

Foto: DLR (CC-BY 3.0)

Glasfaser-Metall-Laminat in der Forschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt - eine Verbindung auch für Rotorblattwurzeln?

Gestählte Blattwurzel

Künftige Rotorblätter werden deutlich über 100 Meter lang sein. Neue Verbindungstechnik für Nabe und Blattsegmente erlauben das.

Größere Rotoren lassen günstiger Strom produzieren. Die viel diskutierte Frage ist, ob beziehungsweise wann dieser Trend aufhört? Der Straßentransport von sehr großen Rotorblättern wird immer aufwändiger und für manche Standorte unmöglich. Die Lasten, insbesondere die Betriebslasten, steigen sehr stark, so dass konventionelle Werkstoffe und Bauweisen nicht mehr tragfähig genug sind. Das Größenwachstum kann nur weitergehen, wenn für derartige Herausforderungen immer wieder innovative Lösungen gefunden werden.

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig werden der Einfluss des Größenwachstums auf die Verbindungstechnik der Komponenten erforscht und Lösungen



Lutz Beyland,
wissenschaftlicher
Mitarbeiter,
Institut für Faserver-
bundleichtbau und
Adaptronik, DLR

für künftige Modelle entwickelt. Neben dem Blattanschluss, also der Verbindung von Rotorblatt und Nabe, geht es hier um Verbindungstechnik für segmentierte Rotorblätter. Beide Verbindungen müssen immer größere Lasten übertragen.

Allerdings ist der Bauraum für die Verbindungstechnik begrenzt. Für den Blattanschluss stellen Autobahnbrücken eine Bauraumbegrenzung dar. Ab einem Anschlussdurchmesser von gut vier Metern kann ein Rotorblatt die Autobahnbrücken nicht mehr unterqueren, so dass der Straßentransport für den Bau von Windparks an Land nicht mehr möglich ist. Und bei segmentierten Rotorblättern bleibt grundsätzlich sehr wenig Platz für die Verbindungstechnik, da das aerodynamische Profil auch im Verbindungsbereich eher schlank sein sollte, um eine hohe Leistungsausbeute zu erreichen.

Foto: DLR

Klassische Verbindungen erreichen Limit

Das Biegemoment M ist die maßgebliche Last für die sehr schlanke Struktur des Rotorblatts und steigt nämlich bei zunehmender Blattlänge schneller als das Widerstandsmoment W : Dieses kennzeichnet den Bauraum, wobei beispielsweise ein Rohr nach einer Verdoppelung seines Durchmessers eigentlich schon ein vier Mal so großes Widerstandsmoment W enthält. Doch lässt sich mit dem Design des Bauraums die zunehmende Last nicht mehr ausreichend ausgleichen – schon weil die Blätter eben aus aerodynamischen Gründen in weiten Bereichen schlank ausfallen müssen. Vereinfacht bildet diese wachsende Beanspruchung die Formel mit dem griechischen Buchstaben Sigma σ , der für die physikalische Größe der Spannung steht: Sigma (Beanspruchung) $= M/W$.

Am Blattanschluss konventioneller Rotorblätter werden seit vielen Jahrzehnten T-Bolzen oder Inserts eingesetzt. Bezogen auf den Brutto-Querschnitt im Verbindungsbereich haben T-Bolzen-Verbindungen eine zulässige statische Beanspruchung von etwa $\sigma = 30$ Megapascal (MPa) oder 30 Newton pro Quadratmillimeter. Insert-Verbindungen können etwas dichter gepackt werden, weil sich im selben Bauraum mehr Hülsen nebeneinander platzieren lassen, so dass mehr Schrauben gleicher Größe hinein passen. Insert-Verbindungen erreichen so bis zu 50 MPa. Bei einem Anschlussdurchmesser von maximal für den Straßenverkehr geeigneten vier Metern ergeben sich hieraus maximale Blattlängen für die T-Bolzen-Verbindung von 80 bis 85 Meter und 95 bis 105 Meter für die Insert-Verbindung.

Wandstärken von 100 Millimetern drohen

Allerdings wirkt noch eine zweite räumliche Begrenzung: Auch die Länge der Rotorblätter

200

MEGAPASCAL

beträgt die maximale statistische Beanspruchung, die Bolzen-Verbindungen in Faser-Metall-Laminaten aus Stahl und Glasfaserkunststoff ohne Schäden standhalten können. Das ist das Vierfache der bisher erreichbaren Beanspruchung bei herkömmlichen Rotorblatt-Verbindungstechniken.

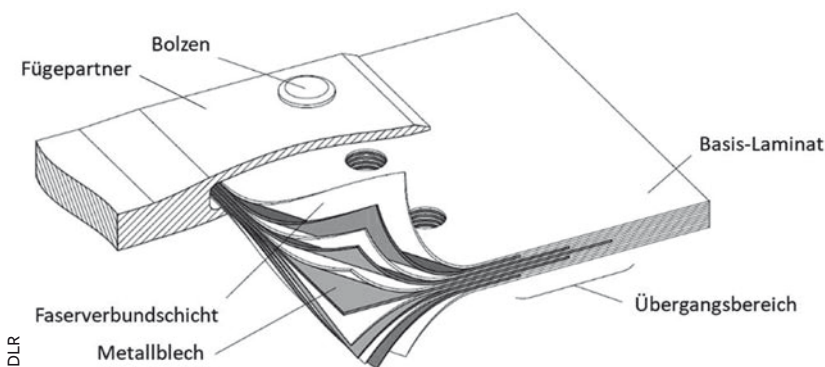
macht den Straßentransport zunehmend schwieriger. Segmentierte Rotorblätter sind die Lösung, benötigen aber eine starke Verbindungstechnik. Eine Verklebung kann mit wenig Zusatzmasse im Verbindungsbereich realisiert werden, benötigt aber einen aufwändigen Prozess für die sichere Verklebung der Blattsegmente im Feld. Eine Verschraubung ist relativ einfach im Feld durchzuführen, führt aber zu viel Zusatzmasse im Verbindungsbereich: Denn für T-Bolzen oder Insert-Verschraubungen müssen die in jedem Blatt enthaltenen lasttragenden Gurte – bestehend aus in Blattlängsrichtung orientierten, durchgängigen Glas- oder Kohlefasern – zur Verbindungsstelle hin deutlich im Querschnitt vergrößert werden. Nur dann können diese Gurte auch Verbindungselemente in ausreichender Anzahl aufnehmen.

Das führt zu Wandstärken von teilweise über 100 Millimetern und einer Gurtbreite, die nahezu den ganzen Profilmfang einnimmt. Diese Maßnahmen lassen sich angesichts des Trends zu immer längeren und dennoch schlankeren Blättern nicht mehr weiter vorantreiben. Würde hingegen das aerodynamische Profil an der Verbindungsstelle vergrößert werden, um ein höheres Widerstandsmoment zu erhalten, wäre das mit einem Verlust im Energieertrag gegenüber einem monolithischen Blatt verbunden.

Faser-Metall-Laminat und RAX-Bolzen

Sowohl am Blattanschluss als auch für geschraubte, segmentierte Rotorblätter werden daher tragfähigere Verbindungstechniken benötigt, um weiteres Größenwachstum zu ermöglichen. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik setzt dabei auf zwei Technologien: Faser-Metall-Laminat (FML) und radial und axial vorgespannte Bolzenverbindungen (RAX).

FML sind hybride Werkstoffe aus Glas- oder Kohlefaser-verstärktem Kunststoff in Kombination mit dünnen Metallblechen. Ein Beispiel aus dem Flugzeugbau ist GLARE, eine Kombination aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und Aluminium: Mehrere dünne Lagen zweier abwechselnd übereinander geschichteter Materialien kombinieren dabei ihre Eigenschaften zu einem besonders tragfähigen und leichten Werkstoff (siehe Grafik 1). Auch Stahl ist zur Hybridisierung von Verbindungsbereichen in Rotorblättern besonders geeignet, weil Stahl hochfest und preisgünstig ist. Dieser Materialmix eignet sich deutlich besser als reines GFK oder CFK für hohe Lochleibungsbelastungen, wie sie bei Bolzenverbindungen auftreten. So können für Bolzenverbindungen ▶



Grafik: DLR

Grafik 1: Faser-Metall-Laminat in gabelförmiger Struktur als lastenfähiger Blattanschluss

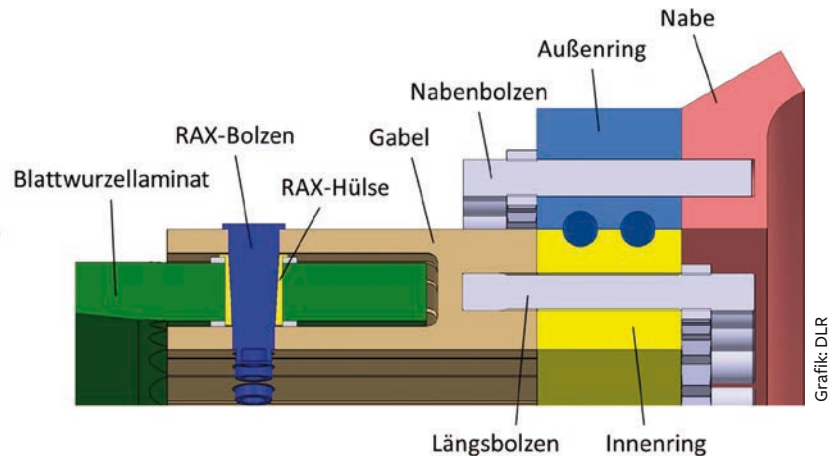
in Stahl-GFK oder in mit Carbonfaserkunststoff (CFK) verstärktem Stahl-CFK zulässige statische Beanspruchungen von 100 bis 200 MPa erreicht werden.

Die neuartige RAX-Verbindung kombiniert als alternatives Konzept die positiven Eigenschaften einer radialen und axialen Vorspannung, so dass eine Bolzenverbindung mit höchster Tragfähigkeit bei statischer und schwingender Belastung entsteht (siehe Grafik 2). Das Laminat wird hier im Verbindungsbereich durch Flansche beidseitig axial gestützt, so dass eine Vorspannung in Laminatdickenrichtung entsteht. Dadurch treten versagensinitiiierende Delaminationen erst bei höheren Lasten auf. Insbesondere die statische Festigkeit der Verbindung steigt. Die radiale Vorspannung der Bohrung im Laminat wird über einen Innen- und einen Außenkonus erzeugt, die bei der Montage übereinander geschoben werden und sich dabei radial ausdehnen (siehe Grafik 3).

Wie RAX wichtige Vorspannungen erzeugt

Soweit die Kurzform dieses Blattanschluss-Aufbaus. Im detaillierten Querschnitt stellt sich das System mit der RAX-Verbindung als eine Gabel aus Stahl dar oder eine Nut, in der das Blatt-GFK-Laminat eingefügt ist. Seitlich durch beide Nutflanken und das GFK getriebene RAX-Bolzen haben eine sich beim Durchqueren der Blattwand verjüngende konische Form. Die Bolzen stecken allerdings nicht direkt in der Bohrung, sondern in einer dort zuvor eingelassenen konischen Hülse.

Das Eintreiben des konischen RAX-Bolzens weitet so die Bohrung im Blattwurzellaminat auf und sorgt für Vorspannung in radialer Richtung. Zwei Unterlegscheiben pro Bolzen erzeugen – physikalisch korrekter: übertragen – zugleich die Vorspannung in Dickenrichtung, die eine Delamination



Grafik 2: „Radial und axial vorgespannte Bolzenverbindung“ (RAX) am Blattanschluss

Die Ergebnisse werden 2021 oder 2022 vorliegen und wohl eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit nachweisen.

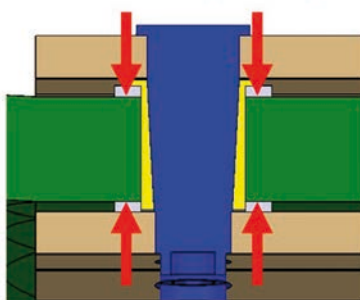
verhindert, also die Ablösung der Schichten an der Lochkante. Die Vorspannung durch den konischen RAX-Bolzen verdoppelt die Lochleibungsfläche zwischen dem GFK und der Hülse sogar. Und sie bewirkt, dass auch unter Lastwechseln GFK und Metall in der gesamte Blattstärke in Kontakt bleiben.

Hohe Tragfähigkeit experimentell geklärt

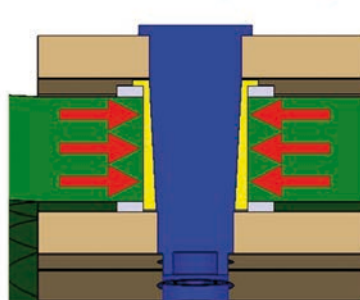
Die Verbindung ist so immer spielfrei, wenig anfällig für Abrieb und insbesondere unter schwingender Belastung hochfest. Erste Tests zeigen, dass alleine mit der RAX-Verbindung zulässige statische Beanspruchungen von bis zu 100 MPa erreicht werden können. In den Projekten LENA1 und SegBlatte konnte das Institut FA seit 2016 die hohe Tragfähigkeit von RAX und FML auch experimentell bestätigen. Darauf aufbauend wird derzeit in einem Technologietransfer-Projekt die Kombination von RAX und FML untersucht. Darin werden diese Technologien strukturmechanisch optimiert, Bauteiltests in repräsentativer Größe mit Belastungen von 10 Meganewton oder 1.000 Tonnen Gewichtskraft durchgeführt, die Kosten bewertet, und ein skalierter Blattanschluss mit 1,35 Metern Durchmesser als Prototyp gefertigt. Die Ergebnisse werden 2021 oder 2022 vorliegen und wohl eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit nachweisen.

Für zukünftige Projekte lädt das Institut FA interessierte Partner ein, diese neuartigen Verbindungstechniken im Gesamtsystem zu untersuchen. Dabei sollen innovative Gesamtkonzepte für Blattanschluss, Blattlager und Nabe entwickelt werden. ■

Axiale Vorspannung



Radiale Vorspannung



Grafik 3: Konischer Bolzen (blau) treibt in konische Hülse und erzeugt die Vorspannungen.



Es ist flexibel, sagt die Beständigkeit.

Ein offener Dialog ermöglicht uns die
individuelle Vertragsgestaltung.

Vom case-by-case-Vertragsgestaltung, als einzelner Fall
kommunikation, national oder international – für die erfolgreiche
Umsetzung der passenden Vertriebsstrategien – bis hin zur weit auf
den Kunden zugeschnittenen und effizienten gemeinsamen
Umsetzung für die Realisierung von gemeinsamen Projekten.

deus-cna-wirtschaft.com



Deutsches
Wirtschaftsmagazin