

Sensorsysteme für die statistische Prozessmodellierung von Faserverbundbauteilen

Birgit Wieland¹, Lars Trampe², Nico Liebers³

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

¹Birgit.Wieland@dlr.de

³Nico.Liebers@dlr.de

Abstract. Production of rotor blades for wind turbines is still a predominant manual process. In order to improve blade quality without significant increase of production costs, a combination of tolerance management and statistical process control is the favored way. A process model with both, analytical and numerical elements is developed based on production data and experiments. This paper will focus on simulation of the resulting fiber volume fraction and the detection of its influence parameter.

1. Einleitung

Die Herstellung von Rotorblättern von Windenergieanlagen ist nach wie vor ein überwiegend manueller Prozess. Eine Verbesserung der Bauteilqualität kann daher über die Erhöhung des Automatisierungsanteils oder, ohne nennenswerte Steigerung der Produktionskosten, über eine kontinuierliche Prozessüberwachung erreicht werden. Letztere liefert eine statistische Datenbasis mit der ein Toleranzmanagementsystem inklusive den entsprechenden Prozesssimulationsanteilen abgeleitet werden kann. Diese Modellierungen folgen sowohl analytischen als auch numerischen Ansätzen und werden modular entlang einer Toleranzkette angeordnet.

Das vorgestellte System bietet zum einen die Möglichkeit der Qualitätssicherung und Optimierung laufender Produktionen und zum anderen die Auslegung neuer, ähnlicher Herstellungsprozesse.

In der vorliegenden Veröffentlichung wird das Vorgehen zum Aufbau eines statistischen Toleranzsystems anhand der Herstellung von Rotorblättern für Windenergieanlagen qualitativ dargestellt. Die Zielgröße, im Folgenden Schlüsselcharakteristik genannt, ist hierbei der Blindverklebungsspalt zwischen Hauptgurt und Steg. Auf Grund der Vielzahl der Einflussparameter wird beispielhaft die Modellierung des Faservolumengehaltes vorgestellt. Dabei stellt die Überwachung der Bauteildicke während des Herstellungsprozesses, insbesondere zur Ermittlung von Kenngrößen, einen zentralen Aspekt dar.

2. Stand der Technik

Herstellung von Rotorblättern

Rotorblätter von Windenergieanlagen bestehen meist aus zwei Halbschalen, entsprechend ihrer aerodynamischen Umströmung, als Druckseite (DS) und Saugseite (SS) bezeichnet (vergl. [1]). Im Rahmen der Fertigung werden bei einigen Herstellern Strukturelemente wie Hauptgurte oder

Wurzelverstärkungen in separaten Werkzeugen hergestellt. Die einzelnen Elemente werden mit den weiteren, flächigen Elementen der Halbschale in einem Prozessschritt gefügt. In Abbildung 1 ist der Querschnitt eines Rotorblattes mit den genannten Elementen dargestellt:

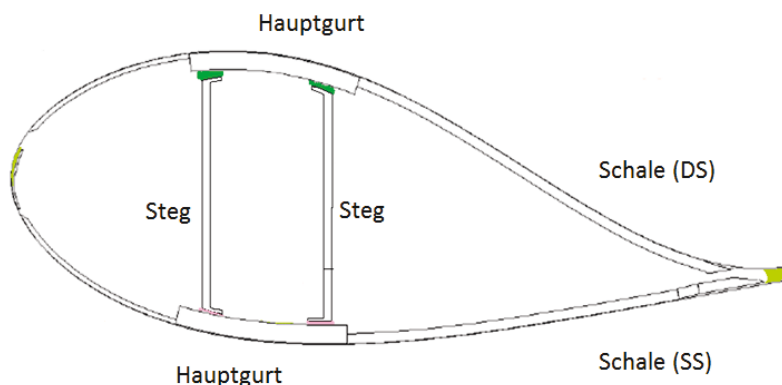


Abbildung 1: Querschnitt eines Rotorblattes nach [2]

Die beiden Schalen werden in der Regel in der Sandwich-Bauweise hergestellt. Dabei wird Glasfasergelege als Außenmaterial und Balsaholz oder ein Schaummaterial als Kernelement eingesetzt. In ihnen eingebettet liegen die Hauptgurte zur Aufnahme der Zug- und Drucklasten infolge der Rotorblattbiegung aus unidirektionalem Glas- oder Kohlefaser-Composite. Die Torsionssteifigkeit der Rotorblätter wird durch den Einsatz von einem bis mehreren Stegen, ebenfalls aus Sandwichmaterial, erhöht.

Während Stege und Hauptgurte meist in separaten Werkzeugen gefertigt werden, erfolgt die Herstellung der Schalen, sowie die Verbindung aller Bauteile durch strukturelle Verklebung, in den bereits erwähnten Halbschalenwerkzeugen. In Abb. 2 sind die Halbschalenwerkzeuge eines 45m Rotorblattes dargestellt. Während die Schalen in der links gezeigten, offenen Form hergestellt werden, erfolgt die finale Bildverklebung durch das Schließen der Werkzeugform, wie im Bild rechts gezeigt.

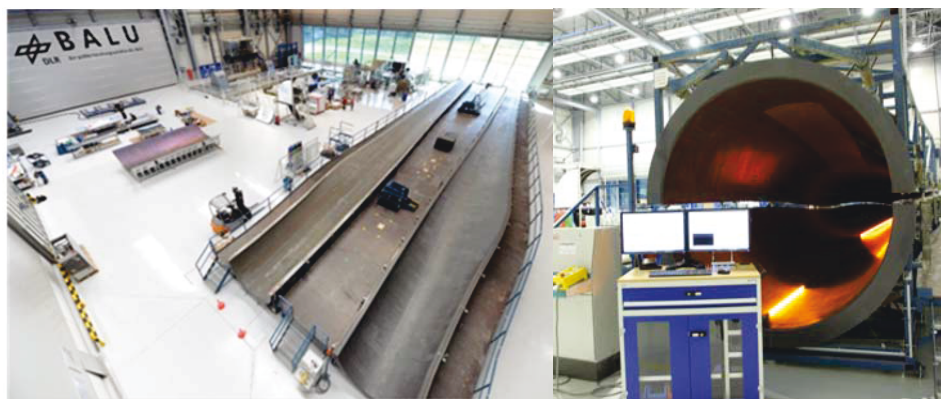


Abbildung 2: 45m Rotorblattform

Für die Herstellung der Schalen und der Hauptgurte wird im Allgemeinen die Vakuuminfusion als Fertigungsverfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden trockene Faserlagen in die Werkzeugform drapiert und anschließend mit flüssigem Harz imprägniert.

Eine Besonderheit bei Rotorblättern für Windenergieanlagen ist, dass die Infusion bei Umgebungsdruck und die anschließende Aushärtung mit einseitig beheizbaren Werkzeugen erfolgt.

Per Vakuuminfusion werden Rotorblätter mit über 80 m Länge und einer maximaler Blatttiefe mit bis zu 5 m hergestellt. Die Wandstärken der Schalen können dabei lokal bis zu 100 mm betragen. Dem gegenüber stehen Anforderungen höchster Präzision, z.B. bei dem Klebespalt für die Blindverklebung zwischen Hauptgurt und Steg von maximal 15mm. Die Einhaltung dieser, im Vergleich engen Grenzen trotz einer Vielzahl von Störfaktoren, setzt ein genaues Prozessverständnis voraus.

Toleranzmanagement

Die Methoden des statistischen “*Quality engineering*” und die des Toleranzmanagements wurden u.a. von Taguchi [4] entwickelt und von Shainin [5] um eine direkte Auswertung der Produktionsmessergebnisse erweitert. Beide Ansätze identifizieren die kritischen Parameter eines Prozesses und ermitteln deren Einfluss auf die Schlüsselcharakteristik des Produkts sowie die gegenseitigen Wechselwirkungen.

Mit dem so genannten “Design of experiments” gibt Taguchi nach KLEIN [5] Vorgaben für die Durchführung faktorieller Versuchspläne mit orthogonal aufgebauten Parameterfeldern, um einzelne Prozesse oder Prozessschritte effektiv auf ihre statistisch signifikanten Einflussfaktoren hin zu untersuchen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt dann über die etablierte ANOVA (Analysis of Variance) -Methode.

Die Ergebnisse der eben beschriebenen Matrixversuche ermöglichen zusätzlich die Ableitung der Wirkzusammenhänge innerhalb einer Toleranzkette. Diese sind Grundlage zur Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes nach Gauß und somit für die statistische bzw. wahrscheinlichkeitstheoretische Toleranzbetrachtung.

Das “Quality Engineering” und die auf statistischen Daten basierende kontinuierliche Prozessverbesserung werden unter anderem auch als Aspekt der „Industrie 4.0“ in unterschiedlichsten Branchen und Anwendungsfeldern diskutiert. Diverse Simulationsprogramme zur Prozessanalyse und Optimierung sind bereits auf dem Markt vorhanden, relevante Fallstudien können der Literatur entnommen werden.

Die hier betrachtete Anwendung der Toleranzmanagementmethoden auf Faserverbundgroßbauteile ist hingegen bisher wenig untersucht worden. Besondere Herausforderungen stellen hierbei die hohe Streuung der einzelnen Prozesse und die Verbindung von klassischen Toleranzketten mit chemischen und physikalischen Wirkzusammenhängen dar. In Abbildung 3 ist eine qualitative Toleranzkette für die Herstellung von komplexen Faserverbundgroßbauteilen gezeigt:

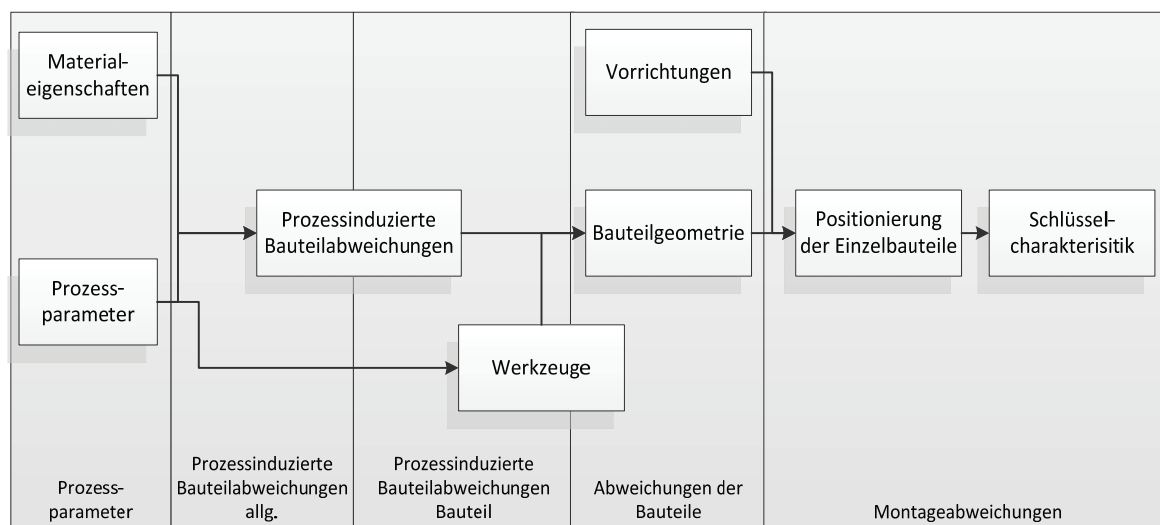


Abbildung 3: Allgemeingültige Elemente einer Toleranzkette für Faserverbundbauteile

Eingangsparameter sind, neben den geometrischen Betrachtungspunkten, die Prozessparameter und Materialeigenschaften. Aus diesen ergeben sich die prozessinduzierten Bauteilabweichungen und anschließend die geometrische Montagetoleranzkette bis hin zur Schlüsselcharakteristik als Schließmaß. Eine zentrale Rolle bei der Ermittlung der prozessinduzierten Abweichungen spielt der Faservolumengehalt, der alle folgenden Elemente der Kette beeinflusst. Daher wird im Folgenden das Vorgehen zur Prozessmodellierung zur Einstellung des Faservolumengehaltes stellvertretend gezeigt.

Faservolumengehalt

Der Faservolumengehalt bestimmt einige der wichtigsten Eigenschaften eines Faserverbundbauteils. Er ist ein Maß für das Mischungsverhältnis von Fasern und Matrix und beeinflusst damit über die Mischungsregel direkt die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Er bestimmt Festigkeit und Steifigkeit eines Blattes sowie die Wärmeausdehnung und den chemischen Schwindungskoeffizient während der Aushärtung. Für die Toleranzbetrachtung von Rotorblättern ist er ein ausschlaggebender Einflussparameter in Bezug auf die Ausprägung der geometrischen Abmaße in Laminatdicken-Richtung und prozessinduzierten Bauteilabweichungen. Darüber hinaus ist die Kenntnis des Faservolumengehaltes für die Bestimmung des Exothermieanteils während der Aushärtung, und damit die Bauteiltemperatur essentiell. Der Aufbau einer Prozessmodellierung zur Ausprägung des Faservolumengehaltes stellt durch den „out-of-autoclave“-Prozess, sowie durch die hohe Streuung, sowohl innerhalb, als auch zwischen den einzelnen Rotorblättern, eine Herausforderung dar.

Zur Modellierung des Idealzustandes werden die Einflussfaktoren über Vorversuche bestimmt. Als Ergebnis können folgende Punkte zusammengefasst werden:

1. Ausgangsdicke des Preforms sowie eingesetztes Faserhalbzeug
2. Kompaktierung (Druck und Zeit)
3. Differenzdruck zwischen Kavität und Matrixreservoir
4. Eigenschaften der Matrix

Für die Modellbildung zur Beschreibung des Faservolumengehaltes werden daher zunächst die kritischen und damit ausschlaggebenden Parameter ermittelt.

3. Modellbildung

Einflussfaktoren auf die Ausprägung des Faservolumengehaltes

Die Einflussfaktoren auf den Faservolumengehalt werden in einer Vorversuchsreihe auf ihre Signifikanz untersucht. Die gewählten Einflussfaktoren sind Kompaktierungszeit, Gelegetyp und die Differenzhöhe zwischen Bauteil und Harzreservoir. Die Eigenschaften der Matrix werden hier vernachlässigt, da die in der Fertigung von Windkraftrotorblättern eingesetzten Epoxidharze nur geringe Unterschiede in den Fließeigenschaften aufweisen. In Tabelle 1 ist der vollfaktorielle Versuchsplan dargestellt.

Faktor	Stufe				
	1	2	3	4	5
Kompaktierungszeit in s	0	0,5	2	12	-
Differenzhöhe in mm	0	300	600	900	1200
Gelegetyp	UD0°	UD90°	Triax	-	-

Tabelle 1: Versuchsplan Einflussfaktoren auf Faservolumengehalt

Der Faservolumengehalt wird anschließend über TGA- Messungen bestimmt und die Ergebnisse mittels einer ANOVA ausgewertet. In Tabelle 2 sind die jeweiligen, daraus resultierenden Fisher-Werte verzeichnet.

Faktor	Fisher-Wert	Relevanz
Faserausrichtung	0,61196058	Nein
Differenzhöhe	5,97367834	Ja
Kompaktierungszeit	4,38803942	Nein

Tabelle 2: Fisher-Wert für Einflussfaktoren auf FVG

Eine statistische Relevanz liegt vor, wenn der Fisher-Wert einen vom Freiheitsgrad-abhängigen Grenzwert übersteigt. Letzterer kann Tabellen für das gewählte Signifikanzniveau entnommen werden. Für die vorliegende Versuchsreihe hat die Differenzhöhe auf einem Signifikanzniveau von 95% einen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung des Faservolumengehaltes.

Ziel der weiterführenden Untersuchung ist es nun, ein Modell zur Berechnung des Faservolumengehaltes zu entwickeln. Hierfür soll weder eine Fließsimulation auf Basis des Gesetzes nach Darcy, noch eine Druckdifferenzbetrachtung verwendet werden. Kern der Modellierung ist der Höhenunterschied zwischen Harzreservoir und Bauteil, sowie die Bestimmung des Kompaktierungs- und Aufdickungsverhaltens des Laminates.

Energetisches Modell und Federanalogie

Basis der Modellierung ist die Beschreibung der Vakuuminfusion einer ebenen Platte, wie in Abbildung 4 mit Bauteil, Werkzeug und Harzreservoir gezeigt. Die relevante Höhe ist dabei die Differenz zwischen der Höhe des Bauteils und der Matrix.

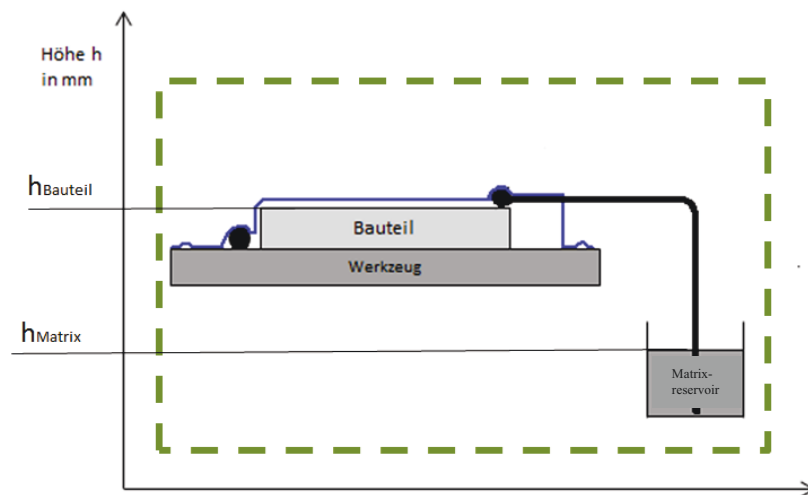


Abbildung 4: Systemgrenzen der Energiebetrachtung für den Infusionsprozess

Die Veränderung der Höhen in bzw. zwischen statischen bzw. quasistatischen Zuständen lässt sich über eine energetische Betrachtung modellieren. Die Systemgrenze ist hierbei um den gesamten Aufbau gelegt, eine zusätzliche Zuführung von Energie ist nicht zu identifizieren. Für den vorliegenden Fall werden die Zustände direkt vor (1) und direkt nach (2) der Infusion gewählt.

Diese ergeben folgende mathematischen Zusammenhänge:

$$E_{pot1} = \frac{1}{2} \cdot c_{ges}(\Delta z) \cdot \Delta z_{Feder}^2 + m_{Faser} \cdot g \cdot h_{Bauteil_1} + m_{Matrix_1} \cdot g \cdot h_{Matrix_1} \quad (3.1)$$

Und

$$E_{pot2} = m_{Faser} \cdot g \cdot h_{Bauteil_2} + m_{Matrix_2Bauteil} \cdot g \cdot h_{Bauteil_2} + m_{Matrix_2Reservoir} \cdot g \cdot h_{Matrix_2} \quad (3.2)$$

mit m für Masse, g für die Erdbeschleunigung und h für die Höhe (vergl. Abb.4).

Neben den potentiellen Energien von Faser und Matrix ist in den obigen Formeln eine vorgespannte Feder mit der Federsteifigkeit c_{ges} und dem Federweg Δz_{Feder} zur Beschreibung der Preform-eigenschaften enthalten. Diese Analogie ist notwendig um die treibende Kraft der Infusion darzustellen.

Während bei Autoklav- oder RTM-Infusionen der resultierende Faservolumengehalt über die Druckdifferenzen zwischen Harzreservoir, Kavität des Bauteils und Autoklavdruck eingestellt werden kann, sind bei einer Vakuuminfusion bei Umgebungsbedingungen die resultierenden Druckunterschiede zu gering um messbar zu sein. Daher wird für die vorliegende Modellierung die Vorspannung des Lagenpaketes durch Kompaktierung als „Differenz“ eingesetzt. SONG [6] führt zur Beschreibung dieser Kompaktierung die in der obigen Formel bereits enthaltene Federanalogie für Lamine ein:

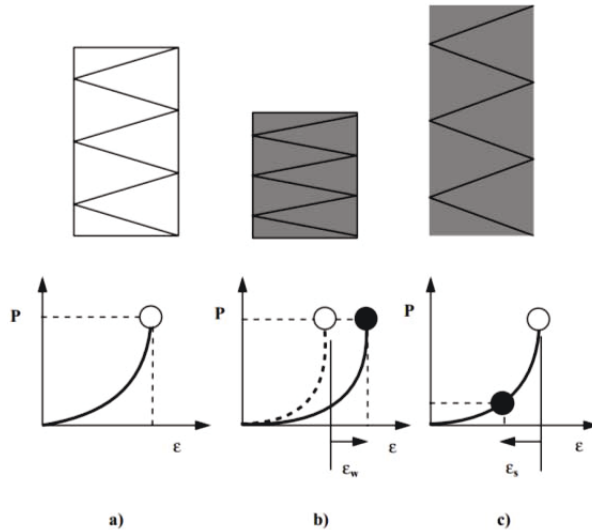


Abbildung 5: Federanalogie zur Beschreibung einer Infusion nach [6]

In Abbildung 5 a) ist das Lagenpaket eines trockenen Preforms, welcher auf Grund des Unterdrucks in der Kavität kompaktiert ist als vorgespannte Feder dargestellt. Durch die Benetzung mit dem Matrixwerkstoff gleiten die einzelnen Lagenpakete, wie in 5b) noch etwas aneinander ab und kompaktieren noch bis zu einem gewissen Grade nach. Die Infusion ist abgeschlossen, wenn sich, wie in 5c) dargestellt, ein Gleichgewicht zwischen der potentiellen Energie der Matrix und der pot. Energie der vorgespannten „Lagenpakets-Feder“ eingestellt hat. In der Formel 3.1 für E_{pot1} ist diese Federenergie mit $\frac{1}{2} \cdot c_{ges}(\Delta z) \cdot \Delta z_{Feder}^2$ beschrieben. Hierbei ist c_{ges} durch die progressive Federkennlinie von der Kompaktierung des Lagenpaketes Δz abhängig. Im Folgenden sollen nun der typische Federweg und die Federsteifigkeit für unidirektionale Glasfaser-Lamine experimentell bestimmt werden. Damit kann dann der Faservolumengehalt φ aus dem Fasermassenanteil Ψ nach [7] mit

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \Psi}{\Psi} * \frac{\rho_f}{\rho_M}}$$

berechnet werden.

Ziel ist es also, die Federsteifigkeit als Materialparameter eines Lagenaufbautyps zu bestimmen, um über sie die infundierte Masse der Matrix in Abhängigkeit zur Differenzhöhe berechnen zu können.

4. Bestimmung der Federsteifigkeit von Unidirektionalen Glasfaserlaminaten

Versuchsaufbau

Zur Ermittlung der Federsteifigkeit und des Federweges für unidirektionale Lagenaufbauten müssen alle Gewichte und Positionen reproduzierbar gemessen werden können. Dies ermöglicht der in Abbildung 6 gezeigte Versuchsstand. Während in vorangegangenen Untersuchungen der Federvorspannweg (Kompaktierungshöhe unter bestimmter Kraft) meist mittels hydraulischen Pressen erfolgte, kann hier der tatsächliche Federweg bei Tränkung des Materials aufgenommen werden. Der

Versuchsstand besteht aus einer Werkzeugplatte als Unterlage für das Bauteil, einem Gestell als Halterung für Sensorik und einer höhenverstellbaren Linearführung zur reproduzierbaren Positionierung des Matrixreservoirs.



Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Federsteifigkeit [8]

Sensorik

Der obige Versuchsstand (Abbildung 6) bietet die Möglichkeit unterschiedliche Sensorsysteme zu vergleichen. Für die Vermessung der Dickenänderung von Laminaten sind gewisse Randbedingungen zu beachten:

1. Die Harzschicht über der ersten Faserlage ist transluzent, damit wird Licht undefiniert zwischen eigentlicher Oberfläche und erster Faserlage gebrochen
2. Durch den Einsatz von taktile Messtechnik erfolgt lokal eine zusätzliche Kompaktierung

Für den vorliegenden Versuch wird daher berührungslose Messtechnik wie Ultraschall, Wirbelstrom und Lasertriangulation eingesetzt. Die Ergebnisse für die Ultraschallmesstechnik sind TRAMPE [8] zu entnehmen.

Auf den Einsatz von flächiger, optischer Vermessung beispielsweise über Photogrammetrie wird abgesehen, da eine kontinuierliche Überwachung auf Grund der Messfrequenz und der großen Datenmenge nicht möglich ist.

Wirbelstromsensorik hat nach [8] den Vorteil, dass sie temperaturstabil, also auch Autoklav-geeignet ist. Nachteil ist die, je nach Sensortyp, relativ große Messfläche über die gemittelt wird und die Notwendigkeit der Integration einer metallischen Schicht in den Laminataufbau.

Die Lasertriangulation ist die einfachste, aber auch effizienteste Möglichkeit die Dickenänderung des Prüfkörpers kontinuierlich zu überwachen. Hier stellt die Transluzenz der Epoxidharze die größte Herausforderung dar. Durch den Einsatz von UV-Lasern oder die lokale Veränderung der Vakuummembran, z. B. durch diffus reflektierende Targetpunkte, kann hier Abhilfe geschaffen werden.

Für die hier durchgeführten Versuche werden zusätzlich eine Videoüberwachung der Fließfront, sowie Differenzdrucksensoren im Aufbau des Versuches integriert. Alternativ zur Videoüberwachung konnten auch mit dem Einsatz einer Infrarotkamera gute Ergebnisse erzielt werden.

Für die folgende Versuchsauswertung werden nur die Ergebnisse der Laserpunktsensoren eingesetzt.

Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Federsteifigkeit von unidirektionalen Laminataufbauten wird der in Tabelle 3 dargestellte vollfaktorielle Versuchsplan durchgeführt. Dabei wird das VARI-Verfahren mit einer einseitigen Absaugung über einen MTI-Schlauch und einem Linienanguss eingesetzt. Der Aufbau ist zur Vermeidung von Abweichungen nicht mit Fließhilfe bedeckt, der Versuch wird bis zur Aushärtung der Matrix bei Raumtemperatur aufgenommen.

Name	Differenzhöhe in mm	Kompaktierungs-Druck in mbar	Lagenanzahl	Matrixmasse in g
9-0-0	0	0	9	982,5
9-0-50	0	50	9	982,5
9-600-0	600	0	9	982,5
9-600-50	600	50	9	982,5
3-0-0	0	0	3	458,5
3-0-50	0	50	3	458,5
3-600-0	600	0	3	458,5
3-600-50	600	50	3	458,5

Tabelle 3: Vollfaktoriellen Versuchsmatrix [8]

Der Faservolumengehalt wird nach Abschluss der Versuche über eine taktile Dickenmessung und über eine Wägung ermittelt.

Ergebnisse Faservolumengehalt

Im Folgenden werden nun die Vermessungsergebnisse exemplarisch dargestellt. In Abbildung 7 sind die ersten 5000 min einer Vakuuminfusion mit den Ergebnissen der Lasersensoren aufgetragen. Der Federweg Δz_{Feder} wird dabei relativ zur Bauteilhöhe vor Anfang der Infusion dargestellt. Deutlich ist die zusätzliche Kompaktierung durch die Benetzung der Fasern Δz_{Komp} sowie die Aufdickung Δz_{Aufd} zu sehen. Der anschließende Dickenabfall resultiert durch die Aushärtung und der damit einhergehenden chemischen Schwindung. Der relevante Federweg Δz_{Feder} setzt sich aus Δz_{Komp} und Δz_{Aufd} zusammen.

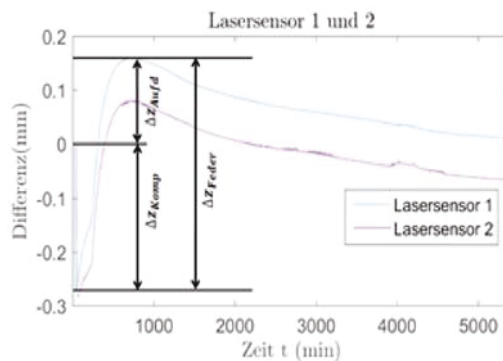


Abbildung 7: Zusammensetzung Δz_{Feder} aus Lasermessungen nach [8]

Die ermittelten Federwege in Abhängigkeit zur Differenzhöhe zwischen Bauteil und Matrixreservoir, für jeweils zwei Lasersensoren, sind in folgendem Diagramm dargestellt:

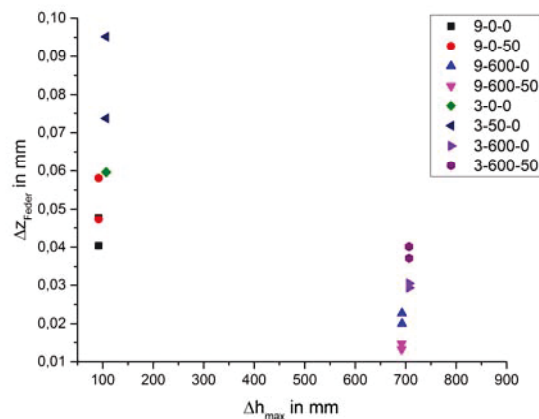


Abbildung 8: Δz_{Feder} über Δh_{max}

Auffällig ist hierbei die große Streuung der Ergebnisse aber auch die eindeutige Aufteilung der Federwege nach Lagenanzahl und Kompaktierungsdruck.

Validierung des Modells

Aus den gezeigten Ergebnissen kann über Regression die Federsteifigkeit in Abhängigkeit zur Differenzhöhe ermittelt werden. Diese wiederum ermöglicht eine Berechnung des Faservolumengehaltes für eine ebene Platte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

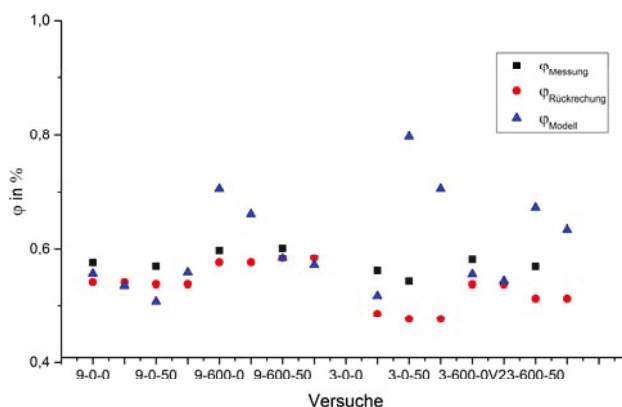


Abbildung 9: Faservolumengehalt aus Dickenmessung, Rückrechnung aus Plattengewicht und dem Modell

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modellierung. Die vorhandenen Abweichungen können auf eine unzureichende Festlegung des Nullpunktes der Lasersensoren zurückgeführt werden. Aus dem Vergleich der Faservolumengehalte als Resultate der Dickenmessung φ_{Messung} und $\varphi_{\text{Rückrechnung}}$ aus der Wägung sind bereits kleine Abweichungen durch Messabweichungen erkennbar. Eine Verbesserung des Modells und insbesondere der Bestimmung der Federsteifigkeit ist durch eine Vergrößerung der statistischen Basis und einer präziseren Bestimmung des Faservolumengehaltes mittels TGA- Prüfung geplant.

Sensoren zu Überwachung der Infusion

In Abbildung 10 sind die Messergebnisse von Wirbelstrom-, Laser- und Differenzdrucksensoren dargestellt, wobei der jeweilige Sensor 2 später von der Fließfront erreicht wird.

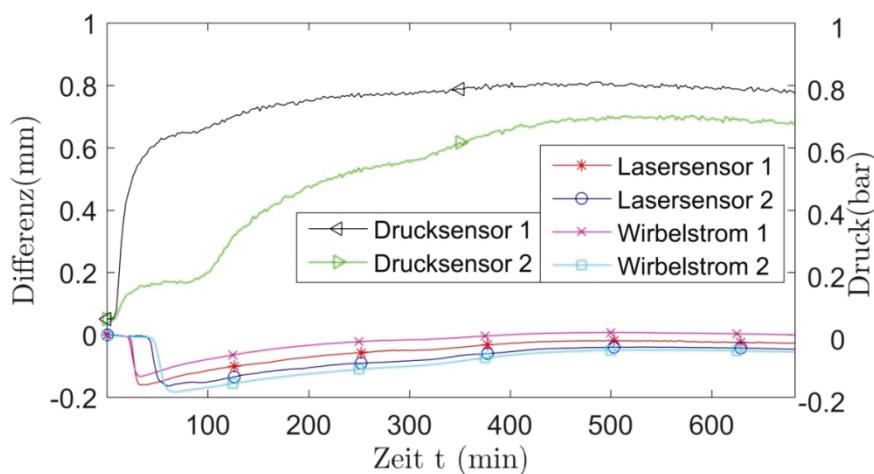


Abbildung 10: Druckmessung während des Versuchs (Versuch 8 9-600-50) [8]

Abbildung 10 zeigt, dass die Differenzdrucksensoren, auf Grund einer gewissen Leitungslänge, den Durchgang der Fließfront verzögert detektieren. Wirbelstrom- und Lasersensoren zeigen sehr gute

Übereinstimmung sind also beide für die Ermittlung der Federsteifigkeiten von UD-Laminaten geeignet.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Qualität der Messergebnisse stark von der Güte der Referenzierung abhängig ist. Insbesondere die Lasersensoren sind nach TRAMPE [8] für den zukünftigen Einsatz bei der kontinuierlichen Prozessüberwachung in der Rotorblattherstellung geeignet.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Rotorblätter für Windenergieanlagen müssen, bei gleichzeitiger Steigerung der Bauteilqualität, in der Herstellung günstiger werden, um auch zukünftig eine rentable Möglichkeit zur Energiegewinnung darzustellen. Ein mögliches Vorgehen ist dabei das statistische Toleranzmanagement in Kombination mit einer kontinuierlichen Prozessüberwachung. Mit dieser Verbindung können prozessinduzierte Abweichungen in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess über eine Verfeinerung der Modelle und Optimierung der Prozessparameter reduziert werden.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde hierzu das Vorgehen anhand der Modellierung des Prozessmoduls „Faservolumengehalt“ inklusive der Identifikation und Prüfung unterschiedlicher Messsysteme vorgestellt.

Das Prozessmodellierungsmodul „Faservolumengehalt“ ist Teil einer umfassenden Toleranzbetrachtung für die Herstellung von Rotorblättern. Für die zukünftigen Arbeiten ist eine vollständige analytische und/oder numerische Beschreibung des Systems, sowie die Adaption auf weitere Anwendungsfelder geplant.

Quellen

- [1] R. Gasch, und J. Twele „*Windkraftanlagen-Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*“ Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011. ISBN 978-3-8348
- [2] E. B. Herreth „*Viel Wind um GFK, Werkstoffe und Verfahren im Rotorblattbau*“ München: Carl Hanser Verlag KU Kunststoffe, 2002.
- [3] E. Hau, „*Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*“ 4. Auflage Springer Verlag, 2008
- [4] G. Taguchi, S. Chowdhury und Y. Wu „*Taguchi's Quality Engineering-Handbook*“ Hoboken: John Wiley&Sons, 2005
- [5] B. Klein „*Versuchplanung- DoE*“ München, Wien: Oldenbourg Verlag, 2007
- [6] X. Song „*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification*“ Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 14.04.2003.
- [7] H. Schürmann „*Konstruieren mit Faser- Kunststoff-Verbunden*“ 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [8] L. Trampe, N. Liebers, B. Wieland „*Messung der Bauteildicke während der Harzvakuuminfusion und Untersuchung der Einflussparameter*“ DLR 2016, IB-BS-2016-8