

# Von Holz zu Kohlefaser, von Kilowatt zu Multi-Megawatt - Wohin geht die Windenergie-Rotorblatttechnik?

From Wood to Carbon Fibre, from Kilowatt to Multi-Megawatt - Where Wind Energy Rotor Blade Technology Going to?

H. Seifert, Forschungs- und Koordinierungsstelle Windenergie (fk-wind), Hochschule Bremerhaven



## Summary

At the end of the year 2004 about 48 GW wind power were installed world wide. At this moment alone 16.000 wind turbines fed renewable energy into the German grid. The rotor diameter of about 90 per cent of all in the year 2004 installed turbines was larger than 60 m. These serial produced wind turbines feature a common technology, namely three blades, an upwind running pitch controlled rotor, and variable speed. Today, prototypes with hub heights of more than 120 m, rotor diameters of up to 126 m and an installed power of up to 6 MW are under test operation on-shore, however, being designed for the upcoming off-shore wind farms. The growing dimensions of the rotor blades make high demands especially on the design of the material and the life-time. Generally seen, there is a common requirement for the future application of off-shore wind turbines: to lower the costs while increasing ecological and structural quality.

Ende 2004 waren weltweit 48 GW Windleistung installiert. Zu diesem Zeitpunkt speisten allein in Deutschland rund 16.000 Windenergieanlagen (WEA) Energie in das Netz, wobei 90% aller im Jahr 2004 aufgestellten Anlagen Rotordurchmesser größer 60 m aufwiesen. Diese Serienanlagen haben als gemeinsame Technik dreiblättrige, luv-laufende, pitchgeregelte Rotoren mit variablem Drehzahlbetrieb. Heute befinden sich Anlagen mit Nabenhöhen über 120 m, Rotordurchmessern bis 126 m, installierter Leistung bis 6 MW in der Erprobung, noch an Land aber schon für den zukünftigen Offshore-Betrieb ausgelegt. Die zunehmende Größe der Rotoren stellt an die konstruktive Auslegung und besonders an die Materialien und die Betriebsfestigkeit hohe Anforderungen. Diese resultieren aus den durch die großen Massen bedingten Lasten aber auch durch sogenannte Funktionslasten, zum Beispiel während eines Notabschaltens, wenn das Rotorblatt schnell in Richtung Fahnenposition gestellt wird. Für die großen Rotordurchmesser und die großen Blatttiefen sind die kleinräumigen Turbulenzen sicherlich nicht so schädigend wie Windgradienten von mehreren m/s über eine Höhe von 100 Metern und mehr. Wenn das einzelne Rotorblatt während seines Lebens mehrere Millionen mal senkrecht durch das Gravitationsfeld rotiert, bekommt das deterministische Schwenkbiegemoment ein besonderes „Gewicht“. Diese Sinuslast mit hoher Schwingweite kann nur durch konsequente Massenreduktion minimiert werden. Damit senkrecht dazu, aus der Rotorebene heraus, die stochastischen Betriebslasten das Rotorblatt nicht zu nah an den Turm biegen, ist auch eine sehr hohe Steifigkeit des Blattes gefragt. Beide prinzipiellen Anforderungen, gepaart mit einer hohen Lebensdauererwartung, stellen eine sehr hohe Herausforderung an die künftige Offshore-Generation von Rotorblättern dar.

Für die Technik dieser Windenergieanlagen in diesen Dimensionen gilt es weiterhin, die Simulationsprogramme, die Testverfahren und die Zertifizierungsmethoden zu verbessern, um sichere Konstruktionen bei hoher Wirtschaftlichkeit zu garantieren. Dazu gehören genauere Kenntnisse der Materialeigenschaften und Verbesserungen der Herstellungsmethoden, wie auch die Reproduzierbarkeit der Kennwerte der Rotorblattmaterialien, die ja erst bei der Formlegung der Blätter als Composite entstehen. Beides kann die Mengen eingesetzter Materialien reduzieren und so die ökologische und ökonomische Qualität verbessern. Neue Materialien,

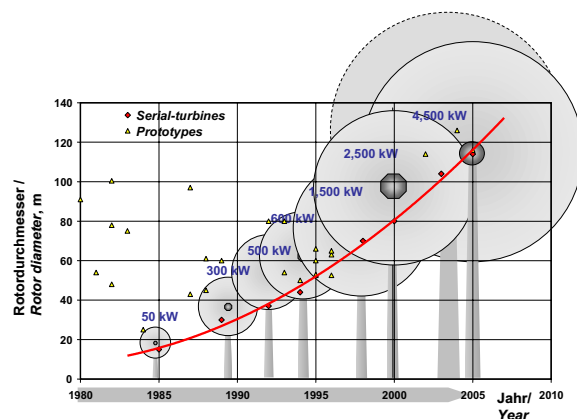


Abb. 1: Größenwachstum der Prototypen und der Serien WEA in den letzten 25 Jahren.

Fig. 1: The growing sizes of prototypes and serial produced wind turbines over the past 25 years.

insbesondere Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen, müssen verstärkt in die Windenergie eingebracht werden, um spätere Entsorgungswege umweltfreundlicher zu gestalten. Bei den großen und schlanken Rotorblättern ist die Strukturdynamik ein wesentlicher Auslegungspunkt, den es genau zu kennen gilt. Die Eigenfrequenzen müssen gerade bei WEA mit variabler Drehzahl genau bekannt sein, um Resonanzstellen zu meiden. Die Aerodynamik der Profile, die Blatttiefenverteilung, die Verwindungsverteilung und die Gestaltung der Blattspitze sollen die Leistung steigern und das Geräusch reduzieren. Erfolge hinsichtlich Leistung und Geräusch sind sicht- und messbar, im Bereich Schmutz- und Regenempfindlichkeit, Erosion, Eisansatz sowie Rauigkeiten durch Insekten besteht noch einiger F&E - Bedarf. Intelligente Regelungen und Betriebsführungen können helfen, Lasten zu reduzieren und die entsprechenden Bauteile in Folge zu optimieren. Lernfähige Regelungen, die sich externen Bedingungen automatisch anpassen, zyklische Blattregelungen, die Windparkeffekte und Windgradienten Last gesteuert ausgleichen, Sensoren und Monitoring Systeme, die dies alles zuverlässig ermitteln und dokumentieren und gegebenenfalls Alarm schlagen, seien hier als Beispiel genannt.

Das Größenwachstum und die damit verbundenen Fertigungsmethoden stellen besondere Anforderungen an die Rotorblattmaterialien. Unter den entsprechenden Dimensionen muss die Formtreue gewahrt bleiben, übermäßige Schrumpfeffekte und Welligkeiten können aus aerodynamischen Gründen nicht akzeptiert werden. Dicke Endkanten und frühe Ablösungen der Grenzschicht führen zu erhöhtem Geräusch und verminderter Leistung. Weitere Anforderungen an die verwendeten Materialien sind hohe Festigkeiten bei ausreichenden Steifigkeiten, kombiniert mit geringer Dichte für reduzierte Massenkräfte und gepaart mit einer langen Lebensdauer. Üblicherweise sind dies Forderungen für Werkstoffe, wie sie in der Luftfahrt Verwendung finden, allerdings dort zu einem um Größenordnungen höherem Preis. Zusätzliche Anforderungen an die WEA - Rotorblattmaterialien ergeben sich aus dem Betrieb unter teilweise extremen externen Bedingungen bei langen Inspektionsintervallen, während derer kaum in die Struktur „hineingesehen“ werden kann, da sich diese auf visuelle Untersuchungen durch mehr oder weniger qualifizierte Gutachter beschränken werden. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, die Struktur nach dem „safe life“ Prinzip auszulegen.

Die externen Bedingungen sind in den einschlägigen nationalen und internationalen Richtlinien und Nor-

men definiert. Neben den eigentlichen Beschreibungen der Windbedingungen, wie zum Beispiel Maximalwindgeschwindigkeiten, Windrichtungsänderungen, Windprofile, sind dies Temperaturen, Feuchte, chemisch und mechanisch aktive Partikel, Regen, Hagel, Schnee und Eis. Genauere Spezifikationen für die zuletzt genannten Bedingungen bleiben die Auslegungsrichtlinien aber schuldig; sie sind aber ausschlaggebende Parameter für die Auslegung der Konstruktionen. Der Salzgehalt der Luft kann beispielsweise für Korrosion und - speziell an der Profilverdickung des Rotorblattes - Erosion beim zukünftigen Off-shore-Einsatz eine wesentliche Rolle spielen.

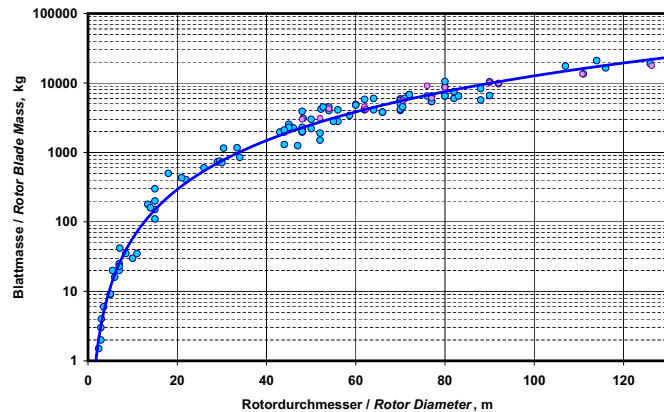


Abb. 2: Rotorblattmassen heutiger Serien-Windenergieanlagen.

Fig. 2: Rotor blade masses of today's wind turbines

Die hohen Festigkeitsanforderungen an die Materialien ergeben sich aus der Aerodynamik, die möglichst dünne Rotorblattprofile fordert. Die damit verbundenen geringen Bauhöhen erzeugen in der Struktur hohe Materialspannungen. Um die Durchbiegungen der Rotorblätter zu begrenzen - eine große Durchbiegung würde beispielsweise einen großen Abstand der Rotorblattebene vom Turm bedeuten - muss die Struktur ausreichende Steifigkeiten besitzen, oder das Blatt muss mit „Vorbiegung“ gefertigt werden. Bei vorgegebener Profildicke muss mehr Material verbaut werden, oder ein höhermoduligeres Material. Mehr Material bedeutet mehr Masse, die im Gravitationsfeld rotiert und hohe Wechsellasten produziert. Hochmodulige Werkstoffe, wie Carbonfaser verstärkte Kunststoffe (CFK) sind sehr teuer, z. Zt. in ausreichenden Mengen auf dem Weltmarkt nicht ohne weiteres zu erhalten und fordern eine spezielle Anforderung an die Fertigungsqualität.

Die größte Herausforderung an die Werkstoffe im Rotorblattbau ist die geforderte Lebensdauer von 20 Jahren. Für die größer werdenden Blätter dominiert das deterministische Schwenkbiegemoment, das wesentlich durch die Masse des Rotorblattes gebildet wird. Ziel der Auslegung ist es daher, das Moment durch die Masse mal Abstand des Blattschwerpunkts möglichst gering zu halten, was wiederum ein Herantasten an die Materialgrenzen erfordert. Dies geht aber nur, wenn die statischen und dynamischen Materialkennwerte genau bekannt sind und in der Fertigung auch genau genug eingehalten bzw. erzeugt werden können. Auch die auftretenden Lasten müssen möglichst genau bekannt sein, um „Überraschungen“ durch unerwartet auftretende Beanspruchungen auszuschließen.

Diese Zusammenhänge bestimmen u.a. den zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die Konstruktion, den Festigkeitsnachweis, die Testverfahren und die Betriebsanalyse der großen Rotorblätter. Einen ersten Punkt stellt die Validierung der Lastannahmen dar. Sind die Lastannahmen genau genug bekannt, so können durch Simulation und entsprechende Tests unter Verwendung bekannter Materialkennwerte die statische Festigkeit und die Betriebsfestigkeit sicher ermittelt werden. Zu Lastannahmen und Materialberechnung gehören die Weiterentwicklung und das „Benchmarking“ von Simulationsprogrammen. Als Beispiele seien hier die folgenden Untersuchungen genannt:

- Aufnahme von Feuchte in den Laminaten. Die Rotorblätter drehen in wechselnder Temperatur und Luftfeuchte. Insbesondere die innere, nicht durch Lackierung geschützte aber durchlüftete Oberfläche kann Feuchtigkeit in das tragende Laminat einbringen. Feuchteaufnahme kann die Ermüdungsfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen reduzieren. Feuchtezyklen und die daraus im Betrieb resultierende Feuchteaufnahme und -abgabe können simuliert werden, wenn die äußeren Bedingungen bekannt sind.
- Die zukünftig gebauten großen Rotorblätter werden aus sehr dicken Composite - Laminaten bestehen. Herstellungsmethoden, Berechnungsmethoden und Testverfahren für diese dicken Laminat müssen entwickelt und validiert werden.
- Klebeverbindungen dieser „Großbauteile“ sind von bisher nicht bekannten Dimensionen und bedürfen entsprechender Untersuchungen. Fugenabstand, Materialkombinationen von Kleber und Füllstoffen und die entsprechenden Klebmethoden unter Vermeidung von kritischen Fehlstellen bei der Blindverklebung müssen berechenbar und im Fertigungsprozess einfach überprüfbar gestaltet werden.

- Forschungsbedarf besteht in der Berechnung der Lebensdauer neuer Materialkombinationen und Fertigungsmethoden. Tests von Materialien und Komponenten müssen die theoretischen Annahmen validieren. Zur Qualifizierung von Rotorblattmaterialien und Materialkombinationen, wie zum Beispiel Sandwichmaterial, UD-Gelege, Blattanschlüsse müssen die entsprechenden Testverfahren entwickelt, verifiziert und standardisiert werden. Dazu gehören auch das Testen der oben genannten dicken Lamine und der Verklebungen großer Composite-Bauteile.
- Einen wesentlichen Anteil an möglichen Unsicherheiten in der Produktion von Faserverbundwerkstoffen hat die Beschichtung der einzelnen Fasern, die für die Haftung zwischen Faser und Matrix verantwortlich ist, die sogenannte Schlichte. Änderungen ihrer Zusammensetzung oder ungleiches Aufbringen kann die Materialkennwerte, auch in der laufenden Produktion, beeinflussen. Eine standardisierte Qualitätsüberwachung und vereinheitlichte Prüfverfahren in den Betrieben sind hier gefordert.
- Optimierung von Testverfahren zur Validierung der Lastannahmen und Simulationen für statische und dynamische Tests ganzer Blätter, Komponenten und Kombinationsverfahren daraus müssen an die neuen Dimensionen angepasst werden. Erste Untersuchungen lassen vermuten, dass gerade die sogenannten „full-scale“ Fatiguetests, wie sie in der technischen Richtlinie der IEC 61400-23 [4] beschrieben werden, ein eindeutiges Testergebnis nicht mehr unbedingt zulassen. Hier müssen andere und ergänzende Verfahren entwickelt und validiert werden. Virtuelles Testen und sogenannte Stellvertretertests seien hier genannt. Die Voraussetzungen für die Möglichkeiten, sich auf einen Stellvertreterversuch zu beziehen, liegen zum Beispiel dann vor, wenn die verglichenen Strukturen für die verwendeten Werkstoffe, Geometrien, Fertigungsverfahren bei gleicher Bauweise einander ähnlich sind, und ein entsprechender „Erfahrungs-Pool“ vorliegt. Dieser Erfahrungs-Pool kann aus Literatur und Forschungsergebnissen, Normen und Richtlinien, Datenbanken über Materialkennwerte, Ergebnissen durchgeführter statischer oder dynamischer „Full Scale Tests“ und durchgeführter statischer oder dynamischer Komponententests, aus Beanspruchungsmessungen im Betrieb, aus positiven Betriebserfahrungen und Schadensanalysen bestehen. Dabei müssen die entsprechenden Erfahrungen nicht nur auf dem Gebiet der Windenergie gewonnen worden sein, sondern könnte auch aus „benachbarten“ Ingenieurwissenschaften, wie z.B. dem Luffahrtbereich stammen.

Dass die Rotorblätter der zukünftigen Generationen von Multimegawatt-WEA aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt werden, steht außer Frage. Mit zunehmender Größe muss aber auch eine zunehmende

de Automatisierung der Fertigung dieser Composite - Bauweise einhergehen, um die Kosten zu senken und die Fertigungsqualität „reproduzierbarer“ zu gestalten. Dazu gehören auch eine entsprechende Überwachung der Fertigung und Stichproben zur Überprüfung der Materialeigenschaften. Vakuum - Infusionsverfahren, bei dem trockene und damit leichte Laminare exakt und verzugsfrei in die Formen gelegt werden und - nach dem Abdecken - das Harz per Vakuumpumpe zwischen die Gelege gesaugt wird, werden bereits im großen Maßstab in der Produktion eingesetzt. Ebenso können zukünftig Wickel- oder Tapeablegeverfahren eingesetzt werden, bei denen die vorgetränkten Fasern auf oder in die entsprechenden Formen computergesteuert abgelegt werden. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Verwendung von kalt- oder warm härtenden Prepregs, dies sind maschinell vorgetränkte Faserverbunde, die - kalt gelagert - unter Raumtemperatur aushärten, oder - unter Raumtemperatur gelagert - durch Wärmezufuhr aushärten. Auch hier, wie bei den meisten maschinellen Verfahren, werden ein vorgegebener Faservolumengehalt und damit die angestrebten Materialkennwerte genau eingehalten.

Die heute üblichen mehrteiligen Schalen, in Negativbauweise hergestellt, werden nach Aushärten blind verklebt. Genaues, Klebespalt abhängiges Dosieren der Klebermenge führt zu Gewichtsersparnis, erhöht aber das Risiko von Fehlstellen. Weiterhin muss das Wegtropfen während des Zusammenfügens der Einzelnen Schalteile verhindert werden. Eine Kontrolle der ausgeführten Verklebung - zum Beispiel mit Hilfe von Thermographieverfahren - kann hier helfen.

„Smart structures and materials“, so genannte, an die Anforderungen angepassten Materialien, und „intelligente“ Strukturen, die beispielsweise durch gezielte Verformungen Lasten abbauen können (aeroelastic tailoring), wären zukünftig in der Lage, Lastspitzen im Entstehen zu entschärfen. Faserverbunde sind per se schon schadenstolerant. Die Definition von schadenstoleranten Konstruktionen nennt die *Fähigkeit einer fehlerbehafteten Struktur, die zu erwartenden Belastungen zu ertragen, bis die Fehler durch eine geplante Inspektion oder einen nicht sicherheitsgefährlichen Funktionsausfall entdeckt und repariert werden kann*. Solche Konstruktionen sind für den Offshore-Einsatz prädestiniert, da die Wartungs-, Inspektions- und Reparatursätze durch die spezielle Situation und begrenzte Zugänglichkeit einen schnellen Einsatz nicht immer erlaubt. Der Einsatz der Rotorblätter in extremen externen Bedingungen erfordert auch besondere Beschichtungen. Sie sollten Schmutz- und Eis abweisen, UV-Strahlung, die dem Harz in der tragenden Struktur schaden kann, abweisen und widerstandsfähig gegen Erosion sein, aber auch elastisch genug, um die großen Dehnungen zum Beispiel an der Blatthinterkante während der Lebensdauer des Blattes auszuhalten.

Repowering ist gerade im Gespräch, die ersten „alten“ Serienanlagen werden zurückgebaut. Was geschieht mit den Abbruchmaterialien? Die Mengen an Blattmaterialien, die momentan verbaut werden, fallen in 20 Jahren als „Composite-Schrott“ an. Wege zur umweltgerechten Verwertung müssen aufgezeigt werden. Dazu gehört auch das Forschen nach Ersatzwerkstoffen für zum Beispiel Polyester- und Epoxidharze, Glas- und Kohlefasern, Sandwich - Schäume oder deren Ersetzung durch nachwachsende Rohstoffe wie z.B. Naturfasern, PU - Schäume, Holz.

Die Höhereskalierung der Rotorblätter und der Off-shore Betrieb ergeben neue höhere Lasten, große Rotorblätter erfordern Massenoptimierung, Massenoptimierung erfordert genaue Lastannahmen, besser bekannte Materialeigenschaften und genaue Simulationsverfahren. Genaue Lastannahmen sind durch exemplarische Messungen, neue Strukturen und Materialkombinationen sind durch geeignete Prüfmethoden zu verifizieren. Gemeinsame, vorwettbewerbliche Forschungsprojekte mit der Industrie sind durchzuführen, Normen und Richtlinien sind den neuen Anforderungen anzupassen. Pilotprojekte müssen messtechnisch betreut werden, um die Ergebnisse mit den Annahmen vergleichen zu können. Allen Optimierungsmaßnahmen ist ein Ziel gemein: Kostensenkung bei steigender ökologischer und struktureller Qualität.

- [1] Windenergienutzung in Deutschland - Stand 30.06.2004, DEWI - Magazin Nr. 26; Februar 2005; 14. Jahrgang 2004, ISSN 0946-1787
- [2] Kensche, Christoph W.; Seifert, Henry; Untersuchungen zum Feuchteinfluss auf Rotorblattmaterialien. - DEWEK '94: 2. Deutsche Windenergie-Konferenz, 22. bis 24. Juni 1994; Wilhelmshaven: DEWI, 1994. - S. 99-103
- [3] Henry Seifert; Von Holz zu Kohlefaser, von Kilowatt zu Multi-Megawatt; Wohin geht die Windenergie-Rotorblatttechnik?; 7th Austrian Wind Energy Symposium, St. Pölten, Österreich, 20./21. Oktober 2005
- [4] IEC 61400-23 „Wind turbine generator systems - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades“; International Electrotechnical Commission; 4/2001