

Schlussbericht

Entwicklung eines ertragsstarken und masse- reduzierten Onshore Rotors für besonders effiziente Windkraftanlagen in der 3-4 MW Leistungsklasse

FKZ 0325671

Nordex Energy GmbH
Langenhorner Chausse 600
22419 Hamburg
Deutschland

Zeitraum: 01.01.2014 – 15.06.2016

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325671 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

	Schlussbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	--	--

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
1.4.1	Stand von Nennleistung und Rotordurchmesser bei Onshore-Windenergieanlagen	4
1.4.2	Stand der Technik beim Rotorblatt	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	Eingehende Darstellung.....	6
2.1	Verwendung der Zuwendung, Ziele und Ergebnisse im Einzelnen	6
2.1.1	AP 1 - Konzepterstellung	6
2.1.2	AP 2 - Detaillierung Aerodynamik & Struktur; funktionelles Design Blitzschutz	6
2.1.3	AP 3 - Blattkonstruktion	12
2.1.4	AP 4 - Formen-, Vorrichtungsbau & Entwicklung Fertigungsprozess	12
2.1.5	AP 5 - Prototypenbau	14
2.1.6	AP 6 - Validierung im labor – full-scale-Tests	14
2.1.7	AP 7 - Validierung an der Prototyp-WEA im Feld.....	19
2.1.8	AP 8 - Serienreifmachung des Fertigungsprozesses	20
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
2.3	Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes.....	21
2.4	Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	21
2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	21

	Schlussbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	--	--

Allgemeines

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Ergebnisse im Vorhaben „**Entwicklung eines ertragsstarken und masse-reduzierten Onshore Rotors für besonders effiziente Windkraftanlagen in der 3-4 MW Leistungsklasse**“, Förderkennzeichen 0325671 für den Zeitraum 01.01.2014 – 15.06.2016.

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines leistungsstarken Onshore Rotors mit innovativen Eigenschaften, die die Wirtschaftlichkeit von Onshore Turbinen im Leistungsbereich 3-4 MW deutlich verbessern. Der Onshore Rotor soll die Anforderungen eines Binnenlandstandortes, z.B. Masse, Ausmaße und Geräuschemissionen berücksichtigen und mit einem Durchmesser von 130-140m in den Punkten Effizienz und Ertrag überzeugen.

Die Optimierung im Bereich der Rotorblatt - Eigenschaften sind: deutliche Steigerung der Blattgesamtlänge, Reduktion der Blattgesamtmasse, Steigerung des Energieertrages, Reduktion der Lasten für die WEA, Minimierung der Schallemission, Minimierung des aerodynamischen Flatterns, Gewährleistung des Blitzschutzes und Reduktion der Taktzeit in der Produktion.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Nordex-Produktportfolio sollte um eine 3-4MW Binnland-WEA ergänzt werden mit einem Rotordurchmesser von 130-140m. Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Rotorblatt erforderte eine parallele Entwicklung/Anpassung der maschinenbaulichen und elektrotechnischen Komponenten der zugehörigen Nordex-Windenergieanlage. Eine Machbarkeitsstudie zur Realisierung einer solchen WEA lag vor Projektbeginn vor. Eine Reduzierung der Energieerzeugungskosten mit einer WEA mit o.g. Durchmesser und Nennleistung hat sich innerhalb der Machbarkeitsstudie erwiesen. Damit erschien die Durchführung des Projektes sinnvoll für Nordex.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliedert sich in 8 Arbeitspakete, die die Konzeptphase zur Vorauslegung bis zum Prototypenbetrieb an der WEA umfassen:

AP 1: Konzept und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

AP 2: Detaillierung Aerodynamik & Struktur; funktionelles Design Blitzschutz

AP 3: Blattkonstruktion

AP 4: Formen-, Vorrichtungsbau & Entwicklung Fertigungsprozess

AP 5: Prototypenbau

AP 6: Validierung im Labor – Blatttests

AP 7: Validierung an der Prototyp-WEA im Feld

AP 8: Serienreifmachung des Fertigungsprozesses

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Stand von Nennleistung und Rotordurchmesser bei Onshore-Windenergieanlagen

Die größten Rotorblätter, die vor Projektbeginn in Serie gebaut wurden, haben sowohl Onshore als auch Offshore eine Länge von etwa 61m. Lediglich 1-2 Mitbewerber, Enercon und Gamesa bieten Anlagen mit einem Rotordurchmesser größer 120m an. Enercon hat ihre 7,5MW mit einem segmentierten ca. 60m langen Rotorblatt ausgestattet. Die spanische Gamesa bietet für ihre 4,5MW WEA ein Rotor mit 128m und 136m an, dessen Blatt ebenfalls in der Länge geteilt wird. Vestas hat im September 2012 eine Onshore-WEA mit 126m Rotordurchmesser angekündigt; Repower (heute Senvion) will eine Onshore-WEA mit 122m Rotordurchmesser anbieten. Beide Wettbewerbsanlagen sollen eine Nennleistung von 3.0 MW aufweisen und ab 2014 verfügbar sein. Ungeteilte Onshore Rotoren mit einem Durchmesser größer 120m sind derzeit nicht als Serienprodukt am Markt verfügbar.

1.4.2 Stand der Technik beim Rotorblatt

Material:

Bisher setzen nur wenige WEA-Hersteller Carbonfasern für ihre Rotorblätter ein, dazu zählen Vestas, Gamesa und Nordex. Nordex hat bereits Erfahrung in der Verarbeitung von Carbonfasergelege beim Rotorblatt vom Typ NR58.5 gesammelt. Es handelt sich um ein Vakuuminfusionsverfahren, das im vorliegenden Projekt genutzt und weiterentwickelt werden sollte. Bei Vestas wurden Carbonfasern als Prepreg eingesetzt.

Aerodynamische Profile:

Bei der Auswahl der aerodynamischen Profile findet man am Markt einige Profilmfamilien, die schwerpunktmäßig an Universitäten oder Forschungseinrichtungen entwickelt wurden, z.B. an der TU Delft, bei der FFA oder beim Forschungsinstitut Risoe. Diese Profile werden im Außenbereich des Rotorblattes eingesetzt, während im Innenbereich bis ca. 1/3 der Gesamtlänge in-House-Designs der unterschiedlichen Rotorblatt/WEA-Hersteller Verwendung finden.

Nordex hat in einem Benchmark verschiedener Profile eine Vorauswahl von Profilen getroffen, die bei Nordex in diesem Projekt detailliert untersucht werden sollen. Die Profile sind von Bedeutung für den Ertrag und den Schallpegel.

Aerodynamisches Blattdesign:

Die Bedeutung des aerodynamischen Rotorblattdesign für die Anlagenlasten ist sehr groß. Zunehmend werden schlanke Designs eingesetzt, wodurch nicht nur Betriebslasten, sondern auch Extremlasten reduziert werden können. Für schlanke Blattdesigns sind insbesondere Profile mit hohem Auftriebsbeiwert und hochfeste Materialien wie Carbonfasern geeignet bzw. je nach Ausprägung des Designs erforderlich.

Bauweise:

Der Großteil der Hersteller verwendet eine aufgelöste Bauweise, d.h. das Rotorblatt besteht aus mehreren Komponenten, die im Allgemeinen durch Kleben gefügt werden. Lediglich Siemens setzt eine Integralbauweise ein, bei dem die Glasfaser-Gelege des Rotorblattes in einem Schritt infundiert und verbunden werden.

Masse:

Bei einer herkömmlichen Bauweise eines Rotorblattes in Glasfaserverbundmaterial ist bei einer Rotorblattlänge von 65m eine Gesamtmasse von ca. 22-23 t zu erwarten.

	Abschlußbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	---	--------------------

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb der Nordex innerhalb dieses Projektes ist durch Beauftragung entstanden. Es handelt sich schwerpunktmäßig um folgende Themengebiete. Windkanalmessungen: DLR; Materialkennwertermittlung: IMA; Blitzschutztests: Global Lightning Protection Systems (GLPS); Entwicklung Fertigungsprozeß und Prototypenbau: SGL Rotec.

	Abschlußbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	---	--

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung, Ziele und Ergebnisse im Einzelnen

Die Darstellung der Ergebnisse wird nach Arbeitspaketen gegliedert. Die Zielerreichung wird jeweils am Ende der Arbeitspaketbeschreibung bzw. des jeweiligen Unterabschnittes dargelegt.

2.1.1 AP 1 - Konzepterstellung

Das Rotorblatt wurde mit dem Nordex eigenen multidisziplinären Optimierungstool ausgelegt. Dabei wurden Wechselwirkungen zwischen Blatt und Windenergieanlage durch eine Integration von Lastberechnung und Blattauslegung in ein übergreifendes Optimierungswerkzeug berücksichtigt. Im ersten Schritt wurden unterschiedliche Profildfamilien und deren Einfluß auf Energieertrag und Lasten untersucht. Daraus resultiert die Auswahl der Profildfamilie. Im zweiten Schritt wurden verschiedene Optimierungs-Zielrichtungen untersucht: maximaler Energieertrag, minimaler Turmschub und geringste Energieerzeugungskosten. Unter Einbeziehung eines Kostenmodells wurde schließlich ein Entwurf zur Optimierung der Energieerzeugungskosten gewählt.

Das endgültige Blattdesign hat eine Länge von 64.4m und wird bei Nordex unter dem Namen NR65.5 (entspricht dem halben Rotordurchmesser) geführt.

Das Rotorblatt zeichnet sich durch eine sehr geringe Blatattiefe im Außenbereich aus, wodurch eine Lastsenkung erzielt wurde.

Das Blattdesign sieht die Fertigung von folgenden Einzelkomponenten vor: Gurte, Stege, Halbschalen, Abschlußsteg, Blattwurzeleinleger. Das Fertigungsverfahren ist für alle Bauteile ein Vakuuminfusionsverfahren. Die Verbindung der Einzelteile geschieht durch Klebung bzw. in Einzelfällen durch Lamine, die dann vorwiegend im Handlaminierverfahren hergestellt werden.

Das Ziel eines optimierten Designs und Festlegung der Aerodynamik wurde erreicht. Das Fertigungskonzept wurde festgelegt.

2.1.2 AP 2 - Detaillierung Aerodynamik & Struktur; funktionelles Design Blitzschutz

Blattanschluß:

Da an der Verbindungsstelle Blatt zu Nabe das Pitchlager dimensionierend geworden ist, ergab sich hier ein Blattwurzelndurchmesser von 2,8m. Dadurch konnte das bewährte T-Bolzen-Konzept weiter verwendet werden.

Beim full-scale-test sind Messungen am Blattanschluß zur Validierung der Berechnungen eingeplant. Dies geschieht sowohl während des dynamischen als auch während des statischen Tests an 17 Bolzen im Blattanschlussbereich (siehe Abb. 1).



A 3D visualization of a curved, cylindrical-like structure. The structure is composed of several concentric layers. The outermost layer is a light blue grid. Inside this, there is a darker blue layer, and then a grey layer. The innermost part is a yellowish-orange region. A series of green dots are arranged along the inner surface of the grey layer. A series of red dots are arranged along the inner surface of the dark blue layer. A series of blue dots are arranged along the inner surface of the light blue grid. A 3D coordinate system is shown at the bottom right, with axes labeled x (red), y (green), and z (blue).

Seite 7 / 21

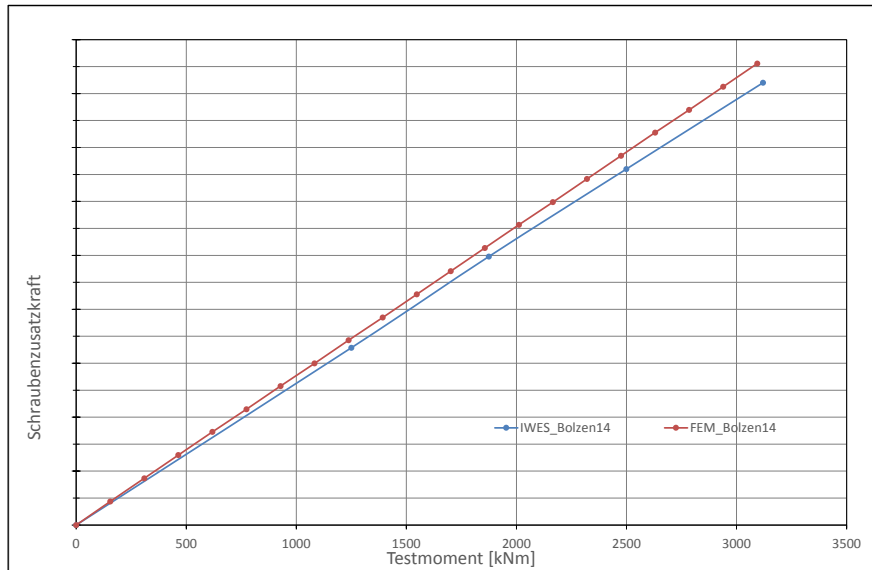


Abb. 3: Schraubenzusatzkraft in Abhängigkeit vom Testmoment bei LF7 (Bolzen 14 ist zugbelastet)

Somit konnten die bisher verwendeten Einstellungen des FE-Modells im Blattanschlussbereich, insbesondere die Vernetzung (Feinheit, Elementauswahl) und die Kontaktdefinitionen (in den Trennfugen) validiert werden.

Das Ziel eines Bolzenkreisdurchmessers von 2,3m konnte nicht weiterverfolgt, da dies für die Pitchdrehverbindung nicht realisiert werden konnte. Für den 2,8m Bolzenkreisdurchmesser wurde die Bolzenanzahl minimiert und die Berechnungen mit Messungen validiert.

Stabilitätsanalyse:

Als besondere Herausforderung ergab sich die Frequenzabstimmung zwischen Blatt und WEA, da innerhalb der Lastberechnung Flattereffekte festgestellt wurden. Die Schlankheit des Blattes im Außenbereich stellt eine Herausforderung zur Einstellung einer ausreichenden Steifigkeit in Schwenk- und Torsionsrichtung dar. Insbesondere Torsionsschwingungseffekte am Blatt sind bei dieser Blattlänge erstmals innerhalb von Lastrechnungen bei Nordex identifiziert worden; bei vorherigen Blatt-/ Anlagendesigns waren diese Effekte vernachlässigbar. Es konnte eine effiziente Lösung durch Abstimmung von Regelung und Blattsteifigkeit erzielt werden. Zur Validierung der Auslegung sind Messungen am Prototyp und am Testblatt mit Sensorik entlang der Blattlänge an mehreren Radiuspositionen durchgeführt worden.

Das Ziel eines positiven Stabilitätsnachweises wurde erreicht.

Material und Verarbeitung:

Für den Hauptgurt, der als Carbonfaserverbundbauteil geplant war, wurden unterschiedliche Fertigungsverfahren analysiert. Die Verwendung von Pultrusionsprofilen wurde verglichen zum Einsatz von trockenem Gelege, das im Vakuuminfusionsverfahren verarbeitet wird.

Die Verwendung von Pultrusionsprofilen erfordert ausführliche Blitzschutzuntersuchungen. Dazu wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Tests im Labormaßstab wurden durchgeführt. Um eine zeitnahe Prototypenfertigung zu realisieren, wurde das Infusionsverfahren priorisiert, da hier bereits Erfahrungen vom Rotorblatttyp NR58.5 vorliegen. Eine spätere Substitution durch Pultrusionsprofile ist weiterhin möglich. Zur Verbesserung der Durchlaufzeiten beim Infusionsverfahren, wurden Gelege mit unterschiedlichem Flächengewicht und mit unterschiedlichen Vernährungsarten betrachtet. Für den Prototypen wurde das „schwerere“ Gelege eingesetzt und ein neuer Infusionsaufbau mit integriertem Blitzschutz entwickelt.

Damit konnte gegenüber dem Serienprozeß beim NR58.5 das Ziel einer Verbesserung für die Zykluszeit der Hauptgurtfertigung erzielt werden.

Aerodynamik:

Für die ausgewählten aerodynamischen Profile lagen bereits eine Reihe von Windkanalversuchen vor. Windkanalversuche mit Anbauteilen, wie z.B. Wirbelgeneratoren oder Serrations, wurden im Projekt durchgeführt.

Für die Vermessung der Profildfamilie wurde eine Meßkampagne geplant, bei der Wirbelgeneratoren und Serrations als aerodynamische Anbauteile getestet werden sollen. Serrations werden an der Endkante des Rotorblattprofils befestigt und haben in der Draufsicht eine Zackenform; die Geometrie der Zacken kann auch dreidimensional sein – siehe Abb. 4: Serrations. Mit Serrations ist eine Reduzierung des Schallpegels möglich. Ein Test an einer WEA wurde an einer Nullserienanlage erfolgreich durchgeführt.



Abb. 4: Serrations

Abb. 5 zeigt eine der zu untersuchenden Wirbelgeneratorkonfigurationen. Mit Wirbelgeneratoren kann die Leistung der Profile gesteigert werden, indem höhere Auftriebsbeiwerte erreicht werden. Diese Maßnahme dient zur möglichen Anpassung, falls die Prototypenvermessung zu einer nicht ausreichenden Leistungskurve führt. Weiterhin soll die Möglichkeit zur Steigerung der Nennleistung der WEA hiermit offen gehalten werden.

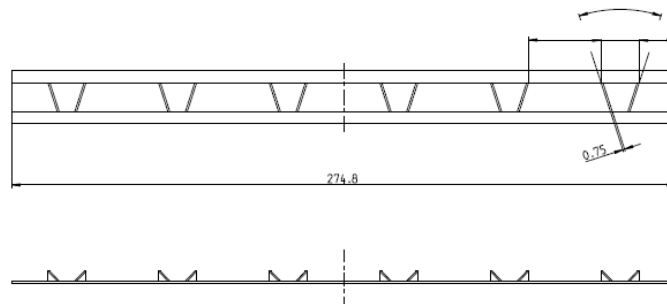


Abb. 5: Wirbelgeneratoren

Die meisten zu messenden Konfigurationen fielen auf die Vermessung der VGs. Je Windkanalmodell wurden zwei VG-Höhen in Kombination mit zwei unterschiedlichen Abständen in Spannweite sowie vier verschiedenen Positionen entlang der Sehne vermessen, mit dem Ziel eine optimale Konfiguration bezüglich folgender Auswahlkriterien zu finden:

- Erhöhung des Stallwinkels um 2 bis 3°
- Maximale Gleitzahl
- Verlängerung des linearen Bereiches (Auftriebskoeffizient)

Abb. 6 zeigt die Auftriebskoeffizienten der Favoriten für das Profil mit dem geringsten Dickenverhältnis. Die Erhöhung des Stallwinkels ist deutlich zu erkennen. Im Gegensatz zu VGs sollen Serrations die aerodynamischen Eigenschaften der Profile wenn möglich nicht verändern, da sie akustische Hilfsmittel sind.

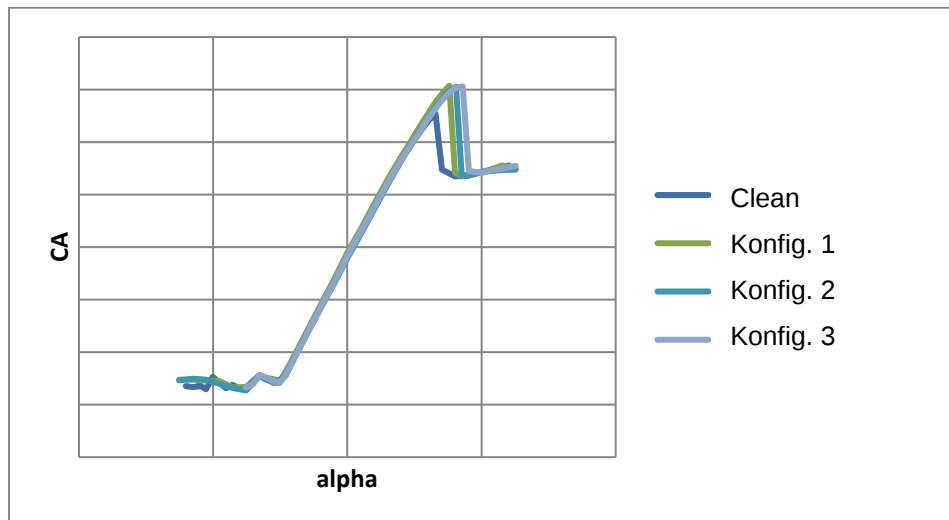


Abb. 6: Auftriebskoeffizient für VG-Favoriten

Das Ziel der Charakterisierung der aerodynamischen Eigenschaften der eingesetzten Profile mit zusätzlichen Anbauteilen wurde erreicht. Damit liegen ausreichend Daten für das aerodynamische Design vor und das Potential für weitere Leistungssteigerung ist sichergestellt.

Eine signifikante Schallreduzierung durch Serrations wurde an einer WEA nachgemessen.

Blitzschutzsystem:

Für das Blitzschutzsystem des NR65.5 wurde auf einige bereits qualifizierte Komponenten des Rotorblattes NR58.5 zurückgegriffen – z.B. Ableitkabel und Rezeptoren. Die Integration des leitenden CFK-Gurtes in das Blitzschutzsystem soll verbessert werden. Daher wurden unterschiedliche konstruktive Ausführungen anhand von Prüflingen der Länge 4m im Hochspannungslabor getestet. Dabei werden die Prüflinge mit unterschiedlichen Stromimpulsen beaufschlagt, um die Stromverteilung in den leitenden Teilen zu messen und um lokale Schädigungen des Laminates oder der Bauteile des Blitzschutzsystems zu detektieren.

Typische Stromimpulse sind in Abb. 7 dargestellt.

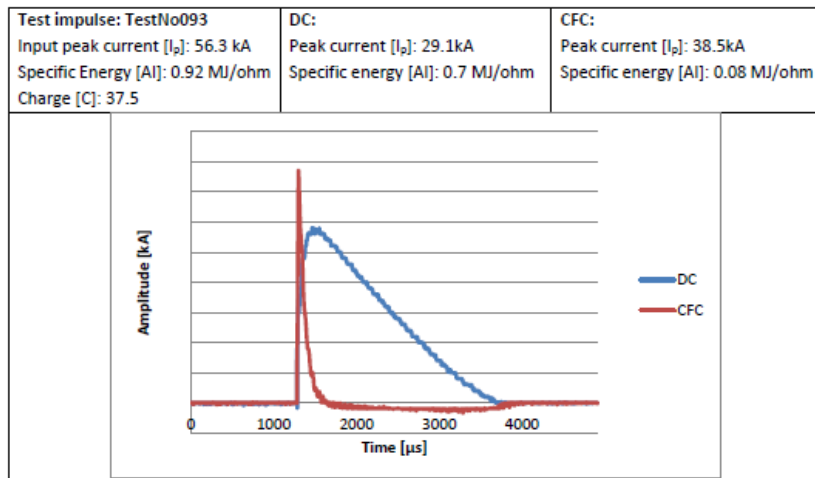


Abb. 7: Stromimpuls im Blitzstromtest

Für das Blitzschutzsystem des NR65.5 wurden unterschiedliche Varianten zur Integration der leitenden CFK-Bauteile in das Blitzschutzsystem untersucht. Die Untersuchungen sind in erster Linie experimentell.

Die Stromverteilung in den einzelnen Bauteilen wurde durch aufwändige Messungen ermittelt.

Das Ziel dieses Teilarbeitspaketes: Layout eines fertigungsoptimierten Blitzschutzsystems für CFK-Bauteile. Das Ziel wurde erreicht.

2.1.3 AP 3 - Blattkonstruktion

Die Konstruktion des Rotorblattes NR65.5 ist schematisch in Abb. 8 dargestellt. Zu sehen sind hier die Komponenten und Vorfertigungsteile (nicht dargestellt ist der vorgefertigte Blattwurzeleinleger).

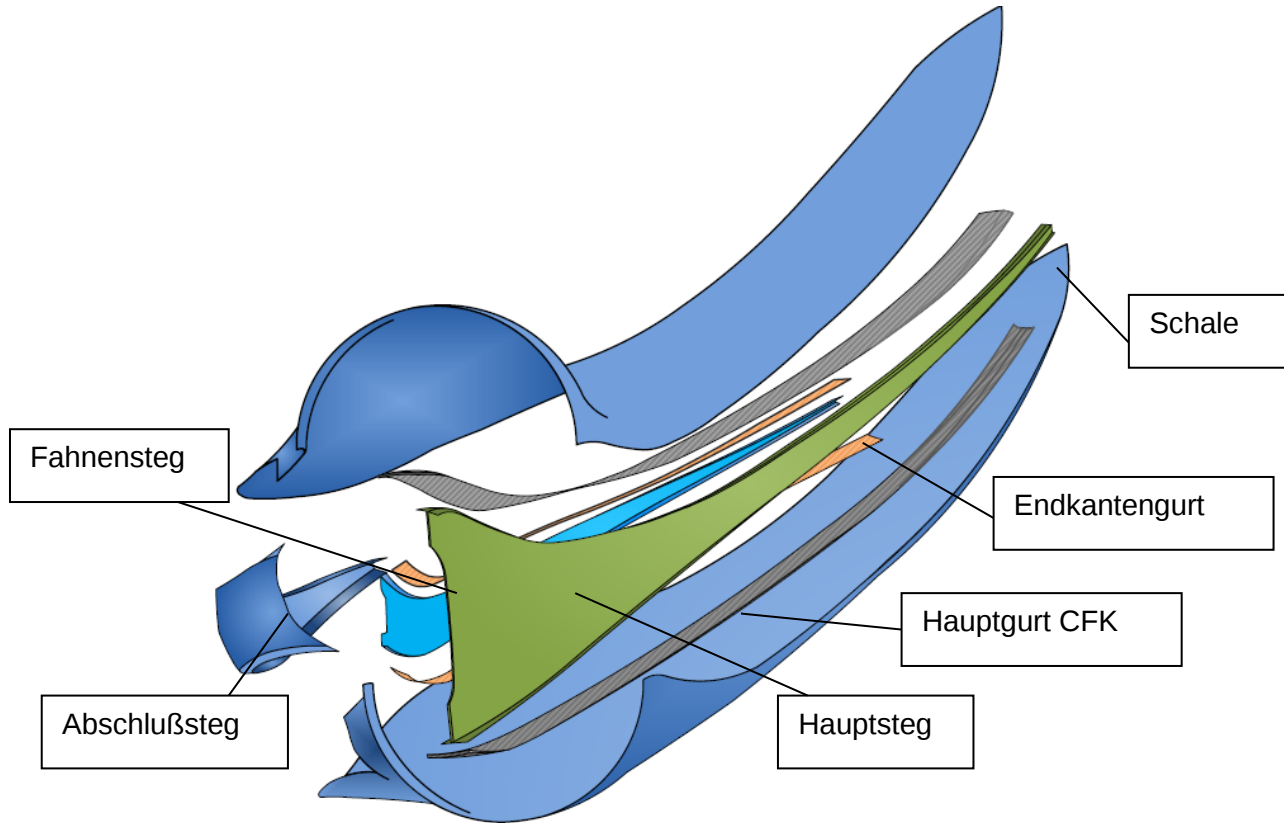


Abb. 8: Strukturaufbau NR65.5

Bei der Konstruktion des Rotorblattes und Aufteilung in Vorfertigungskomponenten stehen Überprüfung der Fertigbarkeit im Vordergrund. Dazu werden alle Komponenten auf Hinterschnitte, die eine Entformbarkeit behindern, überprüft. Weiterhin werden Details zum Kernmaterialzuschnitt konstruiert und das Blitzschutzsystem sowie Anbauteile wie Bodenplatten, Luken, Nullgradmarkierungen integriert.

Das Ziel des Arbeitspaketes ist die Erstellung der CAD-Modelle aller Oberflächen für den Formenbau und die Erstellung aller Konstruktions- und Fertigungszeichnungen.

2.1.4 AP 4 - Formen-, Vorrichtungsbau & Entwicklung Fertigungsprozess

Formen:

Die Formen und Vorrichtungen für den Prototypenbau wurden bei SGL Rotec hergestellt. Als Neuerung wurde bei diesem Blatttyp eine dicke Hinterkante im Blattinnenbereich als Vorfertigungsteil vorgesehen. Die Hauptform ist in Abb. 9 zu sehen. Die Geometrie der Hauptform ist wichtig für die aerodynamische Performance des Rotorblattes. Die geforderten Toleranzen wurden eingehalten



Abb. 9: Fertigstellung der Hauptform

Ziel: Funktionsfähige Formen zur Erreichung der Toleranzanforderungen. Das Ziel wurde erreicht.

Fertigungsprozeß:

Fertigungsversuche zur Herstellung der Hauptgurte und zur Integration der dicken Hinterkante wurden durchgeführt.

Transportkonzepte wurden untersucht und die Auslegung/Herstellung von Transportvorrichtungen in Auftrag gegeben.

Die Herstellung der Formen und Vorrichtungen wurde an Firma SGL Rotec vergeben.

Ein kritischer Punkt beim Fertigungsprozeß ist die Herstellung der lasttragenden Hauptgurte. Die Gurte sind als Carbonfaserbauteil konstruiert. Es gelten enge Toleranzen an die Faserwelligkeit. Der Prozeß zur Qualifizierung des Herstellprozesses der CFK-Gurte ist daher sehr umfangreich und in einer Spezifikation beschrieben worden.

Beim Einsatz eines neuen Gelegeherstellers ist eine Neu-Qualifizierung erforderlich, weil die vom Lieferanten eingesetzten Herstellmaschinen einen Einfluß auf die Gelegequalität und somit auf die resultierende Bauteilqualität haben.

Während der Herstellung eines Prüfbauteils werden Harzfrontverläufe und Tränkungszeiten ermittelt.

Anschließend wird das Prüfbauteil zersägt und hinsichtlich Welligkeiten, Porositäten und Faservolumengehalten analysiert. Abb. 10 zeigt einen Querschnitt. Gut erkennbar ist die vollständige Durchtränkung des Materials.

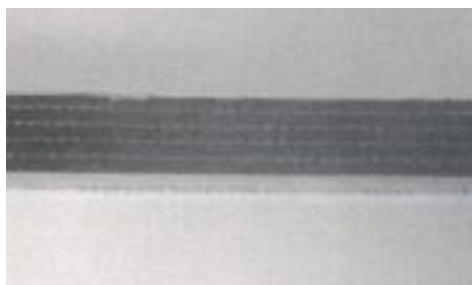


Abb. 10: Querschnitt des Prüfbauteils

Das Ziel eines robusten Fertigungsprozesses und die Einhaltung der engen Welligkeitstoleranzen wurde erreicht.

2.1.5 AP 5 - Prototypenbau

Herstellung der Prototypenblattsätze und des Testblattes wurde ebenfalls bei SGL Rotec beauftragt.

Das erste Rotorblatt ist als Testblatt vorgesehen und wurde am Nordex Blattteststand getestet.

2.1.6 AP 6 - Validierung im labor – full-scale-Tests

Statischer und dynamischer Test:

Der statische Test umfaßt Extremlasttests in 4 Richtungen – Abb. 11 zeigt den Test in eine Richtung. Dabei werden Dehnungen und Verformungen meßtechnisch erfaßt und mit den rechnerisch ermittelten Werten verglichen. Hierbei wurde eine gute Übereinstimmung erzielt.

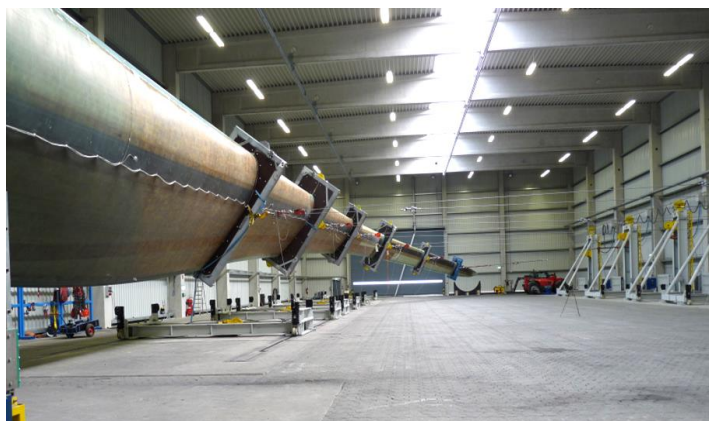


Abb. 11: Statischer Blatttest

Der dynamische full-scale Test besteht aus 2 Testrichtungen: Schlagrichtung und Schwenkrichtung. Zur Reduzierung der Testzeit wurden zwei Rotorblätter eingesetzt.

Beide Rotorblätter wurden in Q3/Q4 2015 auf zwei Testständen in unterschiedlichen Testrichtungen getestet. So konnte das Terminziel Abschluss der Tests in 2015 erreicht werden.

Die dynamischen full-scale tests werden nach Norm IEC61400-23 durchgeführt. Das zweite Testblatt wurde als erstes einem full-scale static test unterzogen, der die maximal zu erwartenden Extremlasten im Betrieb der WEA zuzüglich eines Überhöhungsfaktors von 1,1 abbildet. Es wird in vier Richtungen eine Last aufgebracht, um die rechnerisch ermittelten Bereiche der geringsten Restsicherheit abzudecken.

Die Zieltestlasten ergeben sich aus den berechneten Lasten zuzüglich eines Sicherheitsfaktors von ca. 1,3. Gemäß Richtlinie sind die Bereiche geringster rechnerischer Restsicherheit zu testen und eine Länge von 70% der Blattlänge ist zu betrachten.

Zielerreichung:

Die full scale-tests (statisch und dynamisch) dienen zur Verifizierung von Design und Fertigungsverfahren. Alle Tests sind positiv abgeschlossen worden. Das Terminziel wurde durch den Einsatz von 2 Testblättern erreicht.

Blitzschutzsystem – full-scale-tests

Der Nachweis der Funktionalität des Blitzschutzsystems umfaßt im Wesentlichen drei Aspekte:

- a) Verhinderung von Überschlügen zwischen elektrisch leitenden Komponenten
- b) Effizienz des Rezeptorsystems zum „Einfangen“ der Blitzeinschläge
- c) Hochstromtragfähigkeit aller Komponenten des Blitzschutzsystems

Dabei sind mehrere Technologien wie z.B. Potentialausgleich zwischen leitenden Bauteilen, Isolation und Funkenstrecken einsetzbar. Die verwendeten Bauteile müssen sowohl die erforderlichen elektrischen Eigenschaften als auch die mechanischen Eigenschaften, insbesondere zum fatigue-Verhalten, aufweisen. Daher ist es wichtig, die Bauteile schon im Testblatt zu verbauen, das für den full-scale-fatigue test verwendet wird.

Punkt a) der obigen Aufzählung kann durch rechnerische Betrachtung nachgewiesen werden. Im Hause Nordex wurden in Vergangenheit für andere Blatttypen zahlreiche Berechnungen und begleitende Tests durchgeführt, so daß man auf validierte und zuverlässige Berechnungstools zurückgreifen kann.

Punkt b) wird durch den Hochspannungstest nachgewiesen und Punkt c) durch eine Kombination von Test an Einzelkomponenten des Gesamtsystems und Teilen des Gesamtsystems Blitzschutz-Rotorblatt.

Hochspannungstest

Hochspannungstests zur Validierung der Effizienz der Rezeptoren sind anhand von 15m langen Prüfbauteilen durchgeführt worden. Die Prüflinge wurden in einer 15m-Versuchsform hergestellt, die Nordex für diesen Zweck angeschafft hat. Die Form hat die Originalgeometrie des NR65.5 Rotorblattes im Bereich der Blattspitze. In Abb. 12 ist der Prüfling in der Vorbereitung zum Lackieren zu sehen. Dies entspricht dem Fertigungsstand Ende Juni 2015.



Abb. 12: Blitzschutzprüfling 15m

Die Hochspannungstests wurden im 2. Halbjahr 2015 im GLPS-Labor in Dänemark durchgeführt.

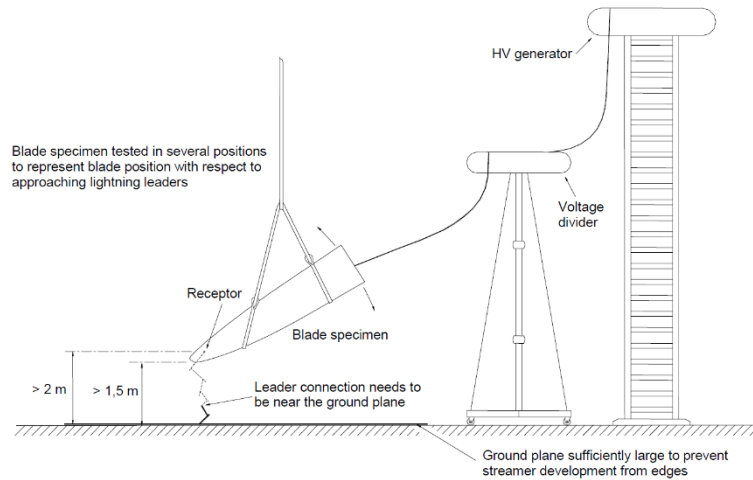


Abb. 13: Versuchsaufbau Hochspannungstest

Der grundsätzliche Aufbau des Versuches ist Abb. 13 zu entnehmen. Die Ground plane simuliert hierbei die Gewitter-Wolke am Himmel und damit das Spannungspotential zwischen Wolke und Rotorblatt. Der HV-Generator generiert die Spannungsdifferenz zwischen Rotorblattblitzschutzsystem und der ground plane.

Um alle Positionen des Rotorblattes innerhalb einer Rotorumdrehung und innerhalb von Pitchbewegungen abzubilden, werden im Test mehrere Testpositionen des Rotorblattes relativ zur ground plane eingestellt – siehe Abb. 14.

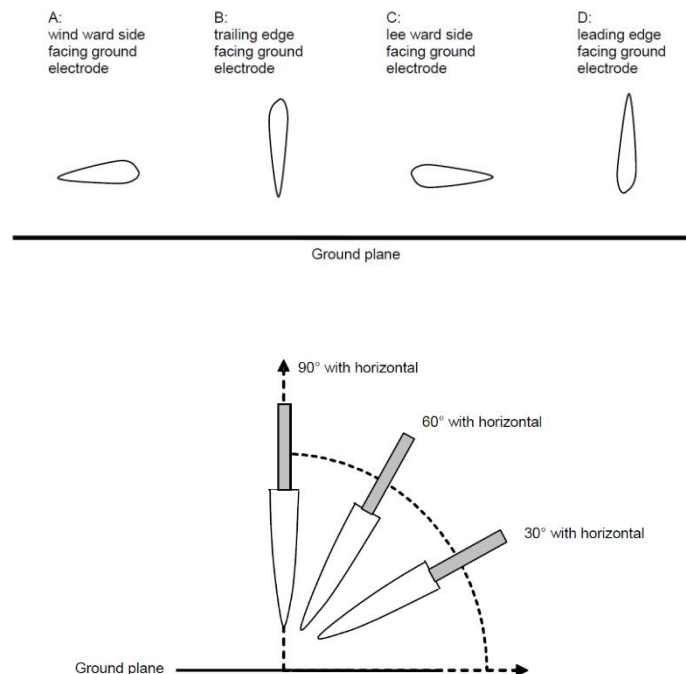


Abb. 14: Position des Rotorblattes relativ zur ground plane

Es werden im Test Spannungsimpulse mit negativer und positiver Polarität eingebracht. Dies entspricht den tatsächlich in der Natur vorkommenden Blitzentladungen.

Gemäß dem Blitzschutzkonzept (siehe Abb. 15) sind in Abhängigkeit von der Rotorradiusposition unterschiedlich starke Blitze zu erwarten.

Blitzschutzzone	Scheitelstrom in kA	Spezifische Energie in MJ/Ω	Elektrische Ladung in C
0A ₁	200	10,00	100
0A ₂	100	2,50	50
0A ₃	50	0,63	25
0B	-	-	-

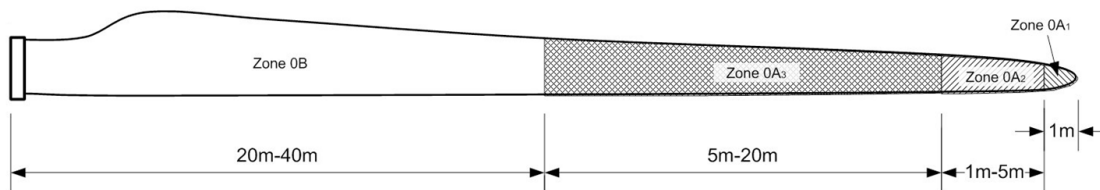


Abb. 15: Blitzschutzkonzept

Abb. 16 zeigt exemplarisch unterschiedliche Positionen des Rotorblattes relative zur ground plane im Test. Deutlich zu erkennen sind die Blitzentladungen zwischen ground plane und den verschiedenen am Rotorblatt angebrachten Rezeptoren.



Abb. 16: Entladungen im Hochspannungstest (Labor GLPS in Dänemark)

Hochstromtests

Zur Verifizierung der Hochstromtragfähigkeit des Blitzschutzsystems wurden im full-scale zwei Tests durchgeführt.

Der erste Test beinhaltet den Blitzableiter und den Carbon-Gurt, der in das Blitzschutzsystem einzubeziehen ist. Dazu wurden Tests mit Abschnitten von Blattspitze und Blattwurzel des Carbon-Gurtes durchgeführt. Es konnte die Stromtragfähigkeit nachgewiesen werden.

Der zweite Test beinhaltet das Gesamtblitzschutzsystem im Blattspitzenbereich. Der Versuchsaufbau ist Abb. 17 zu entnehmen. An den Rezeptoren wird ein Stromimpuls entsprechend einem Blitz eingeleitet; an dem blattwurzelseitigen Ende werden die abgeleiteten Teilströme der einzelnen Systemkomponenten gemessen. Überschlüsse und Erwärmungen werden visuell mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bzw. mit einer Infrarotkamera ermittelt und können so bewertet werden.



Abb. 17: Hochspannungstest am Gesamtsystem in der Blattspitze

Abb. 18 zeigt eine Infrarotaufnahme des Carbon-Gurtes. Deutlich zu erkennen ist der lokale Temperaturanstieg am rechten Ende des Bauteils. Die hier ermittelten Temperaturen liegen im tolerierbaren Bereich, so daß keine Schädigung des Rotorblattes im Blitzschlagfall durch lokale Erwärmung zu erwarten ist.



Abb. 18: Infrarotaufnahme des Hochstromtests am Carbon-Gurt

Zielerreichung:

Durch die Blitzschutztests konnten die nach IEC-Richtlinie geforderten Eigenschaften nachgewiesen werden. Dies sind Effizienz der Rezeptoren, Stromtragfähigkeit der Komponenten und Verhinderung von Überschlügen zwischen leitenden Komponenten. Letzterer Nachweis erfolgte durch Kombination von Berechnung und Versuch basierend auf Erfahrungen vom NR58.5-Rotorblatt. Temperaturpeaks, die zur lokalen Zerstörung des Rotorblattes führen können, wurden nicht festgestellt.

2.1.7 AP 7 - Validierung an der Prototyp-WEA im Feld

Die Errichtung der Prototyp-WEA erfolgte im ersten Halbjahr 2015. Die Schall- und Leistungskurvenvermessung wurden in Q3/2015 abgeschlossen. Die Lastvalidierung wurde durchgeführt.

Die Instrumentierung für die Lastmessung umfaßte folgende Komponenten der WEA:

- Biegung an einer Blattwurzel am Rotorblatt
- Biegung und Torsion an der Hauptwelle
- Biegung und Torsion am Turmkopf
- Biegung am Turmfuss

Diese Meßstellen wurden mit DMS ausgerüstet.

Zur Auswertung der Meßdaten ist es wichtig ausreichend Daten für alle Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten gesammelt zu haben.

Abb. 19 zeigt gemessene Momente am Turmfuß im Vergleich zu den Werten aus der Simulation.

Die Übereinstimmung ist sehr gut.

Die gemessenen Momente werden in erster Linie durch die aerodynamischen Kräfte, die am Rotorblatt entstehen, erzeugt. Das aerodynamische Design ist daher entscheidend für die Belastungen an den Großkomponenten der WEA und somit auch für deren Kosten. Die aerodynamische Optimierung, die im Designprozeß des Rotorblattes mit aufwändigen Optimierungsrechnungen durchgeführt wurde, ist daher von entscheidender Bedeutung für die Gesamtkosten der WEA.

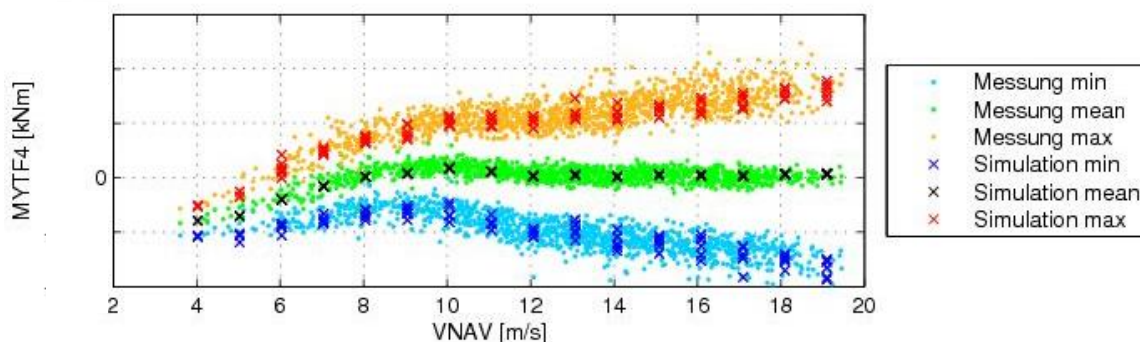


Abb. 19: Moment am Turmfuß aus Messung und Simulation

Zielerreichung:

Die rechnerisch ermittelte Leistungskurve der WEA mit dem Rotorblatt NR65.5 wurde durch Messungen bestätigt. Der Schallpegel wurde im Feld gemessen. Der anvisierte Schallpegel wurde unterschritten und

	Abschlußbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	---	--

damit ergeben sich weitere Potentiale zur Drehzahlsteigerung/Nennleistungserhöhung bei konstantem Schallpegel.

Die berechneten Lasten wurden innerhalb von Messungen an der WEA validiert; es sind keine signifikanten Überschreitungen festzustellen.

Seitens Zertifizierer wurden die entsprechenden Gutachten, die o.g. Aussagen bestätigen, ausgestellt.

2.1.8 AP 8 - Serienreifmachung des Fertigungsprozesses

Der Beginn der Serienfertigung lag im zweiten Halbjahr 2015. Vorfertigungsteile (Gurte, Stege, Blattwurzeleinleger) wurden im ersten Halbjahr 2015 hergestellt. Notwendige Anpassungen der Werkzeuge (siehe Beschreibung unter AP 4) wurden im Rahmen der Erstmusterprüfung definiert. Nach Abschluss der Nullserie wird der aktuelle Qualitätssicherungsplan auf die Serienproduktion abgestimmt und implementiert. Hierbei fließen die Ergebnisse und Erfahrungen aus der Nullserie mit ein.

Die Serienreifmachung des Fertigungsprozesses beinhaltet primär Verbesserungen am Infusionsaufbau. Sowohl Positionen des Angusses, Durchmesser von Angußkanälen, Einsatz von Fließhilfen und Vakuumgittern beeinflussen die Geschwindigkeit und die Vollständigkeit der Bauteildurchträngung.

Das Design des Systems erfolgt anhand von Erfahrungswerten kleinerer Rotorblätter und durch zahlreiche Versuche und leichte Modifikationen während der Nullserienphase. Rechnerische Methoden sind derzeit nur begrenzt verfügbar und mit erheblichen Rechenaufwand verbunden.

Für die Qualitätssicherung werden umfangreiche Prüfungen und Dokumentationen während der Bauteilherstellung durchgeführt.

Der Prüfplan und die Q-Dokumentation wurden überarbeitet und auf Nullserienstand gebracht.

Im Qualitätsprotokoll eines Bauteils werden alle kritischen Arbeitsschritte protokolliert und eventuelle Fehler dokumentiert, so daß im Bedarfsfall Nacharbeiten durchgeführt werden können.

Die kritischen Arbeitsschritte wurden zuvor innerhalb einer Prozeß- und Design-FMEA identifiziert.

Zielerreichung: Ziel des AP ist die Serienfreigabe.

Innerhalb dieses Arbeitspaketes ist das Rotorblatt serienreif gemacht worden. Die Erstmusterprüfung wurde abgeschlossen. Zykluszeiten werden im Allgemeinen innerhalb der Serienfertigung durch Optimierung von Arbeitsabläufen und Materialfluß reduziert. Die technischen Ziele zur Fertigbarkeit einer Serie sind erreicht worden.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt dargestellten Arbeiten sind für eine Produktentwicklung entsprechend Nordex Produktentwicklungsprozeß (PEP) notwendig. Die Arbeiten wurden in Berichten, Spezifikationen und Zeichnungen dokumentiert. Spezifikationen und Zeichnungen sind für die Herstellung von Rotorblättern erforderlich. Die Berichte zum Festigkeitsnachweis, zum Blitzschutznachweis, zur Leistungskurven-, Schall, und Lastenmessung, zur Testdurchführung und -auswertung sind im Rahmen der Produktzertifizierung notwendig und angemessen.

Die Blitzschutzuntersuchungen an den Pultrusionsprofilen wurden vorbereitend für eine Weiterentwicklung der Carbon-Technologie durchgeführt. Nach heutigem Stand ist dies eine sehr vielversprechende Technologie, die im Hause Nordex weiterverfolgt wird.

	Abschlußbericht Entwicklung eines ertragsstarken und massereduzierten Onshore-Rotors	FKZ 0325671
---	---	--

2.3 Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes

Entsprechend der geplanten Verwertung wird das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Rotorblatt für die WEA vom Typ N131 eingesetzt. Weiterhin war im Verwertungsplan eine Erweiterung des Rotorblattes um eine Anti-Icing-Variante geplant – diese Erweiterung fand außerhalb des geförderten Projektes statt.

2.4 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Andere Hersteller haben in 2015 Windenergieanlagen mit höherer Nennleistung und größerem Rotordurchmesser angekündigt.

Dazu gehören:

Enercon: Rotordurchmesser: 141m; Nennleistung: 4,2MW; Serienfertigung: 2018

Senvion: Rotordurchmesser: 140m; Nennleistung: 3,4MW; Serienfertigung: 2017

GE: Rotordurchmesser: 137m; Nennleistung: 3,4MW

Vestas: Rotordurchmesser: 136m; Nennleistung: 3,45MW

Einzig Vestas setzt Carbonfasern für das Gurtdesign ein. Vestas verwendet für ihre neuesten Rotorblätter Carbon-Pultrusionsprofile. Bei Nordex wurde der Einsatz des Halbzeugs innerhalb dieses Projektes konzeptionell betrachtet. Eine Umsetzung in ein Produkt ist möglich, erfordert jedoch weitere Auslegungsarbeiten und Verarbeitungsversuche.

2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Von der Entwicklung des Rotorblattes bzw. der WEA N131 wurde auf folgenden Konferenzen berichtet:

- Blade Manufacturers Conference, 01.12.2015, Düsseldorf; "NR65.5 - A new large onshore rotor blade"
- Advances in Rotor Blades for Wind Turbines, 24.-26.02.2015, Bremen; "NR65.5: Challenges in design, production and logistics"