

# CFK Prop 6m – Entwicklung von Konstruktions-, Simulations- und Prüfverfahren für 3-D verstärkte CFK-Propellerstrukturen bis 6 m Durchmesser

Hannes Kröger, Voith Advanced Propeller Technologies GmbH & Co KG; Siegfried Bludszuweit, Werner Frühlingsdorf, MET Motoren- und Energietechnik GmbH; Olaf Grewe, Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik; Steffen Bartke, Christian Kliewe, Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau

## Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe haben bereits bei einer Vielzahl von Anwendungsfällen z.B. in der Luft- und Raumfahrt oder im Fahrzeugbau ihre Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen unter Beweis gestellt. Seit 1993 werden auch innovative maritime Propeller auf Basis von kohlefaserverstärkten Kunststoffen am Markt angeboten. Diese Schiffspropeller bestehen aus einer Metallnabe und „intelligenten“ CFK-Propellerflügeln. „Intelligent“ bezieht sich auf die Fähigkeit der Flügel auf Belastung mit einer sich selbst einstellenden Steigung zu reagieren, was zu besser angepassten Leistungskennlinien, höheren Gesamtwirkungsgraden und damit zu Treibstoffeinsparungen von bis zu 15 Prozent sowie einem besseren Schwingungs- und Geräuschverhalten führt.

CFK-Propellerflügel werden als Voll laminate ohne Schaumkern o.ä. hergestellt. Bis 2m Durchmesser verfügen sie über eine eher geringe Wandstärke. Bereits bei 4m Propellerdurchmesser ist im Flügelbereich von einer Wandstärke größer 120 mm auszugehen. Bei Propellern ab 6m Durchmesser wird sich diese noch einmal verdoppeln.

Bei der Fertigung von derartig dickwandigen Faserverbundstrukturen gewinnen besonders die thermischen Einflüsse im Aushärtungsprozess an Bedeutung, weil der Temperaturgradient Eigenspannungen in den Bauteilquerschnitt induziert, die zu Schäden führen können. Im Rahmen des vorliegenden Projektes war daher ein Ziel, die Exothermie während des Aushärteprozesses theoretisch richtig vorauszusagen und auch Maßnahmen zu entwickeln, um diese im Fertigungsprozess zu beherrschen.

Weitere Problemstellungen ergeben sich aus der Tatsache, dass an große Propeller auch hohe Anforderungen bzgl. Auslegungssicherheit, Maßhaltigkeit und Lebensdauer gestellt werden.

Die Berechnung flexibler Propeller ist durch die Wechselwirkung von Strömung und Struktur besonders anspruchsvoll und erfordert sorgfältig abgestimmte Nachrechenverfahren. Bisher erfolgte die Strömungsberechnung mittels reibungsfreier Verfahren. Im Rahmen dieses Projektes sollte nun eine Kopplung von viskosen RANSE-Verfahren (RANSE: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) mit der FEM-Strukturberechnung entwickelt und validiert werden, um auch komplexe instationäre Phänomene, wie z.B. Schwingungen oder das Verhalten der Flügel im Nachstromfeld detaillierter untersuchen zu können.

Die in diesem Vorhaben zu untersuchenden CFK-Propeller unterscheiden sich in zwei Punkten wesentlich von herkömmlichen Gußpropellern. Zum einen ist die Fertigungsmethodik eine andere. Es werden die Einzelflügel in Flügelformen manuell laminiert, anschließend ausgehärtet und an einer Nabe zu einem Propeller montiert. Dies bedeutet, dass die abgeformten Einzelflügel direkt die Endform besitzen und nicht durch Fräsen oder Schleifen eines Rohlings nachgearbeitet werden. Es ergibt sich also ein hoher Anspruch an die geometrische Güte der Flügelformen und der Überprüfung des Abformprozesses. Zum anderen kann der Betriebszustand nur dann erreicht werden, wenn Geometrie und Lagenaufbau den Vorgaben entsprechen und die engen Toleranzen eingehalten werden. Um diese zu überprüfen, ist daher ein weiteres Ziel, Grundlagen für ein Verfahren zur geometrischen Prüfung von CFK-Propellern und deren Komponenten auf Basis von 3D-Messtechnik und einer teilautomatisierten Datenauswertung zu entwickeln.

Die Lebensdauer der Flügel wird hauptsächlich durch Desintegration des Laminats ausgehend von den Ein- und Austrittskanten limitiert. Durch eine 3D-Verstärkung in diesen Bereichen können entscheidende Beiträge zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Laminats in z-Richtung erzielt werden. Diese Eigenschaftsverbesserungen führen zu einer effektiveren Werkstoffausnutzung wodurch sich auch das Impactverhalten verbessert. Dies schlägt sich in einer längeren Lebensdauer der Bauteile und größeren Wartungsintervallen nieder. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass 3D-Verstärkungen wirtschaftlich eingesetzt werden können, weshalb entsprechende Fertigungsverfahren zu entwickeln sind. Es war daher ein weiteres Projektziel, ein Verfahren zu entwerfen und prototypisch umzusetzen.

### **Simulation des Aushärtevorgangs**

Zielstellung war die Entwicklung von Simulationsmodellen zur Analyse des Formpressprozesses zur Fertigung eines dickwandigen Propellerblattes aus Faserverbundwerkstoffen. Das von der MET GmbH entwickelte Simulationsmodell ermöglicht eine Berechnung der zeitabhängigen Temperatur- und

Vernetzungsgradfelder im Bauteil bei unterschiedlichen thermischen Randbedingungen. Das Simulationsmodell beinhaltet geeignete CFK und GFK Werkstoffmodelle, welche die thermischen Eigenschaften und den temperaturabhängigen Harzaushärteprozess erfassen.

Eine wesentliche Grundlage für alle durchzuführenden Simulationen ist die Kenntnis der thermischen Stoffwerte der zu verwendenden Faserverbundwerkstoffe sowie die Reaktionswärme und Reaktionskinetik des Harzaushärteprozesses (Polymerisation). Um diese zu ermitteln wurden zunächst Versuche durchgeführt.

Mit den identifizierten Materialmodellen wurde dann der Standard-Formpressprozess simuliert. Zur Prozessverbesserung wurde mit Hilfe der erstellten Simulationsmodelle der Einfluss einer inneren und äußeren Temperierung auf das zeitabhängige Temperatur- und Vernetzungsgradfeld untersucht. Es wurde dazu der Wassertemperaturzyklus optimiert. Die Ergebnisse zeigen die technischen Möglichkeiten einer Erhöhung der Bauteilqualität durch eine deutliche Reduzierung der maximalen Temperaturen und der Vernetzungsgraddifferenz im Propellerblatt auf.

### **Entwicklung von CFK und GFK Werkstoffmodellen**

Ausgehend von der Auswahl des Harzsystems konnte dieses in Zusammenarbeit mit der Voith Turbo Advanced Propeller Technologies GmbH & Co. KG analysiert werden. Es wurden dazu 2 Versuche durchgeführt, bei welchen von der MET GmbH dünne Thermoelemente in eine GFK bzw. CFK Platte von relativ großer Dicke eingelegt und die Temperaturverläufe während des Formpressprozesses aufgenommen wurden. Diese gemessenen Temperaturverläufe bildeten die Grundlage für die Analyse des Werkstoffverhaltens und die Entwicklung von GFK und CFK Materialmodellen. Ergänzend wurde vom Harzhersteller ein DSC Diagramm zur Verfügung gestellt. Aus dem DSC Diagramm konnte insbesondere die Reaktionswärme abgelesen und für die Materialmodelle verwendet werden. Die Simulation der beiden Versuche ermöglichte eine Validierung der GFK und CFK Materialmodelle (Reaktionskinetik und Stoffwerte) durch Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturverläufe (siehe Abbildung 1).

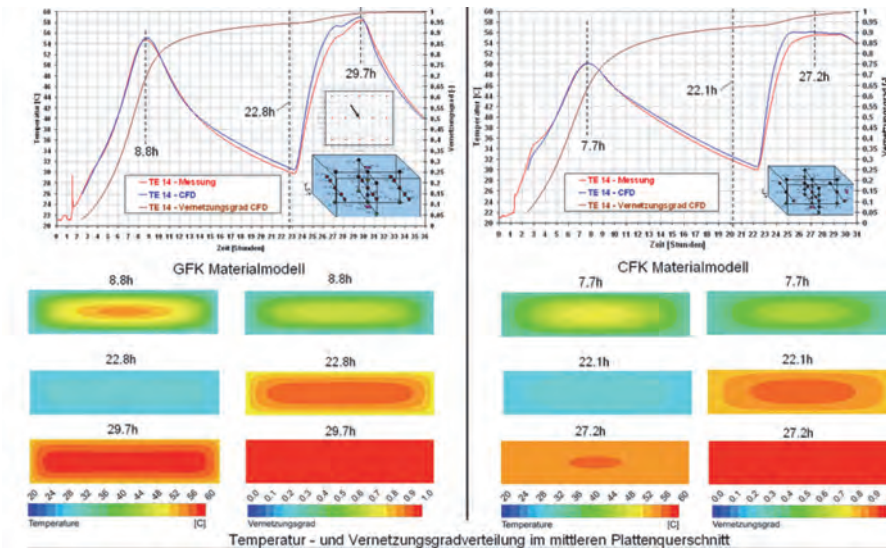


Abbildung 1: Beispiel für den Vergleich von gemessenen und simulierten Temperaturverläufen zur Validierung der GFK und CFK Materialmodelle (oben) und simulierte Temperatur- und Vernetzungsgradverteilungen im mittleren Plattenquerschnitt (unten)

## Simulation des Formpressprozesses

Bei der Modellbildung des Formpressprozesses für einen Demonstratorpropellerflügel wurde der reale Schichtenaufbau von Kohle- und Glasfasern berücksichtigt. Ergänzend wurde in die Simulation des Formpressprozesses der Legevorgang in 10 Schritten integriert. Bei der Simulation des Formpressprozesses wird nach dem Legevorgang die Form geschlossen und das System sich selbst überlassen. Es erfolgt eine Selbstaufheizung und Wärmeübertragung an die geschlossene Form, welche Wärme teilweise durch freie Konvektion an die Umgebung abführt. Nach einer bestimmten Prozesszeit wurde die Form konvektiv mit warmem Wasser beheizt. Es wurde dazu auf der Bauteiloberfläche auf der Grundlage des bekannten Formenaufbaus bzw. thermischen Widerstandes zwischen den Kühlrohren und der Forminnenseite eine Wärmeübergangszahl vorgegeben.

Zur weiteren Verbesserung des Formpressprozesses wurde von der MET GmbH untersucht, wie groß die Prozessverbesserung bei einer konvektiven, äußeren Temperierung der Bauteiloberfläche direkt nach dem Legevorgang ist. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch eine Wasserkühlung der Forminnenseite direkt nach dem Legevorgang die Maximaltemperatur reduzieren lässt. Bei näherungsweise gleicher Prozessdauer, wie bei dem Formpressprozess ohne direkte Temperierung nach dem Legevorgang kann die maxi-

male Vernetzungsgraddifferenz reduziert werden. Es ist durch eine direkte äußere Temperierung eine Prozessverbesserung möglich.

Eine weitere Prozessverbesserung kann durch eine innere, effektive Temperierung des Bauteils erreicht werden. Diese innere Temperierung wurde als Wand in der Mittelfläche des Gebietes mit E Glasfasern modelliert. Es wurde an dieser Wand eine Ersatzwärmeübergangszahl angenommen. Es ist aus den Simulationsergebnissen insgesamt zu erkennen, dass eine innere Temperierung des dickwandigen Propellerblattes eine deutliche Erhöhung der Produktivität und Bauteilqualität bewirkt. Weiterhin ist zu erkennen, dass auch beim Einsatz einer Rohrschlange zur inneren Kühlung, bei einer ausreichend langen Prozess- bzw. Kühlzeit eine positive Prozessbeeinflussung möglich ist.

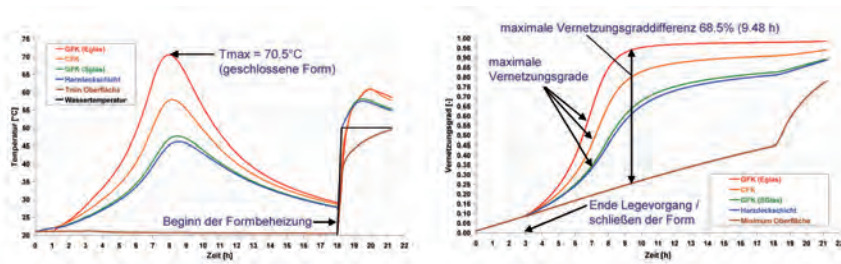


Abbildung 2: Formpressprozess des Propellerflügels mit äußerer Temperierung - simulierte zeitabhängige Verläufe der Maximaltemperatur (links) und des maximalen Vernetzungsgrades (rechts)

## RTM Prozess

Neben der Untersuchung des Formpressprozesses war ein weiteres Ziel, das Fließverhalten des Harzes während eines RTM-Prozess zur Herstellung des Propellerflügels zu simulieren, um mögliche grundsätzliche Probleme im Vorfeld von Versuchen zu erkennen.

Beispiele für im Projekt von der MET GmbH erstellte Modelle zur Simulation der Harzinjektion sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Lage, Anzahl und Größe der Ein- und Auslassöffnungen wurde in mehreren Zyklen optimiert. Die in Abbildung 3 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen die Möglichkeit der simulationsgestützten Optimierung des RTM Prozesses durch die Optimierung der Anzahl, Lage und Größe von Ein- und Auslassöffnungen für die Harzinjektion. Für diesen Prozess sind weitere Optimierungen möglich, z.B. wenn eine innere Temperiereinheit (s. Formpressprozess) verwendet werden soll.

Für die Einführung des RTM Prozesses zur Propellerflügelherstellung sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere ist eine Validierung mit Harzinjektionsversuchen sinnvoll, um relevante Modellparameter, wie z.B. die Permeabilität der Preform oder die Harzviskosität genauer bestimmen zu können. Nach dieser Modellvalidierung kann eine gezielte Optimierung des Harzinjektionsprozesses erfolgen.

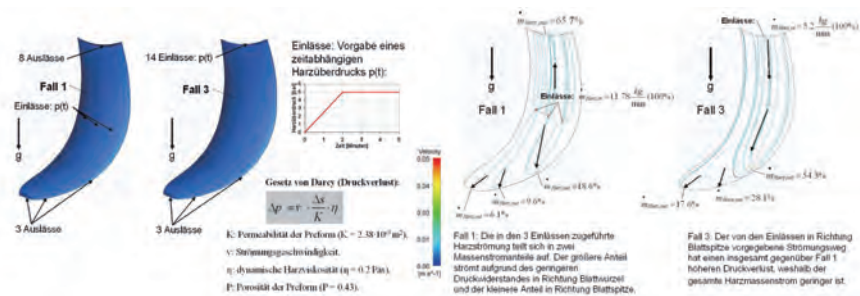


Abbildung 3: Links: Definition von Fall 1 und Fall 3, sowie des zeitabhängigen Harzdruckverlaufs an den Einlässen und des verwendeten Druckverlustmodells, Rechts: Stromlinien der Harzströmung für Fall 1 und Fall 3, einschließlich der sich nach 5 Minuten Füllzeit einstellenden Harzmassenströme

## Viskose Berechnungsverfahren mit Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Kopplung

Die Flügel von Compositepropellern sind flexibel und reagieren auf Belastung neben einer Durchbiegung mit einer merklichen Änderung ihrer Steigung. Dies wird zur besseren Anpassung des Propellers an die Motorkennlinie ausgenutzt. Allerdings wird dadurch auch eine treffsichere Auslegung erschwert und kann nur bei richtiger Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung erfolgreich sein. Voraussetzung ist, dass möglichst genaue Berechnungsverfahren für die Strömung und die Struktur zum Einsatz kommen.

Etabliert ist dafür aktuell ein Potenzialverfahren für die Strömungsberechnung und eine Finite-Elemente-Modellierung der Struktur. Damit waren bisher nur stationäre Probleme behandelbar. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde nun die Strömungsberechnung mittels RANSE-Verfahren mit der Strukturberechnung gekoppelt und an Beispielen validiert.

Für die Lösung des Berechnungsproblems wurde der Finite-Volumen-Code (FVM) OpenFOAM mit dem Finite-Elemente-Löser NX-Nastran (FEM) gekoppelt. Es handelt sich um eine starke Kopplung, die iterativ gelöst wurde. Dabei waren folgende Teilprobleme zu lösen:

- a) Interpolation der Drucklasten aus der Strömungsrechnung auf das FEM-Modell.
- b) Interpolation der Verschiebungen aus der FEM-Lösung auf das CFD-Gitter
- c) Verzerrung des CFD-Gitters auf die verformte Flügelgeometrie
- d) Implementierung des iterativen Kopplungsalgorithmus

Sowohl FVM als auch FEM-Verfahren verwenden Volumengitter für die Berechnung. Für die Strömungsrechnung mit dem FVM-Verfahren sind die Anforderungen an die Gitterauflösung jedoch um ein Vielfaches höher als an ein FEM-Gitter. Diese stark unterschiedlichen Detaillierungsgrade machen die Punkte a) und b) besonders schwierig. Bei der Interpolation der Lasten muss sichergestellt sein, dass die Gesamtkräfte und -momente auf beiden Modellen gleich groß sind. Dazu wurde ein Algorithmus nach [1] umgesetzt, der dies garantiert.

Die Propelleroberflächen sind zweiachsig gekrümmte Freiformflächen mit starken Krümmungsgradienten im Kantenbereich. Während die Kantenbereiche für die Strömungsrechnung möglichst gut aufgelöst werden müssen, ist für die strukturelle Berechnung die Auflösung hier eher grob. Daher ist in diesem Bereich keine saubere Überdeckung beider Modelle gegeben. Es ergibt sich speziell bei der Interpolation der Verschiebungen auf das CFD-Modell das Problem, dass nicht für alle Punkte Verschiebungswerte direkt aus der FEM-Lösung bestimmt werden können. Für die Behandlung dieses Problems wurde eine Kombination von Extrapolation und geeigneten Glättungsverfahren entwickelt.

So kann auf der Flügelfläche ein Verschiebungsfeld ohne Sprungstellen und Überschneidungen bestimmt werden. Anschließend erfolgt die Berechnung der Verschiebung aller inneren Knoten des FVM-Gitters. Dafür wird eine bereits in OpenFOAM implementierte Methode verwendet.[2]

Zur Erprobung des entwickelten Verfahrens wurde ein Modellpropeller aus Faserverbundmaterial simuliert. Für diesen Propeller stehen auch Messwerte zur Verfügung, sodass ein Vergleich mit den Berechnungsergebnissen erfolgen konnte. Die Propellercharakteristik beim flexiblen Propeller ist von der Drehzahl abhängig. In Abbildung 4 sind die experimentellen und berechneten Freifahrtkurven für zwei Drehzahlen gegenübergestellt. Es zeigt sich über einen weiten Fortschrittsgradbereich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung.

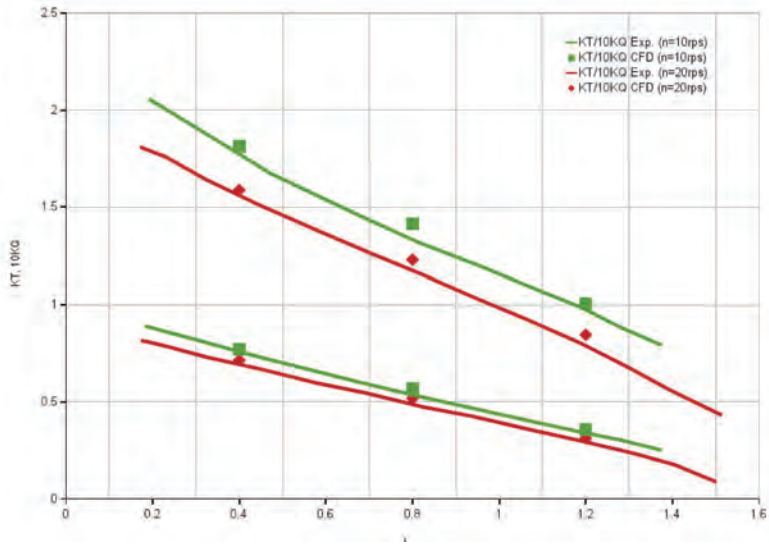


Abbildung 4: Vergleich zwischen experimentell bestimmter und berechneter Freifahrtkurve für zwei unterschiedliche Drehzahlen

Die Verformung des Flügels für einen Betriebspunkt ist in Abbildung 5 dargestellt. Die großen Verschiebungen im Bereich der Spitze sind deutlich erkennbar.

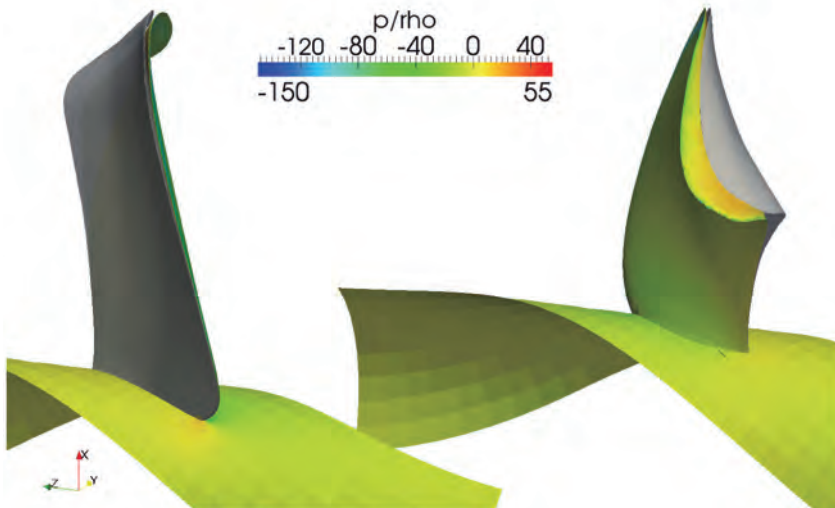


Abbildung 5: Verformung des Propellerflügels (ohne Überhöhungsfaktor)



### **3D-Prüfverfahren**

Durch das Fraunhofer AGP wird das Teilprojekt „Auswerteverfahren und Messkonzepte für die geometrische Prüfung von CFK-Propellerstrukturen und deren Komponenten“ bearbeitet. Ziel des Teilprojektes ist es, Grundlagen für ein Verfahren zur geometrischen Prüfung von CFK-Propellern und deren Komponenten auf Basis von 3D-Messtechnik und einer teilautomatisierten Datenauswertung zu entwickeln. Damit soll erreicht werden, dass die Prüfung von CFK-Propellern zum einen den Ansprüchen der Fertigungsmethode gerecht wird und zum anderen, dass die Kontrolle der Propeller im Vergleich zur herkömmlichen punktuellen Prüfung wesentlich schneller und effektiver ausgeführt werden kann.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen für folgende Arbeitsbereiche effiziente Lösungen erforscht werden:

- **Messaufbauten**  
Ziel ist die Configuration von experimentellen Messaufbauten zur flächenhaften 3D-Vermessung von CFK-Propellern und deren Komponenten. Durch die Entwicklung neuartiger Mess- und Prüfverfahren lassen sich die Ursachen und Auswirkungen für die zunehmenden Probleme durch Schwindungen und Temperaturverzüge bei dickwandigen CFK-Bauteilen ermitteln. Darüber hinaus soll eine deutliche Reduktion der Dauer einer Prüfung erreicht werden.
- **Softwareumsetzung**  
Es sollen softwareseitige Verfahrenswege und Softwarefunktionsmuster entwickelt werden. Dazu werden die Anforderungen der verschiedenen Zielstellungen nach Möglichkeit vereinheitlicht und automatisiert, um eine einfache und schnelle Datenverarbeitung zu gewährleisten.

### **Messaufbauten**

Eine flächenhafte Vermessung von Propellern kann mittels verschiedener Messsysteme realisiert werden. Daher wurde im ersten Schritt eine Aufgabenanalyse (Anforderungen, Produktionsschema, Bauteilanzahl) durchgeführt. Auf dieser Basis konnte ein gewichteter Vergleich verschiedener Messsysteme durchgeführt werden. Ergebnis ist, dass zur Aufnahme der Propeller Streifenlichtprojektoren mit Messfeldern von 0,5x0,5 bis 1,5x1,5m am besten geeignet sind.

Auf Basis dieser Geräteauswahl konnten Probemessungen durchgeführt und die Messaufbauten konfiguriert werden (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Messaufbau und -system für die Propellerprüfung

Mit dem Streifenlichtprojektor werden innerhalb weniger Sekunden vier Millionen 3D-Messpunkte aufgenommen. Um den gesamten Propeller auf diese Weise zu erfassen, werden mehrere Aufnahmen benötigt. Dazu wurde ein System entwickelt, welches auf kalibrierten Verknüpfungssäulen basiert. Diese Säulen mit bekannter Referenzpunktconfiguration werden in die Aufnahmen eingebracht und ermöglichen es, den Propeller sehr schnell zu vermessen. Ergebnis der Digitalisierung mit dem Streifenlichtprojektor ist ein Flächenmodell der realen Ist-Oberflächen (siehe Abbildung 7).

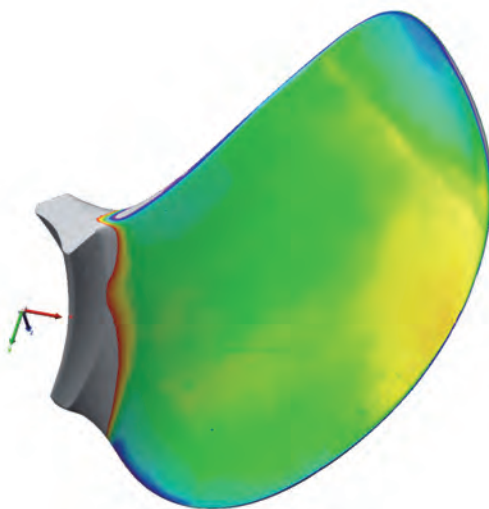


Abbildung 7: Soll-Ist-Vergleich in Falschfarbendarstellung

## Softwareumsetzung

Die Auswertesoftware soll die Möglichkeit bieten, die erfassten Flächendaten nach vorgegebenen Kriterien automatisch auszuwerten. Dazu mussten Algorithmen für die Auswertung der flächenhaften Messdaten neu entwickelt werden. Mit der Software ist die Prüfung der Kriterien wie Steigung, Profillänge, Profildicke, etc, möglich.

Zur Umsetzung wurde die Software in folgende Hauptmodule gegliedert:

- 1. Geometrie und CAD-Modul**  
Möglichkeiten Geometriedaten zu importieren und zu interpretieren, geometrische Operationen (z.B. Boolesche Operation, Vernetzung) durchzuführen
- 2. Interaktives Testmodul für globale oder selektive Durchführung der Prüfverfahren**  
Möglichkeit der Prüfung aller oder ausgewählter Kriterien, Darstellung und Protokollierung der Ergebnisse
- 3. Berechnungsmodul für die Überprüfung der Kriterien**  
Softwareimplementierung der Prüfverfahren und der einzelnen Kriterien

Die Software bietet die Möglichkeit die Auswertungen nach erfolgtem Durchlauf textuell und grafisch zu dokumentieren (siehe Abbildung 8).

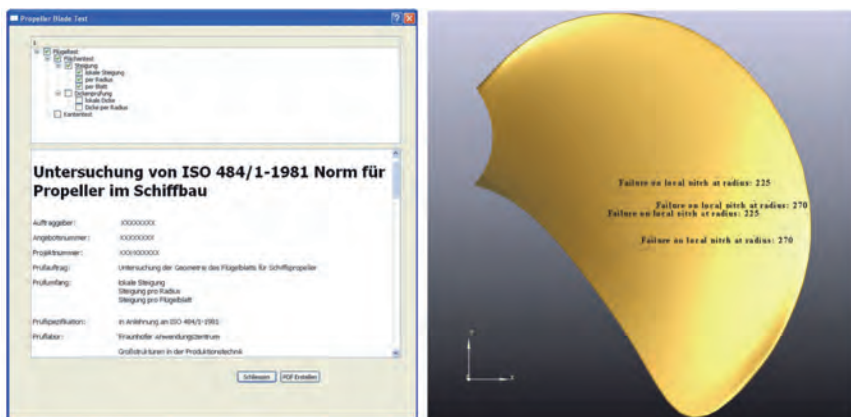


Abbildung 8: Textuelle und grafische Ausgabe der Prüfergebnisse nach ISO 484

### 3D-Verstärkung der Propellerkanten durch Z-Pins

Am Propeller treten neben den hydrodynamischen Lasten auch Schlagbelastungen an der Flügelkante bei Kollisionen mit Treibgut oder bei Grundberührung auf. Diese Schlagbelastungen führen zu einem lokal begrenzten, räumlichen Spannungszustand. Die hier untersuchten CFK-Propeller weisen auslegungsbedingt eine vorwiegend radiale Faserorientierung auf, woraus bei Schlagbelastungen auch hohe Beanspruchungen in Laminatdickenrichtung resultieren. In dieser Richtung sind durch den schichtweisen Aufbau keine Fasern angeordnet, wodurch die mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen vom Harz bestimmt werden. Diese sind deutlich schlechter als in Faserrichtung, weshalb bereits geringe Schlagbelastungen zu Faserbruch und Delaminationen führen.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Konzepte zur Verbesserung der interlaminaren Eigenschaften entwickelt wie das Vernähen oder das Vernadeln von Laminaten. Beim Vernadeln werden stiftförmige Elemente in das noch nicht ausgehärtete Laminat eingebracht und sorgen dadurch für einen zusätzlichen Stoffschluss in Dickenrichtung (Z-Richtung). Für die mit Z-Pins aus CFK vernadelten Bauteile konnte nachgewiesen werden, dass der Risswiderstand erhöht und die Delaminationsneigung reduziert ist, was auch zu verbesserten Impact-Eigenschaften führt. [3]

Die bisher eingesetzte Technologie zum Vernadeln von Laminaten beschränkt sich auf ebene Bauteile mit einer maximalen Dicke von 8 mm, die im Prepregverfahren hergestellt werden. Die hinsichtlich des Impactverhaltens zu optimierenden zweidimensional gekrümmten Propellerflügel werden dagegen im Nassverfahren gefertigt und erreichen Bauteildicken bis zu 120 mm. Um einen wirksamen Verstärkungseffekt mit Hilfe der Z-Pins zu erzielen, sind entsprechend lange Pins orthogonal zur Oberfläche einzubringen.

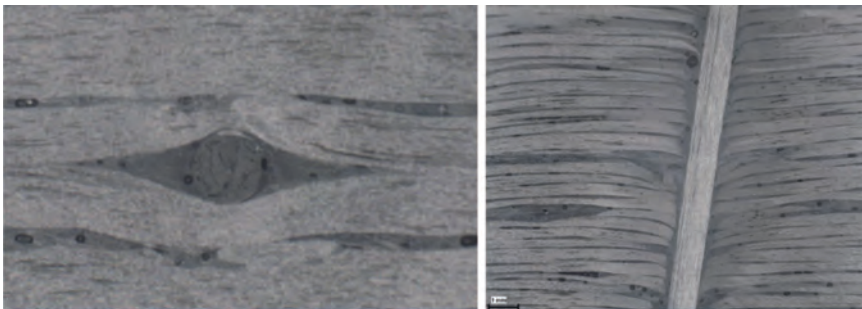
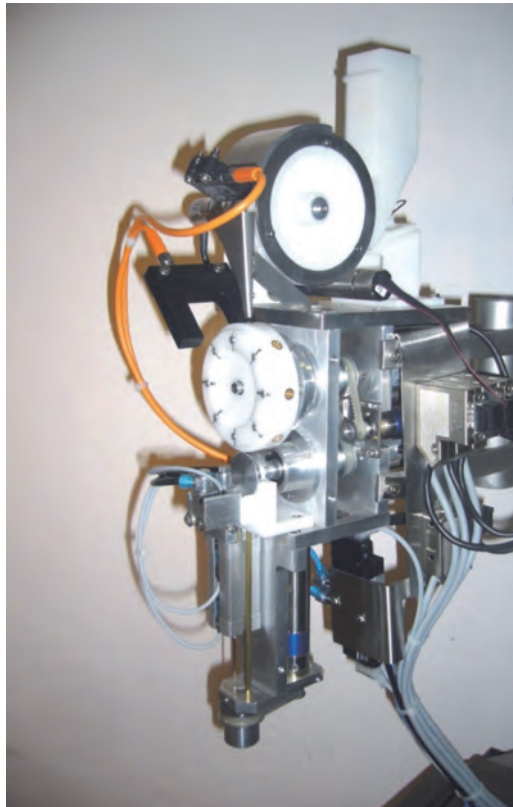


Abbildung 9: Schliffbilder parallel zur Laminatenebene (links) und senkrecht zur Laminatenebene (rechts)

Die Schliffbilder zeigen, dass mit dem Einbringen der Z-Pins die optimale Faserausrichtung gestört wird. Die Fasern weichen dem Pin aus, so dass sich um den Pin Harzinseln bilden. Weiterhin werden beim Eindrücken des Pins die Fasern mit eingezogen. Die daraus resultierende Faserwelligkeit führt zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Laminates in Faserlängsrichtung.

Aus den genannten Fragenstellungen haben sich zwei Bearbeitungsschwerpunkte herauskristallisiert, die im Rahmen des geförderten Teilprojektes bearbeitet wurden. Einerseits bestand die Forderung, ein Fertigungswerkzeug zum automatischen Vernadeln dickwandiger, gekrümmter Laminare zu entwickeln. Andererseits sind die Materialkennwerte der vernadelten Laminare zu bestimmen und Empfehlungen für Verstärkungsmuster abzuleiten.

Für dicke Laminare sind zwei neuartige Vernadelungsverfahren entwickelt worden. Im Gegensatz zu dem bekannten Preform-Verfahren werden hierbei die Z-Pins mit einem Durchmesser bis zu 2 mm und bis zu einer Länge von 25 mm mit wiederverwendbarem Pinträger gesetzt. Für die Propellerfertigung ist ein spezielles Setzwerkzeug entwickelt worden, welches die Pins einzeln verarbeitet.



*Abbildung 10:  
Vernadelungswerkzeug*

Die mit einer konischen Spitze versehenen Pins werden in einem Magazin vorgehalten. Ein Vereinzelmechanismus fördert die CFK-Stifte in eine Ausrichteeinheit, welche die Pins so ausrichtet, dass die Pinspitze in Förderrichtung gelangt. Die so ausgerichteten Pins werden in der sich anschließenden Eindrückvorrichtung in das nasse Laminat einzeln eingebracht. Das Vernadelungswerkzeug wird mit Hilfe eines Handlingsystems konturnah über die Laminatoberfläche geführt, so dass ein automatisches Einbringen der Pins in einem definierten Muster möglich ist. Mit diesem Vernadelungswerkzeug werden Taktzeiten von einem Pin/ Sekunde erreicht, sodass in der Zeitspanne von einer ½ Stunde das Vernadeln der Eintrittskante eines großen Propellerblattes möglich ist.

Um den Einfluss der Z-Pins auf die Materialkennwerte einschätzen zu können, wurden umfangreiche Versuchsreihen an vernadelten und unvernadelten Probekörpern durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Z-Pin-Konfigurationen auf die interlaminare Festigkeit und die inplane-Eigenschaften bestimmt.

Eine Gegenüberstellung der inplane-Eigenschaften sowie der Rissenergiefreisetzungsrates als Maß für die interlaminare Festigkeit zeigt, dass die Vorteile der 3D-Verstärkung mit Z-Pins dominieren. Für alle Pin-Konfigurationen wurde festgestellt, dass mit zunehmender Pindichte der E-Modul abfällt und die interlaminare Festigkeit erhöht ist. Der Abfall des E-Moduls beträgt jedoch 18 % bei der hier untersuchten maximalen Pindichte von 3,14 % mit Pindurchmesser 2 mm. Bei einer Pindichte von 1,4 % wurde eine Verschlechterung des E-Moduls von 8 % ermittelt. Dem steht eine Erhöhung der Rissenergie von 68 % gegenüber. Bei den GIC-Versuchen versagten die Probekörper mit einer Pindichte von 3,14 % und 2 mm Pindurchmesser durch Bruch, sodass das Risswachstum nur begrenzt erfasst werden konnte. Für den im Plate-Twist-Test ermittelten Schubmodul konnte für sämtliche Pin-Konfigurationen kein signifikanter Unterschied zur unverpinten Referenzprobe festgestellt werden.[4]

Die durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Rissenergiefreisetzungsrates nach Mode I zeigen das Verhalten vorgeschädigter Laminates hinsichtlich der Rissausbreitung. Ein weiterer Aspekt ist in diesem Zusammenhang das Verhalten des Laminates bei Eintreten des Erstschadens z.B. durch Stoßbelastungen auf die Laminatkante, was durch weitere Untersuchungen herausgearbeitet werden soll. Dazu ist ein spezieller Impactprüfstand aufgebaut worden, bei dem Auftreffgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s und Impactenergien von bis zu 350 J realisiert werden können.

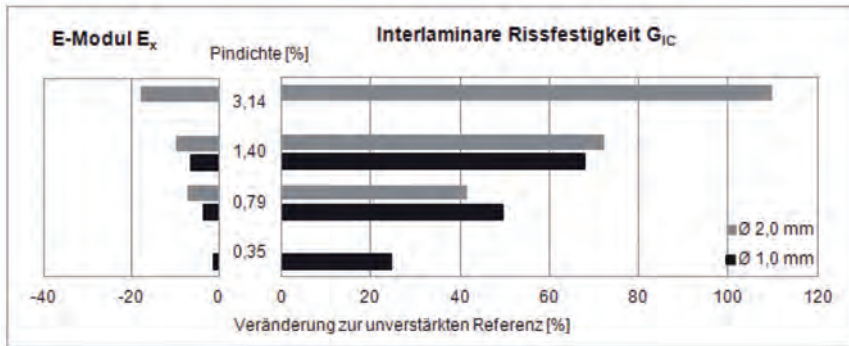


Abbildung 11: Gegenüberstellung mechanischer Eigenschaften verstärkter und unverstärkter Laminate

Bei der Verarbeitung der Z-Pins zeigte sich, dass sich die Pins im Durchmesser von 1,0 und 1,5 mm problemlos in das Laminat eindrücken lassen. Bei den Pins im Durchmesser 2 mm traten Probleme auf, weil sich die Pins zum Teil aufspalten und damit erhebliche Schäden im Laminat verursachen. Die Verarbeitung der Pins mit dem Vernadelungswerkzeug ist ab einem Durchmesser von 1,5 mm funktionssicher. Die 3D-Verstärkung mit Z-Pins im Durchmesser von 1,5 mm weist schon eine deutliche Verbesserung der interlaminaren Festigkeit bei gleichzeitiger kalkulierbarer Verschlechterung der inplane-Eigenschaften auf, sodass für die 3D-Verstärkung der Propellerblätter unter Berücksichtigung der technologischen Parameter Pins mit einem Durchmesser von 1,5 mm und einer Pindichte von 1-1,5 % empfohlen werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Vorhabens „Entwicklung von Konstruktions-, Simulations- und Prüfverfahren für 3-D verstärkte CFK-Propellerstrukturen bis 6 m Durchmesser“ konnten wertvolle Ansätze zur Verbesserung der Berechnung und Herstellung von Faserverbund-Propellern untersucht werden.

Mit Hilfe von Simulationen des Fertigungs- und Aushärteprozesses konnten Möglichkeiten zur Verringerung der Temperaturgradienten während des Aushärtens und der damit verbundenen Eigenspannungen identifiziert werden. Die Realisierung einer inneren Kühlung während des Aushärtevorgangs ist konstruktiv erarbeitet und wird derzeit umgesetzt und erprobt.

Erste Simulationen eines RTM-Verfahrens zeigen keine prinzipiellen Hindernisse bei der Anwendung dieser Technologie auf Propeller. Allerdings besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf, bis dieses Verfahren in die Fertigung eingeführt werden könnte.

Die Implementierung und Validierung verbesserter Berechnungsverfahren konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Verfahren fanden schon Einsatz bei laufenden Projekten und haben sich bereits bewährt.

Es wurden die Grundlagen für eine schnelle flächenhafte Prüfung von Propellerstrukturen gelegt. Die Messaufnahme und Prüfung eines Propellers mit 3m Durchmesser wird mit dem neuen Verfahren auf 60 Minuten kalkuliert. Damit ist die Prüfung mindestens um den Faktor 5 schneller als bisher. Es kann also wesentlich schneller mit erhöhter Informationsdichte geprüft werden. Dies wird einen Beitrag dazu leisten, die Qualität und Effektivität bei der Herstellung zu erhöhen.

Die Z-Pin-Verstärkung hat sich als eine vielversprechende Technologie zur Verbesserung der Schadenstoleranz von schlagbeanspruchten CFK-Propellern erwiesen. Im Rahmen dieses Projekts wurden umfangreiche systematische Untersuchungen zur Verstärkungswirkung und zum Einfluss der Pins auf die inplane-Eigenschaften des Laminats durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten standen in diesem Umfang bisher nur für Prepreg-Werkstoffe zur Verfügung. Weiterhin wurden wichtige Erfahrungen zur Verarbeitung der Pins in der Fertigung gesammelt.

## Literatur

- [1] Farhat et al., „Load and motion transfer algorithms for fluid/structure interaction problems with non-matching discrete interfaces: Momentum and energy conservation, optimal discretization and application to aeroelasticity“, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 157, pp. 95-114, 1998
- [2] H. Jasak, Z. Tukovic, „Automatic Mesh Motion for the Unstructured Finite Volume Method“, *Transactions of FAMENA*, Vol. 30 (2), 2006
- [3] A. P. Mouritz, „Review of z-pinned composite laminates“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38 (12), pp. 2383-2397, 2007
- [4] S. Bartke, C. Kliewe, „3D-Verstärkung von Schiffspropellern in Carbon-Faser-Verbundbauweise durch Z-Pins“, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, Rostock, Deutschland, 2011