

Neue Einsatzmöglichkeiten –

Rotorblätter für Windenergieanlagen

Autoren: *Matthias Weickum, INVENT GmbH, Braunschweig*

Holger Schmitz, INVENT GmbH, Braunschweig

Die INVENT GmbH ist vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten beauftragt, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeit des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe im Windenergieanlagenbau zu prüfen.

Ziel der Studie ist die Erfassung der stoffmechanischen Eigenschaften von Faser/Matrix-Verbunden mit einem hohen Anteil von Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Es ist ein Demonstrationsobjekt für ein in Glasfaser/Naturfaser-Hybridbauweise aufgebautes Rotorblatt zu fertigen. Des Weiteren sind Grundlagen für eine Lebensdauervorhersage von Hybridwerkstoffen unter den Betriebsbedingungen einer Windkraftanlage schaffen.

Hierzu wird zunächst der Stand der Technik im Rotorblattbau anhand einer Literaturrecherche gesichtet und dokumentiert. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist es die Aufgabe der INVENT GmbH, eine Lösung für die Ausführung des Rotorblatts zu erarbeiten. Der Lösungsvorschlag ist baulich umzusetzen und die Realisierbarkeit zu bewerten. Die zur statischen und dynamischen Auslegung des Demonstrationsobjektes erforderlichen Werkstoffkennwerte werden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit in Darmstadt erbracht. Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse, sowohl aus fertigungstechnischer Sicht als auch bezüglich der Werkstoffeigenschaften, stellt die Basis zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten nachwachsender Rohstoffe im Windenergieanlagenbau dar.

Einleitung

Die Strahlungsenergie der Sonne erhält die Bewegung der Atmosphäre aufrecht. Demnach ist die kinetische Energie der Luftmassen als sekundäre Form der Sonnenenergie zu verstehen. Zwischen 1,5 % und 2,5 % der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie werden in Strömungsenergie umgewandelt. Windenergie-Konverter könnten bis zu 3 % dieser Energie umwandeln [Dörn].

Seit Jahrhunderten nutzt der Mensch das Kraftpotential natürlich bewegter Luft. Zuverlässige Quellen, bereits aus dem Jahr 644 nach Christus, belegen die Existenz von Windmühlen [Hau]. Die Entwicklung dieser Energieumwandler dauert bis heute an. Gezielte Forschung und die Erarbeitung

neuer Technologien ermöglichen die Herstellung und Nutzung leistungsfähiger Windenergieanlagen. Die energetische Effizienz dieser Maschinen wird wesentlich vom Einsatz hochwertiger Materialien bestimmt.

Rotorblätter fortschrittlicher Windenergieanlagen sind sowohl hinsichtlich der Aerodynamik als auch bezüglich ihrer Steifigkeit und Festigkeit als äußerst komplex und anspruchsvoll zu beurteilen. Die hohen Anforderungen an Funktionalität und Umweltverträglichkeit sind nur durch den Einsatz innovativer Werkstoffe, wie z.B. faserverstärkter Kunststoffe, zu erfüllen.

Bioverbundwerkstoffe verbinden die positiven Eigenschaften herkömmlicher Faserverbundwerk-

stoffe, wie beispielsweise konstruierbare Materialeigenschaften, mit den Vorteilen von Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Die Ausgangsstoffe dieser Bioverbunde sind biologischen Ursprungs. Hanf- und Flachs sind unter anderem als Fasermaterialien gebräuchlich. Polylactid, eine hauptsächlich aus polymerisierter Milchsäure bestehende Substanz, oder Schellack, das einzige Harz tierischen Ursprungs, dienen beispielsweise als Matrixwerkstoff. Besonders vorteilhaft bei der Verwendung von Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe stellen sich die Möglichkeit des sparsamen Umgangs mit den Werkstoffressourcen und die Umweltfreundlichkeit dar.

Bauelemente von Windenergieanlagen sind strukturellmechanisch hoch belastet, insbesondere durch dynamische Beanspruchung. Die derzeit herstellbaren Bioverbundwerkstoffe weisen deutlich niedrigere Festigkeitswerte auf als Verbundwerkstoffe mit synthetischen Fasern. Die sogenannte Hybridbauweise bietet einen Lösungsansatz. Hier besteht die Konstruktion teils aus synthetischen Verbunden und teils aus Bioverbunden. Ein konsequentes Verfolgen der Hybridphilosophie führt zur Entwicklung von Hybridwerkstoffen. Hybridwerkstoffe sind Werkstoffe, dessen Struktur neben den in diesem Sinne konventionellen, synthetischen Fasern einen wesentlichen Anteil von Fasern auf Basis nachwachsender Rohstoffe aufweist.

Auf Grund der Neuartigkeit der Faserverbund-Hybridbauweise ist ein Mangel an Kenntnissen und Erfahrungen auf diesem Gebiet zu verzeichnen. Geeignete Fertigungsverfahren sind zu entwickeln und die Werkstoffe auf ihre spezifischen Eigenschaften hin zu untersuchen. Hier besteht großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Ziel der hier dokumentierten Untersuchungen ist die Entwicklung des Demonstrationsobjektes für ein Windenergieanlagen-Rotorblatt mit einem hohen Anteil von Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. In diesem Rahmen sind umfangreiche Erkenntnisse bezüglich der Fertigungsmöglichkeiten, der spezifischen Werkstoffeigenschaften sowie Grundlagen für eine Lebensdauervorhersage von Bioverbund- und Hybridwerkstoffen zu erarbeiten.

Rotorblätter von Windenergieanlagen

Die Entwicklung und Konstruktion von Windenergieanlagenrotoren ist wesentlich durch Erkenntnisse und Erfahrungen des Flugzeugbaus geprägt. Dies ist bedingt durch die Ähnlichkeit beider Bereiche in den Schwerpunkten der Entwurfsaufgabe. Sowohl im Flugzeugbau als auch im Windenergieanlagenbau wird das Ziel der optimalen Formgebung bei geringem Gewicht verfolgt.

Fertigungstechnisch ist der Windflügelbau durch verschiedene Bereiche der Technik beeinflusst. Insbesondere Anleihen aus dem Bootsbau sind anzutreffen. Als Fertigungsmaterialien kommen neben metallischen Werkstoffen, wie z.B. Stahl, Verbundwerkstoffe zum Einsatz. Moderne Holz-Harzverbunde und faserverstärkte Kunststoffe sind hier zu nennen. Praktizierte Bauweisen sind z.B. die Stahlholmbauweise, die Faserverbundbauweise und die Holzbauweise. Für die hochbeanspruchte Flügel-Nabe-Verbindung existieren verschiedene Konstruktionskonzepte. Häufig verwendet werden metallische Flansche, welche mittels spezieller Befestigungsprinzipien in der Flügelwurzel fixiert sind und über eine Verschraubung die Verbindung zur Nabe gewährleisten. Auch das Einbringen bolzenartiger Konstruktionselemente im Flügelfuß ermöglicht das Verschrauben der Rotorblätter.

Hybridbauweise

Im vorliegenden Kontext ist die Hybridbauweise als Bauweise definiert, welche sich bezüglich der Faserverbundwerkstoffe an folgender Philosophie orientiert: Der größtmögliche Anteil der eingesetzten Werkstoffe wird von biofaserverstärktem Matrixwerkstoff dargestellt. Einen weiteren, möglichst geringen Anteil bildet synthetikfaserverstärkter Matrixwerkstoff, welcher zur Kompensierung eventueller Festigkeitsdefizite der Bioverbundwerkstoffe eingesetzt wird.

Hybridbauweisen bieten die Möglichkeit, Vorteile unterschiedlicher Materialien gezielt miteinander zu kombinieren.

Bei der GFK/Bioverbund-Hybridbauweise steht die Nutzung von Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Vordergrund. Biofaserverbund soll den größtmöglichen Werkstoffanteil

ausmachen, auch für tragende Konstruktionselemente. Der glasfaserverstärkte Kunststoff wird dort eingesetzt, wo der Werkstoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe bezüglich seiner Steifigkeit und Festigkeit an Grenzen stößt.

Der Hybridwerkstoff, ein nach der Philosophie der Hybridbauweise hergestelltes Material, weist sowohl Anteile auf Basis nachwachsender Rohstoffe als auch Synthetikanteile auf. GFK/Bioverbund-Hybrid ist charakterisiert durch den Glasfaserverbund im Bioverbund. Glasfaserverstärkter Kunststoff bildet die Synthetikkomponente. Diese soll die vergleichsweise niedrigen Steifigkeits- und Festigkeitswerte der Biokomponente, dem Bioverbundwerkstoff, kompensieren.

GFK kommt seit Jahren in vielen Bereichen der Technik zum Einsatz, beispielsweise als tragende Strukturen im Segelflugzeugbau. Die aus der Schmelze gezogenen Glasfasern werden in thermoplastische oder in duroplastische Kunststoffe eingebunden. Die Fasern, Harzsysteme und die Verarbeitung dieser Materialien sind weitreichend erforscht.

Bioverbundwerkstoffe hingegen wurden bislang vorwiegend für nicht tragende Bauteile, wie Verkleidungsteile im Automobilbau, verwendet. Verschiedene Naturfasern, z.B. Hanf-Pflanzenfasern verstärken hauptsächlich duroplastische Bio-Matrixwerkstoffe.

Zur Orientierung sind in der folgenden Tabelle einige Kennwerte von GFK denen von Bioverbundwerkstoff exemplarisch gegenübergestellt.

Kennwert	Werkstoff	
	Bioverbundwerkstoff mit unidirektionaler Faserorientierung	GFK mit unidirektionaler Faserorientierung
	Flachs/Schellack	E-Glas/Vernylesterharz
Dichte [g/cm ³]	1,34 [Schm]	2,04 [INVE]
Zugfestigkeit R_p [N/mm ²]	245 [Schm]	1300 [INVE]
Zug E-Modul [N/mm ²]	27800 [Schm]	44500 [INVE]

Tabelle 1: Kennwerte von GFK und Bioverbundwerkstoffen

Nachwachsende Rohstoffe im Windenergieanlagenbau

Zunehmende Rohstoffknappheit und die mit der Nutzung konventioneller Energiespeicher einher

gehende Umweltbelastung erzwingen die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung neuer Energie-Umwandlungssysteme und Konzepte zur Nutzung regenerativer Rohstoffquellen. Die umweltschonende Windenergiegewinnung unter Einsatz moderner Werkstoffe stellt einen Wirtschaftszweig mit Zukunft dar.

Die Herausforderung besteht darin, den unerschöpflichen Energiespeicher Wind zu nutzen und gleichzeitig die Rohstoffressourcen der Erde zu schonen. Eine Chance bietet die Verwendung von Bioverbundwerkstoff im Windenergieanlagenbau. Hier werden sowohl Rohstoffe bei der Stromgewinnung als auch bei der Herstellung der Energieumwandler gespart. Von der Erzeugung in der Landwirtschaft über die industrielle Aufbereitung, den Einsatz bei Windenergieanlagen bis zur umweltschonenden Entsorgung durch CO₂ - neutrale Verbrennung sind die Rohstoffe in ein ökologisch sinnvolles System eingebunden, welchem nutzbare Energie entzogen wird.

Mittels der GFK/Bioverbund-Hybridbauweise sind die Vorteile jeder Bauweise kombinierbar. Nur ein hohes technisches Niveau gewährleistet die energetische und ökologische Effizienz. Dies erfordert die detaillierte Erforschung und Erprobung sämtlicher Systemkomponenten. Die Machbarkeitsstudie für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Windflügelbau ermöglicht das Sammeln von Erkenntnissen und Erfahrungen. Von besonderem Interesse sind hier die charakteristischen Eigenschaften der zu verbauenden Werkstoffe und deren Verarbeitung.

Entwicklung eines Rotorblattes in Hybridbauweise

Auslegung des Rotorblattes

Vorgehensweise

Die Auslegung eines Bauteils erfordert genaue Kenntnis über die einzuhaltenden Randbedingungen. Da diese im vorliegenden Fall nur sehr grob umrissen sind, soll eine fiktive Windenergieanlage den Untersuchungen zu Grunde gelegt werden. Das bedeutet, dass sämtliche Eingangsinformationen zur Auslegung einem gedachten Szenario entnommen werden. Durch die Festlegung wesentlicher Eckdaten, wie z.B. des Aufstellungsortes oder der Betriebszeit, erfolgt die Abgrenzung des Betrachtungsfeldes. Detailliertere Aussagen ergeben sich dann durch Verknüpfung der genannten Eckdaten und anschließende Schlussfol-

gerungen auf die beschreibenden Parameter oder deren Wahl. Beschreibende Parameter sind z.B. die Auslegungswindgeschwindigkeit oder die Rotorblattzahl.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen sind die Dimensionen der Rotorblattkomponenten zu wählen. In der Regel greift der Konstrukteur hierfür auf den dokumentierten Stand der Technik zurück, bzw. er nutzt den eigenen Erfahrungsschatz. Auch überschlägige Berechnungen sind hilfreich.

Bei üblichen Verfahren zur Dimensionierung werden zunächst die Beanspruchungen und die Beanspruchbarkeit einer Bauteilkomponente ermittelt. Eine Gegenüberstellung beider Größen, der Nachweis, gibt Aufschluss darüber, ob das untersuchte Konstruktionselement den Anforderungen entspricht. Ist dies an dem, sind die Maßverhältnisse festzusetzen, andernfalls werden neue Abmessungen festgelegt und überprüft.

Eine Besonderheit der Auslegung im vorliegenden Fall stellt das Fehlen eines großen Teils der benötigten Werkstoffkennwerte dar. Die Dimensionierung ist dieser Tatsache anzupassen. Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit sind charakteristische Kennwerte der verwendeten Werkstoffe nötig. Für die Auslegung des Rotorblattes in Hybridbauweise erscheint ein Zwischenschritt im Verfahren. Über die Ermittlung der Beanspruchung identifizieren sich diejenigen Kennwerte, welche zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit nötig sind. Der vor den Nachweis gestellte Zwischenschritt beinhaltet die Ermittlung der Kennwerte in einem Probenprüfprogramm.

Randbedingungen bei der Auslegung des Rotorblattes der fiktiven Windenergieanlage

Aufstellungsort:

- fiktiver Aufstellungsort ca. 150 km nordwestlich von Hannover → Windzone III

Typenklasse:

- Typenklasse III (nach [Rich])

Rotor:

- Schnellläufer
- Anzahl z der Rotorblätter: gewählt:
 $z = 3$
- Rotordrehzahl n : gewählt:
 $n = 300 \text{ U/min}$
- Auslegungsschnellaufzahl λ : gewählt:
 $\lambda = 6$
- Auslegungswindgeschwindigkeit v_w :
gewählt: $v_w = 10 \text{ m/s}$
- Nabendurchmesser $d_n = 120 \text{ mm}$

Rotorblatt:

- Blattlänge $l_b \approx 2 \text{ m}$
- Einstellwinkel $\beta = -3,5^\circ$ (nach [Dörn])

Rotorblattgeometrie

In dieser Phase der Auslegung wird die geometrische Beschreibung des Rotorblattes stark vereinfacht. Die Abmaße sind so anzusetzen, dass die Beanspruchungen und deren Auswirkungen mit ausreichender Sicherheit ermittelt werden können. Das bedeutet, der Ermittlung der Lasten und der anschließenden Schnittgrößenberechnung liegen Flügeldimensionen zu Grunde, welche der detaillierten Auslegung einen gewissen Spielraum gewähren.

- Blattlänge $l_b = 1940 \text{ mm}$
- Blattumriss

Ermittlung der optimalen Blatattiefe nach Formel:

$$t_{\text{opt}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{z} \cdot \frac{8}{9 \cdot c_a} \cdot \frac{v_w^2}{u \cdot w} \quad [\text{Moll}]$$

$$z = 3$$

$$v_w = 10 \text{ m/s}$$

$$n = 300 \text{ 1/min} = 5 \text{ 1/s}$$

$$c_a = 1,1$$

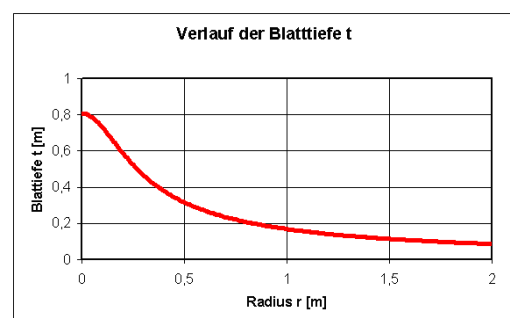


Abbildung 1: Graphische Darstellung der optimalen Blatattiefe über den Radius

Annäherung an Optimalform durch eine Trapezform:

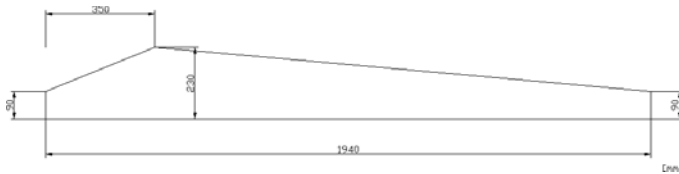
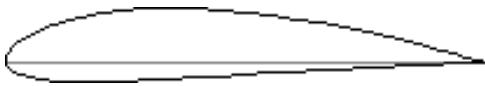


Abbildung 2: Trapezförmiger Blattumriss

- Aerodynamisches Profil
- gewähltes Profil: NACA-Profil NACA 4415



- Abbildung 3: Aerodynamisches Profil NACA 4415 [Mpro]

Belastung

Der Aufbau und die Funktion einzelner Baugruppen der gedachten Windenergieanlage ist nicht detailliert gegeben. So ist beispielsweise das System von Nabe, Rotorwelle, Getriebe und Generator nicht beschrieben. Um angemessene Annahmen bezüglich der Rotorblattbelastung treffen zu können, wird das Betrachtungsfeld eingegrenzt. Folgende Belastungen gehen in die Untersuchung ein:

- Eigengewicht des Rotorblattes
- Fliehkraft
- aerodynamische Lasten

Schnittgrößen

Folgende Schnittgrößen werden ermittelt und der Dimensionierung zu Grunde gelegt.

- Biegung
- Längskraft
- Querkraft

Konstruktiver Aufbau des Rotorblattes

Das Rotorblatt ist durch Biegung, Torsion, Normalkraft und Querkraft beansprucht. Der aus den folgenden Abbildungen hervorgehende Konstruktionsaufbau soll die Aufnahme dieser Schnittgrößen gewährleisten.

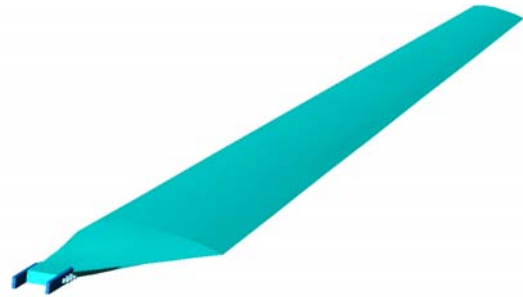


Abbildung 4: Rotorblatt

Biegung und Längskraft verursachen Zug- bzw. Druckspannungen. Diese sollen durch die Schäfte einer Schlaufe in GFK/Bioverbund-Hybridbauweise übertragen werden. Das Stützen der Schlaufe wird durch Anordnung eines Hülllaminats aus GFK um die Schlaufe und eines Schaumkerns zwischen den Schäften erzielt. Um das auftretende Torsionsmoment absetzen zu können, ist eine die Schlaufe umschließende Schale aus Bioverbundwerkstoff vorzusehen. Über diese, das aerodynamische Profil bildende Außenhaut, wird ebenfalls die Querkraft aufgenommen. Zum Lagesichern der Schlaufenschäfte und als Schalung für die Außenhaut wird ein Schaumkern im Blattinneren vorgesehen. Zwei Stahlbleche, welche durch Stehbolzen mit dem Schlaufeninsert und der Blattschale verbunden sind, dienen der Befestigung vom Blatt an der Rotornabe, beispielsweise durch Verschrauben.

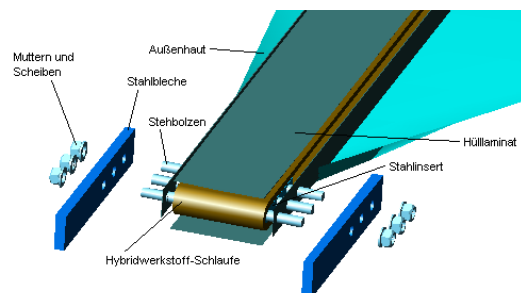


Abbildung 5: Bereich der Rotorblattwurzel, ohne Schaumkern, zerlegt dargestellt

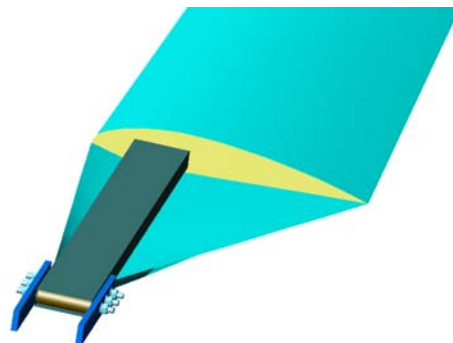


Abbildung 6: Bereich der Flügelwurzel, aufgeschnitten, mit Schaumkern (gelb dargestellt), im Blattinneren

Spannungsberechnung

Folgende Spannungen werden ermittelt:

Statische Auslegung

- Maximale Normalspannung $\sigma_{x,max}$ in den Schlaufenschäften infolge gleichzeitiger Wirkung von Eigengewicht bei Heben des Rotorblattes, Windlast und Fliehkraft bei 800 U/min
- Maximale Schubspannungen in der Blattschale durch Querkräfte infolge Eigengewicht des Rotorblattes und Windlast

Dynamische Auslegung

- Normalspannung $\sigma_{x,Betrieb,H}$ infolge gleichzeitiger Wirkung von Eigengewicht bei Heben des Rotorblattes, Windlast und Fliehkraft bei 300 U/min
- Normalspannung $\sigma_{x,Betrieb,S}$ infolge gleichzeitiger Wirkung von Eigengewicht bei Senken des Rotorblattes, Windlast und Fliehkraft bei 300 U/min

Ermittlung der Beanspruchbarkeit

Um überprüfen zu können, ob die Bauteilkomponenten den Anforderungen, beispielsweise den Spannungen, gewachsen sind, werden über ein Probenprüfprogramm fehlende Kennwerte ermittelt. Im Folgenden sind Auswahlversuche gegeben:

- Zugversuch in Faserrichtung
- Druckversuch in Faserrichtung
- Scherversuch
- Schwingfestigkeitsversuche

Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit

Sind alle auslegungsrelevanten Kenngrößen bekannt, wird die Beanspruchung jedes Bauteils seiner Beanspruchbarkeit gegenübergestellt. Wenn nachgewiesen ist, dass die Bauteilkomponenten den Anforderungen genügen, werden die geplanten Dimensionen und Materialien beibehalten. Andernfalls erfolgt eine Neuwahl und anschließende Überprüfung der Abmaße und Werkstoffe.

Werkstoffe und Fertigung des Rotorblattes

Da die Herstellung des Rotorblattes als sehr komplex zu bewerten ist, sind die verwendeten Werkstoffe und die Fertigung lediglich schwerpunktmäßig umrissen.

Schlaufe

Schlaufenwerkstoff

Es ist geplant, für die Schlaufe ein GFK/Bioverbund-Hybrid zu verwenden. Dabei sollen Biofasern, Glasfasern und Biomatrixwerkstoff einen Verbund bilden.

Der Biofaser-Anteil wird durch einen speziell für diese Anwendung erzeugten Cellulose-Roving gestellt. Hier einige Angaben, welche diesen näher beschreiben.

Bezeichnung: Lyocell

Gesamtfilter: 4455 dtex

Filamente: 2970

Den Glasfaser-Anteil bildet der im folgenden charakterisierte Roving.

Bezeichnung: SAINT-GOBAIN VETROTEX EC9 756 K43 68

Nennfeinheit Roving-Strang: 7560 dtex

Filamente: 4400

Als Matrixwerkstoff dient das Biopolymer Tribest S350, versetzt mit Härter und Beschleuniger.

Zugversuche mit Proben unidirektionaler Laminate des reinen Bioverbundwerkstoffes brachten Werte von $R_{Iz} \approx 250 \text{ N/mm}^2$.

Unidirektionale Glas/Matrix-Verbunde erreichen Zugfestigkeiten von $R_{Iz} \approx 1300 \text{ N/mm}^2$.

Fertigung der Schlaufe

Die Schlaufe wird im Wickelverfahren hergestellt. Auf ein spezielles Wickelwerkzeug (vgl.

Abbildung 7 und 8) werden harzgetränkte Fasern (vgl. Abbildung 9) abgelegt und mit Hilfe von Aluminiumprofilen (vgl. Abbildung 10) kompaktiert. Im Anschluss daran ist das Harz unter Druck und Temperatur auszuhärten. Der so entstandene Schlaufenrohling wird vom Werkzeug gelöst und anschließend durch Zusägen und Einbringen des Stahlinserts weiter bearbeitet.

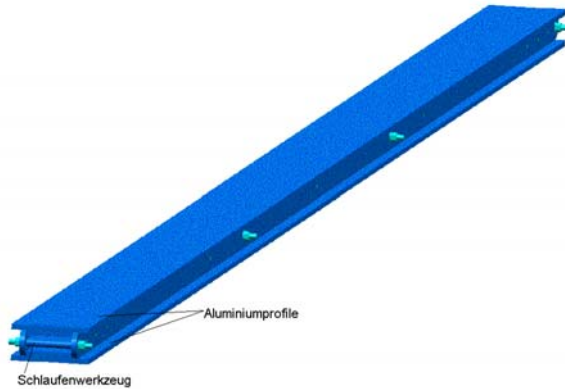


Abbildung 7: Schlaufenwerkzeug und Aluminiumprofile

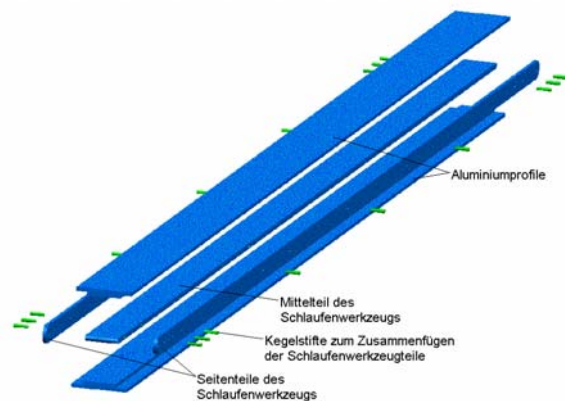


Abbildung 8: Schalenwerkzeug zerlegt dargestellt und Aluminiumprofile

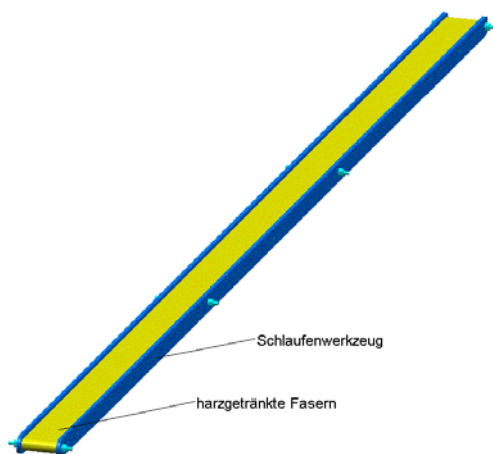


Abbildung 9: Gewickelte Fasern

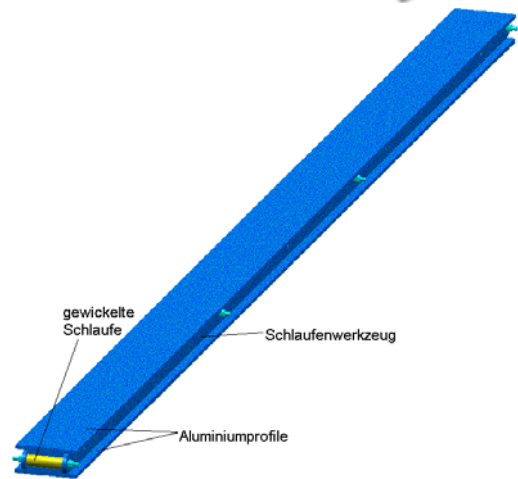


Abbildung 10: Kompaktierte Fasern

Blattschale

Schalenwerkstoff

Als Schalenwerkstoff kommt ein Bioverbundwerkstoff, hergestellt aus Flachsgewebe und der im Abschnitt Schlaufenwerkstoff beschriebenen Matrix zum Einsatz.

Fertigung der Schalen

Auf die Fertigung der Schalen wird im Abschnitt Fertigung des Rotorblattes eingegangen.

Schaumkerne

Schaum

Ein in Platten gelieferter duroplastischer Hartschaum findet hier Verwendung.

Fertigung der Schaumkerne

Mit Hilfe einer sogenannten Strakleiste (vgl. Abbildung 11) erfolgt die Herstellung der Schaumkerne. Als Strakleiste ist hier eine ca. 2 m lange Holzleiste, welche mit Schleifpapier beklebt ist, zu verstehen. Mit dieser Leiste wird das durch Metallschablonen begrenzte Schaumhalbzeug bearbeitet. Durch das Straken, der Schleifbewegung mittels Strakleiste, über die angesprochenen Schablonen entsteht die gewünschte Schaumform (vgl. Abbildung 12).

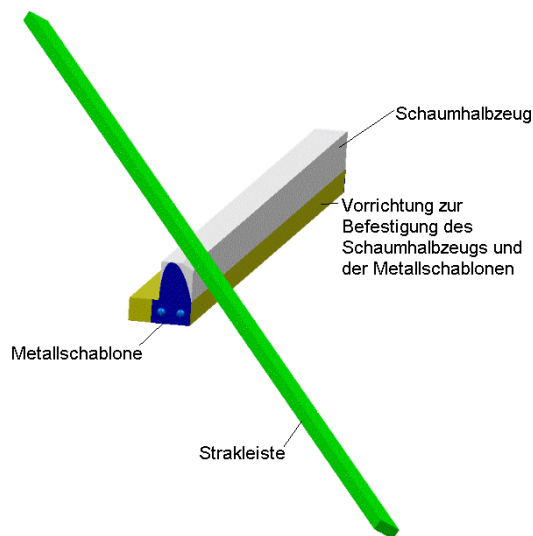


Abbildung 11: Herstellung der Schaumkerne

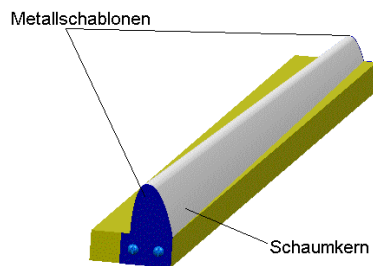


Abbildung 12: Schaumkern und Schablonen

Fertigung des Rotorblattes

Das Bauteil soll in einem, die aerodynamische Gestalt des Rotorblattes vorgebenden, Aluminiumschalenwerkzeug gefertigt werden. Die vorgefertigten Komponenten des Flügels, wie beispielsweise Schaumkerne und Schlaufe, und der Blattschalen-Faserwerkstoff werden in dem aus Ober- und Unterteil bestehenden Schalenwerkzeug (vgl. Abbildung 13) angeordnet. Um das Werkzeug wird nach Zusammenfügen der Aluminiumschalen eine Vakuumfolie vorgesehen, welche es ermöglicht das Werkzeug und dessen Inneres einem Unterdruck auszusetzen. Mittels Injektionsverfahren, bei welchem der flüssige Matrixwerkstoff über Leitungen ins Bauteil gelangt, wird das Harz eingebracht. Die anschließende Aushärtung des Harzes führt zum gewünschten Verbund von Matrix und Fasern und zur Fixierung sämtlicher Bestandteile der Konstruktion. Mit Flachsgewebe und Biomatrix wurden bereits erfolgreiche Injektionsversuche durchgeführt.

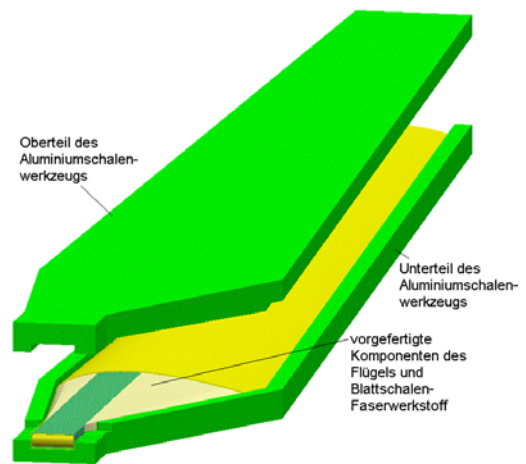


Abbildung 13: Fertigung des Rotorblattes im Aluminiumschalenwerkzeug

Resümee und Ausblick

Regenerative Energiequellen werden in Zukunft eine immer stärkere Rolle spielen. Dem Mangel an fossilen Brennstoffen und der Gefahr risikobehafteter Energieumwandlung mittels Kernkraftwerken ist durch die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung moderner, umweltschonender Energieumwandlungssysteme entgegenzuwirken. Die Schaffung neuer Werkstoffe, deren Herstellung nicht an das Vorhandensein knapp werdender Rohstoffressourcen gebunden ist, stellt eine Herausforderung für die Forschung dar.

Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Windenergieanlagenbau trägt sowohl dem Aspekt der Ressourceneinsparung als dem der Umweltschonung Rechnung.

Rotorblätter von Windenergieanlagen sind strukturell hoch belastete Bauteile. Die verwendeten Werkstoffe sind insbesondere enormen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Hybridbauweise ermöglicht es, Materialien so zu kombinieren, dass jeweils deren Vorteile in den Vordergrund treten. Mittels der GFK/Bioverbund-Hybridbauweise wird angestrebt, die ökologischen Vorteile des Bioverbundwerkstoffes mit den guten Festigkeitseigenschaften des glasfaserverstärkten Kunststoffes zu kombinieren.

Nach dem bislang in dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen stehen Fertigungstechnologien zur Herstellung von Rotorblättern in GFK/Bioverbund-Hybridbauweise zur Verfügung. Ob und in welchem Umfang diese zu ver-

ändern oder zu optimieren sind, ist im Rahmen der anstehenden Untersuchungen zu klären.

In wie weit die zur Verwendung geplanten Werkstoffe den hohen Beanspruchungen von Rotorblättern widerstehen, wird das Ergebnis der Materialprüfungen zeigen. Sind gesicherte Kennwerte vorhanden, ist der Konstrukteur in der Lage effizient zu dimensionieren und die Vorteile des Faserverbundwerkstoffs auszuspielen.

Es ist anzustreben, die Fertigungstechnologien dem Werkstoff so anzupassen, dass die Produkteigenschaften reproduzierbar sind und den Anforderungen im Rotorblattbau entsprechen.

Quellen

- [Dörn] Dörner, Heiner: *Freifahrende Turbinen Windenergie*. Vorlesungsmanuskript Version 8.0, ab WS 1999/00 Universität Stuttgart
- [Hau] Hau, Erich: *Windkraftanlagen. 2.*, überarbeitete und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- [Moll] Molly, Jens - Peter: *Windenergie in Theorie und Praxis*. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller, 1978
- [Mpro] Programm: *Mprofil*, zum Auslesen geometrischer Daten von aerodynamischen Profilen
- [Rich] Richtlinie für Zertifizierung von Windenergieanlagen
- [INVE] Arbeitsmaterial der INVENT GmbH Braunschweig
- [Schm] Schmitz, H.: *Technischer Leitfaden zur Anwendung von ökologisch vorteilhaften Faserverbundwerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen – am Beispiel eines Kastenträgers für hochbelastbare Baugruppen*. Braunschweig 1999