

Hocheffiziente adaptive Faserverbund-Rotorblätter

Additiv gefertigte FKV-Formwerkzeuge für FKV-Bauteile von Kleinwindenergieanlagen

Kleinwindenergieanlagen lassen sich aktuell im Binnenland kaum rentabel betreiben. Die Partner EAB Gebäudetechnik Luckau GmbH und das Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der BTU Cottbus-Senftenberg haben dieses Manko nun behoben: Passive Smartblades aus 3D-gedruckten Formwerkzeugen passen sich den Windverhältnissen an. Dies gelingt durch einen intelligenten Lagenaufbau und dessen Biege-Torsions-Kopplung.



Der Anteil erneuerbarer Energien wird kontinuierlich ausgebaut. Der Anstieg der mit der Energiewende verbundenen Kosten wird seit dem Jahr 2000 anteilig über die EEG-Umlage (EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz) finanziert. Etwa ein Drittel der gesamten Umlage tragen dabei private Haushalte und kleine Unternehmen. Dies stellt einen zentralen Beweggrund für viele Privatpersonen dar, sich mit eigenen Kleinwindenergieanlagen (KWEA) anteilig selbst zu versorgen. KWEA erreichen ihre Nennleistung meist erst bei 12 m/s und sind in Küstengebieten rentabel. Im Binnenland werden nur selten ausreichende Windgeschwindigkeiten erreicht.

In einer Höhe von 10 m liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Binnenland größtenteils unter 5 m/s. In Deutschland sind KWEA bis zu dieser Höhe genehmigungsfrei, aber in diesen Regionen nicht rentabel. Den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad haben die Rotorblätter, die bislang zum Großteil für

Stark- und Mittelwindregionen ausgelegt sind. Sie werden von den Herstellern nach Ähnlichkeitsregel in der Größe skaliert.

Der Weg zu rentablen Kleinanlagen im Binnenland

Damit sich KWEA für Privathaushalte auch im Binnenland rentieren, müssen diese für Schwach- und Mittelwindregionen ausgelegt werden. Hierfür haben die EAB Gebäudetechnik Luckau GmbH und das Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg zwei neuartige Ansätze vereint und umgesetzt:

- eine klug optimierte Geometrie für Schwach- und Mittelwindregionen und
- eigenständiges Drosseln durch passive Anpassung des Anstellwinkels an die Windlast.

Die Profile für Schwachwindregionen wurden mittels eines Design- und Simulationsprogramms (QBlade v0.96.3, HF1TU

Berlin) ausgewählt und verifiziert. Aus den Profilen wurde eine vorläufige Blattgeometrie konstruiert und simuliert. Das vollständige Rotorblattdesign wurde mit einem CAD-Programm (Rhinoceros 6.0, Robert McNeel & Associates, Seattle, Washington/USA) umgesetzt (Bild 1). Bei der Konstruktion wurde auch berücksichtigt, ob sich das Produkt in Faserverbundbauweise fertigen lässt.

Effiziente Produktentwicklung dank moderner Simulationstechniken

Über den Anstellwinkel des Rotorblatts werden Drehzahl und Leistung beeinflusst. Eine passive Einstellung des Anstellwinkels kann über die Biege-Torsionskopplung (BTK) erfolgen, sodass ein Anlaufen bei geringer Windgeschwindigkeit und große Ausbeuten bei hohen Windlasten erzielt werden.

Faserkunststoffverbunde (FKV) weisen anisotrope, d.h. richtungsabhängige Materialeigenschaften auf. Diese Anisotropie führt bei einer Faserorientierung abweichend von der 0°- und 90°-Richtung sowie unsymmetrischen Lagenabfolgen zu einer Kopplung der Verformungen. So kann z.B. bei entsprechender Faserorientierung ein Biegemoment nicht nur eine Biegeverformung, sondern auch ein Tordieren bewirken [1–3].

Mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) wurde ein Lagenaufbau ermittelt, der eine BTK aufweist und den Belastungen standhält. Bei erhöhter Windlast tordiert das Blatt in den Wind und reduziert so die Drehzahl auf die Nennleistung, so dass ein Abbremsen der Anlage nicht notwendig ist (Infokasten S. 34).

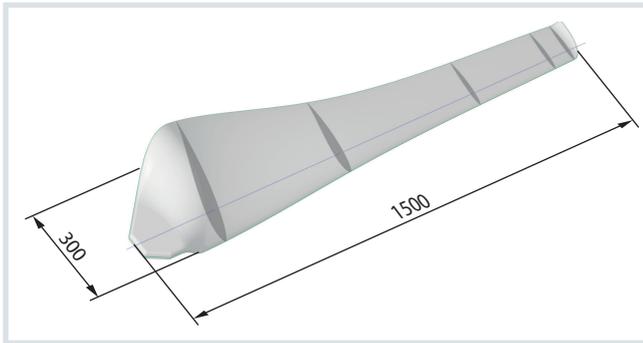


Bild 1. Fertigungsgerechte Umsetzung der Konstruktion des Rotorblatts mit den Profilen und der Profil-Sehne © BTU

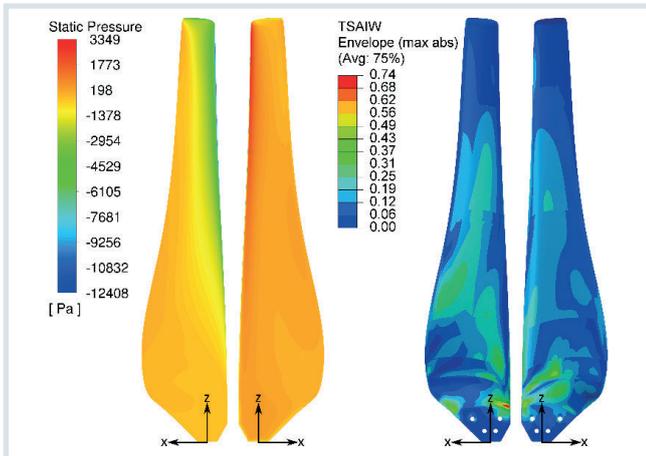


Bild 2. Druckverteilung auf das Rotorblatt und Tsai-Wu-Versagenskriterium (TSAIW). Bei TSAIW < 1 tritt keine Schädigung des Laminats auf © BTU

Auf das Rotorblatt wirken im Wesentlichen zwei Lasten:

- die Zentrifugalkraft aufgrund der Rotation und
 - die Druckverteilung aus der Windlast.
- Die komplex wirkenden Druckverteilungen am Rotor sind vorab nicht bekannt und müssen daher berechnet werden.

CFD- und FEM-Berechnungen: Torsion bei Windlast

Im Anschluss an die Vernetzung erfolgen in Ansys Fluent 3D und Ansys CFD-Post (Ansys, Inc., Canonsburg, Pennsylvania/

USA) der weitere Modellaufbau, die Berechnung sowie die Auswertung (CFD: Computational Fluid Dynamics). Als Turbulenzmodell wird das Zweigleichungsmodell SST k- ω gewählt. Bei der Berechnung der Steady-State-Lösung mit dem druckbasierten Solver wird von einem Extremfall mit einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einer Rotationsgeschwindigkeit von 460 Umdrehungen pro Minute ausgegangen. Als Ergebnis wird der Druck auf das Rotorblatt (**Bild 2**) in ein entsprechendes FEM-Datenformat exportiert.

Die FEM-Modelle werden mit Abaqus (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacou- »

Hybrider Fertigungsprozess			
Phase 1: Additive Fertigung		Phase 2: Subtraktive Fertigung	
Kunststoffgranulat	AC004XXAR1 (Sabic)	Fräser	Kugelfräser R = 8 mm 2 Schneiden
Düsendurchmesser	6 mm	Drehzahl	18 500 U/min
Geschwindigkeit	75 mm/s	Fräsgeschwindigkeit	10 m/min
Schichthöhe	2 mm	Step XY	0,25
Bahnbreite	8 mm	Step Z	4 mm, finale Geometrie in einem Fräsvorgang
Endkonturnahe Bahnanzahl	2		
Geometrie-Offset	4 mm		

Tabelle 1. Prozessparameter der hybriden Fertigung der Werkzeughälften

Quelle: BTU, CNC Bärceñas-Bellón



NEUE COIL-STATION

Weniger Verschchnitt, mehr Produktivität!

Hochgenaue Zuschnitte aus Rohgummi inklusive Selbstoptimierung.

WICKERT hat eine COIL-STATION zum Ablängen von Gummi entwickelt, die bei Schwankungen des Materialgewichts automatisch die Länge des Zuschnitts anpasst. Das Rollenmaterial kann präzise zugeschnitten werden – Toleranzen von +/- 1g.

Durch ihr optimiertes Design und dank der Zulassung durch die FDA ist sie für den Einsatz in Reinräumen der Pharma- und Lebensmittelindustrie geeignet.



Lesen Sie den kompletten Bericht über die neu entwickelte COIL-STATION:



WICKERT plant und produziert aus einer Hand, von vollautomatischen Pressensystemen bis zur einfachen Presse mit manueller Bedienung.

PRESSEN, PRESSENSYSTEME UND VOLLAUTOMATISIERTE ANLAGEN

www.wickert-presstech.de

blay/Frankreich) gelöst. Sie bestehen aus mehreren Komponenten, die durch Zwangs- und Kontaktbedingungen verbunden sind. Im ersten Rechenschritt wird die Vorspannung der Bolzen, die das Blatt an der Narbe fixieren, aufgebracht, im zweiten Schritt die Zentrifugalkraft so-

Vorteile des Systems

Kleinwindenergieanlagen (KWEA) werden üblicherweise durch eine Kurzschlusschaltung vom Generator aktiv abgebremst, um die Drehzahl zu drosseln. Das neuentwickelte Rotorblatt drosselt sich passiv dank Biege-Torsions-Kopplung selbst.

Die Autoren

Gero Pfizenmaier, M.Sc., Lucas Ost, M.Sc., und Jonas Krenz, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU); fg-leichtbau@b-tu.de

Dr.-Ing. Lars Ulke-Winter ist Oberingenieur am Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der BTU.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz ist Leiter des Fachgebiets Polymerbasierter Leichtbau an der BTU und Leiter des Forschungsbereichs Polymermaterialien und Composite PYCO am Fraunhofer IAP.

Dipl.-Ing. (FH) Christian Beloch ist Geschäftsführer der EAB Gebäudetechnik Luckau GmbH, Luckau.

Dank

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags. Der Dank der Autoren gilt ferner der EAB Gebäudetechnik Luckau GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung.

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

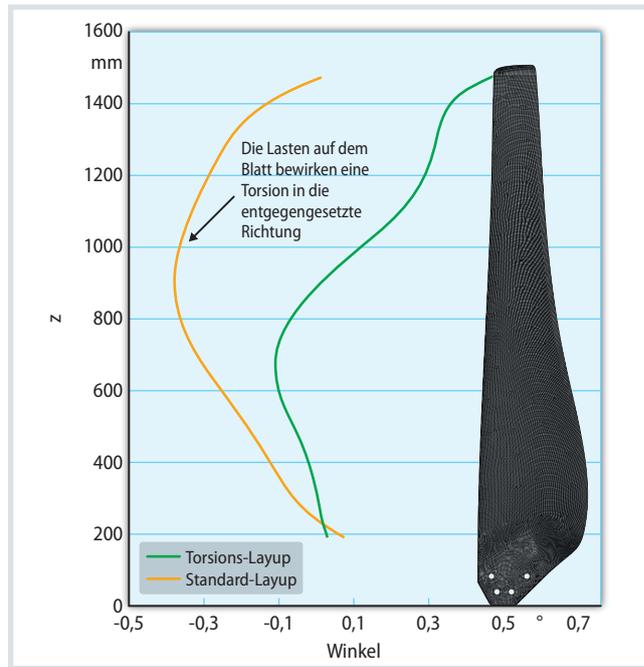


Bild 3. Regressionskurven (polynomial, Grad 6) des Torsionswinkels über die Blattlänge bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s

Quelle: BTU; Grafik: © Hanser

wie die aus der Windlast resultierende Drucklast.

Mit einem Python-Skript wird auf Grundlage der FEM-Ergebnisse der Torsionswinkel berechnet und zusammen mit dem Tsai-Wu-Versagenskriterium [4] (**Bild 2**) in der Abaqus CAE-Software zur Auswertung herangezogen, sodass eine optimale Laminatauslastung und ein großer Torsionswinkel erreicht werden. Die Bewertung des Lagenaufbaus berücksichtigt eine effiziente Fertigungsweise.

Das entwickelte Blatt mit unsymmetrischem Lagenaufbau erzielt im Vergleich zu einem quasiisotropen Standard-

[0/90/±45]-Layup eine signifikante Torsion bei Windlast (**Bild 3**).

Für die fertigungstechnische Umsetzung der neuen Rotorblattgeneration wurde eigens ein zweiteiliges Formwerkzeug entwickelt (**Bild 4a**). Zum Einsatz kam dabei erstmalig ein Direktextrusionssystem, das sowohl additive als auch subtraktive Kunststoffverarbeitungsprozesse in einer Anlage vereint und seit März 2021 auch am Institut für Leichtbau und Wertschöpfungsmanagement (ILW) der BTU vorhanden ist. Die additive Fertigung bietet ein enormes Potenzial, um die Herstellungsdauer und -kosten des Formwerkzeugs für FKV-Bau-

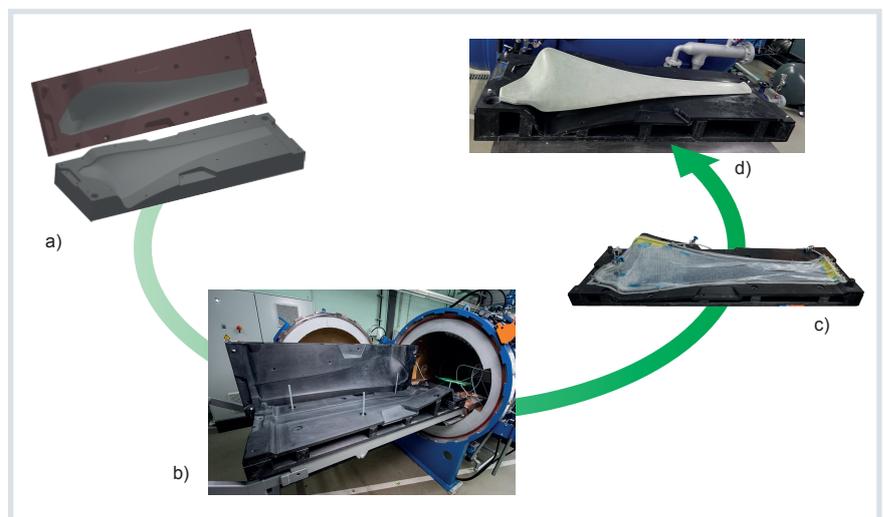


Bild 4. Entwicklungsprozess des Formwerkzeugs für die Rotorblattherstellung. a) CAD-Modell des Formwerkzeugs; b) gedrucktes Werkzeug; c) Infusion einer Rotorblatthälfte; d) Rotorblatt nach der Verklebung beider Schalenhälften Quelle: BTU; Grafik: © Hanser

teile zu senken. Eine Kombination aus Materialauftrag mit hohem Volumenstrom (durch Direktextrusion von thermoplastischem Kunststoffgranulat) und einem nachgeschalteten einstufigen subtraktiven Feinschlichtprozess ermöglicht einen kurzfristigen Bau des Werkzeugs (Direct-Tooling). Diese hybride Vorgehensweise erlaubt bei wenigen Abformungen eine wirtschaftliche Herstellung von Formwerkzeugen, vor allem aufgrund der hohen Materialeffizienz sowie der kurzen Prozesszeiten in Folge der hohen Ausstoßmengen des Extruders beim Aufbau.

Additive Fertigung eines FKV-basierten Werkzeugs

Im Vergleich zum klassischen Werkzeugbau besteht der Direct-Tooling-Ansatz vor allem dadurch, dass er die Zahl manueller Arbeitsschritte deutlich verringert und darüber hinaus die Komponentenmasse erheblich reduziert, indem das großvolumige Werkzeug (1700 x 500 x 350 mm) als dünnwandige Hohlkörperstruktur umgesetzt wird. Das gedruckte Werkzeug wiegt ca. 30 kg. Dadurch kann das Werkzeug von zwei Personen gehandhabt werden. Die Masse eines vergleichbaren Werkzeugs aus Aluminium beträgt demgegenüber bauartbedingt ca. 500 kg.

Die beiden Werkzeughälften wurden mit der hybriden Fertigungszelle Super Discovery vom Hersteller (CNC Bárcenas-Bellón S.L., Valdepeñas/Spanien) gefertigt. Die zweistufige Technologie ermöglicht die Direktextrusion von faserverstärktem Kunststoffgranulat und den anschließenden Fräsvorgang innerhalb einer Maschine. Durch die Verwendung von Polymeren in Granulatform (hier ein ABS-CF20) ist ein effizienter Materialaustrag bis zu 25 kg/h möglich. Die Direktextrusion begünstigt zudem den endkonturnahen Materialauftrag, sodass nur ein einzelner Feinschlichtvorgang als Nacharbeit notwendig ist, um eine ausreichende Oberflächenbeschaffenheit der Werkzeugkavität zu erzeugen. Schruppvorgänge entfallen gänzlich.

Hierin unterscheidet sich die Technologie vom klassischen Fräsvorgang mit aufeinander geklebten

polyurethan- oder epoxidharzbasierten Blockmaterialien, weil diese aufwendig in mehreren Frässtufen geschruppt und anschließend mehrfach geschliffen werden müssten. Mit geeigneter Parameterwahl (Tabelle 1) ist ein effizienter, materialsparender, endkonturnaher 3D-Druck mit nachgeschaltetem Feinschlichtvorgang in der Summe zeitsparend, materialeffizient und zudem kostengünstiger (Bild 4b). Um ein Aufschwingen der Formwerkzeuge während des anschließenden Fräsvorgangs zu unterbinden, wurden bereits in der Konstruktion Stege vorgesehen.

Fertigung der Rotorblätter aus FKV

Die Faserverbund-Rotorblätter wurden durch Infusion von Glasfasergelegen und -geweben mit Epoxidharz gefertigt (Bild 4c). Die passgenaue Positionierung zur Verklebung der GFK-Schalen wurde in den geschlossenen Werkzeughälften durchgeführt (Bild 4d). Die Erprobung des neu entwickelten Rotorblattsatzes war für Mai 2021 vorgesehen. Dabei sollen die über ein Jahr ermittelten Ertragsdaten mit den 2020 aufgezeichneten Daten der klassischen Bauweise verglichen werden. ■

Your reliable partner for automotive solutions

Wir sind **internationale** Anbieter von Kunststoffmischungen, -harzen und thermoplastischen Elastomeren mit **50 Jahren Erfahrung**.

Wir bieten der **Automobilindustrie** ein komplettes Portfolio an **thermoplastischen, kreislaufwirtschafts- und biokunststoffbasierten Lösungen**.

Unsere Forschungs- und Entwicklungsabteilung hilft Ihnen bei der Auswahl des richtigen Materials für Ihre **Interieur-, Exterieur- und Motorraum-Anwendungen** und unterstützt Sie durch **Co-Design** das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, die Emissionen zu senken und Sicherheit und Lebensdauer zu verbessern.

SIRMAX
sirmax.com