroelastic properties of a bend-twist coupled blade", Journal of Fluids and Structures, Ausgabe 68, Seiten 72-89] wurden mit einem numerischen Modell die Auswirkungen von Biege-Torsions-Kopplung auf die modalen Blatteigenschaften untersucht. Diese Publikation lieferte insofern Hinweise auf Interpretationsmöglichkeiten der Messergebnisse. Zudem publizierten Meng et al. In Meng, H., Lien, F. S., Glinka, G., & Geiger, P. (2019). Study on fatigue life of bend-twist coupling wind turbine blade based on anisotropic beam model and stress-based fatigue analysis method. Composite Structures, 208, 678-701 Berechnungen zu Ermüdungslasten bei BTK-Blättern. Dies lehnt sehr an die gemachten Arbeiten an und die Publikation stellt eher eine Möglichkeit von Vergleichsrechnungen dar. Ähnliche Arbeiten zur strukturellen Auslegung von BTK-Blättern gabe es noch von Bagherpur et al. Bagherpour, T., Li, X. M., Manolas, D. I., & Riziotis, V. A. (2018). Modeling of material bend-twist coupling on wind turbine blades. Composite Structures, 193, 237-246 und Untersuchungen zu Flutter von Zhou et al. Zhou, X., Huang, K., & Li, Z. (2018). Effects of bend-twist coupling on flutter limits of composite wind turbine blades. Composite Structures, 192, 317-326 und Shakya et al. (Shakya, P., Sunny, M. R., & Maiti, D. K. (2019). A parametric study of flutter behavior of a composite wind turbine blade with bend-twist coupling. Composite Structures, 207, 764-775.). All diese Arbeiten warden als ergänzend betrachtet, hatten jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf den Projektverlauf oder die Verwertung,

- In Task 2.4.6 hat DTU eine Untersuchung über ein Freifeld-Experiment veröffentlicht mit einer sich verformenden Hinterkante an einem Ein-Blatt-Teststand: Ai, Q., Weaver, P. M., Barlas, T. K., Olsen, A. S., Madsen, H. A., & Andersen, T. L. (2019). Field testing of morphing flaps on a wind turbine blade using an outdoor rotating rig. Renewable Energy, 133, 53-65. Allerdings handelte es sich dabei um ein homogenes Blattsegment, so dass eine Untersuchung der Übergänge zwischen der sich verformenden Hinterkante zu dem Rest des Blattes, wie in Task 2.4.6 vorgesehen, in dem Feldtest nicht möglich war.

#### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Siehe Publikationsliste im Anhang.

# Erfolgskontrollbericht

## Fraunhofer IWES

Zuwendungsempfänger Fraunhofer – Institut für Windenergiesysteme	Förderkennzeichen: 0324032 B
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 52 Monate	
Berichtszeitraum: 01.06.2016 bis 30.09.2020	

Part III: Erfolgskontrollbericht

**Dieser Abschnitt des Abschlussberichts ist vertraulich.**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht
3. Titel Schlussbericht SmartBlades2	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Stoevesandt, Bernhard	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2020
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation keine
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.</b>  Zentral Verwaltung, B6 Forschungs- und Entwicklungsverträge Hansastraße 27c, 80686München Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0324032 B
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) S. Hackhofer, Jülich,	
18. Kurzfassung Der Trend zu größeren Rotorblättern und neuen Möglichkeiten sie leicht und flexibel zu bauen bedingt den Bedarf nach Regelungsmöglichkeiten der Blätter selbst. Vor diesem Hintergrund wird global an Blättern geforscht, die sich selbst regeln können – sogenannten Smart Blades. Im Projekt Smart Blades 2 wurden die Möglichkeiten in Bezug auf drei Technologien deutlich ausgebaut. In der Biege-Torsions-Kopplung (BTK) konnte ein Blatt entwickelt, gebaut, im Teststand getestet und im Freifeld an einer Anlage vermessen werden. Damit wurde es erstmal möglich in einem öffentlichen Projekt die gesamte Prozesskette für BTK Blätter zu durchlaufen und zu untersuchen, Codes zur Berechnung zu validieren und die Eignung der Methode für den industriellen Einsatz zu überprüfen. Alternativ wurden für existierende Anlagen Retrofits der Blätter untersucht. Die Eignung von Hinterkantenklappen und Vorflügel wurde grundlegender betrachtet und verschiedene offene Fragenstellungen untersucht. Bei Klappen wurden bspw. die Strömungseigenschaften im rotierenden System betrachtet, bei Vorflügel die Eigenschaften bei turbulenter Anströmung.	
19. Schlagwörter Rotorblatt; Rotor; Lastreduktion; Regelung; Passive Regelung; Biege-Torsions-Kopplung; Freifeld Messung; Blatttest; Retrofitting; Materialprüfung; Komponentenprüfung; MoWiT, Modelica Library; OpenFOAM; Aktive Regelung; Moveables; Starrer Vorflügel; Adaptiver Slat; Integrierter Vorflügel; Bewertung; Zuverlässigkeit; Referenz, Referenzanlage, Referenzrotorblatt; Demonstrator.	
20. Verlag	21. Preis

## **Anhang C**

### **Schlussbericht ForWind Hannover (FW-H)**

# Schlussbericht ForWind Hannover

Zuwendungsempfänger ForWind Hannover (FW-H), Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH)	Förderkennzeichen: 0324032C
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 49 Monate	
Berichtszeitraum: 01.09.2016 bis 30.09.2020	

## Part I: Kurze Darstellung

### 1. Aufgabenstellung

#### 1.1 Gesamtziel

FW-H verfolgte die folgenden übergeordneten Projektziele:

- Demonstration & Erprobung der unterschiedlichen Smart-Blades-Technologien, wenn möglich im Freifeld oder im Windkanal
- Validierung der entwickelten Tools und Methoden, um auf (industrieller) Anwendungsseite ein höheres Maß an Vertrauen in die Technologien und ihre Auslegung zu erlangen und somit die Chance der wirtschaftlichen Verwertung deutlich zu erhöhen
- Weiterentwicklung von Methoden und Teilkonzepten, die sich im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ als besonders relevant und aussichtsreich herausgestellt haben und bei denen noch ein signifikanter Forschungsbedarf besteht
- Bewertungsaussagen für die sinnvolle Anwendung der untersuchten Technologien

Bezogen auf die einzelnen Technologien ergibt sich dabei:

- Technologie 1: Ziele sind die Demonstration der Funktionsfähigkeit von passiven Smart Blades auf Rotorebene (20m Blattlänge), die Validierung von Tools zur Auslegung gekoppelter Blätter und das Aufzeigen weiterer Potenziale passiver Blatt-Technologien.
- Technologie 2: Ziele sind die Demonstration der Funktionsfähigkeit von aktiven Smart Blades mit flexibler Hinterkante auf Segmentebene, die Validierung von Tools zur Auslegung flexibler Hinterkanten und der Vorentwurf eines Blattes mit flexibler Hinterkante.
- Technologie 4: Ziele sind die Entwicklung von Methoden für übergreifende Aspekte, die ein hohes Maß an Bedeutung für alle untersuchten Smart-Blades-Technologien haben, wie z.B. Berechnungsmodelle inkl. experimenteller Validierung für Klebnähte, aeroelastische Stabilität sowie eine umfassende Bewertung aller Technologien.

#### 1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen (der Organisation)

Ausführungen zum Bezug zu den förderpolitischen Zielen des Gesamtprojekts, dem sich auch dieses Teilvorhaben unterordnete, ist im Technologiebericht (Anhang I) in Kapitel 1 zu finden.

#### 1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele (der Organisation)

Das Teilvorhaben von FW-H verfolgte folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele:

- Validierung eines am Institut für Windenergiesysteme entwickelten Tools namens MoCA (Model Creator and Analyzer) zur Generierung von 3D-Finite-Elemente-Modellen in ANSYS und der Analyse der Simulationsergebnisse (AP 1.4)
- Untersuchung schraubenförmiger Stringerschalen zur Erzeugung einer gezielten BTK und Ableitung einer Aussage zur Wirksamkeit des Konzepts (AP 1.5)
- Validierung, Implementierung und Test eines in "SmartBlades" entwickelten aerodynamischen Modells zur Beschreibung von Klappenbewegungen in BEM-Codes (AP 2.2)
- Numerische Begleitung von Ermüdungsversuchen eines Hinterkanten-Demonstrators mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (AP 2.3)
- Abschätzung des durch Hinterkantenklappen erzeugten Zusatzschalls bei Windenergieanlagen durch konsequente Weiterführung der Aktivitäten im Vorgängerprojekt "Smart Blades" unter Einbeziehung avancierter Simulationen (AP 2.5)
- Implementierung eines aeroelastischen Modells (Fluid-Struktur-Interaktion mit detaillierten 3D-Finite-Elemente-Modellen und einer vereinfachten Aerodynamik) in einen Finite-Elemente-Modellgenerator aus "Smart Blades" und Durchführung von Spannungsanalysen und -nachweisen bei der Vorauslegung eines Blatts mit integrierter flexibler Hinterkante (AP 2.4)
- Entwicklung einer Methodik für den Entwurf multistabiler flexibler Hinterkantenstrukturen (AP 2.7)
- Implementierung einer adaptiven global-lokal-Modellierung in MoCA und Ableitung von Aussagen über das Tragverhalten von Klebnähten, auch unter Berücksichtigung prozessbedingter Materialeigenschaften und Imperfektionen (AP 4.1)

- Aufdecken von Abhängigkeiten der aeroelastischen Stabilität von Modellansätzen durch einen umfassenden Code-to-Code-Vergleich mit Verbundpartnern und Ableitung von Modellierungsempfehlungen für herkömmliche und intelligente Rotorblätter (AP 4.2)
- Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Technologien unter Anwendung eines in "Smart Blades" entwickelten Bewertungsmodells (AP 4.4)

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben bei der jeweiligen Organisation durchgeführt wurde

FW-H hat Mitglieder aus den Fakultäten für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Elektrotechnik und Informatik sowie Maschinenbau und bündelt damit Kompetenzen der kompletten Bandbreite des Ingenieurwesens. Alle Institute mit Rotorblatt-relevanten Aktivitäten waren an diesem Projekt beteiligt. Dies waren das Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik (TFD), das Institut für Statik und Dynamik (ISD) sowie das Institut für Windenergiesysteme (IWES). Es wurden insbesondere Kompetenzen in den Feldern Aerodynamik (TFD), Aeroakustik (TFD), Aeroelastik (IWES, TFD), Rotorblattentwurf (IWES), Strukturmechanik (ISD, IWES), numerische Simulation im Bereich FEM (ISD, IWES) und CFD/CAA (TFD) sowie Systemverständnis des Systems Windenergieanlage (IWES) in das Projekt integriert.

FW-H verfügt über die fachliche Expertise hinaus über eine hervorragende Infrastruktur: Modernste Rechnerarchitekturen, Zugriff auf den Hochleistungs-Rechencluster des Rechenzentrums (LUI) und kostengünstige Lizenzen hochwertiger Softwarepakete boten den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern optimale Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens. Durch die enge Kooperation innerhalb von ForWind, aber auch innerhalb des Forschungsverbunds Windenergie mit Fraunhofer IWES und DLR, ist ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch auf höchstem wissenschaftlichem Niveau und die Nutzung von Synergien für die Forschungsarbeit möglich, was im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ unter Beweis gestellt wurde. In diesem Projekt wurden grundlegende und fundamentale Vorarbeiten durchgeführt. Diese stellten eine hervorragende Basis und Grundvoraussetzung für die Bearbeitung des Projekts „SmartBlades2“ dar.

Die Labormessungen in Task 4.1.8 wurden in den Räumlichkeiten des Fraunhofer IWES in Bremerhaven durchgeführt, was durch die enge Verbindung zwischen Fraunhofer IWES und FW-H-IWES ermöglicht wurde. Daher konnte auf die dort vorhandene hervorragende Infrastruktur zurückgegriffen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass FW-H über das notwendige Knowhow, die Infrastruktur und die Erfahrungen in der Durchführung koordinierter Verbundforschungsvorhaben verfügt, die zur Durchführung des Vorhabens erforderlich waren. Die Vernetzung mit der Lehre in den Bereichen Windenergie-Ingenieurwesen, Maschinenbau, Energietechnik, Bauingenieurwesen und Computergestützte Ingenieurwissenschaften bietet zusätzlich die Möglichkeit der Integration von Forschungsergebnissen in die Ausbildung der nächsten Ingenieurgenerationen.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens bei der jeweiligen Organisation

In Task 4.2.2 (Weiterentwicklung von Flatter-Analyse-Methoden) waren Anpassungen im Arbeitsplan erforderlich, die mit dem PTJ 2018 abgestimmt wurden. Begründet war dies durch einen deutlich erhöhten Arbeitsaufwand in der Erstellung eines Anlagenmodells in OpenFAST, da die Dokumentation der Referenzanlage aus „Smart Blades“ zahlreiche Fehler und Inkonsistenzen aufwies. Auch die Untersuchung der aeroelastischen Stabilität für das Referenzblatt erforderte einen deutlich erhöhten Arbeitsaufwand, da für einen validen Abgleich der verschiedenen Tools, die von den am Code-to-Code-Vergleich beteiligten Partner eingesetzt wurden, zahlreiche numerische Vorabtests durchgeführt werden mussten, die so im Antrag nicht geplant waren. Daher konnten die Subtasks 4.2.2.2 (Entwicklung einer Energiemethode zur Detektion einer aeroelastischen Instabilität), 4.2.2.6 (Bestimmung von Unsicherheiten) und 4.2.2.7 (Probabilistische Erfassung kritischer Zustände) nicht mehr bearbeitet werden.

Ansonsten erfolgte das Projekt gemäß (angepasstem) Zeit- und Arbeitsplan.

## 4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen

Technologie 1: Die Ausführungen können dem Kapitel 2.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

Technologie 2: Die Ausführungen können dem Kapitel 3.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

Technologie 3: Bei FW-H gab es keine Aktivitäten in Technologie 3.

Technologie 4: Die Ausführungen können dem Kapitel 5.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

In vielen Tasks wurde intensiv mit Partnern des Konsortiums zusammengearbeitet. In den Tasks 1.4.1, 4.1.5 und 4.1.8 gab es eine enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWES. In Task 2.2.1 wurde mit FW-OL zusammengearbeitet. In den Tasks 2.3.3, 2.4.2, 2.4.3, 2.5.2 und 2.7.1 wurde mit dem DLR kooperiert. Die Abarbeitung des Tasks 4.1.8 fand in den Laboren des Fraunhofer IWES statt. In Kooperation mit dem DLR in Task 4.1.8 konnten Temperaturmessungen bei der Blattverklebung ermittelt werden, welche als Input für die Modellierung verwendet wurden. In Task 4.2.2 wurde eng mit dem DLR, Nordex und Senvion zusammengearbeitet. In Task 4.4.1 gab es insbesondere Interaktionen mit Suzlon und WRD, aber auch mit allen anderen Industriepartnern. Über das Konsortium hinaus gab es keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Part II: Eingehende Darstellung

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

Die eingehende Darstellung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele, wird im Folgenden taskweise vorgenommen.

#### Task 1.4.1: Validierung des Tools MoCA

Das Ziel dieses Tasks war die Validierung des am Institut für Windenergiesysteme entwickelte Tool zur automatisierten Erzeugung von 3D-Finite-Elemente-Modellen für Rotorblätter (MoCA – Model Creation and Analysis Tool) anhand experimenteller Daten. Dazu sollten die Prüfstandsversuche aus Arbeitspaket 1.2 herangezogen werden.

In der Modellbildung wurden fertigungsinduzierte Imperfektionen berücksichtigt (aus der Dokumentation der Fertigung und aus eigenen Messungen der Querschnitte des nach den Tests zersägten Blatts). Die statischen Durchbiegungen wurden in Form von Biegelinien (Biegung und Torsion) ausgewertet und mit den Versuchsergebnissen verglichen. Ebenso wurden die Dehnungen an den Stellen, wo im Versuch Dehnmessstreifen angebracht waren, ausgewertet. Für die Dynamik des Blatts wurden Eigenfrequenzen und Moden berechnet (frei-frei und eingespannt gelagert) und mit Versuchsdaten abgeglichen. Die Übereinstimmung war im Wesentlichen zufriedenstellend. Eine Ausnahme bildet Torsion, die mit Schalen-Modellen nicht adäquat abgebildet werden kann.

Insgesamt wurde das Taskziel im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Sachmittel und Personal wurden ausgeschöpft. Eine Journal-Veröffentlichung zur Validierung von MoCA ist bereits vorbereitet und steht unmittelbar vor der Einreichung (OpenAccess-Publikation wird angestrebt).

#### Task 1.5.1: Stringerschalen für Biege-Torsions-Kopplung

Ziele des Tasks waren das Aufzeigen des Potenzials von Stringer-Schalen zur Erzeugung einer gezielten Biege-Torsions-Kopplung und die Ermittlung des Potenzials von Stringer-Schalen zur Gewichtsreduktion von Rotorblättern.

Schraubenförmig angeordnete Stringer auf der Innenseite der Schalen-Paneele wurden mit Hilfe eines verschmierten Modells (virtuelle Zusatzschicht in den Schalen mit gleicher resultierender Dehn- und Biegesteifigkeit wie diskret aufgebrachte Stringer) in MoCA implementiert. Die Wirksamkeit des Stringerschalenkonzepts im Hinblick auf Biege-Torsions-Kopplung und Beulfestigkeit wurden im Rahmen von Sensitivitätsstudien analysiert. Dazu wurden zahlreiche Entwurfsparameter der Stringer variiert, wie z. B. die geometrischen Abmessungen, der Abstand untereinander oder der strukturelle Lageraufbau der Stringer. Grundsätzlich kann eine Biege-Torsions-Kopplung durch schraubenförmig Stringer-versteifte Blattschalen erzeugt werden. Auch die Beulfestigkeit der Schalen steigt, was allerdings nur dann einen tatsächlichen Nutzen bringt, wenn Schalenbeulen dimensionierend ist.

Es wurden über die in MoCA implementierte Schnittstelle zu BECAS Balkenmodelle des Blatts mit integrierten Stringern erzeugt, in ein HAWC2-Modell der Referenzanlage integriert und damit Anlagensimulationen durchgeführt. Es konnte eine geringe Reduktion der aerodynamischen Lasten erzeugt werden. Allerdings ist das Potenzial zur Gewichtsreduktion der Blätter beschränkt, da die Stringer selbst mit erheblichen Zusatzmassen einhergehen. Die Ergebnisse geben erste Hinweise auf die Wirksamkeit der Methode. Für ein finales Fazit sind ggf. darauf aufbauende Arbeiten erforderlich.

Die Taskziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Sachmittel und Personal wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.2.1: Validierung eines Klappenmodells für aeroelastische Simulationen von Windenergieanlagen mit intelligenten Rotorblättern

Ziel des Tasks war die Validierung des Klappenmodells, welches im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ entwickelt wurde, anhand experimenteller Daten aus dem Windkanal Oldenburg. Ferner war eine Implementierung des Modells in die Aeroelastik-Software FAST vorgesehen und eine Validierung bzw. Präzision der Bewertung von Technologie 2 anhand des neuen Modells.

Das in „Smart Blades“ entwickelte Klappenmodell wurde erfolgreich in die Aeroelastik-Software FAST implementiert. Ebenso wurde das Lastminderungspotential durch eine aktive Klappensteuerung anhand eines generischen Testfalles bestimmt und bewertet. Eine Validierung anhand der Messdaten aus dem Windkanal Oldenburg konnte aufgrund der stark verzögerten Lieferung und unzureichenden Betriebspunktvariabilität nicht durchgeführt werden.

Somit wurden die Task-Ziele teilweise im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.3.3: Ermüdungsanalyse für die getesteten Probekörper

Die Ziele des Tasks waren ein genaues Verständnis des Ermüdungsverhaltens der in Technologie 2 entwickelten flexiblen Hinterkante sowie die Interpretation der Ergebnisse der Ermüdungslaborversuche in Task 2.3.2.

Es wurden detaillierte Finite-Elemente-Modelle des Hinterkantensegments, das am DLR getestet wurde, erstellt. Zunächst wurden die im kommerziellen Finite-Elemente-Programm ABAQUS verfügbaren Methoden für eine erste Ermüdungsanalyse eingesetzt (z. B. die Virtual Crack Closure Technique, VCCT). Für das Laminatversagen wurde außerdem ein bei FW-H-ISD vorhandenes Ermüdungsschädigungsmodell von 2D auf 3D erweitert und angewendet. Die Ergebnisse wurden in Form detaillierter Deliverable-Berichte dokumentiert. Als kritisch sind insbesondere die Anschlussstellen der einzelnen schlanken Hinterkanten-Streben zu bewerten.

Die Task-Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.4.2: Schwingungsanalyse und aeroelastische Analyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

Die Ziele des Tasks waren die Entwicklung einer Toolkette für eine gekoppelte aero-servo-elastische Analyse mit hoher Genauigkeit auf der Strukturseite sowie die Validierung der entwickelten Toolkette und der Analyse am Blattsegmentdemonstrator anhand der Ergebnisse des Tests am Schleuderprüfstand. Die Entwicklung der Toolkette wurde abgeschlossen. Es wurden Simulationen durchgeführt und anhand von HAWC2-Simulationsergebnissen sowie experimentellen Ergebnissen des Schleuderprüfstandsversuchs des DLR verifiziert und validiert.

Die Task-Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.4.3: Ermüdungs- und Festigkeitsanalyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

Die Ziele des Tasks waren die Durchführung von detaillierten Ermüdungsanalysen zur Verifikation von Entwurfsstudien, die Bewertung des Einflusses einer flexiblen Hinterkante auf das Ermüdungsverhalten von Rotorblättern, die Durchführung von detaillierten Festigkeitsanalysen zur Verifikation von Entwurfsstudien sowie die Bewertung des Einflusses der flexiblen Hinterkante auf die Festigkeit von Rotorblättern.

Das am Institut für Statik und Dynamik entwickelte Modell zur Bewertung von Ermüdungsschädigungen wurde auf die Anwendung am Rotorblatt erweitert und parametrisiert. Mit dem Modell wurde der Einfluss der flexiblen Hinterkante auf das Ermüdungsschädigungsverhalten und die Festigkeit des Rotorblatts im Rahmen der bereitgestellten Entwurfsstudien analysiert und bewertet.

Die Task-Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.5.2: Identifizierung und Minderung relevanter Schallquellen am Rotorblatt mit Klappen

Ziel dieses Tasks war eine numerische Abschätzung, inwieweit Klappen am Rotorblatt die Schallabstrahlung der Windenergieanlage erhöhen. Darüber hinaus sollte ein Konzept zur akustischen Optimierung der Klappe erarbeitet und dessen Wirksamkeit im Windkanal demonstriert werden.

Im Rahmen dieser Task wurde der Seitenkantenlärm als zusätzliche Schallquelle bei Windenergieanlagen mit aktiven Hinterkantenklappen identifiziert und mögliche Schallminderungsmaßnahmen untersucht. Hauptsächlich wurde der Einsatz von porösen Strukturen im Bereich der Seitenkante akustisch untersucht. Diese Methode wird auch schon erfolgreich an der Profilhinterkante eingesetzt und war der aussichtsreichste Kandidat für eine Lärmreduktion an den Seitenkanten der Klappe. Numerische und experimentelle Untersuchungen mit den verwendeten porösen Seitenkanten zeigten jedoch nur ein geringes Lärminderungspotential, hauptsächlich bei Frequenzen unter 5.000 Hz und negativen Klappenwinkeln. Eine angepasste Auslegung der porösen Struktur und weitere Untersuchungen auch im Zusammenhang mit dem Hinterkantenlärm können das Potential dieser Methodik wahrscheinlich noch steigern.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 2.7.1: Konzept eines multistabilen Morphing-Mechanismus

Die Ziele des Tasks waren die Entwicklung von Analysetools für multistabile Strukturen sowie die Methodenentwicklung zur Assemblierung der adaptiven Hinterkante mit der Hauptstruktur.

Es wurde eine Analyseverfahren für *variable stiffness laminates* (Laminat mit variabler Steifigkeit) basierend auf der klassischen Finite-Elemente-Methode in die Software ABAQUS implementiert. Mit dieser Methode wurden Konfigurationen zum Einbau in das Rotorblatt gefunden und ein Konzept zur strukturdynamischen Implementierung erarbeitet.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 4.0.0: Projektmanagement - Technologiekoordinator

Die Ziele dieses Tasks waren die zielgerichtete Ausführung der Tasks in der Technologie 4 (Querschnittsthemen) und des Projekts sowie die Qualitätssicherung der Ergebnisse in Technologie 4.

Der Technologiekoordinator wurde kontinuierlich in der Koordination sämtlicher Aktivitäten in Technologie 4 unterstützt. Dies schloss das Überprüfen und Fortschreiben der Zeitpläne der beteiligten Partner, die Organisation von Arbeitstreffen sowie das Berichtswesen ein.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 4.1.5: Finite-Elemente-Modellierung von Klebnähten

Die Ziele dieses Tasks waren die Modellierung von Klebnähten innerhalb des MoCA-Tools (s. Task 1.4.1), die Entwicklung einer adaptiven Global-Lokal-Modellierungsmethode, die Ableitung einer Aussage über die Notwendigkeit eines dreidimensionalen Spannungsnachweises für Klebnähte sowie die Abschätzung des Einflusses fertigungsinduzierter geometrischer Imperfektionen auf die Lebensdauer der Klebnähte.

Eine lokale 3D-Solid-Element-Modellierung der Hinterkante wurde in MoCA implementiert, die über Kontaktbedingungen mit der globalen Schalen-Element-Beschreibung des Rotorblatts gekoppelt wurde. Da im lokalen Modell eine größere Netzdichte erforderlich ist als im globalen Blattmodell, wurde eine lokale Netzverfeinerung in MoCA integriert. Der Vorteil des Verfahrens ist eine lokal hochgenaue Auflösung der Blattgeometrie im Bereich der Verklebung, was genauere Spannungsprognosen zur Folge hat. Die reale Geometrieimplementierung liefert deutlich höhere Spannungen in der Verklebung als ein vereinfachtes Schalenmodell mit Verklebung. Da dreidimensionale Spannungszustände in der Verklebung vorherrschen, ist ein 3D-Spannungsnachweis erforderlich. Biege-Torsions-Kopplung erhöht die maximalen Spannungen in der Hinterkantenverklebung von Rotorblättern.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 4.1.8: Materialmodell-Entwicklung, Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebnähte unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen

Die Ziele des Tasks waren Labormessungen zum chemischen Schrumpfen von Klebstoffen unter unterschiedlichen Aushärtebedingungen, Labormessungen zum thermischen Schrumpfen, die Berücksichtigung des prozessabhängigen thermischen und chemischen Schrumpfens sowie die Modellreduktion für die Verwendung im Strukturdesign.

Die Labormessungen zum chemischen Schrumpfen unter verschiedenen Aushärtebedingungen und zum thermischen Schrumpfen wurden erfolgreich abgeschlossen. Es wurde ein Modell zur Bestimmung prozessabhängiger Kennwerte für chemisches und

thermisches Schrumpfen erstellt. Durch eine Vereinfachung der komplexen viskoelastischen Modellformulierung für Eigenspannungen konnte eine reduzierte Modellumgebung generiert werden.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 4.2.2: Weiterentwicklung von Flutter-Analyse-Methoden

Die angepassten Ziele des Tasks waren die Erstellung von Anlagenmodellen für FAST und HAWC2, die Entwicklung eines automatisierten Tools zur Bestimmung der kritischen Zustände bei Einsetzen einer aeroelastischen Instabilität im Zeitbereich, die Ableitung einer Aussage über Vor- und Nachteile der Technologien 1 und 2 in Bezug auf aeroelastische Stabilität, Code-to-Code-Vergleiche zur Flutterberechnung mit Projektpartnern (Abgleich von Ergebnissen) sowie die Ableitung von Hinweisen zur Berechnung einer aeroelastischen Instabilität im Rahmen einer Zertifizierung.

Anlagenmodelle wurden für die Referenzanlage, die Anlagenvariante mit Swept Blade aus dem „Smart Blades“-Projekt (Technologie 1) sowie der Anlagenvariante mit Hinterkantenklappe (Technologie 2) erstellt. Das automatisierte Tool zur Bestimmung kritischer Zustände wurde als Matlab-basiertes Skript umgesetzt. Der Code-to-Code-Vergleich mit Projektpartnern wurde schwerpunktmäßig verfolgt. Hier wurden insbesondere die Referenzanlage und die Swept Blade-Anlage analysiert und die Ergebnisse in einem sehr umfangreichen Deliverable dokumentiert. Untersuchungen der Technologie 2 beschränkten sich aus Zeitgründen auf kollektiv fehlerhaft feststehende Klappen mit unterschiedlichen Klappenanstellwinkeln. Auf Basis der Ergebnisse des Tasks und des Arbeitspakets 4.2 wurden Hinweise zur Berechnung einer aeroelastischen Instabilität mit einem Zeitbereichs-Simulationstool verfasst und in Form eines Deliverables dokumentiert.

Die angepassten Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

#### Task 4.4.1: Technologiebewertung

Die Ziele dieses Tasks waren der Vergleich der Performanz aller Technologien mit der Referenzanlage sowie die Ableitung einer finalen Aussage über die untersuchten Smart-Blades-Technologien.

Das techno-ökonomische Bewertungsmodell, das bereits im „Smart Blades“-Projekt entwickelt wurde, wurde noch einmal grundlegend überarbeitet. Dazu wurden Expertenbefragungen bei den am Projekt beteiligten Industriepartnern durchgeführt, um die Bewertungskriterien, Wichtungsfaktoren und Bewertungsskalen zu objektivieren. Sämtliche Projektergebnisse wurden sorgfältig analysiert und nach bestem Wissen und Gewissen in das Bewertungsschema integriert. Eine vergleichende Bewertung ist aber auch mit Abschluss dieses Projekts nicht abschließend möglich, wie die unterschiedlichen Technologien unterschiedliche Reifegrade aufweisen.

Die Ziele wurden im beantragten Zeit- und Kostenrahmen erreicht und der Task erfolgreich abgeschlossen. Die Ressourcen für Personal und Sachmittel wurden ausgeschöpft.

## **2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die veranschlagten Sach- und Personalmittel wurden planmäßig eingesetzt. Die wichtigsten drei Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind

- 1.290.381,97 € in Position 0812 (Personalmittel, Endgeltgruppe E12-15)
- 64.547,30 € in Position 0822 (Beschäftigungsentgelte)
- 59.177,88 € in Position 0834 (Mieten und Rechnerkosten)

## **3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geplanten Arbeiten waren zur Erreichung der Ziele und somit für einen erfolgreichen Projektverlauf und -abschluss notwendig. Der Zeitplan war durchweg ambitioniert, so dass die aufgewendeten Mittel im Bereich Personal, der die zahlenmäßig größte Position in dem Vorhaben darstellt, in vollem Umfang angemessen waren. Sachkosten sind insbesondere für Software-Lizenzen in Pos. 0834 angefallen. Diese waren für die Durchführung der Arbeiten notwendig und durch die hervorragenden Konditionen, die über die Leibniz Universität IT Services (LUI) der LUH zur Verfügung stehen, angemessen. Darüber hinaus sind in untergeordnetem Umfang Sachkosten für Hardware (für Windkanal-Versuche in den Tasks 2.2.1 und 2.5.2 und Laborversuche in Task 4.1.8) sowie Dienstreisen entstanden. Diese waren für die Durchführung und Koordination der Arbeiten sowie für die Veröffentlichung und Präsentation von Forschungsergebnissen bei angesehenen Konferenzen erforderlich und in ihrer Höhe angemessen. Zu jedem Zeitpunkt wurde der für eine Universität ohnehin obligatorische Grundsatz wirtschaftlicher Mittelverwendung beachtet.

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

Wie im Antrag bereits ausgeführt, bieten die Forschungsergebnisse wenig Potential für eine wirtschaftliche Verwertung. Diese Einschätzung ist weiterhin unverändert gültig. Die wissenschaftliche Verwertung steht klar im Vordergrund.

Die Forschungsergebnisse stehen den beteiligten Industriepartnern als Deliverables bereits zur Verfügung. Diese reduzieren in den bearbeiteten Themengebieten Entwicklungsrisiken durch Aufzeigen von Sensitivitäten und Problemen bei der Entwicklung von Smart Blades. Es kann eine beschleunigte Implementierung im industriellen Umfeld erwartet werden.

Durch die Profilierung der Kompetenzen gegenüber der Industriepartner, aber auch im nationalen und internationalen Forschungsumfeld, wurden bereits gemeinsame Forschungsaktivitäten initiiert (s. die BMWi-geförderten Projekte „QuexUS“, „ReliaBlade“ und voraussichtlich ab Mai 2021 auch „Add2ReliaBlade“).

Die Technologiekoordinatoren Bernhard Stovesandt (IWES), Johannes Riemenschneider (DLR), Michael Hölling (FW-OL) und Claudio Balzani (FW-H) organisieren gemeinsam mit anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern im internationalen Kontext ein Mini-Symposium bei der Wind Energy Science Conference 2021 (WESC2021) mit dem Titel „Smart Blades Technologies“. Dort

werden einige Projektergebnisse präsentiert und die Sichtbarkeit des Projekts und des Konsortiums verstärkt, was weiter zur Profilierung beiträgt.

Zur besseren Übersicht wird der voraussichtliche Nutzen der Forschungsergebnisse taskweise beschrieben.

#### Task 1.4.1: Validierung des Tools MoCA

- Eine validierte Methodik zum Erstellen parametrisierter Finite-Elemente-Modelle für Rotorblätter (hybride Schalen-Solid-Modelle mit Schalenelementen für die Laminare und Solidelementen für die Verklebungen) steht für aufbauende Forschungsarbeiten zur Verfügung. Geplant ist der Einsatz z. B. für Model-Updating-Methoden, detaillierte Finite-Elemente-Analysen, Unsicherheits-Quantifikationen, etc. Dies wird z. T. bereits realisiert (s. das Projekt „ReliaBlade“ oder das Teilprojekt B03 im jüngst eingerichteten SFB 1463 der DFG).
- Das validierte Tool soll wissenschaftlich als Teil einer Promotion und in Form einer Veröffentlichung in einer internationalen Fachzeitschrift verwertet werden. Die Veröffentlichung, die eine Beschreibung der Modellierungsmethodik sowie die Validierungsergebnisse mitsamt Testergebnissen der Prüfstandversuche aus AP 1.2 enthält, steht unmittelbar vor der Einreichung und steht somit der Forschungscommunity sowie der Windenergie-Industrie zur Verfügung und kann bei Bedarf für den Entwurf von Rotorblättern genutzt werden.
- Das Tool MoCA kann auf Anfrage interessierten Wissenschaftlern oder auch der Industrie verfügbar gemacht werden. Die Nutzung muss auf eigenes Risiko erfolgen. Professioneller Support kann nicht geleistet werden.

#### Task 1.5.1: Stringerschalen für Biege-Torsions-Kopplung

- Die Aussagen zur Wirksamkeit schraubenförmiger Stringerschalen für die Erzeugung einer gezielten Biege-Torsions-Kopplung und zur Erhöhung der Beulfestigkeit geben Anhaltspunkte zur Performanz und erleichtern den Entwurf entsprechender Rotorblätter.

#### Task 2.2.1: Validierung eines Klappenmodells für aeroelastische Simulationen von Windenergieanlagen mit intelligenten Rotorblättern

- Eine erste Abschätzung des Lastminderungspotentials konnte geliefert werden. Diese ist entscheidend für den zukünftigen Einsatz der Technologie 2.
- Das aerodynamische Modell für Hinterkantenklappen ist in FAST implementiert und ermöglicht den Einsatz für weiterführende Forschungsarbeiten in einem frei verfügbaren Anlagen-Simulations-Tool.

#### Task 2.3.3: Ermüdungsanalyse für die getesteten Probekörper

- Die entwickelten Simulationsmodelle können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.

#### Task 2.4.2: Schwingungsanalyse und aeroelastische Analyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- Die entwickelten Simulationsmodelle können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.

#### Task 2.4.3: Ermüdungs- und Festigkeitsanalyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- Die entwickelten Simulationsmodelle können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.

#### Task 2.5.2: Identifizierung und Minderung relevanter Schallquellen am Rotorblatt mit Klappen

- Die entwickelten Simulationsmodelle können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.
- Neue Schallquellen an den Klappenseiten wurden identifiziert. Die Verwendung einer porösen Struktur zur Minderung der Schallemissionen erwies sich als schwierig. Mit der erarbeiteten Methodik können weitere Methoden zur Lärminderung untersucht werden. Zusatzschall durch Klappen ist für moderne Windparks nicht akzeptabel, daher sind wirksame Lärmreduzierungskonzepte unbedingt erforderlich, damit die Technologie 2 im Feld wirtschaftlich betrieben werden kann.

#### Task 2.7.1: Konzept eines multistabilen Morphing-Mechanismus

- Die Wirksamkeit des Konzepts konnte numerisch gezeigt werden. In weiteren Arbeiten könnte das Konzept in Hardware umgesetzt und beispielsweise im Windkanal demonstriert werden.
- Die Erweiterung von einer bistabilen auf eine multistabile Konfiguration könnte die Variabilität der Hinterkantenbewegungen und damit die Anwendbarkeit im Blatt weiter erhöhen.
- Die Ergebnisse des Tasks sind bereits in die erfolgreiche Promotion von Ayan Haldar eingegangen.
- Es ist eine Patentanmeldung mit dem Titel „Profilverwölbung durch bistabile Elemente“ gemeinsam mit dem DLR ansässig.

#### Task 4.0.0: Projektmanagement - Technologiekoordinator

- Die Erfahrungen im Projektmanagement können in der Koordination von Verbundforschungsvorhaben eingesetzt werden.

#### Task 4.1.5: Finite-Elemente-Modellierung von Klebnähten

- Die entwickelten Simulationsmodelle und Methoden können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.

- Durch die global-lokal-Modellierung von Hinterkantenverklebungen konnte das MoCA-Tool sinnvoll erweitert werden. Dadurch ist eine geometrisch exakte Abbildung der Verklebungen möglich, was die Qualität und Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse im Vergleich zu einem klassischen Schalen-Solid-Modell (Schalen für Laminate, Solids für Verklebungen) deutlich erhöht.
- Die Ermüdungs- und Festigkeitsanalyse von Rotorblattverklebungen ist ein Forschungsschwerpunkt des Instituts für Windenergiesysteme. Die entsprechenden Arbeiten werden bereits im Projekt „ReliaBlade“ weitergeführt und werden voraussichtlich ab Mai 2021 im Projekt „Add2ReliaBlade“ ergänzt.
- Die Implementierung der Global-Lokal-Modellierung kann auf Anfrage interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern oder der Industrie verfügbar gemacht werden. Die Nutzung muss auf eigenes Risiko erfolgen. Professioneller Support kann nicht geleistet werden.

#### Task 4.1.8: Materialmodell-Entwicklung, Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebnähte unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen

- Die entwickelte Modellumgebung ermöglicht die Integration der Material-Fertigungsprozess-Beziehung in den Entwurfsprozess.
- Eigenspannungskenngrößen können in zukünftigen Rotorblattentwürfen als Input verwendet werden.
- Die modellhafte Beschreibung der Eigenspannungsentstehung kann in bestehende Versagensmodelle von Klebnahtrichtungen integriert und die Vorhersagegenauigkeit gesteigert werden.
- Durch Kenntnis der Aushärtekinetik des Klebstoffmaterials ist es möglich, bestehende Temperprozessparameter zeitlich zu optimieren. Die Anwendung der Aushärtekinetik trägt zudem zur Qualitätssicherung bei und kann minderwertig ausgehärtete Stellen im Rotorblatt ausmachen.
- Erzielte Ergebnisse bilden die Grundlage für ein Promotionsvorhaben.
- Teilergebnisse können für weitere Publikationen herangezogen werden.

#### Task 4.2.2: Weiterentwicklung von Flutter-Analyse-Methoden

- Die entwickelten Methoden können für vertiefte Analysen eingesetzt und in den Entwurfsprozess in der Rotorblattentwicklung integriert werden.
- Die etablierte Zusammenarbeit zwischen den im AP 4.2 beteiligten Partnern kann in Folgeprojekten fortgeführt werden. Dies wird bereits im Projekt „QuexUS“ bereits. Es wird angestrebt, diese Partnerschaft auch darüber hinaus zu pflegen.
- Die Forschungsergebnisse sollen im Rahmen einer Promotion verwertet werden.
- Die implementierten Auswerteskripte können auf Anfrage interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern oder der Industrie verfügbar gemacht werden. Die Nutzung muss auf eigenes Risiko erfolgen. Professioneller Support kann nicht geleistet werden.

#### Task 4.4.1: Technologiebewertung

- Die Technologiebewertung fasst übersichtlich die Stärken und Schwächen der einzelnen SmartBlades-Technologien zusammen, sodass Empfehlungen für zukünftige Entwicklungen abgeleitet und die Technologien zielgerichtet weiterentwickelt werden können. Insbesondere unvollständige Analysen bzw. Ergebnisse werden in der Gesamtbewertung hervorgehoben und zeigen den Bedarf weiterer Forschung in einzelnen Bewertungskategorien auf.
- Das Bewertungsmodell kann in zukünftigen Forschungsprojekten für die Analyse von Vor- und Nachteilen neuer Anlagenkonzepte oder -komponenten eingesetzt werden.
- Das Bewertungsmodell kann der Industrie bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden. Die Nutzung muss auf eigenes Risiko erfolgen. Professioneller Support kann nicht geleistet werden.

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

Auf Gründen der Übersichtlichkeit wird die Darstellung taskweise aufgeführt.

#### Task 1.4.1: Validierung des Tools MoCA

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 1.5.1: Stringerschalen für Biege-Torsions-Kopplung

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.2.1: Validierung eines Klappenmodells für aeroelastische Simulationen von Windenergieanlagen mit intelligenten Rotorblättern

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.3.3: Ermüdungsanalyse für die getesteten Probekörper

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.4.2: Schwingungsanalyse und aeroelastische Analyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.4.3: Ermüdungs- und Festigkeitsanalyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.5.2: Identifizierung und Minderung relevanter Schallquellen am Rotorblatt mit Klappen

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 2.7.1: Konzept eines multistabilen Morphing-Mechanismus

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 4.0.0: Projektmanagement - Technologiekoordinator

- In diesem Task gibt es keine Forschungsinhalte.

#### Task 4.1.5: Finite-Elemente-Modellierung von Klebnähten

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 4.1.8: Materialmodell-Entwicklung, Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebnähte unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 4.2.2: Weiterentwicklung von Flatter-Analyse-Methoden

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

#### Task 4.4.1: Technologiebewertung

- Dem Zuwendungsempfänger sind während der Durchführung des Vorhabens keine anderen Arbeiten oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt geworden.

### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die erfolgten und/oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse taskweise angegeben.

#### Task 1.4.1: Validierung des Tools MoCA

- Pablo Noever Castelos, Bernd Haller, Claudio Balzani: Validation of a modelling methodology for wind turbine rotor blades based on a full blade test, in Vorbereitung, Einreichung im März 2021 im Wind Energy Science Journal geplant (OpenAccess)
- Bernd Haller, Pablo Noever Castelos, Claudio Balzani (2021): Validation of torsional stiffness by means of full-scale blade testing, eingereicht zur Wind Energy Science Conference (WESC2021), 25.-28.05.2021, Hannover
- Die Forschungsergebnisse sollen im Rahmen der Promotion von Pablo Noever Castelos verwertet werden.

#### Task 1.5.1: Stringerschalen für Biege-Torsions-Kopplung

- Es ist keine Veröffentlichung geplant, da die Ergebnisse voraussichtlich nicht für die Annahme in einer Fachzeitschrift ausreichend sind. Ggf. können die Deliverables auf einem Repository OpenAccess veröffentlicht werden.

#### Task 2.2.1: Validierung eines Klappenmodells für aeroelastische Simulationen von Windenergieanlagen mit intelligenten Rotorblättern

- Torben Wolff, Jörg R. Seume (2016): Modeling the Transient Aerodynamic Effects During the Motion of a Flexible Trailing Edge, Journal of Physics: Conference Series 753, 082038, doi:10.1088/1742-6596/753/8/082038

#### Task 2.3.3: Ermüdungsanalyse für die getesteten Probekörper

- Hinesh Madhusoodanan, Eelco Jansen, Raimund Rolfes (2018): A physically based fatigue damage model for simulating three-dimensional stress states in composites under very high cycle fatigue loading, in Hans-Jürgen Christ (Ed.): Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles, Springer Spektrum, Wiesbaden, 533-559, doi: 10.1007/978-3-658-24531-3\_24
- Johannes Riemenschneider, Martin Pohl, Róbert Ungurán, Vlaho Petrovic, Martin Kühn, Ayan Haldar, Hinesh Madhusoodanan, Eelco Jansen, Raimund Rolfes (2018): Smart Trailing Edges for Wind Turbines, Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS 2018), September 2018, San Antonio, Texas, USA

#### Task 2.4.2: Schwingungsanalyse und aeroelastische Analyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- Eine Veröffentlichung zur Modellerweiterung der BEM im Hinblick auf die Berücksichtigung der flexiblen Hinterkante und Blattschwingungseinflüsse ist geplant.

#### Task 2.4.3: Ermüdungs- und Festigkeitsanalyse mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen

- s. Task 2.3.3

#### Task 2.5.2: Identifizierung und Minderung relevanter Schallquellen am Rotorblatt mit Klappen

- Carl Robert Brand (2017): Zur Schallentstehung an den Seitenkanten von Wölbklappen für Windenergieanlagen, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover.

#### Task 2.7.1: Konzept eines multistabilen Morphing-Mechanismus

- Ayan Haldar, Eelco Jansen, Raimund Rolfes (2017): Snap-through of Multistable Variable Stiffness Composites using Piezoelectric Actuators, Proceedings of the 20th International Conference on Composite Structures (ICCS20), 04.-07.09.2017, Paris, Frankreich
- Ayan Haldar, José Reinoso, Eelco Jansen, Raimund Rolfes (2018): Thermally induced multistable configurations of variable stiffness composite plates: Semi-analytical and finite element investigation, Composite Structures 183, 161-175, doi:10.1016/j.compstruct.2017.02.014
- Ayan Haldar, Eelco Jansen, Raimund Rolfes (2019): Analysis of Morphing Trailing Edge Flap with Embedded Multistable Variable Stiffness Laminates, SciTech 2019, Januar 2019, San Diego, Kalifornien, USA
- P. M. Anilkumar, Ayan Haldar, Eelco Jansen, B. N. Rao, Raimund Rolfes (2019): Design optimization of multistable variable-stiffness laminates, Mechanics of Advanced Materials and Structures 26(1), 48-55, doi:10.1080/15376494.2018.1512022
- Ayan Haldar, Eelco Jansen, B. Hofmeister, M. Bruns, Raimund Rolfes (2020): Analysis of Novel Morphing Trailing Edge Flap Actuated by Multistable Laminates, AIAA Journal 58, 3149-3158, doi:10.2514/1.J058870
- s. auch Task 2.3.3 mit Beteiligung von Ayan Haldar und Raimund Rolfes.
- s. auch Task 4.4.1 mit Beteiligung von Ayan Haldar und Raimund Rolfes.

#### Task 4.0.0: Projektmanagement - Technologiekoordinator

- Es sind keine Veröffentlichungen geplant, da dies kein Forschungstask ist.

#### Task 4.1.5: Finite-Elemente-Modellierung von Klebnähten

- Pablo Noever Castelos, Claudio Balzani (2017): Non-proportional multi-axial stress states and their influence on the fatigue life of trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades, Wind Energy Science Conference (WESC2017), 26.-29.06.2017, Technical University of Denmark, Lyngby Campus, Kopenhagen, Dänemark
- Pablo Noever Castelos, Michael Wentingmann, Claudio Balzani (2017): Fatigue analysis of trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades accounting for non-proportional multiaxial stress histories, Proceedings of the 20th International Conference on Composite Structures (ICCS20), 04.-07.09.2017, Paris, Frankreich
- Pablo Noever Castelos, Michael Wentingmann, Claudio Balzani (2017): Comparative study of finite-element-based fatigue analysis concepts for trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades taking into account different rotor blade designs, 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry, 11.-13.10.2017, Stuttgart, Deutschland

#### Task 4.1.8: Materialmodell-Entwicklung, Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebnähte unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen

- Tobias Holst, Florian Sayer, Alexandros Antoniou (2020): Modelling of chemical shrinkage evolution with curing degree of a filled epoxy adhesive, 41<sup>st</sup> Risø International Symposium on Materials Science, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 942 (2020) 012020, doi:10.1088/1757-899X/942/1/012020
- Tobias Holst, Florian Sayer, Alexandros Antoniou: A viscoelastic model for residual stress prediction in bond lines of wind turbine blades, eingereicht zur Wind Energy Science Conference (WESC2021), 25.-28.05.2021, Hannover
- Die Forschungsergebnisse sollen im Rahmen der Promotion von Tobias Holst verwertet werden.

#### Task 4.2.2: Weiterentwicklung von Flatter-Analyse-Methoden

- Oliver Hach, Holger Hennings, Jelmer Derk Polman, Claudio Balzani, Thomas Klemme, Sarah Müller, Johannes Rieke (2019): Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools for wind turbines, Wind Energy Science Conference (WESC2019), 17.-20.06.2019, Cork, Irland
- Oliver Hach, Hendrik Verdonck, Jelmer Derk Polman, Claudio Balzani, Sarah Müller, Johannes Rieke, Holger Hennings (2020): Wind turbine stability: Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools, Journal of Physics: Conference Series 1618, 052048, doi:10.1088/1742-6596/1618/5/052048
- Jelmer Derk Polman, Claudio Balzani (2021): Time domain stability analysis of a rotor blade with trailing edge flaps, eingereicht zur Wind Energy Science Conference (WESC2021), 25.-28.05.2021, Hannover
- Die Forschungsergebnisse sollen im Rahmen der Promotion von Jelmer Derk Polman verwertet werden.

#### Task 4.4.1: Technologiebewertung

- Zhuzhell Montano Rejas, Steffen Opitz, Johannes Riemenschneider, Edgar Werthen, Martin Pohl, Yves Govers, Janto Gundlach, Vlaho Petrovic, Robert Ungurán, Lars Neuhaus, Claudio Balzani, Michael Wentingmann, Ayan Haldar, Raimund Rolfes, Moritz Bätge (2019): Selected results on the development and testing of smart blades technologies for wind turbines, In: Proceedings der ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials - SMART 2019, 102-117, International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 9th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, ECCOMAS SMART 2019, 08.-11.07.2019, Paris, Frankreich, ISBN 978-84-949194-6-6
- Johannes Riemenschneider, Marcus Wiens, Tobias Meyer, Piyush Singh, Lars Neuhaus, Michael Hölling, Oliver Huxdorf, Jochen Wild, Vlaho Petrovic, Róbert Ungurán, Michael Kühn, Michael Wentingmann, Claudio Balzani, Jan Teßmer (2020): Active and Passive Methods for Load Alleviation in Wind Turbines, SMASIS 2020, 15.09.2020, Online Conference

# Erfolgskontrollbericht

## FW-H / Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Zuwendungsempfänger ForWind Hannover (FW-H), Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH)	Förderkennzeichen: 0324032C
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 49 Monate	
Berichtszeitraum: 01.09.2016 bis 30.09.2020	

Part III: Erfolgskontrollbericht
<b>Dieser Abschnitt des Abschlussberichts ist vertraulich.</b>

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht	
3. Titel Schlussbericht SmartBlades2		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Balzani, Claudio	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2020	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation keine	
	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover</b>  Welfengarten 1 30167 Hannover  Institut für Statik und Dynamik (ISD) Institut für Windenergiesysteme (IWES, Projektleiter, federführend) Appelstr. 9A, 30167 Hannover  Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik (TFD) An der Universität 1, 30823 Garbsen		10. Förderkennzeichen 0324032 C
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin		11. Seitenzahl
		13. Literaturangaben
		14. Tabellen
15. Abbildungen		16. Zusätzliche Angaben Part III ist vertraulich zu behandeln.
		17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Simon Hackhofer, Projektträger Jülich, Jülich, ???.?.2021
18. Kurzfassung  Das Vorhaben ist Teil eines Verbundforschungsprojektes und befasst sich mit der Weiterentwicklung intelligenter Rotorblatt-Technologien, die zum Ziel haben, Beanspruchungen von Windenergieanlagen zu reduzieren. Darunter werden im Rahmen dieses Teilprojekts Rotorblätter mit einer gezielten passiven Biege-Torsions-Kopplung (T1) und Rotorblätter mit einer integrierten aktiven flexiblen Hinterkante (T2) verstanden. Darüber hinaus werden Querschnittsthemen (T4) behandelt, die für T1 und T2 wichtig sind.  Das Projekt baut auf den Forschungsergebnissen des Forschungsprojektes „Smart Blades“ (2012-2016) auf. Die Zielsetzung beinhaltet insbesondere das Testen von Demonstrationsrotorblättern mit einer Länge von 20 m an einer Testanlage (T1), das Testen eines Demonstrations-Segments an einem Rotationsprüfstand (T2) sowie weitere Aspekte, wie z.B. die Modellierung und Analyse von Klebnähten, aeroelastische Stabilität und technisch-wirtschaftliche Technologiebewertung. Gemeinsam an diesen Aktivitäten sind die zentralen Elemente der Validierung und Applikation von Methoden und Tools, die im Vorgängerprojekt entwickelt wurden.		

19. Schlagwörter

Rotorblatt; Rotor; Lastreduktion; Lastminimierung; Regelung; passive Regelung; Biege-Torsions-Kopplung; flexible Hinterkante; Moveables; Hinterkantenklappe; Windenergieanlage; Windkraftanlage; Windenergie; Bewertung; Smart Blades; intelligente Rotorblätter; Validierung; MoCA; Stringer; Klebnaht; Klebnähte; Verklebung; Finite Elemente; Ermüdung; Festigkeit; Aeroelastik; Aeroakustik; aeroelastische Stabilität

20. Verlag

21. Preis

**Anhang D**  
**Schlussbericht FW-OL**

# Schlussbericht FW-OL

Zuwendungsempfänger: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg	Förderkennzeichen: 0324032 D
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 49 Monate	
Berichtszeitraum: 01.09.2016 bis 30.09.2020	

## Part I: Kurze Darstellung

### 1. Aufgabenstellung

#### 1.1 Gesamtziel (der Organisation)

Das übergeordnete Forschungsziel des hier vorgeschlagenen Teilvorhabens von ForWind – Universität Oldenburg ist mit numerischen als auch experimentellen Untersuchungen zur Validierung von Modellen und Konzepten für Smart Blades beizutragen. Dies betrifft Strömungsmessungen beim Freifeldtest von passiven Smart Blades und Versuche unter kontrollierten Bedingungen in zwei turbulenten Windkanälen von ForWind – Oldenburg. Basierend auf der experimentellen Expertise in der Windphysik soll ein Beitrag geliefert werden, um alle drei Technologien auf der TRL-Skala weiter in Richtung industrieller Verwertung zu bringen.

Die spezifischen Beiträge von ForWind – Universität Oldenburg zum Verbundvorhaben beziehen sich auf die Technologien 1 bis 3 und können in insgesamt sechs übergeordnete Hauptziele zusammengefasst werden:

#### Technologie 1:

1. Validierung der in SmartBlades entwickelten Methoden zur Strömungs-Struktur-Kopplung und zur Optimierung von biege-torsions-gekoppelten Rotorblättern in OpenFOAM mit Messdaten einer realen Anlage
2. Zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Vermessung atmosphärischer Windfelder in der Umströmung einer Windenergieanlage, an der die biege-torsions-gekoppelten Rotorblätter getestet werden, liefert die Basis für die Validierung von Simulationen im Gesamtprojekt

#### Technologie 2:

3. Validierung von 2D Blattsegmenten mit aktiv geregelter flexibler Hinterkante durch neuartige experimentelle Methoden bei definierten turbulenten Strömungsbedingungen im Windkanal
4. Umsetzung von Lastreduktionen und Ertragssteigerungen im Gesamtsystem der Windenergieanlage durch Weiterentwicklung eines robusten (Hinf) Reglers und Ergänzung um ein Feedforward-Regelkonzept basierend auf lokalen optischen Strömungssensoren

#### Technologie 3:

5. Experimentelle Analyse von drei unterschiedlichen Konzepten des Vorflügels und entsprechender Regelungskonzepte am 2D Blattsegment oder Modellanlage unter kontrollierten turbulenten Bedingungen im Windkanal und teilweise an einer realen Anlage
6. Erkenntnisse über die Funktionalitäten der verschiedenen Vorflügelkonzepte sowie deren Einfluss auf die Dynamik auf das Gesamtsystem durch Anwendung stochastischer Analysemethoden

#### 1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen (der Organisation)

Der Bezug zu den förderpolitischen Zielen des Gesamtprojekts, dem sich auch das Teilvorhaben bei FW-OL unterordnet, ist im Technologiebericht (Anhang I) in Kapitel 1 zu finden.

#### 1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele (der Organisation)

Den unter in 1.1 dargestellten übergeordneten Hauptzielen sind folgende Arbeitsziele in den jeweiligen Technologien und Arbeitspaketen (AP) zugeordnet:

#### Technologie 1:

- Vorherrschende Windfelder um die CART3 Testanlage (Einströmung und Nachlauf) sollen mithilfe von LiDAR Geräten vermessen werden. Eine detaillierte Charakterisierung dieser gemessenen Windfelder soll als Input für geplante Simulationen und Validierungen im Gesamtprojekt dienen (AP 1.3).
- Die im Vorgängerprojekt SmartBlades entwickelten Tools zur Strömungs-Struktur-Kopplung, CFD-BEM Simulationen sowie Tools zur aerodynamischen Optimierung von biege-torsions-gekoppelten (BTC) Blättern sollen validiert werden. Zusätzlich sollen aerodynamischen Optimierung mit BTC Blättern für verschiedene Lastfälle durchgeführt werden. (AP 1.4).

### Technologie 2:

- Im kleinen Windkanal in Oldenburg sollen geeignete turbulente Windfelder erzeugt werden und Tests sowie Validierung des 2D Blattsegment mit geregelter, flexibler Hinterkante durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen sollen ebenfalls zur Validierung von Anlagensimulationen genutzt werden (AP 2.2).
- Die in SmartBlades entwickelten Reglerarchitekturen sollen an das Design einer flexiblen Hinterkante angepasst werden. Zusätzlich soll der  $H_{inf}$  Regler für industrielle Auslegungsrechnungen angepasst werden (AP 2.6).
- Basierend auf einer laseroptischen lokalen Anströmungsmessung (LDIC) soll ein Feedforward-Regelkonzept für aktive Smart Blades entwickelt werden (AP 2.6).
- Die Polaren des 2D Segment mit einer Profiltiefe von 1m sollen zur Validierung der aerodynamischen Auslegung im großen Windkanal vermessen werden (AP 2.8).

### Technologie 3:

- Im kleinen Windkanal in Oldenburg sollen turbulente Einströmungsbedingungen erzeugt werden in denen 2D Segmente mit aktivem Vorflügel getestet werden können. In diesen Strömungen sollen Feedback und prädiktive Regelungskonzepte für den aktiven Vorflügel aufgebaut und getestet werden (AP 3.1).
- Ein 2D Segment mit einer passiv adaptiven Vorflügelkinematik soll in Windkanaluntersuchungen validiert werden. Zusätzlich soll eine Feinabstimmung der Kinematik stattfinden (AP 3.2).
- Das Verhalten des 2D Segments mit passiv adaptiver Vorflügelkinematik soll für extreme Anstellwinkel sowie dynamischen Anstellwinkeländerungen untersucht werden (AP 3.2).
- Die aerodynamischen Charakteristika von 2D Segmenten mit starrem, mit passiv adaptivem und mit aktivem Vorflügel sollen verglichen werden (AP3.2).
- Numerische Methoden zur Lärmentwicklung an 2D Segmenten mit Vorflügeln sollen validiert werden. Zusätzlich soll die Lärmentwicklung durch Vorflügel bei laminaren und turbulenten Strömungsbedingungen beurteilt werden. (AP 3.2)
- Mithilfe eines aktiven Gitters sollen in dem großen Windkanal in Oldenburg realistische turbulente Strömungsbedingungen generiert werden. Das WEA Modell (1,8m Durchmesser) soll für Untersuchungen mit starren Vorflügeln umgebaut und die Regler entsprechend angepasst werden (AP 3.3).
- Die Auswirkungen starrer Vorflügel auf Ermüdungslasten und Leistung soll anhand der Modellexperimente untersucht werden (AP3.3).
- Mithilfe stochastischer Methoden soll der Einfluss von starren Vorflügeln auf die Dynamiken von Anlagen untersucht werden. Die Methoden sollen sowohl auf Daten der Modell WEA als auch auf Daten einer realen WEA mit und ohne starre Vorflügel angewandt werden. Zusätzlich sollen die Anlagendynamiken des WEA-Modells mit den stochastischen Methoden modelliert werden (AP 3.3).

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben bei der jeweiligen Organisation durchgeführt wurde

Von ForWind Oldenburg waren die Arbeitsgruppe Turbulenz, Windenergie und Stochastik (TWiSt) und die Arbeitsgruppe Windenergiesysteme (WESys) an diesem Projekt beteiligt. Durch diese beiden Gruppen werden verschiedene Windkanäle, LiDAR-Geräte und ein Rechencluster an der Universität Oldenburg betrieben und kamen in diesem Verbundvorhaben ebenfalls zum Einsatz. Zusätzlich zu der fachlichen Kompetenz zeichnet sich das Zusammenspiel dieser beiden Arbeitsgruppen dadurch aus, dass sie Ansätze aus der Physik (TWiSt) sowie aus den Ingenieurwissenschaften (WESys) für die gestellten wissenschaftlichen Herausforderungen heranziehen.

Durch die enge Kooperation innerhalb von ForWind, aber auch innerhalb des Forschungsverbunds Windenergie mit Fraunhofer IWES und DLR sowie den Industriepartnern, ist ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch auf höchstem wissenschaftlichen Niveau und die Nutzung von Synergien für die Forschungsarbeit möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ForWind Oldenburg über das notwendige Knowhow, die Infrastruktur und die Erfahrungen in der Durchführung koordinierter Verbundforschungsvorhaben verfügt, die zur Durchführung des Vorhabens erforderlich waren.

Die Vernetzung mit der Lehre in dem Bereich der Windphysik bietet zusätzlich die Möglichkeit der Integration von Forschungsergebnissen in die Ausbildung.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens bei der jeweiligen Organisation

ForWind Oldenburg war in den Technologien 1 bis 3 beteiligt wobei vier Tasks in Technologie 1, fünf Tasks in Technologie 2 und neun Tasks in Technologie 3 verortet waren. Über In- und Outputs waren diese Tasks mit Arbeiten der Projektpartner über die gesamte Laufzeit verknüpft. Die ursprüngliche Laufzeit war auf 39 Monate angesetzt. Bei der Durchführung gab es immer wieder zeitliche Verzögerungen, die eine Anpassung der Abläufe notwendig machte, wobei zwei Ereignisse hervorzuheben sind. Aufgrund der Verzögerungen beim Bau der Demo Blätter haben sich die Freifeldmessung um ein Jahr verschoben. Daraus resultierend mussten die geplanten Validierungsarbeiten ebenfalls verschoben werden. Zwischenzeitlich wurde das Projekt kostenneutral um einen Monat bis zum 31.12.2019 verlängert um die Laufzeiten mit denen der anderen Projektpartner zu synchronisieren. Neben den zeitlichen Verzögerungen bei der Umsetzung der Freifeldmessungen an der CART3 Anlage gab es zusätzlich technische Probleme, die darin resultierten, dass nur ein geringer Teil der ursprünglich geplanten Testmatrix messtechnisch erfasst werden konnte. Die reduzierte Datengrundlage schränkte ebenfalls die Möglichkeiten der Validierung in diesem Projekt ein. Die zeitlichen Verzögerungen und den daraus resultierenden Anpassungen im Zeitplan kollidierten zusätzlich mit dem Weggang von eingearbeiteten Personal, woraufhin die Ziele in Task 1.4.7 um Ergebnisse der Subtasks 1.4.7.3 und 1.4.7.4 gekürzt werden mussten. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde eine Aufstockung und Verlängerung bis zum 30.06.2020 für Validierungsaufgaben auf Basis der geringen Datenmenge beantragt. Eine letzte kostenneutrale Verlängerung des Projektes bis zum 30.09.2020 wurde aufgrund der Corona-Situation und der erneuten Synchronisation der Laufzeit mit anderen Projektpartnern beantragt und bewilligt.

Die im Laufe des Projektes durchgeführten Anpassungen in der Zielsetzung sowie im Zeit- und Arbeitsplan sind in den jeweiligen Zwischenberichten vermerkt.

Der Ablauf des Vorhabens erfolgte gemäß den angepassten Zeit- und Arbeitsplänen.

#### **4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere Angabe bekannter Konstruktionen**

Technologie 1: Die Ausführungen können dem Kapitel 2.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

Technologie 2: Die Ausführungen können dem Kapitel 3.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

Technologie 3: Die Ausführungen können dem Kapitel 4.3 des Technologieberichts (Anhang I) entnommen werden.

#### **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen:**

Neben der intensiven Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in diesem Projekt wurde das Windkanalmodell mit der flexiblen Hinterklappe mit der Firma Deharde GmbH entwickelt und gefertigt.

Part II: Eingehende Darstellung

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

Die eingehende Darstellung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen inklusive Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele wird im Folgenden taskweise vorgenommen.

##### **Technologie 1:**

###### Task 1.3.14: Strömungsmessung im Rotornahfeld

Die im Antrag benannten Ziele wurden nicht vollständig erreicht:

- Im Freifeldversuch mit passiven biege-torsions-gekoppelten Rotorblättern wurde mittels eines gondelbasierten short-range continuous-wave SpinnerLidar das turbulente Windfeld vermessen. Das SpinnerLidar wurde im September 2018 erfolgreich auf dem Gondel der CART3 Windenergieanlage bei NREL in Boulder, Colorado installiert und ausgerichtet. Die Messungen haben dazu gedient, die Validierung der Dynamik der CART3 Windenergieanlage zu ermöglichen, wofür die genaue Kenntnis des einströmenden turbulenten Windfeldes eine unabdingbare Voraussetzung ist. Das SpinnerLidar hat während der Messkampagne ohne technischen Mängel den einströmenden Wind vermessen und wurde im Mai 2019 erfolgreich von der Gondel der CART3 Windenergieanlage entfernt und zurück nach Oldenburg transportiert.
- Die im Antrag vorgegebenen Ziele wurden nur teilweise erreicht. Wegen technischer Probleme mit der CART3 Windenergieanlage wurden relativ wenige Messungen durchgeführt, und gab es keine Zeit mehr für die geplanten Nachlaufmessungen. Auch gibt es für verschiedene Betriebszustände der Anlage viel weniger Daten als ursprünglich geplant.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Planung der Logistik und Vorbereitung und Inbetriebnahme der Messkampagne
- Plausibilisierung der ersten Datensätze und Überprüfung der Funktion des Fokusbilders
- Durchführung und Rückbau der Messung

###### Task 1.3.15: Auswertung der Strömungsmessung im Rotornahfeld

Die im Antrag benannten Ziele wurden nicht vollständig erreicht:

- Die im Rahmen von Task 1.3.14 mit dem SpinnerLidar erzeugten Messungen wurden analysiert und zur Rekonstruktion des turbulenten einströmenden Windfeldes ausgewertet. Für die Erstellung des Windfeldmodells wurde ein 3-Parameter-Modell in Kombination mit einer einfachen Definition von räumlicher Turbulenz angewendet.
- Die im Antrag vorgegebenen Ziele wurden bis auf der Auswertung der Nachlaufströmung erreicht. Grund dafür ist, dass im Rahmen von Task 1.3.14 keine Nachlaufmessungen durchgeführt worden sind.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Überprüfung und Filterung der Messdaten
- Rekonstruktion und Parametrisierung des gemessenen turbulenten einströmenden Windfeldes
- Aufbereitung der Daten gemäß den mit den Projektpartnern abgestimmten Methoden und Formate
- Analyse der Korrelation zwischen der turbulenten Einströmung und der Anlagenlasten

###### Task 1.4.4: Validierung von Strömungs-Struktur-Kopplung und CFD-BEM-Simulationen

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Das Ziel von Task 1.4.4 war die Validierung der in die CFD Umgebung implementierten Fluid-Struktur Kopplung anhand von real gemessenen Anlagendaten der Demoanlage. Dies sollte unter Bewertung verschiedener Anströmbedingungen durchgeführt werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Definition von Vergleichsfällen zwischen Messung und CFD Simulation
- Implementierung eines turbulenten Einströmmodells

- Erstellung eines numerischen Rechengitters für alle Anlagenkomponenten
- Aufbau der Simulationsumgebung für Randbedingungen und Strukturmodell der Rotorblätter
- Simulation der Anlage sowohl in laminarer als auch in turbulenter Strömung
- Vergleich und Bewertung der Simulationsergebnisse mit gemessenen Anlagendaten

#### Task 1.4.7: Optimierungstool für BTC Blätter

Die im Antrag benannten Ziele wurden nicht vollständig erreicht:

- Das Ziel dieses Tasks war die Entwicklung und der Test eines Optimierungstools für biege-torsions-gekoppelte Rotorblätter basierend auf adjungierte Gradienten-Berechnung.
- Die adjungierte Gradienten-Berechnung ist nicht vollständig automatisiert

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Automatisierung für den Import und das Generieren von Blade-Geometrie-Parametern
- Löser sowohl für das Primo-Feld als auch für das adjungierte Feld
- Werkzeuge zur Berechnung der adjungierten Gradienten

### **Technologie 2:**

#### Task 2.2.2: Validierung aktive geregeltes 2D Blattsegment im turbulenten Windkanal

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Validierung aktives 2D Blattsegments mit geregelter, aktiv verformbarer Hinterkante im kleinen Windkanal unter laminaren als auch unter instationären Bedingungen, die aus einer Gesamtsimulation einer Windenergieanlage mit aktiven Smart Blades abgeleitet werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Ein Blattsegment mit einer aktiven Hinterkante wurde entworfen, hergestellt und im Windkanal charakterisiert.
- Drei Regelungskonzepte für die aktive Hinterkante wurden anhand Windkanalmessungen und numerischer Simulationen analysiert.
- Experimentelle Ergebnisse wurden mit Simulationen verglichen.

#### Task 2.3.3: Erstellung der Ansteuerungsprotokolle für das aktive Gitter im kleinen Windkanal

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Erzeugung von Anströmbedingungen für experimentelle Untersuchungen in Task 2.2.2 mittels aktivem Gitter im kleinen Windkanal in Oldenburg

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Erzeugung von Ansteuerungsprotokolle für das reduzierte aktive Gitter
- Charakterisierung der erzeugten Anströmwinkelfluktuationen

Es wurden zusätzliche Arbeiten durchgeführt:

- Das aktive Gitter wurde modifiziert um größere Anstellwinkelfluktuationen generieren zu können

#### Task 2.6.2: Adaption Regelung für Movable an Gesamtsystem

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Adaptation der im SmartBlades Projekt entwickelten Reglerarchitekturen an das Design einer flexiblen Hinterkante.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Der Basisregler wurde an das Modell der Referenzanlage angepasst.
- Zwei Regler für Individual Pitch Control (IPC) und für die aktive Hinterkante (Trailing Edge Flap Control, TEFC) wurden entworfen: einmal mit einem klassischen Designverfahren und einmal unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten.
- Eine neue Methode zur Behandlung der Beschränkungen von Aktuatoren in IPC- und TEFC-Algorithmen wurde entwickelt.
- Die entwickelten Regler wurden in aeroelastischen Simulationen validiert, die Methode zur Behandlung der Beschränkungen wurde zusätzlich in Windkanalexperimenten validiert.

#### Task 2.6.3: Feedforward-Regelung mit LIDIC im Gesamtsystem

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Entwicklung eines Feedforward-Regelungskonzepts für aktive Smart Blades, basierend auf einer Einströmungsmessung mittels LIDIC.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Die LIDIC-basierte Messung wurde im aeroelastischen Simulationscode HAWC2 sowie im LES Code PALM modelliert.
- Durch ein Optimierungsverfahren wurde die für den Feedforward-Regler optimale LIDIC-Konfiguration bestimmt.
- Der Einfluss von nicht-optimalen LIDIC-Parametern auf den Regler und auf die Lastreduktion wurde analysiert.
- Unsicherheiten von LIDIC-Messungen wurden analysiert und modelliert.

- Das Mess- und Regelungskonzept wurde in HAWC2 und PALM Simulationen validiert.

#### Task 2.8.3: Vermessung der Blattpolaren

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Die Polaren des 2D Blattsegments mit 1m Profiltiefe sollten im großen Windkanal in Oldenburg vermessen werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Es wurde ein Aufbau inklusive Drehtisch aufgebaut, der eine automatisierte Vermessung von Polaren ermöglicht
- Die Polaren des wurden im Windkanal basierend auf Messungen der Druckverteilung vermessen

Es wurden zusätzliche Arbeiten durchgeführt:

- Die Polaren wurden mithilfe einer 6-Komponenten Kraftwaage vermessen.

### **Technologie 3:**

#### Task 3.0.0: Koordination der Technologie 3

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Zielgerichtete Ausführung der Tasks in Technologie 3 sowie Qualitätssicherung der Ergebnisse

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Es wurden Treffen auf Technologieebene organisiert
- Abstimmungen innerhalb der Technologie

#### Task 3.1.2: Entwicklung Regelungskonzept

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Aufbau eines Regelungskonzeptes für die Regelung von aktiven Vorderkanten.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Regelziele wurden identifiziert.
- Das Blattsegment mit der aktiven Vorderkante wurde modelliert und mithilfe des Modells wurden Regelungsalgorithmen getunt.
- Zwei verschiedene closed-loop Regelungskonzepte wurden entwickelt und im Windkanal validiert

#### Task 3.1.3: Test von Regelkonzepten am 2D-Windkanalmodell

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Das 2D Windkanalmodell mit dem aktiven Vorflügel soll im kleinen Windkanal in Oldenburg detailliert charakterisiert werden.
- Erzeugung von Anströmung mit fluktuierendem Anströmwinkel
- Untersuchung unterschiedliche Regelkonzepte am 2D-Windkanalmodell im kleinen Windkanal in Oldenburg

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Charakterisierung des Windkanalmodells mit aktivem Vorflügel
- Erzeugung verschiedener Anströmungen mit fluktuierendem Anströmwinkel mittels reduziertem aktivem Gitter
- Untersuchung mit feed-forward, feed-back, und kombiniertem Regler für den aktiven Vorflügel zur Reduktion von Auftriebskraftfluktuationen

#### Task 3.2.2: Validierung und Charakterisierung der passiven Vorflügelauslegung im Windkanal

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Experimentelle Validierungsmessungen der Vorflügelgeometrie sowie detaillierte Charakterisierung der aerodynamischen Wirkung des Vorflügels mit passiv adaptiver Kinematik.
- Feinabstimmung der passiv adaptiven Vorflügelkinematik im kleinen Windkanal in Oldenburg.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Die Kinematik der passiven adaptiven Vorflügel wurde getestet. Die Validierungsmessungen wurden im Windkanal der Uni Oldenburg durchgeführt.
- Dem Vorflügel wurde ein Begrenzer hinzugefügt, um die kinematische Leistung zu verbessern.
- Charakterisierung des Windkanalmodells mit passiv adaptivem Vorflügel.
- Die Polaren wurden für den passiv adaptiven Vorflügel und dem starren Vorflügel gemessen.

#### Task 3.2.5: Experimentelle Betrachtung extremer Anstellwinkel und dynamischer Anstellwinkeländerungen

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Experimentelle Untersuchungen der Aerodynamik bei extremen Anstellwinkeln
- Charakterisierung der aerodynamischen Kräfte des passiven und starren (mit arretierter Kinematik) Vorflügels.
- Vergleich der aktiven, passiven und starren Vorflügelrealisierungen bei laminaren und turbulenten Anströmbedingungen.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Im kleinen Windkanal der Uni Oldenburg wurden extreme Anstellwinkelmessungen durchgeführt.
- Im großen Windkanal der Uni Oldenburg wurde ein spezieller Aufbau für 360 ° -Polarmessungen aufgebaut.
- Der passiv adaptive und starre (mit arretierter Kinematik) Vorflügel wurden bei turbulenten Anströmbedingungen getestet, die dynamische Anströmwinkeländerungen reproduzieren.
- Die Ergebnisse wurden mit denen des aktiven Vorflügels verglichen.

#### Task 3.2.7: Akustische Charakterisierung mit instationärer Turbulenz

Die im Antrag benannten Ziele wurden nicht vollständig erreicht:

- Das Ziel dieser Task ist die Beurteilung der Lärmentwicklung durch den Vorflügel bei laminaren und bei turbulenten Strömungsbedingungen sowie die Validierung der numerischen Methoden zur Lärmentwicklung
- Bei der Teilaufgabe 3.2.7.3 wurden keine aeroakustischen Versuchen mit der Turbulenzeinströmung und unter der Verwendung eines aktiven Gitters durchgeführt, da der Betrieb des aktiven Gitters eine dominierende Geräuschstörquelle darstellte.
- Zu der Teilaufgabe 3.2.7.11 war die Anwendung einer turbulenten Einströmung für die 2D-RANS-Simulationen sowie das RSNM-Modell nicht physikalisch. Das liegt daran, dass das RSNM-Modell ein statistisches Modell ist und das Modell verwendet das Geschwindigkeitskreuzspektrummodell in den Grenzschichten. Die in der Grenzschicht berechneten Daten können nicht als turbulente Zuflussgrenzbedingungen angewendet werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Aeroakustische Messungen wurden durchgeführt, um die akustischen Hotspots sowie die Fernfeldspektren zu untersuchen.
- Die stationäre Simulationen anhand der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes (RANS) wurden durchgeführt. Basierend auf die RANS-Simulationen, wurde ein statistisches Modell des turbulenten Geschwindigkeitskreuzspektrums (TVCS) zwischen zwei Punkten (Lärmquellen) in der Grenzschicht verwendet. TVSC wird in eine Green Funktionslösung eingegeben, um die Prognose des Fernfeldrauschens zu ermöglichen.
- Die instationären RANS Berechnungen (URANS) wurden ebenfalls durchgeführt, um das zeitabhängige Strömungsfeld zu erfassen.
- Um die Modellgenauigkeit bei der Erfassung der Strömungsablösung zu verbessern, wurden die LES-Simulationen zusammen mit dem Wall Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE)-Turbulenzmodell angewendet.
- Die turbulente Einströmungsrandbedingungen anhand der Divergence Free Synthetic Eddy Methode (DFSEM) für die LES-Simulationen wurde umgesetzt.
- Die Ergebnisse des instationären Nahfeldströmungsfeldes wurden in akustischen Analogien zur Berechnung des akustischen Fernfeld-Lärms bei laminaren und turbulenten Einströmbedingungen verwendet.

#### Task 3.3.2: Bereitstellung Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Aufbau und Bereitstellung einer regelbaren Modellwindturbine mit 1,8 m Durchmesser, mit für eine moderne Windturbine repräsentativem Rotordesign, zur Untersuchung des Einflusses eines starren Vorflügels im aktiv turbulenten Windkanal.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Aufbau des Windkanalmodells und Inbetriebnahme sowie Charakterisierung im Windkanal
- Entwurf und Implementierung eines Basisreglers für den Betrieb mit und ohne Vorflügel
- Messungen im Windkanal mit und ohne starrem Vorflügel in turbulenten Windfeldern
- Untersuchung des Einflusses des Vorflügels auf Ermüdungs- und Extremlasten

#### Task 3.3.3: Windkanaluntersuchungen mit Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment bei turbulenter Anströmung

Die im Antrag benannten Ziele wurden erreicht:

- Unter reproduzierbaren turbulenten Strömungsbedingungen soll der Einfluss der Vorflügel auf das dynamische Verhalten der Gesamtanlage untersucht und beschrieben werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Erzeugung charakteristischer reproduzierbarer Strömung im Windkanal mittels aktivem Gitter und dynamischer Windgeschwindigkeitsänderung mittels Gebläse
- Messungen mit Modellanlage und unterschiedlichen Rotorkonfigurationen (ohne und mit Vorflügel)
- Stochastische Analyse der Anlagendaten mit und ohne Vorflügel
- Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Vorflügel
- Erzeugung einfacher stochastischer Modelle der Anlage mit und ohne Vorflügel

#### Task 3.3.8: Stochastische Analyse der WEA Daten mit und ohne Vorflügel

Die im Antrag benannten Ziele wurden mit Daten einer anderen WEA erreicht:

- Die gemessenen Daten der Windenergieanlage sollen mithilfe stochastischer Methoden analysiert werden. Dabei soll der Einfluss des Vorflügels auf die Dynamik der Anlagendaten untersucht werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Aufbereitung der Anlagendaten mit und ohne Vorflügel. Hierbei wurden vom Industriepartner Daten einer Messkampagne außerhalb von SmartBlades2 zur Verfügung gestellt. Für die Erreichung der Ziele war das irrelevant.
- Stochastische Analyse der Anlagendaten mit und ohne Vorflügel
- Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Vorflügel

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Einzelpositionen sind

- Personalmittel: 1.745.657€
- Sachmittel:
  - 18.207 €: Satz Rotorblätter für Modellanlage mit Durchmesser von 1,8m
  - 44.625 €: Windkanalprofil mit flexibler Hinterkante für Windkanalversuche der Technologie 2

## 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie unter II. 1 beschrieben wurden die geplanten Arbeiten durchgeführt und waren zur Erreichung der Ziele notwendig und angemessen.

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

Zur besseren Übersicht ist die Darstellung taskweise aufgeführt.

### Technologie 1:

#### Task 1.3.14: Strömungsmessung im Rotornahfeld

- Die erzeugten SpinnerLidar-Messungen haben die Definition eines Windfeldmodells für die turbulente Einströmung ermöglicht und Input für Task 1.3.15 geliefert.

#### Task 1.3.15: Auswertung der Strömungsmessung im Rotornahfeld

- Die aufbereiteten Windfelder haben eine Validierung der Anlagendynamik der CART3 Windenergieanlage auf Basis von Echtzeitfällen ermöglicht. Diese erlaubt zukünftig Vergleich mit Validierungen, die auf synthetischen Windfeldern basieren.
- Die aufbereiteten Windfelder sind für die Validierung von Blattverformungsmessungen genutzt worden und stehen auch zukünftig zur Verfügung.

#### Task 1.4.4: Validierung von Strömungs-Struktur-Kopplung und CFD-BEM-Simulationen

- Das entwickelte Untersuchungskonzept der kombinierten Simulation von numerisch reproduzierbaren turbulenten Windfeldern mit einer Fluid-Struktur gekoppelten Anlage wird bereits in aktuellen Untersuchungen verwendet und auch in zukünftigen wissenschaftlichen Fragestellungen in der Arbeitsgruppe zum Einsatz kommen.
- Die daraus resultierende verbesserte Vergleichbarkeit von Experiment und Simulation ist für das Verständnis aerodynamischer Effekte von großer Bedeutung.

#### Task 1.4.7: Optimierungstool für BTC Blätter

Folgende Methoden wurden entwickelt, die für zukünftige Projekte und Arbeiten zur Verfügung stehen

- Es ist ein funktionaler Adjointfield-Solver implementiert, der das adjungierte Feld unter der Annahme der eingefrorenen Turbulenz lösen kann
- Es wird eine kompatible Blade-Parametrisierungslösung erreicht, welche die Adjoint-Lösung und die Blade-Transformation verbindet
- Der gesamte adjungierte Gradient kann berechnet und zur Optimierung auf die Blade-Parameter projiziert werden
- Es wurde eine offene Codestruktur entwickelt, auf der weitere Optimierungsziele und ein zusätzlicher Grenztyp hinzugefügt werden können

### Technologie 2:

#### Task 2.2.2: Validierung aktive geregeltes 2D Blattsegment im turbulenten Windkanal

- Windkanalergebnisse zeigten das Potenzial zur Lastreduktion von aktiven Hinterkanten und konnten dadurch die vielversprechenden Simulationsergebnisse bestätigen.
- Das hergestellte Blattsegment mit der aktiven Hinterkante kann auch in zukünftigen Forschungsprojekten verwendet werden.

#### Task 2.3.3: Erstellung der Ansteuerungsprotokolle für das aktive Gitter im kleinen Windkanal

- Die detaillierte Charakterisierung des aktiven Gitters hat zu einem verbesserten Verständnis des Zusammenhangs zwischen den Gitterbewegungen und der generierten Strömungsbedingungen geführt. Die daraus resultierende Methode der Erstellung der Gitterprotokolle wird auch zukünftig zum Einsatz kommen.

#### Task 2.6.2: Adaption Regelung für Movables an Gesamtsystem

- Die entwickelten Regelungsalgorithmen zeigten in aeroelastischen Simulationen ein großes Potenzial zur Lastreduktion.
- Die neue Methode zur Behandlung von Beschränkungen kann zukünftig die Effektivität von IPC- und besonders von TEFC-Algorithmen erhöhen.

#### Task 2.6.3: Feedforward-Regelung mit LIDIC im Gesamtsystem

- Das neue Messkonzept wurde erfolgreich für die Regelung von aktiven Hinterkanten verwendet.
- Mögliche Unsicherheiten beim neuen Messkonzept wurden analysiert und modelliert, was auch in zukünftigen Forschungsprojekten verwendet werden kann.

#### Task 2.8.3: Vermessung der Blattpolaren

- Der entwickelte Aufbau in Kombination mit der installierten Kraftwaage wird auch in zukünftigen Projekten und Arbeiten zum Einsatz kommen.

### **Technologie 3:**

#### Task 3.0.0: Koordination der Technologie 3

- Die Koordination dieser Technologie liefert keinen expliziten Beitrag zur Verwertung

#### Task 3.1.2: Entwicklung Regelungskonzept

- Die experimentelle Validierung hat gezeigt, dass die Blattlasten durch die Regelung von der aktiven Vorderkante reduziert werden können.

#### Task 3.1.3: Test von Regelkonzepten am 2D-Windkanalmodell

- Es konnte gezeigt werden, dass mit einer entsprechenden Regelung gezielt Fluktuationen der aerodynamischen Kräfte reduziert werden können
- Auch für komplexe Fälle (turbulente Anströmung / Anströmwindfluktuation) kann der aktive Vorflügel die Fluktuationen der aerodynamischen Kräfte reduzieren
- Der Vorflügel ist daher generell zur aktiven Reduktion von Fluktuationen der aerodynamischen Kräfte / und da mit von Last an Windenergieanlagen geeignet.

#### Task 3.2.2: Validierung und Charakterisierung der passiven Vorflügel auslegung im Windkanal

- Die Studie liefert einen „Proof of Concept“ für die passive adaptive Vorflügel Technologie für dicke Profile, wie sie in der Windenergie vorkommen.
- Diese Studie wird beim Entwurf neuer und verbesserter Kinematiken für neue passiv adaptive Vorflügel helfen.

#### Task 3.2.5: Experimentelle Betrachtung extremer Anstellwinkel und dynamischer Anstellwinkeländerungen

- Diese Studie wird helfen, die Aerodynamik der passiv adaptiven Vorflügel bei extremen Anstellwinkeln besser zu verstehen.
- Der neue 360 ° Polar Messaufbau im großen Windkanal der Uni Oldenburg wird auch bei anderen Projekten und Arbeiten zum Einsatz kommen.
- Diese Studie kann bei der weiteren Erforschung verschiedener passiv adaptiver Vorflügelkonzepte helfen.

#### Task 3.2.7: Akustische Charakterisierung mit instationärer Turbulenz

- Der Vorflügel ist abhängig von verschiedenen Konfigurationen als eine der wichtigsten Lärmquellen erkannt worden.
- Im Rahmen dieser Forschung wurde eine Reihe umfangreicher Untersuchungen zum Lärmerzeugungsmechanismus der Vorflügel durchgeführt. Des Weiteren wurde die turbulente Strömung um den passiv adaptiven Vorflügel detailliert ausgelegt. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen den Einfluss der modifizierten sowie verringerten Spaltgröße zwischen dem Vorflügel und dem Hauptelement auf die Lärmreduzierung.

#### Task 3.3.2: Bereitstellung Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment

- Der konkrete Einfluss des starren Vorflügels auf die aerodynamische Charakteristik und Lasten konnte experimentell in statischen und auch wiederholbaren turbulenten Windfeldern untersucht werden.
- Der Effekt der Auftriebserhöhung bei hohen Angriffswinkeln konnte experimentell gezeigt werden.
- Die Modellturbine kann als neuer Basisversuchsaufbau auch für weitere Forschungsprojekte verwendet werden.

### Task 3.3.3: Windkanaluntersuchungen mit Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment bei turbulenter Anströmung

- Die charakteristischen reproduzierbaren Strömungen können für weitere Untersuchungen verwendet werden
- Mit der entwickelten Routine zur Erstellung von Ansteuerungsprotokollen für das aktive Gitter können weitere Strömungen einfach generiert werden
- Die stochastische Analyse wurde für die MoWiTO 1.8 angepasst und kann im Folgenden für unterschiedliche Untersuchungen mit dieser direkt angewendet werden
- Die aus der Analyse extrahierten stochastischen Modelle der MoWiTO 1.8 mit und ohne Vorflügel stehen zur Verfügung und können für theoretische Betrachtungen mit verschiedenen Anströmungen verwendet werden
- Der Vergleich der stochastischen Analyse der Anlage mit und ohne Vorflügel konnte Einblick in die Wirkweise von Vorflügeln an rotierenden Anlagen liefern und Erkenntnisse können bei der Weiterentwicklung helfen.

### Task 3.3.8: Stochastische Analyse der WEA Daten mit und ohne Vorflügel

- Die Langevin Analyse konnte erfolgreich auf die Daten der realen WEA angewendet werden.
- Zusätzlich zu der Leistungskurve konnten Informationen über die Dynamik der Anlage gewonnen werden.
- Der Vergleich der Anlagen mit und ohne Vorflügel, zeigte eine höhere Dynamik für den Fall mit Vorflügel.
- Die Methode kann einfach auf andere Anlagen übertragen werden.

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

Zur besseren Übersicht ist die Darstellung taskweise aufgeführt.

### **Technologie 1:**

#### Task 1.3.14: Strömungsmessung im Rotornahfeld

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 1.3.15: Auswertung der Strömungsmessung im Rotornahfeld

- A. Peña et al.; Inflow characterization using measurements from the SpinnerLidar: The ScanFlow experiment; Journal of Physics: Conference Series 1037; 052027 (2018).
- T. G. Herges et al.; Detailed analysis of a waked turbine using a high-resolution scanning lidar; Journal of Physics: Conference Series 1037; 072009 (2018).

#### Task 1.4.4: Validierung von Strömungs-Struktur-Kopplung und CFD-BEM-Simulationen

- K. Boorsma and J. G. Schepers. "Rotor experiments in controlled conditions continued: New Mexico". Journal of Physics: Conference Series, 753 (2016).
- A. K. Sabale und N. K. V. Gopal, „Nonlinear aeroelastic analysis of large wind turbines under turbulent wind conditions,“ AIAA Journal, pp. 4416-4432 (2019).

#### Task 1.4.7: Optimierungstool für BTC Blätter

- Dwight RP, Brezillon J. "Effect of various approximations of the discrete adjoint on gradient-based optimization". AIAA-2006-0690 (2006)
- B. Dose, "Fluid-structure coupled computations of wind turbine rotors by means of CFD", PhD Thesis (2018)
- L. Vorspel, I. Herraes and J. Peinke, "Towards the optimization of wind turbine rotor blades by means of computational fluid dynamics and the adjoint approach", 34th AIAA applied aerodynamics conference, 13-17 (2016)
- K.C. Giannakoglou, E.M. Papoutsis-Kiachagias, K.T. Gkaragkounis, "adjointOptimisationFoam, an OpenFOAM-based optimisation tool", user manual
- O.Soto, R. Löhner, "On the boundary computation of flow sensitivities", AIAA 2004-112

### **Technologie 2:**

#### Task 2.2.2: Validierung aktive geregeltes 2D Blattsegment im turbulenten Windkanal

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden. Die Arbeiten in Task 2.2.2 sind komplementär zu aktuellen Forschungen zu Smart Blades außerhalb des SB2 Konsortiums.

#### Task 2.2.3: Erstellung der Ansteuerungsprotokolle für das aktive Gitter im kleinen Windkanal

- Mydlarski, L.; A turbulent quarter century of active grids: from Makita (1991) to the present. *Fluid Dynamics Research*, 49(6), 061401 (2017)

#### Task 2.6.2: Adaption Regelung für Movables an Gesamtsystem

- Chen et al.: "System identification and controller design for individual pitch and trailing edge flap control on upscaled wind turbines", Wind Energy, vol. 19, no. 6, pp. 1073-1088 (2016)

#### Task 2.6.3: Feedforward-Regelung mit LIDIC im Gesamtsystem

- Chen et al.: "System identification and controller design for individual pitch and trailing edge flap control on upscaled wind turbines", Wind Energy, vol. 19, no. 6, pp. 1073-1088 (2016)

#### Task 2.8.3: Vermessung der Blattpolaren

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

### **Technologie 3:**

#### Task 3.0.0: Koordination der Technologie 3

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 3.1.2: Entwicklung Regelungskonzept

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 3.1.3: Test von Regelkonzepten am 2D-Windkanalmodell

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 3.2.2: Validierung und Charakterisierung der passiven Vorflügelauslegung im Windkanal

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 3.2.5: Experimentelle Betrachtung extremer Anstellwinkel und dynamischer Anstellwinkeländerungen

- Dem Zuwendungsempfänger sind keine Veröffentlichungen von anderen Stellen zur Bearbeitung dieser Task bekannt geworden.

#### Task 3.2.7: Akustische Charakterisierung mit instationärer Turbulenz

- Albaraccin, Cristobal. "Trailing Edge Noise Prediction using a RANS-based Statistical Method (RSNM)" PhD Thesis, The University of Adelaide, Australia (2018).
- Terracol, M., Manoha, E., and Lemoine, B., "Investigation of the unsteady flow and noise generation in a slat cove," AIAA Journal, Vol. 54, No. 2, 2015, pp. 469–489. doi:10.2514/1. J053479.
- Lockard, D., and Choudhari, M., "Noise Radiation from a Leading-Edge Slat," AIAA Paper 2009-3101, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Miami, FL, USA, 11-13 (2009)
- Herr.M., Pott-Pollenske.M., Ewert,R., Boenke.D., Siebert, J., Delfs,J., Rudenko,R., A. Büscher, A., Friedel, H., Mariotti. I., "Large-Scale Studies on Slat Noise Reduction ", 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, , Dallas, TX, USA, 22-26 (2015)
- Choudhari, M., and Lockard, D. P., and BANC-III Category-7 Team, "Assessment of Slat Noise Predictions for 30P30N High-Lift Configuration from BANC-III Workshop," 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2015-2844, 2015. doi:10.2514/6.2015-2844
- Terracol,M., and Manoha, E., "Wall-Resolved Large Eddy Simulation of a High-Lift Airfoil: Detailed Flow Analysis and Noise Generation Study," 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2014-3050, 2014. doi:10.2514/6.2014-3050
- Choi, H., and Moin, P., "Grid-Point Requirements for Large Eddy Simulation," Physics of Fluids, Vol. 24, 2012, Paper 011702. doi:10.1063/1.3676783
- Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, Royal Society of London Philosophical," Transactions Series A, Vol. 264, No. 1151, 1969,pp. 321–342. doi:10.1098/rsta.1969.0031
- Poletto, R., Craft, T., and Revell, A., "A New Divergence Free Synthetic Eddy Method for the Reproduction of Inlet Flow Conditions for LES", Flow Turbulence Combust (2013) 91:519-539

#### Task 3.3.2: Bereitstellung Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment

- Herráez, I., Daniele, E., Schepers, J. G. (2018). Extraction of the wake induction and angle of attack on rotating wind turbine blades from PIV and CFD results. Wind Energy Science, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.5194/wes-3-1-2018>

#### Task 3.3.3: Windkanaluntersuchungen mit Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment bei turbulenter Anströmung

- Mydlarski, L.; A turbulent quarter century of active grids: from Makita (1991) to the present. *Fluid Dynamics Research*, 49(6), 061401 (2018)
- Hearst, R. J., & Ganapathisubramani, B.; Tailoring incoming shear and turbulence profiles for lab-scale wind turbines. *Wind Energy*, 20(12), 2021-2035 (2017)

#### Task 3.3.8: Stochastische Analyse der WEA Daten mit und ohne Vorflügel

- Lee, C. Y. J., Stuart, P., Clifton, A., Fields, M. J., Perr-Sauer, J., Williams, L., Cameron, L., Geer, T. & Housley, P. (2020). The Power Curve Working Group's Assessment of Wind Turbine Power Performance Prediction Methods. *Wind Energy Science*, 5(NREL/JA-5000-76102).

### **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Zur besseren Übersicht ist die Darstellung taskweise aufgeführt.

#### **Technologie 1:**

##### Task 1.3.14: Strömungsmessung im Rotornahfeld

- Es sind bisher keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder konkret geplant

##### Task 1.3.15: Auswertung der Strömungsmessung im Rotornahfeld

- A. P. Kidambi Sekar et al.; Evaluation of the LINCOM wind field reconstruction method with simulations and full-scale measurements; *Journal of Physics: Conference Series* **1037**; 052008 (2018).

##### Task 1.4.4: Validierung von Strömungs-Struktur-Kopplung und CFD-BEM-Simulationen

- Rahimi, H., „Validation and improvement of numerical methods for wind turbine aerodynamics: development of an engineering model for yawed conditions derived from computational fluid dynamics“, PhD Thesis (2018)
- Dose, B., “Fluid-structure coupled computations of wind turbine rotors by means of CFD“, PhD Thesis (2018)
- Dose, B., Rahimi, H., Herráez, I., Stoevesandt, B., & Peinke, J. (2018). Fluid-structure coupled computations of the NREL 5 MW wind turbine by means of CFD. *Renewable energy*, 129, 591-605.
- Dose, B., Rahimi, H., Stoevesandt, B., & Peinke, J. (2020). Fluid-structure coupled investigations of the NREL 5 MW wind turbine for two downwind configurations. *Renewable Energy*, 146, 1113-1123.
- Dose, B., Rahimi, H., Stoevesandt, B., Peinke, J., & Schepers, J. G. (2018). On the effect of blade deformations on the aerodynamic performance of wind turbine rotors subjected to yawed inflow. *The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2018)*, 1037, 1-12.

##### Task 1.4.7: Optimierungstool für BTC Blätter

- Vorspel, L., „Development of a tool for aerodynamical optimization of wind turbine rotor blades using the adjoint approach“ PhD Thesis (2019)
- Vorspel, L., Stoevesandt, B., & Peinke, J.; Optimize rotating wind energy rotor blades using the adjoint approach. *Applied Sciences*, 8(7), 1112 (2018)
- Vorspel, L., Schramm, M., Stoevesandt, B., Brunold, L., & Bünner, M.; A benchmark study on the efficiency of unconstrained optimization algorithms in 2D-aerodynamic shape design. *Cogent Engineering*, 4(1), 1354509 (2017)

#### **Technologie 2:**

##### Task 2.2.2: Validierung aktive geregeltes 2D Blattsegment im turbulenten Windkanal

- Forghani, M., Petrovic, V., and Kühn, M.: “Experiments of wind turbine active flap control using a stationary blade segment in wind tunnel“, EAWE PhD Seminar, Cranfield, United Kingdom (2017) (Vortrag)

##### Task 2.3.3: Erstellung der Ansteuerungsprotokolle für das aktive Gitter im kleinen Windkanal

- Es sind bisher keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder konkret geplant

##### Task 2.6.2: Adaption Regelung für Movables an Gesamtsystem

- Ungurán, R., Petrović, V., Boersma, S., van Wingerden, J., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Feedback-feedforward individual pitch control design for wind turbines with uncertain measurements“, *American Control Conference (ACC)*, Philadelphia, USA (2019) (Vortrag)
- Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Smart rotor control of wind turbines under actuator limitations“, *American Control Conference (ACC)*, Philadelphia, USA (2019) (Vortrag)
- Petrović, V., Berger, F., Neuhaus, L., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., and Kühn, M.: “Wind tunnel validation of wind turbine load reducing concepts based on individual pitch control and blades with rigid leading edge slats“, *Wind Energy Science Conference*, Cork, Ireland (2019) (Vortrag)
- Unguran, R.: „Lidar-assisted feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flaps control of variable-speed wind turbines,“ PhD dissertation, Carl von Ossietzky University of Oldenburg (2019).

- Ungurán, R., Petrović, V., Boersma, S., van Wingerden, J., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Feedback-feedforward individual pitch control design for wind turbines with uncertain measurements,” in American Control Conference (ACC), pp. 4151–4158, doi: 10.23919/ACC.2019.8814757 (2019)
- Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Smart rotor control of wind turbines under actuator limitations”, in American Control Conference (ACC), pp. 3474–3481, doi: 10.23919/ACC. 2019.8815001 (2019)

#### Task 2.6.3: Feedforward-Regelung mit LIDIC im Gesamtsystem

- Ungurán, R., Petrović, V., and Kühn, M.: “Investigation of the blade mounted lidar use for feedforward individual pitch and trailing edge flaps control in Large-Eddy Simulation”, Wind Energy Science Conference 2017, Copenhagen, Denmark (2017) (Vortrag)
- Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Performance evaluation of a blade-mounted LiDAR with dynamic versus fixed parameters through feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flap control”, TORQUE 2018, Milan (2018) (Vortrag)
- Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Performance evaluation of a blade-mounted LiDAR with dynamic versus fixed parameters through feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flap control”, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1037, p. 032004, doi: 10.1088/1742-6596/1037/3/032004 (2018)

#### Task 2.8.3: Vermessung der Blattpolaren

- Es sind bisher keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder konkret geplant

### **Technologie 3:**

#### Task 3.0.0: Koordination der Technologie 3

- Es sind keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder geplant

#### Task 3.1.2: Entwicklung Regelungskonzept

- Es sind bisher keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder konkret geplant

#### Task 3.1.3: Test von Regelkonzepten am 2D-Windkanalmodell

- Neuhaus, L., Singh, P., Homeyer, T., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., Peinke, J. & Hölling, M. (2018, June). Mitigating loads by means of an active slat. TORQUE 2018, Milan (2018) (Poster)
- P. Singh, L. Neuhaus, O. Huxdorf, J. Riemenschneider, J. Wild, J. Peinke and M. Hölling; Airfoil load mitigation by an active slat under turbulent inflow conditions. Wind Energy Science Conference, Cork (2019)
- P. Singh, L. Neuhaus, O. Huxdorf, J. Riemenschneider, J. Wild, J. Peinke and M. Hölling Mitigation of turbulence-induced loads by an active slat. Wind Physics Symposium 2019, Oldenburg (2019)
- Neuhaus, L., Singh, P., Homeyer, T., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., Peinke, J. & Hölling, M.; Mitigating loads by means of an active slat. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1037, pp. 1-8). Institute of Physics (IOP) Publishing (2018)
- geplant: Journal Paper über open loop Regelung mit dem aktiven Vorflügel für unterschiedliche turbulente Anströmungen
- geplant: Journal Paper über den Vergleich von closed loop und open loop Regelung mit dem aktiven Vorflügel für unterschiedliche turbulente Anströmungen

#### Task 3.2.2: Validierung und Charakterisierung der passiven Vorflügelauslegung im Windkanal

- geplant: Journal Papier zur experimentellen Validierung passiv adaptiver Vorflügel.

#### Task 3.2.5: Experimentelle Betrachtung extremer Anstellwinkel und dynamischer Anstellwinkeländerungen

- geplant: Journal Paper über den Vergleich von experimentellen Daten und CFD für sinusförmige Anströmbedingungen.

#### Task 3.2.7: Akustische Charakterisierung mit instationärer Turbulenz

- “Aeroacoustic Analysis of a Two-Element Airfoil with a Leading Edge Slat Using Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity Model for Large-Eddy Simulation”, DAGA 2019 - 45. Jahrestagung für Akustik, 18 - 21 March 2019, Rostock, Germany (2019)
- “Aerodynamic Simulation of Flow over Passive-Adaptive Slat for a Wind Turbine Airfoil”, Wind Energy Science Conference (WESC) 2019, 17-20 June, Cork, Ireland (2019)
- geplant: Aerodynamic Simulation of Flow over Passive-Adaptive Slat for a Wind Turbine Airfoil (Wind Energy)
- geplant: Aeroacoustic Analysis of a Two-Element Airfoil with a Leading Edge Slat Using Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity Model for Large-Eddy Simulation (International Journal of Aeroacoustics)
- geplant: Experimental study of the Influence of Reynolds Numbers and Angles of attack on Slat Noise (International Journal of Aeroacoustics)

#### Task 3.3.2: Bereitstellung Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment

- Berger, F., Kröger, L., Onnen, D., Petrović, V., and Kühn, M.: „Scaled wind turbine setup in a turbulent wind tunnel“, EERA DeepWind Conference, Trondheim, Norway (2018) (Vortrag)
- Berger, F., Hölling, M., and Kühn, M.: “Scaled wind turbine test setup in a wind tunnel with active turbulence generation for induction aerodynamics, load and control experiments“, NAWEA WindTech Conference, Boulder (2017) (Vortrag)
- Berger, F., and Kühn, M. (2018): “Experimental investigation of dynamic inflow effects with a scaled wind turbine in a controlled wind tunnel environment“, The Science of Making Torque from Wind, Milan, Italy (2018) (Vortrag)
- Berger, F., Kröger, L., Onnen, D., Petrović, V., & Kühn, M.; Scaled wind turbine setup in a turbulent wind tunnel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1104(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012026> (2018)
- Berger, F., & Kühn, M.; Experimental investigation of dynamic inflow effects with a scaled wind turbine in a controlled wind tunnel environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/5/052017> (2018)
- Petrović, V., Berger, F., Neuhaus, L., Hölling, M., & Kühn, M.; Wind tunnel setup for experimental validation of wind turbine control concepts under tailor-made reproducible wind conditions. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1222, No. 1, p. 012013). IOP Publishing (2019)

Task 3.3.3: Windkanaluntersuchungen mit Windkanalmodell (1,8m Durchmesser) mit Vorflügelsegment bei turbulenter Anströmung

- Lars Neuhaus, Frederik Berger, Joachim Peinke, and Michael Hölling: Capturing wind turbine power curve and dynamics by atmospheric-like inflow at lab-scale, Wind Energy Science Conference 2019, 17.-20. June 2019, Cork, Ireland (2019)
- geplant: Journal Paper über Vorflügelexperimente mit turbulenter Anströmung

Task 3.3.8: Stochastische Analyse der WEA Daten mit und ohne Vorflügel

- Es sind bisher keine Veröffentlichungen im Rahmen dieser Task geschehen oder konkret geplant

# Erfolgskontrollbericht

DLR

Zuwendungsempfänger Carl von Ossietzky Universität Oldenburg	Förderkennzeichen: 0324032 D
Vorhabenbezeichnung: SmartBlades2	
Laufzeit des Vorhabens: 49 Monate	
Berichtszeitraum: 01.09.2016 bis 30.09.2020	

Part III: Erfolgskontrollbericht

**Dieser Abschnitt des Abschlussberichts ist vertraulich.**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht
3. Titel Schlussbericht SmartBlades2	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hölling, Michael	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2020
	6. Veröffentlichungsdatum /
	7. Form der Publikation keine
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>Carl von Ossietzky Universität Oldenburg</b>  Ammerländer Heerstraße 114-118 26129 Oldenburg  ForWind – Zentrum für Windenergieforschung AG Turbulenz, Windenergie und Stochastik (Projektleiter) AG Windenergiesysteme Küpkersweg 70, 26129 Oldenburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution /
	10. Förderkennzeichen 0324032 D
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) S. Hackhofer, Jülich	
18. Kurzfassung In der Windenergiebranche geht der Trend zu immer größeren Rotorblättern, die aufgrund des fluktuierenden und heterogenen Windfeldes sehr starken dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Gemeinsames Ziel in Forschung und Industrie ist die Reduktion mechanischer Belastungen auf die Windenergieanlage um entweder die Anlage zuverlässiger oder kostengünstiger zu gestalten. Das Teilvorhaben von ForWind-Oldenburg im Rahmen von SmartBlades2 verfolgt zum einen die systematische Weiterführung der in Projekt »Smart Blades« (FKZ 0325601) erarbeiteten Ergebnisse bzw. den Einsatz der entwickelten Methoden und Tools. Zum anderen sollen durch experimentelle und numerische Untersuchungen grundlegende Beiträge zur Weiterentwicklung aller drei Technologien hin zu höheren technischen Reifegraden geliefert werden.	
19. Schlagwörter Rotorblatt; Rotor; Lastreduktion; Lastminimierung; Regelung; Passive Regelung; Biege-Torsions-Kopplung; Aktive Regelung; Flexible Hinterkante; aktiver Vorflügel; starrer Vorflügel; passiv adaptiver Vorflügel; Windenergieanlage; Windkraftanlage; Windenergie; Windkanaluntersuchungen; Turbulenz; turbulente Anströmung; Zuverlässigkeit; CFD Methoden, CFD/BEM Kopplung	
20. Verlag /	21. Preis /

# **Anhang E**

## **Schlussbericht WRD**

Der Schlussbericht vom Partner WRD wurde dem Projektträger bereits vorab versendet und ist daher in diesem Gesamtdokument nicht enthalten.

# **Anhang F**

## **Schlussbericht GE**

Der Schlussbericht vom Partner GE wurde dem Projektträger bereits vorab versendet und ist daher in diesem Gesamtdokument nicht enthalten.

# **Anhang G**

## **Schlussbericht Suzlon**

Der Schlussbericht vom Partner Suzlon wurde dem Projektträger bereits vorab versendet und ist daher in diesem Gesamtdokument nicht enthalten.

# **Anhang H**

## **Schlussbericht SSB**

Der Schlussbericht vom Partner SSB wurde dem Projektträger bereits vorab versendet und ist daher in diesem Gesamtdokument nicht enthalten.

**Anhang I**  
**Technologieberichte**

# SmartBlades2

---

## **Bau, Test und Weiterentwicklung intelligenter Rotorblätter**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324032 A/B/C/D/E/F/G/H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Zusammenfassung

Der Trend zu immer größeren Rotorblättern in der Windenergiebranche hält weiter an, da dies direkt mit der Effizienz einer Windenergieanlage korreliert. Die dadurch induzierten starken dynamischen Belastungen der Rotorblätter, sowie der Gondel und des Mastes, hervorgerufen durch das inhomogene und auch oszillierende Windfeld, bedingen eine sorgfältige Überwachung und zusätzliche Maßnahmen, um den sicheren Betrieb solcher Anlagen gewährleisten zu können. In Fortführung des Vorgängerprojekts SmartBlades werden im Rahmen dieses Verbundvorhabens drei verschiedene Rotorblattkonzepte weiter untersucht, die durch aktive und passive Maßnahmen eine Entlastung der Struktur erzielen sollen, indem die aerodynamischen Bedingungen geeignet beeinflusst werden. Diverse Messkampagnen begleiten dieses Vorhaben, in dem unter anderem vier Rotorblätter mit Biege-Torsions-Kopplung gebaut, untersucht und getestet wurden. Andere Technologien studieren aktive Hinterkanten und diverse Vorflügel an geeigneten Funktionsdemonstratoren. Schließlich spielt auch die Bewertung und die akustische Evaluierung eine zentrale Rolle in der Bedeutung dieses Vorhabens für die Industrie der Windenergieanlagen.

## Inhalt

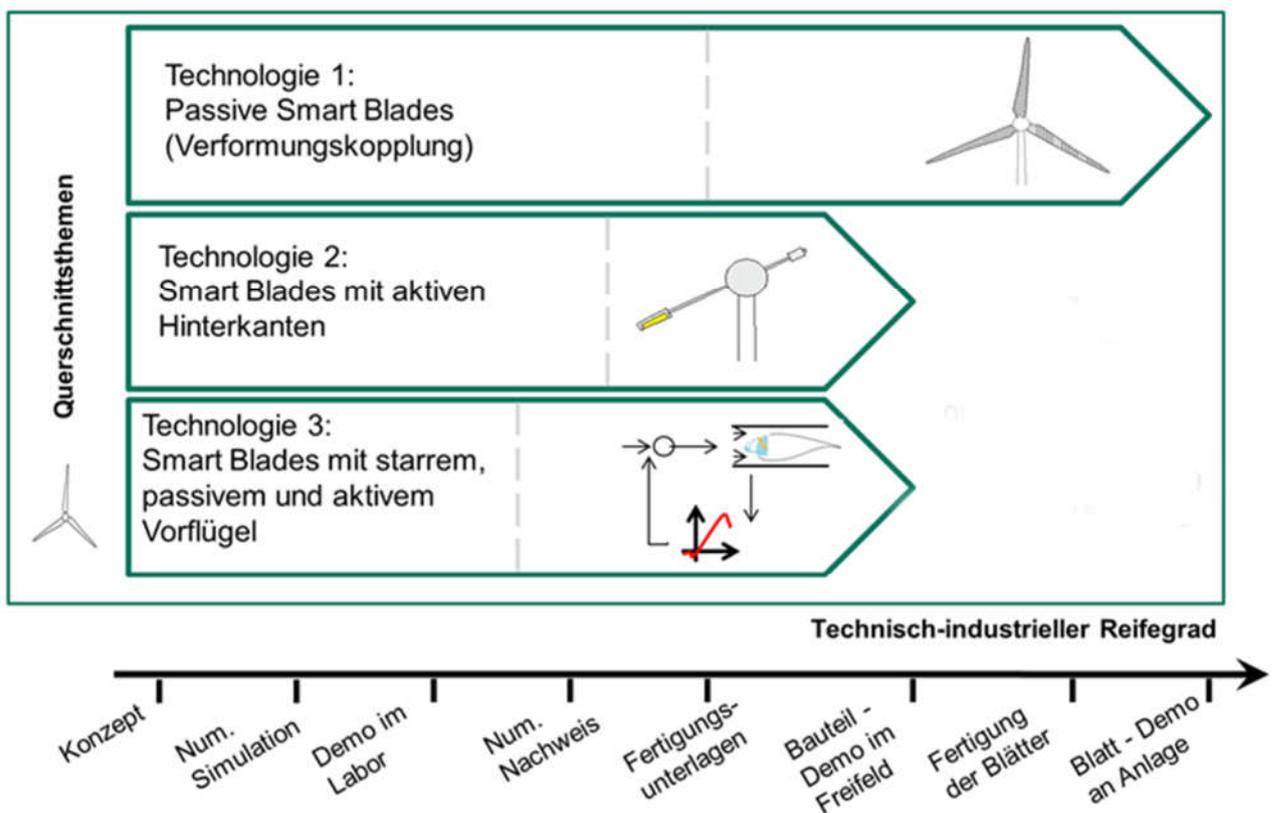
1	Einleitung (Dr. Jan Teßmer) .....	76
2	Technologie 1: Biege-Torsions-Kopplung (Dr. Bernhard Stoevesandt)..	79
2.1	Gesamtziel .....	79
2.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	79
2.3	Stand der Technik.....	81
2.4	Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse .....	82
2.5	Deliverables-Berichte.....	88
2.6	Fazit.....	88
3	Technologie 2: Aktiven Hinterkanten (Dr. Johannes Riemenschneider)	91
3.1	Gesamtziel .....	91
3.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	91
3.3	Stand der Technik.....	92
3.4	Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse .....	93
3.5	Deliverables Berichte.....	96
3.6	Fazit.....	96
4	Technologie 3: Vorderkantenklappen (Dr. Michael Hölling) .....	97
4.1	Gesamtziel .....	97
4.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	98
4.3	Stand der Technik.....	99
4.4	Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse .....	101
4.5	Deliverables Berichte.....	109
4.6	Fazit.....	109
5	Technologie 4 (Dr. Claudio Balzani) .....	111

5.1 Gesamtziel .....	112
5.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	112
5.3 Stand der Technik.....	114
5.4 Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse .....	116
5.4.1 Arbeitspaket 4.1: Klebnähte.....	116
5.4.2 Arbeitspaket 4.2: Flattern.....	118
5.4.3 Arbeitspaket 4.3: Nichtlineare Regelung .....	120
5.4.4 Arbeitspaket 4.4: Technologiebewertung .....	121
5.5 Deliverables Berichte .....	122
5.6 Fazit .....	122
6 Externes Literaturverzeichnis.....	125

# 1 Einleitung (Dr. Jan Teßmer)

Das Projekt „SmartBlades2“ (FKZ 0324032 von 2016 - 2020) hat als Folgeprojekt von „SmartBlades“ (FKZ 0325601 von 2012 - 2016) einen Beitrag zur Entwicklung intelligenter Rotorblätter für Windenergieanlagen geleistet. Mit 11 Partnern konnten im Projekt wesentliche Kompetenzen in der deutschen Windenergieforschung gebündelt werden, um in vorwettbewerblicher Zusammenarbeit Grundlagen für effiziente Rotorblatttechnologien auszuarbeiten, die zukünftig auf betriebs- und volkswirtschaftlicher Ebene ihre Wirkung im internationalen Wettbewerb entfalten sollen.

Hierbei stand im Gegensatz zu vielen Projekten mit sehr eingeschränktem Fokus die multidisziplinäre Forschung entlang der gesamten Entwicklungskette von Rotorblättern auf der Agenda.



**Abbildung 1:** Forschung entlang der gesamten Entwicklungskette von Rotorblättern

Mit diesem Ansatz war eine konsequente Ausrichtung auf die Forschung zu Fragestellungen verbunden, die eine signifikante Wirkung für den wirtschaftlichen Erfolg im Zuge der Energiewende erzielen können.

Aus dem Energiesystem heraus kommen die übergeordneten Anforderungen bezüglich Funktionalität und Sicherheit an die Technologie. Hierzu haben die Forschenden bereits im Projekt SmartBlades technologische Ideen und Konzepte entwickelt. Dazugehörige Software-Methoden zur Auslegung, Messtechnik zur Charakterisierung und Testpläne zur Validierung ergeben das Grundgerüst auf technisch-wissenschaftlicher Seite. Die Betrachtungen bezüglich Energieertrag, Kosten, Lärm und Sicherheitskonzept ermöglichen darauf aufbauend Business-Case Untersuchungen, die letztendlich Voraussetzung für eine spätere Realisierung im industriellen Maßstab sind.

In diesem facettenreichen Spannungsfeld war es wichtig im Projektkonsortium eine angemessene Akteursbeteiligung zu erreichen.

Das DLR (als Koordinator), das Fraunhofer-IWES und die ForWind-Universitäten aus Hannover und Oldenburg konnten im Projekt SmartBlades2 direkt auf ihren vorbereitenden Entwicklungen in SmartBlades aufsetzen. Aus der Industrie haben sich NORDEX & SENVION (ohne Förderung) sowie GE, SUZLON und WRD als WEA-Hersteller sowie Henkel (ohne Förderung) und SSB als Zulieferer im Konsortium engagiert.

Technologisch wurden die Projekte SmartBlades und SmartBlades2 genutzt, um Ideen mit nachhaltigem Potenzial aber auch mit erheblichem Entwicklungsrisiko zu verfolgen. Drei Stränge wurden dabei verfolgt:

- Technologie 1: Nutzung von Kopplungseffekten in den Verformungen aus Biegung und Torsion (BTK) in den Rotorblättern
- Technologie 2: Nutzung von aktiven Stellgliedern an der Blatt-Hinterkante
- Technologie 3: Nutzung von adaptiven Mechanismen an der Blatt-Vorderkante

Neben diesen Strängen wurden in der „Technologie 4“ Querschnittsthemen und allgemeine Fragestellungen aus dem Materialbereich (z.B. Verklebungen), zu Betriebsmodi (mit Reglermodellen) und zur Systemsicherheit (z.B. aeroelastische Stabilität) untersucht. Ein Bewertungsschema wurde entwickelt und ein Referenzanlagenmodell (IWT-7.5-164) wurden entwickelt, auf deren Basis auch in Zukunft weitergearbeitet werden kann.

Im Rahmen des Projektes sind umfangreiche Publikationen entstanden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zu den einzelnen Technologien ist in den nachfolgenden Kapiteln zu finden.

Neben etlichen Hardware-Komponenten sind umfangreiche Software-Methoden entwickelt worden, die als Enabler für die Konzepte dienen sollen. Für das BTK-Konzept hat sich gezeigt, dass ein Potenzial vorhanden ist, dass für die Nutzung aber auch das Design akkurat beherrscht werden muss. Für die Mechanismen an Vorder- und Hinterkanten haben sich vielfältige Optionen ergeben, die auch unter dem Gesichtspunkt der Geräuschentwicklung beherrschbar erscheinen.

Als Ausblick aus dem Projekt SmartBlades2 bleibt festzuhalten, dass kurz- wie auch langfristig noch etlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Eine Vielzahl von Parametern sollte für aussichtsreiche Konfigurationen detailliert weiter untersucht werden. Neben-Einflüsse, die bisher von untergeordneter Bedeutung waren, werden im Zuge der neuen Technologien zu Haupt-Einflüssen und müssen methodisch sicher beherrscht werden. Hierfür ist eine umfangreiche Forschungsinfrastruktur, nach Möglichkeit in örtlicher Nähe zu den Forschergruppen, notwendig, damit Versuche flexibel angepasst und die Messergebnisse wissenschaftlich vernünftig genutzt werden können. Letztendlich müssen auch Standards angepasst werden, um mögliche technische Reserven auch zulassungsrechtlich ausnutzen zu dürfen.

## **2 Technologie 1: Biege-Torsions-Kopplung (Dr. Bernhard Stoevesandt)**

### **2.1 Gesamtziel**

Die Biege-Torsions-Kopplung (BTK) ist eine sehr zukunftsweisende Technologie in der Windenergie Branche. Gerade aufgrund der zunehmenden Flexibilität der Rotorblattdesigns, aber auch wegen der inhärenten Passivität der Technologie, die keine ausfallanfällige Steuerungselemente benötigt, ist die Technologie besonders für lange Rotorblätter prädestiniert. Vor diesem Hintergrund wurde im vorangegangenen Projekt ein 80m langes Rotorblatt für eine 7,5 MW Windenergieanlage entworfen, um theoretisch, das Potenzial des Konzepts aufzuzeigen. Gleichzeitig wurden diverse Programme (meist Tools – „Berechnungswerkzeugen“ entsprechend - genannt) zur Berechnung der Eigenschaften von Blättern basierend auf dieser Technologie entwickelt. Im vorliegenden Projekt ging es nun darum all diesen Entwicklungen eine valide Basis zu geben, da rein theoretische Berechnungen nicht hinreichen, um eine Anlagenauslegung zu begründen.

In der Technologie 1 wurden deshalb neben der Entwicklung von Tools zur Auslegung intelligenter Rotorblätter mit Biege-Torsions-Kopplung (BTK) Fertigungsunterlagen für ein 20m langes Demonstrationsblatt mit eben dieser Kopplung erstellt. Anhand der Unterlagen war das Ziel die Fertigung dieser Rotorblätter und der Test der Technologie in realer Anwendung. Dieser Test sollte mit einer Messkampagne begleitet werden, um eine Validierung der entwickelten Methoden und Tools für die Nutzung von BTK zu erlauben. Zwar war dieses Rotorblatt deutlich kleiner und in den Eigenschaften nicht dem Nutzen entsprechend wie bei heutigen Blattlängen der Multi-MW-Anlagen. Doch das Ziel des Projekts war die Überprüfung der Methoden, Programme und des Know-Hows der Projektpartner in Bezug auf diese Technologie. Dafür war eine Messkampagne mit deutlich kleineren Blättern an einer kleineren Anlage ausreichend, um am Ende die Aussagen, die für große Blätter gemacht werden konnten mit einer Validität zu untermauern. Zudem erlaubte die Testkampagne auch die Erprobung von Messmethoden für die Evaluation aerodynamischer und aeroelastischer in situ Messungen an Windenergieanlagen.

### **2.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Auch wenn, das Hauptziel des Projekts die Validierung und Evaluation des Konzepts der BTK war, so waren in dem Projekt in der Technologie damit einhergehend zahlreiche zusätzliche wissenschaftliche und technische Arbeitsziele vorgesehen, die zusätzlich verfolgt wurden. Diese ließen sich in fünf verschiedene Einzelbereiche aufteilen:

1. Der Bau von vier Rotorblättern für die Messkampagne. In die Rotorblätter sollte Sensorik für die Kampagne integriert werden. Das Ziel war es die gesamte Lebenspanne der Rotorblätter von Bau über Transport bis zur Entsorgung nachzuvollziehen.

2. Um die Sicherheit der Blätter für die Messkampagne garantieren zu können, aber auch um zusätzliche Informationen über das elastische Verhalten der Blätter zu generieren sollte ein Blatttest am Teststand des Fraunhofer IWES in Bremerhaven durchgeführt werden. Zudem sollten durch weitere Tests mehr Informationen über das strukturelle Verhalten der Blätter gewonnen werden.
3. Anschließend war das Ziel eine umfangreiche Messkampagne im Freifeld an einer Windenergieanlage im Testfeld des NREL in Colorado durchzuführen. Die durch die neuartigen Blätter veränderte Anlage sollte mit einem angepassten Regler versehen werden, mit umfassender Messtechnik ausgestattet werden und anschließend in Betrieb genommen werden. Die über einen längeren Zeitraum gewonnenen Daten sollten anschließend aufbereitet und ausgewertet werden. Aus der umfangreichen Testmatrix für den Feldtest sollte für annähernd alle kritischen Lastfälle Aussagen über das Verhalten von BTK-Blättern abgeleitet werden können.
4. Die gewonnenen Daten sowohl aus den Blatttests, als auch der Messkampagne im Freifeld sollten dann mit allen in der Entwicklung verwendeten Methoden und Tools verglichen und somit die Tools validiert werden. Ziel war, so die Tools aller Partner validieren zu können. Ziel war es die Qualität der Aussagekraft im Rahmen einer Bewertung der 80m Rotorblattmodelle deutlich zu erhöhen.
5. Schließlich war das gewählte Design der BTK nicht alternativlos. Daher gab es zusätzlich noch das Ziel das gewählte Konzept mit anderen Konzepten der BTK zu vergleichen und somit Optimierungspotenzial zu ergründen. Speziell war das Ziel die Effektivität der Biege-Torsions-Kopplung zu steigern und negative Effekte, wie die aus der BTK resultierende Steigerung der strukturellen Belastungen durch die Torsion, zu reduzieren. Hierfür wurden insbesondere neue strukturelle und aerodynamische BTK-Konzepte auch in Kombination weiter analysiert.

Damit lässt sich zusammenfassend sagen, dass das wissenschaftliche und technische Ziel der Forschung zu dieser Technologie war, diese zu einer praktischen Anwendbarkeit in der Windenergie zu bringen. Die Ausführung sollte die Technologie soweit bringen, dass im Anschluss alle weiteren Entwicklungen im Rahmen der Industrie für die direkte Nutzung möglich sein sollten.

## 2.3 Stand der Technik

Seit über 15 Jahren gibt es Ansätze zur Untersuchung von passiven intelligenten Rotorblattkonzepten mit Biege-Torsions-Kopplung. Hierzu gehören das „TX-100“ Blattmodell und das „Swept Twist Adaptive Rotor (STAR) Blade“ Projekt von Sandia National Laboratories (SNL).

Das TX-100 Rotorblatt mit einer Gesamtlänge von 9m wurde mit einer strukturellen Biege-Torsions-Kopplung entwickelt und hergestellt und nachträglich getestet [52] [4]. Durch den Einsatz von kohlefaserverstärktem Kunststoff wurden durch die Verwendung außeraxialer Lagen Kopplungen zwischen Biegung und Torsion ermöglicht. Im STAR Projekt wurden ein 27,1m langes Blatt mit einer geometrischen Biege-Torsions-Kopplung hergestellt und ein BTK-Rotor an einer Zond 750 Anlage getestet und vermessen [1].

Auffallend an beiden Projekten ist die nicht weiter beschriebene numerische Simulation der Gesamtanlagen. Vielmehr wurden anhand von vorherigen Messungen der Bestandsanlagen die auslegungsrelevanten Lasten verwendet. Die Blätter wurden beide nach strukturellen Aspekten hergestellt und nachträglich an den Anlagen ausgewertet [2]. Auch wegen der nicht vorhandenen Modelle der Versuchsanlagen können auf Basis dieser beiden Projekte keine nachträglichen Validierungen von neu entwickelten Toolketten und Simulationsprogrammen durchgeführt werden. Beide Projekte gaben eine Indikation für das Potential der passiven Konzepte. So wurden zwar Messungen an kritischen Punkten, sowie die Leistungskurve der Windanlagenkonfigurationen vermessen, jedoch wurden das Torsionsmoment an der Blattwurzel und der Effekt der Biege-Torsions-Kopplung an der Versuchsanlage nicht berücksichtigt. Dadurch war eine Auswertung der Auswirkung der passiven Konzepte auf das Pitchsystem von modernen Windenergieanlagen nicht möglich. Die DTU in Dänemark beschäftigt sich u.a. innerhalb der Doktorarbeit „Light Weight Rotor Design - Combined passive and active control methods“ mit aktiven und passiven Möglichkeiten zur Lastenreduktion an Rotorblättern von Windenergieanlagen. Hier wurden bereits Steuerungen von Swept Blättern sowie weitere sweep Konfigurationen untersucht. Dies führte zu vor allem theoretischen Untersuchungen der Eigenschaften von BTC-Blättern in der Aeroelastik [44] [45].

Das europäische Innwind Projekt [42] untersucht im dortigen WP2 Konzepte mit passiver Lastreduzierung an einem detaillierten Blattmodell basierend auf der DTU10MW Anlage.

In diesem Projekt wurde der Fokus auf die Effekte der passiven Konzepte vorerst ohne auf die Herstellungskosten oder auf reale Restriktionen der Fertigbarkeit gelegt.

Insgesamt hat die Forschungsaktivität rund um BTC-Blätter in der Projektlaufzeit zugenommen. Nicht überraschend, handelt es sich dabei jedoch primär um theoretische Betrachtungen meist entweder der Blattstruktur (bspw. bei York [50]), oder um Diskussionen der aeroelastischen Stabilität [31] [53]. Reale wissenschaftliche Tests von BTC-Blättern an Windenergieanlagen hat es in der Projektlaufzeit nicht gegeben.

## **2.4 Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse**

Im Gegensatz zu vielen anderen Forschungsprojekten in der Aerodynamik oder Aeroelastik war die Forschung in Technologie 1 mit besonderen Herausforderungen verbunden: Blätter für eine Windenergieanlage zu entwerfen, zu produzieren und an einer Anlage zu vermessen und diese Messungen wiederum mit den theoretischen Berechnungen abzugleichen ist eine große Herausforderung für das gesamte Forschungsteam. Dies ist umso mehr relevant als das viele der Schritte, die unternommen werden mussten zum ersten Mal von den Forschungspartnern vorgenommen wurden. Dies hatte zur Folge, dass eine größere Anzahl von Komponenten zur Herstellung von Windenergieanlagenblättern beschafft und anschließend kalibriert und getestet werden mussten. Das Ziel war, dass die Fertigung der Blätter optimal überwacht werden konnten, um strukturelle Schwächen der Blätter durch Fertigungsfehler auszuschließen. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Tests von Infusionsmessungen durchgeführt.

Gleichzeitig wurde das aus Smart Blades I gewonnene Blattdesign sowohl vom DLR für den Fertigungsprozess als auch vom Fraunhofer IWES mit Unterstützung einer externen Beratungsfirma für die Vollständigkeit der Fertigung überprüft. Dabei wurden alle relevanten Elemente der Blätter berücksichtigt, die für eine Nutzung im Feld notwendig sind, wie z.B. Steg, Holmgurt, Blitzschutz, Wuchtkammer, Stegverstärkung für den Blatttest oder auch Ersatzmassen. Abgesehen davon waren die vollständigen Informationen zur Fertigung der Schalen für die Blattfertigung von großer Bedeutung. Erst nach der Überprüfung der Vollständigkeit der Unterlagen wurde mit dem Bau von vier Rotorblättern begonnen.

Die Blätter waren für die CART-3 Anlage (Control Advanced Research Turbine - 3) auf dem Testfeld des NREL bei Boulder in Colorado vorgesehen. Dabei handelte es sich um eine drei Blatt-WEA mit 600 kW Nennleistung, welche ursprünglich auf einem Anlagen Design der Firma Westinghouse aufsetzt [11]. Das vierte Blatt wurde, einem für die Verwendung an realen Windenergieanlagen üblichen Blatttest am Fraunhofer IWES vorgesehen.

Um die Fertigung zu begleiten und mögliche Schwachstellen bei der Infusion vorhersagen zu können wurden Infusionssimulationen an den Blättern durchgeführt. Diese dienten dazu, mögliche Schwachpunkte bei der Infusion vorher zu erkennen. Da jedoch bisher keine Erfahrung mit dem Bau von WEA-Blättern beim DLR vorlagen, diente der Prozess auch dazu die Vorhersagen der Simulationen zu verifizieren. Dies konnte tatsächlich durchgeführt und Problemzonen gut vorhergesagt werden.

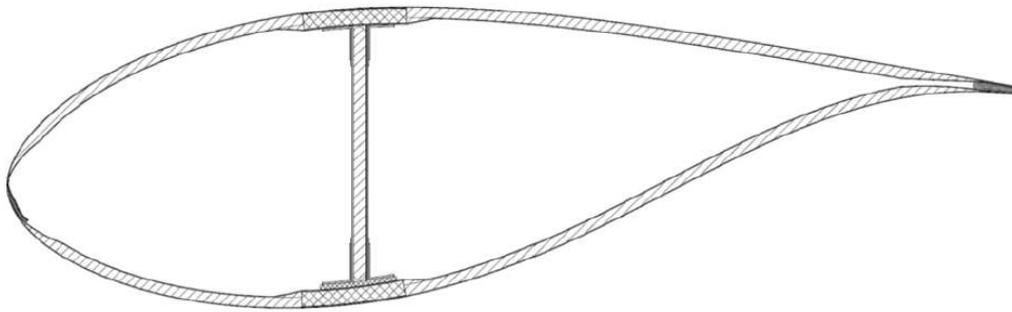
Bei den Rotorblättern handelt es sich um Schalenkonstruktionen, gefertigt aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Als Matrix wurde ein Epoxidharz verwendet. Der Tabelle 1 sind die allgemeinen technischen Daten der Rotorblätter zu entnehmen.

**Tabelle 1: Allgemeine technische Daten**

Durchmesser des Rotors	41,6 m
Nenn Drehzahl	37,1 U/min
Länge des Rotorblatts	20 m
Maximale Sehnenlänge	2,38 m
Max. Vorbiegung	1 m
Blattgewicht	Ca. 1800 kg

Die Rotorblätter wurden in einer Halbschalenbauweise gefertigt. Die wichtigen Bestandteile der Rotorblätter, wie Holmgurte, Stege sowie die Flanscheinleger wurden vorgefertigt (Prefab) und später zu einer Halbschale (Druck- bzw. Saugseite)

zusammengesetzt. Die fertigen Halbschalen wurden mit einem Klebstoff miteinander verbunden. Die Abbildung 2 zeigt einen Querschnitt der Rotorblätter.



**Abbildung 2: Querschnitt des Rotorblatts mit Klebflächen und Steg**

Schließlich wurde eine umfassende Prozessbewertung für die Fertigung der Rotorblätter durchgeführt. Diese umfasste neben einer Diskussion der Methoden auch eine Kostenanalyse für die Produktion von Rotorblättern.

So weit möglich wurden die Rotorblätter vor der Verschiffung mit Messsensorik ausgestattet. Durch den Eigenbau war es möglich Sensoren schon vor der Verklebung der Blätter einzufügen.

Das Finishing der Rotorblätter beinhaltet das Entfernen von Materialresten vorangegangener Fertigungsschritte an Vorder- und Hinterkante sowie an der Blattwurzel. Außerdem werden einige Lagen Handlaminat im Bereich der Blattwurzel hinzugefügt und die Rotorblätter werden lackiert. Schlussendlich erfolgen, das Einsetzen der Anschlussbolzen und die Auswuchtung der Rotorblätter.

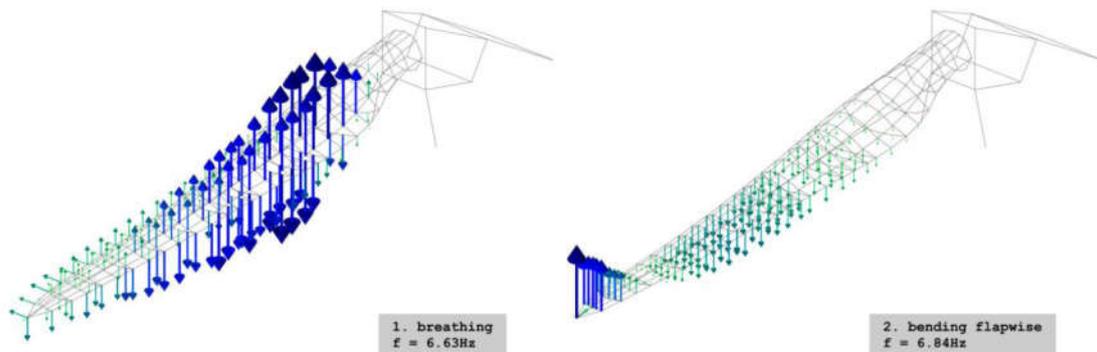
Die fertigen Rotorblätter wurden dann zur Montage zum NREL in Colorado verschifft. Ein Blatt wurde zum Test an das Fraunhofer IWES Bremerhaven geschickt, um einen umfassenden Blatttest durchzuführen.

Der Test am Fraunhofer IWES diente einerseits dazu, die hinreichende Festigkeit des Blatts für die Verwendung an der Anlage zu prüfen, andererseits lieferte er zudem detaillierte Informationen über die realen strukturellen Eigenschaften des Blatts nach der Fertigung. Zudem konnten in dem Test auch Sensoren auf ihre Eignung für die Feldtests untersucht werden. Es wurden zu diesem Zweck unterschiedliche Test an dem Blatt durchgeführt. U.a. wurden maximale Biegemomente in Schlag und Schwenkrichtung, Torsion statisch,

sowie dynamische Ermüdungslasttest mit 980227 Zyklen in Schlag und 1584757 Zyklen in Schwenkrichtung durchgeführt.

Das Blatt wurde vor bzw. nach den Tests sowie während der Ermüdungstests mehrmals visuell untersucht. Nur bei dem Torsionstest gab es bei der Lastschere 4 einen Schaden, der sich aber während der weiteren Tests nicht vergrößerte. Auch das Blitzschutzsystem hat die Tests ohne Einschränkungen überstanden. So dass sich sagen lässt, dass das Blatt die Tests zur Funktionalität ohne große Einschränkungen überstanden hat.

Bei einer Modalanalyse wurde die Sensorverteilung gegenüber den Tests in freien Randbedingungen angepasst. Die Auflösung wurde erhöht auf 29 instrumentierte Querschnitte, 15 davon mit Saugseiteninstrumentierung, und einer größeren Sensordichte über die Profiltiefe. Insgesamt wurden 288 Beschleunigungssignale gemessen; aufgeteilt auf Rotorblatt (266), Einspannplatte des Prüfstands (10) und seitliche Anbringung am Prüfstand (12). So konnte eine Modalanalyse der Blattschwingungen sehr detailliert durchgeführt und mit Simulationen abgeglichen werden (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Verschiedene Moden der Blattschwingungen beim Blatttest.**

Die drei nicht im Test verwendeten Blätter wurden auf das Freifeld Testgelände des National Renewable Energy Laboratory in Boulder, Colorado verbracht um an die CART-3 Anlage montiert zu werden. Da die Anlage dadurch neue Blätter, mit einer leichten passiven Selbstregelung bekamen, musste der Regler der Anlage modifiziert werden. Dafür wurde ein Reglermodul erstellt, welches vor allem die Grenzen des Pitch verändert hat, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Dieses wurde gemeinsam mit dem

Gesamtmodell der Anlage dem Projekt für Validierungsrechnungen zur Verfügung gestellt.

Die Blätter wurden vor der finalen Installation mit weiteren Sensoren ausgestattet. Auch wurde die Anlage selbst mit Sensoren ausgestattet. Tabelle 2 führt die installierten Sensoren an Anlage und Blättern im Rahmen des Projekts auf.

**Tabelle 2 Liste der installierten Sensoren im Rahmen des Projekts mit Positionsangabe. Dabei ist z hier die radiale Position in mm am Blatt.**

Sensoren	Blatt	installiert	plausibilisiert	kalibriert	betriebsbereit
<b>Aerodynamische Sonde bei z = 5000</b>	3	✓	✓	✓ (vor Einbau)	✓
<b>Aerodynamische Sonde bei z = 17000</b>	3	✓	✓	✓ (vor Einbau)	✓
<b>Dehnmessstreifen an Blattwurzel</b>	1, 2, 3	✓	✓	✓	✓
<b>Dehnmessstreifen bei z = 4000</b>	1	✓	✓	✓	✓
<b>Dehnmessstreifen bei z = 8000</b>	2,3	✓	✓	✓	✓
<b>SSB BladeVision</b>	1,2,3	✓	✓	x	✓ (bedingt)
<b>Lidar</b>	N/A	✓	✓	✓	✓
<b>Aerodyn. Wollfäden</b>	3	✓	N/A	N/A	✓
<b>Blattspitzensensor</b>	3	✓	x	✓ (vor Einbau)	✓ (bedingt)
<b>Betriebsdatenerfassung NREL-CART3-Anlage</b>	N/A	✓	Teilweise	Teilweise	✓ (bedingt)
<b>Windmessdatenerfassung des meteorologischen NREL-Messmasts 4.2</b>	N/A	✓	Teilweise	Teilweise	✓ (bedingt)

Manche der Sensoren waren nur bedingt einsatzbereit. So waren manche Messungen durch das optische System von SSB eingeschränkt durch Verarbeitungsschwierigkeiten beim Finish des Blattbaus. Die zwei verbleibenden Lasermodule der Blattspitzensensoren, die in den USA installiert wurden als die Blätter noch am Boden lagen, funktionierten zunächst, wurden jedoch beim Anschließen eines Messdatenerfassungssystems für einen vereinfachten Ground Vibration Test beschädigt. Es erfolgte der Austausch der beschädigten Lasermodule und die Installation der Schutzschaltung. Der Defekt des Sensorsystems in Anlagen Blatt 3 konnte mit dieser Maßnahme sofort behoben werden. Trotz der Fertigung der Komponenten für drei Sensorsysteme und der Vorbereitung der Installation in alle 4 Blätter konnte nur ein Blatt (Anlagenblatt 3) mit einem funktionierenden Sensor ausgerüstet werden. Dieser Sensor wurde bis zur Anzeige in der Messwerte erfolgreich getestet. Neu entwickelt wurde in dem Projekt eine Methode zur exakten Auswertung von Spinner-Lidar Daten zur Bestimmung der Einströmung vor der Anlage.

Die Messkampagne mit Aufzeichnung der Daten wurde am 21.1.2019 gestartet. Am 19.02.2019 wurde am Getriebe der CART3 Anlage ein Schaden festgestellt, sodass die Messkampagne bis zum Austausch des Getriebes unterbrochen wurde. In dieser Zeit war jedoch ein Trudel-Betrieb (Leerlauf) der Anlage möglich, sodass vereinzelt Messdaten zu diesem Betriebsbereich bis einschließlich 13.03.2019 aufgezeichnet wurden. Am 13.05.2019 erfolgte die Wiederaufnahme des Anlagenbetriebs und die reguläre Messdaten-Aufzeichnung bis einschließlich 04.06.2019. Anschließend musste aufgrund von Zollbestimmungen ein Teil der Messinstrumente abgebaut und zurückgeschickt werden. In Ergänzung zu den verschiedenen Messsystemen an den Rotorblättern erfolgte die Installation von Wollfäden an der Saugseite der Rotorblattoberfläche und die Videoaufnahme dieser während des Anlagenbetriebs. Hieraus lässt sich im Allgemeinen das aerodynamische Verhalten des Rotorblattes an der CART3 Anlage erkennen und Rückschlüsse auf die aerodynamische Auslegung der Rotorblätter ziehen. Die Wollfäden zeigen unter anderem den Verlauf der Luftströmung an der Oberfläche des Blattes, also in welchen Bereichen sich die Strömung ablöst oder noch anliegt.

Aufgrund der Verzögerungen in der Messkampagne und einer unklaren Perspektive der CART 3 Anlage, sowie finanzieller Schwierigkeiten des NREL, wurde sich anschließend

entschlossen, die Messkampagne nicht mehr fortzuführen. Daher lagen am Ende der Kampagne nur manche der angestrebten Lastfälle der Testmatrix in den Messdaten vor.

Trotz allem sind in dem Projekt diverse Messdaten generiert worden, die genutzt wurden, um diverse Berechnungswerkzeuge auf verschiedenen Ebenen zu validieren. Die Universität Hannover (Code: MoCA), das DLR (Ansys/ABAQUS, Nastran/CQuad4&8), das Fraunhofer IWES (MoWiT) und WRD (u.a. Simulink) haben die mechanischen Eigenschaften des Blatttests genutzt, um das Biege- und Schwingungsverhalten des Blatts in unterschiedlichen Detailgrad zu validieren. Die Universität Oldenburg (OpenFOAM) und das Fraunhofer IWES (OpenFOAM, MoWiT) nutzen die vorliegenden Daten aus der Freifeldmesskampagne an der WEA um ausgewählte Situationen in den jeweiligen Tools zu validieren.

Gleichzeitig wurden Anstrengungen unternommen Blattdesigns für BTK zu verbessern im Vergleich zu den Arbeiten aus Smart Blades I. Die Universität Hannover untersuchte die Möglichkeit durch Stringerschalen in den Blättern einen positiven Effekt zu erzeugen, kam aber zu dem Schluss das dies nicht immer empfehlenswert sei. Das Fraunhofer IWES untersuchte alternativ den Ausbau von Retrofit-Blättern. Hier lag der Schwerpunkt vor allem auf der Evaluation der Lasten. Schließlich betrachtete das DLR noch Konstruktionsvariationen für das SB I Rotorblatt der 7,5 MW Anlage. Insbesondere wurden hier C-Balken und „Swpt“-Balken betrachtet, mit deren Hilfe sich am Ende das Gewicht der Blätter um ca. bis zu 10% reduzieren ließen.

## **2.5 Deliverables-Berichte**

Die Deliverables sind als Anhang K diesem Bericht angehängt.

## **2.6 Fazit**

Die Technologie 1 der BTK in Projekt Smart Blades 2 stellte eine echte Herausforderung dar, da sie Forschung mit realer Anwendung an einem Demonstrator im Freifeld verknüpfte. Das Ziel war darin sehr viele verschiedene Forschungsergebnisse zur Anwendung zu bringen und auf ihre Fähigkeiten und Validität zu prüfen. Dies ist zum Großteil gelungen.

Mit den Ergebnissen aus Smart Blades 1 konnte ein Rotorblattdesign entwickelt werden, welches zum Bau von vier Rotorblättern genutzt wurde. Dies erlaubte auch den Einbau von Messsensorik, welche für die Vermessung der Eigenschaften der Blätter im Blatttest und im Freifeld vorgesehen war. Dafür wurden zum Teil neu entwickelte Sensoren eingebaut und getestet. Die Fertigung der Blätter wurde durch das DLR vorgenommen, wobei auch an der Fertigungstechnik geforscht werden konnte.

Eines der Blätter wurde anschließend einem umfassenden Blatttest unterzogen. Hier hat sich gezeigt, wie wertvoll ein solcher Test unter kontrollierten Bedingungen für die Validierung von Blattdesigns sein kann. Durch die verschiedenen Tests wurde es möglich die Eigenschaften, insbesondere der Schwingungen des Blatts zu untersuchen. Insbesondere erlaubten die Ergebnisse eine detaillierte Modalanalyse und die Validierung der Ansätze für die Moden der verschiedenen verwendeten Berechnungs-Codes.

Drei der Blätter wurden für einen Freifeldtest am Testfeld des NREL in Boulder Colorado verschifft, mit umfassender Sensortechnik ausgestattet und an die CART 3 Anlage montiert. Auch hier kamen zusätzliche neue Messmethoden zum Einsatz, wie z.B. Gondel-Lidar oder auch Blattspitzen Sensoren, welche die Bewegung der Blattspitzen vermessen sollten. Ein Teil der Sensoren wurde vor Ort montiert.

Die anschließende Messkampagne musste leider deutlich verkürzt werden wegen eines Defekts der Anlage, der nicht mit dem Projekt im Zusammenhang stand. Schließlich wurde entschieden zur Risikominimierung die Messkampagne abubrechen. So konnten nur Teile, der avisierten Daten gewonnen werden, was eine Gesamtvalidierung aller Rechnungsmethoden unmöglich machte. Trotzdem konnten auch die so gewonnenen Daten genutzt werden, um Teile der Validierung mit der Freifeldmesskampagne durchzuführen. Insbesondere die Berechnungscodes, welche auf die strukturelle Blattauslegung ausgerichtet waren, konnten dagegen schon am Blatttest validiert werden.

Auch wenn in Technologie I nicht alle Ziele erreicht werden konnten, da insbesondere die Messkampagne im Freifeld abgebrochen werden musste, so sind doch erhebliche Erkenntnisse und Daten gewonnen worden. Diese wurden im Projekt schon zur Validierung der verwendeten Methoden genutzt. Ob am Ende das BTK-Blatt an der CART

3 Anlage effizienter war, lässt sich wegen der kurzen Messdauer nicht abschließend sagen. Dies war, wegen der kurzen Blattlänge nicht das Ziel des Projekts. Vielmehr ging es darum die Funktionsweise der Technologie zu verstehen, die Schwierigkeiten und Möglichkeiten in der Praxis zu erforschen und damit die Möglichkeit der Nutzung zu eröffnen. Dies ist mit dem Projekt sehr weitgehend gelungen.

## **3 Technologie 2: Aktive Hinterkanten (Dr. Johannes Riemenschneider)**

### **3.1 Gesamtziel**

Auch die Technologie 2 zielt auf eine Reduzierung von Betriebslasten ab. Im Gegensatz zur Technologie 1, die gezielt auf eine passive Kopplung zwischen Anströmung und Blattdeformationen setzt und damit eine vorher fest eingestellte Reaktion der Blätter auf Anströmung implementiert, handelt es sich bei der Technologie 2 um eine aktive Technologie, die in der Lage ist, je nach Betriebspunkt unterschiedlich zu reagieren, oder auch gar nicht zugeschaltet zu sein. Das untersuchte Prinzip basiert auf einer auftrieberzeugenden Hinterkante, wie sie prinzipiell von Flugzeugen her bekannt ist. Im Projektverlauf sollten dabei verschiedene Aspekte der Technologie beleuchtet werden. Im Vordergrund stehen dabei die Größe der erreichbaren Lastminderung und die Auswirkung derselben auf einzelnen Komponenten der Windkraftanlage wie Blattwurzeln, Turmkopf und Turmfuß. Dabei werden unterschiedlichste Kombinationen mit der Pitchregelung untersucht. Basis für diese Fragestellung sind Simulationsmodelle, die im Projekt SmartBlades aufgebaut worden waren. Einen weiteren Schwerpunkt stellen Untersuchungen zur strukturellen Umsetzung dar. Hierzu wurde im Vorgängerprojekt ein Demonstrator aufgebaut, der an einem Blattsegmentprüfstand unter Zentrifugallasten die Arbeitsweise des Konzeptes nachweisen konnte. Außerdem wurden mit dem Demonstrator Windkanaluntersuchungen durchgeführt, um die Wirksamkeit der Technologie zu zeigen. Darüber hinaus werden Aspekte wie die Akustik, Ermüdung, Ausfallsicherheit und Sensorkonzepte für das Konzept einer aktiven Hinterkante betrachtet. Alle Ergebnisse fließen in eine Gesamtbewertung der Technologie ein.

### **3.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Ziel der Technologie 2 ist die Demonstration der Funktionsfähigkeit von aktiven SmartBlades mit flexibler Hinterkante auf Segmentebene, die Validierung von Tools zur Auslegung flexibler Hinterkanten, der Vorentwurf eines Blattes mit flexibler Hinterkante und die Weiterentwicklung lastmindernder Regelungskonzepte.

### 3.3 Stand der Technik

Verschiedene Projekte wurden inzwischen durchgeführt um einzelne Komponenten oder Technologien von intelligenten Rotorblättern zu betrachten.

Untersuchungen zur aktiven Lastkontrolle an Windenergieblättern begannen circa Anfang der 2000 Jahre an verschiedenen Orten bei unterschiedlichen Forschergruppen.

An der TU Delft wurden Lastreduktionsmöglichkeiten, basierend auf formvariablen Hinterkanten, sowohl simulativ als auch im Windkanal untersucht. Für die Windkanalmodelle fanden piezoelektrische Biegeumformer an der Hinterkante Anwendung, mit denen eine kontinuierliche Verformung möglich ist. Damit konnte die prinzipielle Wirksamkeit des Verfahrens im Windkanal gezeigt werden, eine Anwendbarkeit der piezoelektrischen Wandler an realen Blättern ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Dimension nicht gegeben.

In dem DFG geförderten Projekt zur Entwicklung von aktiven Strömungsbeeinflussungselementen im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Wind turbine load control under realistic turbulent inflow conditions“ untersuchen die Universitäten Oldenburg, TU Berlin, TU Darmstadt, RWTH Aachen und Stuttgart einerseits das aeroelastische Verhalten bei der Nutzung aktiver Elemente, wie auch die Aerodynamik an Profilen im Windkanal. Auch dieses Projekt bewegt sich stark auf dem Boden der Grundlagenforschung und strebt keine so weite Entwicklung an, dass ein Einbau in Anlagen möglich würde.

Parallel zu den bereits genannten Initiativen fanden an den Sandia National Laboratories (SNL) in den USA umfangreiche simulative Untersuchungen zu Lastreduktionstechnologien statt. Neben der Verwendung von Kohlefasern in der Windenergie und Blättern mit Biege-Torsionskopplung wurden auch aktiv ansteuerbare Hinterkanten umfangreich in deren Wirkung simuliert. Höhepunkt der Untersuchungen war die experimentelle Vermessung einer Hinterkante an einem 9m langen Blatt an einer Experimentalturbine im Rahmen des SMART Wind Turbine Rotor Projekts. Hierbei wurde jedoch eine diskrete Hinterkante mit Gelenk vergleichbar mit den Steuerrudern eines Flugzeugs verwendet, um die aerodynamische Wirkung nachzuweisen. Anforderungen für Windenergieanlagen hinsichtlich Mediendichtigkeit lassen sich so nicht umsetzen.

Weitere Forschungsaktivitäten zur Windenergie finden sich bei der Technischen Universität in Dänemark (DTU) bei der Forschungsgruppe Windenergie. Dort wurde im Rahmen des Projektes ADAPWIND untersucht, inwieweit sich die Strömung durch flexible Hinterkantenklappen beeinflussen lässt. Dabei ist dieses Projekt grundlagennah, da viele Zusammenhänge zunächst simulativ untersucht werden. Den Abschluss bildet die Vermessung einer Hinterkante im Windkanal. Dabei werden jedoch piezoelektrische Aktoren als Antriebe der Hinterkante verwendet, die prinzipbedingt nur über einen geringen Hub verfügen. In einem nachfolgenden Projekt INDUFLAP wird das Konzept der flexiblen Hinterkante weiterentwickelt und in Form eines Prototypen mit 2m Spannweite und 1m Profiltiefe an einer Rotationsversuchsanlage auch in relevanter Umgebung untersucht. Das gewählte Konzept der aktiven Hinterkante unterscheidet sich jedoch grundsätzlich, indem ein extrudiertes Elastomerteil verwendet wird, bei dem zusätzlich die Profiltiefe geringer ist. Ein exakter Ausschlag der Hinterkante erscheint somit durch die Nachgiebigkeit der Elastomerteile gegenüber einer Faserverbundkonstruktion eher fraglich.

Im Rahmen von INNWIND wurde eine weitere Hinterkante an der Rotationsversuchsanlage untersucht, die eine einseitig durchgehende Haut, eine Silikonunterseite und dazwischen eine auxitische Struktur verwendet. Diese Struktur kann nur in positiver Richtung ausgeschlagen werden.

Im Nachfolgeprojekt INDUFLAP 2 fanden weitere Untersuchungen an aktiven Hinterkanten in Zusammenarbeit mit Siemens Gamesa statt. Zentrales Ziel dabei war die Implementierung einer flexiblen Hinterkante an einer realen Windenergieanlage. Dafür wurde eine pneumatisch betriebene Hinterkante verwendet. Deren Ausschlag ist jedoch nur in eine Richtung möglich und geringer als bei der in Smartblades 2 ausgelegten Hinterkante.

### **3.4 Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse**

Zur Vorbereitung der Validierungsversuche für eine flexible Hinterkante (deliverable 2.1.1.1 bis 2.1.3.2) wurde der in Smartblades 1 ausgelegten und gebauten Segmentdemonstrator für den Schleuderversuch am Standort Campus Risø der Dänischen Technischen Universität ertüchtigt. Dazu gehörten der Aufbau einer Bewegungsplattform,

die Energieversorgung für alle Komponenten, die Steuerung der Servomotoren, der Anschluss der Dehnmessstreifen sowie der Druckmessung. Parallel wurde in enger Abstimmung mit den Industriepartnern von ENERCON und GE eine Testmatrix erstellt, welche im Wesentlichen drei Ziele hatte:

1. Nachweis der Funktion der flexiblen Hinterkante in einer realistischen Umgebung unter Zentrifugallasteinfluss
2. Bestimmung der Einflüsse der Hinterkante auf Aerodynamik und Anlagendynamik
3. Versuch der Verringerung der 1p Schwingung mittels Steuerung und Regelung

Die eigentliche Messkampagne fand vom 09.04. bis 20.04.2018 am Rotationsversuchsstand der DTU in Risø, Dänemark statt. Während der Kampagne wurden folgende Daten erhoben: Beschleunigungen am Segment und an der Hinterkante, Dehnungen im Mechanismus und in der Hinterkante, Druckverläufe, Anströmung, Dehnungen am Ausleger selber.

Grundsätzlich wurden vier verschiedene Modi vermessen:

1. Stufenförmiger Ausschlag der Hinterkante um 1/3, 2/3 und Vollausschlag um die Neutralstellung mit jeweils 15s Haltezeit zur Bestimmung der Klappenpolare
2. Sinusförmiger Ausschlag der Hinterkante in Abhängigkeit des Azimutwinkels des Rotors mit unterschiedlicher Phase
3. Anstellwinkelproportionaler Ausschlag mit Anstellwinkeldruckdifferenz der Fünflochsonde als Referenz
1. Biegemomentenproportionaler Ausschlag der Hinterkante mit Schlagbiege-DMS im Rotorarm als Referenz

Insgesamt wurden so 109 Lastfälle mit jeweils ca. 5min Versuchsdauer vermessen. Die Daten stehen in geeigneter Weise zu Validierungszwecke zur Verfügung (Task 2.1.5).

In einer Reihe von Tasks wurden diese Ergebnisse zu Validierungszwecken herangezogen. Erwähnenswert ist hier insbesondere Das Deliverable 2.1.12 und 2.1.13, in dem die Industriepartner ihre Validierung darstellen.

In den Arbeitspaketen 2.2.x wurden Messungen von aktiven Hinterkanten an einem Windkanalmodell durchgeführt und bis hin zu einem Reglertest als Hardware in the loop Aufbau umgesetzt. Die Ergebnisse dazu finden sich im Deliverable 2.2.2.7.

Auch die Lebensdauer wurde untersucht. Einerseits numerisch (Deliverable 2.3.3.1+2) und ebenfalls experimentell 2.3.1.1+2. Dabei wurden zumindest die möglicherweise kritischen Bereiche in diesem Hinterkantendesign untersucht und analysiert.

Im Deliverable 2.4.7.1 wurden die Anforderungen von Seiten der Industrie zusammengetragen. Dies ist ein sehr hilfreiches Dokument, da es die Anforderungen der Industrie zusammenfasst und einen Leitfaden für die weitere Untersuchung der Technologie darstellt. Außerdem wurden erste Analysen durchgeführt, um die Ansätze aus AP2.1, welche alle im Modellmaßstab umgesetzt wurden, auf den realen Anlagenmaßstab zu überführen. Dies wurde sowohl für den Mechanismus selber (Deliverables 2.4.5.1 & 2) als auch für das umgebende Blatt (Deliverable 2.4.4.1-3) durchgeführt. Ein erstes Design für den Ausschnitt der Klappe aus dem Blatt wurde erarbeitet. Hier müsste sich als nächstes ein interdisziplinäres Design zusammen mit den anderen Disziplinen anschließen, um die Lastreduktion und die Gewichtszunahme des Blattes spezifizieren zu können.

Im Arbeitspaket 2.5 wurde die Auswirkung dieser Thematik auf die Akustik einer Anlage untersucht. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Bereitstellung einer neuen – nun für die Großausführung repräsentativen - Datenbasis aus AWB-Messungen
- Erfolgreiche Validierung der Methode FRPM/FMCAS, welche für die akustische Technologiebewertung sowohl in Task 2 und 3 verwendet wurde
- Übertragung auf die Großausführung: Ergebnisse der Simulationen & der Messungen mit und ohne Minderungsmaßnahmen bestätigen die Dominanz des klassischen Hinterkantengeräuschs gegenüber der Klappe, d.h. die Klappe erweist sich für Designbedingungen als akustisch neutral.

Im Arbeitspaket 2.6 wurde die Arbeiten zur Reglerentwicklung weitergetrieben. Hier ist insbesondere die Entwicklung einer feedback-feedforward Regelung zu benennen, die im Task 2.6.3 entwickelt wurde und auf blattbasierten LIDAR Systemen basiert.

Die geplante komplette Berechnung der kompletten Lastfälle durch einen Industriepartner konnte leider wegen des frühzeitigen Ausstiegs dieses Partners nicht stattfinden.

Das Arbeitspaket 2.7.1 zeigt welche Möglichkeiten eine Hinterkante basierend auf multistabilen Elementen für bringt. Es konnte gezeigt werden, dass hier Potential besteht, das aber noch bei einem relativ niedrigen Reifegrad liegt. Daher wurde die Beantragung eines DFG Projektes in Betracht gezogen.

Im Arbeitspaket 2.8 wurde der Demonstrator aus 2.1 in einem Windkanal untersucht. Es wurden Polaren aufgezeichnet, die mit Simulationen – gerade der Industriepartner – erfolgreich abgeglichen werden konnten. Die Messdaten wurden archiviert und stehen den Partnern für weitere Validierungen zur Verfügung.

### **3.5 Deliverables Berichte**

Die Deliverables sind unter Anhang K in diesem Bericht angehängt.

### **3.6 Fazit**

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten führten zu einem deutlich vertieften Verständnis verschiedenster Aspekte für die Umsetzung von aktiven Hinterkanten von Windenergieanlagen. So wurden zahlreiche Methoden entwickelt, welche die unterschiedlichsten Herausforderungen der Technologie von der Reglerimplementierung und der Gesamtanlagensimulation bis hin zu Strukturauslegung abdecken. Diese Methoden stehen zur weiteren Auslegung und Bewertung entsprechender Konzepte zur Verfügung. Es konnte gezeigt werden, welches Potential für die Lastreduktion in dem Konzept liegt und wie das Zusammenspiel von aktiver Hinterkante und Individual Pitch aussehen könnte. Dabei sind die unterschiedlichen Kombinationen der Maßnahmen besonders wertvoll. Zur Validierung von Simulationen wurden eine Windkanalmesskampagne und ein Rotationstest erfolgreich durchgeführt. Diese Daten konnten die vorausgesagten Potentiale der Technologie bestätigen.

## 4 Technologie 3: Vorflügel (Dr. Michael Hölling)

Die Ergebnisse der Technologie 3 des ersten SmartBlades Projektes haben gezeigt, dass mithilfe eines aktiven Vorflügels die aerodynamischen Beiwerte eines Profils beeinflusst werden können. Eine detaillierte Charakterisierung eines Profils mit aktivem Vorflügel unter laminarer Einströmung zeigte die Bandbreite der Beeinflussbarkeit. Ein wichtiger Aspekt für die Anwendbarkeit in der Windenergie ist allerdings nicht die Reaktion des Systems auf stationäre Situationen, sondern die Reaktion auf sich schnell ändernde Anstellwinkel. In experimentellen Untersuchungen im Windkanal wurde ein Profil mit aktivem Vorflügel unter zeitlich periodisch variierenden Anströmwinkeln vermessen. Das Ergebnis zeigt, dass auch in diesen hoch dynamischen Strömungsbedingungen die Einstellungen des aktiven Vorflügels so angepasst werden können, dass Fluktuationen in den wirkenden Kräften minimiert werden. Damit wurde erfolgreich die prinzipielle Anwendbarkeit mit dem „proof of concept“ für den Bereich der Windenergie gezeigt. Bevor aktive Vorflügel jedoch an realen Windenergieanlagen zum Einsatz kommen können, gibt es noch einige offene Punkte zu klären. Ein zentraler Punkt betrifft die Umsetzung eines Vorflügels und die Frage ob ein Vorflügel wirklich aktiv angesteuert werden muss. Aufgrund beweglicher Teile und einer aktiven Regelung sind aktive Vorflügel fehleranfälliger als z. B. rein passive Elemente. Nachdem die prinzipielle Wirksamkeit im Projekt SmartBlades gezeigt wurde, ist im nächsten Schritt zu untersuchen, inwieweit andere, weniger komplexe Bauformen von Vorflügeln ebenfalls positive Auswirkung auf die lokale Aerodynamik am Rotorblatt besitzen. Die Abstufung geht hier von dem aktiven Vorflügel über eine passiv adaptive Kinematik, die aufgrund der lokalen Kräfte die Ausrichtung des Vorflügels ändert, hin zu einem rein starren Vorflügel ohne entsprechende Variabilität. Diese drei Varianten eines Vorflügels sollten in der Technologie 3 dieses Projektes näher untersucht werden.

### 4.1 Gesamtziel

Im Vorgängerprojekt SmartBlades wurde das Potential der Vorflügeltechnologie für den prinzipiellen Einsatz an Windenergieanlagen anhand eines aktiven Vorflügels mit aufwendiger Mechanik aufgezeigt. Das übergeordnete Gesamtziel der Technologie 3 im Rahmen von SmartBlades2 war zu untersuchen, ob und inwieweit sich eine Reduzierung der Komplexität der Vorflügeltechnologie auf die Beeinflussbarkeit der lokalen Aerodynamik unter dynamischen Einströmbedingungen auswirkt. Hierfür sollten drei Konzepte betrachtet werden:

#### **Hohe Komplexität: aktiver Vorflügel**

Aktive Vorflügel bieten mithilfe einer getriebenen Mechanik die Möglichkeit die Form oder die Position bzw. Ausrichtung des Vorflügels aktiv zu verändern. In diesem Projekt konnte die Hinterkante des Vorflügels verformt werden, sodass die Spaltbreite zwischen

Vorflügelhinterkante und Hauptprofil variiert werden konnte.

### **Mittlere Komplexität: passiv adaptiver Vorflügel**

Passiv adaptive Vorflügel besitzen eine Mechanik, die es ebenfalls erlaubt die Position bzw. Ausrichtung des Vorflügels zu verändern. Für diese Veränderungen ist eine passive Kinematik nötig, die den Vorflügel mittels lokal wirkender Kräfte an die Strömungssituation anpasst. In diesem Projekt wurde die Position des Vorflügels relativ zum Hauptprofil mithilfe der Kinematik verändert.

### **Geringe Komplexität: starrer Vorflügel**

Starre Vorflügel besitzen keine Möglichkeit ihre Form oder Position am Hauptprofil zu verändern.

Neben der reinen aerodynamischen Wirksamkeit eines Vorflügels ist ebenfalls der Einfluss auf die zusätzliche Lärmentwicklung ein wichtiger Aspekt für den Einsatz an realen Windenergieanlagen. Ein weiteres Ziel in dieser Technologie war es, ein besseres Verständnis von der Entstehung lokaler Lärmquellen am Vorflügel bis hin zur Akustik der Gesamtanlage mit Vorflügeltechnologie zu erlangen.

## **4.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Für das Erreichen der gesetzten Gesamtziele wurde die Durchführung der Arbeiten in dieser Technologie in drei Arbeitspakete aufgeteilt, die sich jeweils auf eine Komplexitätsstufe der Vorflügeltechnologie konzentrieren.

### **Aktiver Vorflügel**

Im Vorgängerprojekt wurde das Profil mit dem aktiven Vorflügel Strömungsbedingungen ausgesetzt, bei denen der Anströmwinkel zeitlich periodisch variierte. Die Bewegungen des Vorflügels wurden darauf mit bekannter Phasenlage zur Einströmung entsprechend gesteuert. In SmartBlades sollte für den aktiven Vorflügel ein Regelungssystem aufgebaut und getestet werden, welches mit unterschiedlichen Zielfunktionen betrieben werden kann. Für die Umsetzung eines Reglers musste die Soft- und Hardware des Vorflügels angepasst werden. Zusätzlich sollten mithilfe eines aktiven Gitters Strömungen generiert werden, bei denen sich der Anströmwinkel zeitlich nicht rein periodisch ändert, sondern Strömungen, die turbulente Strukturen aufweisen. Die experimentellen Arbeiten sollten von numerischen Simulationen begleitet werden. Abschließend sollte ein Strukturkonzept erarbeitet werden, wie ein aktiver Vorflügel an einem Blattsegment mit einer Profiltiefe von einem Meter umgesetzt werden könnte.

### **Passiv adaptiver Vorflügel**

Zur Reduzierung der Komplexität sollte ein beweglicher Vorflügel entwickelt werden, der mithilfe einer passiven Kinematik seine Position auf variierende Einströmbedingungen adaptieren kann. Für die passiv adaptive Variante des Vorflügels sollte zunächst eine

Kinematik sowie ein strukturelles Design für die Fertigung ausgelegt werden. Das fertige Windkanalmodell sollte detailliert charakterisiert und die Auslegung validiert werden. Die resultierenden Polaren sollten dafür genutzt werden den passiv adaptiven Vorflügel für das Gesamtsystem Windenergieanlage zu bewerten. Zusätzlich sollten experimentelle Untersuchungen für extreme Anstellwinkel und dynamische Anstellwinkelfluktuationen tiefere Einblicke in das Verhalten ermöglichen. Diese Arbeiten sollten durch numerische Simulationen begleitet werden. Das Design des passiv adaptiven Vorflügels sollte ebenfalls als Grundlage für akustische Untersuchungen dienen. Ziel war es mithilfe numerischer Simulationen sowie Windkanalexperimenten Lärmquellen für unterschiedliche Positionen des Vorflügels zu identifizieren und Modelle zu validieren.

### **Starrer Vorflügel**

Das Konzept des starren Vorflügels mit der geringsten Komplexität sollte sowohl an einer Modellwindenergieanlage als auch an einer realen Windenergieanlage getestet werden. Für die Arbeiten auf Ebene des Modells mit einem Rotordurchmesser von 1,8m sollte zunächst die aerodynamische Auslegung und die Fertigung durchgeführt werden. Zusätzlich sollten die Controller für die Modellanlage für den Betrieb mit Vorflügeln angepasst werden. In dem großen Windkanal in Oldenburg sollten abschließend Messungen unter turbulenten Einströmungsbedingungen durchgeführt werden, welche mithilfe eines aktiven Gitters generiert werden sollten.

Für die Untersuchungen an einer realen Windenergieanlage sollte neben der reinen aerodynamischen Auslegung auch eine entsprechende strukturelle Auslegung erfolgen. Zusätzlich sollte eine Halterung für die Vorflügel entworfen und gefertigt werden. Abschließend sollten die Vorflügel an einer WEA montiert und im Betrieb über mehrere Wochen getestet werden.

Für beide Anlagen sollte mithilfe einer stochastischen Analyseverfahren der Einfluss der starren Vorflügel auf das dynamische Verhalten der WEA untersucht und beschrieben werden. Messkampagnen mit und ohne installierte Vorflügel sollten die Datenbasis für diese Analysen bilden und damit einen Vergleich ermöglichen.

## **4.3 Stand der Technik**

Aufgrund der dicken Profile, dem Übergang zur Nabe sowie lokal hohen Anstellwinkeln operieren Windturbinenblätter im Wurzelbereich oft mit einer Strömungsablösung auf der Saugseite. Maßnahmen zur Vermeidung der Ablösung können sowohl die Leistung der Anlage erhöhen als auch turbulente Wechsellasten reduzieren und damit einen positiven Effekt auf die Lebensdauer erzielen. An den heutigen Windkraftanlagen werden zu diesem Zweck Wirbelgeneratoren eingesetzt, die zwar den Strömungsabriss hin zu höheren Anstellwinkeln verschieben, aber gleichzeitig eine geringfügige

Widerstandserhöhung verursachen [3]. Der Wirkungsbereich von Wirbelgeneratoren ist allerdings auf Situationen limitiert, bei denen sich die Ablösung stromab von ihnen befindet. Aus dem Flugzeugbau ist bekannt, dass demgegenüber Vorflügel einen weitaus breiteren Einsatzbereich des Blattprofils hinsichtlich des Anstellwinkelbereichs ermöglichen [43].

Untersuchungen von Gaunaa et al. [13] haben gezeigt, dass starre Vorflügel im inneren Bereich des Rotorblatts Ablösungen unterdrücken können und einen Zuwachs des AEP von 1% erwarten lassen. Pechlivanoglou et al. [34] erzielen ähnliche Ergebnisse basierend auf Windkanalmessungen an einem dicken Rotorblattprofil mit starrem Vorflügel. Zahle et al. [51] haben in vergleichbaren Untersuchungen einen starren Vorflügel für ein 40%-dickes Flatback-Profil entworfen und die Geometrie sowohl numerisch als auch experimentell untersucht. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass sich der Anstellwinkel des maximalen Auftriebs des Rotorblattprofils mit Hilfe eines Vorflügels um bis  $16^\circ$  vergrößern lässt. Der Universität Oldenburg ist darüber hinaus ein Patent für einen regelbaren Vorflügel zuerkannt [36].

Allgemein bekannt ist, dass das Anbringen eines Vorflügels durch die entstehende Spaltströmung die Profilleistungskennwerte, wie z.B. die Gleitzahl, gegenüber dem Basisprofil verschlechtert. Im Vorgängerprojekt SmartBlades wurden verschiedene Vorgehensweisen untersucht, um diesen negativen Einfluss zu verringern. Manso Jaume und Wild optimierten die Geometrie des Vorflügels und des Rotorprofils für einen starren aufgesetzten - also nachrüstbaren – Vorflügel sowie einen integrierten Vorflügel, der die Außenkontur des Gesamtprofils nicht ändert [29]. Huxdorf et al. entwickelten eine steuerbare formvariable Struktur dieses integrierten Vorflügels, um durch Öffnen und Schließen des Spaltes zu Leistungsverbesserungen und Lastabminderungen beizutragen [22]. Durch Windkanaluntersuchungen wurde die prinzipielle Wirksamkeit von Vorflügeln damit nachgewiesen.

Für die geplanten Arbeiten in SmartBlades2 zum Entwurf eines passiv adaptiven Vorflügels wird das kinematische Prinzip von Braun [7] und Petrikat [37] übernommen. Mit den entsprechenden Viergelenkketten wurden bereits automatische Vorflügel an den Flugzeugen Messerschmidt Bf 108 und Bf 109 realisiert.

## **4.4 Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse**

Die Arbeiten in den Arbeitspaketen für die drei Varianten des Vorflügels liefen teilweise parallel. Die Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse erfolgt hier daher nicht rein chronologisch sondern anhand der einzelnen Arbeitspakete.

### **Aktiver Vorflügel**

Das bestehende 2D-Blattsegment für die Windkanaluntersuchungen aus dem Projekt SmartBlades mit dem aktiven Vorflügel wurde für den Betrieb mit einer Regelung modifiziert. Hierfür wurden die Einstellungen für den Schrittmotorcontroller für einen resonanz- und vibrationsarmen Betrieb optimiert. Zusätzlich wurde die Übertragungsfunktion zwischen Schrittmotorrotation und resultierender Hinterkantenverformung bestimmt sowie die Software für die Schnittstellen mit der Regelung angepasst (Deliverable 3.1.1.1). Am Aufbau im Windkanal wurden ebenfalls Modifikationen vorgenommen, welche neben der reinen Regelung auch die Synchronisation aller genutzten Systeme ermöglicht (Deliverable 3.1.3.3).

Für die Umsetzung einer Regelung wurde zunächst das 2D-Blattsegment mit aktivem Vorflügel detailliert im Windkanal vermessen. Hierbei wurden systematisch die Anströmgeschwindigkeit, der Anstellwinkel des Segments und die Position der Hinterkante des Vorflügels statisch variiert und die aerodynamischen Kräfte gemessen. Zusätzlich wurden Testfälle definiert, bei denen zum einen die Strömung mit dem aktiven Gitter so beeinflusst wurde, dass periodische Anstellwinkel-änderungen am Profil wirken. Zum anderen wurde für feste Anstellwinkel des Blattsegments die Hinterkante periodisch mit unterschiedlichen Frequenzen angesteuert. Die umfassende Testmatrix ist in dem Deliverable 3.1.3.1 festgehalten. Die Ergebnisse der detaillierten statischen Charakterisierung zeigen, dass mit unterschiedlichen Stellungen der Hinterkante des Vorflügels die Beiwerte über einen breiten Anstellwinkelbereich direkt beeinflusst werden können. Die Messungen für die periodische Einströmung und die Bewegung des aktiven Vorflügels zeigen, dass hierdurch eine zeitliche Verzögerung in der Ausbildung der Kräfte verursacht wird, die bei der Umsetzung einer open-loop Regelung mitberücksichtigt werden muss (Deliverable 3.1.3.2).

Das Ziel der Regelung war die Abschwächung von Schwankungen in den wirkenden aerodynamischen Kräften bei zeitlich variierenden Anstellwinkeln in der Strömung. Für die

Regelung wurden drei unterschiedliche Regelungskonzepte realisiert. Bei der open-loop Steuerung wurde vorher die Strömung vermessen, sodass die zeitliche Variation der Anströmwinkel bekannt war. Die Ergebnisse der detaillierten Charakterisierung wurden dann als Grundlage für die Berechnung der Bewegungen des aktiven Vorflügels in dieser Strömungssituation genutzt, um die Zielfunktion der Regelung zu erreichen. Bei der closed-loop Regelung liegen keine Informationen über die vorherrschende Einströmung vor. Der Regelkreis bekommt die aktuell wirkenden Kräfte als Eingang und versucht diese auf einem Sollwert zu halten. Als letztes wurde eine Kombination aus diesen beiden Reglern entworfen. Aufgrund der schon erwähnten dynamischen Effekte, die durch die Bewegung des Vorflügels und den fluktuierenden Anstellwinkeln in der Strömung verursacht werden, können Abweichungen in den erwarteten Kräften auftreten, welche so kompensiert werden sollten. Details zu den Regelstrategien hierzu sind im Deliverable 3.1.2.1 zu finden.

Für den Test der entwickelten Regelstrategien in Windkanalexperimenten wurden spezielle Strömungssituationen mithilfe eines aktiven Gitters generiert. Ziel war es dabei charakteristische Eigenschaften atmosphärischer Windfelder auf lokale Anstellwinkelfluktuationen am Rotorblatt zu reproduzieren. Der Fokus lag dabei auf der sogenannten Intermittenz, die einer erhöhten Häufigkeit von Böen (Geschwindigkeitsänderungen auf unterschiedlichen Zeitintervallen) gleichzusetzen ist. Es wurden drei Anstellwinkelzeitserien erzeugt, deren Intermittenz über verschiedenen Zeitskalen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Details zur Generierung und den Eigenschaften der Strömungen finden sich im Deliverable 3.1.3.4.

Die entwickelten Regler wurden implementiert und in den unterschiedlichen Strömungsbedingungen getestet. Hierbei zeigte sich, dass die Regler für den aktiven Vorflügel in allen Strömungsbedingungen eine Wirkung auf die Aerodynamik des 2D-Segments hatten, jedoch von unterschiedlicher Stärke. Je schneller die Änderungen in der Strömung sind, desto weniger wirksam wird die Regelung des aktiven Vorflügels. Dies liegt zum einen daran, dass der Vorflügel eine maximale Bewegungsgeschwindigkeit besitzt und zum anderen, dass aerodynamische Kräfte ebenfalls nicht instantan ausgebildet werden. Die Ergebnisse der open-loop Steuerung sind im Deliverable 3.1.3.5, die der closed-loop Regler in den Deliverables 3.1.3.6 und 3.1.2.1 festgehalten. Ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Regler ist im Deliverable 3.1.3.7 zu finden. Dabei

waren die Resultate abhängig vom zeitlichen Verlauf der Strömungsänderungen. Die open-loop Steuerung zeigte für langsame Änderungen gute Resultate, während der closed-loop Regler besser auf schnelle Änderungen reagierte.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Simulationen durchgeführt. Für die Simulationen wurden ebenfalls periodische Anströmwinkeländerungen basierend auf den experimentellen Daten für die Einströmung gewählt. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Daten und validieren die verwandten Methoden für diesen speziellen Einsatz. Details hierzu sind in dem Deliverable 3.1.4.1-2 zu finden.

Eine potenzielle Umsetzung an einer realen Windenergieanlage ermöglicht, aufgrund der vorhandenen Größen am Rotorblatt, einen Aufbau des aktiven Vorflügels mit anderen Komponenten bzw. einer vereinfachten aktiven Mechanik. Im Deliverable 3.1.5.1 sind Vorschläge für das Design, Materialien sowie Wirkkonzepte der aktiven Vorformung des Vorflügels für ein Profil mit einer Sehnenlänge von 1m zusammengefasst. Ein Blattsegment dieser Größe könnte im Windkanal oder an einem Schleuderprüfstand zum Einsatz kommen.

### **Passiv adaptiver Vorflügel**

Zur Reduzierung der Komplexität wurde ein 2D-Blattsegment mit einem passiv adaptiven Vorflügel entwickelt. Hierfür wurde zunächst eine Konzeptanalyse durchgeführt, in der aus der Literatur bekannte Systeme zur Variation der Spaltbreite zwischen Vorflügel und Hauptprofil auf die Übertragbarkeit auf die Größe des Windkanalmodells untersucht wurden. Eine Anforderung war, dass der Vorflügel nicht schlagartig seine Position wechselt, sondern eine stetige Bewegung vollzieht. Das Ergebnis dieser Untersuchung, ein Vier-Gelenk-Konzept nach Braun/Petrikat, ist im Deliverable 3.2.1.1 festgehalten. Dabei wird die Kinematik um einen virtuellen Drehpunkt aufgrund der wirkenden aerodynamischen Kräfte in Gang gesetzt. Ein Öffnen bzw. Schließen des Spaltes kann somit bei bestimmten Anströmwinkeln der Strömung erfolgen. Im Rahmen einer Optimierung wurde die Hebelgeometrie ermittelt, welche die finalen Stellungen des Vorflügels relativ zum Hauptprofil bestimmen und eine stetige Bewegung ermöglichen. Die Zielfunktion beinhaltet neben einer optimalen Steigzahl auch eine Verzögerung des Strömungsabrisses vom Profil. Details hierzu sind im Deliverable 3.2.1.3 festgehalten. Das

finale Design wurde in CAD umgesetzt (Deliverable 3.2.1.2) und gefertigt (Deliverable 3.2.3.1).

Das 2D-Blatsegment mit der passiv-adaptiven Vorflügelkinematik wurde im Windkanal in Oldenburg charakterisiert. Dabei wurden zum einen die Polaren für den komplett geschlossenen und den komplett geöffneten Vorflügel vermessen und mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen, die eine gute Übereinstimmung zeigten. Bei den Messungen mit der freilaufenden Kinematik hingegen ergaben sich Probleme mit dem Windkanalmodell, die in den Simulationen so nicht auftauchen können. Aufgrund minimalem Spiels in den Führungsgelenken entstand zusätzliche Reibung, sodass die aerodynamisch wirkenden Kräfte nicht ausreichten um den Vorflügel aus den Endpositionen zu lösen und bei den gewollten Anstellwinkeln den Spalt zu öffnen bzw. zu schließen. Mithilfe kleiner mechanischer Modifikationen konnte die Kinematik in Funktion gesetzt werden und die prinzipielle Funktionsweise konnte gezeigt werden. Alle Details hierzu sind im Deliverable 3.2.2.1\_3-4 zu finden.

Neben den reinen statischen Polaren spielt das Verhalten des passiv adaptiven Vorflügels bei periodischen bzw. dynamischen Anströmwinkeländerungen eine wichtige Rolle. Hierfür wurde das Windkanalmodell zunächst periodisch variierenden Anstellwinkeln mit Frequenzen von 1Hz, 3Hz und 5Hz ausgesetzt und die Messergebnisse mit denen für komplett geöffneten und komplett geschlossenen Spalt verglichen. Die Resultate zeigen, dass bei kleinen Frequenzen eine Wirksamkeit des Vorflügels vorhanden ist und die Fluktuationen in den Kräften verkleinert werden. Dies bedeutet auch, dass die Kinematik in der Tat wie beabsichtigt arbeitet und der Vorflügel seine Position variiert. Gleichzeitig zeigen die Messungen aber auch, dass bei höheren Frequenzen dieser Effekt immer geringer wird, was vermuten lässt, dass die Masse des Vorflügels und damit seine Trägheit hier ein limitierender Faktor ist. Hierbei ist zu bemerken, dass der für den Windkanalversuch gebaute Vorflügel als massives Aluminiumteil ausgeführt ist und die Massenträgheit für den Einsatz an einer Windenergieanlage nicht repräsentativ ist. Alle Details zu diesen Messungen sind im Deliverable 3.2.5.4 aufgeschrieben.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden weitreichende numerische Simulationen zu dem dynamischen Verhalten des passiv adaptiven Vorflügels durchgeführt und, wo vorhanden, mit den Messergebnissen verglichen. Basierend auf den Ergebnissen und den Problemen bei den Windkanaluntersuchungen wurde eine weitere

Kinematik mit veränderten Gelenkpositionen und Hebellängen entworfen, welche ein geändertes Öffnungsverhalten des Vorflügels bewirkt. Alle Details hierzu sind im Deliverable 3.2.1.4 wiederzufinden. Mit der angepassten Kinematik konnten leider keine erfolgreichen Experimente durchgeführt werden, da diese sich komplett verklemmt hatte und auch nicht mehr im Rahmen der Projektlaufzeit repariert werden konnte.

Ein weiterer Aspekt in diesem Arbeitspaket war die Untersuchung des 2D-Blattsegments mit passiv adaptivem Vorflügel für extrem große Anstellwinkel bis hin zu  $\pm 90^\circ$ . Daher wurde der bestehende Aufbau dahingehend untersucht, inwieweit er sich für die Vermessung dieser Winkelbereiche eignet. Aspekte wie zunehmende Versperrung und damit notwendige Korrekturen sowie mechanische Belastungen bzw. Vibrationen durch Strömungsablösung spielen hier eine Rolle. Die Messungen dazu wurden mit dem DU 91-W2-250 Profil durchgeführt und mit Simulationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass für Anstellwinkel größer  $30^\circ$  und kleiner  $-30^\circ$  die Fehler zunehmen. Zusätzlich wurde die maximale Geschwindigkeit auf 15m/s festgelegt, um die Stabilität des Aufbaus nicht zu gefährden. Details hierzu sind im Deliverable 3.2.5.1 zu finden. Bei den Messungen mit dem passiv adaptiven Vorflügel reichten die 15m/s nicht aus um am Vorflügel ausreichend große Kräfte zu entwickeln, sodass die Kinematik in Bewegung gesetzt wird. Die Messungen wurden daher nur bei komplett geöffnetem und komplett geschlossenem Spalt durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Deliverable 3.2.5.2-3 zu finden.

Basierend auf den genutzten Methoden zur Auslegung des passiv adaptiven Vorflügels für ein 2D-Blattsegment wurde zusätzlich für die Geometrie des gesamten Referenzblatts aus dem Vorgängerprojekt SmartBlades ein solcher Vorflügel entworfen. Das Ergebnis ist im Deliverable 3.2.1.4 festgehalten.

Zusätzlich zu den aerodynamischen Untersuchungen wurde die Lärmentwicklung an einem Vorflügel betrachtet. Mithilfe einer akustischen Kamera wurden an dem 2D-Blattsegment mit dem passiv adaptiven Vorflügel im Windkanal Messungen zur Lärmabstrahlung durchgeführt. Hierbei wurden wiederum der komplett offene und der komplett geschlossene Spalt berücksichtigt. Analysen der Spektren des Fernfeldes zeigen, dass bei geöffnetem Spalt über weite Frequenzbereiche wie erwartet ein erhöhter Lärmpegel gemessen wurde (Deliverable 3.2.7.1). Die experimentellen Ergebnisse wurden mit numerischen Simulationen für unterschiedliche Einströmbedingungen abgeglichen. Für die numerischen Simulationen wurden unterschiedliche Methoden und Codes

verwandt, um schrittweise die Genauigkeit zu erhöhen. Details zu den Simulationen finden sich in den Deliverables 3.2.7.2 und 3.2.7.3. Abschließend wurde ein Vergleich aller genutzten Methoden durchgeführt. Deliverable 3.3.7.4 gibt einen Überblick über die aeroakustischen Eigenschaften des passiv adaptiven Vorflügels und enthält Vorschläge zur Lärminderung für zukünftige Entwicklungen.

### **Starrer Vorflügel**

Der starre Vorflügel besitzt die geringste Komplexität der drei betrachteten Konzepte in diesem Projekt. Untersuchungen mit starren Vorflügeln wurden zum einen an einer Modellanlage im Windkanal und zum anderen an einer realen Windenergieanlage durchgeführt.

#### Modellwindenergieanlage

Für eine Modellwindenergieanlage mit einem Durchmesser von 1,8m an der Universität Oldenburg wurde ein starrer Vorflügel für den Blattinnenbereich entworfen, der auf das bestehende Blatt nachträglich montiert werden sollte. Die Optimierung ergab eine Geometrie für den Vorflügel, die in numerischen Simulationen in einer Leistungssteigerung im hohen Anstellwinkelbereich resultierte. Details hierzu sind im Deliverable 3.3.4.2 zu finden. Bevor die Vorflügel gefertigt werden konnten, wurden die erwarteten Belastungen auf die Rotorblätter der Modellanlage untersucht um die Stabilität im Betrieb zu garantieren. Die Ergebnisse flossen in das Design für die Halterungen der Vorflügel mit ein (Deliverable 3.3.1.1).

Die Modellanlage in Oldenburg wurde im Rahmen eines anderen Projektes als skalierte Version der NREL 5MW Turbine entwickelt und in diesem Projekt verwirklicht. Vor den eigentlichen Windkanalexperimenten wurde der zu erwartende Einfluss der starren Vorflügel auf die Performance des Anlagenmodells mithilfe von BEM Simulationen untersucht. Die Ergebnisse sowie Details zum Design und Aufbau der Modellanlage sind in den Deliverables 3.3.2.1 und 3.3.2.2 zu finden. Abschließend wurden die Regelparameter an die geänderten Bedingungen mit den zusätzlichen Vorflügeln angepasst. Details hierzu sind im Deliverable 3.3.2.3 festgehalten.

Für den Test der starren Vorflügeltechnologie sollten im großen Windkanal in Oldenburg mithilfe eines aktiven Gitters turbulente Strömungsbedingungen mit charakteristischen Eigenschaften atmosphärischer Windfelder generiert werden. Diese sollten neben

definierten mittleren Geschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten zusätzlich auf bestimmten Längenskalen (bezogen auf den Durchmesser der Anlage) geringe bis starke Intermittenz bzw. Böigkeit aufwiesen (Deliverable 3.3.3.1). Eine detaillierte Vermessung des aktiven Gitters im Vorfeld ermöglichte die Bestimmung einer Übertragungsfunktion, auf dessen Basis die Eigenschaften der resultierenden Windfelder im Windkanal bereits am Computer vorhergesagt werden konnten. Details hierzu sind im Deliverable 3.3.3.2 zu finden. Die Eigenschaften der mithilfe dieser Methode erzeugten Windfelder finden sich im Deliverable 3.3.3.3.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurde das Anlagenmodell mit und ohne starre Vorflügel den unterschiedlichen Windfeldern ausgesetzt. Neben der Betrachtung gemittelter Werte sollte zusätzlich das zeitliche Verhalten der Modellanlage und die resultierenden Dynamiken miteinander verglichen werden. Hierfür wurde der Aufbau dahingehend erweitert, dass die Messungen synchronisiert mit der Ansteuerung des aktiven Gitters ablaufen konnten (Deliverable 3.3.3.4).

In der ersten Messkampagne wurde die Modellanlage für beide Rotorkonfigurationen charakterisiert und Reglereinstellungen bestimmt. Die Vermessung der Leistungskurve zeigte, dass sowohl mit als auch ohne Vorflügel vergleichbare Mittelwerte erreicht wurden, die Reglereinstellungen aber einen Einfluss auf die auftretenden Fluktuationen haben (Deliverable 3.3.3.5). Bei nachfolgenden Messungen wurden wirkende Lasten auf Rotorblätter und Anlage (Schub) detaillierter untersucht. Zusätzlich wurden Messungen durchgeführt, die Einblicke in die lokale aerodynamische Wirksamkeit (axiale Induktion) entlang des Rotorblattes geben sollten. Hierfür wurde der Aufbau dahingehend erweitert, dass mithilfe eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA) die Windgeschwindigkeiten in der Rotorebene gemessen werden, woraus die Anströmwinkel abgeleitet werden können. Anhand der LDA Messungen wurde gezeigt, dass der Vorflügel einen höheren Auftrieb bei großen Angriffswinkeln ermöglicht. Eine Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich einer eindeutigen Bewertung der starren Vorflügeltechnologie im geregelten Betrieb ist aus vielerlei Gründen schwieriger. Zum einen müssen bei der Auslegung im Windkanalmaßstab sowie Fertigung und Befestigung solch kleiner Vorflügel Kompromisse eingegangen werden. Zum anderen haben die verwandten Regelparameter ebenfalls einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Alle Details hierzu sind in dem Deliverable 3.3.2.4 zu finden.

Mithilfe der Langevin Analyse wurde das dynamische Antwortverhalten der Modellanlage mit und ohne Vorflügel untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Methode erfolgreich auf Modelldaten angewandt werden kann. Unterschiede in der Reaktion der Anlage wurden der erhöhten Masse der Rotorblätter mit Vorflügel und ebenfalls den Einstellungen des Reglers zugeordnet (Deliverable 3.3.3.6). Zusätzlich wurde gezeigt, dass auf Basis der Langevin Analyse eine stochastische Modellierung der Anlage möglich ist, die für unterschiedliche Windfelder die richtigen Dynamiken reproduziert. Details hierzu finden sich im Deliverable 3.3.3.7.

### Reale Windenergieanlage

Ein starrer Vorflügel wurde für den Einsatz an einer realen Windenergieanlage entworfen. Der Vorflügel hatte dabei das primäre Ziel die jährliche Energieproduktion zu steigern. Die Spezifikationen und Beschreibung des Vorflügels sind im Deliverable 3.3.5.4 zu finden. Die strukturelle Auslegung sowie die Fertigungsunterlagen sind in den Deliverables 3.3.10.1 und 3.3.10.2 festgehalten. Der Vorflügel wurde für den Innenbereich des Rotorblattes einer S88 Anlage nahe der Nabe ausgelegt und gefertigt, wo sie nachträglich montiert werden sollten. Das Design der Halterungen ist im Deliverable 3.3.6.4 zu finden. Aufgrund zeitlicher Verzögerungen konnten die Vorflügel nicht mehr wie vorgesehen im Projekt an die reale Anlage gebracht werden. Für die geplanten Analysen wurden daher Messdaten einer S111 Anlage zur Verfügung gestellt, an der außerhalb dieses Projektes ebenfalls die Technologie des starren Vorflügels getestet worden war. Informationen über die Installation sind im Deliverable 3.3.7.1 festgehalten.

CFD-Simulationen zur aerodynamischen Wirksamkeit des starren Vorflügels an der S88 Windenergieanlage sollten mithilfe der Messdaten aus dem Freifeld validiert werden. Für den Fall ohne Vorflügel konnten gute Übereinstimmungen sowohl mit den gemessenen Leistungsdaten als auch mit dem industriell genutzten Programm FLEX5 zur Leistungsvorhersage erzielt werden. Für den Fall mit Vorflügel stimmten die Ergebnisse aus den CFD-Simulationen ebenfalls gut mit der Vorhersage aus FLEX5 überein. Die angewandte CFD-Methodik stellt dementsprechend eine gute Leistungsvorhersage des Anlagenverhaltens dar. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Vorflügel der Ertrag der Anlage erhöht werden kann. Für die S111 Anlage wurden aus Zeitgründen diese aufwendigen CFD-Simulationen nicht zusätzlich durchgeführt werden. Eine Beurteilung

hinsichtlich des Potentials des starren Vorflügels auf Basis der gemessenen Daten wurde dadurch erschwert, dass die Messungen der beiden Rotorblattkonfigurationen zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt wurden. Die daraus resultierenden Unterschiede in den Randbedingungen, unter anderem der Turbulenzintensität, haben einen großen Einfluss auf die Bestimmung der Leistungskennlinie. Alle Details zu diesen Untersuchungen sind im Deliverable 3.3.4.4 zu finden.

Die Messdaten der S111 Anlage für beide Rotorblattkonfigurationen wurden mit der Langevin Analyse untersucht und verglichen. Die Ergebnisse dieser stochastischen Analyse liefern Einblicke in das dynamische Antwortverhalten der Anlage. Es zeigte sich, dass der Vorflügel in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen zu einer schnelleren Reaktion auf Geschwindigkeitsänderungen beiträgt. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die Anlage ohne Vorflügel zeitweise außerhalb des eigentlichen Betriebspunktes gearbeitet hat. Alle Details hierzu sind in den Deliverables 3.3.8.1-3 zu finden.

Im Rahmen des Projekts wurden aeroakustische Vorhersagemethoden entwickelt und erstmalig zur Anwendung gebracht, die zukünftig einen integrierten aero-akustischen Entwurf in iterativen Designzyklen ermöglichen. Simulierte Spektren und Richtcharakteristiken für zwei repräsentative Blattschnitte (Vorflügelschall innen vs. Hinterkantenschall außen) dokumentieren die Dominanz des klassischen Hinterkantengeräuschs für moderate Windgeschwindigkeiten bis 9 m/s, d.h. Schallbeiträge des Vorflügels sind relativ unbedeutend im Hinblick auf den Gesamtanlagenschall. Für die höchste analysierte Windgeschwindigkeit (16 m/s) ist allerdings mit deutlicher Zusatzgeräuschenstehung infolge der Vorflügelinstallation zu rechnen. Der im Projekt zunächst rein aerodynamisch getriebene Entwurf weist in der nachgeschalteten Analyse akustisches Verbesserungspotential auf. Details hierzu finden sich in den Deliverables 3.3.9.1 und 3.3.9.2.

## **4.5 Deliverables Berichte**

Die Deliverables sind als Anhang K diesem Bericht angehängt.

## **4.6 Fazit**

Nach dem erfolgreichen „proof of concept“ des Vorflügels für den Einsatz in der

Windenergie im Projekt Smart Blades wurde diese Technologie in diesem Projekt in drei unterschiedlichen Komplexitätsstufen untersucht; dem aktiven Vorflügel, dem passiv adaptiven Vorflügel und dem starren Vorflügel. Für den aktiven Vorflügel konnte gezeigt werden, dass dieser in einem closed-loop Regelbetrieb in der Lage ist, Fluktuationen in den wirkenden Kräften über einen weiten Bereich zeitlicher Schwankungen zu minimieren. Außerdem wurden Umsetzungen für einen aktiven Vorflügel im größeren Maßstab präsentiert, die im Aufbau weitaus einfacher sind, als die kleine Variante im Windkanal, was einen weiteren Schritt für einen Einsatz an einer realen Anlage darstellt. Bei dem passiv adaptiven Vorflügel wurde gezeigt, dass die gewählte Kinematik in der Lage ist auf fluktuierende Anströmbedingungen zu reagieren. Aufgrund von mechanischen Schwierigkeiten – ebenfalls dem filigranen Aufbau im kleinen Windkanalmodell geschuldet – sowie einer erhöhten Trägheit des Vorflügels, konnte das numerisch prognostizierte Potential experimentell nicht vollständig bestätigt werden. Die erzielten Ergebnisse ermutigen jedoch diese Variante des Vorflügels im größeren Maßstab weiterzuverfolgen.

Der starre Vorflügel wurde im Einsatz an einer Modellanlage und einer realen Windenergieanlage getestet. Die Untersuchungen an der Modellanlage konnten wichtige Erkenntnisse für das grundlegende Verständnis liefern, auch wenn das kleine Modell auch hier zusätzliche Schwierigkeiten mit sich brachte, die nicht der Technologie des Vorflügels an sich zuzuordnen sind. Für die reale Anlage konnte hingegen gezeigt werden, dass der starre Vorflügel das Potenzial besitzt den Ertrag zu erhöhen.

## 5 Technologie 4 Querschnittsthemen (Dr. Claudio Balzani)

Im Projekt „SmartBlades2“ gab es wie auch schon im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ Aktivitäten, die technologieübergreifend für mindestens zwei der untersuchten Technologien 1-3 von Bedeutung sind. Diese waren in der sogenannten Technologie 4 (Querschnittsthemen) verortet. Die Querschnittsthemen waren in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt. Diese umfassten die numerische und experimentelle Analyse von Klebnähten (AP 4.1), die numerische Untersuchung der aeroelastischen Stabilität intelligenter Rotorblätter (Flattern, AP 4.2), die Entwicklung von nichtlinearen Reglern für Windenergieanlagen mit smarten Blättern (AP 4.3) sowie die Bewertung von SmartBlades-Technologien (AP 4.4), s. auch Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Tasks innerhalb der Technologie 4 (Querschnittsthemen)

<b>AP 4.1 Klebnähte</b>		
4.1.1	Materialversuche und Komponentenversuche	DLR
4.1.2	Zentrifugenprüfverfahren	DLR
4.1.3	Analyse von Subkomponenten	DLR
4.1.4	Komponentenprüfungen zur Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebverbindungen unter komplexer Beanspruchung	IWES
4.1.5	Finite-Elemente-Modellierung von Klebnähten	FW-H
4.1.7	Beteiligung an der numerischen und/oder experimentellen Untersuchung von Klebnähten	Henkel
4.1.8	Materialmodell-Entwicklung, Evaluierung und Validierung von Ermüdungsmodellen für Klebnähte unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen	FW-H
<b>AP 4.2 Flattern</b>		
4.2.1	Flutterbewertung für SmartBlades	DLR
4.2.2	Weiterentwicklung von Flutter-Analyse-Methoden	FW-H
4.2.3	Simulationen für Code-to-Code-Vergleich mit HAWC2	Senvion
4.2.4	Simulationen für Code-to-Code-Vergleich mit ALASKA	Nordex
<b>AP 4.3 Regelung (nichtlinear)</b>		
4.4.1	Regler-Struktur für Adaptive Control	IWES
<b>AP 4.4 Bewertung: Technologien/Regelkonzepte</b>		
4.4.1	Technologiebewertung	FW-H
4.4.2	Bereitstellung von Beratungsleistung durch Überprüfung von Modellannahmen	WRD
4.4.3	Lastberechnung zur Regelung von SmartBlades	Suzlon

Die folgenden Abschnitte sollen die übergeordneten Ziele, also die Gesamtziele der Technologie 4, und ihre wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele erläutern, den

Stand der Technik aufzeigen sowie das Vorgehen und die Forschungsergebnisse zusammenfassen. Die entwickelten Methoden und Ergebnisse werden detailliert in den zugehörigen Deliverables (s. Anhang K) beschrieben. Daher wird in den folgenden Abschnitten auch auf die Deliverables verwiesen.

## **5.1 Gesamtziel**

Für die Querschnittsthemen wurden die folgenden übergeordneten Ziele verfolgt:

- Weiterentwicklung besonders relevanter und aussichtsreicher Methoden und Teilkonzepte
- Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden und Ableitung von Bewertungsaussagen über die Verwertbarkeit der Technologien

Bei dem ersten Ziel sollten Methoden und Teilkonzepte weiterentwickelt werden, die nicht direkt einer Technologie zugeordnet werden können, aber für mindestens zwei der untersuchten Technologien 1-3 relevant sind. Dabei handelte es sich beispielsweise um numerische Methoden, Materialmodelle oder auch experimentelle Untersuchungen von Rotorblattverklebungen, da dort durch den Einsatz von SmartBlade-Technologien mit erhöhten Beanspruchungen zu rechnen ist. Auch die aeroelastische Stabilität von SmartBlades-Technologien stand im Fokus der Querschnittsthemen. Außerdem sollten nichtlineare Regelungskonzepte als aussichtsreiche Teilkonzepte verfolgt werden.

Das zweite Ziel bezog sich auf die Fortschreibung des Bewertungsmodells aus dem Vorgängerprojekt „Smart Blades“ sowie auf ergänzende Arbeiten durch Industriepartner. Hierbei sollten klare Aussagen zum techno-ökonomischen Nutzen sowie zu Chancen und Risiken der drei untersuchten SmartBlades-Technologien abgeleitet werden.

## **5.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

In den Querschnittsthemen waren die in Tabelle 3 aufgelisteten Arbeitspakete und Tasks verortet. Diese verfolgten wissenschaftliche und technische Arbeitsziele, die über die spezifischen Ziele einer Technologie hinausgehen. Die AP- und Task-spezifischen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele werden in diesem Abschnitt erläutert.

Das Ziel von AP 4.1 (Klebnähte) war, das mechanische Verhalten von Verklebungen in Rotorblättern, in die SmartBlades-Technologien integriert sind, genau zu analysieren. Bei intelligenten Rotorblättern ist durch die zusätzlichen Torsionslasten mit erhöhten, mindestens aber qualitativ veränderten Beanspruchungen der Klebnähte, insbesondere an der Hinterkante, zu rechnen. Daher war es erforderlich, das veränderte Tragverhalten der Hinterkanten-Verklebungen sehr genau zu analysieren. Zu diesem Zweck sollten numerische, analytische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei sollten einerseits recheneffiziente Finite-Elemente-Modelle erstellt und auch der Einfluss von Fertigungsprozessen berücksichtigt, andererseits Material- und Komponentenversuche zu Charakterisierungs- und Validierungszwecken durchgeführt werden.

In AP 4.2 (Flattern) sollte die aeroelastische Stabilität von SmartBlades-Technologien numerisch untersucht und nachgewiesen werden. Der Fokus lag dabei neben der Weiterentwicklung von Analysemethoden aus dem Vorgängerprojekt auf dem Vergleich der Prognose des klassischen Biege-Torsions-Flatterns mit unterschiedlichen Simulationstools (alaska-Wind, GH Bladed, HAWC2, OpenFAST, Simpack), einem sogenannten Code-to-Code-Vergleich. Dabei sollten insbesondere Blätter mit Biege-Torsions-Kopplung (Technologie 1) mit der Referenzkonfiguration verglichen, aber auch Analysen einfacher Fehler-Betriebszustände der Technologie 2 durchgeführt werden.

In AP 4.3 sollten nichtlineare Regelungsstrategien für Windenergieanlage mit smarten Blättern entwickelt werden. Insbesondere Rotorblätter mit Biege-Torsions-Kopplung (Technologie 1) verhalten sich durch die Kopplung der strukturdynamischen Verformung mit der instationären Aerodynamik hochgradig nichtlinear, was in einer optimalen Regelungsstrategie berücksichtigt werden muss.

In den Tasks des AP 4.4 wurde das Ziel verfolgt, eine umfassende techno-ökonomische Bewertung der einzelnen SmartBlades-Technologien durchzuführen. Dazu sollte das Bewertungsmodell, das bereits im Vorgängerprojekt aufgesetzt wurde, weiterentwickelt und an aktuelle Entwicklungen innerhalb des Vorhabens angepasst werden. Auch sollte die Industrieperspektive stärker beleuchtet und Chancen und Risiken aus der Sicht von Anlagenherstellern analysiert werden. Ein wesentliches Ziel war, vollständige Lastensets,

die in umfassenden Anlagensimulationen für alle drei Technologien ermittelt werden sollten, in den Bewertungsprozess zu übernehmen.

### **5.3 Stand der Technik**

Im Folgenden wird der Stand der Technik zu Beginn des Projekts bezüglich der Aktivitäten in den Querschnittsthemen kurz zusammengestellt.

Aktuelle Richtlinien für den Entwurf von Rotorblättern [11] schreiben einen Betriebsfestigkeitsnachweis für die Lebensdauer der Windenergieanlagen vor, die mindestens 20 Jahre beträgt. Sie sehen u. a. vor, dass für die Verklebungen ein Festigkeitsnachweis unter Berücksichtigung von Schub-, axialer Normal- und Schälspannungen zu erbringen ist. Es wurde von NOEVER CASTELOS & BALZANI [10] gezeigt, dass in Rotorblatt-Verklebungen mit komplexen und multiaxialen Spannungszuständen zu rechnen ist. In Rotorblättern, die mit SmartBlades-Technologien ausgestattet sind, könnte der Grad der Komplexität weiter zunehmen, da mit erhöhten Torsionsverformungen und damit veränderten Spannungszuständen zu rechnen ist. Darüber hinaus hängen die Materialeigenschaften und verbleibende Eigenspannungen wesentlich von den Fertigungsprozessen ab [20] [5] [49] [15]. Komponentenprüfungen von Steg-Gurt-Verklebungen wurden in der Vergangenheit bereits durchgeführt [40], um realistische Spannungszustände in die Verklebung einzuleiten. Allerdings sind die Beanspruchungen blattspezifisch und die Spannungen in der Vorder- oder Hinterkante grundlegend unterschiedlich. So erzeugt der Brazier-Effekt [8] (das sogenannte Blattatmen) eine wichtige Schälspannungskomponente insbesondere in der Hinterkante. Daher sind auch Komponentenprüfungen für die Hinterkante entscheidend, um das Tragverhalten der Verklebungen zu verstehen, und standen auch in diesem Projekt im Fokus der Forschung.

Im Entwurf von Rotorblättern und Windenergieanlagen muss das Auftreten einer aeroelastischen Instabilität unbedingt vermieden werden, da hier exponentiell anwachsende Schwingungsamplituden zum Totalverlust der Blätter führen können. Zur numerischen Berechnung kritischer Zustände gibt es eine Reihe von Methoden, s. beispielsweise [27] [14] [16] [19] [30] [23]. RESOR ET AL. [39] fanden unter Anwendung des in [26] vorgeschlagenen Modells heraus, dass bei sehr großen Rotorblättern der kritische

Zustand nah am Betriebsbereich liegt. Darum ist das Thema aeroelastische Stabilität, insbesondere der Sonderfall des klassischen Flatterns, Gegenstand extensiver Forschung und besonders relevant für innovative Rotorblattkonzepte und sehr große Rotoren. Die Kritikalität der aeroelastischen Stabilität bei Rotorblättern mit SmartBlades-Technologien wurde allerdings bisher nicht eingehend untersucht.

Die Regelung von Windturbinen ist eine große Herausforderung. Das Ziel ist der sichere und stabile Betrieb zur Bereitstellung elektrischer Energie. Die Regelung hat aber auch maßgebliche Auswirkungen auf die Beanspruchungen der Komponenten von Windenergieanlagen [17] [9]. Eine effektive Methode zur Reduzierung von Belastungen der Windenergieanlage stellt die „Individuelle Pitch Regelung“ (IPC) dar [6]. Hierbei wird durch eine Messung der Blattwurzelbiegemomente eine Pitch-Einstellung für jedes Rotorblatt individuell berechnet, sodass die Blattschwingung bei 1p gedämpft wird. Zu den erweiterten Methoden zählen z. B. Modell-prädiktive Regelungskonzepte (engl. *Model Predictive Control*, MPC). Bei MPC wird ein (nichtlineares) Modell der Windenergieanlage genutzt, um eine kurzzeitige Prädiktion des Anlagenverhaltens vorzunehmen. Durch das Lösen eines Optimierungsproblems wird eine optimale Stellgröße berechnet. Problematisch ist hierbei die Windprädiktion, die für die Prädiktion des Anlagenverhaltens benötigt wird [18]. Zur Messung des einströmenden Windes kann *Light Detecting and Ranging* (LiDAR) verwendet werden. Hierbei wird mittels Interferometrie die Windgeschwindigkeit vor der Anlage gemessen. In [41] ist diese Anwendung untersucht worden. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung neuer Regelverfahren für Windenergieanlagen ist die Reduktion der mechanischen Belastung und damit die Verlängerung der Lebensdauer der Anlage bei gleichzeitig maximaler Energieausbeute [32].

Jede neue Technologie muss bzgl. ihrer Design Benefits, ihrer Performanz und ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Im Bereich Rotorblätter bietet sich eine multikriterielle Bewertung an, weil es sich um eine sehr komplexe Struktur mit einer Vielzahl von Nebenbedingungen wie z. B. Transportierbarkeit, Fertigbarkeit, Zuverlässigkeit, etc. handelt. Eine technische und wirtschaftliche Bewertung von Windenergie-Technologien wurde in der Vergangenheit insbesondere im Kontext der Windparkplanung betrachtet [25] [46]. Die Arbeiten von OBERSCHMIDT [33] und WANG ET AL. [48] zeigen bereits erste

Anwendungen im Bereich Energietechnik. Auch Offshore-Tragstrukturen wurden bereits über multikriterielle Analysen bewertet [28] [24]. PECHLIVANOGLU [35] macht erste Ansätze zur Bewertung von SmartBlades-Konzepten, bleibt aber sehr oberflächlich. Eine ganzheitliche technisch-wirtschaftliche Bewertung von Rotorblatt-Konzepten im Kontext des Systems Windenergieanlage findet sich dort nicht. Im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ wurde bereits ein techno-ökonomisches Bewertungsmodell, das die Bewertung der Gesamtanlage zum Ziel hat, aufgesetzt [21]. Die Sichtweise und Expertise von Anlagenherstellern konnte dort allerdings nur eingeschränkt berücksichtigt werden. Um belastbare Aussagen zum technischen und wirtschaftlichen Nutzen von SmartBlades-Technologien ableiten zu können, muss das Modell weiterentwickelt und fortgeschrieben werden.

## **5.4 Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse**

In diesem Kapitel werden das Vorgehen in den Arbeitspaketen der Technologie 4 sowie die Arbeitsergebnisse kurz zusammengefasst. Details können den Deliverables entnommen werden, s. Anhang K.

### **5.4.1 Arbeitspaket 4.1: Klebnähte**

In AP 4.1 wurden Verklebungen von Rotorblättern untersucht. Dabei wurden experimentelle Arbeiten durchgeführt, neue Materialmodelle entwickelt, die die Prozessbedingungen berücksichtigen sowie numerische Modelle im Rahmen der Finite-Elemente-Methode aufgesetzt.

Bei den experimentellen Arbeiten wurden Vorversuche zur Integration faseroptischer Sensorik in eine Verklebung durchgeführt (Deliverable 4.1.1.1). Außerdem wurden Materialversuche zum Zwecke der Materialcharakterisierung durchgeführt. Für die Bestimmung statischer Festigkeiten kam eine Zentrifugenprüfmaschine zum Einsatz. Der Vorteil dieser Methode ist, dass mehrere Proben gleichzeitig geprüft werden können, was die Prüfgeschwindigkeit erhöht. Die Ergebnisse wurden mit klassischen Versuchen verglichen und es konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden (Deliverables 4.1.2.1 und 4.1.2.2). Darüber hinaus wurde der Einfluss des Porenvolumengehalts auf Festigkeiten und Bruchenergien untersucht (Deliverable 4.1.4.2). Für die Bestimmung der Festigkeiten wurden sogenannte Sanduhrproben gefertigt und sowohl statisch als auch

zyklisch belastet (Deliverable 4.1.4.2). Mit zunehmendem Porenvolumengehalt sank die Festigkeit deutlich. Zur Ermittlung der Mode I-Bruchenergien wurden Double Cantilever Beam (DCB) Versuche für zwei unterschiedliche Verklebungsdicken durchgeführt (statisch und zyklisch). Da das Versagen immer als Kombination aus Klebstoff- und Laminatversagen aufgetreten ist, muss hier von einem Strukturversagen und nicht von einem Materialversagen ausgegangen werden. Neben reinen Materialversuchen wurden auch Subkomponentenversuche durchgeführt. Dabei handelte es sich um Versuche von Hinterkantensegmenten. Es wurden sowohl beim DLR als auch beim Fraunhofer IWES entsprechende Versuche durchgeführt, wobei beide Prüfstände unterschiedlich aufgebaut waren (Deliverable 4.1.4.1 und Deliverable 4.1.3.1). Gemeinsam sind die realistischen Beanspruchungen, die auf die Hinterkantenverklebungen wirken. Aus den Versuchen lässt sich das qualitative Versagensgeschehen ablesen (Deliverable 4.1.4.3 und Deliverable 4.1.3.1), was wertvolle Einblicke gewährt.

Neben den experimentellen Arbeiten wurden Material- und Versagensmodelle entwickelt, die auch die Prozessbedingungen berücksichtigen. Dazu wurden zunächst wichtige Kennwerte zur Charakterisierung des Schrumpfverhaltens von Klebstoffen aufgrund der chemischen Aushärtereaktion (chemischer Schrumpf, Deliverable 4.1.8.1) und aufgrund thermischer Belastung (thermischer Schrumpf, Deliverable 4.1.8.2) bestimmt. Ebenso wurden Kennwerte zur Porosität und Porositätsverteilung für verschiedene Mischtechnologien (Handmischung, statischer Mischer, Speedmischer, Speedmischer mit Vakuum, Deliverable 4.1.8.3) ermittelt. Auf Basis der Messungen wurde dann ein Modell zur Berechnung von Eigenspannungen entwickelt, das sowohl chemischen als auch thermischen Schrumpf berücksichtigt. Dieses Modell wurde anschließend validiert (Deliverable 4.1.8.4). Ein Modell zur Berechnung prozessinduzierter Eigenspannungen wurde ebenfalls in ein Strukturschädigungsmodell überführt. Darin werden die Eigenspannungen mit den Spannungen, die aus der Belastung des Rotorblatts resultieren, superponiert und die Ermüdungsschädigung durch lineare Schadensakkumulation nach der Palmgren-Miner-Regel ermittelt (Deliverable 4.1.4.4).

Außerdem wurde der bei FW-H-IWES entwickelte Finite-Elemente-Modellgenerator „MoCA“ weiterentwickelt, um Hinterkantenverklebungen abzubilden. Dazu wurde zunächst die Möglichkeit implementiert, ein globales hybrides Modell zu erstellen,

(Deliverable 4.1.5.1), das für die Laminate Schalenelemente und für die Verklebungen Solid-Elemente verwendet. Zusätzlich wurde eine Strategie zur lokalen Netzverfeinerung integriert (Deliverable 4.1.5.2). Mit den beiden Methoden wurde eine globale Spannungsberechnung für die Hinterkantenverklebung durchgeführt, um die Methoden auf Plausibilität zu überprüfen (Deliverable 4.1.5.3). Anschließend wurde eine hybride global-lokal-Modellierung implementiert (Deliverable 4.1.5.5). Dabei wird das Blatt grundsätzlich mit dem hybriden Schalen-Solid-Modell modelliert, das Netz an einer kritischen und damit auszuwertenden Stelle lokal verfeinert und dort das globale Modell lokal durch ein vollständiges Solid-Modell ersetzt. Durch diese Strategie wird die Geometrie der Verklebung exakt abgebildet, was hochgenaue Analysen ermöglicht, ohne die Rechenzeiten unnötig zu steigern. Die Vernetzungsstrategie wurde dann genutzt, um mit einem globalen Schädigungskriterium die Schadensanfälligkeit des Referenzblatts mit der eines Blattes mit geometrischer Biege-Torsions-Kopplung zu vergleichen und zu bewerten (Deliverable 4.1.5.6. und 4.1.5.7).

#### **5.4.2 Arbeitspaket 4.2: Flattern**

Das Arbeitspaket 4.2 hat sich mit der Analyse der aeroelastischen Stabilität von Windenergieanlagen ohne und mit SmartBlades-Technologien beschäftigt. Dabei lag der Fokus auf klassischem Biege-Torsions-Flattern.

Vor Beginn der Arbeiten wurde das Referenzanlagenmodell der IWT-7.5-164 grundlegend auf Inkonsistenzen und Fehler überprüft. Einige Daten mussten im Vergleich zu der anfangs verfügbaren Revision 2.5 angepasst werden, wie z. B. die Profilpolaren, die Blattstrukturdaten (nach einer aufwendigen Neu-Berechnung über Simulationen mit dem Tool BECAS) sowie einige weitere Parameter. Aus den Modellanpassungen ist dann auch in Abstimmung mit Fraunhofer IWES die Revision 4 des Anlagenmodells hervorgegangen, die jetzt öffentlich zugänglich im Internet zum Download zur Verfügung steht.

Der wesentliche Teil der Arbeiten in AP 4.2 bestand aus einem strukturierten Code-to-Code-Vergleich (gemeinsames Deliverable 4.2.1.1-4, 4.2.2.1, 4.2.2.4-5, 4.2.4.1). Dabei haben die beteiligten Partner unterschiedliche Zeitbereichs-Simulations-Codes genutzt (DLR: GH Bladed und Simpack; FW-H: OpenFAST; Nordex: alaskaWind; Senvion: HAWC2; Senvion musste das Konsortium vor Abschluss der Arbeiten aufgrund Insolvenz verlassen).

Das Ziel der Code-to-Code-Vergleiche war einerseits, die unterschiedlichen Ergebnisse zur Flutterstabilität der einzelnen Codes miteinander, andererseits auch die Stabilitätsgrenzen unterschiedlicher SmartBlades-Technologien mit der SmartBlades-Referenzanlage zu vergleichen.

Um Modellfehler zu vermeiden, wurden eine Reihe Vorabtests definiert, die dazu dienen, sicherzustellen, dass alle Partner mit ihren Tools die gleiche Anlage modellieren und nicht Anwendungsfehler zu vermeidbaren Differenzen der Simulationsergebnisse führen. Die Vorabtests waren durch eine steigende Komplexität gekennzeichnet. Nach dem Vergleich der Blattmasse und Schwerpunktlage sowie der Eigenfrequenzen und Moden wurde das statische Strukturverhalten der Blattmodelle überprüft, danach das dynamische Strukturverhalten der Blattmodelle, das stationäre aerodynamische Verhalten, das instationäre aerodynamische Verhalten, das stationäre aeroelastische und schließlich das instationäre aeroelastische Verhalten. Die Vorabtests wurden sowohl für die Referenzanlagenkonfiguration als auch für die Swept Blade-Konfiguration aus Technologie 1 durchgeführt.

Die aeroelastische Stabilität wurde im Rahmen einer sogenannten Runaway-Analyse untersucht. Dabei wird angenommen, dass es einen Netzabfall gibt und sowohl die Pitch- als auch die Drehmomentenregelung versagt. Gleichzeitig wird die Windgeschwindigkeit langsam gesteigert. Die Drehzahl des Rotors steigt in der Leerlaufdrehzahl mit der steigenden Windgeschwindigkeit, bis die relative Anströmung so groß wird, dass das Blatt anfängt sich aufzuschwingen, was der aeroelastischen Instabilität entspricht. Bei Eintreten der Instabilität fällt die Drehzahl plötzlich ein wenig ab, weil Rotationsenergie in Schwingungsenergie transformiert wird. Daher lässt sich der Instabilitätspunkt relativ eindeutig identifizieren. Die Ergebnisse der einzelnen Codes wurden miteinander verglichen und ein relativ großer Unterschied in den einzelnen Stabilitätspunkten festgestellt.

Neben dem Code-to-Code-Vergleich wurden automatisierte Skripte zur Ermittlung kritischer Zustände (Deliverable 4.2.2.3) entwickelt. Außerdem wurden Stabilitätsuntersuchungen für Technologie 2 durchgeführt, wobei für die Runaway-Analyse außerdem die Annahme getroffen wurde, dass die Klappen bei unterschiedlichen Klappenwinkeln feststehen und nicht mehr beweglich sind (Deliverable 4.2.2.8). Ferner

wurden Empfehlungen für die Zertifizierung auf Basis der durchgeführten Simulationen abgeleitet (Deliverable 4.2.2.9).

### **5.4.3 Arbeitspaket 4.3: Nichtlineare Regelung**

In AP 4.3 wurden nichtlineare Regelungsstrategien für die Technologie 1 entwickelt und ihre Performanz mit der Referenzregelung verglichen. Zunächst wurden die Biege-Torsions-gekoppelten Blätter für die IWT-75.-164 Referenzanlage in MoWiT, dem hauseigenen Lastrechnungstool des Fraunhofer IWES, implementiert. Dazu wurde die Blattkrümmung ohne Verlängerung des Rotorradius angewendet, um das aerodynamische Verhalten ähnlich zu halten.

Für spätere Vergleiche wurde ein Standard-Regler für das Anlagenmodell entworfen. Dabei handelte es sich um einen PI-Regler für die Pitchregelung mit Gain Scheduling und Antiwindup. Die Generatorregelung wurde durch Maximum Power Point Tracking realisiert. Für eine Analyse der Biege-Torsions-gekoppelten Blätter in Bezug auf den regelungstechnischen Einsatz wurde die Windgeschwindigkeit stufenförmig erhöht, um die Reaktion von Komponenten und der Blätter zu ermitteln. Dabei wurde die Drehrate der Blattspitze als sensitiv gegenüber Windböen eingestuft.

Darauf aufbauend wurde ein Regler entworfen, der die Biege-Torsions-Kopplungseigenschaften explizit berücksichtigt. Dabei wurde eine Feedforward-Regelung der Blattspitzen-Twist-Rate auf den Pitchwinkel mit einer Mittelung für alle drei Blätter eingesetzt. Zur Glättung des Signals wurde dieses gefiltert und gleichmäßig auf den kollektiven Pitchwinkel addiert.

Für die neu entworfene Regelungsstrategie wurde eine Gesamtbewertung durchgeführt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die maximale Turmschwingung um 15% und die maximalen Schlag-Biegemomente um 6% reduziert werden konnten. Die Ermüdungslasten dagegen bleiben unverändert. Die Energieproduktion wird nur durch die Biege-Torsions-Kopplung, nicht aber durch die Regelung beeinflusst.

Die Ergebnisse wurden in den Deliverables 4.3.1.1-4.3.1.6 dokumentiert.

#### **5.4.4 Arbeitspaket 4.4: Technologiebewertung**

In AP 4.4 wurden die im Projekt erforschten Technologien 1-3 grundlegend analysiert und in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht bewertet.

Das Bewertungsmodell, das von FW-H bereits im Vorgängerprojekt „Smart Blades“ entwickelt wurde und dort zum Einsatz gekommen ist, wurde kontinuierlich fortgeschrieben. Das Modell basiert auf der VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3 [47]. Dabei werden eine technische und eine wirtschaftliche Wertigkeit berechnet und in ein sogenanntes Stärkediagramm eingetragen. Eine Technologie, die große technische und wirtschaftliche Wertigkeiten erhält, ist eine techno-ökonomisch günstige Variante. Die technische Wertigkeit wird als Summe von Teilwertigkeiten berechnet. Jede Teilwertigkeit basiert auf der Bewertung einzelner Bewertungskriterien. Die Methode ist also ein multikriterielles Bewertungsmodell. Die Teilwertigkeiten werden als Verhältnis aus einem Teilnutzwert und einem maximal möglichen Teil-Nutzwert, gewichtet durch einen für das jeweilige Kriterium gültigen Wichtungsfaktor, berechnet. Die Bewertungskriterien wurden mit den Industriepartnern während des Projekts abgeglichen und nach ausführlicher Diskussion teilweise modifiziert (Deliverable 4.4.1.1). Außerdem wurde eine Expertenbefragung bei den Industriepartnern durchgeführt, um ausgewählte Wichtungsfaktoren und Bewertungsskalen zu bestimmen. Die wirtschaftliche Wertigkeit wird als Verhältnis aus idealen und prognostizierten Herstellkosten berechnet. Die Ermittlung der Kosten erfolgt über ein Kostenmodell. Für die Bewertung wurden sämtliche Deliverables gesichtet und die Forschungsergebnisse der Partner in das Bewertungsmodell überführt. Es wurden halbjährlich Zwischenbewertungen (Deliverable 4.4.1.2) und am Ende des Projekts eine abschließende Bewertung durchgeführt (Deliverable 4.4.1.3). Leider konnten nicht wie geplant vollständige Lastensimulationen für alle drei SmartBlades-Technologien von SUZLON durchgeführt werden. Daher standen für die Technologiebewertung keine konsistenten und vollständigen Lastensets zur Verfügung. Die Bewertungsergebnisse sind also in quantitativer Sicht mit Vorsicht zu behandeln, können qualitativ aber herangezogen werden.

Darüber hinaus wurde von WRD eine ausführliche Evaluation der Technologien 1 und 2 durchgeführt (Deliverable 4.4.2). Für beide Technologien wurde der technologische Reifegrad analysiert, wobei eine deutliche Steigerung des technologischen Reifegrades

(engl. *Technology Readiness Level*, TRL) infolge des Projekts attestiert wurde. Ebenfalls für beide Technologien wurde eine umfangreiche SWOT-Analyse durchgeführt. Es wurde ferner – ebenfalls für beide Technologien – eine Bewertung von Simulationsmethoden und der Technologien als Ganzes vorgenommen. Darüber hinaus wurden in Deliverable 4.4.2 die Beratungstätigkeiten von WRD während des Projekts (technologische Einordnung, Versuchsplanung, -durchführung und -validierung) dokumentiert.

## **5.5 Deliverables Berichte**

Die Deliverables sind als Anhang K diesem Bericht angehängt.

## **5.6 Fazit**

Das mechanische Verhalten von Rotorblattverklebungen wurde in AP 4.1 eingehend untersucht. Dabei wurden experimentelle Arbeiten zur Material- und Strukturcharakterisierung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse wurden z. T. in neue Materialmodelle integriert, die die Fertigungsprozesse berücksichtigen. Ein Ergebnis ist beispielsweise die Prognose von Eigenspannungen unter Berücksichtigung des thermischen und chemischen Schrumpfens. Darüber hinaus wurden hybride Finite-Elemente-Modellierungsmethoden entwickelt, die eine lokale Netzverfeinerung und einen global-lokalen Vernetzungsübergang zur lokal genauen Beschreibung der Verklebungsgeometrie an der Hinterkante beinhalten. Es lässt sich festhalten, dass das Verständnis des mechanischen Verhaltens von Rotorblattverklebungen vertieft wurde und so ein Beitrag zur zertifizierungsfähigen Entwicklung von SmartBlades-Technologien geleistet wurde.

In AP 4.2 wurden Prognosen der Flatterstabilitätsgrenze bei Einsatz unterschiedlicher Anlagensimulationstools im Zeitbereich miteinander verglichen. Dabei sind z. T. erhebliche Unterschiede aufgetreten. Es gibt Anhaltspunkte, dass unterschiedliche Korrekturverfahren in den Formulierungen der Blattelementimpulstheorie, die jeweils der Aerodynamik zugrunde liegen, dafür verantwortlich sind. Dies konnte jedoch nicht abschließend geklärt werden. Es wurden auch Simulationen für die Swept-Blade-Variante aus Technologie 1 durchgeführt. Auch hier sind erhebliche Unterschiede zwischen den Simulationstools aufgetreten. Da diese zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschließend erklärt werden können, kann jedoch auch kein endgültiges Fazit zur Kritikalität von

Rotorblättern mit gezielter Biege-Torsions-Kopplung gezogen werden. Für Rotorblätter mit integrierten Hinterkantenklappen (Technologie 2) wurden lediglich Simulationen mit OpenFAST durchgeführt, so dass hier kein Code-to-Code-Vergleich durchgeführt werden kann. Es konnte aber gezeigt werden, dass für kollektiv feststehende Klappen (gleicher konstanter Klappenausschlag in allen drei Blättern) der Klappenwinkel einen signifikanten Einfluss auf die Flatterstabilität der Anlage hat. Technologie 3 wurde in AP 4.2 nicht behandelt. Es sind grundsätzlich weitergehende Forschungsaktivitäten erforderlich, um ein abschließendes Fazit zum Flatterverhalten von SmartBlades-Technologien zu ziehen. Insbesondere eine experimentelle Validierung von Simulationsergebnissen ist wünschenswert. Im Rahmen der Aktivitäten in AP 4.2 konnten mehrere Fehler und Inkonsistenzen im Anlagenmodell der SmartBlades Referenzanlage identifiziert und behoben werden. Die Anpassungen sind in die öffentlich verfügbare Revision 4 des Referenzanlagenmodells eingegangen [38] und stehen damit der Forschungscommunity zur Verfügung.

In AP 4.3 wurden grundlegende Arbeiten durchgeführt, um für Technologie 1 die Methode des Model Predictive Control zu etablieren. Es konnten in Simulationen signifikant Extremlasten reduziert werden, wobei die damit in Zusammenhang stehende Reduktion des Energieertrags auf die Biege-Torsions-Kopplung selbst, nicht aber auf die Reglerstrategie zurückzuführen war. Es sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um den Beitrag einer optimalen Regelung auf das Finden eines optimalen Kompromisses zwischen Lastenreduktion und Energieertragserhaltung (oder sogar Ertragssteigerung) zu ermitteln und so einen Business Case für SmartBlades-Technologien zu entwickeln.

In AP 4.4 wurde das multikriterielle techno-ökonomische Bewertungsmodell aus dem Vorgängerprojekt „Smart Blades“ fortgeschrieben und weiterentwickelt. Dabei ist eine Expertenbefragung bei den beteiligten Industriepartnern in die Ermittlung von Wertefunktionen und Wichtungsfaktoren, die für die Bestimmung der technischen Wertigkeiten benötigt werden, eingegangen. Leider konnten nicht wie ursprünglich geplant vollständige Lastensets für alle drei Technologien in die Bewertung eingehen, so dass kein abschließendes Fazit zu Chancen und Risiken der einzelnen Technologien möglich ist. Allerdings wurde von WRD eine fundamentale und detaillierte Analyse zu den

Technologien 1 und 2 durchgeführt, die die Reifegrade der Technologien und der für ihre Entwicklung erforderlichen Simulations- und Analysemethoden beinhaltet.

Insgesamt konnten alle übergeordneten Projektziele, die mit der Technologie 4 (Querschnittsthemen) assoziiert waren, erreicht werden. Auch die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele wurden erreicht. Somit wurde das Vorhaben aus Sicht der Technologie 4 erfolgreich abgeschlossen.

## 6 Externes Literaturverzeichnis

- [1] T. Ashwill, „Sweep-Twist Adaptive Rotor Blade: Final Project Report - SAND2009-8037,“ Sandia, Albuquerque, New Mexico, USA, 2009.
- [2] T. Ashwill, „Passive Load Control for Large Wind Turbines - SAND2010-3276C,“ Sandia, Albuquerque, New Mexico, USA, 2010.
- [3] D. Baldacchino, M. Manolesos, C. Ferreira, G. Salcedo, M. Aparicio, T. Chaviaropoulos, K. Diakakis, L. Florentie, N. R. García, G. Papadakis, N. N. Sørensen, N. Timmer, N. Troldborg, S. Voutsinas und A. van Zuijlen, „Experimental benchmark and code validation for airfoils equipped with passive vortex generators,“ in *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 022 002, <http://stacks.iop.org/1742-6596/>, Munich, Germany, 2016.
- [4] D. Berry, „Design of 9-Meter Carbon Fiberglass Prototype Blades: CX-100 and TX-100 - SAND2007-0201,“ Sandia, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007.
- [5] T. Blumenstock, „Analyse der Eigenspannungen bei der Aushärtung von Epoxidharzmassen,“ Stuttgart, 2003.
- [6] E. A. Bossanyi, „Individual Blade Pitch Control for Load Reduction,“ *Wind Energy*, Bd. 6, Nr. 2, pp. 119-128, 2003.
- [7] Braun, „Untersuchungen von Vorflügelkinematiken,“ Messerschmidt Bericht 33/41. Augsburg, 1941.
- [8] L. Brazier, „On the flexure of thin cylindrical shells and other 'thin' sections,“ *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Bd. 116, Nr. 773, pp. 104-114, 1927.
- [9] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe und E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd edition, Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] P. Noever Castelos und C. Balzani, „On the impact of multi-axial stress states on trailing edge bondlines in wind turbine rotor blades,“ *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 753, p. 62002, 2016.
- [11] DNV GL AS, *Rotor blades for wind turbines*, 2015.
- [12] L. a. K. J. Fingersh, „Baseline results and future plans for the NREL controls advanced research turbine,“ in *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno. Nevada, 2004.
- [13] M. Gaunaa, F. Zahle, N. Sorensen und C. Bak, „Quantification of the effects of using slats on the inner part of a 10MW rotor,“ in *EWEA 2012 - European Wind Energy Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [14] R. Haas, „An efficient approach for determining the flutter characteristics of rotor blades for multi-megawatt wind turbines,“ in *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, Athen, Griechenland, 2006.
- [15] G. Habenicht, *Kleben*, Berlin: Springer, 2009.
- [16] M. Hansen, „Aeroelastic instability problems for wind turbines,“ *Wind Energy*, Bd. 10, Nr. 6, pp. 551-577, 2007.
- [17] E. Hau, *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*, 4. Auflage, Berlin: Springer, 2008.

- [18] L. C. Henriksen, „Model Predictive Control of Wind Turbines,“ Lyngby, Dänemark, 2011.
- [19] J. Holierhoek, „Aeroelasticity of Large Wind Turbines,“ Delft, Niederlande, 2008.
- [20] M. Holst, „Reaktionsschwund von Epoxidharz-Sysemen,“ Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2001.
- [21] D. Horte und C. Balzani, „Abschließende Bewertung der Smart-Blades-Technologien,“ Hannover, 2016.
- [22] O. Huxdorf, J. Riemenschneider, P. Lorsch und M. Radestock, „STRUCTURAL DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF A SHAPE-ADAPTIVE SLAT FOR WIND ENERGY ROTOR BLADES,“ in 8th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Madrid, Spanien, 2017.
- [23] M.-S. Jeong, I. Lee, S.-J. Yoo und K.-C. Park, „Torsional stiffness effects on the dynamic stability of a horizontal axis wind turbine blade,“ *Energies*, Bd. 6, Nr. 4, pp. 2242-2261, 2013.
- [24] A. J. Kolios, A. Rodriguez-Tsouroukdissian und K. Salonitis, „Multi-criteria decision analysis of offshore wind turbines support structures under stochastic inputs,“ *Ships and Offshore Structures*, Bd. 11, Nr. 1, pp. 38-49, 2016.
- [25] A. H. I. Lee, M.-C. Hung, H.-Y. Kang und W. L. Pearn, „A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment,“ *Energy Conversion and Management*, Bd. 64, pp. 289-300, 2012.
- [26] D. W. Lobitz, „Aeroelastic stability predictions for a MW-sized blade,“ *Wind Energy*, Bd. 7, Nr. 3, pp. 211-224, 2004.
- [27] D. W. Lobitz, „Parameter sensitivities predictions for a MW-sized blade,“ *Journal of Solar Energy*, Bd. 127, Nr. 4, pp. 538-543, 2005.
- [28] E. Lozano-Minguez, A. J. Kolios und F. P. Brennan, „Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures,“ *Renewable Energy*, Bd. 36, pp. 2831-2837, 2011.
- [29] W. J. Manso Jaume A, „Aerodynamic Design and Optimization of a High-Lift Device for a Wind Turbine Airfoil,“ in *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X*, Berlin Heidelberg New York, Springer, 2016, pp. 859-869.
- [30] F. Meng, „Aero-elastic Stability Analysis for Large-Scale Wind Turbines,“ Delft, Niederlande, 2011.
- [31] H. F.-S. L. G. G. a. P. G. Meng, „Study on fatigue life of bend-twist coupling wind turbine blade based on,“ *Composite Structures*, Nr. 208, pp. 678--701, 2019.
- [32] J. G. Njiri und D. Söffker, „State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 60, pp. 377-393, 2016.
- [33] J. Oberschmidt, „Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme,“ Göttingen, 2010.
- [34] G. Pechlivanoglou, C. Nayeri und C. Paschereit, „Fixed Leading Edge Auxiliary Wing as a Performance Increasing Device for HAWT Blades,“ in *Proceedings of DEWEK 2010*, Bremen, Germany, 2010.
- [35] G. Pechlivanoglou, „Passive and active flow control solutions for wind turbine blades,“ Berlin, 2013.

- [36] J. Peinke und P. Neumeyer, „Rotor für eine windenergieanlage und Verfahren zur Regelung des Rotors“. Deutschland Patent DE 10 2010 027 003, 19 01 2012.
- [37] Petrikat K, „Untersuchungen an festen und selbsttätig öffnenden Vorflügeln im Wasserkanal der Gerhard Fieseler Werke,“ Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung. Kassel, 1940, vol. 1, p. 248 ff.
- [38] W. Popko, P. Thomas, A. Sevinc, M. Rosemeier, M. Bätge, R. Braun, F. Meng, D. Horte, C. Balzani, O. Bleich, E. Daniele, B. Stoevesandt, M. Wentingmann, J. D. Polman und M. Leimeister, „IWES Wind Turbine IWT-7.5-164 Rev. 4,“ Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems IWES, Bremerhaven, 2018.
- [39] B. Resor, B. Owens und D. Griffith, „Aeroelastic instability of very large wind turbine blades,“ in *Proceedings of EWEA 2012 Annual Event*, Kopenhagen, Dänemark, 2012.
- [40] F. Sayer, A. Antoniou und A. van Wingerde, „Investigation of structural bond lines in wind turbine blades by sub-component tests,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Bd. 37, pp. 129-135, 2012.
- [41] D. Schlipf, D. J. Schlipf und M. Kühn, „Nonlinear model predictive control of wind turbines using LIDAR,“ *Wind Energy*, Bd. 16, Nr. 7, pp. 1107-1129, 2013.
- [42] K. T. Schmidt, „INNWIND,“ 11 06 2014. [Online]. Available: <http://www.innwind.eu/Work-Packages/Work-Package-2>. [Zugriff am 22 06 2016].
- [43] A. Smith, „High-Lift Aerodynamics,“ *Journal of Aircraft*, Bd. 12, Nr. 6, pp. 501-530, 1975.
- [44] R. M. H. H. a. G. P. Stäblein, „Fundamental aeroelastic properties of a bend–twist coupled blade section,“ *Journal of FLuids and Structures*, Bd. 68, pp. 72--89, 2017.
- [45] A. R. M. H. H. a. D. R. V. Stäblein, „Modal properties and stability of bend-twist coupled wind turbine blades,“ *Wind Energy Science*, pp. 343--360, 2017.
- [46] M. Troldborg, S. Heslop und R. L. Hough, „Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 39, pp. 1173-1184, 2014.
- [47] „VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren,“ Verein Deutscher Ingenieure e. V., 1998.
- [48] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang und J.-H. Zhao, „Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 13, pp. 2263-2278, 2009.
- [49] M. Wenzel, „Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen,“ Darmstadt, 2005.
- [50] C. B. York, „On Bending-Twisting coupled laminates,“ *Composite Structures*, Bd. 160, pp. 887–900, 2017.
- [51] F. Zahle, M. Gaunaa, N. Sørensen und C. and Bak, „Design and Wind Tunnel Testing of a Thick, Multi-Element High-Lift Airfoil,“ in *EWEA 2012 - European Wind Energy Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [52] J. R. Zayas, P. L. Jones und A. Holman, „CX-100 and TX-100 Blade Field Tests - SAND2005-7454,“ Sandia, Albuquerque, New Mexico, USA, 2005.

- [53] X. K. H. a. Z. L. Zhou, „Effects of bend-twist coupling on flutter limits of composite wind turbine blades.“ *Composite Structures*, Nr. 192, pp. 317--316, 2018.

## **Anhang J**

### **Publikationsliste SmartBlades2**

Im Nachfolgenden sind die Publikationen aus dem Projekt SmartBlades2 bis zum Projektende am 30.09.2020 aufgelistet.

### ***Technologie 1***

- (1) Bösl, P.; Numerische Untersuchung der Aerodynamik von Windenergieanlagen bei Extremwind; Masterarbeit bei WRD und Universität Stuttgart (2018).
- (2) Daniele, E.; Wind turbine control in computational fluid dynamics with OpenFOAM; Wind Engineering, 41(4), 213-225 (2017).
- (3) Denecke, N., Kress, K., Mechler, S., Nitschke, M.; Field demonstration of integral load measurements tailored to advanced offshore wind turbine blades; Proceedings of the WindEurope Offshore Conference, Copenhagen (2019).
- (4) Dose, B., "Fluid-structure coupled computations of wind turbine rotors by means of CFD", PhD Thesis (2018).
- (5) Dose, B., Rahimi, H., Herráez, I., Stoevesandt, B., Peinke, J.; Fluid-structure coupled computations of the NREL 5 MW wind turbine by means of CFD. Renewable energy, 129, 591-605 (2018).
- (6) Dose, B., Rahimi, H., Stoevesandt, B., Peinke, J.; Fluid-structure coupled investigations of the NREL 5 MW wind turbine for two downwind configurations. Renewable Energy, 146, 1113-1123 (2020).
- (7) Dose, B., Rahimi, H., Stoevesandt, B., Peinke, J., Schepers, J.G.; On the effect of blade deformations on the aerodynamic performance of wind turbine rotors subjected to yawed inflow. The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2018), 1037, 1-12. (2018).
- (8) Gharibi, Z., Peinke, J., Stoevesandt, B.; Aerodynamic and Aeroacoustic Analysis of a Passive-Adaptive Slat for a Wind Turbine Airfoil; Bulletin of the American Physical Society (2020).
- (9) Gundlach, J., Knebusch, J., Govers, Y., Haller, B.; Model-based displacement estimation of wind turbine blades using strain modal data.; Journal of Physics, Conference Series (Vol. 1618, No. 5, p. 052069); IOP Publishing, September (2020).
- (10) Gundlach, J., Govers, Y.; Experimental modal analysis of aeroelastic tailored rotor blades in different boundary conditions; J. Phys.: Conf. Ser. **1356** 012023 (2019).
- (11) Gundlach, J., Govers, Y.; Experimentelle Modalanalyse an einem aeroelastisch optimierten Rotorblatt mit Biege-Torsions-Kopplung; 9. VDI-Tagung Schwingungen von Windenergieanlagen, 91-103 (2324), VDI-Verlag (2018).
- (12) Haller, B., Noever Castelos, P., Balzani, C.; Validation of torsional stiffness by means of full-scale blade testing; Wind Energy Science Conference (WESC2021), Hannover, Germany, online event, accepted; May (2021).
- (13) Henkel, N.; Numerische Untersuchung turbulenter Anströmbedingungen auf Windenergieanlagen; Bachelorarbeit bei WRD und RWTH Aachen (2018).
- (14) Kidambi Sekar, A.P. et.al.; Evaluation of the LINCOM wind field reconstruction method with simulations and full-scale measurements; Journal of Physics: Conference Series **1037**; 052008 (2018).
- (15) Montano, Z., Kühn, M., Daniele, E., Stüve, J.; Bend-twist Coupling on Rotor Blades for Wind Turbines; Lightweight Design worldwide, 11(4), 42-47 (2018).

- (16) Noever Castelos, P., Haller, B., Balzani, C.; Validation of a modelling methodology for wind turbine rotor blades based on a full scale blade test, Wind Energy Science, eingereicht, Preprint verfügbar online: <https://doi.org/10.5194/wes-2021-24>; (2021).
- (17) Noever Castelos, P., Balzani, C.; Sensitivity analysis of the structural performance of a wind turbine blade with respect to modelling and manufacturing parameters; Wind Energy Science Conference (WESC2021), Hannover, Germany, online, event, accepted; May (2021).
- (18) Popko, W., Thomas, P., Sevinc, A., Rosemeier, M., Bätge, M., Braun, R., Meng, F., Horte, D., Balzani, C., Bleich, O. and Daniele, E.; IWES Wind Turbine IWT-7.5-164. Rev 4 Tech. rep. Fraunhofer IWES (2018).
- (19) Rahimi, H., „Validation and improvement of numerical methods for wind turbine aerodynamics: development of an engineering model for yawed conditions derived from computational fluid dynamics“, PhD Thesis (2018) .
- (20) Rosemeier, M., Saathoff, M.; Assessment of a rotor blade extension retrofit as a supplement to the lifetime extension of wind turbines; Wind Energy Science, 5(3), 897-909 (2020).
- (21) Rosemeier, M., Saathoff, M., Antoniou, A.; Assessment of a rotor blade extension retrofit as an alternative to the lifetime extension of wind turbines. Presented at the Wind Energy Science Conference 2019 (WESC 2019), Cork, Ireland, Zenodo <http://doi.org/10.5281/zenodo.3249040>; June (2019).
- (22) Rosemeier, M., Antoniou, A., Lester, C., Schmitt, Y.; Experimental validation of a novel hybrid plywood/steel load frame design for sub-component testing of wind turbine blades; Presented at the 21st International Conference on Composite Structures (ICCS21), Bologna, Italy; Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1420958>; September (2018).
- (23) Vorspel, L., „Development of a tool for aerodynamical optimization of wind turbine rotor blades using the adjoint approach“ PhD Thesis (2019).
- (24) Vorspel, L., Stoevesandt, B., & Peinke, J.; Optimize rotating wind energy rotor blades using the adjoint approach. Applied Sciences, 8(7), 1112 (2018).
- (25) Vorspel, L., Schramm, M., Stoevesandt, B., Brunold, L., & Bünner, M.; A benchmark study on the efficiency of unconstrained optimization algorithms in 2D-aerodynamic shape design. Cogent Engineering, 4(1), 1354509 (2017).
- (26) Vorspel, L., Stoevesandt, B., Peinke, J.; Optimize rotating wind energy rotor blades using the adjoint approach; Applied Sciences, 8(7), 1112 (2018).
- (27)

## **Technologie 2**

- (1) Forghani, M., Petrovic, V., and Kühn, M.: “Experiments of wind turbine active flap control using a stationary blade segment in wind tunnel”, EAWE PhD Seminar, Cranfield, United Kingdom (2017) (Vortrag).
- (2) Haldar, A., Jansen, E., Rolfes, R.; Snap-through of multistable variable stiffness composites using piezoelectric actuators; 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Structures (ICCS20); 655, 4-7 Sept., Paris, France (2017).
- (3) Haldar, A., Jansen, E., Rolfes, R.; Analysis of Morphing Trailing Edge Flap with Embedded Multistable Variable Stiffness Laminates; AIAA Scitech 2019-0856, Session Morphing Wings I, Januar, San Diego, California (2019).

- (4) Petrović, V., Berger, F., Neuhaus, L., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., and Kühn, M.: “Wind tunnel validation of wind turbine load reducing concepts based on individual pitch control and blades with rigid leading edge slats”, Wind Energy Science Conference, Cork, Ireland (2019) (Vortrag).
- (5) Pohl, M., Riemenschneider, J.; Konzipierung, Auslegung und Vermessung einer formveränderlichen Hinterkante für ein Windenergie rotorblatt; Symp. Für smarte Strukturen und Systeme (4SmartS), Shaker Verlag, 21-22. June, Braunschweig, Germany (2017).
- (6) Pohl, M., Riemenschneider, J.; Designing and testing a flexible trailing edge of wind energy turbine blades; AIA 2018-1066, Aerospace Structures II, Januar (2018).
- (7) Pohl, M.; Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy blades; Wind energy Science Conference, 17-20. July, Cork, Irland (2019).
- (8) Riemenschneider, J., Pohl, M., Ungurán, R., Petrovic, V., Kühn, M., Haldar, A., Madhusoodanan, H., Jansen, E., Rolfes, R.; Smart Trailing Edges for Wind Turbines; SMASIS2018-7916, p. 11, November (2018).
- (9) Suryadi, A., Jätz, C., Seume, J., Herr, M.; Identifying the flap side-edge noise contribution of a wind turbine blade section with an adaptive trailing edge; International Conference on Wind Turbine Noise, online event, accepted; May (2021).
- (10) Ungurán, R.: „Lidar-assisted feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flaps control of variable-speed wind turbines,“ PhD dissertation, Carl von Ossietzky University of Oldenburg (2019).
- (11) Ungurán, R., Petrović, V., Boersma, S., van Wingerden, J., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Feedback-feedforward individual pitch control design for wind turbines with uncertain measurements“, American Control Conference (ACC), Philadelphia, USA (2019) (Vortrag).
- (12) Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Smart rotor control of wind turbines under actuator limitations“, American Control Conference (ACC), Philadelphia, USA (2019) (Vortrag).
- (13) Ungurán, R., Petrović, V., Boersma, S., van Wingerden, J., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Feedback-feedforward individual pitch control design for wind turbines with uncertain measurements,“ in American Control Conference (ACC), pp. 4151–4158, doi: 10.23919/ACC.2019.8814757 (2019).
- (14) Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Smart rotor control of wind turbines under actuator limitations“, in American Control Conference (ACC), pp. 3474–3481, doi: 10.23919/ACC. 2019.8815001 (2019).
- (15) Ungurán, R., Petrović, V., and Kühn, M.: “Investigation of the blade mounted lidar use for feedforward individual pitch and trailing edge flaps control in Large-Eddy Simulation”, Wind Energy Science Conference 2017, Copenhagen, Denmark (2017) (Vortrag).
- (16) Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Performance evaluation of a blade-mounted LiDAR with dynamic versus fixed parameters through feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flap control“, TORQUE 2018, Milan (2018) (Vortrag).
- (17) Ungurán, R., Petrović, V., Pao, L. Y., and Kühn, M.: „Performance evaluation of a blade-mounted LiDAR with dynamic versus fixed parameters through feedback-feedforward individual pitch and trailing edge flap control“, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1037, p. 032004, doi: 10.1088/1742-6596/1037/3/032004 (2018).
- (18) Ungurán, R., Petrovic, V., Pao, L.Y., Kühn, M.; Uncertainties identification of the blade-mounted lidar-based inflow wind speed measurements for robust feedback-feedforward control synthesis; Journal Wind Energy Science 4, 677-692, April (2019).

- (19) Vosseveld, R.; Development of a Software framework to assess the potential of adaptive trailing edge flaps on horizontal-axis wind turbines; Masterarbeit bei WRD, Delft University of Technology und Technical University of Denmark (2019).

### **Technologie 3**

- (1) Berger, F., Kröger, L., Onnen, D., Petrović, V., and Kühn, M.: „Scaled wind turbine setup in a turbulent wind tunnel”, EERA DeepWind Conference, Trondheim, Norway (2018) (Vortrag).
- (2) Berger, F., Hölling, M., and Kühn, M.: “Scaled wind turbine test setup in a wind tunnel with active turbulence generation for induction aerodynamics, load and control experiments”, NAWEA WindTech Conference, Boulder (2017) (Vortrag).
- (3) Berger, F., and Kühn, M. (2018): “Experimental investigation of dynamic inflow effects with a scaled wind turbine in a controlled wind tunnel environment”, The Science of Making Torque from Wind, Milan, Italy (2018) (Vortrag).
- (4) Berger, F., Kröger, L., Onnen, D., Petrović, V., & Kühn, M.; Scaled wind turbine setup in a turbulent wind tunnel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1104(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012026> (2018).
- (5) Berger, F., Kühn, M.; Experimental investigation of dynamic inflow effects with a scaled wind turbine in a controlled wind tunnel environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/5/052017> (2018).
- (6) Berger, F., Neuhaus, L., Kröger, L.; Dynamic inflow due to gusts - an experimental wind tunnel study; Wind Energy Science Conference, Cork, Ireland (2019).
- (7) Gharibi, Z., Stoevesandt, B., Peinke, J.; Aeroacoustic Analysis of a Two-Element Airfoil with a Leading Edge Slat Using Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity Model for Large-Eddy Simulation; DAGA 2019 – 45; Jahrestagung für Akustik; 18 - 21 March, Rostock, Germany (2019).
- (8) Gharibi, Z., Peinke, J., Stoevesandt, B.; Aerodynamic Simulation of Flow over Passive-Adaptive Slat for a Wind Turbine Airfoil; Wind Energy Science Conference (WESC), 17-20 June, Cork, Ireland (2019).
- (9) Neuhaus, L., Singh, P., Homeyer, T., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., Peinke, J. & Hölling, M. (2018, June). Mitigating loads by means of an active slat. TORQUE 2018, Milan (2018) (Poster).
- (10) Neuhaus, L., Singh, P., Homeyer, T., Huxdorf, O., Riemenschneider, J., Wild, J., Peinke, J. & Hölling, M.; Mitigating loads by means of an active slat. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, pp. 1-8). Institute of Physics (IOP) Publishing (2018).
- (11) Neuhaus L., Berger, F., Peinke, J., Hölling, M.; Capturing wind turbine power curve and dynamics by atmospheric-like inflow at lab-scale; Wind Energy Science Conference 2019, 17.-20. June 2019, Cork, Ireland (2019).
- (12) Petrović, V., Berger, F., Neuhaus, L., Hölling, M., & Kühn, M.; Wind tunnel setup for experimental validation of wind turbine control concepts under tailor-made reproducible wind conditions; *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1222, No. 1, p. 012013). IOP Publishing (2019).
- (13) Schramm, M., Stoevesandt, B., Peinke, J.; Simulation and Optimization of an Airfoil with Leading Edge Slat; *Journal of Physics Conference Series* 753(2), September (2016).

- (14) Singh, P., L. Neuhaus, O. Huxdorf, J. Riemenschneider, J. Wild, J. Peinke and M. Hölling; Airfoil load mitigation by an active slat under turbulent inflow conditions. Wind Energy Science Conference, Cork (2019).
- (15) Singh, P., L. Neuhaus, O. Huxdorf, J. Riemenschneider, J. Wild, J. Peinke and M. Hölling Mitigation of turbulence-induced loads by an active slat. Wind Physics Symposium 2019, Oldenburg (2019).

#### ***Technologie 4***

- (1) Hach, O., Hennings, H., Polman, J., Balzani, C., Klemme, T., Müller, S., Rieke, J.; Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools for wind turbines; Wind Energy Science Conference, 16.-20. Juni, Cork, Irland (2019).
- (2) Hach, O., Verdonck, H., Polman, J. D., Balzani, C., Müller, S., Rieke, J., Hennings, H.; Wind turbine stability: Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools; TORQUE 2020 Conference, Delft, The Netherlands, online event; (2020).
- (3) Hach, O., Verdonck, H., Polman, J. D., Balzani, C., Müller, S., Rieke, J., Hennings, H.; Wind turbine stability: Comparison of state-of-the-art aeroelastic simulation tools; Journal of Physics: Conference Series 1618, 052048, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/5/052048>; (2020).
- (4) Holst, T., Sayer, F., Antoniou, A.; Modelling of chemical shrinkage evolution with curing degree of a filled epoxy adhesive; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 942, No. 1, p. 012020); IOP Publishing; October (2020).
- (5) Polman, J. D.; Balzani, C.; Time domain stability analysis of a rotor blade with trailing edge flaps; Wind Energy Science Conference (WESC2021), Hannover, Germany, online event, accepted; (2021).
- (6) Noever Castelos, P., Wentingman, M., Balzani, C.; Fatigue analysis of trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades accounting for non-proportional multiaxial stress histories; 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Structures (ICCS20), Sept. 04-07, Paris, France (2017).
- (7) Noever Castelos, P., Voosen, M., Balzani, C.; Non-proportional multi-axial stress states and their influence on the fatigue life of trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades; Wind Energy Science Conference, June 26-29, Copenhagen, Denmark (2017).
- (8) Noever Casteles, P, Voosen, M., Balzani, C.; Comparative study of finite-element-based fatigue analysis concepts for trailing edge adhesive joints in wind turbine rotor blades taking into account different rotor blae designs; GCM Colloquium on Computational Mechanics for Young scientists from Academia and Industry, Oct. 11-13, Stuttgart, Germany (2017).
- (9)

#### ***Alle Technologien***

- (1) Montano Rejas, Z., Opitz, S., Riemenschneider, J., et. al.; Selected Results on the Development and Testing of Smart Blades Technologies for Wind Turbines; 9<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 102.117, 08.-11. July, Paris, Frankreich (2019).



# **Anhang K**

## **Deliverables**

Die Deliverables befinden sich auf der dem Schlussbericht beiliegenden DVD.