

# **Preforming in großer Dimension-innovativer Ansatz in der Rotorblattfertigung**

## **Inhalt**

Um der Forderung nach immer kürzeren Fertigungszeiten und höheren Qualitätsansprüchen dieser immer größer werdenden Faser-Kunststoff-Verbundbauteile (FVK) gerecht zu werden, wurden vom Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK) der Universität Bremen, dem Hersteller von technischen Geleugen, der Saertex GmbH & Co. KG und dem Rotorblatthersteller Areva Blades GmbH, im Verbundprojekt *mapretec* [1] neue Fertigungstechnologien und automationsfähige Materialien entwickelt. Hiermit ist es möglich, einen automatisiert eben abgelegten Textilstapel durch Umformung in einen endformnahen Preform bei synchroner, automatischer Qualitätskontrolle zu wandeln. Gemeinsam mit der Preforming-Technologie und der Harzinfusionstechnik ergibt sich auf diese Weise eine innovative Prozesskette für die Herstellung von Rotorblattkomponenten mit niedrigen Zykluszeiten.

## **1 Einleitung**

In den letzten Jahren sind zwei Tendenzen bei der Fertigung von Rotorblättern von Windenergieanlagen (WEA) zu beobachten. Zum einen sind die leistungsstärkeren Anlagen [2] und damit nach die wachsenden Längen der Rotorblätter [3], zum anderen ist es die Forderung nach kürzeren Fertigungszeiten mit steigenden Qualitätsanforderungen [4].

Aktuell wird versucht, diesen Anforderungen mit Hilfe der Automatisierungstechnik zu begegnen. Während für die mechanischen Nachbearbeitungsprozesse oder die Lackierung der Rotorblätter schon einige industrielle Lösungen verfügbar sind, sind die Handhabungsprozessschritte für die verstärkenden technischen Textilien nach wie vor ein Thema in der Forschung. Komplex gestaltet sich dabei, die biegeweiche Charakteristik der empfindlichen Materialien bei den zu entwickelnden Handhabungstechnologien sowie der Prozessgestaltung zu berücksichtigen.

Ein maßgebliches Qualitätskriterium bei den Handhabungsprozessen von technischen Textilien ist die Positioniergenauigkeit bzw. die Reproduzierbarkeit. Durch diese werden die strukturellen Eigenschaften der FVK-Bauteile im späteren Betrieb bestimmt. Insbesondere die Ausrichtung bzw. Orientierung der technischen Textilien als Ganzes sowie der einzelnen Faserbündel (Rovings) innerhalb des Textils müssen, wie vom Konstrukteur festgelegt, entsprechend der späteren Bauteilbelastung erfolgen.

## **2 Grundlagen und Konzept**

Am BIK wird im Rahmen des Verbundprojektes *mapretec* eine Versuchsanlage für die Herstellung von Preforms für Rotorblätter von WEA entwickelt und aufgebaut. Basis ist die Betrachtung einer ganzheitlichen automatisierten Prozesskette von der Lagerung der textilen Halbzeugrollen bis zum fertig aufgebauten, endkonturnahen Preform für ein Rotorblattsegment.

Als Preform wird dabei ein Paket trockener technischer Textilien vor dem Harzinfusionsprozess bezeichnet. Dieses wird ggf. durch geeignete Bindertechnologie in der gewünschten Geometrie

(eben oder endkonturnah) gehalten bzw. im Formwerkzeug oder auf einer Transportvorrichtung (Preform-Träger) fixiert.

Der entwickelte Prozessablauf zum Aufbau und zur Umformung eines Preforms ist in Bild 1 dargestellt. In diesem Artikel soll insbesondere auf die Umformeinheit mit Preform-Träger eingegangen werden.

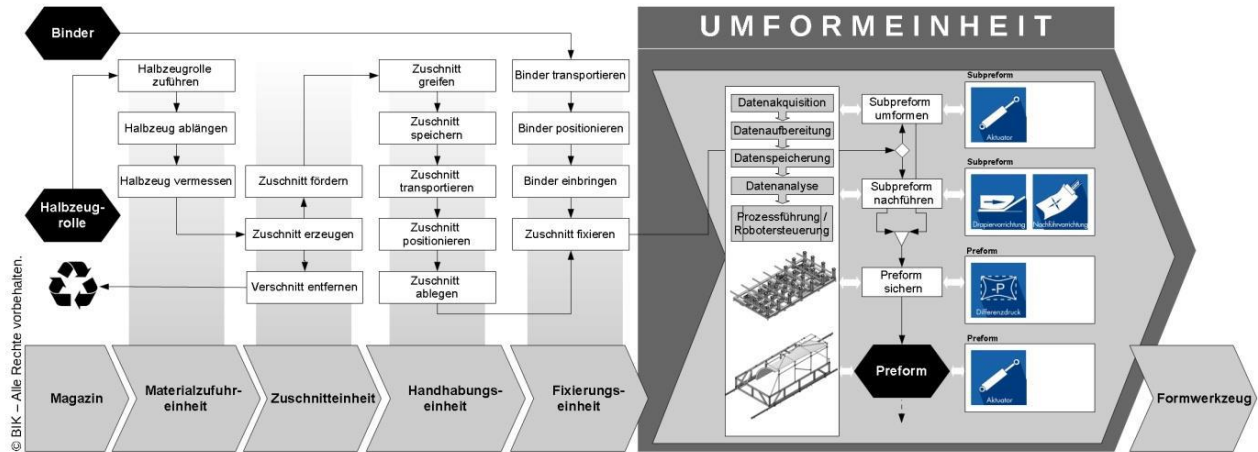


Bild 1: Prozessablauf zum Aufbau und zur Umformung eines Preforms (Preforming) (aufbauend auf [5]) mit detaillierter Darstellung der Prozesse, die durch die Umformeinheit erfolgen

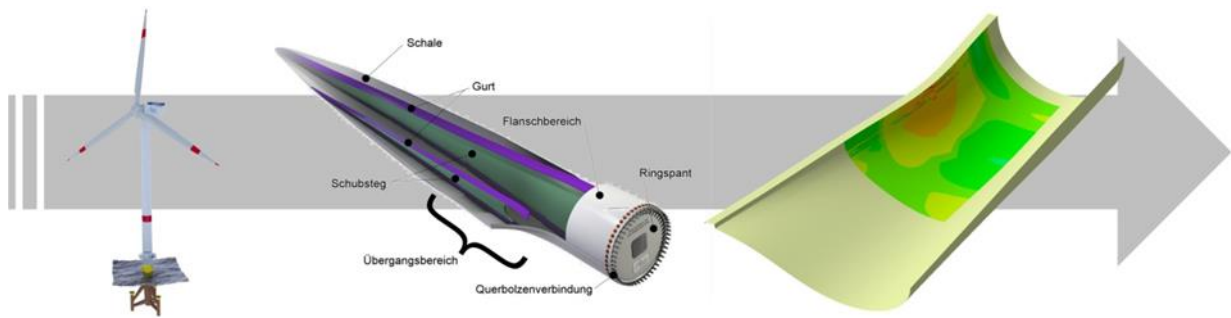
Für die Prozessschritte der Umformeinheit ist es im Vorfeld erforderlich, dass die einzelnen technischen Textilien definiert und reproduzierbar auf der flexiblen Verformungsfläche positioniert werden.

Aus diesen Materialien wird mit Hilfe der Materialzufuhreinheit, der Zuschnitteinheit und der Handhabungseinheit ein ebener Preform automatisiert auf dem Preform-Träger aufgebaut. Beim Aufbau des zunächst ebenen Preforms ist dabei an Bereichen mit geringer relativer Verschiebung bzw. geringem relativen Verzug Binder zur Fixierung der einzelnen Zuschnitte zueinander sowie auf der flexiblen Verformungsfläche aufzubringen. Für diese Prozessschritte wurde am BIK eine Fixierungseinheit entwickelt [6], die in der Lage ist, automatisch definierte Bereiche des Preforms mit einem epoxidharzbasierten Klebefilm zu versehen.

Nach dem abgeschlossenen Aufbau wird dieser Textilstapel durch die Umformeinheit als Ganzes zum endkonturnahen Preform umgeformt.

Anschließend wird dieser im Formwerkzeug positioniert, in seine Endkontur gebracht und gesichert, um in einem nächsten Prozessschritt die Vorbereitungen des Harzinfusionsprozesses zu beginnen.

Die im Projekt zu entwickelnden Prozesse bzw. die zu entwickelnde Anlagentechnik soll durch die Umsetzung am geometrisch komplexesten Segment des Rotorblattes demonstriert werden. Dieses befindet sich zwischen zylindrischem Flanschbereich und aerodynamisch wirksamem Bereich (vgl. Bild 2). Die für die Drapierung wichtige Information der Gaußschen Krümmung des Formwerkzeug ist in farblicher Darstellung qualitativ dargestellt. Die Gaußsche Krümmung definiert sich durch das Produkt der beiden Hauptkrümmungen ( $k_1=1/r_1$  und  $k_2=1/r_2$ ) und damit durch die Radien in x und y-Richtung des Formwerkzeugs.



*Bild 2: Schematische Darstellung des gewählten Rotorblattsegments am Übergangsbereich zwischen zylindrischem Flanschbereich und aerodynamisch wirksamem Bereich. Darstellung mit Gaußscher Krümmung*

Dieses Segment hat eine Größe von ca. 18,0 m<sup>2</sup> (6,0 x 3,0 m) und besitzt an seiner dicksten Stelle ca. 20 Lagen technische Textilien, sogenannte Multiaxialgelege (MAG), übereinander. Es besitzt Bereiche mit negativer und positiver Gaußscher Krümmung im Bereich von  $-4,6e-0,004 \text{ mm}^{-1}$  bis  $5,8e-0,004 \text{ mm}^{-1}$ . Diese geometrische Analyse ist Ausgangspunkt der Entwicklung von Prozess- und Anlagentechnik. Parallel werden die Zuschnitt- und Legepläne des Bauteils auf eine Automatisierbarkeit in Verbindung mit der zu entwickelnden Prozess- und Anlagentechnik hin untersucht.

### 3 Konstruktive und textiltechnische Entwicklung

Die konstruktiven Entwicklungen teilen sich in zwei Bereiche. Das eine ist die Entwicklung der Handhabungs- und Automatisierungstechnik durch das BIK auf der Basis der in Bild 1 beschriebenen Prozesskette. Zeitgleich werden von Saertex textiltechnische Entwicklungen für technische Gelege speziell für automatisierte Handhabungsprozesse und große Umformwege, wie sie bei der gemeinsamen endkonturnahen Umformung eintreten, durchgeführt. Die Schwierigkeit besteht darin, eine gleichzeitig gute Durchtränkbarkeit sicherzustellen.

#### 3.1 Anlagentechnik

Kern der Gesamtprozesskette ist der eigentliche Preforming-Prozess, welcher in Bild 1 hervorgehoben und im Detail dargestellt ist. Diese Prozesskette wird am BIK an der dort aufgebauten Forschungsanlage (vgl. Bild 3) zur biegeweichen Handhabung entwickelt.

Durch diesen Ansatz wird der kritische Pfad, insbesondere durch die Reduzierung der Belegungszeiten der Rotorblattform, entlastet. Ursächlich dafür ist eine Fertigung der Preforms parallel oder vorab zum Fertigungsprozess in der Hauptform, in welche die fertig aufgebauten Preforms eingelegt werden können.

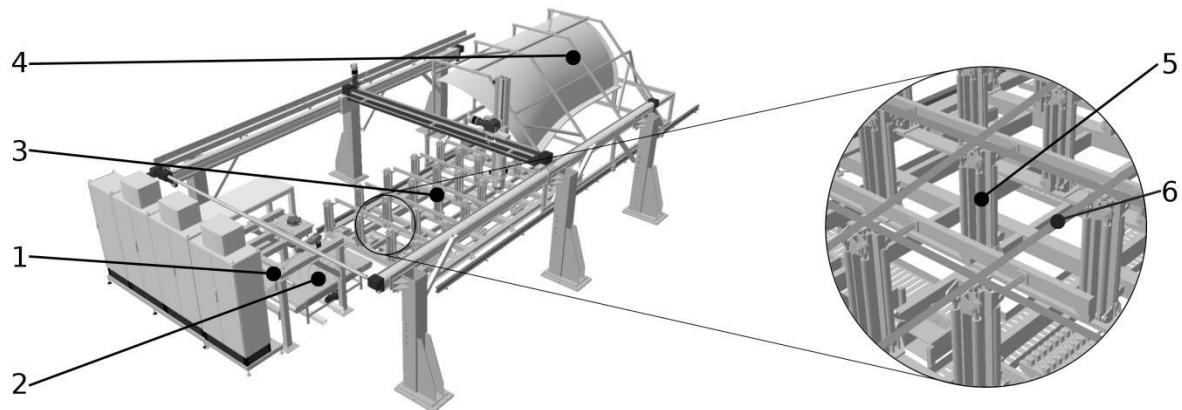
Neuartig ist eine Verformung der trockenen, automatisiert aufgebauten Textilstapel in einer geometrischen Dimension für Rotorblätter.

Um eine konstruktive Entwicklung der Umformeinheit mit Preform-Träger durchführen zu können, waren eine Reihe von Versuchen erforderlich [7], um das Prozess- und Materialverständnis zu gewährleisten. Anschließend wurde die Konstruktion der einzelnen Einheiten der Forschungs- und Demonstrationsanlage mit Hilfe der VDI 2221 [8] entwickelt.

Die maßgeblichen Faktoren für die Funktion der Umformeinheit lassen sich in mechanische und regelungstechnische Anforderungen einteilen. Dies sind für die Mechanik, die hydraulischen Aktuatoren, das flexible Profilraster sowie die flexible Verformungsfläche. Für die

Regelungstechnik sind dies die echtzeitfähige Regelung sowie die Einbindung und Auswertung von Sensorik zur Erfassung der Verformungsgeometrie.

In Bild 3 ist der konstruktive Entwurf der Umformeinheit (3) mit 28 hydraulischen Aktuatoren (5), flexiblem Profilraster (6), flexibler Verformungsoberfläche (der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt) sowie mit dem Formwerkzeug des exemplarischen Rotorblattsegmentes (4) dargestellt.



*Bild 3: Konstruktive Übersicht, 1: Materialzufuhreinheit, 2: Zuschnitteinheit, 3: Umformeinheit, 4: Formwerkzeug, 5: hydraulischer Aktuator, 6: flexibles Profilraster*

Die hydraulischen Aktuatoren arbeiten mit einem Betriebsdruck von 7 N/mm<sup>2</sup>. Jeder Aktuator kann bei einer Grundlänge von 750 mm einen Hub von 1.700 mm machen. Die maximale Verfahrgeschwindigkeit beträgt dabei 100 mm/s und ist abhängig von der Anzahl der zeitgleich bewegten hydraulischen Aktuatoren.

Das flexible Profilraster aus pultrudierten Faserverbundkunststoffprofilen ist in der Lage die erforderlichen Verformungen für die Geometrien des betrachteten Rotorblattbereichs durch die Verstellung der Aktuatoren zu erreichen. Die Kreuzungspunkte der Profile ist mit einem Gelenk realisiert, welches zwei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade besitzt. Dadurch sind auch komplexe Formen, wie der untersuchte Übergangsbereich eines Rotorblattes zu realisieren. Eine spezielle, drauf schwimmend gelagerte, flexible Verformungsoberfläche aus einem Sandwichtaufbau, bestehend aus verschiedenen Polymerstrukturen, dient als Träger für den textiltechnischen Aufbau. Für den CAE-unterstützten Konstruktionsprozess ist diese Aufgabe eine Herausforderung, da die hohen Verformungseigenschaften des Materials mit berücksichtigt werden müssen.

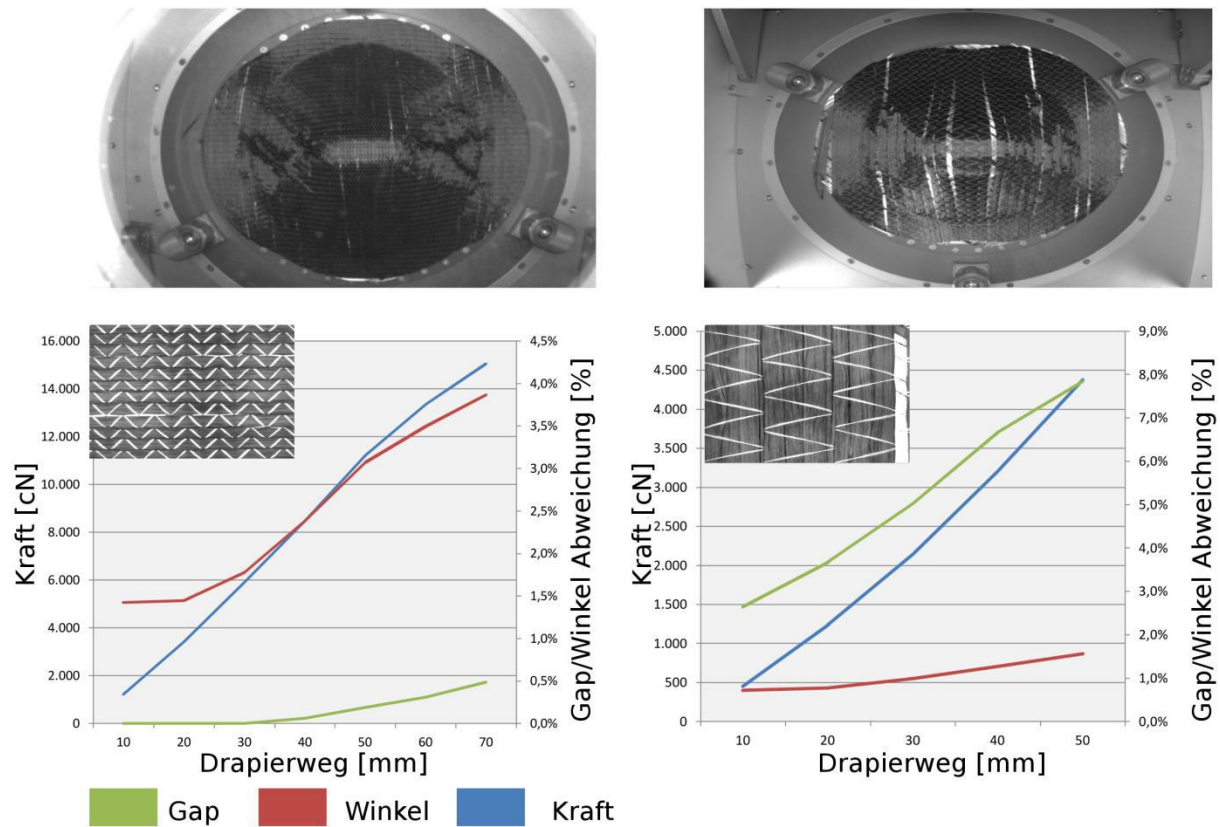
### **3.2 Textiltechnik**

Für die textiltechnische Entwicklung eines hochdrapierfähigen Multiaxialgeleges, welches zugleich die komplexe dreidimensionale Umformung ohne Faltenbildung zulässt, eine gute Durchtränkbarkeit mit dem Matrixwerkstoff garantiert und den Anforderungen der automatisierten Handhabung gerecht wird ist umfassendes Know-how erforderlich.

Zusätzlich sind der textiltechnischen Entwicklung strikte Rahmenbedingungen durch den Rotorblattkonstrukteur und die Zulassungskriterien gesetzt.

Vorgabe ist ein triaxiales Halbzeug mit einer Ausrichtung von  $\pm 45^\circ$  Glasfaser- und  $0^\circ$  Carbonfaser-Rovings), ein definiertes Gesamtflächengewicht des textilen Halbzeugs und das Gewicht und Material des einzusetzende Rovings.

Basierend auf den bisher in der Rotorblattfertigung eingesetzten Gelegen sind vergleichende Untersuchungen hinsichtlich der Tränk- und Drapierbarkeit erforderlich. Für die Bestimmung der Drapierfähigkeit wird der "Drapetest" genutzt, mit dem es möglich ist, die Drapierfähigkeit eines technischen Textils quantitativ und qualitativ darzustellen (vgl. dazu Bild 4).



*Bild 4: Materialcharakterisierung mit Hilfe des "Drapetest" (ZIM-Forschungsprojekt: Messsysteme zur Charakterisierung der Drapierbarkeit von Multiaxialgelegen. 03.2010 - 12.2011); links: Ausgangsmaterial; rechts: neu entwickeltes Material mit hoher Drapierfähigkeit.*

Dabei wird ein technisches Textil durch einen kegelförmigen Stempel verformt. Parallel werden die Winkelabweichungen (GAP) zwischen den sich durch die Verformung verschiebenden Fasern bzw. Faserbündeln vermessen. Die Kombination aus der erforderliche Kraft und dieser Winkelabweichungen aufgetragen über den Verformungs- bzw. Drapierweg des Stempels lässt eine Information über die Drapierfähigkeit zu.

Die Drapierfähigkeit von Multiaxialgelegen ist unter anderem durch die Art der Vernähung und dem eingesetzten Roving-Typ bzw. Roving-Werkstoff (Glas oder Carbon) abhängig. Durch mehrere Iterationsschleifen ist ein neues MAG entwickelt worden, das im Gegensatz zu der ursprünglich stark eingeschränkten Drapierfähigkeit eine optimale Anpassung an die komplexe 3D-Struktur ermöglicht. Dadurch wird der oben beschriebene automatisierte Fertigungsprozess optimal von der textiltechnischen Seite aus unterstützt.

## 4 CAE-Schnittstelle

Für die Programmierung des automatisierten Umformprozesses hat sich eine Schnittstelle der Anlagenregelung zum CAD-System als sinnvoll herausgestellt. Diese Schnittstelle wurde im

Rahmen des Projektes entwickelt (vgl. Bild 5). Dazu wurde in einem ersten Schritt die Oberfläche des Formwerkzeugs mit Hilfe eines 3D-Laserscanners vermessen und in das 3D-CAD-System Catia V5 eingefügt. Diese Geometriedaten sind die Basis für die weiteren Analysen des Umformprozesses.

Die Analyse wird mit Hilfe eines parametrischen Modells durchgeführt. Dadurch lassen sich die vorteilhaftesten Positionen der hydraulischen Aktuatoren auf dem flexibel einstellbaren Grundträger  $(x_{i,t}, y_{i,t})$  sowie die dann erforderlichen Ausfahrlängen  $(z_{i,t})$  ermitteln. Die verschiedenen Kombinationen werden durch den Vergleich der idealen (Endkontur) und der tatsächlich erreichten Geometrie bewertet.

Die ermittelten, optimalen Positionen werden als Geometriedatenset (Matrix) durch die entwickelte Schnittstelle direkt in die echtzeitfähige Regelung der hydraulischen Aktuatoren übertragen.

Für diese Schnittstelle wurde ein Programm mit der mathematischen Programmiersprache MATLAB® erstellt. Weitere Parameter, wie Verfahrensgeschwindigkeit  $(v_{i,t})$  und Beschleunigung  $(a_{i,t})$  der Aktuatoren sowie die Umformstrategie, können durch diese Schnittstelle eingestellt werden. Als Ausgabeformat wird der SPS-Code für den eigentlichen Umformprozess erzeugt.

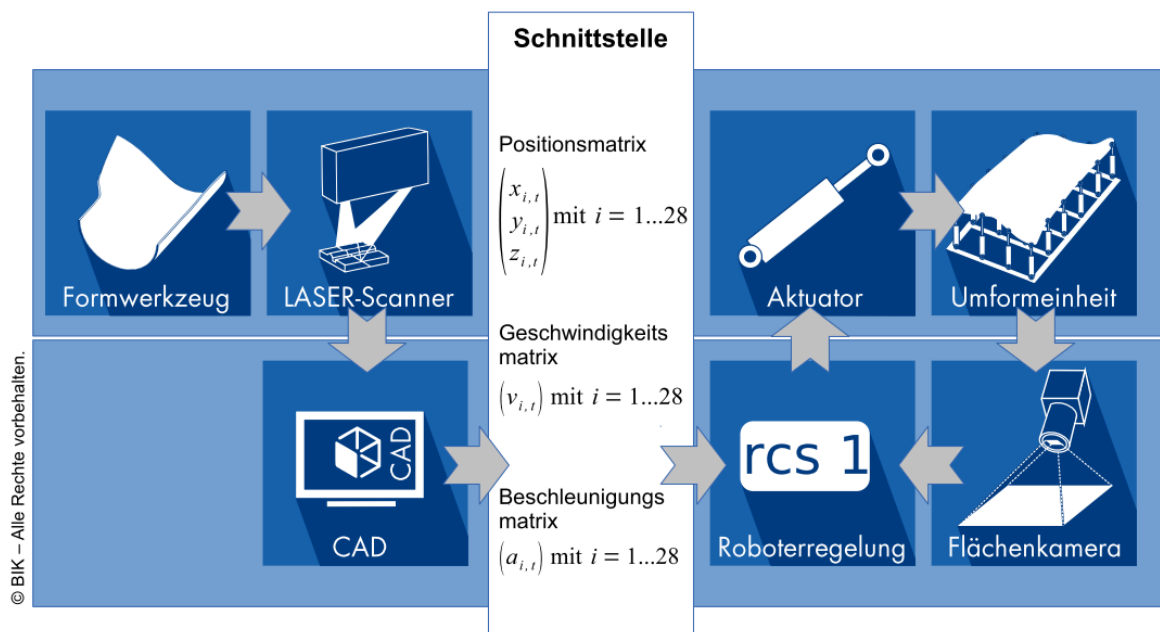
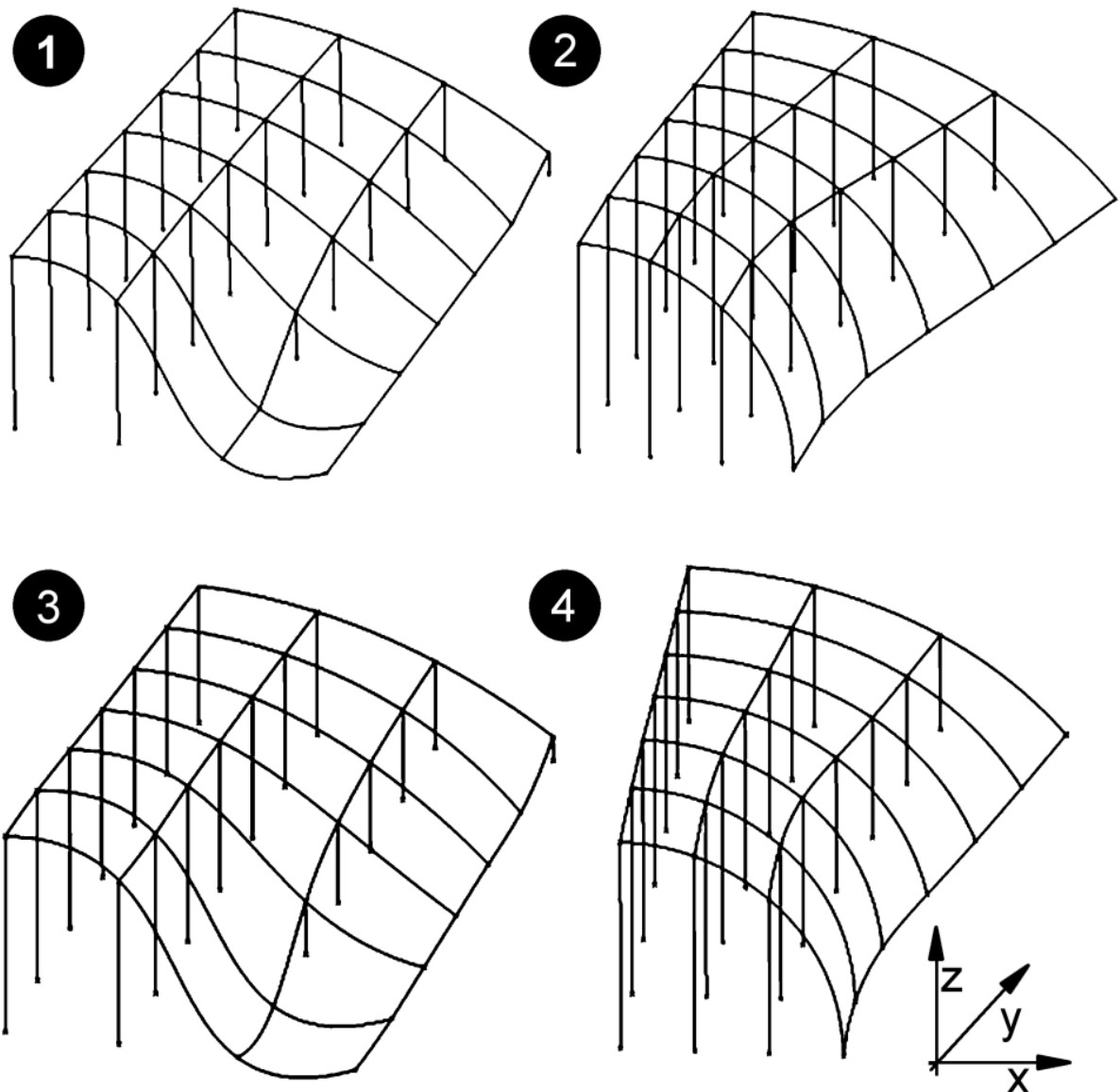


Bild 5: Schnittstelle zwischen 3D-CAD System und der Regelung der Umformeinheit

In Bild 6 sind exemplarische Geometrieanalysen verschiedener Positionen und Ausfahrlängen der hydraulischen Aktuatoren mit Hilfe des 3D-CAD-Systems Catia V5 dargestellt. Parallel stellt das Bild 6 Untersuchungen zu zwei verschiedenen Varianten des Profilrasters (Spline, abschnittsweise definierte Geradenfunktion) in x-Richtung dar.



*Bild 6: 1: Variante, in welcher die Stützen in gleichem Abstand stehen und eine Reihe der Stützen (y-Richtung) jeweils mit einem Spline verbunden ist. Die Verbindung der Stützen in x-Richtung geschieht durch einen Polygonzug; 2: gleiches Prinzip wie 1, jedoch sind hier die Abstände der Stützen zueinander Geometrieoptimiert; 3: die Polygonzüge weichen weiteren Splines bei gleichem Stützenabstand; 4 zeigt schließlich eine Variante, in welcher ebenfalls nur Splines bei unterschiedlichem Stützenabstand zu sehen sind, welches das beste, wenn auch konstruktiv aufwendigste Ergebnis zeigt*

Bild 7 stellt die in x-, y- und z- Position auf das zu untersuchende Rotorblattsegment eingerichteten hydraulischen Aktuatoren dar.



*Bild 7: Auf das zu untersuchende Rotorblattsegment in x-, y- und z-Position eingerichtete hydraulische Aktuatoren*

## 5 Prozesstechnik

Nachdem vor der Anlagenentwicklung experimentelle Untersuchungen im kleineren Maßstab (1:9) [9] sowie Simulationen des Umformvorganges durchgeführt wurden, finden aktuell am Institut experimentelle Untersuchungen des Umformvorganges statt. Dabei steht die Strategie der Umformung im Zentrum der Betrachtungen. Exemplarisch wie folgend drei Strategien zur Umformung:

- Bei der ersten Variante erfolgt ein Zwischenschritt im Umformprozess. Dabei werden die Aktuatoren gemeinsam in eine Position mittlerer Höhe verfahren. Anschließend erfolgt das Verfahren in die endkonturnahe Position. Dabei wird ein Teil der Aktuatoren weiter ausgefahren, ein anderer Teil wieder eingefahren.
- Die zweite Variante formt den textilen Lagenstapel durch Absenken der hydraulischen Aktuatoren um. Dazu werden zuerst alle Aktuatoren in eine obere Position verfahren und nachfolgend ein Teil wieder abgesenkt, so dass sich die endkonturnahe Position ergibt.
- In der dritten Variante werden die Aktuatoren von der ebenen Position aus geregelt in die endkonturnahe Geometrie verfahren.

Das Formwerkzeug wird mit Hilfe eines Schienensystems vor dem Umformungsprozess oberhalb der Umformeinrichtung positioniert (vgl. Bild 3). In einem realen Fertigungsprozess würden hydraulische Klappvorrichtungen eingesetzt (beispielsweise von [10]).



Das Formwerkzeug der Versuchsvorrichtung ist mit einer Differenzdruckvorrichtung ausgestattet, die den endkonturnahen Preform mit Hilfe einer Vakuumfolie im Formwerkzeug über Kopf in die endgültige Kontur drückt, hält und sichert. Nachfolgend kann der Harzinfusions- und der Aushärtprozess erfolgen und abschließend das endgültige FKV-Bauteil entnommen werden.

## 6 Qualitätssicherung

Vor dem Umformprozess wird eine Oberflächenanalyse des aufgebauten, ebenen Textilstapels durchgeführt. Dafür kommt ein neu entwickelter Effektor mit einem Bildaufnahmesystem zum Einsatz. Durch dieses können sowohl 2D- als auch 3D-Aufnahmen der textilen Oberfläche erstellt werden.

In Bild 8 ist das entwickelte Aufnahmesystem dargestellt, bei dessen Entwicklung hoher Wert auf das Verhältnis von Gewicht zu Steifigkeit gelegt worden ist. Dies hat seine Ursache in der zulässigen Nutzlast des Knickarmroboters, der zur Positionierung des Kamerasystems genutzt wird sowie in der Notwendigkeit eine hohe Dämpfung für das Schwingungsverhalten für eine wackelfreie Aufnahme zu erhalten. Dazu wurde eine Aluminium-Carbon Konstruktion mit einer an bionische Ansätze angelehnten Struktur genutzt.



*Bild 8:a) Qualitätssicherungseinheit (OCQU); links am 6-Achs Knickarmroboter zur Erfassung von textilen Oberflächenfehlern nach der Ablage; rechts: Beispielhaft erfasste textile Oberfläche eines multiaxialen Carbongeleges mit ausgewerteten Faserverläufen (rot: Nähfäden; grün: Zwischenräume)*

Durch dieses Aufnahmesystem und die nachgeschalteten Auswerteroutinen nach [7] können die realen Rovingverläufe erfasst und als mathematische Funktionen ausgegeben werden. Dadurch ist es auch möglich zulässige und unzulässige *Gap*-Bildungen und Winkelabweichungen zu erfassen (vgl. dazu Abbildung 8).

## **7 Zusammenfassung**

Mit der Erforschung und Entwicklung der Anlagen- und Prozesstechnik für das großflächige Preforming ist es gelungen, einen Nachweis für den Ansatz in der Rotorblattfertigung mit Hilfe der Umformtechnik zu führen.

Durch diese Anlagen- und Prozesstechnik lassen sich große Innovationen in der automatisierten Handhabungs- und Textiltechnik zur Rotorblattfertigung erzielen. Die Automatisierungstechnik bietet die Möglichkeit, neue Gelegetypen zu entwickeln und einzusetzen, die für herkömmliche händische Verfahren nicht geeignet sind.

Durch die Kombination von Automatisierung, innovativer Textiltechnik, Preforming-Technologie und der Harzinfusionstechnik lassen sich geringe Zykluszeiten mit einer hohen Reproduzierbarkeit kombinieren. Bei den immer größer werdenden Rotorblättern und den steigenden Qualitätsanforderungen wird dies zukünftig immer wichtiger werden.

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, das aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages das Verbundprojekt *mapretec* fördert sowie dem Projektträger Jülich für die Koordinierung des Vorhabens.

## Referenzen

- [1] Anon.: Verbundprojekt *mapretec* [*mapretec joint project*]. Website (retrieved Jan. 29, 2014) (2014). — <http://www.mapretec.de/>
- [2] ALBERS, H.: Bundesverband WindEnergie e.V. (2012). — <http://www.wind-energy-market.com/de/windenergieanlagen/>
- [3] BETZ, A.: *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen [Wind energy and its utilization by windmills]*. Göttingen: Bandenhoed und Ruprecht, 1926
- [4] MÜLLER, D. H. ; WEIGEL, L.: *Gemeinsamer Technischer Abschlussbericht für das Verbundprojekt preblade [Joint final technical report of the preblade joint project]*: Bremer Institut für Konstruktionstechnik, Abeking & Rasmussen Rotec GmbH & Co. KG, 2008
- [5] OHLENDORF, J.-H. ; ROLBIECKI, M. ; SCHMOHL, T. ; MÜLLER, D. H. ; THOBEN, K.-D.: Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien - Automatisierter preform-Aufbau für Rotorblätter von Windenergieanlagen [Development of handling equipment for flexible materials - automated preform assembly for rotor blades of wind turbines]. In: BRÖKEL, K. ; STELZER, R. ; FELDHUSEN, J. ; RIEG, F. ; GROTE, K.-H. (eds.): *9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2011) [9<sup>th</sup> Joint Colloquium for Design Technology]*. Rostock, 2011, pp. 141–146
- [6] FRANKE, J. ; THOBEN, K.-D. ; ROLBIECKI, M. ; SCHMOHL, T. ; OHLENDORF, J.-H. ; ISCHTSCHUK, L.: Binderapplikation für biegeeweiche Materialien [Binder application for flexible materials]. In: *MM MaschinenMarkt/Composite World* (2014), pp. 15–17
- [7] OHLENDORF, J.-H.: *Untersuchung der mehrlagigen Umformung von Fasergelegen zur Herstellung von Faserverbundstrukturen [Investigation of multilayer deforming of fiber rovings for the production of fiber composite structures]*, Universität Bremen, 2013
- [8] Anon.: Richtlinie VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte [Guideline VDI 2221 - method for the development and design of technical systems and products] (1993)
- [9] OHLENDORF, J.-H. ; ROLBIECKI, M. ; SCHMOHL, T. ; FRANKE, J. ; THOBEN, K.-D. ; ISCHTSCHUK, L.: Innovationen in der Handhabungs- und Textiltechnik zur Rotorblattfertigung [Innovations in handling and textile technology for rotor blade manufacturing]. In: *Lightweight Design* vol. 4 (2013), pp. 48–54
- [10] Anon.: HAWART Sondermaschinenbau GmbH. Website (retrieved Jan. 29, 2014) (2014). — <http://www.hawart.de/>

## Autoren

Dr.-Ing. Jan-Hendrik Ohlendorf

Dipl.-Ing. Jan Franke

Dipl.-Wi.-Ing. Martin Rolbiecki

Dipl.-Ing. Tim Schmohl

Prof. Dr. Ing. habil. Klaus-Dieter Thoben, Institutsleiter

Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK)

Universität Bremen

Badgasteiner Straße 1

28359 Bremen

Tel.: 0421/216 – 6 48 71

Email: [johlendorf@uni-bremen.de](mailto:johlendorf@uni-bremen.de)

[www.bik.uni-bremen.de](http://www.bik.uni-bremen.de)

[www.mapretec.de](http://www.mapretec.de)

Dipl.-Ing. (FH) Lars Ischtschuk

SAERTEX GmbH & Co.KG

Brochterbecker Damm 52

48369 Saerbeck

[www.saertex.com](http://www.saertex.com)