

Abschlußbericht 2013



"Entwicklung und Konstruktion eines teilautomatisierten Finish für große Offshore Rotorblätter"

Förderkennzeichen: **0327678**
Laufzeit des Auftrages: 01.04.2008 – 31.12.2012
(Lt. Änderungsbescheid v. 07.12.2010)
Berichtszeitraum: **01.04.2008 – 31.12.2012**

Auftragnehmer / Autor des Berichtes:

AREVA Blades GmbH
Johann-Rathje-Köser-Straße 7
21683 Stade

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327678 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung des Projektes	4
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurden.....	5
3	Planung und Ablauf des Projektes.....	7
4	Zusammenfassung der wichtigsten Anforderung aus der Praxis an die Forschungsarbeiten	10
5	Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen	11
5.1	Bearbeitung der Rotorblattoberflächen	11
5.1.1	Beschichtungssysteme.....	11
5.1.1.1	Inmould Gelcoat	11
5.1.1.2	Epoxid Oberfläche	13
5.1.1.3	Abreißoberflächen	13
5.1.1.4	Lackklebefolien.....	13
5.1.2	Bearbeitungsmethoden	14
5.1.2.1	Schleifen	15
5.1.2.2	Strahlen.....	16
5.1.3	Beschichtungsverfahren.....	16
5.1.3.1	Beschichten durch Rollapplikation.....	16
5.1.3.2	Beschichten durch Spritzapplikation.....	16
5.1.3.3	Beschichtung durch Gießen und Spachten.....	17
5.2	Prüfung der Rotorblattoberflächen – Erosionsschutz der Rotorblätter.....	17
5.2.1	Erosionsschutz.....	18
5.2.1.1	Untersuchung der Erosion.....	20
5.2.1.2	Full Scale Erosions Versuche.....	20
5.2.1.3	Reparaturlösungen für bereits montierte Rotorblätter	23
5.2.1.4	Lösungsansätze für den Erosionsschutz	24
5.2.1.5	Untersuchung von Teilvarianten an Modellen	25
5.2.2	Erosionsteststand.....	25
5.2.2.1	Entwicklung und Bau eines Erosionsteststands.....	25
5.2.2.2	Entwicklung und Bau eines Prototyps für einen Erosionsteststand.....	25
5.2.2.3	Bau des Erosionsteststandes	31
5.2.2.4	Status des Erosions-Teststandes	34
5.2.3	Tests zur Auswahl geeigneter Erosionsschutzmaterialien	34
5.2.3.1	Sandstrahlen	35
5.2.3.2	Zugversuchstests	36
5.2.3.3	Leitfähigkeitstests.....	36
5.2.3.4	Blitzschutztests.....	37
5.2.3.5	Tests zur Trennmittelverträglichkeit.....	37
5.2.3.6	Tests zur Witterungsbeständigkeit.....	37
5.2.3.7	Tests zur UV-Beständigkeit	37
5.2.3.8	Hagelerosionstests.....	38
5.2.4	Reparaturkonzept für bestehende WEA	39
5.2.5	Neues Erosionsschutzsystem "AREVA 25a"	41
5.3	Endergebnis	45
6	Mittelverwendung – wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	47
6.1	Personal	47
6.2	Kostenplanung Material	47
6.3	Kostenplanung FE-Fremdleistungen.....	48
6.4	Kostenplanung Reisekosten	48
6.5	Kostenplanung vorhabenspezifische Abschreibungen	48
6.6	Kostenplanung sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	48
7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	48

7.1	Schutzrechanmeldung	49
7.2	Wirtschaftliche Aussichten nach Projektende.....	49
7.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende mit Zeithorizont.....	50
7.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	50
7.5	Geplante Veröffentlichungen	50

1 Aufgabenstellung des Projektes

Das in 2007 konzipierte und 2008 beantragte Projekt „Entwicklung und Konstruktion eines teilautomatisierten Finish für große Offshore Rotorblätter“ startete zum 01.04.2008.

Entsprechend des damaligen Erkenntnisstandes wurde das Projektvorhaben in vier Projektmodule, sogenannte Arbeitspakete eingeteilt:

- AP I.2 Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Lackierkabine
- AP I.3 Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblattoberflächen mittels Thermografie
- AP I.4 Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblättern mittels Schwingungsmessung
- AP I.1 Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Schleifkabine

Mit den Entwicklungen der vier verschiedenen Arbeitspakete sollte das Ziel des Forschungsvorhabens umsetzen, eine serienreife Entwicklung von industriellen Bearbeitungs- und Verarbeitungstechnologien für die Endbearbeitung von großen Offshore-Rotorblättern herzustellen.

Bis zu dem Zeitpunkt der Antragstellung/-bewilligung gab es noch keine Erfahrungen zu diesem Thema.

Während der ersten intensiven Arbeiten zur Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete wurde in 2008 und 2009 festgestellt, dass zunächst intensivere Forschungen zu den Beschichtungsmaterialien der Rotorblätter notwendig sind. Ursächlich hierfür waren häufige und wiederholte Reparatüreinsätze aufgrund von Schäden am Beschichtungsmaterial der Rotorblätter der Onshore-installierten Testanlagen.

Aus diesem Grund wurde im ersten Halbjahr des Jahres 2010 ein Umbruch des Projektes eingeleitet, mit der Konsequenz der Zielpräzisierung mit dem Schwerpunkt Verbesserung des Erosionsschutzes der Rotorblätter.

Seit dem 01.07.2010 lag der Focus des Projektes auf der Entwicklung eines langlebigeren Erosionsschutzmaterials für die Rotorblattbeschichtung, mit einer Haltbarkeit von ca. 20 Jahren.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurden

Die Freigabe zu dem Forschungsprojekt erfolgte zu einem Zeitpunkt als die ersten Offshore-Rotorblätter am Produktionsstandort in Stade hergestellt wurden.

Bis dahin gab es keine Erfahrungen im Offshore-Einsatz der Rotorblätter.

Bereits hergestellte Rotorblätter wurden in onshore-Testanlagen bei Bremen und Bremerhaven installiert.

Mit Beginn 2009 wurden Verkaufsverhandlungen zwischen der PROKON-Gruppe und der AREVA-Gruppe zum Verkauf der PN Rotor GmbH an die Bioenergy GmbH, einer Tochter der Areva-Gruppe durchgeführt. Im November 2009 erfolgte schließlich der Verkauf der PN Rotor GmbH an die AREVA Bioenergy GmbH.

Im Januar 2011 wurde die PN Rotor GmbH in die AREVA Blades GmbH umfirmiert.

Während dieser Verkaufverhandlungen in 2009 mussten die Forschungsarbeiten auf ein Minimum reduziert werden. Bis zur Freigabe der finanziellen Forschungsmittel für die PN Rotor GmbH konnten die in 2009 geplanten Investitionen etc. nicht getätigt werden.

Nach dieser auferlegten Ruhephase in der Bearbeitung des Forschungsprojektes erfolgte eine Revitalisierung des Projektes.

Diese Ruhephase erstreckte sich aber nicht vollständig auf die inhaltliche Projektbearbeitung in 2009. Vorher abgesteckte und festgelegte Projektbearbeitungsschritte wurden intensiver hinterfragt und entsprechend der aktuellen Erfahrungen in Frage gestellt. Neue Perspektiven und Projektbearbeitungsmöglichkeiten, wie auch –notwendigkeiten kristallisierten sich heraus.

Somit lag der Tätigkeitsschwerpunkt des Bereiches F&E der PN Rotor insbesondere mit Beginn 2010, in der Suche nach neuen, alternativen Lösungsansätzen, die bisher weder von der PN Rotor noch von anderen Rotorblattherstellern oder der Luftfahrtindustrie genutzt wurden. In diesem Zusammenhang und mit einem erweiterten Blickwinkel erfolgten Analyse- und Recherchetätigkeit, sowie Wirtschaftlichkeitsberechnungen etc.

Aus heutiger Sicht stellte sich für die AREVA Blades der zwischenzeitliche Projektstillstand eher als Vorteil für die gesamte Projektzielsetzung dar.

Die AREVA Blades sieht ein Hauptziel ihrer Forschungsarbeiten u.a. darin, hochwertige, langlebige und reklamationsarme Rotorblätter für den deutschen Offshoremarkt zu produzieren.

3 Planung und Ablauf des Projektes

Der Arbeitsplan des in 2008 genehmigten Forschungsprojektes bestand aus den folgenden Arbeitspaketen:

- AP I.2 Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Lackierkabine
- AP I.3 Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblattoberflächen mittels Thermografie
- AP I.4 Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblättern mittels Schwingungsmessung
- AP I.1 Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Schleifkabine

Der gemeinsame Schwerpunkt der geplanten Arbeitspakete lag in der Realisierung einer möglichst automatisierten Oberflächenbearbeitung für die gesamte Fertigungstiefe des Finishing, d.h. der Endbeschichtung der Offshore-Rotorblätter.

Die Arbeitspakete beinhalten die Erstellung und Entwicklung von Lasten- und Pflichtenheften.

Um mögliche Lösungsansätze für diese einzelnen Arbeitspakete heraus zu filtern, erfolgten u.a. branchenübergreifende Vergleiche mit anderen Finishverfahren. Mittels dieser externen und eigener Erkenntnisse wurde eine Beurteilung aller Lösungsansätze hinsichtlich technischer und zeitlicher Realisierbarkeit, dem anwendungstechnischen Risiko, der Wirtschaftlichkeit und der Serientauglichkeit durchgeführt. Die daraufhin ausgewählten Lösungsansätze wurden hinsichtlich ihrer Praktikabilität weiter verfolgt und detaillierter bearbeitet.

Die Ergebnisse des Projektes sollte in die Entwicklung und den Bau von Prototypen der einzelnen Verarbeitungsmaschinen, Prüfvorrichtungen und Probeteilen einfließen.

Eine anschließende Überprüfung und Vermessung der Fertigungsergebnisse, eine Auswertung der Messergebnisse, sowie eine Beurteilung der erarbeiteten einzelnen Lösungsansätze und Verarbeitungsmaschinen war geplant. Die Auswahl und Weiterverfolgung der Lösungsansätze sollte unter dem Blickwinkel erfolgen, dass

eine gleichbleibend hohe Reproduzierbarkeit durch eine industrielle Serienfertigung gegeben ist.

Weitere Projektziele bestanden darüber hinaus zum einen in der Senkung des Arbeitsaufwandes bei Verbesserung der Qualität der Oberflächenbearbeitung und somit eine Senkung der Produktionsdurchlaufzeiten zur Erhöhung der Produktivität. Um zum anderen in der Reduzierung der Folgekosten in der Unterhaltung der Rotorblätter im Offshore-Einsatzes .

Die Entwicklung und Konstruktion von Schleif- und Lackierkabinen für Rotorblätter, mit einer Länge von über 56 m, bedürfen besonderen Ansprüchen, insbesondere unter dem Aspekt, dass die Auftragsserien für derartige Rotorblätter im Offshorebereich keine automatisierte Serienproduktion in einem ausgewogenen Kosten-Nutzen-Verhältnis ermöglichen.

Bereits kurz nach der Phase des Projektstarts wurden Kundeninteressen an einer nächstfolgenden Generation von Offshore-Rotorblättern, mit höheren Leistungsparametern und folglich einem weiter entwickelten Design und neuen Rotorblattlängen bekannt. D.h. die Schleif- und Lackierkabinen müssen sehr flexibel auf relativ kleine Seriengrößen anpassbar sein.

Aus diesen Kosten-Nutzen-Analysen ableitend und aus den ersten Erfahrungen mit den onshore-Testanlagen wurde eine Verschiebung der Projektbearbeitung mit dem Projektträger beraten.

Gemeinsam mit dem PtJ wurde festgelegt, dass die nun folgende Projektbearbeitung auf der Basis des bestätigten Projektantrages weitergeführt wird, allerdings die Schwerpunkte in zwei Hauptbereiche untergliedert werden. Diese Hauptarbeitsbereiche untergliedern sich, abgeleitet aus den beantragten Arbeitspaketen, wie folgt:

aus den Arbeitspaketen

(AP) I.1 - Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Schleifkabine

(AP) I.2 - Entwicklung und Konstruktion einer teilautomatisierten Lackierkabine

entstand der übergreifende Projektschwerpunkt

I. Bearbeitung der Rotorblattoberflächen (s. Abschnitt 5.1ff)

aus den Arbeitspaketen

(AP) I.3 - Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblattoberflächen mittels Thermografie

(AP) I.4 - Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblättern mittels Schwingungsmessung.

wurde der Arbeitsschwerpunkt

II. Prüfung der Rotorblattoberflächen / Erosionsschutz

(s. Abschnitt 5.2ff)

festgelegt.

Die Detailergebnisse werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4 Zusammenfassung der wichtigsten Anforderung aus der Praxis an die Forschungsarbeiten

Für Offshore Windkraftanlagen ist es noch wichtiger als für Onshore Anlagen, dass sowohl für alle einzelnen Komponenten als auch für alle Komponenten im Verbund eine hohe Zuverlässigkeit nachgewiesen und auch erreicht wird.

Eine Reparatur oder gar ein Austausch, z.B. von Rotorblättern im Offshore-Einsatz bringt erhebliche Kosten mit sich. Dennoch werden Rotorblätter nach wie vor unter großem Kostendruck produziert. Die Herstellungsverfahren für Offshore-Rotorblätter reiften erst in den vergangenen Jahren gemäß ihres Einsatzzweckes. Bis zum Projektstart konnte davon ausgegangen werden, dass Erfahrungen in diesem Bereich nahezu vollständig fehlen. Der Orientierungsschwerpunkt der Windenergiebranche lag bis dahin fast ausnahmslos im Onshore-Bereich.

Bei Untersuchungen zu Rotorblattschäden wurden in der Vergangenheit Schäden der unterschiedlichsten Art bei den verschiedensten Rotorblatttypen festgestellt.

Diese Rotorblattschäden waren während der Herstellungsphase der Rotorblätter bzw. in den Abnahmeuntersuchungen noch nicht ersichtlich gewesen.

Ein Großteil dieser Reklamationen bezieht sich derzeit auf das Finish, die Rotorblattendbeschichtung.

Das Finish der Rotorblätter muss verschiedenen Anforderungen genügen. Zu diesen Funktionen des Finish gehören die folgenden Punkte:

1. Farbliche Gestaltung der Oberfläche
 - Luftfahrtkennung
 - Glanzgrad
 - Optisch ansprechend (lunkerfrei, porenfrei)
2. Schutz vor Bewitterung und UV Strahlung der darunter liegenden Rotorblattstruktur
3. Schutz vor Erosionsauswaschungen an der Nasenkante des Rotorblattes
4. Transportschutz der darunter liegenden Rotorblattstrukturen
5. Markierungen mit Blattnummer, Schwerpunkt und Hebepunkten

Zudem muss das Finish für das Blitzschutzsystem geeignet sein.

5 **Verwendung der Zuwendungen und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen**

Anbei erfolgt eine Beschreibung der verschiedenen Forschungsrichtungen die innerhalb dieses Projektes bearbeitet wurden.

5.1 ***Bearbeitung der Rotorblattoberflächen***

Die Rotorblätter im Offshore-Einsatz sind extremen Belastungen ausgesetzt: Bei Blattspitzengeschwindigkeiten von bis zu 350 Kilometern pro Stunde wirken hier enorme Kräfte, die das Rotorblatt entsprechend biegen und belasten. Dazu bewirken Witterungseinflüsse wie UV-Strahlung, Temperaturen, Schnee, Regen, Hagel oder auch Sand eine erhöhte Erosion an den Rotorblättern. Diesen Belastungen entsprechend muss die Oberflächenbeschichtungen der Rotorblätter genügen, um spätere kostenintensive Reparaturaufwendungen zu reduzieren.

Unter diesen Blickwinkel wurden unterschiedliche Beschichtungssysteme untersucht.

5.1.1 **Beschichtungssysteme**

5.1.1.1 **Inmould Gelcoat**

Eine Möglichkeit, die Beschichtung auf die Blattoberfläche aufzubringen ist, das Inmould Gelcoat. Bei diesem Beschichtungssystem wird ein Teil der Oberflächenbeschichtung in einem ersten Arbeitsgang die Hauptform eingebracht. Das danach eingelegte Laminat bindet dann zumeist chemisch an die Beschichtung an. Die AREVA Blades GmbH verwendete dazu PUR Based Gelcoatsysteme. Wenn das Laminat 48h aufgebracht wird, zeigen sich über die chemischen Verbindungen zwischen dem PUR und dem Epoxid der Struktur gute Anbindungseigenschaften. Andere Gelcoatsysteme basierend auf Epoxid oder Polyester und zeigten Anbindungs- oder andere Probleme.

Vorteile:

- Die Inmould-Gelcoat-Beschichtung wird einfach in die Hauptform durch Rollen oder Sprühen eingebracht.

- Nach einer An Härtephase bildet sich eine Oberfläche aus, auf der die nachfolgenden Gelegelagen weniger Rutschen als auf einer eingetrennten Formoberfläche.
- Die Oberfläche sieht nach der Entformung gleichmäßig glatt ohne Läufer und nur mit geringen Lunkern ansprechend aus.



Abb. 5.1.1. Einbringen der Gelcoat-Oberflächenbeschichtung in die Rotorblattform

Nachteile:

- Leider wird zurzeit noch nicht der gewünschte Glanzgrad erreicht.
- An den Schalentrennstellen und den Lunkern muss das Rotorblatt nachgearbeitet werden.
- Beim Einbringen der Struktur müssen die Werker durch die Form laufen, wodurch die Gelcoatschicht teilweise abgelöst werden kann.
- Eine Sichtprüfung der Struktur nach dem Endformen ist zumindest bei einem eingefärbten Gelcoat nicht mehr möglich.
- Das beim M5000-116 benötigte Cu-Mesh kann auf der Gelcoatoberfläche nicht hinreichend fixiert werden.
- Nicht erkannte Luftlunker unter dem Gelcoat können im Laufe der Nutzungszeit aufplatzen.
- Hohe Materialkosten für das Gelcoat.

Alle in 2010 produzierten Rotorblätter wurden mit Inmould Gelcoat beschichtet und danach komplett geschliffen, gespachtelt sowie lackiert.

5.1.1.2 **Epoxid Oberfläche**

Wenn ein Rotorblatt einfach direkt in der Form gebaut wird, ohne dass zuvor ein Gelcoat eingebracht wird, erhält man eine Epoxid Oberfläche.

Vorteile:

- Die äußere Struktur und die Endkanten und Nasenverklebung kann per Sichtprüfung in einfachster Weise geprüft werden.
- Die Formbelegungszeit wird nicht durch das Einbringen der Oberflächenbeschichtung verlängert.
- Alle Lunker in der Oberfläche der Struktur liegen offen und können somit behandelt werden.
- Materialien zum Fixieren des beim M5000-116 benötigten Cu-Meshs können vor der Lackierung entfernt werden.

Nachteile:

- Die ersten Gelegelagen rutschen auf der glatten Formoberfläche.
- Das Anrauen der Oberfläche ist aufwendiger aufgrund des harten GFKs.
- Verschiedene Lackbeschichtungen liegen übereinander

5.1.1.3 **Abreißoberflächen**

Um das Anschleifen eines Rotorblattes zu vermeiden, kann in die Rotorblattform als erste Lage Abreißgewebe eingelegt werden. Generell muss das Blatt zwar nicht mehr angeschliffen werden, jedoch zeigen sich an den Überlappungen des Abreißgewebes Stufen, die gespachtelt, geschliffen, gespachtelt und wieder geschliffen werden müssen, so dass der Vorteil nur sehr gering ist.

5.1.1.4 **Lackklebefolien**

Auf die Rotorblattoberfläche werden Klebefolien aufgebracht, die die Farbgebung und Bewitterungsschutz erbringen.

Vorteile:

- Gute Anbindung auch ohne Schleifen und ohne Entfernung des Trennmittels
- Einfaches Reparieren durch einfaches Überkleben

Nachteile:

- Keine Erfahrungen an bestehenden Rotorblättern
- Unter der Folie eingeschlossene Lunker könnten durch Erwärmung des eingeschlossenen Gases zu Problemen im Betrieb führen
- Die Erosion kann die Folie an der Nase beschädigen, dass zur Ablösung der Folie führen kann



Abb. 5.1.2: Klebefolie direkt auf der Blattoberfläche aufgebracht

5.1.2 Bearbeitungsmethoden

In der Phase der Bearbeitung der Rotorblattoberflächen zur Vorbereitung der Oberflächenbeschichtung werden verschiedene Prozessschritte durchlaufen, die sich durch unterschiedlich hohe Qualitätsanforderung auszeichnen. Diese Prozessschritte sind derzeit manuell geprägt. Eine Automatisierbarkeit wäre hier wünschenswert, um eine gleichbleibend hohe Qualität sicherstellen zu können.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Marktrecherchen durchgeführt, branchenübergreifende Erfahrungen auf diesem Gebiet ausgewertet und eigene Tests durchgeführt. Insgesamt wurde sehr schnell deutlich, dass die Einhausung von Rotorblättern in einer Größenordnung von über 50m Rotorblattlänge sich als sehr unflexible herausstellte. Aufgrund der zunehmenden Rotorblattlänge (derzeit 56 m, Prototyp des neuen Modells 66-m), des unterschiedlichen Designs der Rotorblätter sowie der relativ geringen Seriengrößen pro Blatttyp, ist eine Flexibilität in der

Nutzung eine automatisierten Bearbeitung der Rotorblattoberfläche notwendig, aber in der Umsetzung zu kosten- und produktionsflächenintensiv.

Somit wurde der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen auf andere flexiblere Lösungen gelegt.

Eine Kombination zwischen flexibel einsetzbaren und leistungsfähigen Absaugung- und großflächigen Schleifanlagen, die sich den verschiedenen konkaven und konvexen Krümmungen des Blattes sich anpassen, ist vorrangig in den Blickwinkel der nachfolgenden Untersuchungen gerückt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, dass sich die Oberflächenqualität der Rotorblätter u.a. durch den Einsatz von Flächenschleifern in der Rotorblattendbehandlung wesentlich erhöhte. Weiterhin konnte mit dem Einsatz dieses Flächenschleifers eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch Verminderung der Staubbelastung, sowie der körperlichen Belastung der Mitarbeiter erreicht werden. Ein weiterer positiver Effekt war eine Reduzierung der Oberflächenbearbeitungszeit.

5.1.2.1 Schleifen

Um die Oberfläche an zu rauhen, zu glätten oder von Trennmittel zu befreien, eignet sich das Schleifen. Dieses Verfahren wird in der Rotorblattbranche oft mit Handrotex-Schleifmaschinen durchgeführt. In der Teilautomatisierung konnten entsprechende Flächenschleifmaschinen bereits getestet und verwendet werden. Die Mitarbeiter übernehmen hier lediglich die Aufgabe der Maschinenführung. Anpressdruck, Absaugung und Glätten in Tiefenrichtung wird hier von der Maschine übernommen.



Abb. 5.1.3: Einsatz eines Flächenschleifers in der Bearbeitung der Rotorblattoberfläche

5.1.2.2 Strahlen

Für die der Oberflächenbearbeitung mittels Strahlen gibt es eine große Bandbreite von verschiedenen Verfahren. Generell ist daher ein geeignetes Verfahren zu wählen, dass die entsprechenden geforderten Eigenschaften aufweist.

Leider lässt sich dabei keine Glättung der Oberfläche erreichen. Lunker können hingegen angeraut werden.

Hohe Energiekosten und und hoher Zeitaufwand bei der Bearbeitung reduzieren die Leistungsfähigkeit dieser Methode

Dieses Verfahren zeigte sich lediglich zur Anrauhung von Lunkern als im derzeitigen Finish-Prozess geeignet.

5.1.3 Beschichtungsverfahren

5.1.3.1 Beschichten durch Rollapplikation

Durch Rollapplikation können große Flächen per Hand schnell beschichtet werden. Die Oberfläche ist danach leicht wellig. Da diese Welligkeiten in der Oberfläche nicht scharfkantig sondern rundlich sind (orangenhautähnlich), zeigten sich keine signifikanten Einflüsse in der Aerodynamik des Rotorblattes. Wenn die Applikation in einer Produktionsform erfolgt (Inmould Gelcoat) geben das Gelcoat, das Trennmittel und die Formoberfläche die Oberflächenbeschaffenheit vor. Eine Teilautomatisierung dieses Verfahrens ist leicht zu erreichen, indem die Chemikalien durch Maschinen vermischt und zum Bauteil gepumpt werden. Dadurch wird vor allem der riskante Prozessteil der Rollapplikation automatisiert.

5.1.3.2 Beschichten durch Spritzapplikation

Mittels Spritzapplikation können sehr gute Oberflächenqualitäten und gleichmäßige Oberflächendicken erreicht werden. Durch Lackierroboter lassen sich so 95% der Fläche des Rotorblattes beschichten. Jedoch verteilen sich große Anteile des Beschichtungsmaterials durch den Sprühnebel nicht nur auf der zu beschichtenden Oberfläche, sondern in der Kabine und auf dem Lackierroboter. Es entstehen hierdurch erhöhte Kosten bei der Reinigung und Materialverbrauch. Lackieren mit

Hilfe von elektrostatischen Anziehungskräften schlug bisher bei den Rotorblättern fehl.

5.1.3.3 Beschichtung durch Gießen und Spachten

Im Bereich der Nasenkante des Rotorblattes wird eine erhöhte Lackschicht aufgebracht, um eine längere Erosionsstandzeit zu erreichen. Diese Schichten können durch Aufspachteln aufgebracht werden. Dieses Verfahren führt ebenfalls zu einer welligen Oberfläche. Die Wellen können dabei in Tiefenrichtung verlaufen ohne einen signifikanten Einfluss auf die Aerodynamik zu haben.

Wenn eine Form zur Verfügung steht, kann das Beschichtungsmaterial eingegossen werden.

5.2 Prüfung der Rotorblattoberflächen – Erosionsschutz der Rotorblätter

Aus den Arbeitspaketen

(AP) I.3 - Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblattoberflächen mittels Thermografie

(AP) I.4 - Entwicklung und Realisierung einer serientauglichen Methode zum Prüfen von Rotorblättern mittels Schwingungsmessung.

wurde der Arbeitsschwerpunkt

II. Prüfung der Rotorblattoberflächen / Erosionsschutz

mit den nachfolgend genannten Bearbeitungsschwerpunkten definiert:

- Ultraschalluntersuchung und InfrarotScans von Rotorblättern
- Geometrievermessungen
- Erosionsschutzversuche im Labor und in einer Testanlage
- Blitzschutzversuche
- Weitere Materialtests bzw. Prozessqualifikationen
- QM Maßnahmen
- Erfahrungen aus der Produktion, dem Transport, der Montage und dem Anlagenbetrieb

Aus den bisherigen Erfahrungen der Onshore Testanlagen, sowie des ersten deutschen Offshore Windparks Alpha-Ventus, in dem sechs Anlagen mit

Rotorblättern der AREVA Blades ausgestattet sind, steht die Forderung eines geeigneten Erosionsschutzes für die Rotorblätter in der Prioritätenliste mit an oberster Stelle. Nur so können kostenintensive Offshore Wartungs- und Reparaturarbeiten minimiert werden.

Diese Anforderung hat noch höhere Priorität gegenüber der Forderung zur Senkung der laufenden Produktionskosten, einschließlich des Finishing.

Um zu ein kostengünstiges Finish zu erhalten, müssen die Auswirkungen der Erosion beherrscht werden, um den Finish-Prozess als Ganzes zu optimieren.

5.2.1 Erosionsschutz

An den Windkraftanlagen (WKA) gibt es insbesondere Erosionen an der Nasenkante des Rotorblattes aufgrund von Regen, Hagel, Dreck und Vogelschlag, die zu einem Abtrag der Oberflächenbeschichtung führt.

Es konnte beobachtet werden, dass bei einer Blattspitzengeschwindigkeit von $<70\text{m/s}$ die Erosion noch sehr gering ist. Ab $>80\text{m/s}$ sind erste Erosionserscheinungen an den Rotorblättern bereits nach kurzer Betriebszeit zu erkennen.

Wünschenswert wäre für den zukünftigen Einsatz von Rotorblätter, Blattspitzengeschwindigkeit von $>110\text{m/s}$ wählen zu können, ohne dabei Erosionschäden an den Rotorblättern nacharbeiten zu müssen.

Die Auslegungstiefe des Rotorblattes könnte dabei auf 40% von der Tiefe eines Blattes mit 70m/s Blattspitzengeschwindigkeit reduziert werden. Dies führt zu deutlich geringeren Extremlasten und Betriebsfestigkeitslasten. Auch wird die Breite der Beulfelder reduziert. Diese hat einen erheblichen Einfluss auf die Beulsicherheit, wodurch das Kernmaterial deutlich reduziert werden kann. Durch eine geringere Tiefe ist das Blatt leichter baubar. Die zu bearbeitende Oberfläche fällt geringer aus. Durch die höhere Blattspitzengeschwindigkeit ergibt sich eine größere Drehzahl, welche vorteilhaft für Getriebe und Generator ist.

Neben der Erosion ist auch der Lärm zu berücksichtigen. Auch dieser steigt überproportional mit der Geschwindigkeit an. Rotorlärm ist Offshore ein untergeordnetes Problem.

Bei der Windkraftanlage M5000-116 werden Blattspitzengeschwindigkeiten von 90m/s erreicht und erfordern verschiedene Erosionsschutzmaßnahmen, die in der Windkraft Stand der Technik sind.

Diese verschiedenen Erosionsschutzmaßnahmen wurden erprobt (Helikopter Test, Full Scale Versuche an Anlage 1, Bau und Inspektion der ersten Blattsätze, Transportschäden des Erosionsschutzes, etc.).

Es steht die Forderung, dass Rotorblätter im Offshoreeinsatz mit einem Erosionsschutz von >20 Jahren ausgestattet sind. Es zeigte sich aber, dass bisher hier keine ausreichenden Maßnahmen einen hinreichenden Erosionsschutz über diesen benannten Zeitraum geben.

Zwar kann man die Rotorblattstruktur durch zusätzliches Laminat vor strukturellen Schäden schützen. An den ersten Onshore-Testanlagen zeigte sich, dass die Oberflächenbeschichtung jedoch innerhalb der ersten zwei Jahre bis zu einem Sechstel der Rotorblattoberfläche komplett von der Struktur entfernt sein kann. Diese Schäden müssen nachgearbeitet werden. Im Bereich Offshore gibt es dazu noch keine bzw. nur erste Prozessenerfahrungen. Eine Nacharbeitung mit einer Bühne, einem Steiger oder anderen Onshore-üblichen Reparaturmaßnahmen sind im Offshore-Bereich sehr kostenaufwendig, da diese eine Jack-Up erfordern. Umso wichtiger ist es, Lösungen zu finden, die das Wartungsintervall von Rotorblättern verlängert oder sogar zu einer Lösung zu finden, bei der die Nasekante des Rotorblattes nicht an der bereits in Betrieb befindlichen WKA nachgearbeitet werden muss. Diese Forderung rechtfertigt auch ggf. deutlich erhöhte Produktionskosten, denn die Kosten für die Nacharbeiten an der Nasenkante der Rotorblätter bei Offshore-Windkraftanlagen sind sehr hoch.

5.2.1.1 **Untersuchung der Erosion**

Für die Entwicklung eines langlebigeren Erosionsschutzes mussten folgende Punkte beantwortet werden:

- Welche Erosionsschadensbilder lassen sich nach welcher Betriebszeit finden?
Welche Baugruppen haben versagt?
- Regelmäßige Inspektionsrhythmus der Windenergieanlagen
- Definition der Erosion
 - Ab wann ist ein Erosionsschaden nachzuarbeiten?
 - Wie können Erosionserscheinungen rechtzeitig erkannt werden?
 - Welche Faktoren beeinflussen das Auftreten der Erosionen?
- Wartung von Erosionsschäden (Onshore und Offshore)
- Recherche zu ähnlichen Beanspruchungsprofilen und Lösungsansätzen im anderen Industriebereichen (Flugzeugtragflächen, Helikopterrotoren, Kaplansturbinen, Schiffspropeller, Transportleitungen für Schlämme)

5.2.1.2 **Full Scale Erosions Versuche**

Untersuchung der favorisiertesten Varianten an der Großausführung

- Bau von ca. 3 favorisierten Varianten in der Großausführung inklusive der dafür erforderlichen Werkzeuge und Hilfsmittel
- Verarbeitung dieser Lösungen in Serienblätter der laufenden Produktion für einen Teststandort
- Langzeitbeobachtung der Testrotorblätter

Zwischenergebnisse Full Scale Erosionsversuche

Auf Grund von Servicearbeiten an Getriebekomponenten bot sich 2008 die Möglichkeit, die Rotorblätter der Onshore -Testanlagen mit den laufenden WKA 3 und 4 am Boden zu inspizieren. Es ließ sich erkennen, dass der lackbasierende Erosionsschutz, der bei WKA 3 verwendet wurde, schon nach nur 2 Jahren Laufzeit total versagt hat. Diese Beschichtung hat sich im gesamten Bereich der Nasenkante abgelöst.

Ein besseres Ergebnis lieferte der Erosionsschutz, mit dem WKA 4 versehen wurde. Die aufgebrauchte Klebefolie zeigte nach zwei Jahren noch keine erosionsbedingten Schäden. Auch bei einem, beim Transport der Blätter entstandenen Schaden in der Folie, der durch Überkleben behoben wurde, konnte kein Ablösen dieses Flickens erkannt werden.

Im Herbst 2010 wurde an den Onshore-Windenergieanlagen in Bremerhaven die Erosionserscheinung an allen in Betrieb befindlichen Rotorblättern geprüft.

Die bis dahin verwendete lösemittelhaltige Lackierung ohne Erosionsschutzfolie zeigte einen unzureichenden Kantenschutz der Rotorblätter.



Abb. 5.2.1: Rotorblatt nach dreijährigem Betrieb ohne Erosionsschutzfolie

Ein besseres Ergebnis lieferte der Erosionsschutz, mit dem die Rotorblätter der WKA 4 versehen waren. Hier erfolgte eine Kombination aus lösemittelhaltiger Lackierung und zusätzlich aufgebrauchter Erosionsschutzfolie. Diese zusätzliche Erosionsschutzfolie zeigte nach drei Jahren noch keine erosionsbedingten Schäden im Onshoreeinsatz.

Im Rahmen einer weiteren Komplettüberprüfung der Onshore-Windenergieanlagen in Bremerhaven wurden im Frühjahr 2011 die Erosionserscheinungen der betreffenden Rotorblätter intensiv geprüft. Es erfolgte eine vollständige Demontage des Sterns (Rotorblattsets).



Abb. 5.2.2: Rotorblatt nach dreijährigem Betrieb mit Erosionsschutzfolie

Erhebliche Erosionen an der Nasenkantenschutz der Rotorblätter waren zu erkennen. Teilweise hat sich die Beschichtung auf der gesamten Vorderkante des Rotorblattes abgelöst. Rotorblätter mit Erosionsschutzfolie beschichte waren, zeigten bei den Onshore Anlagen keine Schäden.



Abb. 5.2.3: Erosionserscheinungen an der Nasenkante von Onshore-Rotorblättern ohne Schutzfolie

5.2.1.3 Reparaturlösungen für bereits montierte Rotorblätter

Sowohl für bereits eingesetzte Rotorblätter als auch für den zukünftigen Erosionsschutz / Oberflächenschutz von Rotorblättern müssen geeignete Verfahren, inklusive der dafür erforderlichen Werkzeuge und Hilfsmittel, entwickelt und erprobt werden.

Für die bereits montierten Rotorblätter an WKA bestand dringender Handlungsbedarf, mit den folgenden Arbeitsschwerpunkten:

- Konzeptfindung, Entwicklung, Bau und Erprobung von Reparaturlösungen für Rotorblätter an installierten WKA
- Auswertung der Erfahrungen aus den Reparaturlösungen
- Konzeptfindung, Entwicklung, Bau und Erprobung von Reparaturlösungen für den zukünftigen Erosionsschutz / Oberflächenschutz für die zukünftigen Rotorblätter.

Seit 2009 befinden sich die ersten Rotorblätter im Alpha-Ventus-Projekt im Offshore-Einsatz. Auch hier wurden im Frühjahr 2011 erste Überprüfungen Erosionserscheinungen an den Rotorblättern durchgeführt. Alle Rotorblätter sind alle mit einer Erosionsschutzfolie geschützt. Im stärksten Erosionsbereich der Rotorblätter, der Nasenkante; waren keine Beschädigungen zu erkennen. An den Anschlagpunkten der Rotorblätter zum Transport und Heben waren Folienrisse oder Folienverschiebungen aufgetreten. Diese beschädigten Bereich sind für die Erosion besonders anfällig geworden und mussten repariert werden.



Abb. 5.2.4: Erste Kontrolle der im Offshore-Einsatz befindlichen Rotorblätter im Alpha-Ventus- Park

5.2.1.4 Lösungsansätze für den Erosionsschutz

- Definition partieller Blattbereiche als auswechselbares Verschleißteil mit definierter Lebensdauer
- Varianten einer verschleißfesten Erosionsschutzlösung (Realität oder Fiktion?)
- Variantenfindung der technischen Realisierbarkeit des Erosionsschutzes
- Verbindungstechnologie für Faserverbundtechnologien in Bereichen hoher Materialdehnungen,
- Industriell vorgefertigte Verschleißkanten für Rotorblätter
- Im Herstellprozess von Rotorblättern eingearbeitete Verschleißkanten
- Nachträglich applizierte Verschleißkanten,
- Weitere Lösungsansätze sind zu ermitteln und zu analysieren

5.2.1.5 Untersuchung von Teilvarianten an Modellen

- Bau eines Teststandes
 - Untersuchung von ungefüllten elastischen Werkstoffen
 - Untersuchung von gefüllten elastischen Werkstoffen
 - [Untersuchung von elastischen Membranen mit Unterfütterung aus Schaumstoff](#)
- Konzepte metallischer Kanten
- Auswertung und Übertragungsfunktion auf die Großausführung

5.2.2 Erosionsteststand

5.2.2.1 Entwicklung und Bau eines Erosionsteststands

Ziel der Entwicklung eines Erosionsteststandes ist es, Fragestellungen und Erkenntnisse über die Erosionen an Rotorblättern zeitnah untersuchen und prüfen zu können.

Um die Erosionserscheinungen an Modellen simulieren zu können, wurde daher in der zweiten Jahreshälfte 2010 mit der Konstruktion und dem Bau eines Erosionsteststandes begonnen.

Als Erosionsauslöser dienen im ersten Testschritt Wassertropfen.

Aus einer Erhöhung der Simulationsgeschwindigkeit sowie einer sehr hohen Volumenkonzentration an Wassertropfen in der Prüfkammer können innerhalb kürzester Zeit mit aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Im Realeinsatz treten Erosionserscheinungen erst nach längerfristigem Einsatz der Rotorblätter auf.

5.2.2.2 Entwicklung und Bau eines Prototyps für einen Erosionsteststand

Im Dezember 2010 erfolgte nach eine Konzeptions- und Bauphase die Inbetriebnahme des Prototyps eines Erosionsteststandes.

Mit diesem Prototypen für einen Erosionsteststand bestand die Möglichkeit, die konzipierten Funktionalität dieses Teststandes zu analysieren, sowie erste

Erkenntnisse über die Erosionen an Rotorblättern zeitnah zu untersuchen und zu prüfen.

Da die Erosionseinwirkung auf die Rotorblattbeschichtungen erst ab einer gewissen Geschwindigkeit einsetzt, wurde bei der Konzeption des Rotors besonderer Wert auf eine stufenlose Geschwindigkeitsregelung gelegt. So kann die Erosionsstabilität eines jeden Werkstoffes (gemessen in m/s) genau bestimmt werden.



Abb. 5.2.5: In Betrieb genommener Erosionsteststand.

Erste Materialtests im Prototypen des Erosionsteststandes

Im Dezember 2010 wurde mit ersten Materialtests im Erosionsteststand begonnen. Bei der Rotation der jeweiligen Versuchskörper konnten Tipgeschwindigkeiten (Blattspitzengeschwindigkeiten) von bis zu 150m/s erreicht werden. Bei den ersten Versuchskörpern war der Schichtaufbau mit dem der Rotorblätter noch nicht identisch.

Die Form und der Aufbau der Probekörper sollten jedoch vergleichbare Erosionsergebnisse bieten, wie diese an Rotorblättern entstehen. Daher war eine entsprechende Anpassung der Probekörper notwendig.



Abb. 5.2.6: Rotation von Versuchskörpern im Prototypen des Erosionsteststandes



Abb. 5.2.7: Am Versuchskörper zeigen sich beginnende Erosionserscheinungen.

Die Testverläufe wurden protokolliert und per Video aufgezeichnet, dokumentiert und ausgewertet.

Weiterführende Materialtests im Prototypen des Erosionsteststandes in 2011

Im ersten Quartal 2011 wurden Versuchskörper mit dem Beschichtungsaufbau der derzeit produzierten Rotorblätter hergestellt.

Der Erosionsschutzaufbau der Rotorblätter besteht aus folgenden drei Schichten:

- Spachtelmasse
- Erosionsschutzfarbe und als Abschluss
- Erosionsschutzfolie.

Somit konnten erste Erosionstestläufe mit Versuchskörpern durchgeführt werden, die dem aktuellen Beschichtungsaufbaus der Rotorblätter entsprechen.

Aus fertigungstechnischer Sicht kann in der Rotorblattherstellung die Erosionsschutzfolie nicht ganz bis an die Rotorblattspitze durchgezogen werden.

Auch diese wurde bei der Beschichtung der Versuchskörper berücksichtigt.



Abb. 5.2.8: Versuchskörper mit dem Erosionsschutzaufbau der Rotorblätter vor dem

Erste Testphase

Der Versuchskörper wurde mit Wasser besprüht.



Abb. 5.2.9: Versuchskörper in der Testphase

Die Erosionserscheinungen an den Versuchskörpern wurden in regelmäßigen Abständen überprüft und dokumentiert. Nach 1 Stunde und 15 Minuten Testlaufzeit zeigen sich erste erhebliche Erosionserscheinungen in den Bereichen des Versuchskörpers, die nicht durch Erosionsschutzfolie geschützt wurden. Hier erfolgte ein Materialverschleiß bis auf das Grundlaminat des Versuchskörpers.

Weitere leichtere Erosionserscheinungen sind in dem Bereich des Versuchskörpers erkennbar, die durch Erosionsschutzfolie geschützt sind.



Abb. 5.2.10: Erosionserscheinungen am Versuchskörper nach einer Testphase von 1:15h

Zweite Testphase

Nach einer Testlaufzeit von 2 Stunden zeigen sich in den nicht durch Erosionsschutzfolie geschützt Bereichen Zerstörungserscheinungen bis in die Glasfaserstruktur des Versuchskörpers. Der Versuchskörper ist hier nahezu aufgelöst. In den durch Erosionsschutzfolie geschützten Bereichen sind weiterhin nur leichte Erosionserscheinungen erkennbar.



Abb. 5.2.11: Probekörper nach 2 Stunden Laufzeit

Änderung der Versuchskörperform

Die ersten, in den Tests verwendeten Versuchskörper wiesen Mängel auf.

Die seitlichen Enden der Versuchskörper waren offen. Dies führte zu starken Luft-Wasser-Verwirbelungen an der Versuchskörperendkante mit der Folge, verzerrter Testergebnisse am Versuchskörper sowie eines erhöhten Energiebedarfs des Teststandes (Prototyps). Der Versuchskörper wurde daraufhin konstruktiv, aerodynamisch neu gestaltet. Die Endkanten wurden geschlossen.



Abb. 5.2.12: Veränderte Form des Versuchskörpers

5.2.2.3 Bau des Erosionsteststandes

Aus den Erfahrungen des Prototypen konnte mit dem Bau des Erosionsteststandes begonnen werden.

Der 2010 in Betrieb genommene Prototyp des Erosionsteststandes war durch eine sehr kompakte Bauweise gekennzeichnet. In sehr hohen Drehzahlbereichen entstanden sehr großen Fliehkräfte.

Diese kompakte Bauweise mit horizontaler Drehachse des Rotors hat bei hohen Drehzahlen die Testergebnisse stark beeinflusst.

Da eine Testgeschwindigkeit von 150m/s unbedingt einzuhalten ist, bestand die Lösung dieses Problems u.a. in einer Vergrößerung des Rotordurchmessers.

Der neue Rotordurchmesser wurde auf 6m festgelegt. Somit reduzieren sich die Fliehkräfte auf ein Drittel des Anfangswertes. Da eine horizontale Achsenlagerung bei diesem Rotordurchmesser nicht mehr möglich ist, wurde der neue Teststand mit vertikaler Achse geplant.

Die Planungsarbeiten für einen neuen Erosionsteststand wurden im 2. Quartal 2011 abgeschlossen und mit der Konstruktion und dem Bau des neuen Erosionsteststandes konnte begonnen werden.

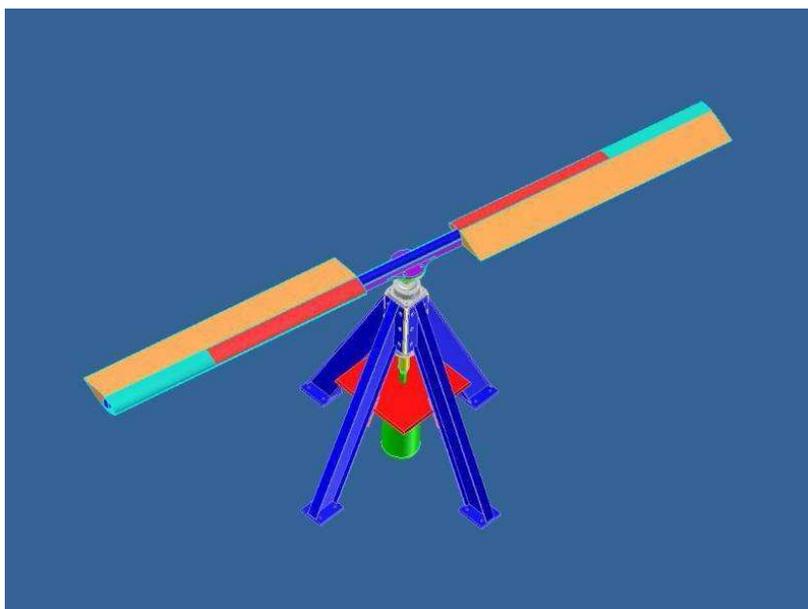


Abb. 5.2.13: Konstruktion des neuen Erosionsteststandes



Abb. 5.2.14: Bau des neuen Erosionsteststandes

Der Erosionsteststand wurde im 3. Quartal 2011 in Betrieb genommen.



Abb. 5.2.15: Fertiggestellter Erosionsteststand von außen

Bei den ersten Testläufen musste festgestellt werden, dass die erreichbaren Blattspitzengeschwindigkeiten des Rotors die gewünschte Geschwindigkeit noch nicht erreichten. Dies lag an dem erhöhten Luftwiderstand, den der längere Rotordurchmesser verursachte. Zusätzlich lieferte der eingesetzte Elektromotorantrieb bei dieser Drehzahl kein ausreichendes Drehmoment.

Entsprechende weitere Nachbesserungsmaßnahmen wurden in Angriff genommen.

Zum einen wurde eine leicht verkürzte Rotorversion gefertigt, welche im 1. Quartal 2012 in Betrieb genommen wurde. Zum anderen erfolgte eine verbesserte Anpassung des aerodynamischen Profils der Rotoren (dünneres, kürzeres Profil).

Die Motorleistung wurde durch einen effizienteren Elektromotor erhöht.



Abb. 5.2.16: Teststand während Testlauf

Die Testläufe in dem neuen Erosionsteststand wurden dokumentiert.

5.2.2.4 Status des Erosions-Teststandes

2012 startete mit regelmäßigen Testläufen im Erosionsteststand. Die Umdrehungsgeschwindigkeiten des Rotors wurden kontinuierlich erhöht. Es zeigte sich, dass zwischenzeitlich diverse konstruktive Anpassungen notwendig waren, da in diesem Spektrum bisher die konstruktiven Erfahrungen fehlten.

5.2.3 Tests zur Auswahl geeigneter Erosionsschutzmaterialien

In weiterführender Vorbereitung der vollständigen Nutzung des Erosionsteststandes wurde an der Qualifizierung geeigneter Erosionsschutzmaterialien gearbeitet. Hierzu wurden verschiedene Verfahren und Tests genutzt, um Vorergebnisse zu erhalten, die später teilweise im Erosionsteststand weiter untersucht und präzisiert wurden.

Für die durchzuführenden Materialtests zu möglichen Erosionsschutzmaßnahmen wurde auf Grundlage der Ergebnisse weitreichender Recherchen ein Testablaufplan erstellt.

5.2.3.1 Sandstrahlen

Um die Regenerosionseigenschaften von diversen Beschichtungsmaterialien zu testen, diente das Sandstrahlverfahren als Vortest .

Entsprechend hergestellte Probekörper wurden jeweils 30, 60 und 90 Sekunden mit dem Sandstrahlgerät bearbeitet.

Problematisch beim Sandstrahlen ist eine große Hitzeentwicklung. Nach ca. 30 Sekunden Sandbestrahlung wurden bereits Temperaturen von über 140°C gemessen. Diese Hitzeentwicklung entsteht zwar bei der Regeneration nicht, und schränkt die Aussagekraft bezüglich der Erosionsbeständigkeit ein, aber es ist trotzdem eine grobe Einschätzung des Materials möglich gewesen.

Um die Aussagekraft dieses Testverfahrens zu erhöhen, wurde das Probenmaterial gekühlt, d.h. die Probe wurde im Nassstrahlverfahren bearbeitet. Eine vom VDI anerkannte Alternative stellt das Sandstrahlen unter Vorhandensein eines stetigen Wasserfilms auf der Probe dar.

Mit diesen Tests zum Nass-/ Sandstrahlverfahren wurde die Anzahl der in Frage kommenden Beschichtungsmaterialien vor dem Regenerationstest verringert, erste geeignete Materialien kristallisierten sich heraus.

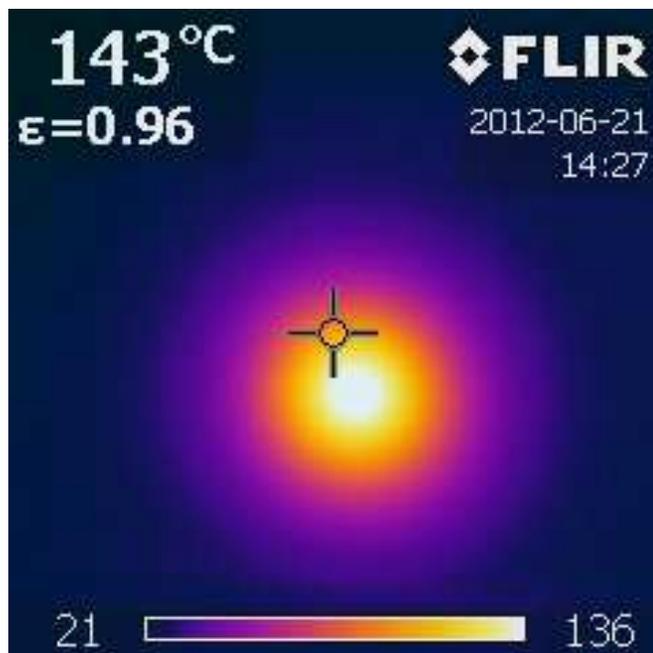


Abb. 5.2.17: Materialprobe nach 30 Sekunden Sandstrahlen

5.2.3.2 Zugversuchstests

Der Zugversuch wurde genutzt, um die Bruchdehnung und den E-Modul eines Probekörpers zu bestimmen. Hierzu wurden Probekörper aus den verschiedenen Materialien gegossen und in eine Zugprüfmaschine eingespannt. Mit diesem Zugversuch können die Herstellerangaben bezüglich der Eigenschaften eines Materials überprüft werden.

5.2.3.3 Leitfähigkeitstests

Mit Leitfähigkeitstests wurde die elektrische Leitfähigkeit von Materialien getestet. Das Erosionsschutzmaterial darf nicht leitfähig sein, um das Blitzschutzkonzept des Rotorblattes nicht zu beeinflussen. Hierzu wurde der elektrische Widerstand von Beschichtungsmaterialien gemessen und ausgewertet.

5.2.3.4 Blitzschutztests

Bei Blitzschutztests wurden komplexe Blitzableiteigenschaften des jeweiligen Blitzschutzsystems getestet. In diesem Zusammenhang wurden die in Frage kommenden Materialien in diesem Gesamt-Blitzschutzversuch eingesetzt. Kooperationspartner für diese Blitzschutz-Tests war die Universität Kiel.

5.2.3.5 Tests zur Trennmittelverträglichkeit

Es muss sichergestellt sein, dass das Material des Prüfkörpers sich vom Trennmittel ablösen lässt, ohne die mechanischen Eigenschaften des Materials des Prüfkörpers zu beeinflussen. Diese Tests wurden vor Ort durchgeführt.

5.2.3.6 Tests zur Witterungsbeständigkeit

In vergleichenden Tests wurde die Witterungsbeständigkeit verschiedener Materialien geprüft. Hierfür wurde eine Probenplatte aus Glasfaser mit einer Epoxidharzmatrix in den Abmessungen 150x70 mm mit dem jeweiligen Erosionsschutzmaterial beschichtet und in einer Witterungskammer verschiedenen Umwelteinflüsse ausgesetzt. Simuliert wurde ein Lebenszyklus von 20 Jahren. Als Referenzmaterial dient ein Beschichtungsmaterial, von welchem 20jähriges Bestehen bekannt ist.

Da dieser Test als ein rein vergleichender Test durchgeführt wurde, kann keine Aussage über die tatsächliche Lebensdauer eines jeweiligen Beschichtungsmaterials getroffen werden. Es erfolgte lediglich die Aussage, ob das Material in Bezug auf seine physikalischen Eigenschaften lang- oder kurzlebiger als das Referenzmaterial ist.

5.2.3.7 Tests zur UV-Beständigkeit

Der UV-Einfluss auf die Beschichtungsmaterialien ist enorm hoch. Daher bestand die Notwendigkeit, die UV-Beständigkeit der Beschichtungsmaterialien zu testen. Die Materialproben wurden in gleicher Weise vorbereitet wie die Probekörper in den

Tests zur Witterungsbeständigkeit. Anschließend wurde die Materialprobe mehrere Tage lang stark erhöhter UV-Strahlung in einer UV-Kammer ausgesetzt.

5.2.3.8 Hagelerosionstests

Um Hagelerosion zu simulieren wurden Hagelkörner benötigt. Der Einsatz anderer Mittel war wenig sinnvoll und nicht aussagekräftig. Daher wurde bei der Firma AREVA Blades ein Konzept entwickelt, Hagelkörner künstlich herzustellen. Mit Druckluft wurden diese Hagelkörner auf ein mit Erosionsschutzmittel versehenes Vorderkantenprofil einer Probekörpers geschossen.

5.2.4 Reparaturkonzept für bestehende WEA

Sowohl für bereits in betriebsfähige WKA als auch für den zukünftigen Erosionsschutz / Oberflächenschutz von Rotorblättern mussten geeignete Verfahren, inklusive der dafür erforderlichen Werkzeuge und Hilfsmittel, entwickelt und erprobt werden.

- Konzeptfindung, Entwicklung, Bau und Erprobung von Reparaturlösungen für Rotorblätter an installierten WKA
- Auswertung der Erfahrungen aus den Reparaturlösungen
- Konzeptfindung, Entwicklung, Bau und Erprobung von Reparaturlösungen für den zukünftigen Erosionsschutz / Oberflächenschutz für die zukünftigen Rotorblätter.

Das aktuell angewandte Verfahren zum Erosionsschutz besteht aus einem Lack auf dem Rotorblatt, auf das zusätzlich eine Erosionsschutzfolie verklebt wird.

Ist die Erosionsschutzfolie eines Rotorblattes beschädigt, breitet sich der Schaden an dieser Folie schnell aus und führt zu deren großflächigen Ablösung. Als Folge daraus kann auch der Lack des Rotorblattes unmittelbar in Mitleidenschaft gezogen werden. Ist dies der Fall, liegt die Rotorblattstruktur frei und es kann zu weiteren Folgeschäden an der Struktur des Rotorblattes durch Regen und andere Umwelteinflüsse kommen.

Um den Erosionsschutz zu erhalten, wurden einige neue Verfahren zur Reparatur von Rotorblättern getestet.

Ziel der Tests war es, ein wirtschaftliches Verfahren für Offshore-Reparaturen an der Nasenkante des Rotorblattes (die mit der Erosionsschutzfolie versehen sind), an der Windkraftanlage zu reparieren, ohne dass eine Demontage des Rotorblattes notwendig ist.

Zu diesem Zweck wurde ein „Blattspitzen-Teststand“ gebaut, in dem eine sechs Meter lange Blattspitze in einem Gestell aufgehängt ist. Zusätzlich erfolgte eine Befestigung mittels Seilstrecke an einem darüber liegenden Träger.

Mit Hilfe dieses „Blattspitzen-Teststandes“ wurden die unten näher ausgeführten Varianten zur Vorderkanten-Reparatur getestet.

Basis bildet ein Glasfaser-Rohling, der auf die Blattspitze aufgeklebt wird. Dann erfolgte der Test verschiedener Reparatur-Varianten im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der Praxis. Nach Abschluss des jeweiligen Tests wurde der Rohling entfernt und ein neuer aufgeklebt. So wurden nacheinander alle Varianten durchgetestet.

Nach Abschluss der ersten Testreihe mit verschiedenen Reparatur-Varianten am Blattspitzen-Teststand wurden die am vielversprechendsten bzw. erfolgreichsten Varianten ein zweiten Test unterzogen. In dieser zweiten Testreihe wurde eine Blattspitze mit Original-Lackaufbau verwendet.

Die erfolgreichsten Reparaturmöglichkeiten aus der zweiten Testreihe wurden dann in einem dritten Test an einer Onshore-Anlage unterzogen, bevor die beste Reparatur-Variante schließlich an Offshore-Anlagen ausgeführt werden soll.



Abb. 5.2.18: Blattspitzen-Teststand

Variante 1:

Die Lackoberfläche der Blattspitze wird in Handarbeit wiederhergestellt und durch das erneute Aufkleben einer Erosionsschutzfolie geschützt. Zu dieser Variante gibt es mehrere Alternativen in Art und Beschaffenheit der verwendeten Folie.

Variante 2:

Wie in Variante 1 dargestellt, wird die Lackoberfläche per Hand an einem montierten Rotorblatt wiederhergestellt. Anschließend erfolgt das Auftragen eines zusätzlichen Reparaturfilms aus einem in den Materialtests erwähnten neuen Werkstoff auf die Reparaturfläche.

Variante 3:

Hierbei wird eine vorgefertigte, starre Vorderkanteneinheit als Schutz an das montierte Rotorblatt angeklebt. Da die Materialstärke hierbei deutlich höher ist als bei dem Folieneinsatz, musste zuvor der alte Erosionsschutzlack an der Vorderkante entfernt werden.

Variante 4:

Bei dieser Variante werden der defekte Lack sowie die beschädigte Erosionsschutzfolie vollständig entfernt. Ein neues Erosionsschutzmaterial wird in flüssiger Form aufgebracht. Zum Aufbringen der Flüssigkeit gibt es mehrere Alternativen, die sich derzeit noch in der Erprobung befinden. Dasselbe gilt für die Zusammensetzung der Reparaturflüssigkeit.

5.2.5 Neues Erosionsschutzsystem "AREVA 25a"

Der gegenwärtige Entwicklungsstand im Bereich Erosionsschutz entspricht einer direkt in der Form erzeugten Beschichtung. Dies bedeutet, dass die Kontur der Vorderkante nicht nachbearbeitet werden muss, und somit eine optimale Nasenkantenergibt. Zusätzlich bestehen keine Schwachstelle, z.B. zwischen der Anbindung zwischen Gelcoat und Erosionsschutzfolie.

In Zusammenarbeit mit einem führenden Materialhersteller wurde ein Material mit den gewünschten Eigenschaften speziell zusammengesetzt.

Dieses Material namens „AREVA 25a“ zeichnet sich durch eine optimale Kombination aus maximalen Erosionsschutzeigenschaften mit hervorragenden Verarbeitungseigenschaften aus. Zur besseren Inspektion ist „AREVA 25a“ gelb eingefärbt, was auch den Schutz der darunterliegenden Faserstruktur erhöht.

Probekörper mit “AREVA 25a”

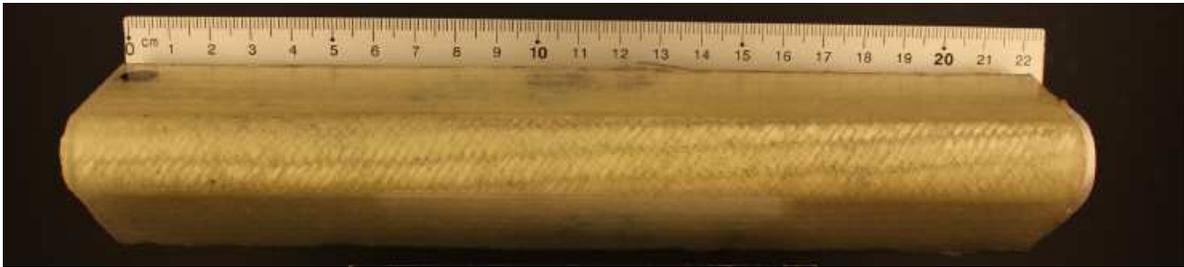


Abb. 5.2.19: Probekörper mit „AREVA 25a“ nach 9h Regenerosionstest

Die Auswertung des Regenerosions- und anderen Tests zeigten, dass eine beträchtlich längere Lebensdauer des Erosionsschutzes durch die Verwendung von „AREVA 25a“ erwartet werden kann.

Bei Beschädigung des Erosionsschutzes, beispielsweise durch unsachgemäßen Transport oder Beschädigungen während der Wartung am montierten Blatt besteht ein qualitativ gleichwertiges Reparaturverfahren für dieses System im Vergleich zur Produktion. Die Reparatur ist sowohl von einer Arbeitsplattform, als auch vom aus Seil durchführbar.

Darüber hinaus sind die Ausfallzeiten im Falle einer Reparatur einzelner Windkraftanlagen erheblich minimiert.

Das neue Erosionsschutzsystem zeichnet sich dadurch aus, dass die Nasenkante eine in der Form produzierte Gummikante ist. Diese Gummikante bindet chemisch mit dem Laminat an, und kann somit durch mechanische Beanspruchung bei Transport und Montage nicht verschoben werden. Im Weiteren kommt die Nasenkante mit einer sehr genauen Kontur aus der Form. Das

Erosionsschutzmaterial ist gelb eingefärbt, um eine visuelle Kontrolle des Erosionsschutzes vom Boot zu erleichtern.

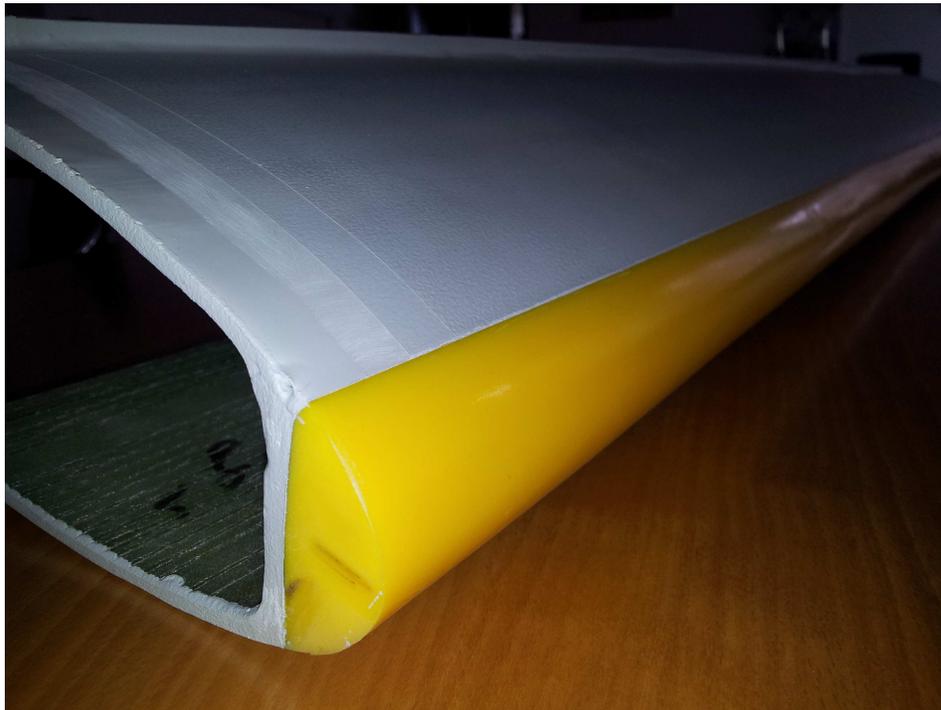


Abb. 5.2.20: Neues Erosionssystem; Gumminase „AREVA 25a“



Abb. 5.2.21: Altes Erosionssystem; Erosionsschutzfolie

Für dieses Fertigungsverfahren ist es notwendig die Schalenteilung aus der Profilhase heraus zur aerodynamischen Druckseite zu verschieben. Ein direkter Einsatz in der bestehenden Produktion ist daher nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

Im Versuch konnte eine vielfache Erosionsbeständigkeit aufgezeigt werden. Das bestehende Verfahren mit der Erosionsschutzfolie zeigt bisher gute Erfolge im Erosionsschutz, hat jedoch in den Bereichen von mechanischen Beanspruchungen durch Transport und Montage Beschädigungen, welche nachgearbeitet werden. Dieser Nachteil wird durch das neue Erosionsschutzmaterial behoben.

Erosionsschutz Vergleich

Vorteile des altes Erosionsschutzsystem: Erosionsschutzfolie:

- nachträglich Applikation möglich
- üblicher Formbau / möglich
- weitverbreitet, da marktüblich

Vorteile des neues Erosionsschutzes: „AREVA 25a“, der Gumminase :

- Bessere Erosionsbeständigkeit
- keine Beschädigungen durch Transport und Montage des Blattes
- Bessere Inspizierbarkeit vom Boot aus
- exakte Profilgeometrie kommt direkt aus der Form
- Erhöhte Dämpfungswerte in Schwenkrichtung

5.3 **Endergebnis**

Der in den vorherigen Kapiteln dargestellten Stand der Technik, deren Nachteile und die erforschten Lösungsansätze können wie folgt zusammengefasst werden: Durch die in diesem Projekt „Entwicklung und Konstruktion eines teilautomatisierten Finish für große Offshore Rotorblätter“ durchgeführten Forschungen in den verschiedenen Bereichen wurde das Finish der Rotorblätter enorm verbessert. Auch die Teilautomatisierung wurde vorangebracht und bereichsweise bis zur Serienreife verbessert. Für die bei AREVA Blade gefertigte Stückzahl ergeben sich folgende Lösungsansätze:

- Ein „klares Blatt“ ohne Gelcoat zur visuellen Inspektion:
sichert die hohe Qualität der Blätter
- maschinengestütztes Anschleifen der Rotorblattoberfläche:
reduziert erheblich den Arbeitsaufwand bei den über 450m² großen Rotorblattoberflächen
- Nasenprofilkontur aus der Form:
reduziert erheblich die Nacharbeit an der Nasenkontur
- Beibehalten der PUR Rollapplikation:
Investitionen in Lackierroboter lohnt sich erst bei sehr hohen Stückzahlen
- Erosionsschutz wird in die Form eingebracht:
Geometrietreue, große Materialdicke und gute Anbindung können so gewährleistet werden

Für den Bereich des Erosionsschutzes gibt es nach Abschluss der Forschung mit dem neuen Erosionsschutzmaterial „AREVA 25a“ ein vielversprechendes und hochwertiges Erosionsschutzsystem, dass durch seine Langlebigkeit optimale Effizienz und längere Wartungsintervalle im Versuch aufzeigt.

Die Erosionserscheinungen waren bisher ein Punkt der zu Nacharbeiten während der Betriebsjahre geführt hat. Mit dem neuen Erosionsschutzverfahren wird erwartet, dass sowohl die aufwendigen Nasenkonturnacharbeiten, die Transport und Montageschäden als auch Erosionsschäden der Vergangenheit angehören. Dieses Verfahren lässt sich leider in die bestehende Blattproduktion nur sehr bedingt

einbringen, kann aber bei der Neukonstruktion eines Rotorblattes mittels Fertigungsmodifikationen in der Produktion umgesetzt werden.

In dem Rotorblatt M5000-135 wurden die in diesem Forschungsprojekt erzielten Forschungsergebnisse angewendet. Dabei stellte sich in der Einführung heraus, dass diverse Tricks nötig waren, um das Blatt mit diesem neuen Verfahren zu ermöglichen. Das hohe Potential für die Serie zeichnet sich ab. Das M5000-135 sollte somit das derzeitige einzige Rotorblatt im internationalen Windmarkt sein, das innerhalb seiner Betriebszeit nicht an der Nasekante nachgearbeitet werden muss. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes „Entwicklung und Konstruktion eines teilautomatisierten Finish für große Offshore Rotorblätter“ leisten einen Beitrag zur Sicherung des internationalen Erfolgs der deutschen Offshore Windenergiebranche.

6 Mittelverwendung – wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Stand der Arbeits-, und Zeitplanung gegenüber ursprünglicher Planung / Verzögerungen

Trotz der zwischenzeitlich verzögerten Projektbearbeitung konnte das Forschungsprojekt innerhalb des geplanten Zeit- und Finanzrahmens bis Ende 2012 erfolgreich realisiert werden.

Das gesamte geplante Finanzvolumen des Forschungsprojektes wurde auf Grund der internen Schwerpunktverschiebung, die sich bereits aus den ersten Projekterkenntnissen 2008 und 2009 ergaben, nicht voll ausgeschöpft. Geplante Investitionen wurden nicht realisiert, sondern die Forschung und Testen zu den einzelnen bereits beschriebenen Projektabschnitten rückte in den Vordergrund. Insgesamt wurden ca. 63 % der geplanten finanziellen Mittel verwendet.

6.1 Personal

Das Personalkostenbudget wurde zu 92% ausgelastet. Die Ursache für diese fast vollständige Mittelausschöpfung lag u.a. in der personalintensiven Bearbeitung von Testvorgängen zur Rotorblattbeschichtung und zum Test von Erosionsschutzverfahren.

6.2 Kostenplanung Material

Nur 34 % der geplanten Materialkosten wurden in diesem Projekt verwendet.

Die Ursache ist u.a. darin begründet, dass beispielsweise die verwendeten Testkörper für den Erosionsteststand teilweise aus Restmaterialien der laufenden Produktion hergestellt werden konnten und keine zusätzliches Material bezogen werden musste.

U.a. wurde auf eine kostengünstige aber solide Ausstattung z.B. des Erosionsteststandes geachtet.

6.3 *Kostenplanung FE-Fremdleistungen*

Externe FE-Leistungen sind nicht einbezogen worden.

6.4 *Kostenplanung Reisekosten*

Diese Kostenposition wurde gegenüber der Vorplanung mit 20% überzogen..

Im Projektantrag wurde die Personal-, Zeit- und Reiseaufwendungen für das Monitoring der Rotorblätter in Onshore- und insbesondere im Offshorebereich unterschätzt. Aus der Projektentwicklung zeigte sich doch die dringende Notwendigkeit, die bereits im Einsatz befindlichen Rotorblätter regelmäßig auf Erosionserscheinungen zu überprüfen und verschiedene Reparaturvarianten an diesen Rotorblättern zu testen.

6.5 *Kostenplanung vorhabensspezifische Abschreibungen*

Diese Kostenposition wurde fast gar nicht genutzt. Bedingt durch die Verschiebung der Projektschwerpunkte, wurde frühzeitig festgestellt, dass auf den Bau der Schleif- und Lackierkabinen zugunsten der Verbesserung der Erosionsbeständigkeit des Rotorblatt-Finish, verzichtet werden sollte.

Es wurden nur Investitionen in geringem Umfang getätigt.

6.6 *Kostenplanung sonstige unmittelbare Vorhabenkosten*

Diese Kostenposition wurde analog der vorhabensspezifischen Abschreibungen auf Grund der Schwerpunktverschiebung innerhalb des Projektes, fast gar nicht genutzt.

7 *Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit*

Die Zielsetzung des Projektes, ein teilautomatisiertes Finish zu entwickeln, um eine hohe Qualität von Offshore-Rotorblättern abzusichern, hat sich prinzipiell nicht verändert.

Es wurde frühzeitig eine Erweiterung der Projektbearbeitung als notwendig erachtet, um ein erfolgreiches Umsetzen der Projektziele auf internationalem Höchstniveau zu erreichen. Das Hauptprojektziel bestand in der Erreichung eines optimalen Finish für große Offshore Rotorblätter, um über die Gewährleistung einer lange Lebensdauer des Endfinish bei minimaler Erosionseinflüssen und Senkung der laufenden Offshore-Wartungskosten der Rotorblätter zu erreichen

Dieses Ziel wurde insofern übertroffen, da ein Projektergebnis in der Entwicklung des neuen Erosionsschutzsystem „AREVA 25a“ (Pkt. 5.2.5) lag.

Mit diesem neuen Erosionsschutzsystem erhöhen sind die laufenden Produktionskosten für Rotorblätter unerheblich gegenüber dem herkömmlichen Produktionsverfahren. Die sehr kostenintensiven Offshore-Wartungen und -Reparaturaufwendungen können dagegen erheblich reduziert werden. Der Einsatz dieses neuen Erosionsschutzverfahrens kann allerdings nur bei neukonstruierten Rotorblättern erfolgen, da anderenfalls erhebliche konstruktive Veränderungen in der laufenden Produktion erfolgen müssten. Dieses neue Erosionsschutzsystem wird derzeit in der Neuentwicklung eines 66-m-Offshore-Rotorblattes eingesetzt und erstmalig in der Windenergiebranche verwendet.

7.1 Schutzrechtanmeldung

Eine Schutzrechtanmeldung ist derzeit nicht vorgesehen. Es wird stattdessen versucht das Fertigungs-Know-How in der Firma zu halten. Dies sichert den Wettbewerbsvorteil, der sich durch die Forschungsarbeiten ergeben hat.

7.2 Wirtschaftliche Aussichten nach Projektende

Um funktionelle und wirtschaftliche Offshore Anlagen herstellen zu können ist es wichtig, die Zuverlässigkeit der Systeme zu steigern. Während es bei Onshore Anlagen noch relativ einfach ist einzelne Komponenten zu tauschen oder nachzuarbeiten, ist dies bei Offshore zur Zeit schon allein aufgrund des Arbeitsstandards kaum denkbar. Die Wirtschaftlichkeit der Offshore Parks steigt somit. Ein funktioneller Vorteil besteht daher darin, dass keine Nacharbeiten an dem Erosionsschutz notwendig sind.

Durch das Beherrschen des Erosionsschutzes wird somit ein großer Vorteil gegenüber anderen Mitbewerben auf dem immer internationaler werdenden Offshore Windkraftanlagen Markt erreicht.

Dies ist von Vorteil für die Rotorblatthersteller, Betreiber von Windenergieanlagen, Finanziers/Banken, Projektierer, sowie Endverbraucher und schont zudem die Ressourcen der Umwelt.

7.3 *Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende mit Zeithorizont*

Das abgeschlossenen Forschungsprojekt ist mit einer stark anwendungsbezogene Entwicklung verbunden und hat mit der Entwicklung eines neuen Erosionsschutzverfahren einen sehr hohen Innovationsgrad verbunden.

Dieses Verfahren zur Herstellung von qualitativ sehr hochwertig erosionsbeständigen Rotorblättern, ist nicht nur für den deutschen offshore-Markt, sondern international von Interesse.

7.4 *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Es ist geplant, die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes direkt in der Produktion von neukonstruierten Offshore-Rotorblättern umzusetzen.

7.5 *Geplante Veröffentlichungen*

Es sind derzeit noch keine Veröffentlichungen zu den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes geplant