



Faserbasierte Werkstoffe

Von der Herstellungssimulation zu Aussagen der Gebrauchstauglichkeit

www.lightweight-design.de

5
-
1

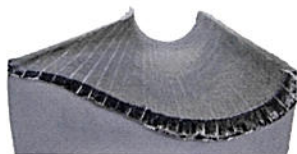
lightweightdesign

DIE FACHZEITSCHRIFT FÜR DEN LEICHTBAU BEWEGTER MASSEN



Vorhersage

Simulation in der
Kunststofffertigung



Automatisiert

Innovationen in der
Handhabungs- und
Textiltechnik zur
Rotorblattfertigung



Innovatives Konzept

Entwicklung eines
intelligenten Flügels für
ein Gezeitenkraftwerk

Innovatives Konzept

Entwicklung eines „intelligenten“ Flügels für ein Gezeitenkraftwerk

Während Windkraftwerke alltäglich sind, steckt die dezentrale Nutzung von Gezeitenströmen bisher noch in den Kinderschuhen. Viele der bisher entwickelten und gefertigten Rotoren für Gezeitenkraftwerke haben analog der Windkraft eine aktive Blattverstellung mit entsprechend aufwendigem Antrieb und Lagerung. Das von der Firma Schottel GmbH in Spay entworfene innovative Konzept beinhaltet die Anforderung, dass der Rotor ohne Pitchantrieb auskommen muss und die Blatterverstellung passiv durch ein „intelligentes“ Faserverbundbauteil dargestellt wird.

Auch bei einem Gezeitenkraftwerk mit 1 MW Leistung lässt sich mit Leichtbau viel erreichen. Mit geschickter Nutzung der Physik und innovativer Faserverbundtechnik ergibt sich ein Einsparungspotenzial von bis zu 160 t pro MW Leistung. Während Windkraftwerke mittlerweile als völlig normaler Bestandteil des Alltags wahrgenommen werden, steckt die dezentrale Nut-

zung von Gezeitenströmen bisher noch in den Kinderschuhen. Viele der bisher entwickelten und gefertigten Rotoren für Gezeitenkraftwerke haben analog der Windkraft eine aktive Blattverstellung mit entsprechend aufwendigem Antrieb und Lagerung. Das von der Firma Schottel GmbH in Spay entworfene Konzept beinhaltet die Anforderung, dass der Rotor ohne Pitchantrieb au-



»Grundlage für unsere Auswahl des Entwicklungslieferanten für das Rotorblatt war eine Kompetenz aus einer Hand: Consulting, Konzeption, Simulation, Berechnung, Formen- und Prototypenbau, Zertifizierung und Serienfertigung.«

Dipl.-Ing. Niels A. Lange ist Assistent der Geschäftsführung der Josef Becker Forschungszentrum GmbH (Schottel Gruppe) in Spay.



kommen muss und die Blatterverstellung passiv durch ein „intelligentes“ Faserverbundbauteil erreicht wird. Damit können sich bei Anströmgeschwindigkeiten über dem Nennbetriebspunkt im Vergleich zu Anlagen mit aktiver Blattverstellung deutlich höhere Lasten für die Struktur ergeben. Tabelle 1 zeigt die technischen Daten.

TABELLE 1 Technische Daten der Turbine

Bauart	Horizontalachsturbine 3 Flügel variable Drehzahl
Rotordurchmesser	D_{Rotor} 4,0 m
Nennleistung	P 50 kW
Strömungsgeschwindigkeit nominal	v_{nominal} 2,7 m/s
Strömungsgeschwindigkeit maximal	v_{max} 5 m/s

Aufgrund des Konzepts des „intelligenten“ Bauteils, das über Verformung die Lasten reduziert, sind die Lasten eine Funktion der Anström- und Betriebsbedingungen sowie der Verformung des Rotorblatts. Dies galt es schon bei der Auslegung und Simulation des Blatts zu berücksichtigen.

Die praktische Umsetzung mit dem extrem umfangreichen Anforderungsprofil erforderte einen breiten Mix an Verfahrens- und Methodenkompetenz, sowohl in der Auslegung und Berechnung als auch in der Fertigung.

Das hydrodynamische Design des Flügels wurde von der Firma Schottel zur Verfügung gestellt. Des Weiteren gab es ein sehr umfangreiches Lastenheft, unter anderem mit folgenden einzelnen Frage- und Aufgabenstellungen:

- Anbindung an die Nabe
- Oberflächenschutz
- Kavitation
- Entwicklung einer lastadaptiven Struktur: Berücksichtigung der Fluid-/Struktur Kopplung in der Auslegung
- statische Berechnungen, Steifigkeit und Absicherung bezüglich der Festigkeit
- Bauverfahrensentwicklung

- Laminatpläne
- Preformentwicklung
- Formenkonzept
- Tränkkonzept
- Fräskonzept
- Sensorik
- Fertigung Prototypen und Vorserie
- Tests und Auswertung
- Serienfertigung.

Die Rotorblätter wurden gemäß den Vorgaben des Lastenhefts entwickelt. Die gesamte Anlage wurde im Anschluss anhand von Fahrversuchen an einem Schlepper mit Anlage in der freien Anströmung erprobt, Bild 1.

ANBINDUNG AN DIE NABE

Grundlegend wurde zuerst in der Entwicklung die Flügelanbindung betrachtet und die Schnittstelle mit dem Kunden definiert. Bei den ersten Berechnungen und detaillierten Betrachtungen stellten sich schon wesentlich höhere Lasten heraus als in der Konzeptstudie angenommen. Sehr früh zeichnete es sich ab, dass man eine sichere Anbindung nur mit einer Preformtechnik lösen kann. Da die Avantgarde Technologie zu den Pionieren der TFP- Technologie (Tailored Fibre Placement) gehört, konnte hier sehr schnell ein tragfähiger Lösungsansatz gefunden werden. Die Anbindung wurde dann als sogenannte „IKEA-Ver-schraubung“ ausgeführt. 30 Stehbolzen, die mit Querbolzen im Flügel-fluß verankert sind, verbinden den Flügel mit der Nabe.

OBERFLÄCHENSCHUTZ

Durch den dauerhaften Betrieb in einem druckbeaufschlagten, salzhaltigen Medium kommt dem Oberflächenschutz eine entscheidende Bedeutung zu. Das Thema Abrasion und der Oberflächenschutz des Faserverbundbauteils wurden in der Herstellung über In-mould-Verfahren adressiert, um formfallende, glatte Oberflächen zu generieren. Ein klarer Vorteil ist hier die detailgetreue Umsetzung der Designdaten des Blatts. Hier wurden in der Entwicklungsphase verschiedenste Systeme auf EP- und PU-Basis erprobt.

KAVITATION

In der Konstruktion und in der Fertigung des Blatts wurde der Einfluss der Kavitation berücksichtigt. Hier wurden schon im Vorfeld mehrere Lösungsansätze generiert, falls bei den Tests das Thema Kavitation eine übergeordnete Rolle spielt. Im Wesentlichen wurden zwei Stoßrichtungen verfolgt: Zum einen, durch gezielte Gestaltung der Geometrie die Kavitationsneigung zu reduzieren, zum anderen durch Verwendung von kavitationsresistenteren Oberflächensystemen die Schädigung zu vermeiden.

ENTWICKLUNG EINER LASTADAPTIVEN STRUKTUR

Zentrales Designmerkmal des Rotors sind die lastadaptiven Blätter. Diese sollen bei Überlast durch gezielte Verformung die Schubkräfte auf die Anlage und die Struktur begrenzen, ohne jedoch die Energie-



BILD 1 Hafenschlepper mit der hochgeschwenkten Versuchsanordnung der Gesamtturbine



BILD 2 Unbearbeiteter Flügel mit einem Gewicht von circa 27,5 kg, im Hintergrund sind die Negativformen aus Toolingmaterial zu sehen

ausbeute signifikant zu reduzieren. Um im Rahmen des Entwurfsprozesses eine verlässliche Aussage über Beanspruchung der Struktur und Effizienz des Rotors zu erzielen, ist es erforderlich, eine gekoppelte Strömungs- und Strukturberechnung durchzuführen. Hier wurde zur Berechnung der Strömungsmechanik und der Lasten auf die Struktur auf einen Blade Element Code zurückgegriffen. Die Berechnung der Struktur erfolgte über ein Finite-Elemente-Modell mit frei parametrierbaren Materialeigenschaften.

Zur Berechnung eines Betriebspunkts (Schub, Drehmoment beziehungsweise Spannung im Faserverbund) erfolgte in folgenden Schritten:

- Vorgabe von Anströmgeschwindigkeit und Drehzahl, Vorgabe der unverformten Struktur
- Berechnung der lokalen Lasten auf das Rotorblatt mittels Blade Element Code (BEM)
- Übertrag der lokalen Lasten in das Finite-Elemente-Modell (FEM)
- Berechnung der Verformungen und Spannungen via FEM
- Übertrag der relaxierten Verformungen (Auslenkung, Anstellwinkel) in das BEM-Modell
- keine Konvergenz (Kriterium: Verformung) erreicht? Weiter mit Schritt 2
- Konvergenz: Ausgabe von Performancedaten und Spannungen. In aller Regel war nach fünf bis sieben Iterationsschritten Konvergenz für einen Betriebspunkt erreicht. Dieses Berechnungsverfahren wurde benutzt um für den gesamten Betriebsbereich die Performance zu beurteilen. Über den parametrischen FE-Modellaufbau konnten

zudem eine Vielzahl von Laminatvarianten in kurzer Zeit durchgerechnet und beurteilt werden.

STATISCHE BERECHNUNGEN, STEIFIGKEIT UND ABSICHERUNG DER FESTIGKEIT

Für den hydrodynamisch wirksamen Teil des Rotors ist nicht die Festigkeit dimensionierend für den Laminataufbau, sondern die gewünschte Steifigkeit das entscheidende Auslegungskriterium. Die auftretenden Dehnungen liegen eine Größenordnung unter den Bruchdehnungen des Materials.

Für die Anbindung an die Nabe gilt das jedoch nicht. Aufgrund der hohen Dichte des Wassers (in Relation zu Luft bei Windkraftanlagen) treten trotz geringerer Anströmgeschwindigkeiten große Momente an der Flügelwurzel auf. Um diese Kräfte sicher in die Nabe einleiten zu können wurde die oben erwähnte „IKEA“-Verschraubung gewählt. Diese wurde mit einem detaillierterem FE-Modell unter Annahme entsprechend großer Sicherheitsfaktoren abgesichert.

BAUVERFAHRENTWICKLUNG

Entscheidend für den Erfolg des Projekts war, dass hier von den ersten Überlegungen die Konstruktion und Entwicklung mit der Fertigung sehr eng kooperiert haben. Somit war bei der letztlichen Erstellung der Laminatpläne bereits die Machbarkeit für den Serienprozess gegeben. Für die Fertigung der Prototypen und der Vorserie wurde die Membrantechnologie des VAP-Verfahrens gewählt. Die spezifischen Vorteile des Verfahrens kamen aufgrund der sehr unterschiedlichen Wandstärken von 3 mm bis zu 28 mm voll zum Tragen. Für eine größere Stückzahl, über 300 Stück/Jahr, wurde auch ein weiterentwickeltes Membranverfahren entwickelt.

LAMINATPLÄNE

Die hohen Lasten und die „Intelligenz“ des Bauteils sowie die Notwendigkeit eines Stringers spiegeln sich in einem etwas aufwändigeren Laminatplan wieder. Dieser wurde durch mehrere Optimierungsschleifen vereinfacht. Der Laminataufbau besteht aus einer Mischstruktur aus Glasfaser und Kohlefaser. Als Matrixsystem wurde Proset infusion 117 eingesetzt.

Da sich die Kooperationspartner Avantgarde Technologie und Hightex schon seit mehr als 15 Jahren mit Preformtechnik befassen, konnte schnell ein tragfähiges Konzept umgesetzt werden. Die hohen Zugkräfte an den Querbolzen werden mit Schlaufenpreforms aufgefangen und flächig in den Flügel eingeleitet. Die Druckkräfte und Lastwechsel an den Querbolzen sind durch harte UD-Preforms an der Nabe abgestützt.

FORMENKONZEPT

Die Prototypenformen wurden klassisch zweiteilig negativ aus Toolingmaterial gefräst. Hierfür wurde OBO modular 1200 eingesetzt, das sich durch eine gute Wärmeformbeständigkeit auszeichnet und sehr gut polieren lässt. Durch den Einsatz von VAP waren formenseitig keine Adaptionen notwendig. Für den Serieneinsatz würde man beheizte Aluminiumwerkzeuge einsetzen, Bild 2.

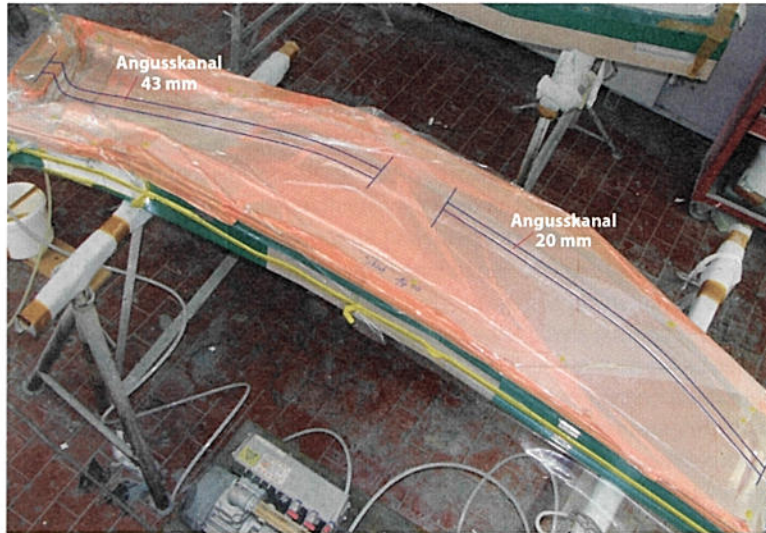


BILD 3 Tränkungsanlage

TRÄNKKONZEPT

Beim Tränkkonzept fiel die Entscheidung wegen der sehr hohen Dickenunterschiede des Laminats auf einen zweiseitigen Anguss mit unterschiedlichem Harzmengenfluss. Die Injektion erfolgte einmal mit einem höheren Volumenstrom von der Wurzel und von der Spitze des Blatts mit einer geringeren Harzmenge. Durch Veränderung der Angusslängen im Bauteil wurde das Konzept schrittweise verbessert. Die Anlage zeigt Bild 3.

FRÄSKONZEPT

Für die Fräsbearbeitung wurden die Negativformen als Fräsaufnahme benutzt. Die aufstehende Planfläche, die Innenpassung und die Bohrungen für die Stehbolzen wurden in einer Aufspannung CNC bearbeitet. Für die Querbolzen wurde eine Bohrlehre entwickelt die zur Kosteneinsparung bei der Nachbearbeitung beiträgt, da man nicht zusätzlich auf einer großen Rundtischmaschine arbeiten muss.



»Die größte Herausforderung im Entwicklungsprozess war die Berücksichtigung des Ziels, schon bei der Auslegung und Berechnung ein wirtschaftlich tragfähiges Serienbauverfahren zu erreichen.«

Wulfam J. Schmucker ist Bootsbaumeister und Geschäftsführender Gesellschafter der Avantgarde Technologie GmbH in Gilching.

SENSORIK

Um die komplexen Zusammenhänge auch überprüfen zu können wurde eine aufwendige Sensorik installiert. An besonders belastete Stellen des Flügels wurden optische Dehnmessstreifen in verschiedenen Messrichtungen angebracht. Dadurch konnten die Verformungen im Betrieb mit den Vorhersagen verglichen werden. Darüber hinaus wurde auch eine weitergehende dynamische Betrachtung ermöglicht. Die Messwerte der drei Flügel wurden mit einer Datenrecorder an der rotierenden Nabe aufgezeichnet und im Anschluss an die Versuche ausgewertet.

FERTIGUNG PROTOTYPEN UND VORSERIE

Während der Fertigung der Prototypen und Vorserie wurde natürlich laufend an prozessrelevanten Verbesserungen gearbeitet. Auch wurde schon parallel in die Vorbereitungen für den Zertifizierungsprozess investiert. Die größte Herausforderung war in diesem Themenkomplex die Integration des Stringers, da dieser entscheidend an der Manipulation des Flügels beteiligt ist. Die Hauptschritte in der Fertigung sind:

- Fertigung der beiden Flügelhälften
- Fertigung des Stringers
- Fertigung der Preforms
- Assembling
- Verkleben des Flügels
- Ausschäumen des Flügels
- Endbearbeitung/Kontrolle.

Das beschriebene Entwicklungs- und Fertigungsspektrum war nach sechs Monaten abgearbeitet, und die Zielvorgaben wurden nach den Tests bestätigt.

AUSWERTUNG TESTS

Um erste reale Bewertungen des neuen Konzepts zu bekommen wurde die Turbine vor einen Schlepper montiert. Die Versuchsanordnung zeigt Bild 1.

Bild 4 zeigt als Nachweis für die Wirksamkeit der adaptiven Rotorblätter die Schubkräfte auf die Nabe als Funktion der Anströmgeschwindigkeit für alle Messpunkte (mit unterschiedlichen Schnel-

WIRTSCHAFTLICHE NUTZUNG VON TIDENERGIE

2010 wurde das Josef Becker Forschungszentrum, benannt nach dem Gründer von Schottel und dem Erfinder des Ruderpropellers, mit dem Ziel gegründet, neue Produkte zu entwickeln. Eine der ersten Entwicklungen war der Schottel Tidal Generator (STG 50), eine offene Horizontalachsturbine mit drei Rotorblättern. Alle diese Aktivitäten sind komplementäre Geschäftsfelder zum etablierten Kerngeschäft mit Schiffspropulsionsanlagen.

Gewinnung von Gezeitenströmungen

Gegenwärtig tendieren die meisten Entwickler von Gezeitenturbinen dazu, große Einzelanlagen mit einer Nennleistung von etwa 1 MW zu bauen. Um dies bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2,5 m/s zu erreichen, ist ein Rotordurchmesser von etwa 20 m erforderlich. Gleichzeitig ist für diese Anlagen typischerweise ein „back-to-base“-Wartungskonzept vorgesehen. Im Falle eines Ausfalls einer wesentlichen Komponente müssen die Turbinen aufwendig an die Wasseroberfläche gehoben. Schottels Tidenenergie-Ansatz steht im Kontrast zu diesen einzeln am Meeresboden verankerten 1 MW Anlagen. Das Regelprinzip ist sehr einfach: Bis zum Nennbetriebspunkt wird die entsprechend der jeweiligen Anströmungsgeschwindigkeit optimal zu erzielende Leistung gewonnen. Bei Übergeschwindigkeiten jenseits des Nennbetriebs, die zum Beispiel in Wellen auftreten können, kann die Drehzahl bei konstant gehaltener Leistungsaufnahme frei ansteigen. Passiv-adaptive Rotorblätter verhindern dabei eine zu große Zunahme des Schubs, sodass die Belastung der Turbinen und vor allem ihrer Tragstruktur niedrig gehalten wird.

Die wesentliche Überlegung, die zur Entwicklung kleiner Turbinen geführt hat, beruht auf der Tatsache, dass bei zunehmender Turbinengröße die Turbinenmasse mit der dritten Potenz zunimmt, während die Energieausbeute nur quadratisch ansteigt. Kleinere Turbinen besitzen ein geringeres Leistungsgewicht und entsprechend ein besseres Verhältnis von Leistung zu Kosten als große. Zwanzig STG 50 Turbinen mit einer Gesamtnennleistung von 1 MW wiegen lediglich 16 t. Dies steht einer Masse von 134 bis 180 t pro MW gegenüber, die drei andere Turbinenentwickler für Ihre Anlagen ohne Tragstruktur angeben.

Durch die Anbringung vieler STG 50 Turbinen an einer Tragstruktur kann eine große Gesamtleistung pro Installation erzielt werden. Dies wird durch TidalStream Triton-Plattformen ermöglicht, die eine Mehrzahl von Tidenturbinen tragen können. Diese Plattform ist nur an einer Stelle mit einem Fixpunktdrehgelenk am Meeresboden verankert, sodass sie sich selbständig nach der Tidenströmung ausrichten kann. Durch Leerpumpen der Ballasttanks kann die Triton-Plattform an der Wasseroberfläche aufgeschwommen werden. Dadurch können die Turbinen einfach und sicher gewartet oder sogar am Standort ausgetauscht werden.

Skalierbare Leistung

Die Kombination aus Plattformsystem und einer Vielzahl kostengünstiger Turbinen resultiert in einer äußerst wirtschaftlichen Tidenenergie-Installation. Dies gilt sowohl im Sinne der Investitionskosten als auch der Betriebskosten. Darüber hinaus erlaubt der modulare Ansatz skalierbare Kraftwerksinstallationen. Die Plattform und die Anzahl der Turbinen können auf die jeweiligen Standortbedingungen und auf die Bedürfnisse der Kunden abgestimmt werden.

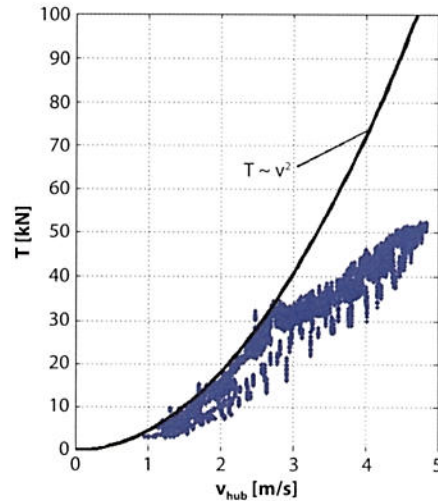
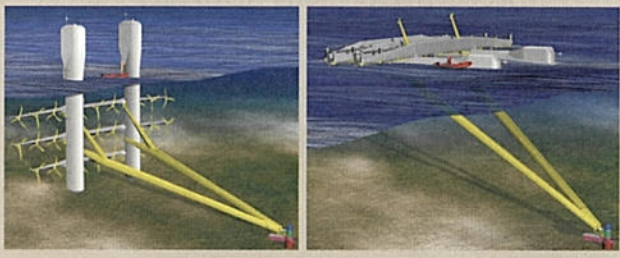


BILD 4 Diagramm zum Nachweis für die Wirksamkeit der adaptiven Rotorblätter

laufzahlen) der Versuchsfahrten (blau). Die für starre Rotorblätter zu erwartende quadratische Abhängigkeit der Maximalkräfte in axialer Richtung von der Anströmungsgeschwindigkeit ist als Vergleichskurve schwarz dargestellt. Schön zu sehen ist die wie beabsichtigt erreichte Reduktion der Schubkräfte für hohe Anströmungsgeschwindigkeiten (ohne Ablösung der Strömung).

Die Turbine wurde auf maximal 5 m/s ausgelegt. Nach Abschluss der Tests wurden die Flügel mit maximaler Geschwindigkeit des Schleppers von 5,5 m/s belastet. Diese Belastung wurde ohne Probleme bewältigt.

Die Entwicklung dieses Gezeitenkraftwerks zeigt, dass durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen ein hoher Kundennutzen zu wirtschaftlichen Bedingungen generiert werden kann. Es zeigt auch, dass im Bereich Faserverbund eine sehr umfangreiche Prozesskette beherrscht werden muss, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Gerade für hochbelastete Bauteile, besonders im Bereich Maschinenbau und Robotik, zeigt dieses Projekt beispielhaft die Möglichkeiten dieses Werkstoffs. Die Firma Schottel ist derzeit sehr aktiv in der Akquise für dieses innovative System, um Standorte und Kunden zu finden.

Die Autoren

DIPL.-ING. NIELS A. LANGE ist Assistent der Geschäftsführung der Josef Becker Forschungszentrum GmbH (Schottel Gruppe) in Spay.

WULFRAM J. SCHMUCKER ist Bootsbaumeister und Geschäftsführender Gesellschafter der Avantgarde Technologie GmbH in Gilching.