



Universität
Bremen

Institut für integrierte
Produktentwicklung

(Fachgebiet 09)

Werkstofftechnik/Fasern
und Faserverbundwerk-
stoffe (FIBRE)

(Fachgebiet 12)

Fachbereich 04

Produktionstechnik:

Maschinenbau

& Verfahrenstechnik

Universität Bremen

Verbundvorhaben BladeFactory

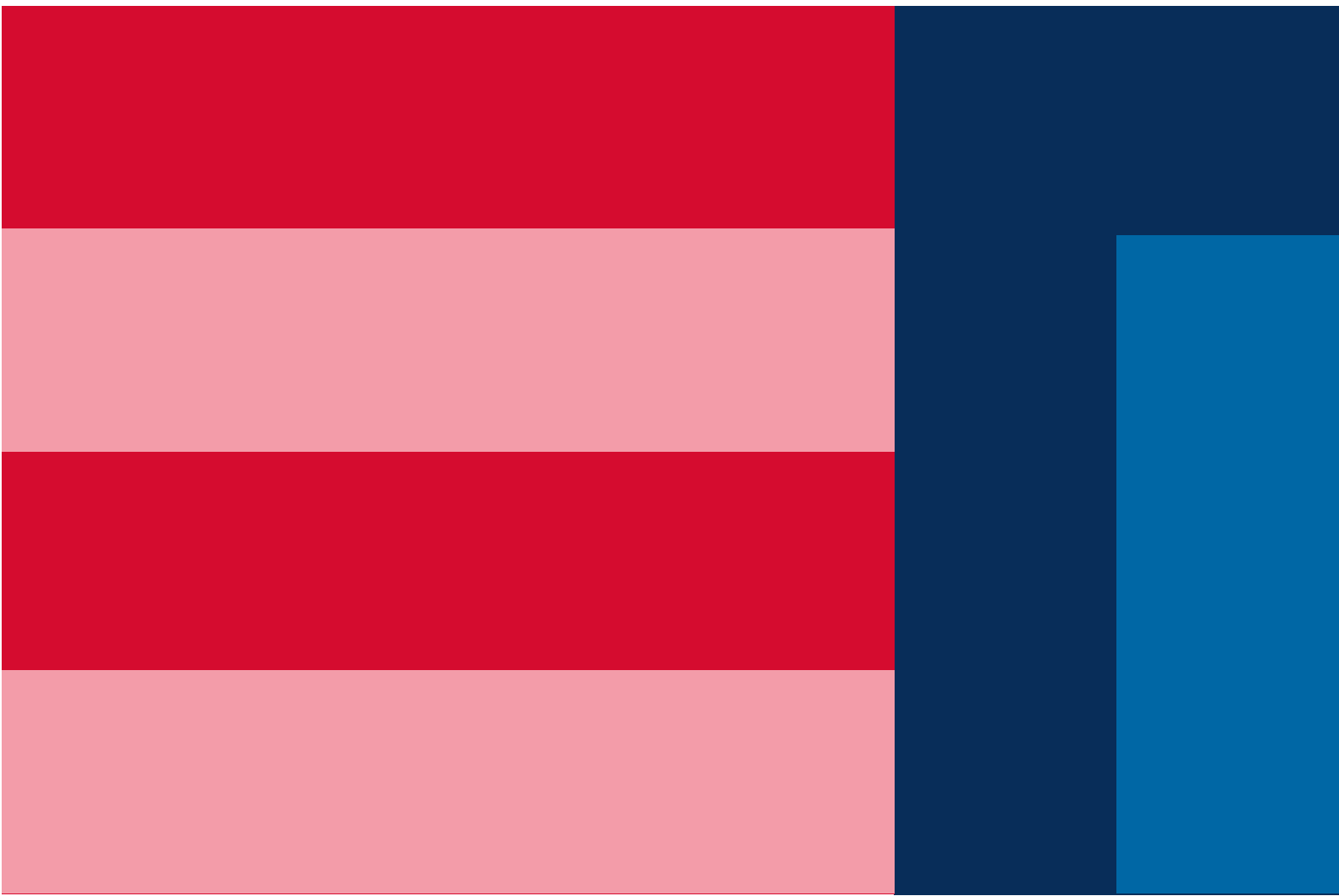
Teilvorhaben: Automatisierte Textilhandhabung, Infusion und Aushärtung

Schlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2018 bis 30.06.2023

Förderkennzeichen: 0324272B

Bremen, 20.12.2023



Ausführende Stelle

Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK) Badgasteiner Straße 1, 28359 Bremen	
Projektleitung	Klaus-Dieter Thoben Telefon: +49 421 218-50005 E-Mail: thoben@uni-bremen.de
Ansprechpartner	Marvin Richrath Telefon: +49 421 218-64875 E-Mail: richrath@uni-bremen.de
	Das Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK) der Universität Bremen ist Mitglied bei ForWind (Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen) sowie beim Forschungsverbund Windenergie

Weitere Bearbeiter

Fachgebiet 12 Werkstofftechnik/Fasern und Faserverbundwerkstoffe (FIBRE) Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen	
Projektleitung	Axel Herrmann Telefon: +49 421 218-58700 E-Mail: herrmann@uni-bremen.de
Ansprechpartner	David Droste Telefon: +49 421 218-59677 E-Mail: droste@uni-bremen.de

Autoren des Berichts: Marvin Richrath, David Droste, Nadine Gushurst, Andreas Mändle, Michael Brink, Jan-Hendrik Ohlendorf

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 0324272B gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhalt

1	Einführung und Aufgabenstellung.....	4
2	Voraussetzungen des Vorhabens.....	5
3	Planung und Ablauf	6
4	Wissenschaftlich-technischer Stand	7
5	Zusammenarbeit der Partner.....	10
6	Erzielte Ergebnisse	11
6.1	Anforderungen an den DTP-Prozess und vorgeschaltete Prozesse (BIK)	11
6.2	Prozesseinflussanalyse zur Textilhandhabung (BIK)	12
6.3	Kontinuierliche Gelegeablage unter dem Aspekt der integrierten Intelligenz (BIK) ..	23
6.4	Prozesseinflussanalyse für die Infusion und Aushärtung (FIBRE)	34
6.4.1	Eignungsuntersuchung von schnellhärtenden Harzsystemen.....	34
6.4.2	Ermittlung des Feuchteinflusses auf den Aushärtprozess.....	40
6.4.3	Entwicklung einer Prozessregelung mit Heiz- und Kühlsystem.....	52
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	65
8	Voraussichtlicher Nutzen.....	67
9	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	69
10	Literaturverzeichnis.....	72

1 Einführung und Aufgabenstellung

Um für die Zukunft der Energiewende ebenso vorbereitet zu sein, wie für den Wettbewerb des internationalen Windenergiemarktes, müssen die Potentiale der nationalen Forschung und Entwicklung sinnvoll ausgeschöpft werden. Somit lassen sich Windenergieanlagen weiterhin unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten fertigen und durch eine hohe technologische Reife der Herstellungsverfahren und eine hohe Qualität des Produkts auch nachhaltig über die Produktlebenszeit betreiben. Wegen des hohen Kostenanteils der Rotorblätter an den Gesamtkosten einer Windenergieanlage, sind durch den Einsatz fortschrittlicher Fertigungsstrategien und moderner Materialien in der Rotorblattfertigung noch Kostensenkungspotentiale zu erwarten. Daher sollen im Projekt BladeFactory die Fertigungszeiten von Rotorblättern durch eine Entwicklung von Lösungen zur Vorfertigung von Teilkomponenten (Prefabbing) weiterhin reduziert werden. Das Prefabbing soll durch sogenannte Preforming und Prepregging-Strategien unterstützt werden, welche im Projekt BladeFactory einen weiteren Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsziele darstellen. Die zusätzliche Weiterentwicklung der Automatisierungslösungen im Bereich der Rotorblattfertigung ermöglicht ebenfalls eine weitere Reduktion der Fertigungszeiten. Außerdem bieten die Flexibilisierung der angewandten Werkzeuge und Effektoren und die fortschreitende Weiterentwicklung der eingesetzten Materialien zahlreiche Ansätze zur Verbesserung der Rotorblattfertigung der Zukunft.

Die Universität Bremen übernimmt im Projekt BladeFactory Aufgaben in zwei unterschiedlichen Bereichen.

Das Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK) sieht im Bereich der Entwicklung von Effektoren zur automatisierten Handhabung der im Rotorblatt verwendeten Fasermaterialien weiteres Entwicklungspotential. Insbesondere durch die Erforschung der Wechselwirkungen von Werkzeug und Material und die damit verbundene Weiterentwicklung der Effektoren und Halbzeuge sollen die automatisierten Prozessanteile beschleunigt und die reproduzierbare Bauteilqualität erhöht werden. Durch den angestrebten Erkenntnisgewinn dieser Wechselwirkungen ist eine flexiblere Anpassung der in einen Handhabungseffektor integrierten Einheiten auf die im Fertigungsprozess anstehenden einzelnen Prozessschritte möglich. Hierfür können adaptive Werkzeugwechsel unter der Anwendung von integrierter Intelligenz einen Fortschritt in der Rotorblattproduktion der Zukunft darstellen.

Das Fachgebiet 12 Werkstofftechnik/Fasern und Faserverbundwerkstoffe (FIBRE) unterstützt das Vorhaben BladeFactory, indem die sehr zeitaufwändigen Prozessschritte Infusion und Aushärtung hinsichtlich des Optimierungspotentials untersucht werden. Für die Infusion und Aushärtung sollen Regelungsstrategien

entwickelt werden, die ausgehend von umfangreichen Materialuntersuchungen sicherstellen können, dass das Bauteil in optimaler Zeit vollständig infusioniert wird. Gleichzeitig wird erreicht, dass der Aushärtvorgang direkt nach Abschluss der Infusion starten kann. Durch eine sensorische Überwachung der Aushärtung kann wiederum der sonst übliche Sicherheitszuschlag auf die Temperzeit entfallen, sodass insgesamt eine wesentlich verkürzte Formbelegungszeit zwischen dem Beginn der Infusion und der Entformung erreicht werden kann.

2 Voraussetzungen des Vorhabens

Der im Verbundprojekt BladeMaker (0325435E) entwickelte DTP-Effektor (**D**irect **T**extile **P**lacement-Effektor) zur kontinuierlichen Gelegeablage sowie der zugehörige Ablage- und Drapierprozess (DTP-Prozess) bilden die Basis für die Entwicklungen des BIK im Projekt BladeFactory. Der Ablage- und Drapierprozess ist in Abbildung 1 dargestellt. Der DTP-Effektor wird vom Portalroboter aufgenommen und in Längsrichtung durch das Rotorblattformwerkzeug geführt. Dabei wird das Fasergelege synchron zur Verfahrensgeschwindigkeit des Portalroboters abgewickelt und drapiert.



Abbildung 1: Automatisierter Ablage- und Drapierprozess (DTP-Prozess) eines Glasfasergeleges im BladeMaker-Demozentrum in Bremerhaven

Die zentralen Komponenten des DTP-Effektors bilden der Wickelkern zum Aufwickeln der trockenen Gelege und die Drapiermodule zur Drapierung der trockenen Gelege in das Formwerkzeug (s. Abbildung 2). Über Schrittmotoren kann der jeweilige Schwenkwinkel der Drapiermodule eingestellt werden. Außerdem ist durch die eingesetzten Pneumatikzylinder eine Längenänderung möglich. Der Kontakt zum Gelege ist durch Drapierspitzen aus hartem Kunststoff (POM) realisiert. Jede Drapierspitze ist durch ein Kugelgelenk mit dem jeweiligen Pneumatikzylinder verbunden, wodurch eine Neigung ermöglicht wird. Durch

integrierte Nadel- und Strömungsgreifer kann das Gelege „gegriffen“ werden. Vor dem Ablage- und Drapierprozess kann das aufgewickelte Gelege so durch das Schwenken der Drapiermodule bei gleichzeitiger Abwicklung des Wickelkerns in Richtung Formwerkzeug geführt werden. Während des Prozesses werden durch die Anpassung der Schwenkwinkel die Drapiermodule der Geometrie des Formwerkzeuges angenähert. Die Längenänderung und die Neigung der Drapierspitze erfolgen passiv durch den Gegendruck des Formwerkzeuges. [RFO17]

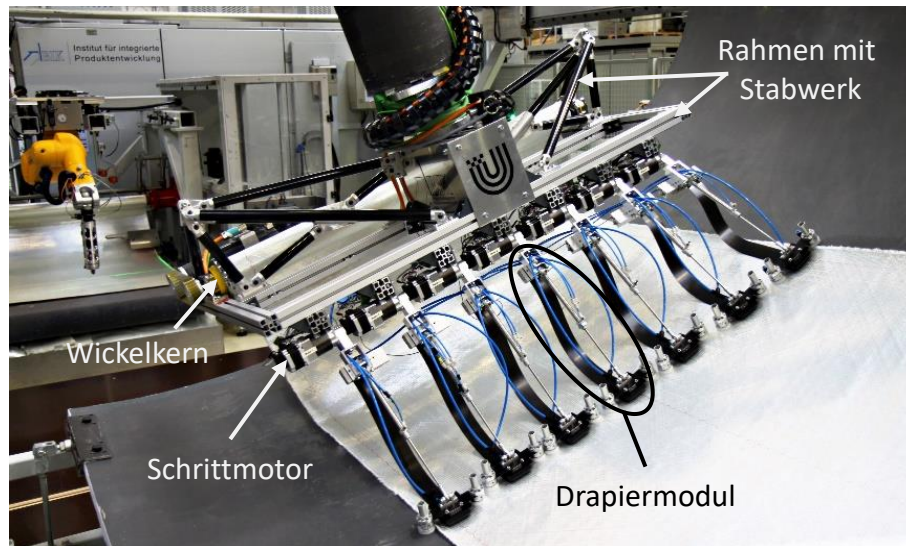


Abbildung 2: Im Vorgängerprojekt „BladeMaker“ entwickelte Handhabungseinheit (DTP-Effektor) zur kontinuierlichen automatisierten Direktablage von technischen Textilien [RFO17]

Neben den Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt BladeMaker besitzt das FIBRE ein gut ausgestattetes Labor zur Prüfung von Kunststoffen und faserverstärkten Kunststoffen. Mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC, Discovery DSC 250) kann am FIBRE das Aushärteverhalten von Epoxidharzen untersucht und charakterisiert werden. Ergänzend zu den Laboruntersuchungen wurden im Vorgängerprojekt BladeMaker Erfahrungen zur dielektrischen Analyse (DEA) aufgebaut, um die Aushärtung bzw. Viskositätsänderung im Infusionsprozess online zu messen und zu bestimmen. Der am FIBRE verfügbare Infusions-Heiztisch mit vier unabhängig heizbaren Feldern bietet zudem eine gute Ausgangsbasis für Infusionsversuche, um die im Projekt entwickelten Modelle prozessnah zu validieren.

3 Planung und Ablauf

Das Projekt begann am 01.10.2018 und war auf dreieinhalb Jahre ausgelegt. Durch die Folgen des russischen Angriffs auf die Ukraine sowie die Nachwirkungen der Covid-19-Pandemie und damit verbundene Betriebs- und Reiseeinschränkungen haben sich die Arbeiten im Projekt verzögert und es wurde kostenneutral bis zum

30.06.2023 verlängert. Die inhaltlichen Arbeiten haben sich durch die Verlängerung nicht geändert. Abbildung 3 zeigt den Zeitplan des Teilprojektes für den verlängerten Zeitraum.

Projektzeitplan																							
Jahr		2018				2019				2020				2021				2022				2023	
Quartal		Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2			
1 Potentialanalyse und Spezifikation der hochparallelierten Produktion																							
1.1 Kostenmodellierung und Anforderungen an vorgeschaltete Prozesse																							
2 Vorformung und Prüfung von Sandwich-Preforms																							
2.2 Prozesseinflussanalyse zur Textilhantabung																							
2.3 Kontinuierliche Gelegeablage unter dem Aspekt der integrierten Intelligenz																							
3 Prozesssichere Harzimpregnierung und Verkürzung der Formbelegungszeit																							
3.4 Prozesseinflussanalyse für die Infusion und Aushärtung																							
6 Integration und Bewertung																							
6.2 Prozessabsicherung																							
6.4 Bewertung des Formenbaus, der Formbelegung und der Harzimpregnierung																							
7 Projektmanagement und Dissemination																							
7.2 Technologiemanagement																							
7.3 Verwertung und Veröffentlichung																							
Meilensteine																							
1 Potenzialanalyse und Spezifikation abgeschlossen																							
2 Hardwareaufbau abgeschlossen																							
3 Prozessintegration und -bewertung abgeschlossen																							

Abbildung 3: Arbeitspakete und Zeitplan für das Teilvorhaben

4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Rotorblätter von Windenergieanlagen werden überwiegend in Schalenbauweise im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt. Die Negativformen der Saug- bzw. Druckseite des Rotorblattes bilden die beiden Hauptformwerkzeuge. Blattkomponenten wie Stege, Gurte und Flanscheinleger werden in eigenen Formwerkzeugen vorgefertigt. Bei der Belegung der Hauptformwerkzeuge werden trockene Fasergelege, vorkonfektionierte Kernwerkstoffkits sowie die Gurte und Flanscheinleger in die Hauptformwerkzeuge eingelegt. Anschließend werden Hilfsmaterialien aufgebracht und der gesamte Aufbau mit einer Vakuumfolie abgedeckt und evakuiert. Die Bauteile werden mit einem flüssigen Harz-Härter-Gemisch getränkt, das anschließend unter erhöhter Temperatur aushärtet, so dass gleichzeitig mit dem Bauteil der Faserverbundwerkstoff entsteht. Die vorgefertigten Komponenten werden meist auf dieselbe Weise hergestellt. Nach dem Aushärten der Blattschalen wird Klebstoff in einer Misch- und Dosieranlage gemischt und auf eine der Blattschalen aufgetragen. Auf die Klebraupen werden die vorgefertigten Stege aufgesetzt und eingeklebt. Nach dem Aushärten der ersten Klebnähte wird erneut Klebstoff auf eine der Blattschalen und die Füße der bereits verklebten Stege aufgetragen, um die zweite Blattschale aufzukleben. Die Klebnähte werden dann ausgehärtet und das gesamte Rotorblatt wird im geschlossenen Formwerkzeug mehrere Stunden bei ca. 80°C getempert (nachgehärtet), damit das Harzsystem und der Klebstoff ihre vollen mechanischen Kennwerte erreichen. Das Rotorblatt wird anschließend entformt und es folgt die mechanische Nachbearbeitung, wie das Besäumen der äußeren Klebnähte und das Planfräsen der Ballwurzel, sowie die Lackierung. [BFP18]

Die Ablage und Drapierung von trockenen Fasergelege ist in der Praxis weiterhin ein manueller Prozess. Neben dem im Vorgängerprojekt BladeMaker entwickelten DTP-Prozess und DTP-Effektor [RFO17] finden sich weitere Automatisierungslösungen.

Das spanische Unternehmen Danobat Composites hat ein Verfahren und Endeffektoren zur Ablage von trockenen Glas- und Kohlefasertextilien entwickelt. Das dazugehörige Patent [AES16] beschreibt ein System zur Fertigung von Rotorblättern für Windenergieanlagen unter Nutzung der ADMP-Technik („Automated Dry Material Placement“). Es werden insgesamt 3 Portalroboter eingesetzt, die über zwei Formhälften eines Rotorblattes verfahren. Am gemeinsamen Portal werden Effektoren zur Applikation von Trennmittel, Lack und Sprühbinder als auch zur mechanischen Bearbeitung (Schleifen) befestigt. An den zwei Einzelportalen sind Endeffektoren zur Ablage von technischen Textilien montiert. Zur Ablage unterschiedlich breiter Textilbahnen stehen unterschiedlich breite Handhabungseffektoren bereit [AES16]. Die maximale Breite der abzulegenden Faserhalbzeuge beträgt 800 mm. [DAN15]

Am „Wind Energy Manufacturing Laboratory“ der Iowa State Universität wurde ein Verformungsmechanismus zur Ablage von trockenen Glasfasergelegen für komplexe Rotorblattgeometrien entwickelt. Durch das so genannte „shifting“ wird das Fasergelege in Schussrichtung gezielt geschert, um bei der Ablage auf gekrümmten Oberflächen die Entstehung von Falten zu reduzieren. Wird ein Fasergelege beispielsweise konventionell entlang einer Kurve geführt, so kommt es zu einer Faltenbildung an der Innenseite. Eine Faltenbildung wird im „shifting“-Verfahren durch mehrfache Scherung bestimmter Abschnitte vermieden. [Zhu15]

Wie bereits beschrieben ist die manuelle Ablage und Drapierung der trockenen Textilagen Stand der Technik. Es ist nicht bekannt, dass die beschriebenen Automatisierungslösungen bei Rotorblattherstellern eingesetzt werden.

Ein reproduzierbarer Infusionsprozess ermöglicht die Nutzung von höherreaktiven Infusionsharzsystemen mit einer kürzeren Aushärte- und Temperzeit. Stand der Technik sind je nach Bauteil ca. 2 h Aushärtezeit und 6 h Temperzeit [Kri17], wobei die Temperdauer einen Zeitpuffer enthält. Ein wichtiger Beitrag zur Reduktion der Temperzeit ist die Erkennung des Zeitpunkts, an dem der notwendige Aushärtegrad erreicht ist. Anhand des Temperaturverlaufs kann theoretisch der Aushärtegrad vorhergesagt werden. Mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) wird durch den Vergleich von Wärmeströmen zwischen einer Referenzprobe und der Materialprobe die Reaktion des Harzes charakterisiert und die Vorhersage des Aushärtegrades ermöglicht. Obwohl mit dieser Technik ein sehr genauer Fingerabdruck der

Reaktion erstellt werden kann, eignet sie sich aber prinzipbedingt nicht für Echtzeitüberwachung im Prozess [LM05]. Aus diesem Grund ist es Gegenstand der aktuellen Forschung, durch Messung der Permittivität des Harzgemischs mittels dielektrischer Sensorik einen Rückschluss auf den Aushärtegrad zu ziehen und so das Ende des Tempervorgangs zu bestimmen [Bra12, Bra13, LJP17]. Ein Nachteil hierbei ist, dass die Sensoren nur lokale Messung an der Oberfläche des Bauteils zulassen, da üblicherweise keine Sensoren ins Innere des Bauteils (ggf. mit Verkabelung) integriert werden.

Daher ist es sinnvoll, die gewonnenen Sensordaten mit Hilfe von Materialmodellen zu interpretieren und anhand von Simulationen Aussagen über das Gesamtbauteil treffen zu können. Anhand der Ionenviskosität und Temperatur werden die dynamische Viskosität und der Fortschritt der Vernetzung berechnet. Die Korrelation zwischen der Ionenviskosität und der dynamischen Viskosität konnte für ausgewählte Systeme bereits nachgewiesen werden [BBH14]. Analog kann die Ionenviskosität zur Bestimmung des Aushärtegrades genutzt werden [GTH20, HJP13]. Allerdings sind diese Korrelationen bisher nur für einzelne Harzsysteme ermittelt worden, ohne dass ein verallgemeinerndes Modell entwickelt wurde. Eine qualitative Korrelation zwischen Ionenviskosität und Aushärtekinetik konnte nachgewiesen werden [CBM15]. Mit Hilfe der DiBenedetto-Gleichungen kann anschließend der Zusammenhang zwischen dem Aushärtegrad und der Glasübergangstemperatur abgebildet werden [HJP13]. Für die Aushärtekinetik von Epoxidharzen sind etablierte Modelle vorhanden [Dom18], wenngleich diese nicht 1 zu 1 für schnellhärtende System genutzt werden können. Eine weitere Möglichkeit, Reaktionsmodelle anhand von DSC-Messungen zu erstellen, besteht in der Nutzung von Methoden des maschinellen Lernens [HXZ22]. Der Einfluss von Feuchte, die durch Balsaholz in den Aufbau eingebracht wird, auf die Reaktion wurde bisher nicht genauer betrachtet.

Um Aussagen für das gesamte Bauteil treffen zu können, müssen die Sensordaten und Materialmodelle in Simulations- oder Datenmodelle überführt werden. Ein aktuelles Forschungsthema ist die Kopplung des Imprägnierungs- und Aushärtevorgangs [SZH21]. In dem angewendeten Modell wird für die Aushärtung eine partielle Differentialgleichung aufgestellt, bei der die Strömungsgeschwindigkeit im konvektiven Teil berücksichtigt wird. Zur Auslegung des Prozesses kann das Modell sehr gut herangezogen werden, allerdings ist die Berechnungszeit zu lang, um für die Prozesssteuerung in Kombination mit Sensordaten genutzt zu werden. Ältere Modelle haben die Kopplung der Strömungssimulation mit der thermisch-chemischen Simulation über angepasste Viskositätsverläufe des Harzes integriert [HH95].

Meist werden jedoch die Prozessschritte getrennt betrachtet, da dadurch die Simulationszeit geringer ist. Bei der Aushärtesimulation findet eine Kopplung

zwischen thermischer und chemischer Simulation statt. Die Vernetzungsreaktion wird mittels Reaktionskinetik modelliert, während für die thermische Simulation die klassische Wärmeleitgleichung verwendet wird [BSH15]. Die Prozesssimulationen werden zur Auslegung und Optimierung des Prozesses verwendet, um beispielsweise die Temperaturverteilung homogener zu gestalten und die Aushärtezeit zeitgleich zu minimieren. Eine Echtzeitsimulation des Gesamtprozesses inklusive der Kopplung von Sensordaten wurde bisher nicht durchgeführt. Ein möglicher Ansatz zur Beschleunigung der Aushärtesimulation ist die Verwendung von neuronalen Netzen. Um die Datenmenge für das Training zu reduzieren, werden sogenannte physikalisch informierte neuronale Netze (PINN) verwendet [NHC21].

Die Aushärte- und Temperzeiten in der Hauptform lassen sich auch mittels des Temperiersystems der Form senken. Stand der Technik ist hierbei eine elektrische Heizung oder eine Wasserheizung [Den18]. Elektrische Widerstandsheizungen auf Kohlenstofffaserbasis, wie sie im Vorgängerprojekt BladeMaker umgesetzt wurden, ermöglichen es, das Heizsystem oberflächennah direkt am Bauteil unterzubringen und das Bauteil dadurch schnell aufheizen zu können [BGR17, Bra13, BRB16]. Die Temperatur beim Aushärten muss niedrig genug gewählt werden, damit das Rotorblatt durch die freiwerdende Wärme der exothermen Aushärtereaktion nicht beschädigt wird. Zudem kühlen Rotorblätter nach dem Tempern durch Wärmeabgabe an die Umgebungsluft relativ langsam ab, bis sie entformt werden können. Eine höhere Aushärtetemperatur und damit kürzere Aushärtezeit sowie eine schnellere Abkühlung lassen sich durch eine aktive Kühlung beschleunigen.

5 Zusammenarbeit der Partner

Die Zusammenarbeit der Projektpartner war außerordentlich gut. Da die Projektpartner über Expertise aus unterschiedlichen Bereichen verfügen, ergänzten sie sich sehr gut, entwickelten Ideen gemeinsam, diskutierten sehr offen und tauschten alle nötigen Daten, Materialien und Hardwarekomponenten untereinander aus.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete des BIK erfolgte im Wesentlichen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Fraunhofer IWES, Siemens AG, SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH und Saertex GmbH & Co. KG. Das FIBRE arbeitete im Projekt eng mit den Projektpartnern Fraunhofer IWES, Saertex GmbH & Co. KG, mit Westlake Epoxy GmbH, SINOI GmbH und Fibretech Composites GmbH.

6 Erzielte Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse der beiden Fachgebiete dargestellt.

6.1 Anforderungen an den DTP-Prozess und vorgeschaltete Prozesse (BIK)

Im Vorgängerprojekt BladeMaker konnte die Machbarkeit des DTP-Prozesses zur automatisierten Ablage und Drapierung von trockenen technischen Textilien in zweifach gekrümmte Formwerkzeuge gezeigt werden. Im Projekt BladeFactory wurden Schwachstellen des Ablage- und Drapierprozesses identifiziert und Optimierungen vorgenommen. Dabei lag der Fokus auf der Erstellung des Maschinencodes zur Bewegung der Roboter- und Effektorachsen sowie der Effetorkonfiguration. Ein weiterer Schwerpunkt war die Materialevaluierung im Hinblick auf das Zusammenspiel zwischen Prozess, Formwerkzeuggeometrien und Materialeigenschaften. Im Rahmen einer Anforderungsanalyse wurden Anforderungen an den DTP-Prozess sowie für vorgeschaltete Prozesse spezifiziert.

In Absprache mit den Projektpartnern SWMS, Siemens und dem Fraunhofer IWES wurde für den DTP-Prozess der Einsatz aller 6 Achsen des Roboterportalsystems entschieden. Dies bietet mehr Flexibilität für den Prozess, da der Effektor so zusätzlich um alle Raumrichtungen geneigt werden kann. Optimierungspotenzial gab es vor allem in der Erstellung des Maschinencodes für das Roboterportal. Die Übergabe der Positionswerte erfolgt durch ein NC-Programm und beinhaltet die Positionswerte der 6 Roboterachsen sowie der sieben Winkel für die Drapiermodule. Die Achse der Wickelwelle wird über die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verfahrgeschwindigkeit in x-Richtung (in Längsrichtung zum Rotorblatt-Formwerkzeug) geregelt. Die Ermittlung der Winkel für die Drapiermodule erfolgte im Vorgängerprojekt BladeMaker manuell in Abhängigkeit der Roboterachsen. Die Übergabe der Winkelwerte wurde über schnelle H-Funktionen gelöst, wobei eine simultane Übergabe der Werte nur für drei Drapiermodule möglich war. Bei höheren Verfahrgeschwindigkeiten der Portalanlage war die Programmierung durch die Nutzung der H-Funktionen allerdings sehr aufwendig und nicht zielführend. Außerdem konnte bei höheren Verfahrgeschwindigkeiten ein Ruckeln durch Abbremsen und Beschleunigen der Portalanlage wahrgenommen werden, dass zum einen auf die Übergabe der Werte als auch auf die Dynamikparameter der Portalanlage zurückgeführt werden kann. Als Festforderungen wurden die Berechnung von Achswerten anhand der CAD-Modelle der Formwerkzeuge und die Bereitstellung des NC-Code für den DTP-Effektor definiert. Dabei musste ein Ruckeln der Anlage verhindert werden.

Eine große Herausforderung innerhalb des DTP-Prozesses ist die Ablage und Drapierung der Gelege im Flatback-Bereich. Die Kantengeometrie verläuft an der Hinterkante des Formwerkzeuges, wobei die Höhe der Flanke und der Winkel der Kante über die Länge variieren. Es ergeben sich Winkel von bis zu 90°. Eine parallele Ablage und Drapierung entlang der Kante ist mit dem DTP-Effektor nicht möglich. Die Ablage verläuft längs zum Rotorblattformwerkzeug, wohingegen die Drapierung im Flatback-Bereich einer Kurve folgen muss. Zur Untersuchung von unterschiedlichen Glasfasergelegen und Drapiertechniken wurde ein Versuchsstand zur automatisierten Drapierung für die Flatback-Geometrie entwickelt.

Weitere dem DTP-Prozess vorgeschaltete Prozesse sind die Konfektionierung der Fasergelege sowie der Binderauftrag. Die Kontur des Zuschnittes ergibt sich aus dem abgewickelten CAD-Modell des Formwerkzeuges. Nach der Konfektionierung muss der Zuschnitt aufgewickelt auf einem Pappkern bereitgestellt werden. Zur Fixierung der Textillagen an den steilen Bereichen im Formwerkzeug ist ein Binderauftrag notwendig. Im Vorgängerprojekt BladeMaker wurde die Erstlagenfixierung durch den Auftrag von Binder auf einer über den Formrand gelegten Textillage untersucht.

6.2 Prozesseinflussanalyse zur Textilhandhabung (BIK)

In Absprache mit dem Projektkonsortium hat Saertex verschiedene Glasfasergelege zur Verfügung gestellt (s. Tabelle 1). Neben dem triaxialen Glasfasergelege KN G 850M3, welches bereits im Vorgängerprojekt BladeMaker eingesetzt wurde, werden diese sowohl für den DTP-Prozess, als auch für die automatisierte Drapierung im Flatback-Bereich untersucht. Die Materialparameter der Glasfasergelege sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Textilparameter der zur Verfügung gestellten Glasfasergelege

Material	KN G 850M3	Y-E-1199g/m ²	X-E-810g/m ²	U-E-640g/m ²
Hersteller	P-D Glasseiden	Saertex	Saertex	Saertex
Abkürzung	Triax PD	Triax ST	Biax ST	UD ST
Lagen- ausrichtung	-45°/45°/0°	-45°/45°/0°	-45°/0°/45°	-45°/45°/90°/0°
Flächen- gewicht in g/m ²	1. Lage: 300	1. Lage: 242	1. Lage: 401	1. Lage: 13
	2. Lage: 300	2. Lage: 242	2. Lage: 2	2. Lage: 35
	3. Lage: 240	3. Lage: 709	3. Lage: 401	3. Lage: 13
	-	-	-	4. Lage: 567

Nähfäden: Polyester	14 g/m ²	6 g/m ²	6 g/m ²	12 g/m ²
Bindungsart	Trikot/Franse	Trikot/Franse	Franse	Trikot
Stichlänge in mm	3,5	2,6	3	3
Dicke in mm (bestimmt nach DIN EN ISO 5084)	0,99	1,32	0,88	0,97

Materialcharakterisierung

Für die Glasfasergelege wurden die Dicken nach DIN EN ISO 5084 (s. Tabelle 1), die Biegesteifigkeiten nach DIN 53362 sowie das Scherverhalten im Scherrahmenversuche (Picture Frame Test) ermittelt.

Die Ermittlung der Biegesteifigkeit erfolgte mit Hilfe eines automatischen Cantilever-Verfahrens. Dabei wurden jeweils 6 Probekörper in den Orientierungen 90°, 45°, 0° und -45° getestet (s. Abbildung 4). Es sind deutliche Unterschiede im Wert der Biegesteifigkeit erkennbar. Das unidirektionale Gelege (UD ST), bei dem die Rovings hauptsächlich in 0°-Richtung vorliegen, hat beispielsweise eine hohe Biegesteifigkeit in 0°-Richtung und verhältnismäßig kleine Biegesteifigkeiten in den anderen Richtungen.

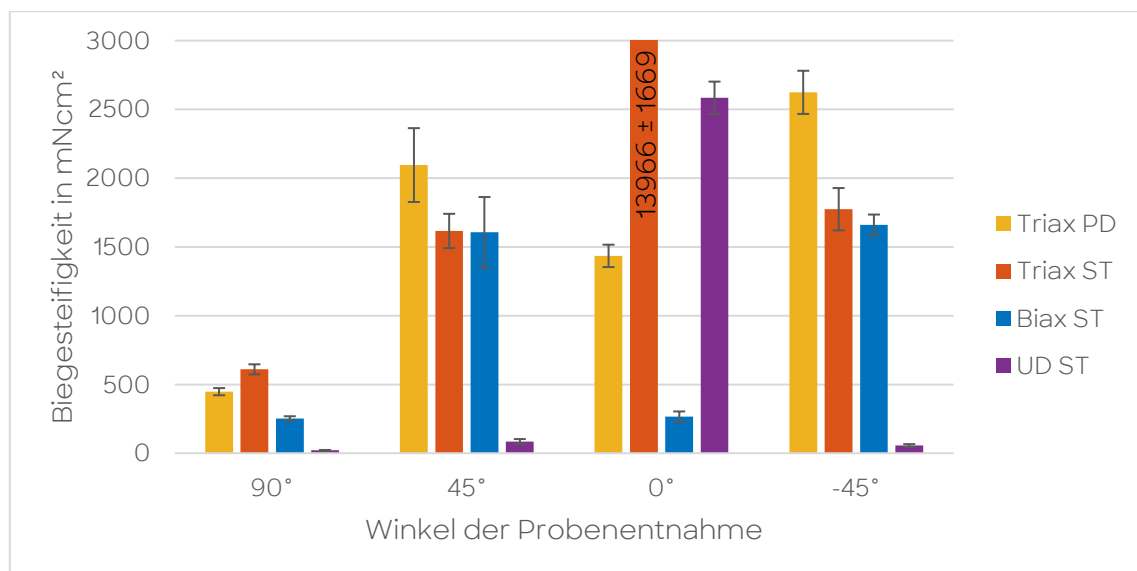


Abbildung 4: Biegesteifigkeiten der Glasfasergelege für verschiedene Winkel der Probenentnahme. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert an.

Das Scherverhalten der Fasergelege wurde mit Hilfe des dargestellten Scherrahmens (s. Abbildung 5) durchgeführt. Dabei werden die Proben so vorbereitet, dass die orthogonal zueinander laufenden Rovings an den Enden freigelegt und diese eingespannt werden. Der Scherrahmen wird in die

Zugprüfmaschine eingespannt und wie dargestellt geschert. Es wurden pro Fasergelege zwei Versuchsreihen (Binderfäden senkrecht bzw. quer zur Zugrichtung) mit jeweils sechs Einzelversuchen durchgeführt. Da die Binderfäden bei dem unidirektionalen Gelege entlang der Rovings der 0°-Richtung verlaufen, wurde nur eine Versuchsreihe durchgeführt.

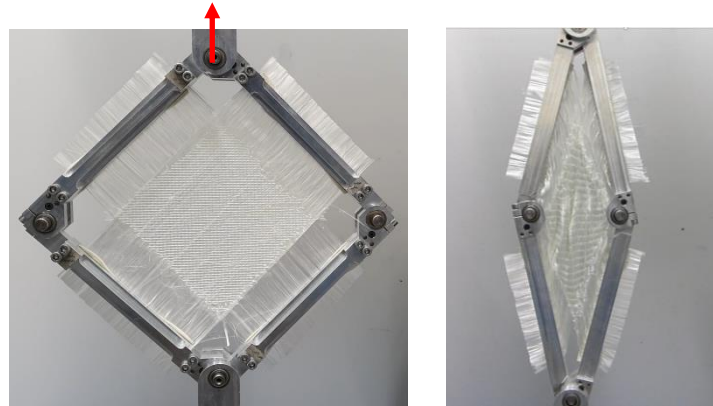


Abbildung 5: Scherversuch zur Bestimmung des kritischen Scherwinkels (vgl. [KOB21])

Zur Auswertung wird die normierte Scherkraft über dem Scherwinkel angegeben und der kritische Scherwinkel ermittelt (s. Abbildung 6). Der kritische Scherwinkel gibt an, wie weit sich das Gelege schert, bis die Rovings einer Textillagen aneinanderstoßen. Die Textilien zeigten ähnliche kritische Scherwinkel (s. Tabelle 1). Die Ergebnisse für die triaxialen Gelege sind dabei allerdings nur eingeschränkt aussagekräftig, da die Rovings der 0°-Lage nicht in den Scherrahmen eingespannt werden und die 0°-Lage somit nur indirekten Einfluss an der Scherung über die Bindung zu den anderen Textillagen nimmt.

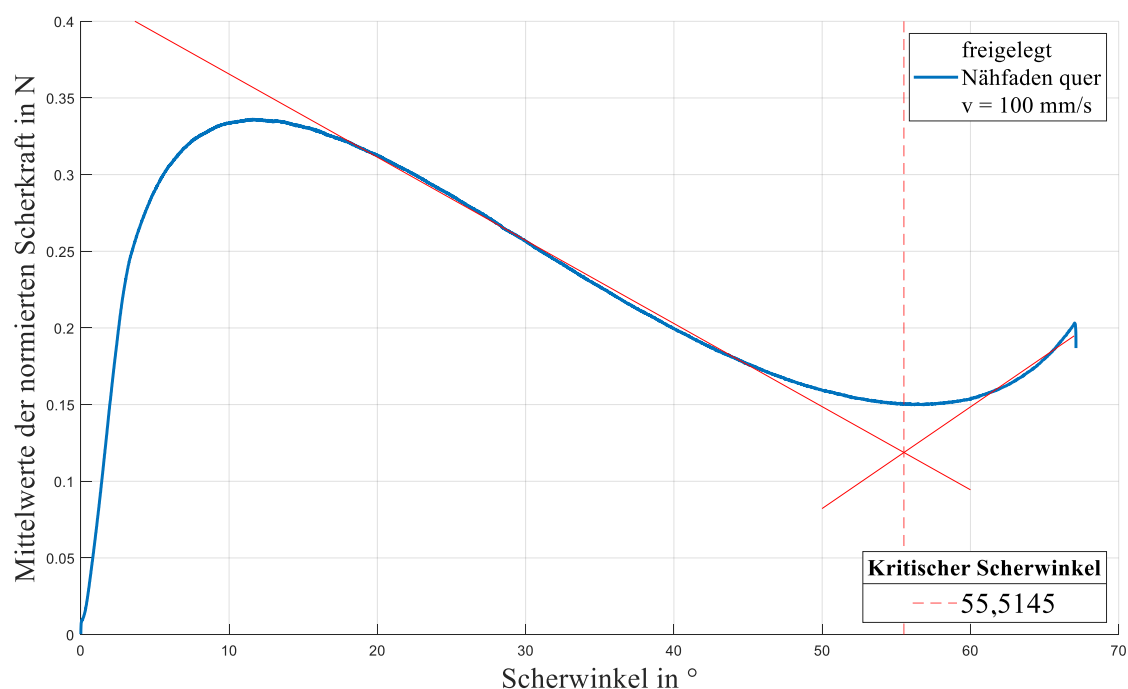


Abbildung 6: Auswertung des kritischen Scherwinkels, beispielhaft für Biax ST, Binderfäden quer

Tabelle 2: Kritische Scherwinkel der verwendeten Fasergelege

Kritischer Scherwinkel						
	Triax PD	Triax ST	Biax ST			UD ST
Binderfäden quer	$\approx 53^\circ$	$\approx 57^\circ$	$\approx 56^\circ$		Binderfäden diagonal	$\approx 53^\circ$
Binderfäden längs	$\approx 58^\circ$	$\approx 55^\circ$	$\approx 64^\circ$			





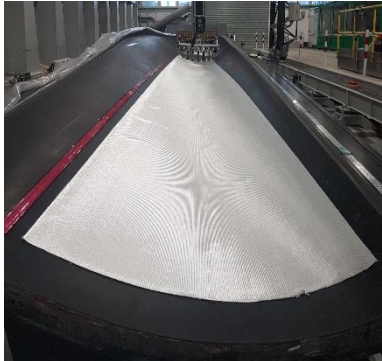
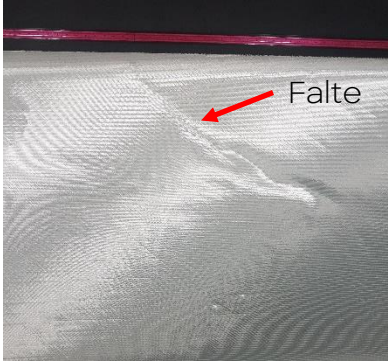


Da schon bei kleineren Scherwinkeln als dem kritischen Scherwinkel ein Ausbeulen der Proben aus der Ebene zu erkennen war, ist eine Übertragung der Werte für eine Aussage über die Drapierfähigkeit im realen Versuch nicht ausreichend.

Materialevaluierung durch Versuchsreihen im BladeMaker-Demozentrum am Fraunhofer IWES

Es wurden verschiedene Ablage- und Drapierversuche im BladeMaker-Demozentrum am IWES sowie am Technikum am BIK durchgeführt, um zu prüfen, welche Fasergelege durch den DTP-Effektor handhabbar sind und sich automatisiert verarbeiten lassen.

Am IWES wurde dafür jedes Fasergelege bei einer vorgegebenen Bahn im Formwerkzeug abgelegt. In Tabelle 3 sind Bilder der abgelegten Fasergelege über die Länge des Rotorblattformwerkzeuges sowie Detailaufnahmen aufgetretener Fehlstellen dargestellt. Die beiden triaxialen Gelege konnten ohne relevante Fehlstellen abgelegt und drapiert werden. Es traten vereinzelt Wellen sowie Druckstellen aufgrund der Lagerung auf. Im biaxialen Gelege bildeten sich kleinere Fehlstellen. Es reagiert empfindlicher auf das Herausstreichen von Falten bei der Drapierung. Dadurch kommt es teilweise zu einer größeren Wellen- bzw. Faltenbildung, als bei den triaxialen Gelegen. Das unidirektionale Gelege konnte zwar abgelegt werden, allerdings kam es zur Faltenbildung in Längsrichtung zum Formwerkzeug. Durch den geringen Anteil an Fasern in den $\pm 45^\circ$ bzw. 90° -Richtungen rutschte das Gelege durch die Schwerkraft zum Scheitelpunkt des Formwerkzeuges, sodass sich eine Falte gebildet hat. Diese Falte konnte vom Effektor nicht herausgestrichen werden.

Tabelle 3: Ablage- und Drapierversuche mit verschiedenen Fasergelegen am IWES

<p>Triax PD: KN G 850M3</p>		
<p>Triax ST: Y-E-1199g/m²</p>		
<p>Biax ST: X-E-810g/m²</p>		
<p>UD ST: U-E-640g/m²</p>		

Eine detailliertere Aussage zur Drapierqualität hat sich aus dem Abstand zwischen Formwerkzeug und Fasergelege ergeben. Sechs am Rahmen des

Effektors montierte Distanzsensoren wurden genutzt, um in Längsrichtung den Abstand vom Effektor zum Textil zu messen. Als Vergleichsmessung wurde das Formwerkzeug ohne abgelegtes Textil vermessen. Die Differenz der Messungen wurde berechnet und ist in Abbildung 7 für die untersuchten Gelege dargestellt. Es wurde jeweils ein Ablegeversuch pro Gelege durchgeführt, wobei die Abstände jeweils zwei Mal gemessen wurden.

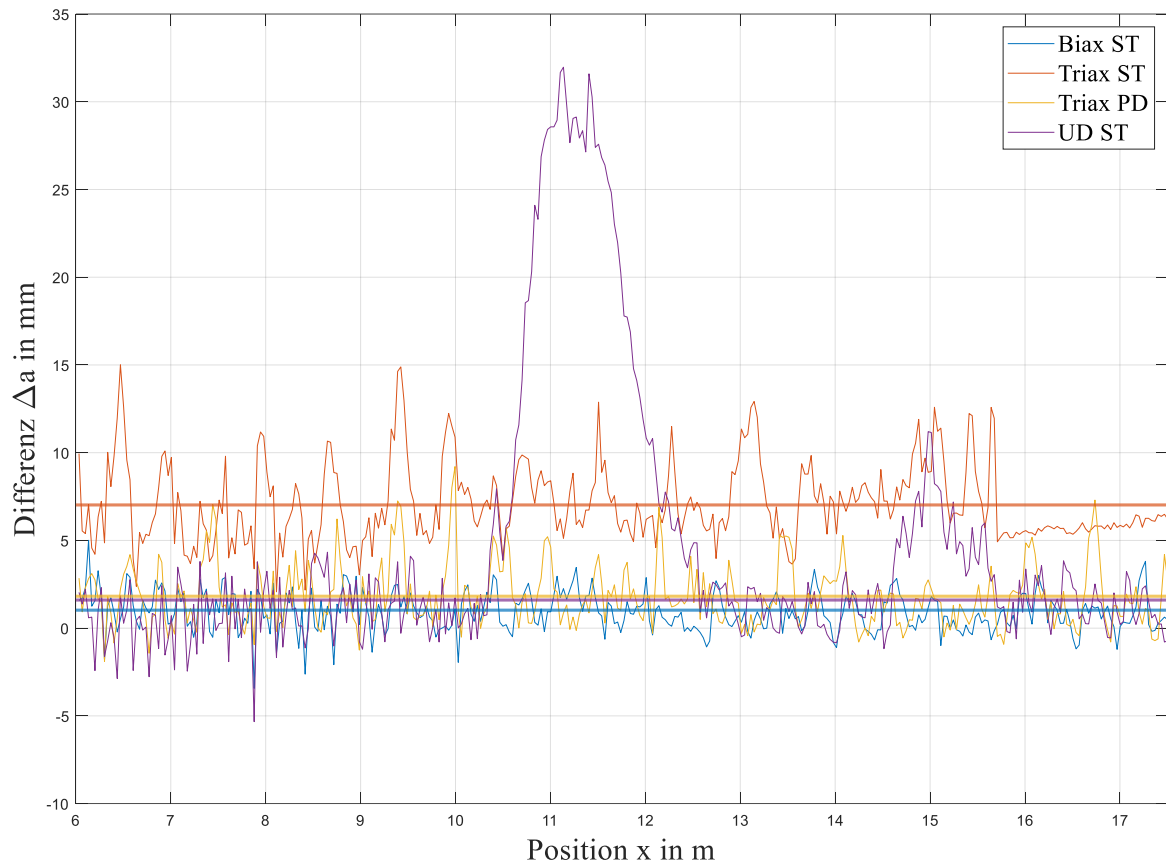


Abbildung 7: Differenz zwischen Fasergelege und Formwerkzeug über der Position im Formwerkzeug in Längsrichtung, exemplarisch für den Distanzsensor 4. Die horizontalen Linien zeigen die Mittelwerte (der Mittelwert für Gelege UD ST wurde ohne die Werte der ausgeprägten Fehlstellen berechnet)

Aus Abbildung 7 wird deutlich, dass es Unterschiede bei der Ablagequalität der Fasergelege gibt. Zum Vergleich eignen sich die dargestellten Mittelwerte (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Mittelwerte der Differenzen zwischen Fasergelege und Formwerkzeug aus Abbildung 7 sowie der Abstand zwischen Fasergelege und Formwerkzeug nach Abzug der Textildicke

	Triax PD	Triax ST	Biax ST	UD ST
Abstand zwischen Textiloberseite und Formwerkzeug	1,82 mm	7,02 mm	1,03 mm	1,60 mm
Abstand zwischen Textilunterseite und Formwerkzeug (nach Abzug der Dicke)	0,83 mm	5,7 mm	0,15 mm	0,63 mm

Es wurden beispielhaft die Sensorwerte des vierten Sensors verwendet. Die anderen Sensoren haben ähnliche Werte ergeben, wobei das Triax ST und das UD ST teilweise kleinere Abstände zum Formwerkzeug aufwiesen. Vergleicht man den Abstand von Fasergelege zum Formwerkzeug (nach Abzug der Dicke) wird deutlich, dass das Triax ST deutlich höhere Abstände zum Formwerkzeug aufweist, als die anderen Fasergelege. Dies kann auf die vergleichsweise hohe Biegesteifigkeit in 0°-Richtung zurückgeführt werden. Für das UD ST lässt sich die bereits zuvor beschriebene Falte deutlich erkennen. Durch die Bewegung des Effektors trifft der Laser nicht über die gesamte Länge auf die Falte. Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass es an den Randbereichen entlang der längs verlaufenden Kanten ein Abheben der Fasergelege Biax ST und Triax PD vom Formwerkzeug gab.

Materialevaluierung durch Versuchsreihen im Technikum am BIK

Am Technikum am BIK wurde ein Versuchsstand und ein Prozess zur automatisierten Drapierung der Fasergelege in eine Flatback-Geometrie entwickelt (s. Abbildung 8). Für den Versuchsstand wurde die Flatback-Geometrie des Referenzrotorblattes auf 1:3 herunterskaliert. Die Auswertung erfolgt über das Rückfederverhalten und über die Wellenbildungen. Dazu wurden Versuchsreihen durchgeführt, um verschiedene Einflussparameter auf das Drapierergebnis zu untersuchen.

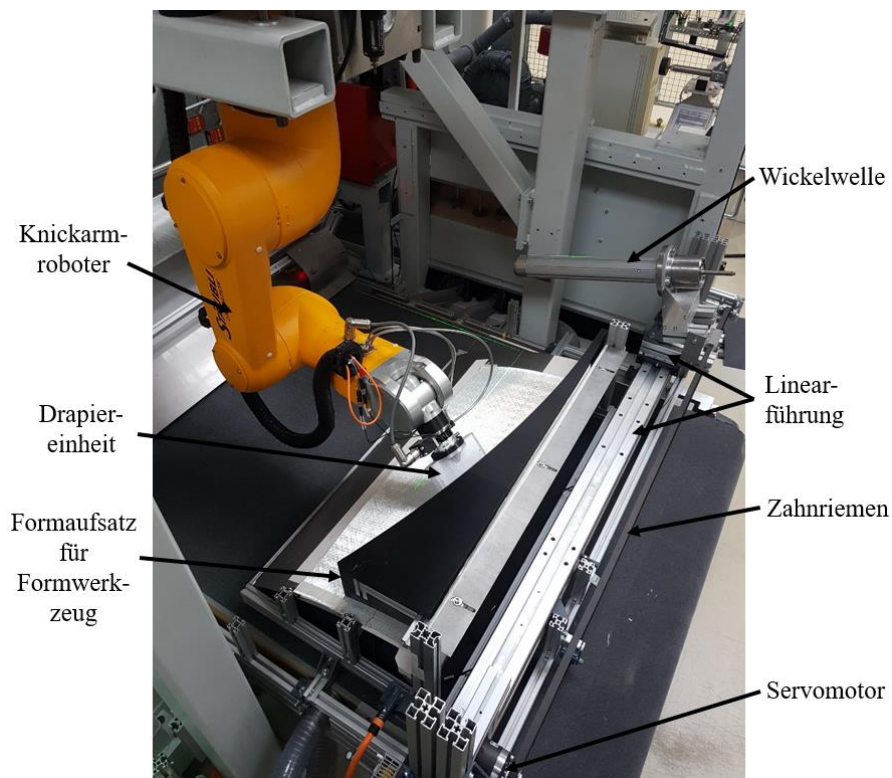


Abbildung 8: Versuchsstand zur automatisierten Drapierung von technischen Textilien

Der allgemeine Versuchsablauf teilt sich in folgende Prozessschritte auf, die in den folgenden Abbildungen erklärt werden. Zunächst wird ein Gelegezuschnitt manuell auf das Formwerkzeug gelegt und an der Unterseite an zwei Positionen mit doppelseitigem Klebeband befestigt (s. Abbildung 9). Dadurch wird ein Abrutschen und eine gleiche Positionierung der Zuschnitte über die Versuchsreihen gewährleistet. Der aufgelegte Zuschnitt schließt an der einen Seite des Bleches und an der Oberkante des Formaufsatzes bündig ab. Vor der Ablage wurden die Zuschnitte für mindestens 24 Stunden flach gelagert.



Abbildung 9: Manuelles Auflegen und Befestigen des Zuschnittes

Nachdem der Zuschnitt platziert wurde, wird die am Knickarmroboter montierte Drapiereinheit in die Startposition für die Drapierung verfahren (s. Abbildung 10). Das Einfahren der Drapiereinheit erfolgt mit 10 mm/s.



Abbildung 10: Einfahren der Drapiereinheit (der rote Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung an)

Ist die Bewegung abgeschlossen, erfolgt nach einer Verweilzeit von 3 s die Drapierung des Zuschnittes entlang der Kante des Formwerkzeuges (Abbildung 11).



Abbildung 11: Drapierung des Zuschnittes

Nach der Drapierung des Zuschnittes erfolgt die Aufnahme durch einen Laserscanner mit Laserlinie (Abbildung 12). Der Abstand des Laserscanners wurde so gewählt, dass die Mitte der Laserlinie in der Kante liegt und die vertikale Fläche des Formwerkzeuges vollständig aufgenommen wird. Die Geschwindigkeit der Laserüberfahrt beträgt 50 mm/s bei einer Profilfrequenz des Laserscanners von 50 Hz. Somit wird jeden Millimeter ein Laserprofil aufgenommen.

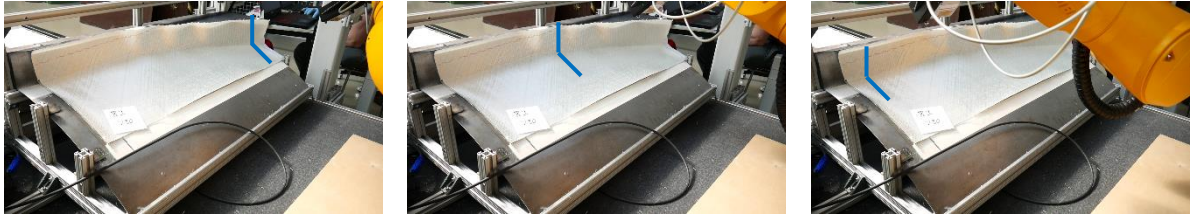


Abbildung 12: Aufnahme der Drapierergebnisse mit Hilfe eines Laserscanner mit Laserlinie

Ein beispielhaftes Ergebnis der Drapierung ist in Abbildung 13 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Formgeometrie mit dem automatisierten Drapierprozess abgebildet werden kann. Bei dem verwendeten Fasergelege (Triax PD) treten Wellen an der vertikalen Fläche des Formwerkzeuges auf.

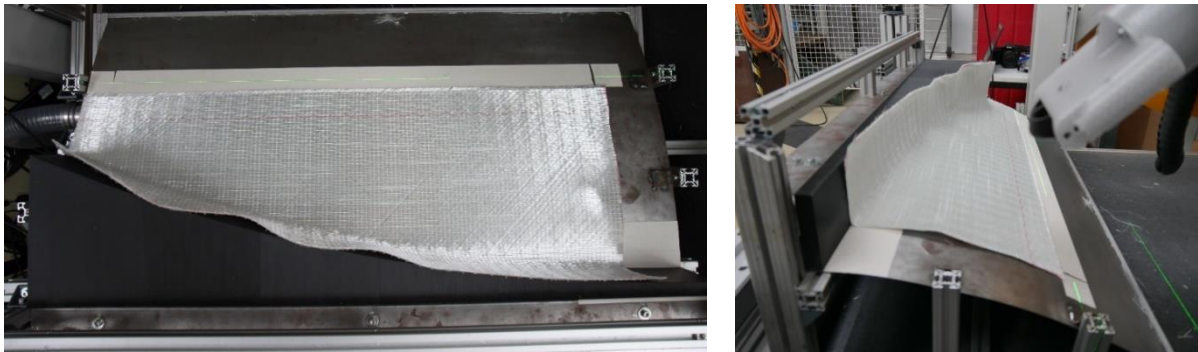


Abbildung 13: Automatisierte Drapierung der simulierten Flatbackgeometrie mit triaxialem Glasfasergelege

Für die durchgeführten Versuchsreihen wird zur Beurteilung des Drapierergebnisses primär das Rückfederverhalten verwendet. Dazu wird der Wert für den Spring-Back, der den Abstand zwischen Textil während der Drapierung und Textil nach der Drapierung in Richtung der Drapierung definiert (Abbildung 14). Der Spring-Back wird hier als negativer Wert verwendet. Je näher der Wert an Null liegt, desto weniger hat sich das Gelege nach der Drapierung zurückverformt.

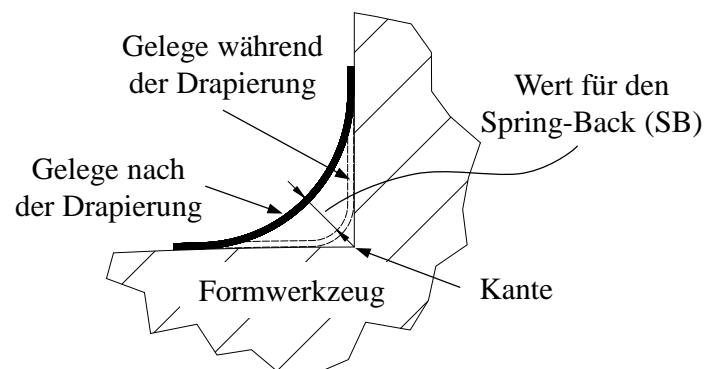


Abbildung 14: Darstellung des verwendeten Spring-Back-Wertes

Der beschriebene allgemeine Versuchsablauf bildet die Grundlage für die Versuchsreihen. Für die Aufnahme von Vergleichswerten wurden nach diesem Vorgehen 30 Versuche mit den gleichen Versuchsparametern durchgeführt. Zur

Auswertung werden die ermittelten Spring-Back-Werte für die zu untersuchenden Einflussparameter mit den Werten der Vergleichsmessung verglichen.

Die Versuchsreihen mit verschiedenen Fasergelegen haben ergeben, dass UD ST und Biax ST nur eingeschränkt für die automatisierte Drapierung im Flatback-Bereich geeignet sind. Das UD ST ist sehr biegeweich und ist durch die Schwerkraft sofort in das Formwerkzeug hineingerutscht. Für Kanten mit vertikalen Flächen ist es ungeeignet. Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Versuch wurde das Textil an der vertikalen Fläche angeklebt und anschließend automatisiert drapiert. Die Versuche lieferten allerdings keine aussagenkräftigen Ergebnisse. Das Biax ST konnte automatisiert drapiert werden, allerdings reagiert es empfindlicher gegenüber Krafteinwirkungen. Vor allem zu Beginn der Drapierung kam es zu einer Verschiebung und dadurch zu einer Scherung des Geleges. Betrachtet man das Rückfederverhalten über die Spring-Back-Werte ist ersichtlich, dass kleinere Werte als beim Triax PD erreicht werden (s. Abbildung 15). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Drapierversuchen am IWES.

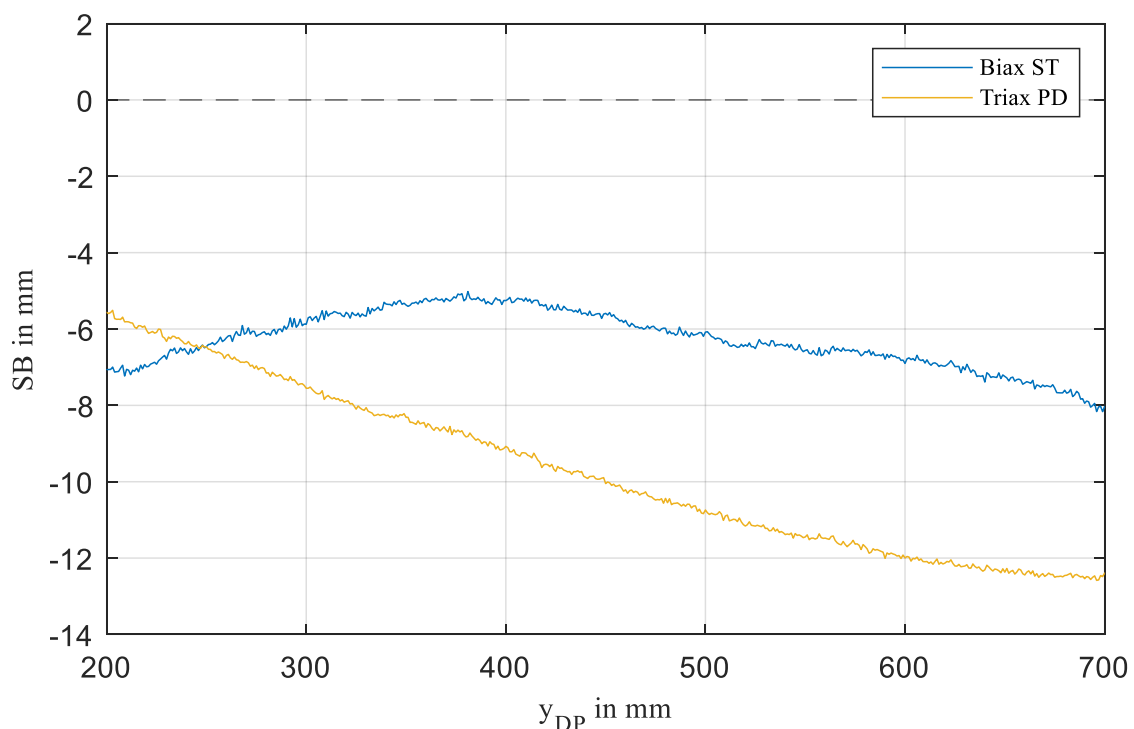


Abbildung 15: Spring-Back SB über Drapierposition y_{DP} für die Fasergelege Biax ST und Triax PD

Neben dem Spring-Back-Wert wurde außerdem die Wellenbildung der triaxialen Fasergelege ausgewertet. Bei gleichen Versuchsparametern zeigt Triax PD eine höhere Anzahl von Wellen. Ignoriert man den Anfangs- und Endbereich trat über die Versuchsreihen bei Triax ST nur eine bzw. keine Welle auf. Die Wellenhöhen erreichten für beide Fasergelege ähnliche Werte. Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Wellenbildung im Fasergelege durch die automatisierte Drapierung sowie einen Vergleich der beiden triaxialen Fasergelege.

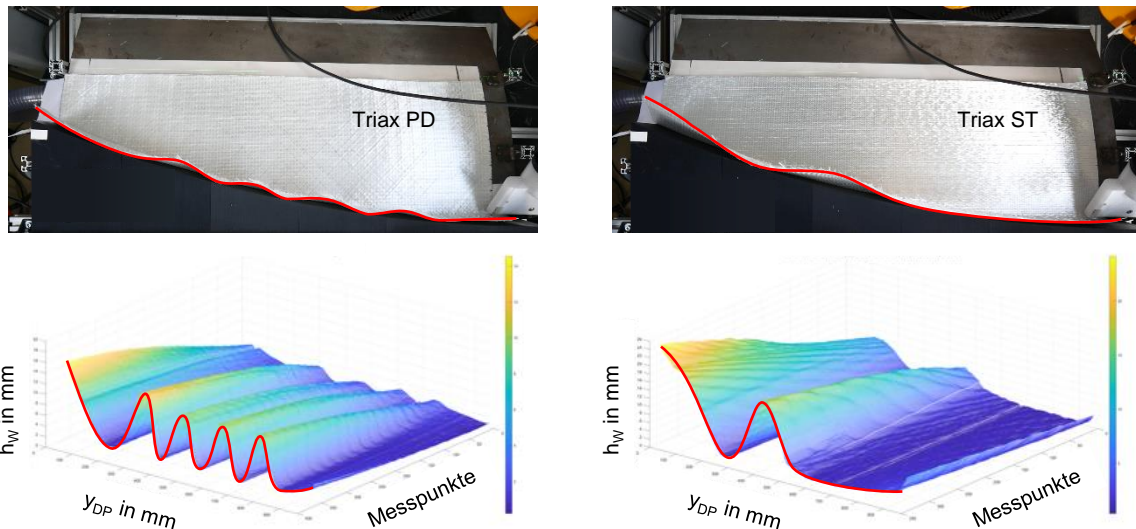


Abbildung 16: Wellenbildung an der vertikalen Fläche der Versuchsform nach der automatisierten Drapierung (Ansicht von oben) und Auswertung der Wellenhöhe h_w über der Drapierposition y_{DP} für die Punkte des Laserscanners auf der vertikalen Fläche

Aus den durchgeführten Versuchsreihen geht hervor, dass das unidirektionale Fasergelege UD ST nicht für eine automatisierte Handhabung geeignet ist. Die geringe Biegesteifigkeit in 90°-Richtung führt zu erhöhter Faltenbildung durch die Schwerkraft und äußere Kräfte. Das biaxiale Fasergelege Biax ST eignet sich für die automatisierte Drapierung im DTP-Prozess für große Flächen mit geringen Krümmungen. Bei komplexen Geometrien reichen bereits kleine Kräfte, um Fehlstellen im Gelege hervorzurufen.

Die untersuchten triaxialen Fasergelege können für die automatisierte Ablage und Drapierung eingesetzt werden. Das Triax PD zeigte eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Wellenbildung bei der komplexen Flatback-Geometrie. Das Triax ST war unempfindlicher gegenüber Wellenbildung. Durch die hohe Biegesteifigkeit ergaben sich allerdings höhere Abstände zwischen Fasergelege und Formwerkzeug.

6.3 Kontinuierliche Gelegeablage unter dem Aspekt der integrierten Intelligenz (BIK)

Untersuchung von Einflussparametern im automatisierten Drapierprozess

Am Versuchsstand zur Drapierung im Technikum am BIK wurden weitere Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss von bestimmten Prozessparametern zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass die Drapiergeschwindigkeit und die Drapierkraft signifikanten Einfluss auf den Spring-Back haben. Für kleine Drapiergeschwindigkeiten als auch für kleine Drapierkräfte kann der Spring-Back reduziert werden [ROT23]. Die Wellenbildung an der vertikalen Fläche war unabhängig von der Drapiergeschwindigkeit. Bei höheren Drapierkräften erhöhte sich allerdings die Anzahl und die Höhe der entstandenen Wellen.

Weitere Einflussparameter, die im Hinblick auf den Spring-Back untersucht wurden, waren das *mehrmalige Drapieren*, die *Richtung der Drapierung*, das *Drapieren einer zweiten Textillage* sowie die *Drapierung mit aufgewickeltem Zuschnitt*. Die Versuchsreihen wurden mit dem Triax PD durchgeführt und es wurden jeweils 6 Versuche pro Versuchsreihe durchgeführt. Für die Versuchsreihe *Drapierung mit aufgewickeltem Zuschnitt* wird die Wickelwelle (s. Abbildung 8) sowie ein auf einem Pappkern aufgewickelter Zuschnitt verwendet (s. Abbildung 17). Der Pappkern wird auf die Wickelwelle aufgeschoben und pneumatisch geklemmt. Während der Drapierung bewegt sich die Wickelwelle entlang des Formwerkzeuges (Abbildung 18). Der Zuschnitt wird automatisch abgewickelt und von der Drapiereinheit drapiert.



Abbildung 17: Auf Pappkern aufgewickelter Zuschnitt

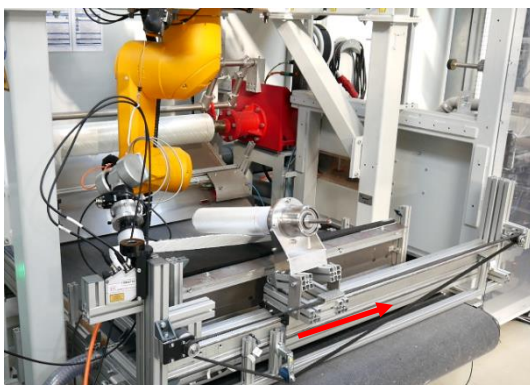
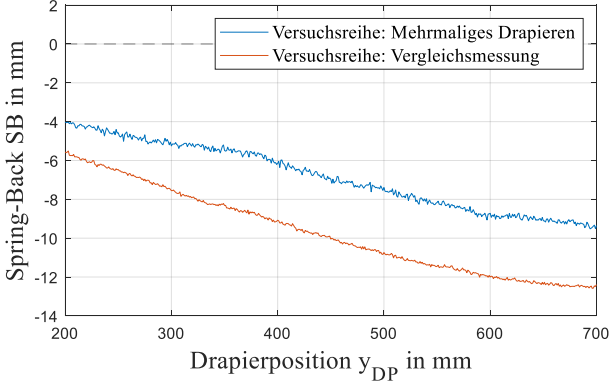
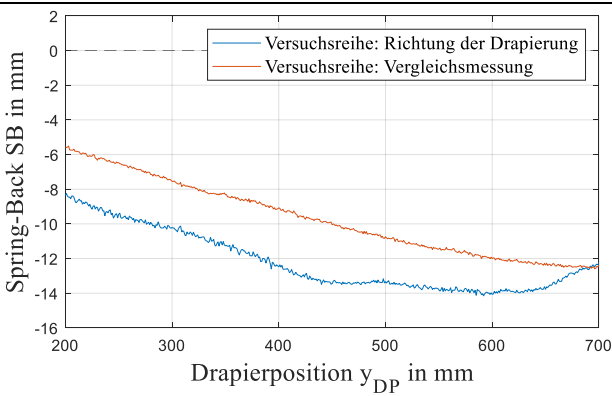
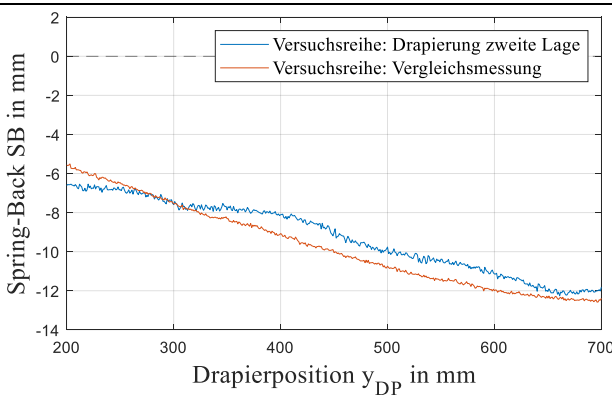
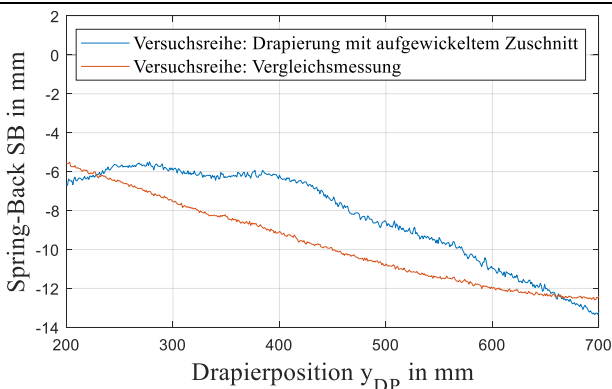


Abbildung 18: Automatisierter Drapierprozess mit Ablage des Zuschnittes mit Hilfe der Wickelwelle

Die Diagramme in der folgenden Tabelle zeigen die Mittelwerte des Spring-Back der jeweiligen Versuchsreihe im Vergleich zur Vergleichsmessung (vgl. Abbildung 9 Abbildung 10 Abbildung 11). Zur Untersuchung der Einflussparameter wurde eine konstante Geschwindigkeit am Berührungspunkt von Drapiereinheit und Fasergelege und eine konstante Drapierkraft gewählt.

Tabelle 5: Diagramme zum Vergleich von Einflussparametern über den Wert des Spring-Back

<p><i>Mehrmaliges Drapieren</i></p> <p>Der drapierte Zuschnitt wurde ein zweites Mal drapiert</p>	
<p><i>Richtung der Drapierung</i></p> <p>Die Drapierung erfolgte von der anderen Seite</p>	
<p><i>Drapierung zweite Lage</i></p> <p>Eine zweite Textillage wurde auf eine bereits drapierte Textillage drapiert. Dabei wird der Abstand von Drapiereinheit zu Formwerkzeug um die Dicke des Geleges erhöht.</p>	
<p><i>Drapierung mit aufgewickeltem Zuschnitt</i></p> <p>Die Ablage des Zuschnittes erfolgte automatisiert mit Hilfe der Wickelwelle</p>	

Aus den Versuchsreihen lässt sich festhalten, dass ein erneutes Drapieren positiven Einfluss auf die Werte des Spring-Back hat. Der Verlauf der Spring-Back-Kurve ist sehr ähnlich zu der Kurve der Vergleichsmessung, jedoch sind die absoluten Werte kleiner. Die Richtung der Drapierung hat höhere Spring-Back-Werte zur Folge. Die Drapierung eines zweiten Zuschnittes liefert sehr ähnliche Ergebnisse, der Einfluss auf die Werte des Spring-Back ist sehr gering. Aus der Versuchsreihe Drapierung mit aufgewickeltem Zuschnitt geht ein reduzierter Spring-Back hervor. Bei dieser Versuchsreihe traten stärkere Randeffekte auf, die auf den Spannungszustand im Gelege durch die Aufwicklung zurückzuführen sind.

Entwicklung der automatisierten Bahnplanung für den DTP-Effektor

Zur Optimierung des DTP-Prozesses wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern SWMS, Siemens und IWES die Bahnplanung für den DTP-Effektor weiterentwickelt und angepasst. Die Bewegung der Achsen des Roboterportalsystems sowie der Wickelachse des DTP-Effektors erfolgt durch Siemens-Antriebe. Die zusätzlichen Achsen zur Winkelanstellung der Drapiermodule wurde über Schrittmotoren und Motorsteuerungen des Unternehmens Nanotec Electronic GmbH & Co. KG realisiert. Die Ansteuerung der Schrittmotoren wurde zunächst über ein serielles Protokoll zwischen Siemens- und Nanotec-Steuerungen umgesetzt, in dem die Positionen übergeben wurden. Dabei wurden schnelle H-Funktionen verwendet, bei dem nur die Positionswerte von drei Schrittmotoren parallel übergeben werden konnten. Die Flexibilität der Drapiermodule war eingeschränkt und die automatische Generierung von NC-Code wurde sehr kompliziert, da der zeitliche Versatz in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit eingerechnet werden musste.

Das Problem konnte durch die Verwendung des Analog-Positioniermodus innerhalb der Nanotec-Steuerung gelöst werden. Die Spannungshöhe am Analog-Eingang ist dabei proportional zur gewünschten Position. Es wurden analoge Ausgangskarten zum dezentralen I/O-System ET 200 SP hinzugefügt, mit denen die analogen Spannungssignale zwischen -10 V und 10 V ausgegeben werden. Die Übergabe der Positionswerte zur Winkelanstellung der Drapiermodule kann dadurch in einem NC-Satz erfolgen. Das bereits beschriebene Ruckeln der Portalanlage konnte allerdings nicht verhindert werden.

Zur automatischen Erzeugung von NC-Code, der die Bewegungen des DTP-Effektors im Formwerkzeug definiert, hat SWMS den DTP-Prozess vollständig digital abgebildet (s. Abbildung 19). Dazu waren die möglichen Bewegungen des DTP-Effektors, vor allem der Drapiermodule, notwendig. In einer Versuchsreihe wurden die Grenzwinkel (Anstellwinkel der Drapiermodule und Neigungswinkel

der Drapierspitze) bestimmt, unter denen eine Drapierung möglich ist. SWMS hat daraufhin einen Algorithmus zur Bestimmung der Achs- und Positionswerte für die Ablage und Drapierung entwickelt.

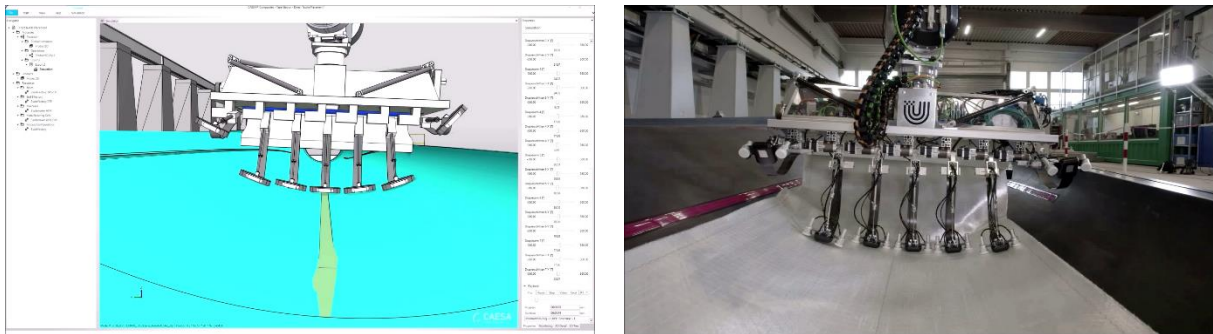


Abbildung 19: Digitale Prozessabbildung des DTP-Prozesses mit Hilfe der Software CAESA® durch SWMS (links) und reale Ablage- und Drapierung im BladeMaker-Demozentrum am IWES (rechts)

Der automatisch berechnete NC-Code wurde, wie in Abbildung 19 dargestellt, erfolgreich in realen Versuchen getestet. Es ist zu sehen, dass die beiden äußeren Drapiermodule hochgeschwenkt sind. Der Prozess wurde so gestaltet, dass Drapiermodule, die aufgrund der Geometrie des Formwerkzeuges nicht für die Drapierung benötigt werden oder den maximalen Grenz- bzw. Neigungswinkel überschreiten, nach oben geschwenkt werden (180° -Position). Aufgrund des Arbeitsbereiches der Drapiermodule zwischen 90° und 180° , können die Drapiermodule auch während des Drapierprozesses abgesenkt oder hochgeschwenkt werden.

Um das Ruckeln der Portalanlage zu minimieren wurden durch Siemens die Dynamikparameter der Anlage auf den DTP-Prozess angepasst. Da auch die Übergabe der Achs- und Positionswerte, die final durch Synchronaktionen gelöst wurde, Einfluss auf das Ruckeln haben, wurde außerdem der NC-Code optimiert. Die Achswerte der Roboterportalanlage werden alle 500 mm in x-Richtung (Längsrichtung zum Rotorblatt-Formwerkzeug) übertragen. Um die Kontur des Formwerkzeuges ausreichend genau abbilden zu können, werden die Winkelwerte der Drapiermodule alle 100 mm übergeben.

Neben dem Ruckeln der Portalanlage ist bei höheren Ablegegeschwindigkeiten aufgefallen, dass die Abwickelgeschwindigkeit des Wickelkerns nicht vollständig synchron zur Ablegegeschwindigkeit ist. Die Abwickelgeschwindigkeit wird über Distanzsensoren, die den Durchmesser des Wickelkerns messen, geregelt. Ändert sich der Durchmesser des aufgewickelten Fasergeleges, beispielsweise durch Ablösen des Fasergeleges, beeinflusst das den gemessenen Abstand und die Berechnung der Abwickelgeschwindigkeit. Es wurde daher eine Andruckeinheit konstruiert, mit der eine Andruckrolle an das aufgewickelte Fasergelege gedrückt werden kann. Außerdem wurde ein Softwarepotentiometer programmiert, mit dem die Abwickelgeschwindigkeit

manipuliert und dadurch die Abwickelgeschwindigkeit an die Ablegegeschwindigkeit angepasst werden kann.

Konfektionierung eines Fasergeleges und Ablage des Zuschnittes

Zur Absicherung des Prozesses wurde ein Zuschnitt des Fasergeleges Triax ST erzeugt und auf einer Bahn an der Hinterkante des Rotorblattformwerkzeuges abgelegt.

Die Zuschnitterzeugung erfolgte mit dem Schneidcutter im BladeMaker-Demozentrum (s. Abbildung 20, links). Die Geometrie des Zuschnittes wurde mit Hilfe der Software Fibersim erstellt. Der 18 Meter lange Zuschnitt wurde dabei stückweise zugeschnitten und am Ende per Hand auf einen Pappkern aufgewickelt (s. Abbildung 20, Mitte & rechts). In Abbildung 20 (Mitte) wird sichtbar, dass durch den Schneidprozess Rovings der 0°-Lage durchtrennt werden und sich diese leicht aus dem Gelegezuschnitt herauslösen.

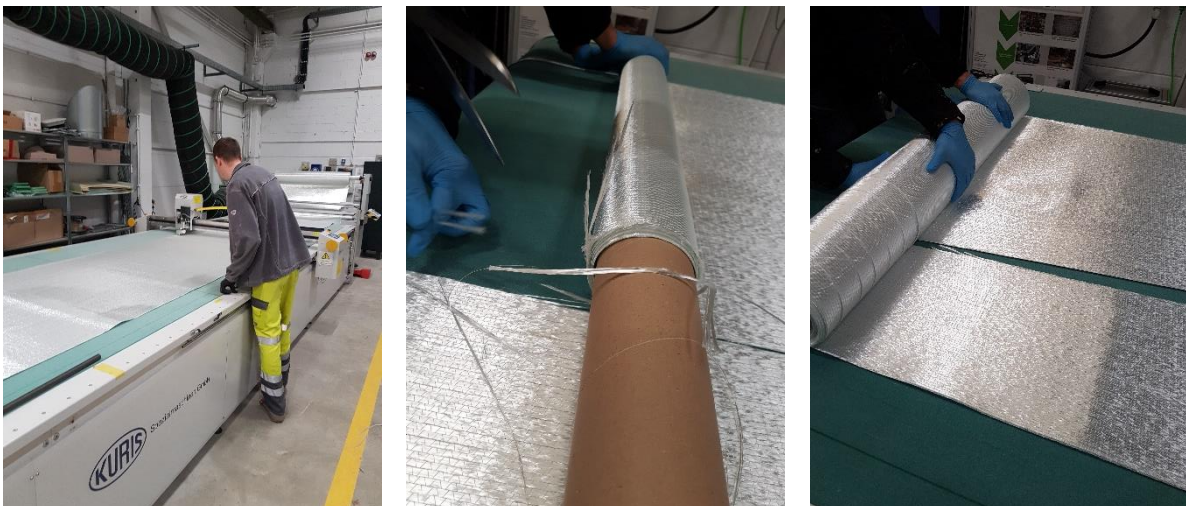


Abbildung 20: Zuschnitterzeugung mit dem Schneidcutter im BladeMaker-Demozentrum und manuelle Aufwicklung auf einen Pappkern

Zur Ablage des Zuschnittes im Formwerkzeug wurde ein neues NC-Programm erstellt. In Abbildung 21 ist erkennbar, dass zu Beginn nur 2 Drapiermodule im Einsatz sind. Im weiteren Verlauf der Ablage, bei zunehmender Breite des Zuschnittes, werden zur Drapierung weitere Drapiermodule in Richtung Formwerkzeug abgesenkt. Der optimierte Prozess und die Übertragung der automatischen Erstellung des NC-Code konnte erfolgreich andere Bahnen übertragen werden.



Abbildung 21: Ablage des Zuschnittes an der Außenkante des Rotorblattformwerkzeuges

Das zuvor beschriebene Herauslösen der Rovings in 0°-Richtung war problematisch, da sich die Rovings zum Teil um die Wickelwelle gewickelt haben, wodurch der Prozess unterbrochen werden musste. Außerdem entstanden durch das Aufwickeln der Rovings Zugkräfte, wodurch Fehlstellen im Zuschnitt hervorgerufen wurden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine Verklebung des Zuschnittes auf dem Pappkern erforderlich ist, da der Zuschnitt bei starker Neigung des Effektors auf dem Pappkern verrutscht. Alternativ kann ein anderes Wickelkernkonzept, welches im Vorgängerprojekt BladeMaker vorgestellt wurde, eingesetzt werden.

Bewertung der Formbelegung

Die Bewertung der Formbelegung erfolgte durch die Aufnahme und Auswertung von Kamerabildern und Sensordaten. Durch die Bildauswertung konnten qualitative Aussagen über die Drapierqualität getroffen werden. Die Auswertung von Sensordaten ließ quantitative Aussagen zu. Mit Hilfe der Trace-Funktion wurden analoge Ausgangssignale der eingesetzten Distanzsensoren (Punktlaser) über die Siemens-Steuerung aufgenommen. Das Konzept hat sich zur Ermittlung von großen Fehlstellen und zur Auswertung des Abstandes zwischen Gelege und Formwerkzeug als positiv herausgestellt. Für eine genaue Betrachtung von Fehlstellen reicht dieses Konzept jedoch nicht aus. Durch den Einsatz des Linienlasers im Technikum am BIK konnten sehr genaue Untersuchungen zum Materialverhalten durchgeführt werden, die Auswertung der großen Datenmengen ist für einen industriellen Einsatz jedoch ungeeignet.

Tabelle 6 zeigt die Unterschiede zwischen den untersuchten Fasergelegen in Bezug auf die gewählten Bewertungskriterien, die eine Aussage über die Drapierqualität zulassen. Die Kriterien wurden mit 0 (schlecht), 1 (mittel) und 2 (gut) bewertet. Über die Summe kann eine Rangfolge abgeleitet werden. Die Kriterien wurden nicht gewichtet.

Tabelle 6: Bewertung der untersuchten Fasergelege

Fasergelege Bewer- tungskriterien	UD ST	Biax ST	Triax ST	Triax PD
Rotorblattschalen				
Wechselwirkung zw. Gelege und Effektor	0	1	2	2
Faltenbildung	0	1	2	2
Abstand zw. Gelege und Formwerkzeug	1	2	0	1
Flatback-Bereich				
Wechselwirkung zw. Gelege und Drapiereinheit	0	1	2	2
Wellenbildung	1	2	1	0
Spring-Back	2	2	1	0
Summe	4	9	8	7
Rang	4	1	2	3

Bei gleicher Gewichtung der Bewertungskriterien ist das Biax ST das für den Prozess am besten geeignete Fasergelege. Da das UD ST allerdings ungeeignet für die automatisierte Drapierung ist, ist eine Substitution der triaxialen Gelege durch das unidirektionale und biaxiale Gelege nicht zielführend. Die triaxialen Fasergelege erreichen ähnliche Punktzahlen. Für den Bereich des Flatback bietet das Triax ST Vorteile, wobei der tolerierbare Abstand zwischen Formwerkzeug und Gelege beachtet werden muss. Bezieht man die Erkenntnisse aus der Ablage des Zuschnittes mit ein, ist das Triax ST ohne ein Besäumen der Schnittkante als zusätzlichen Prozessschritt ungeeignet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz unterschiedlicher Fasergelege für einen automatisierten Ablege- und Drapierprozess zielführend sein kann.

Effektorkonfiguration durch RFID

Die Erkenntnisse der durchgeführten Versuchsreihen zur Prozessoptimierung fließen in die Entwicklung des Konzeptes zur Effektorkonfiguration sowie Prozessgestaltung ein. Es wurde ein Konzept auf Basis der RFID-Technik entwickelt, welches eine Effektorkonfiguration ermöglicht. Die RFID-Technik wurde hardware- und softwareseitig an der Siemens-Steuerung im Technikum am BIK integriert und das Konzept verifiziert. Das Ablaufdiagramm zur Effektorkonfiguration mit Hilfe von RFID ist in Abbildung 22 beispielhaft für die Aufnahme eines Zuschnittes und einer zusätzlichen Einheit dargestellt.

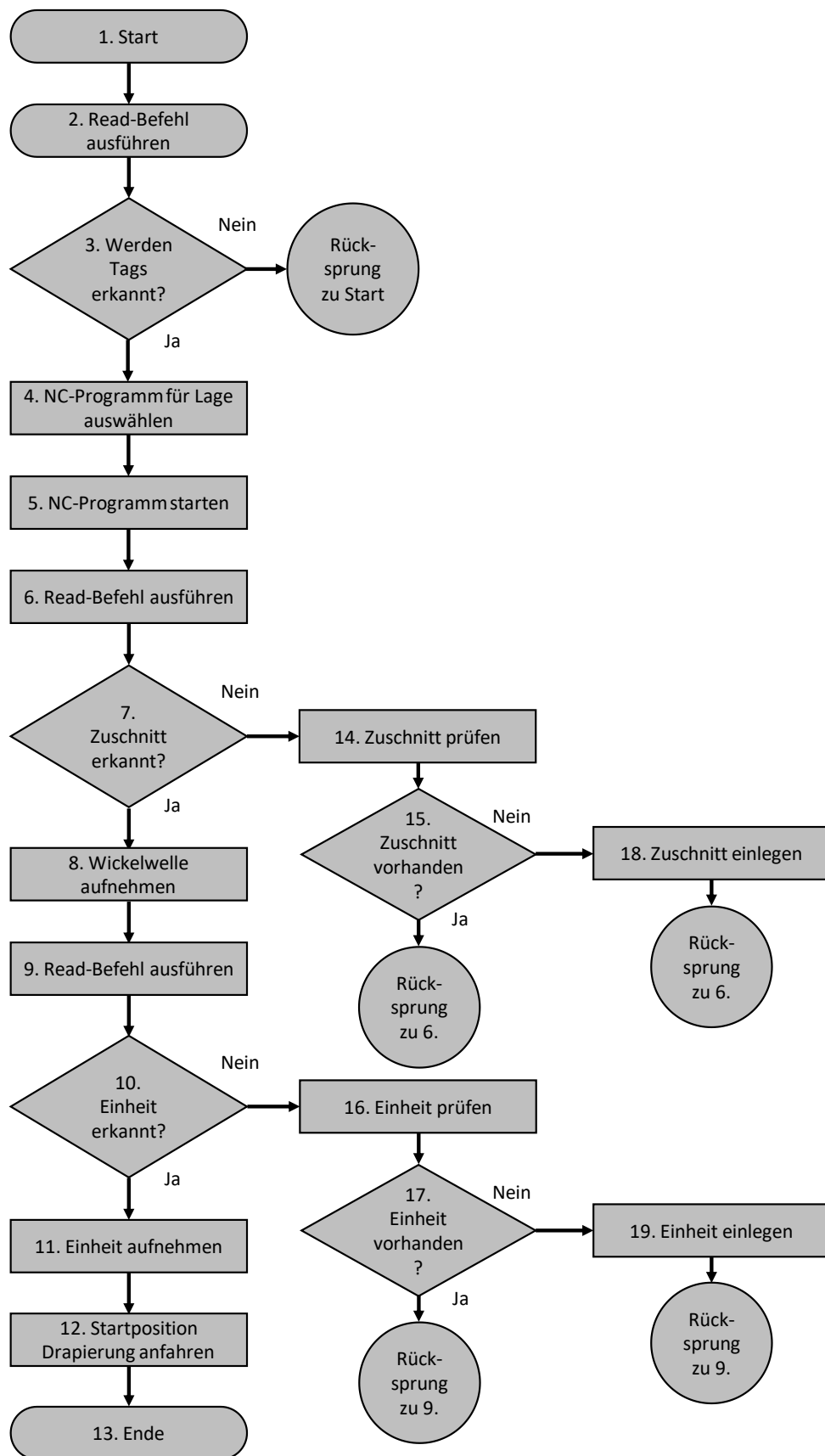


Abbildung 22: Ablaufdiagramm zur Effektorkonfiguration mit Hilfe von RFID

An der Siemens-Steuerung muss der Read-Befehl ausgeführt werden, sodass die im Antennenfeld des RFID-Readers befindlichen RFID-Tags ausgelesen werden. Dabei können maximal vier Tags parallel gelesen werden. Wenn sich Tags im Antennenfeld befinden und der Read-Befehl ausgeführt wird, erscheint eine Information, wie viele Tags erkannt wurden. Dabei werden alle Tags ausgewertet und eine Teileprogramm-Meldung auf der Oberfläche der Steuerung ausgegeben. Diese zeigt an, welche Tags gefunden wurden. Der Bediener muss im Folgenden entscheiden, welches NC-Programm anschließend ausgeführt werden soll.

Im Technikum am BIK wurde das RFID-Konzept an der Roboterportalanlage mit Hilfe des Knickarmroboters am Versuchsstand zur Drapierung evaluiert. Dabei wurde der RFID-Reader am Knickarmroboter und RFID-Tags am Formwerkzeug sowie an der Ablagestation für die Drapiereinheit und den Linienlaser platziert. Exemplarisch wurde der RFID-Tag mit der Beschriftung L6 am Formwerkzeug ausgelesen. An der Steuerung wird angezeigt, dass Layer 6 erkannt wurde (s. Abbildung 23). Wählt der Bediener das entsprechende NC-Programm und führt es aus, wird der am Portal gekoppelte Effektor durch die im Programm hinterlegten Verfahrenswege die nächste Position, z.B. zur Aufnahme einer Drapiereinheit, anfahren.

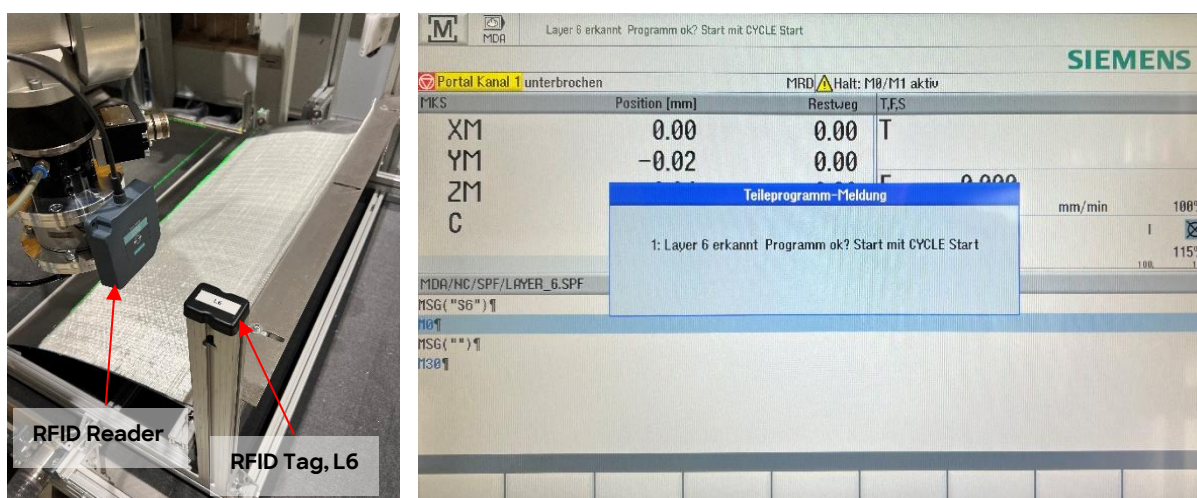


Abbildung 23: RFID-Reader am Knickarmroboter und am Formwerkzeug platzierter RFID-Tag (links) und Teileprogramm-Meldung über den erkannten RFID-Tag innerhalb der Siemens-Steuerung

Vor der Aufnahme der Drapiereinheit wurde der Read-Befehl ein weiteres Mal ausgeführt, um zu prüfen, ob die richtige Drapiereinheit an der Ablagestation bereitgestellt wird (s. Abbildung 24).



Abbildung 24: Ablagestation mit Linienlaser und Drapiereinheit und Auslesen des RFID-Tags der Drapiereinheit

Nach erfolgreicher Konfiguration des Knickarmroboters wurde anhand der im Programm hinterlegten Achs- und Positionswerte der Roboterportalanlage die Startposition zur Drapierung des Zuschnittes angefahren (Abbildung 25)

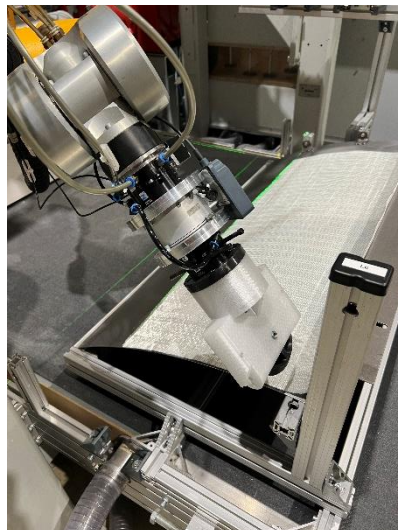


Abbildung 25: Startposition zur Drapierung des aufgelegten Zuschnittes

Das entwickelte Konzept kann auf den DTP-Prozess im BladeMaker-Demozentrum am IWES übertragen werden. Abbildung 26 zeigt ein mögliches Szenario für die Integration des Konzeptes.



Abbildung 26: Integration von RFID-Technik im BladeMaker-Demozentrum am IWES. Im Anfangsbereich der Grube können aufgewickelte Zuschnitte und zusätzliche Einheiten, wie z.B. eine weitere Drapiereinheit, aufgenommen werden.

Der DTP-Effektor wird mit einem RFID Schreib- und Lesegerät ausgestattet und eine zusätzliche Antenne verstärkt das Signal zum Auslesen der RFID-Tags. Die RFID-Tags zum Auslesen der Informationen zu den abzulegenden Gelegebahnen können an der Stirnseite des Rotorblattformwerkzeuges platziert werden. Im Anfangsbereich der Grube können Zuschnitte und zusätzliche Einheiten platziert werden.

6.4 Prozesseinflussanalyse für die Infusion und Aushärtung (FIBRE)

Die Infusion, die Aushärtung und das Tempern des Harzsystems beanspruchen einen Großteil der Formbelegungszeit. Durch die Simulation der Aushärtung kann die Prozesssicherheit erhöht werden. Mit Hilfe von Temperatursensoren und dielektrischen Sensoren im Werkzeug werden die Ist-Größen lokal gemessen und der Simulation zur Verfügung gestellt, um Aussagen über die Temperatur und Aushärtung über die Dicke des Laminats treffen zu können. Der experimentell und numerisch abgesicherte Aushärtungsprozess ermöglicht den Einsatz schneller härtender Harzsysteme, da Pufferzeiten für unerwartete Umgebungseinflüsse entfallen. Dies wird unterstützt durch die Entwicklung von Formkühlungstechnologien, die die aus der exothermen Aushärtereaktion des Harzes freiwerdende Wärme abführen und damit ein Überschreiten der zulässigen Maximaltemperatur verhindern.

6.4.1 Eignungsuntersuchung von schnellhärtenden Harzsystemen

Das verwendete Harz-Härter-Gemisch hat einen signifikanten Einfluss auf den Herstellungsprozess und auf die Qualität des fertigen Bauteils. Da die Infusion und der Aushärteprozess inklusive des Temperns den Großteil der Prozesszeit ausmachen, wurden im Projekt drei Harzsysteme unter folgenden Gesichtspunkten betrachtet:

- Kosten des Systems
- Verarbeitbarkeit (Topfzeit, Viskosität, Arbeitssicherheit)
- Mechanische Eigenschaften
- Feuchteaufnahme

Diese Anforderungsparameter wurden im Projekt mit den Partnern herausgearbeitet. Damit die Harze und die im Projekt entwickelten Methoden und gewonnenen Erkenntnisse schnell in die Praxis umgesetzt werden können, wurden nicht nur „latente“ bzw. schnellhärtende Harzsysteme betrachtet, sondern auch konventionelle Harzsysteme, die bereits in ihrer Handhabung bekannt sind. Unter „latenten“ Harzsysteme versteht man Systeme, bei denen die Reaktion erst bei höheren Temperaturen initiiert wird.

Im Projekt wurden in Zusammenarbeit mit Westlake Epoxy GmbH die Harz-Härter-Systeme gem. Tabelle 7 festgelegt.

Tabelle 7: Im Projekt verwendete Harzsysteme

Harzsystem	Härter	Mischungsverhältnis (Ha/Hä) Gew.-%
EPIKOTE Resin MGS RIMR 035c	EPIKURE Curing Agent MGS RIMH 037	100:28
EPIKOTE Resin MGS RIMR 135	EPIKURE Curing Agent MGS RIMH 137	100:30
EPIKOTE Resin MGS RIMR 1037LV	EPIKURE Curing Agent MGS RIMH 037F	100:24

Das Standardharzsystem RIMR 135 wird bereits seit vielen Jahren in der Rotorblattindustrie eingesetzt. Es ist bereits gut charakterisiert, sodass eine Betrachtung des Harzes im Rahmen dieses Projekts nur wenige Materialprüfungen mit sich bringt, da ausreichend Literaturwerte vorhanden sind. Das genannte Harzsystem wurde in den letzten Jahren von RIMR 035c als Standardharz abgelöst, welches Vorteile in Hinsicht auf den Preis und die Feuchteaufnahme aufweist. Als innovatives, schnellhärtendes Harzsystem wurde das RIMR 1037LV in das Harzportfolio mit aufgenommen. Dieses Harzsystem weist bei geringen Temperaturen eine geringe Viskosität und eine lange Topfzeit auf. Bei einer Erhöhung der Temperatur wird die Reaktion initiiert. Das Harz weist daher einen „latenten“ Charakter auf.

Da zu den einzelnen Harzsystemen bereits Kenntnisse bezüglich Topfzeit und Viskosität im für den Infusionsprozess relevanten Temperaturbereich vorliegen, wurde sich im Projekt auf die Entwicklung einer Reaktionskinetik konzentriert, um die Eignung der ausgewählten Harzsysteme beurteilen und vergleichen zu können. Die Reaktionskinetik lässt sich anhand DSC-Messungen aufstellen, aus der sich der Verlauf der chemischen Reaktion und somit auch die Wärmeentwicklung für einen beliebigen Temperaturzyklus ableiten lässt. Diese Informationen sind für die Aushärtésimulation ein entscheidender Inputfaktor. Die DSC-Messungen umfassen sowohl dynamische als auch isotherme Temperaturverläufe mit mindestens drei Wiederholungen.

Dynamische Messungen

Es wurden dynamische Messungen mit Heizraten zwischen 1 K/min und 20 K/min mit den unterschiedlichen Systemen durchgeführt. In Abbildung 27 ist das Messsignal Wärmestrom über die Temperatur für die Harzsysteme 035c und 1037LV dargestellt. Es zeigt sich, dass die Basislinie – also die Bereiche der Kurve, die keine Umwandlung zeigen – im Bereich über 200 °C liegen.

Da die Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Harzsysteme nach Angabe des Herstellers nur bis zu einer Temperatur von 180 °C gegeben ist, führt die Auswertung der dynamischen Messungen beim RIMR 1037LV zu Problemen. Die Reaktion ist bei diesen Temperaturen noch nicht abgeschlossen, was sich an stark unterschiedlichen Totalenthalpien zeigt. Da geringere Heizraten auf Grund der Kalibrierungsgrenze der eingesetzten Differenzkalorimeters Discovery DSC 250 nicht möglich sind, wurden im Weiteren isotherme DSC-Messungen durchgeführt.

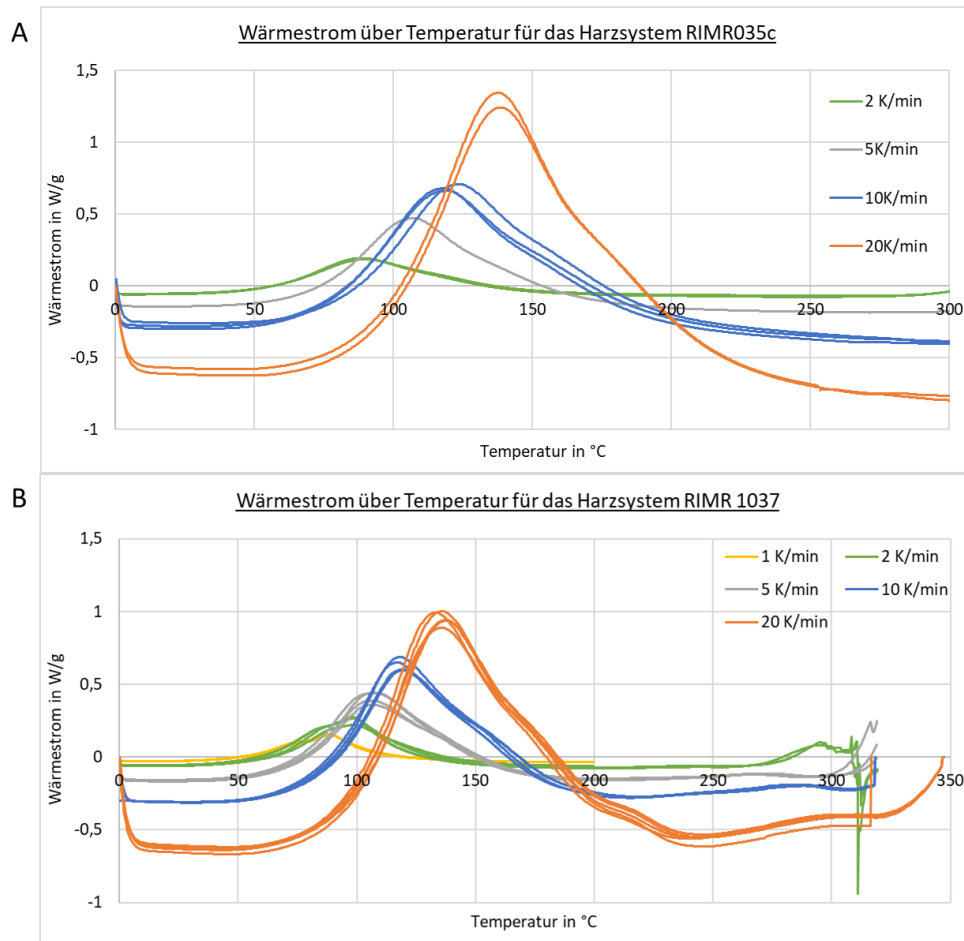


Abbildung 27: Ergebnisse der dynamischen DSC-Messungen für die Harzsysteme RIMR035c und RIMR 1037LV

Isotherme Messungen

Ein weiterer Vorteil der isothermen Messungen ist die Eindeutigkeit der virtuellen Basislinie, die bei vollständiger Aushärtung und konstanter Temperatur horizontal verläuft. Die Basislinie umschließt, gemeinsam mit dem Graph des Wärmestroms, die Fläche der umgesetzten Energie, wodurch die Gesamtenthalpie der Reaktion berechnet werden kann. Es wurden die Temperaturen 70, 80 und 90 °C über einen Zeitraum von 22 Stunden gewählt, um den maximal erreichbaren Umsatz sicherzustellen. Der gemessene Wärmefluss ist für die Harzsystem 035c und 1035 in Abbildung 28 dargestellt.

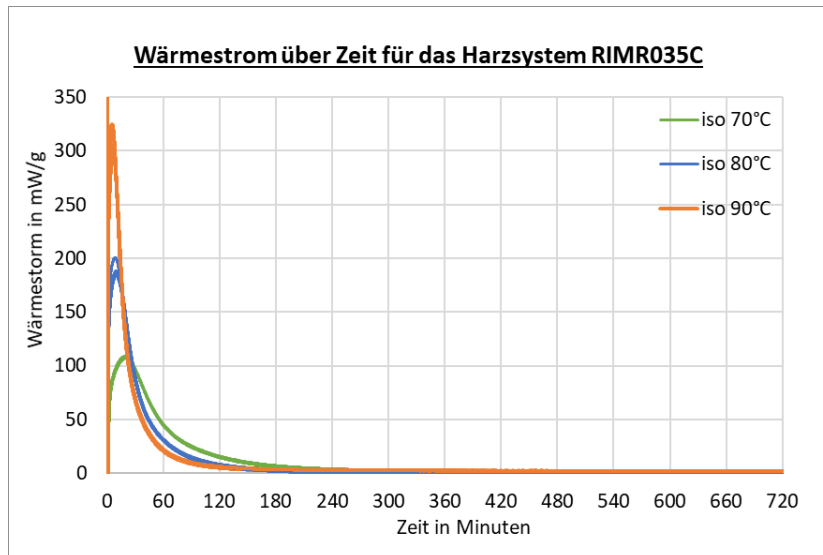


Abbildung 28: Ergebnisse der isothermen Messungen von RIMR035c

Um die Auswertung der Messungen zu beschleunigen und zu automatisieren, wurde im Rahmen des Projekts ein Python-Skript entwickelt. Das Skript nutzt als Inputparameter den normierten Wärmestrom $\frac{Q}{dt}$, um aus diesem Messsignal die Reaktionsrate $\frac{d\alpha}{dt}$ und den Umsatz α über die Zeit auszugeben. In Abbildung 29 sind die Reaktionsrate und der Aushärtegrad für das Harz RIMR 1037LV dargestellt.

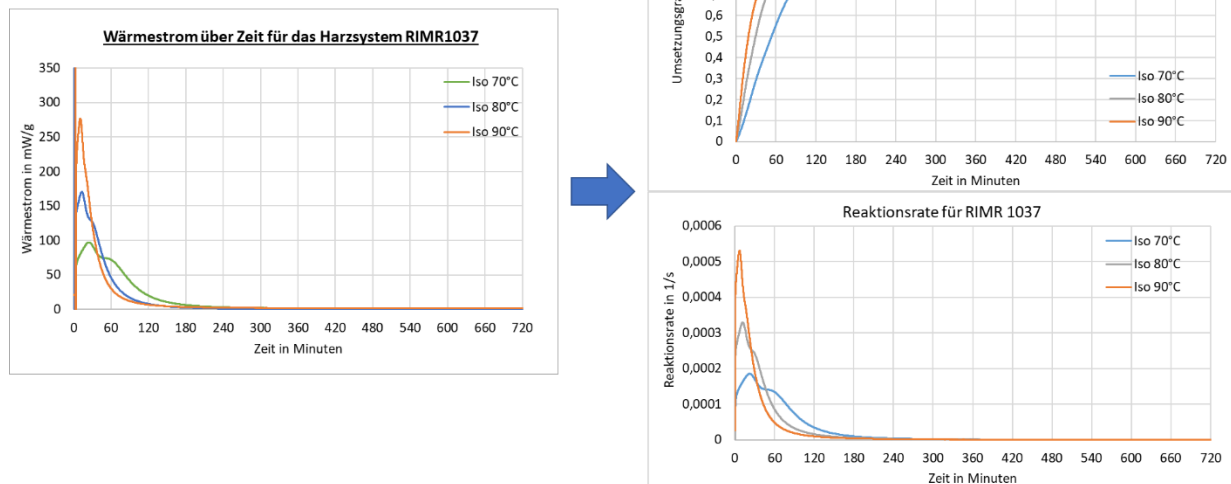


Abbildung 29: Ermittlung des Aushärtegrads und der Reaktionsrate anhand der DSC-Messungen (RIMR 1037LV)

Der Zusammenhang des Skriptes beruht auf der grundlegenden Annahme, dass die während der chemischen Aushärtereaktion freigesetzte Wärme der Enthalpieänderung während der Reaktion entspricht. Die Abhängigkeit zwischen Umsatzrate und Enthalpieänderung ist durch nachfolgende Gleichung gegeben,

wobei Q_{tot} die maximal mögliche Reaktionswärme für den vollständigen Umsatz darstellt.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{Q_{tot}} \frac{dQ}{dt} \quad \text{und} \quad \alpha = \int \frac{1}{Q_{tot}} \frac{dQ}{dt} dt \quad (1)$$

Zur Validierung der DSC-Messkurven sowie deren Auswertung, wurde die theoretische molare Reaktionsenthalpie der Reaktion Epoxidgruppe - NH-Gruppe bestimmt. Nach R. Bruce Prime [Bru98] haben die meisten Epoxid-Amin-Systeme eine Reaktionsenthalpie von 107 kJ/eq +/- 4kJ/eq. Dies ermöglicht die Berechnung der theoretischen, spezifischen Reaktionswärme über das Epoxyäquivalent des jeweiligen Harzes mit einer Genauigkeit, die mit experimenteller Charakterisierung nur schwer zu erreichen ist (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Vergleich der Reaktionsenthalpien, die theoretisch und mittels DSC-Messungen (Dynamisch und Isotherm) ermittelt wurden

Mittelwert von:	RIM 035c	RIM 135	RIM 1037
$Q_{tot,theo}$ in J/g	441 ± 16	469	517 ± 19
$Q_{tot,dyn}$ in J/g	438	-	nicht auswertbar
$Q_{tot,iso}$ in J/g	449	-	507

Für die beiden untersuchten Harzsysteme stimmen die theoretischen und ermittelten Reaktionswärmen gut überein, sodass die Messungen mit der DSC als valide betrachtet werden können. Für das RIMR 1037LV war die Auswertung der dynamischen Messungen nicht möglich, da die Reaktion nicht abgeschlossen war.

Reaktionskinetik

Im nächsten Schritt wurde anhand der Messungen (RIMR 035c, RIMR 1037LV) und der Literaturwerte (RIMR 135) die Reaktionskinetik der Systeme modelliert. Als mathematisches Reaktionsmodell wird das Kamal-Sourour-Modell (vgl. Gleichung 2) verwendet, welches insgesamt sechs Parameter besitzt.

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad \text{mit} \quad k_i(T) = A_i e^{\left(\frac{-E_i}{RT}\right)} \quad (2)$$

Die Parameter k_1 und n beschreiben die Reaktion n-ter Ordnung. Das autokatalytische Verhalten des Systems wird durch k_2 und m beschreiben. Die beiden Reaktionen basieren auf der Arrhenius Gleichung.

Um die Parameter für die einzelnen Harzsysteme und Messungen zu ermitteln, wurde ein weiteres Python-Skript entwickelt. Auf Basis des Outputs des ersten Python Skripts (Reaktionsrate und Aushärtegrad) werden die optimalen Modellparameter ermittelt. Das Optimierungsskript basiert auf dem Dual-Annealing-Algorithmus.

Für die Harzsysteme RIMR 035c und RIMR 135 liefert das Kamal-Sourour-Modell (Gleichung 2) gute Ergebnisse. Der Vergleich zwischen experimentellen Daten und Modell ist für das Harzsystem RIMR 035c beispielhaft in Abbildung 30 dargestellt. Die Übertragung des Modells auf einen typischen Heizzyklus bei der Fertigung von Rotorblättern ist mit den ermittelten Modellparametern möglich.

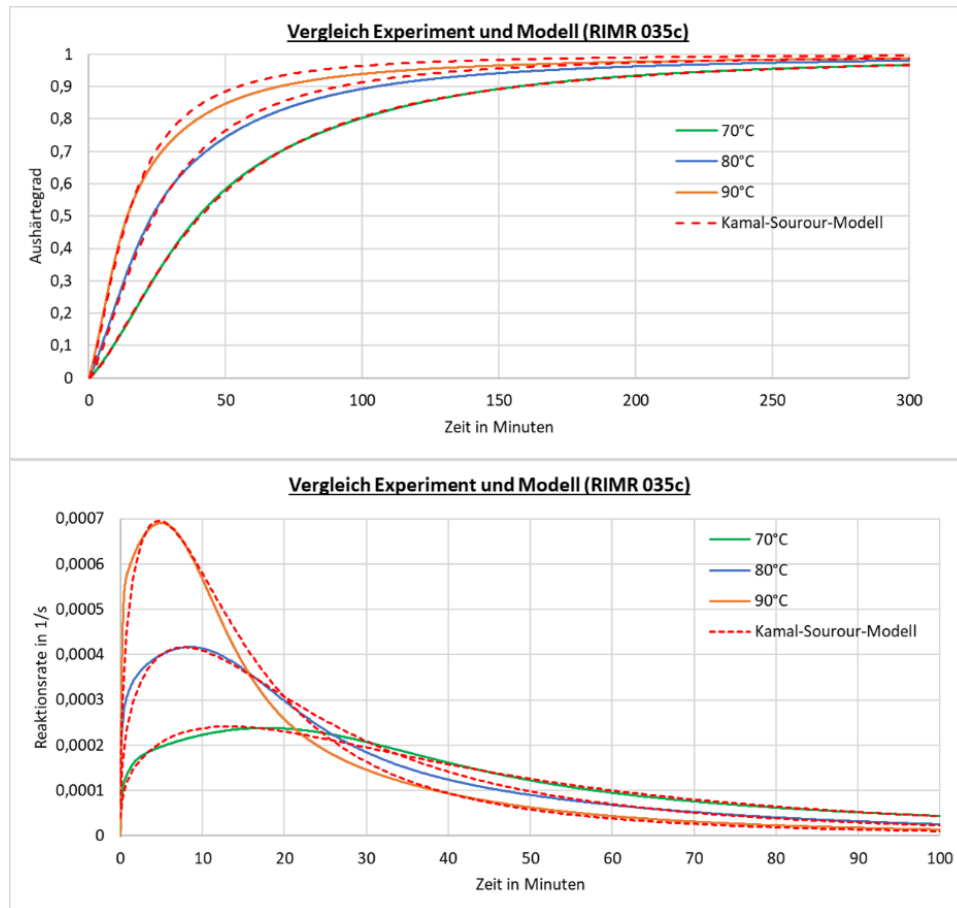


Abbildung 30: Vergleich des Reaktionsmodells mit den isothermen Messungen für RIMR 035c

Für das Harzsystem RIMR 1037LV kann das einfache Kamal-Sourour-Modell nicht verwendet werden, da bei dessen Aushärtung drei unabhängige Reaktionen parallel stattfinden, die jeweils unterschiedliche Anteile ψ_i an der Gesamtreaktion haben. Das folgende Reaktionsmodell wurde für die Modellierung verwendet:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \psi_i k_i (1 - \alpha_i)^{n_i} \cdot \alpha_i^{m_i} \text{ mit } k_i(T) = A_i e^{\left(\frac{-E_i}{RT}\right)}, i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Die Ergebnisse für dieses Harzsystem sind qualitativ schlechter als für die klassischen Systeme. Eine Gegenüberstellung zwischen Experiment und Modell ist in Abbildung 31 zu sehen.

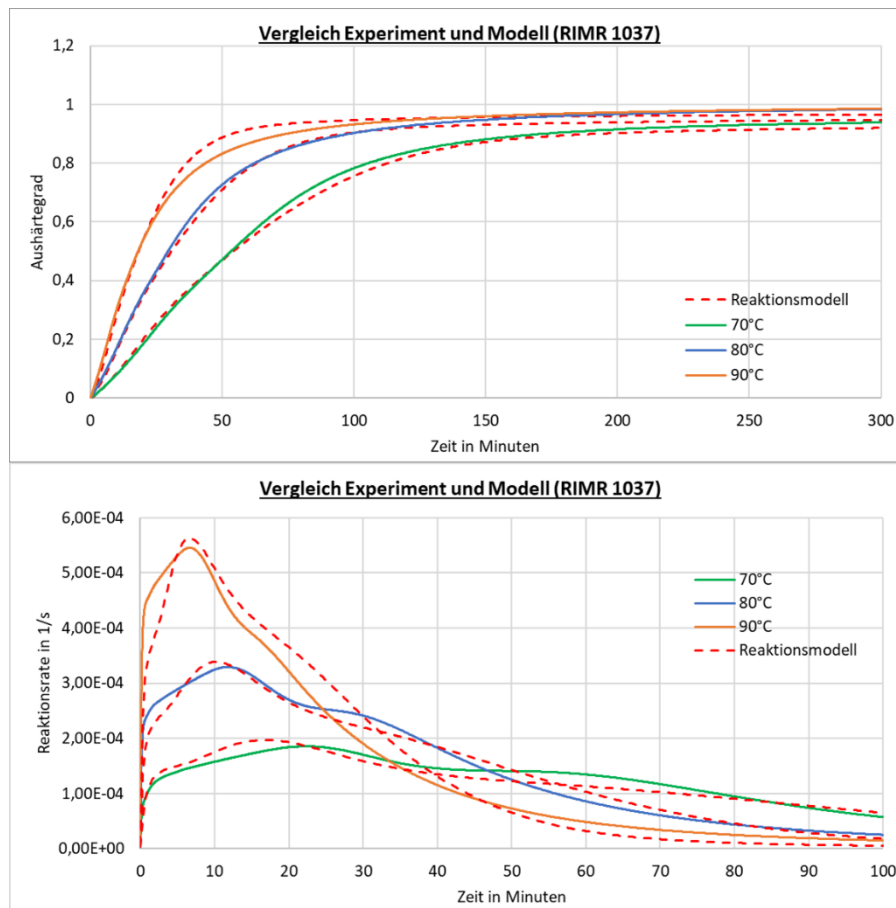


Abbildung 31: Vergleich des Reaktionsmodells mit den isothermen Messungen für RIMR 1037LV

Anhand der DSC-Messungen zeigen sich alle Harzsysteme als geeignet für die Fertigung von Rotorblättern. Im weiteren Verlauf wird der Einfluss der Feuchte auf die Reaktion für alle Harzsysteme betrachtet.

6.4.2 Ermittlung des Feuchteinflusses auf den Aushärteprozess

Der Feuchtegehalt im Balsaholz schwankt in der Praxis transport-, lagerungs-, und umweltbedingt stark. Auf Grund der vorherrschenden Balsaholzknappeheit ist in der Praxis eine fachgerechte Trocknung oftmals zu zeitaufwändig und es erfolgt das direkte Einlegen als Kernmaterial in die Form. Als Hauptproblem des Feuchteintrags durch Balsaholz in das Bauteil wurde, neben dem Feuchteinfluss auf die Geschwindigkeit der Aushärtereaktion, das sogenannte „Champagnerlaminat“ identifiziert. Dieses entsteht durch verdampfendes Wasser während der Aushärtereaktion, welches als Folge weiße Schleier im Bauteil bildet. Der Einfluss der Feuchte auf den ausgehärteten Faserverbundwerkstoff in Form von Quellen wurde einstimmig als in der Praxis nicht kritisch eingeschätzt. Die Qualitätsansprüche werden dadurch nicht relevant beeinträchtigt und das Quellen hat zudem einen positiven Effekt auf den Verzug durch Eigenspannungen.

Ziel ist es in diesem Projekt, den beschleunigenden Einfluss des Wassers auf die Geschwindigkeit der Reaktion zu ermitteln, um diesen später in den Simulationsszenarien und der Prozesssteuerung berücksichtigen zu können. Dies erfolgt zum einen durch DSC-Messungen und zum anderen durch dielektrische Messungen (DEA) an kleinen Bauteilen in der Klimakammer. Mit der angepassten Kinetik, die in der Regelung berücksichtigt werden kann, kann dann die Temperaturführung so geregelt werden, dass kein Wasserdampf entsteht.

Material

Im Projekt wurde ein triaxiales Glasfasergelege ($0^\circ/45^\circ/-45^\circ$) mit einem Flächengewicht von 1199 g/m^2 gewählt. Die 0° -Lage hat dabei ein Flächengewicht von 709 g/m^2 , während die 45° -Lagen lediglich ein Flächengewicht von 242 g/m^2 aufweisen (s. Tabelle 1, Y-E-1199g/m²).

Als Kernwerkstoff wird Balsa SB100 verwendet. Die Stärke des Kernwerkstoffes ist von der Platzierung innerhalb des Rotorblattes abhängig und kann von 6,35 mm bis 31,74 mm variieren. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurden Balsaholzproben mit einer Stärke zwischen 10 mm und 20 mm verwendet. Für alle Teilversuche dieser Versuchsreihe wurden quaderförmige Balsaholzproben verwendet, deren Oberseite eine Gitternetzstruktur aufweist (vgl. Abbildung 32).



Abbildung 32: Balsaholz SB100

Einfluss Feuchte auf Reaktionskinetik

Um den Einfluss des Feuchtegehalts auf die Reaktionskinetik zu untersuchen, musste gezeigt werden, dass dieser Einfluss mit der DSC-Analyse messbar ist. Dafür wurde dem Harzsystem RIMR 1037 LV ein Gewichtsprozent (Gew-%) Wasser beigefügt und mittels isothermen DSC-Durchlaufs bei 60°C der Wärmestrom gemessen. Ein Vergleich der Messungen mit Referenzproben ohne Feuchtezusatz zeigt, dass ein Einfluss erkennbar ist (vgl. Abbildung 33). Das Ergebnis entspricht den Erwartungen, da das Wasser als Katalysator, das heißt beschleunigend, wirkt und daher die maximale Reaktionsrate höher und früher auftritt. Die auto-katalytische Phase, welche bei den Proben ohne Wasserzusatz

auftritt, entfällt bzw. ist weniger ausgeprägt, weil von Beginn an mehr bzw. ausreichend Protonen (im Wasser) für die Reaktion zur Verfügung stehen. Um die auffälligen Streuungen des Messsignals zu reduzieren, wird eine geringere isotherme Temperatur gewählt, welche im Bereich der Infusionstemperatur liegt und somit auch besser den Prozessbedingungen entspricht.

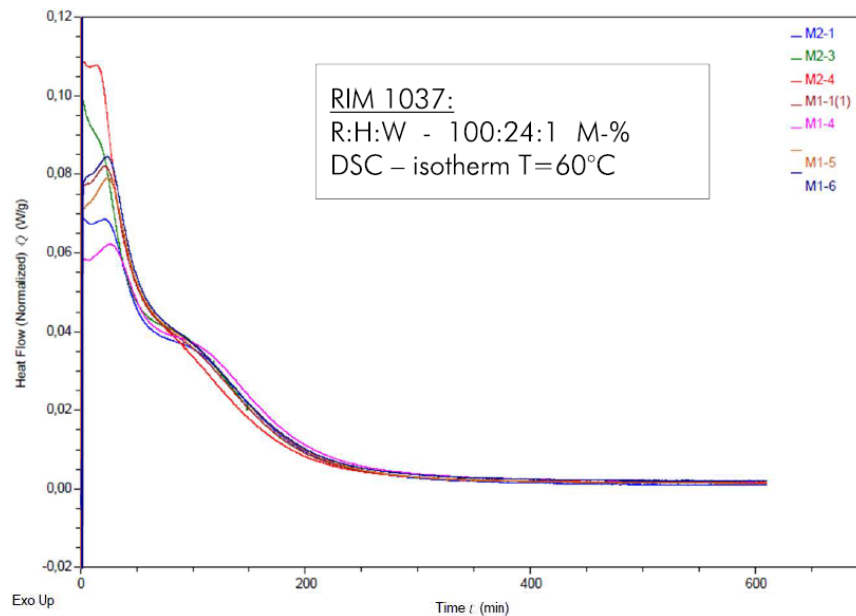


Abbildung 33: Vergleich normierter Wärmefluss über Zeit vom Harzsystem 1037 mit Feuchtezusatz (M2-*) und ohne Feuchtezusatz (M1-*)

Bestimmung des Feuchtegehalts im Balsaholz

Um einen realistischen Einfluss der Feuchte auf die Reaktion bestimmen zu können, muss zuerst die Frage geklärt werden, wie viel Feuchte durch das Balsaholz in den Fertigungsprozess eingebracht wird. Um diese Frage zu klären, wurden Versuche mit Balsaholz durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden Balsaholzproben getrocknet, um vergleichbare Ausgangsbedingungen für die nachfolgenden Versuche zu definieren. Dabei wurde die Methode der Normaltemperaturtrocknung in einem Klimaschrank (Vötsch Industrietechnik – VC 0018) bei 45 °C und 15 % rel. Feuchte angewandt. Nach über einer Woche ist keine Masseänderung mehr messbar, sodass das Holzfeuchtegleichgewicht erreicht ist.

Im zweiten Schritt wurden die Balsaholzproben im Klimaschrank einem definierten Klima ausgesetzt bis sich eine Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat (mit Ausnahme Klima 3). Dabei werden die vier Umgebungsszenarien nach Tabelle 9 unterschieden^{1,2}. Niesel- und Starkregen wurde durch eine definierte Anzahl von täglichen Sprühstößen bzw. zusätzlicher Wasserzufuhr nachgestellt.

¹ <https://www.wetterkontor.de/de/klima/klima-land.asp?land=EC>

² <https://www.wetterkontor.de/de/klima/klima-land.asp?land=id>

Der Feuchtegehalt der Proben während der Exposition im jeweiligen Klima bezogen auf die Normaltrockenmasse ist in Abbildung 34 dargestellt.

Tabelle 9: Umgebungsszenarien für den Feuchtgehalt des Balsaholzes

Klima 1	Klima 2	Klima 3	Klima 4
“Ecuador”	“Ecuador”	“Ecuador”	“Indonesien”
23,5 °C; 75% rF	23,5 °C; 75% rF	23,5 °C; 75% rF	30 °C; 85% rF
-	mit Nieselregen	mit Starkregen	-

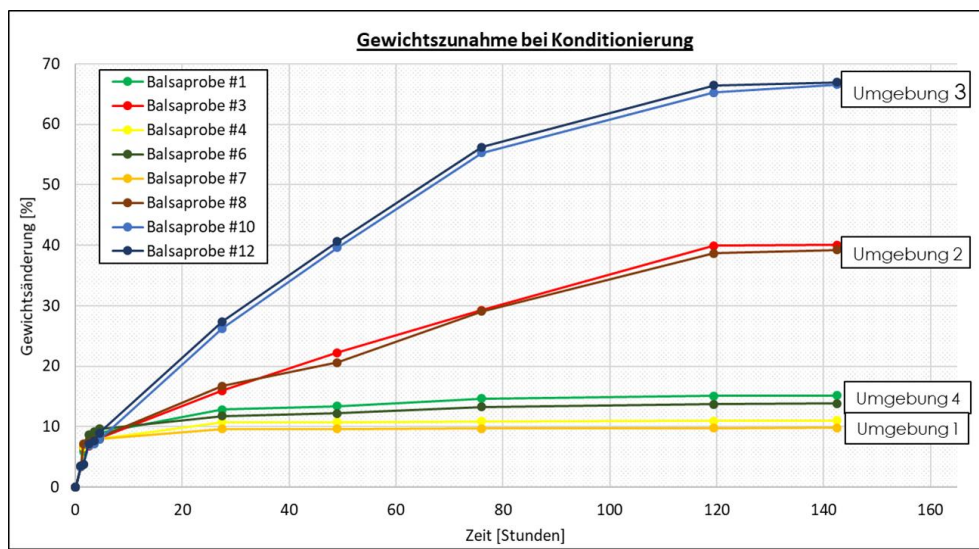


Abbildung 34: Gewichtszunahme während der Konditionierungsphase in den unterschiedlichen Umgebungsszenarien

Die konditionierten Proben wurden im dritten Schritt in einem Versuchsaufbau realen Prozessbedingungen (ohne Harzinfusion) unterworfen, um die Feuchteabgabe des Balsaholzes im Prozess zu verfolgen. Das Balsaholz (mit und ohne zusätzliche Glasfaserlagen) wurde im Vakuuminfusionsaufbau für 1,5 Stunden bei 40°C und für 8 Stunden bei 80°C gelagert. Anhand der Versuchsergebnisse kann eine Aussage über die Restfeuchte im Laminat getroffen werden, die die Aushärtereaktion beeinflusst.

In Abbildung 35 A ist der prozentuale Gewichtsverlust des Balsaholzes bezogen auf das Gewicht am Ende des jeweiligen Konditionierungsschritts dargestellt. In Abbildung 35 B ist die Gewichtsänderung des Laminats (Balsa und 20 GF-Lagen) dargestellt. Es wurde die Gewichtsänderung für das Balsaholz und für die GF-Lagen getrennt gemessen. Eine Gewichtskontrolle erfolgte jede halbe Stunde. Es zeigt sich, dass die Feuchte aus dem Balsaholz durch das Textil hindurch transportiert wird und aus dem Vakuumsystem austritt. Dies wird auch durch Kondensat am gekühlten Absaugschlauch der Vakuumpumpe sowie einer Wasseransammlung in der Harzfalle deutlich. Außerdem ist zu beobachten, dass insbesondere bei einem großen Feuchteeintrag durch Balsaholz während der

Infusionszeit der Feuchtegehalt im Textil fast 2,5% erreicht. Dieses Wasser kann für die chemische Reaktion relevant werden.

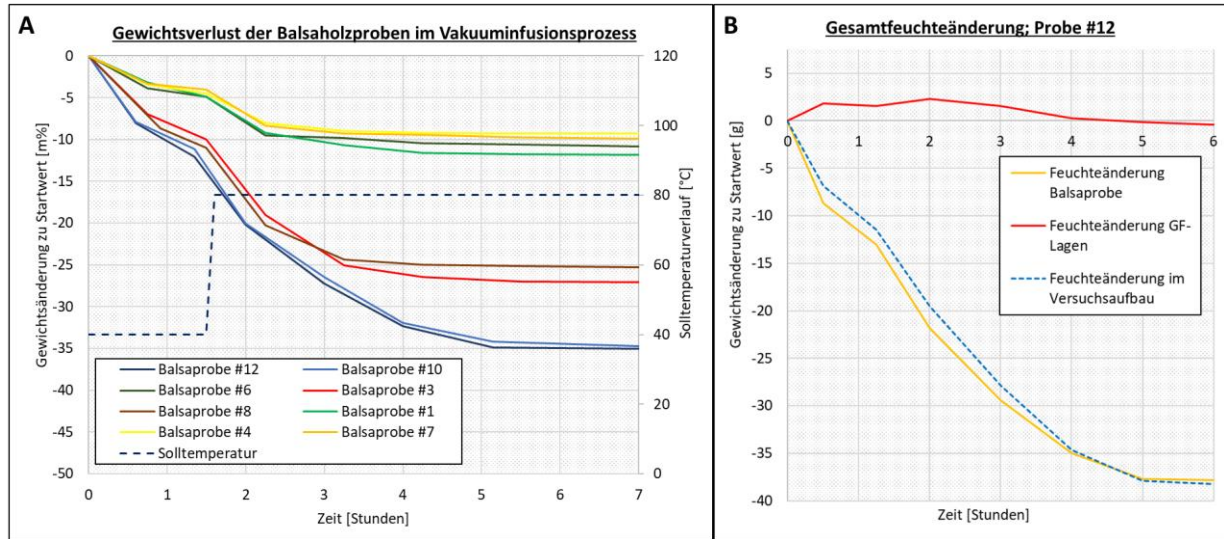


Abbildung 35: A) Gewichtsverlust der einzelnen Balsaholzproben nach Umgebungsszenarien. B) Gesamtfeuchteänderung für Laminataufbau aufgeteilt in Glasfaser-Lagen und Balsaholz

Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich der Feuchtegehalt im Harz abschätzen. Ausgehend von der Dicke des Lagenaufbaus σ , der mit Hilfe des Flächengewichts berechnet wird, kann die benötigte Harzmenge mit

$$m_{\text{Harz}} = \sigma \cdot A \cdot \rho_{\text{Harz}} \cdot (1 - \phi) \quad (4)$$

berechnet werden, wobei A die Grundfläche des Laminats, ρ_{Harz} die Dichte des Harzes und ϕ der Faservolumengehalt seien. Die Feuchte kann während der Infusion solange aus dem Vakuumaufbau austreten bis das Harz angekommen ist. Daher wird die Annahme getroffen, dass 50% der Feuchte der bis nach 90 Minuten (Infusionsende) abgegebenen Feuchte $m_{\text{H20};90\text{min}}$ für die Berechnung der relevanten Feuchtemengen vernachlässigt werden kann. Die relevante Masse an Wasser berechnet sich damit aus

$$m_{\text{H20};\text{rel}} = m_{\text{H20};\text{ges}} - \frac{m_{\text{H20};90\text{min}}}{2}. \quad (5)$$

Die Wassermenge, die nach 90 Minuten ausgetreten ist, kann anhand der Versuche bestimmt werden. Zudem muss berücksichtigt werden, dass ein Teil des infundierten Harzes in das Balsaholz eintritt, da aufgrund der Gitterform der Balsaproben Zwischenräume entstehen, die mit Epoxidharz gefüllt werden. Aufgrund der Maße dieser Zwischenräume wird eine zusätzliche Harzmenge $m_{\text{Harz},\text{add}}$ von $0,2 \text{ g/cm}^3$, bezogen auf das Volumen der Balsaproben, angenommen. Damit kann der Feuchteanteil von Wasser im Harz mit folgender Formel berechnet werden:

$$w_{\text{H20}} = \frac{m_{\text{H20};\text{rel}}}{m_{\text{Harz}} + m_{\text{Harz},\text{add}}}. \quad (6)$$

Die so ermittelten Feuchteanteile im Harz für die verschiedenen Proben sind in Tabelle 10 dargestellt. Die berechneten Feuchteanteile im Epoxidharz zeigen große Differenzen, abhängig von Konditionierung, Balsakerndicke und GFK-Lagenanzahl. Die Konditionierung unter Starkregensimulation stellt einen Grenzwert dar (über 32 Gew-%), sodass eine Verwendung von Balsaholz mit so hohem Feuchtegehalt in der Rotorblattherstellung unwahrscheinlich ist. Für die Balsaproben, die nicht unter zusätzlicher Niederschlagssimulation konditioniert wurden, ergeben sich wesentlich geringere Feuchteanteile zwischen 1 Gew-% bis maximal 9 Gew-%. Da in der Rotorblattfertigung meist dickere Laminataufbauten (20 GF-Lagen) vorliegen, werden im weiteren Verlauf Gew-% von 0% - 5% betrachtet.

Tabelle 10: Berechnete Feuchteanteile im Harz gem. Gleichung 6

Konditionierung	Probe	Dicke Balsaholz [mm]	w_{H_2O} [Gew.-%]	
			4 GF-Lagen	20 GF-Lagen
Umgebung 1	#4	20	5,86	2,4
	#7	10	3,61	1,15
Umgebung 2 (Nieselregen)	#3	20	16,88	5,61
	#8	10	11,01	3,53
Umgebung 3 (Starkregen)	#10	20	32,49	13,29
	#12	10	28,77	9,21
Umgebung 4	#1	20	8,69	3,52
	#6	10	4,04	1,29

DEA-Messungen (Reinharz)

Mit Hilfe von dielektrischen Messungen wurde die Vernetzung sowie Reaktivität der Epoxidharze in Verbindung mit prozessnahen Feuchtegehalten untersucht. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der Feuchte in den verschiedenen Zeitabschnitten des Prozesses zu qualifizieren und darüber die Auswirkungen auf die Aushärtereaktion zu bestimmen. Die dielektrischen Messungen wurden an Reinharzproben mit entsprechenden Feuchtegehalten unter prozessgetreuen Temperaturbedingungen des Vakuuminfusionsverfahrens auf dem Heiztisch des FIBRE durchgeführt. Die Feuchteanteile beziehen sich auf die Gesamtmasse des angemischten Harz-Härter-Systems.

Für die Messungen wurden IDEX-Kammsensoren genutzt, die bei Benetzung mit den Epoxidharzproben relevante Aussagen über das Vernetzungsverhalten liefern. Der Aufbau zur Aufzeichnung der dielektrischen Messdaten ist in Abbildung 36 dargestellt.

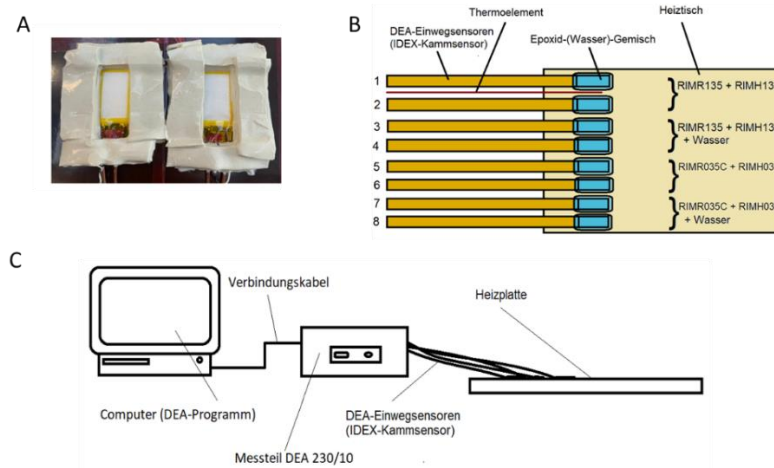


Abbildung 36: Versuchsaufbau zur Messung des dielektrischen Signals während der Aushärtung

Die Sensoren stehen im direkten Kontakt mit dem Harz und messen die Änderung der dielektrischen Eigenschaften während des Prozesses. Grundlage des Messprinzips ist die Impedanzmessung, also die Messung der elektronischen Leitfähigkeit der zu untersuchenden Substanz. Durch das Anlegen einer Wechselspannung wird eine Bewegung der Ladungsträger in der Substanz induziert. Über die Sensoren wird die Phasen- und Amplitudenverschiebung gemessen, die sich durch Veränderung der Beweglichkeit der Dipole und Ionen infolge von Temperaturänderung oder der fortschreitenden Aushärtereaktion ergeben. Somit lassen sich mit zunehmender Vernetzung veränderliche Messwerte der Ionenviskosität erfassen.

Bei Betrachtung der Kurven unterschiedlicher Feuchtegehalte sind Differenzen in der Steigung der Kurven sowie Unterschiede in den absoluten Start- und Endwerten der Ionenviskositäten zu erkennen (vgl. Abbildung 37). Die Kurven wurden aus unterschiedlichen Frequenzbereichen der dielektrischen Messung zusammengesetzt, da die Genauigkeiten der Messung aus einer Kombination von Ionenviskosität und Frequenz abhängt. In den folgenden Diagrammen ist die Aufteilung der Frequenzbereiche nicht weiter dargestellt. Die Messkurve mit Feuchtezusatz weist aufgrund der guten Ionenleitfähigkeit des beigemischten Wassers eine geringere Ionenviskosität im Vergleich zum Reinharz auf. Im Intervall bis zur Temperaturerhöhung steigt die Ionenviskosität bei RIMR 135 durch zunehmende Vernetzung an. Die Steigung des Ionenviskositäts-Signals bei isothermer Temperatur qualifiziert die Reaktivität des Harzgemisches während der Vernetzung. Infolge dessen wird für das RIMR 135 mit 2 Gew.-% Wasserzusatz eine stärkere Reaktivität während des Infusionsprozesses im Vergleich zur Probe des Reinharzes angenommen. Diese gesteigerte Reaktivität kann auf die katalytische Wirkung der Feuchte auf die Vernetzung in diesem Bereich zurückgeführt werden. Nach Stabilisierung der Temperatur auf 80 °C zeigt sich eine geringere Reaktivität bei dem Harzgemisch mit Feuchtezusatz. Zudem konvergiert die Steigung der Messkurve des RIMR 135 mit Feuchtezugabe früher

gegen null, als die Kurve der Ionenviskosität ohne Feuchtezusatz. Die Konvergenz der Ionenviskosität kennzeichnet die Stagnation des Aushärteprozesses. Diese beiden Beobachtungen sprechen dafür, dass die Feuchtezugabe im Epoxidharz neben der höheren Reaktivität im Anfangsbereich auch eine schnellere Vernetzung in diesem Bereich sowie eine frühere Stagnation des Aushärteprozesses induziert.

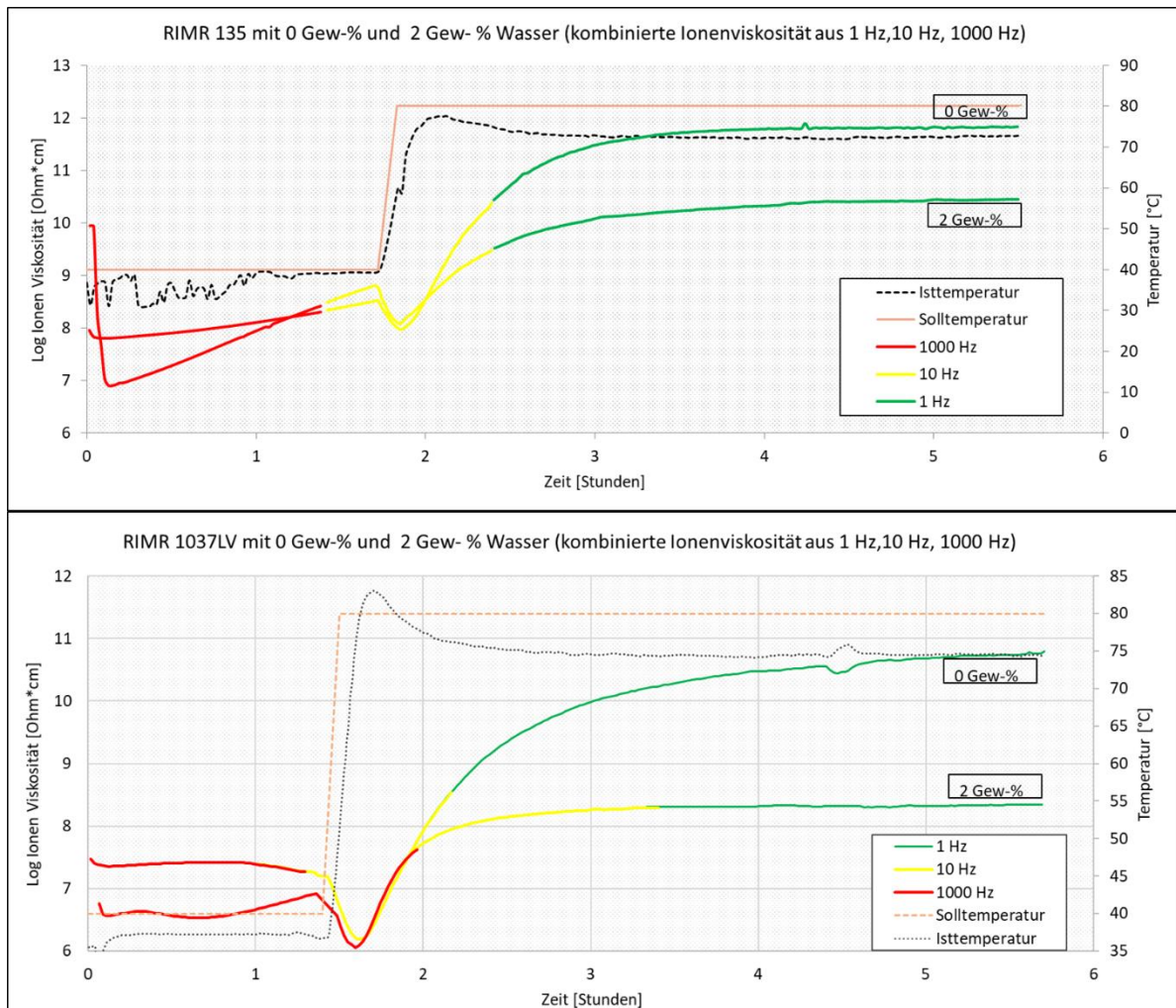


Abbildung 37: Feuchteabhängiges Ionenviskositätssignal von RIMR 135 (oben) und RIMR 1037LV (unten)

Im Vergleich zu RIM 135 weist das „schnellhärtende“ Epoxidharzsystem RIMR 1037LV einen geringeren Anstieg der Ionenviskosität im Anfangsbereich auf. Als Hypothese für den geringen Anstieg der Ionenviskosität in diesem Bereich kann angeführt werden, dass die Vernetzung des RIMR 1037LV durch seinen latenten Vernetzungscharakter im Allgemeinen bei höheren Temperaturen beginnt. Die zugeführte Energie bei 40 °C bewirkt somit nur eine geringfügige Reaktion in den Epoxidharzproben. Nach der Temperaturerhöhung zeichnet sich für beide Messkurven des RIMR 1037LV eine wesentlich höhere Reaktivität im Vergleich zum RIMR 135 ab. Die Beobachtung kann damit begründet werden, dass das RIMR 1037LV während der ersten 90 Minuten eine sehr geringe Reaktivität zeigt, sodass

bis zur Temperaturerhöhung wesentlich weniger Vernetzung in den Harzproben stattfindet. Different zu den Verläufen des RIMR 135 zeigt sich nach der Temperaturerhöhung zunächst ein höherer Anstieg der Kurve mit 2 Gew.-% Feuchtezugabe. Somit kann für diesen Bereich zunächst eine höhere Reaktivität angenommen werden, die sich vermutlich aufgrund der geringen Reaktivität in den ersten 90 Minuten auf diesen Bereich verschiebt. Zudem erreicht das Harzgemisch mit Feuchtezusatz auch beim RIMR 1037LV wesentlich früher einen horizontalen Verlauf der Ionenviskosität und somit eine frühere Stagnation des Aushärtprozesses im Vergleich zu den Proben des Reinharzes.

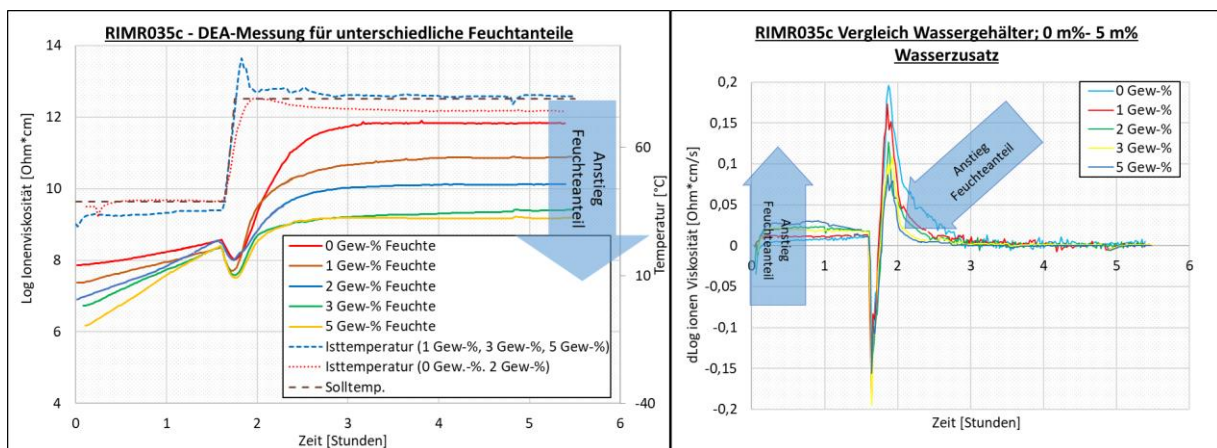


Abbildung 38: Feuchteabhängiges Ionenviskositätssignal (links) und abgeleitetes Ionenviskositätssignal (rechts) von RIM 035c

Abbildung 38 stellt die Ergebnisse der dielektrischen Untersuchungen für das Epoxidharz RIMR 035c dar. Neben 0 Gew.-% und 2 Gew.-% Feuchte wurden für das RIMR 035c zusätzlich 1 Gew.-%, 3 Gew.-% und 5 Gew.-% Feuchtezugabe untersucht, um durch weitere Feuchteabstufungen eine genauere Qualifizierung des Feuchteinflusses zu ermöglichen. Der Verlauf der Messkurven ähnelt qualitativ denen des Epoxidharzsystems RIMR 135. Je größer der Feuchteanteil im Epoxidharz ist, desto niedriger ist die Ionenviskosität des Gemisches. Abbildung 38 (rechts) stellt die Ableitung der Ionenviskosität für die Harzproben des RIMR 035c dar, durch welche die Unterschiede in der Reaktivität der verschiedenen Gemische anschaulicher dargestellt werden können. Zu erkennen ist, dass die Kurven mit steigendem Feuchteanteil früher gegen null konvergieren und ein größerer Umsatz vor der Aufheizphase stattfindet.

DEA-Messungen während der Vakuuminfusion

Abschließend wurden Validierungsversuche durchgeführt, um die bisherigen Annahmen der Einzelversuche an Reinharz-Proben zu bestätigen. Für den Validierungsversuch wird eine prozessnahe Vakuuminfusion mit Harzinjektion durchgeführt (vgl. Abbildung 39).

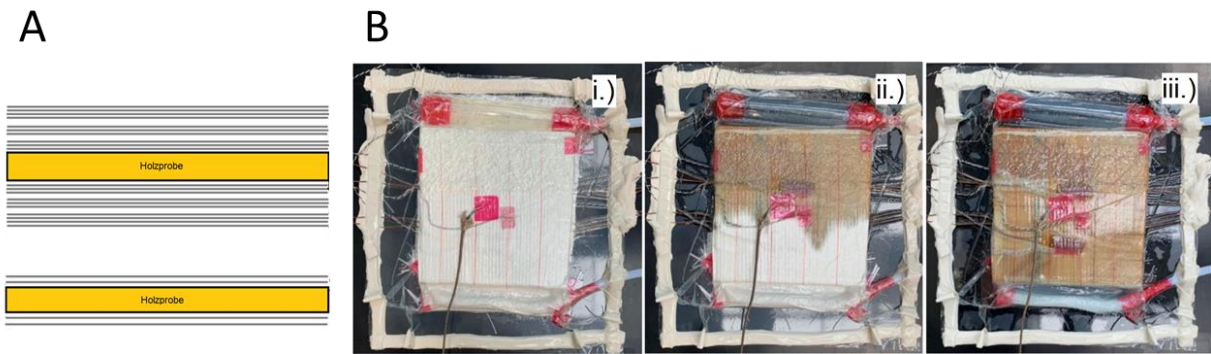


Abbildung 39: A: Querschnitt des Laminataufbaus. B: Ausbreitungsfrent des Epoxidharzes während eines Validierungsversuches

In Abbildung 40 werden die Ionenviskositätskurven aus den zwei Validierungsversuchen im Vergleich zu den Reinharzprobenmessungen gezeigt. Da der Feuchteanteil im Epoxidharz bei der prozessgetreuen Vakuuminfusion nicht bekannt ist, werden die Kurven mit „x Gew-%“ und „y Gew-%“ bezeichnet. „x Gew-%“ stellt die Messdaten der Vakuuminfusion mit in Umgebung 4 konditionierter Balsaprobe #6 und 4 GF-Lagen dar.

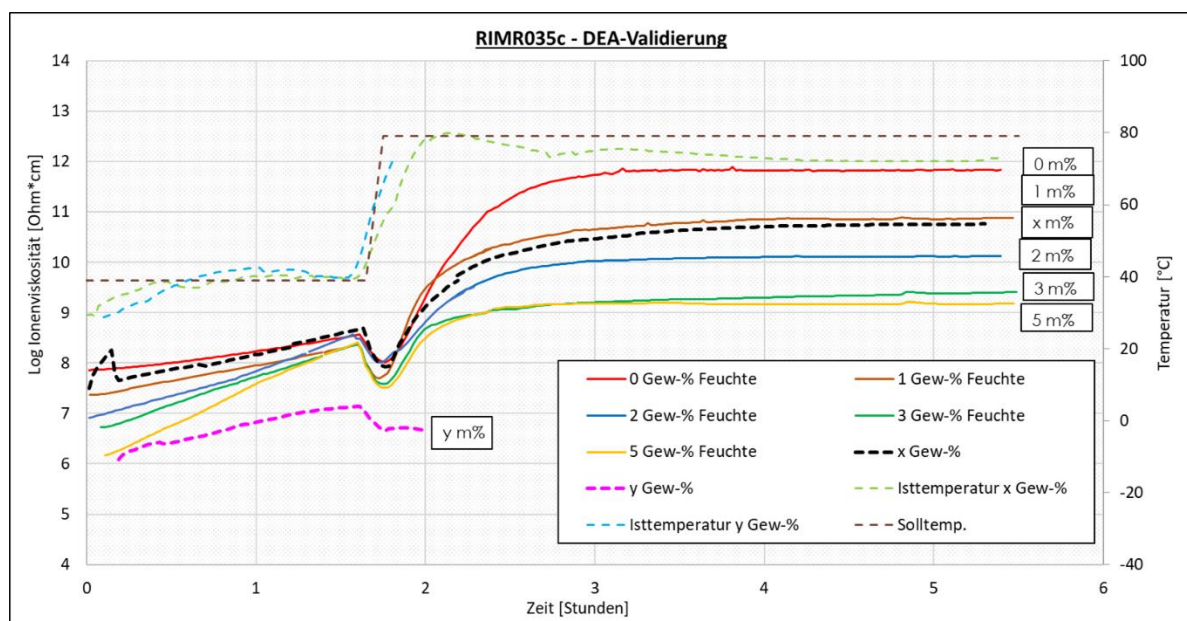


Abbildung 40: Ionenviskositätssignal aus Reinharz-Messungen und Validierungsversuche

Der Verlauf der Ionenviskosität zeigt große Übereinstimmung mit dem der Kurve mit 1 Gew-% Feuchteanteil. Hier zeigt sich eine deutliche Abweichung zu dem prognostizierten Feuchtegehalt von 4,04 Gew-% (vgl. Tabelle 10). Die Kurve „y Gew-%“ repräsentiert die dielektrischen Ergebnisse der prozessgetreuen Vakuuminfusion mit Balsaholz, welches unter zusätzlicher Starkregensimulation konditioniert wurde. Nach Berechnung sind theoretische Feuchteanteile bis 28,77 Gew-% möglich. Der Verlauf der Kurve zeigt, dass keine Übereinstimmung mit den Messkurven bis 5 Gew-% Feuchte vorliegt. Zudem fallen alle Sensoren mit der Temperaturerhöhung auf 80 °C aus. Es wird angenommen, dass der hohe Wasseranteil im Harzsystem zu einer starken Erhöhung der Permittivität führt,

wodurch die Messergebnisse außerhalb des Messbereichs der dielektrischen Sensoren liegen.

Mit Hilfe des dielektrischen Messverfahrens kann der Feuchteanteil im Harz detektiert und die katalytische Wirkung der Feuchte auf die Aushärtereaktion der Epoxidharze nachgewiesen werden. Auch im ausgehärteten Zustand lassen sich Rückschlüsse über den Feuchteanteil im Epoxidharz ziehen.

Zusätzlich zu den Untersuchungen wurde ein Skript in der Programmiersprache R entwickelt, mit dem anhand von DEA-Sensoren der relative Aushärtegrad und die Glasübergangstemperatur während des Prozesses online bestimmt werden kann. Das Programm basiert auf der Annahme, dass ein lineares Verhältnis zwischen der logarithmischen Ionenviskosität und der Glasübergangstemperatur bei konstanter Umgebungstemperatur vorliegt.

DSC-Messungen

Mit DSC Untersuchungen wurden die Ergebnisse der dielektrischen Untersuchungen verglichen. Dafür wurden an den ausgehärteten DEA-Harzproben Temperaturmodulierte DSC-Messungen durchgeführt mit denen der finale Aushärtegrad sowie die Glasübergangstemperatur bestimmt wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt. Für alle untersuchten Epoxidharzsysteme ist eine Verringerung der Glasübergangstemperatur bei den Proben mit 2 Gew-% Feuchtezugabe zu beobachten. Die größte Differenz in der Glasübergangstemperatur ist bei dem Harzsystem RIMR 135 mit 8,46 °C zu verzeichnen. Mit 2,49 °C ist die Differenz bei dem Harzsystem RIMR 035c am geringsten. Dieser geringere Einfluss der Feuchte auf die Glasübergangstemperatur kann dadurch erklärt werden, dass das RIMR 035c im Vergleich zu anderen Epoxidharzsystemen hydrophobe Eigenschaften aufweist. Die Auswertung der Aushärtegrade ergibt kein eindeutiges Ergebnis. Die Harzsysteme RIMR 035c und RIMR 1037 LV weisen geringfügig niedrigere Werte bei den Proben mit 2 Gew-% Feuchteanteil auf. Für das RIMR 135 ist der gegenteilige Effekt festzustellen. Als schwierig bei der Auswertung des Aushärtegrades für die Proben mit 2 Gew-% erwiesen sich die Überlagerung des endothermen Wärmestromsignals aus der Wasserverdampfung mit der exothermen Aushärtereaktion. Eine valide Interpretation des Aushärtegrades für die 2 Gew-%-Proben kann daher nicht angeführt werden.

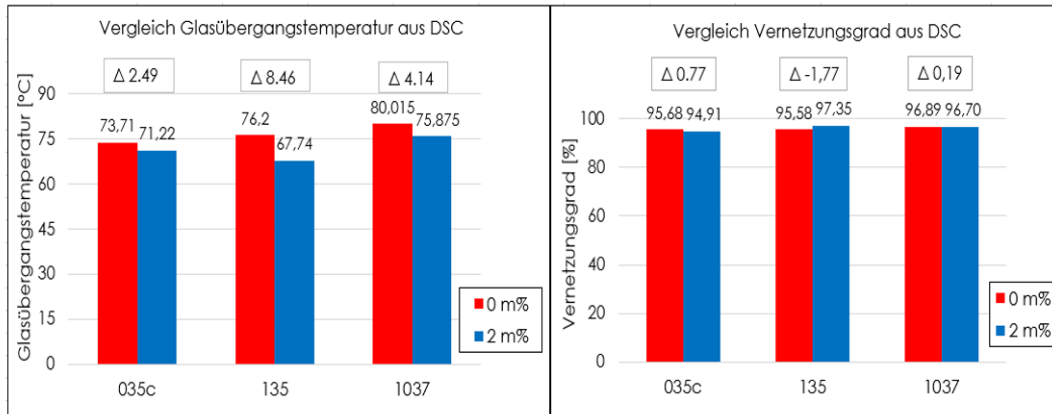


Abbildung 41: Ergebnisse aus DSC-Messungen an ausgehärteten DEA-Proben

Um den beobachteten katalytischen Einfluss der Feuchte auf die Aushärtereaktion nochmals besser hervorzuheben, wurden zusätzlich isotherme Messungen am Harzsystem RIMR035c vorgenommen. Dadurch kann eine Beeinflussung des Ionenviskositätssignals durch Temperaturänderungen ausgeschlossen werden. Die dielektrischen Messungen wurden durch isotherme DSC-Messungen ergänzt. Vergleicht man die Signale der Ableitung der Ionenviskosität mit dem Wärmestrom aus der DSC Messung für 70 °C, so zeigen sich deutliche Parallelen (vgl. Abbildung 42).

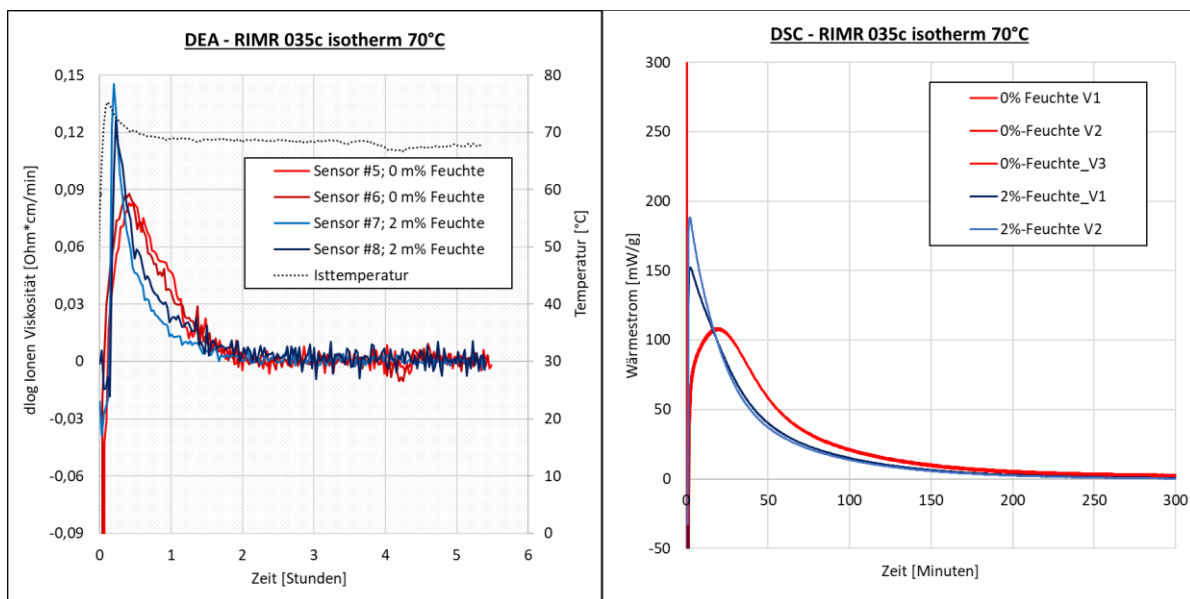


Abbildung 42: Abgeleitetes Ionenviskositätssignal (links) und Wärmestromsignal (rechts) aus isothermen Messungen an RIMR 035c

Für die Harzproben mit 2 Gew-% Feuchtezugabe zeigt sich zu Beginn eine wesentlich höhere Reaktivität im Vergleich zu den Harzproben ohne Feuchtezugabe. Als Erklärung ist die katalytische Wirkung der Wasserzugabe zu nennen. Bei der Epoxy-Amin-Reaktion ohne Wasser sorgen OH-Gruppen dafür, dass eine Reaktion zwischen Harz und Härter abläuft. Diese OH-Gruppen wirken katalytisch auf die Reaktion, sodass die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Zeit

zunimmt. Wenn die Feuchte bereits zu Vernetzungsbeginn im Gemisch ist, wirkt sich die große Anzahl an OH-Gruppen zusätzlich beschleunigend auf die Reaktion aus, sodass sich die maximale Reaktionsgeschwindigkeit weiter Richtung Beginn der Reaktion verschiebt. Die autokatalytische Wirkung der Reaktion wird dadurch vermindert, sodass die Kurve den Charakter einer Reaktion n-ter Ordnung annimmt.

Zudem nimmt die Steigung der Ionenviskosität bzw. die Reaktionsrate der Epoxidharzproben mit Feuchteanteil im Vergleich zu den Proben ohne Feuchteanteil wesentlich früher wieder ab. Diese Beobachtung wird dadurch erklärt, dass die reaktiven Gruppen infolge der frühzeitig hohen Reaktivität aufgebraucht sind und die Reaktionsgeschwindigkeit in der Folge daher vermindert wird. Da die Höhe der betrachteten Signale wesentlich die Exothermieentwicklung während der Aushärtung bestimmt, stellen diese Erkenntnisse eine wesentliche Grundlage für eine thermische Betrachtung des Fertigungsprozesses dar. Je schneller die Reaktion abläuft, desto mehr Energie wird in kurzer Zeit freigesetzt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Feuchte einen deutlichen Einfluss auf die Aushärtekinetik der Harzsysteme hat. Da das RIMR 035c hydrophobe Eigenschaften hat, kann dieses Harz als am besten geeignet angesehen werden. Bei den anderen Harzsystemen müssen die Einflüsse in den Kinetikmodellen berücksichtigt werden, um eine verlässliche Simulation und Regelung zu gewährleisten.

6.4.3 Entwicklung einer Prozessregelung mit Heiz- und Kühlsystem

Zur Entwicklung einer Prozessregelung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern entschieden, dass die praktische Umsetzung im Projekt sowohl an einem Heiztisch des FIBRE als auch an einem ebenen Heiz- und Kühltisch am Fraunhofer IWES erprobt werden soll. Um die Übertragbarkeit der Versuche auf die Rotorblattfertigung zu gewährleisten, wurden drei Strukturaufbauten untersucht, die in ihrem Aufbau exemplarisch für die im Rotorblatt auftretenden Lagenaufbauten stehen und so auf den Industriemaßstab überführt werden können.

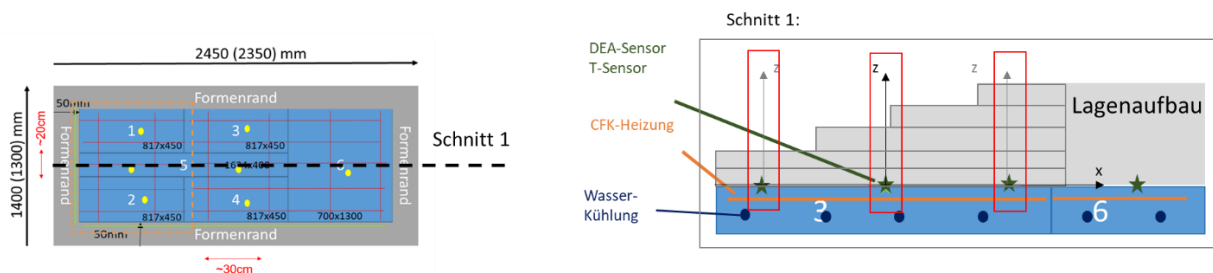
Die drei wesentlichen Strukturen sind:

- I. die Blattspitze, welche ein sehr dünnes Laminat aufweist,
- II. der mittlere Blattbereich, in dem das Kernmaterial liegt und die Fließwege am längsten sind,
- III. sowie die Blattwurzel, mit ihrem sehr dicken Laminataufbau (Flanschpaket).

Bei den spezifischen Laminataufbauten wird der Referenzlagenaufbau aus dem Vorgängerprojekt BladeMaker herangezogen.

Infusionsform und Sensorik

Bei der erwähnten Form handelt es sich um einen ebenen Tisch mit 6 Feldern, welche individuell durch eine elektrische Heizung beheizt und durch eine Wasserkühlung gekühlt werden (vgl. Abbildung 43). Durch die zwei voneinander getrennten Temperiersysteme ist ein schneller Wechsel von Heizen auf Kühlen gegeben. Im Gegensatz zu der am IWES vorhandenen Rotorblattform, ist der ebenfalls im BladeFactory Projekt entwickelte ebene Heiz- und Kühltisch mit einer aktiven Kühlung ausgestattet und ermöglicht es so, die Temperaturen in den Versuchen während der Aushärtung möglichst hoch anzusetzen und das entwickelte Regelungssystem zu testen. Dadurch kann die Aushärtung bei höheren Temperaturen stattfinden, da durch die Kühlung einer zu starken Exothermieentwicklung entgegengewirkt werden kann. Die Kühlung kann ebenfalls einem zu starken Temperaturanstieg entgegenwirken, der durch einen erhöhten Feuchteanteil (schnellere Reaktion) im Harz entstehen kann.



**Abbildung 43: Draufsicht auf die Heiz-/Kühlform für die Demonstratorfertigung (links).
Schnittansicht (rechts).**

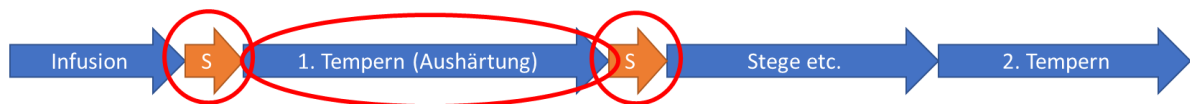
Neben Temperatur- und dielektrischen Sensoren wurden Liniensensoren zur Fließfrontüberwachung der Firma InFactory Solutions GmbH in die Demonstratorform eingebracht. Anhand der Sensoren kann sichergestellt werden, dass das Bauteil auch in Richtung der nicht einsehbaren Formoberfläche mit Harz getränkt und die Infusion durch das gesamte Bauteil erfolgt ist. Das Positionierungskonzept wurde in enger Absprache mit InFactory Solutions GmbH und Fraunhofer IWES entwickelt. Ziel ist es, die Form variabel zu nutzen (alternative Angusstrategien und Teilbelegungen). Es wurden folgende weitere Kriterien bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt:

- Sensorlänge → Verluste, Genauigkeit, Messzeit
- Anzahl → Verstärkereingänge
- Abstand zu dielektrischer Sensorik → Wechselwirkung

Optimierungspotential in der Rotorblatffertigung

In Zusammenarbeit mit SINOI GmbH, Fibretech Composites GmbH und Fraunhofer IWES wurde erörtert, an welchen Stellen des Rotorblattherstellungsprozesses das größte Potential für den Regelungsansatz liegt (vgl. Abbildung 44). Dabei wurden drei markante Bereiche identifiziert, auf die die Regelungsstrategie abzielen soll. Erstens soll durch die integrierte Fließfrontsensorik die Füllung des Bauteils überwacht werden, sodass bei vollständiger Füllung direkt (ohne Sicherheitszuschlag) die Temperphase eingeleitet werden kann. Zweitens soll durch Aushärtegradsensorik die Sicherheitsphase zwischen Tempervorgang und nachgelagerten Bearbeitungsschritten entfallen. Drittens soll der Tempervorgang auf Basis von Modellen und Sensorik optimiert werden.

Aktueller Fertigungsprozess



Neues Konzept für den Prozess



Abbildung 44: Einsparpotential bei der Rotorblatffertigung (rote Kreise)

Da die Infusion im Vergleich zur Aushärtung ein deutlich geringeres Einsparpotenzial bezüglich der Zeit besitzt, wurde zu Beginn des Projektes im Konsortium entschieden, dass nur die Aushärtephase für die Simulation und Prozessoptimierung betrachtet werden soll. Die Kontrolle, ob die Infusion abgeschlossen ist, wird durch die oben erwähnten Fließfrontsensoren sichergestellt. Die Erfahrungen aus der Industrie zeigen zudem, dass der Infusionsprozess gut beherrscht wird, indem die Prozesseinflüsse (Verteilung der Fließhilfen, lokale Druckerhöhung durch Gewichte, Infusionsdruck und ggf. Temperaturführung) gezielt modifiziert werden.

Die Versuche zur Aushärteregeleung wurden am Heiztisch des FIBRE (mit vier variablen Heizfeldern, ohne Kühlung) und an der neu erstellen Form beim Fraunhofer IWES durchgeführt.

Regelungskonzept für die Aushärtung

Basierend auf den Heiz- und Kühlmöglichkeiten der neuen Form des IWES wurde ein Konzept für die Aushärtephase entwickelt, welches in Abbildung 45 dargestellt ist. Im ersten Schritt werden die Sensordaten an der Werkzeugformoberseite ausgelesen und abgespeichert. Auf Basis dieser Ist-

Werte (Temperatur und Ionenviskosität) kann dann mit den entwickelten Modellen die Aushärtung an dieser Position berechnet werden. Mit der Temperatur und dem Aushärtegrad werden im dritten und vierten Schritt die Temperatur- und die Aushärtegradverteilung über die Dicke des Bauteils mit einer „online“-Simulation berechnet. Die Simulation berechnet eine Vorhersage für die nächsten x Minuten (z.B. mit x = 20 Minuten). Die Simulationsdaten werden dann für die Regelung der Temperatur (Bewertung im fünften Schritt des Konzepts) genutzt. Ein sich ständig wiederholender Abgleich von berechneten Werten und Ist-Werten führt zu einem sehr hohen Genauigkeitsgrad in der Vorhersage.

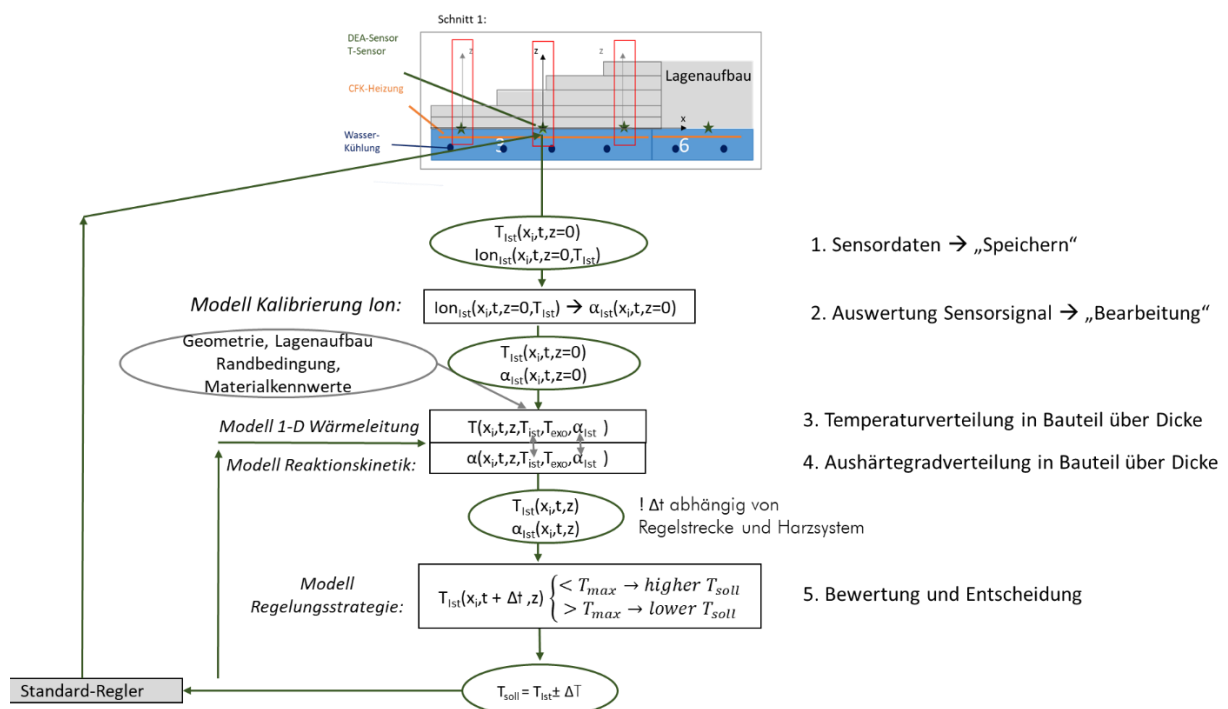


Abbildung 45: Prinzipskizze Regelung

Für die Umsetzung dieser Prozessregelung wurde das Python-Skript „BladeControl“ geschrieben, welches aus mehreren Modulen aufgebaut ist (vgl. Abbildung 46). Kern des Tools ist die 1D-Wärmeleitgleichung über die Dicke des Bauteils, die mit der Finite Differenzen Methode gelöst wird. Die Simulation wird eindimensional durchgeführt, da dadurch die Berechnungszeit sehr gering ist. Die Annahme der Eindimensionalität ist zulässig, solange der Großteil der Wärmeleitung in Dickenrichtung stattfindet. Effekte an den Rändern des Bauteils werden hierbei vernachlässigt.

Eine Funktionsbeschreibung der einzelnen Module ist in Tabelle 11 aufgelistet. Das Skript umfasst die folgenden Funktionalitäten:

- Graphische Benutzeroberfläche (vgl. Abbildung 47)
- Parallele Simulation mehrerer Rotorblattabschnitte
- Definition des Vorhersagezeitraums ($\pm\Delta t$)
- Definition der Temperaturdifferenzen (Regeltemperaturen $\pm\Delta T$)
- Anpassung der Randbedingungen durch die Auflage oder das Entfernen eines Isolationsvlieses zur Wärmeregulierung auf den Vakuuminfusionsaufbau
- Erstellung einer Log-Datei, die Änderungen während des Prozesses erfasst
- Händische Eingabe der Ist-Temperaturen
- Einlesen der Ist-Temperaturen von einem Thermologger mit Hilfe ein RedLab-DAQ
- Möglichkeit zur Anpassung der Ist-Aushärtewerte während der Simulation, um die Werte der Online-DEA-Messungen zu berücksichtigen (Direkte Sensorübergabe, wie bei der Temperatur ist aktuell noch nicht möglich)
- Auswertetool von durchgeführten Versuchen → direkter Zugriff auf die anderen Module des Programms (Tool zur Kalibrierung für neue Materialien/Aufbauten)
- eine online-Simulation und Steuerung für eine eindimensionale Wärmeleitung für GFK-Bauteile aus mehreren geschichteten Materialien (Sandwichaufbau, Volllaminat)

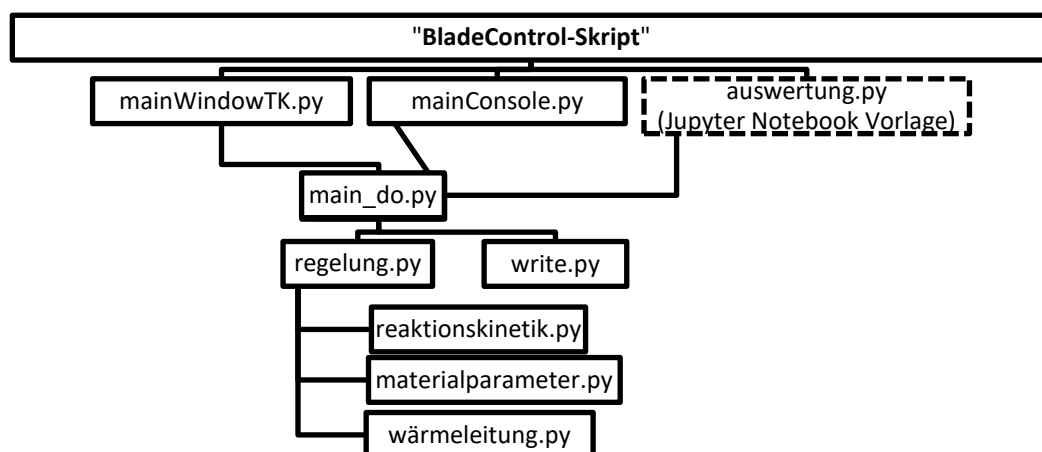
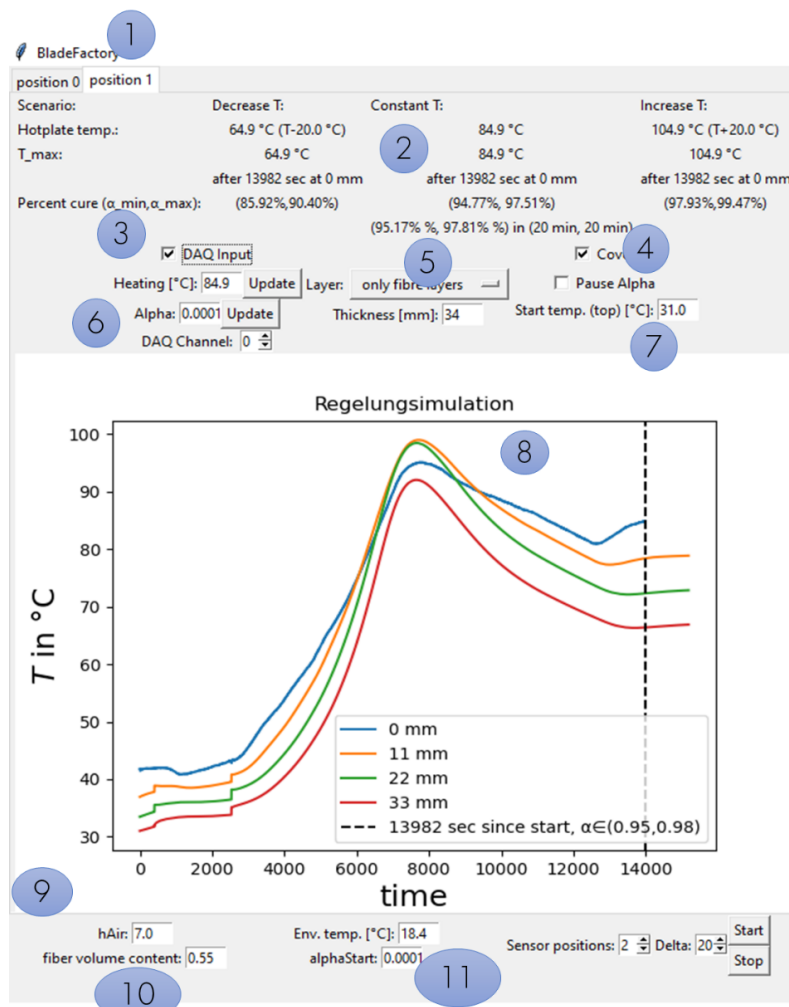


Abbildung 46: Abhängigkeiten im „BladeControl-Skript“

Tabelle 11: Beschreibung der Module des „BladeControl-Skripts“

Module	Inhalt und Funktion
mainWindowTK.py (empfohlen)	<ul style="list-style-type: none"> • Benutzerinterface (GUI), zur mausgesteuerten Anwendung des Regelungsprogramms • erlaubt zahlreiche Parameteranpassungen ohne Veränderung des Programmcodes. • initiiert die Hauptschleife (auf Knopfdruck) • Grafische Ausgabe der Temperaturmessungen und Vorhersagen (Temperatur und Aushärtung)
mainConsole.py (Legacy)	<ul style="list-style-type: none"> • alternatives, textbasiertes Interface • initiiert die Hauptschleife (bei Programmstart) • textuelle Ausgabe von Messungen und Vorhersagen
main_do.py	<ul style="list-style-type: none"> • Initialisierung wichtigster Parameter • Hauptschleife der Prozessregelung • lädt alle weiteren Module zur Prozessregelung
materialparameter.py	<ul style="list-style-type: none"> • Initialisierung der Materialparameter • Funktionen zur Berechnung temperaturabhängiger Materialparameter
reaktionskinetik.py	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter und Modelle zur Berechnung der Reaktionskinetik
wärmeleitung.py	<ul style="list-style-type: none"> • Numerische Lösung der Wärmeleitungsgleichung nach Euler-Verfahren • Berechnung der Interface- und Konvektions-Randbedingung • Berücksichtigung der Reaktionswärme
regelung.py	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenführung von „Materialparameter“, „Reaktionskinetik“ und „Wärmeleitung“ • Durchführung der Simulation
write.py	<ul style="list-style-type: none"> • Speichern der Messungen und Simulationsergebnisse als .csv und .svg-Dateien
auswertung.py (optional)	<ul style="list-style-type: none"> • Jupyter-Notebook-Vorlage • Für Validierungszwecke • Einlesen der Ergebnisse durchgeführter Versuche und offline-Simulation • Graphischer Vergleich von Simulation und Messungen



- 1 Auswahl des Sensors
- 2 Ergebnisse der Simulationen
- 3 DAQ oder händische Eingabe der Temperatur
- 4 Isolationsvliesstoffe aufgelegt: ja/nein
- 5 Lagenaufbau und Dicke des Laminats
- 6 Update des Aushärtegrads
- 7 Starttemperatur der Simulation
- 8 Temperaturverlauf über die Zeit
- 9 Wärmeübergangskoeffizient an der Laminatoberseite
- 10 Faservolumengehalt
- 11 Umgebungstemperatur und Anfangsbedingung Aushärtegrad

Abbildung 47: Graphische Benutzeroberfläche des Skripts während eines Versuchs

Im Tool „BladeControl“ ist kein geschlossener Regelkreislauf implementiert worden. Die Ergebnisse des Tools müssen manuell in das Heiz- und Kühlsystem eingegeben werden.

FEM-Simulationen mit COMSOL Multiphysics

Zur Verifikation der „BladeControl“-Wärmeleitungssimulation wurde eine 3D-FEM-Multiphysics-Simulation in COMSOL Multiphysics (v5.6) durchgeführt. Die Wärmeleitung wurde mit dem COMSOL internen Heatflow-Modul (Wärmetransport in Festkörpern) berechnet. Die Reaktionskinetik und Kopplung zur Wärmeleitgleichung konnte im ODE (Allgemeine Differentialgleichungen) implementiert werden. Das Modell in COMSOL wurde neben der Verifikation für die 1D-Wärmeleitung (Abgleich der Ergebnisse) auch für eine Parameterstudie und zur Überprüfung der 1D-Annahme (Wärmeleitung nur in Dickenrichtung) genutzt.

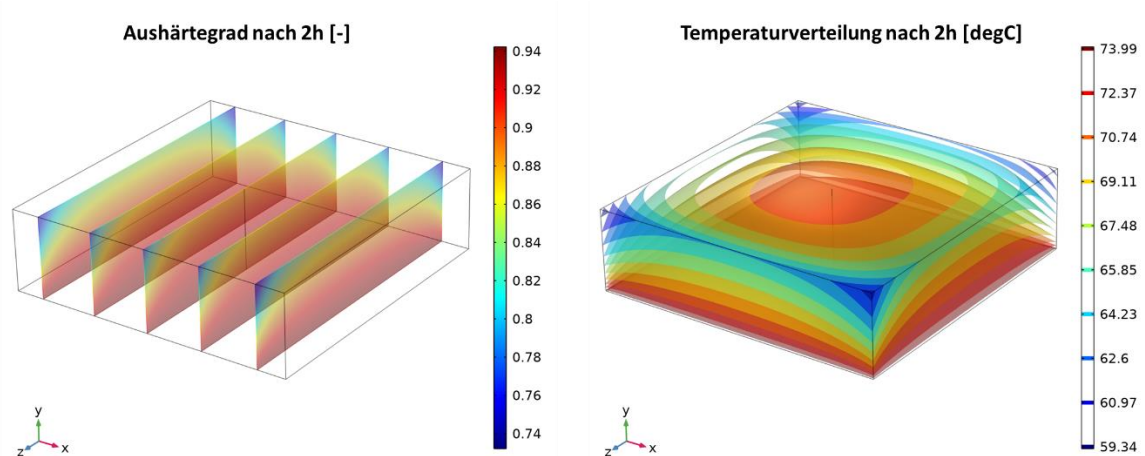


Abbildung 48: Ergebnisse der 3D-FEM-Simulation. Die Randeffekte sind für kleine Bauteile deutlich erkennbar

Da das Modell in COMSOL in 3D aufgebaut wurde, kann hiermit betrachtet werden, wie groß der Einfluss der in-plane Wärmeleitung ist, d.h. wieviel Wärme über die Ränder abfließt. Es wurde die Temperatur in der Mitte von vier quadratischen Platten (50 mm, 100 mm, 200 mm und 400 mm) im Inneren des Laminats und auf Oberseite des Laminats untersucht (vgl. Abbildung 49). Es zeigt sich, dass die Temperatur auf der Oberseite stärker von der Plattengröße beeinflusst wird als die Temperatur im Inneren des Laminats. Vor allem bei der Platte mit 50 mm Seitenlänge zeigt sich eine stark kühlende Wirkung durch die Wärmeverluste am Rand der Platte (vgl. Abbildung 48). Bei den restlichen Platten ist in der Mitte der Platte kein in-plane Wärmefluss erkennbar. Da in der Rotorblattfertigung deutlich größere Bauteile in Betracht kommen, kann daher die Annahme einer 1D-Simulation akzeptiert werden. Randbereiche können aktuell mit dem Tool nicht korrekt betrachtet werden.

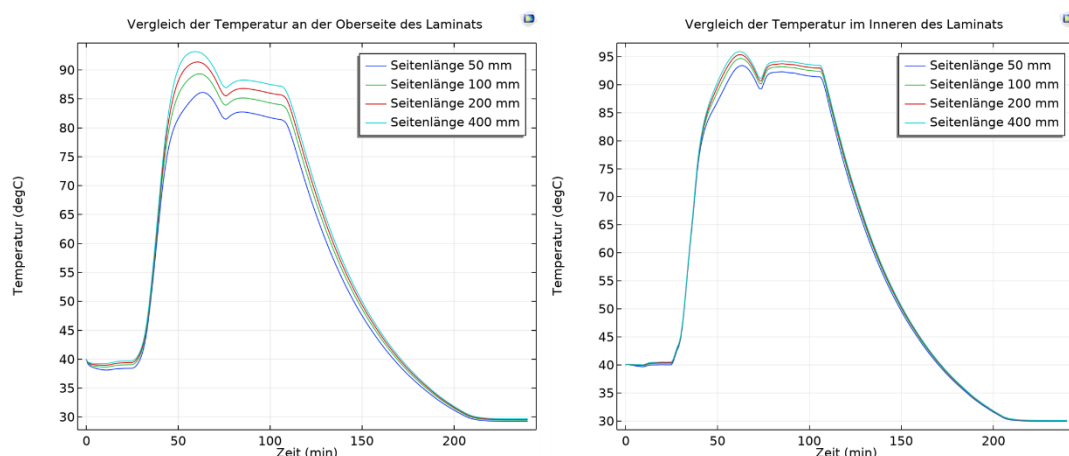


Abbildung 49: Einfluss der Bauteilgröße auf den Temperaturverlauf

Für die Simulation wird eine große Anzahl an Materialparameter benötigt. Um die Einflüsse der unterschiedlichen Materialparameter auf den Prozess besser abschätzen zu können, wurde eine Parameteranalyse für die Aushärtensimulation

mit COMSOL Multiphysics durchgeführt. Es wurden die Einflüsse der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und des Wärmeübergangskoeffizienten betrachtet. Anhand des Parametervergleichs kann abgeschätzt werden, wie sich der Prozess ändert, wenn andere Materialien verwendet werden. In Abbildung 50 sind die Parameterstudien für den Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmeleitfähigkeit der Faser für eine Simulation eines Vollaminats abgebildet.

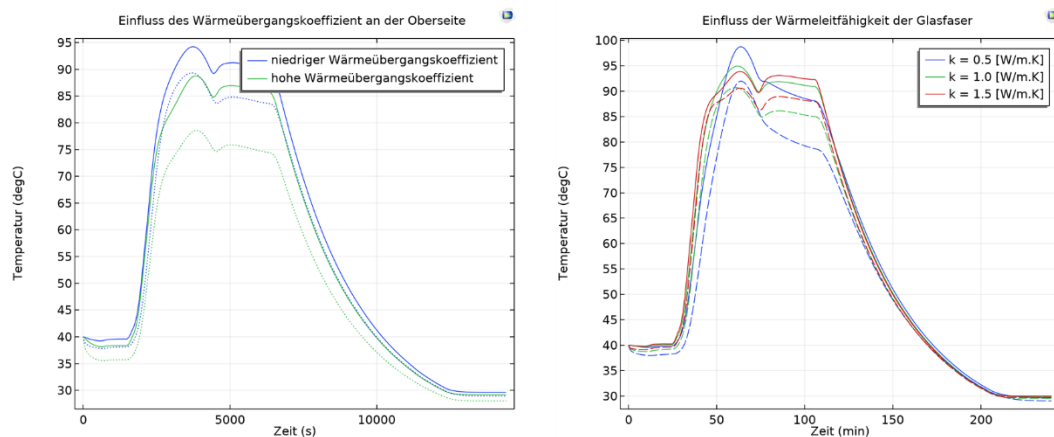


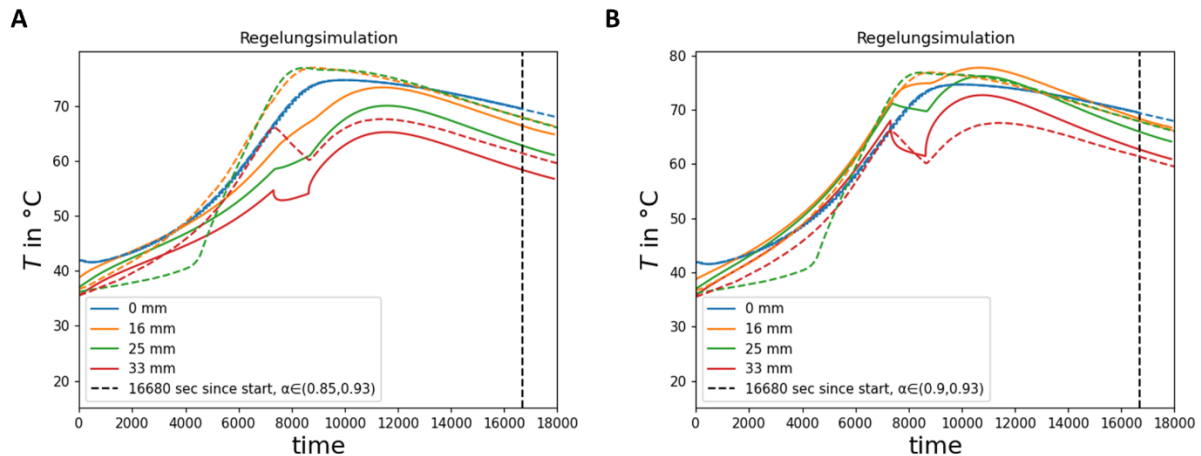
Abbildung 50: Vergleich der Temperaturverläufe für unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten (links) und der Wärmeleitfähigkeit der Glasfaser (rechts)

Die Variation der Parameter ist bewusst groß gewählt, um die Einflüsse besser zu erkennen. Ein hoher Wärmeübergangskoeffizient führt zu einem stärkeren Temperaturgradienten in Dickenrichtung. Der gleiche Effekt ist durch die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit erkennbar.

Anwendung „BladeControl“

Das im vorherigen Abschnitt hergeleitete Regelungstool wird für den jeweiligen Anwendungsfall (Lagenaufbau, Material, Isolationsvlies etc.) kalibriert. In Abbildung 51 ist der Vergleich zwischen dem unkalibrierten und kalibrierten Modell dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Vorhersagen des Tools, während die gestrichelten Linien die dazugehörigen Temperatursensoren darstellen. Die Werkzeugoberfläche ist bei 0 mm. An dieser Stelle wird der Ist-Wert des Sensors als Input für die Simulation genommen (blaue Linie).

Zur Kalibrierung des Tools wurden zwischen einzelnen Lagen (alle 10 Lagen) Temperatursensoren integriert. Dadurch ist ein direkter Abgleich zwischen Simulation und realen Temperaturen im Prozess möglich. Die Abnahme (ca. 7000 s) und Auflage (ca. 8000 s) des Isolationsvlieses wird vom Skript korrekt verarbeitet.



**Abbildung 51: Vergleich zwischen unkalibriertem Modell (A) und kalibriertem Modell (B).
Durchgezogene Linie: Simulation; gestrichelte Linie: Temperatursensoren**

Mit dem kalibrierten Tool kann sowohl die Temperatur als auch die Aushärtung des Bauteils über die Laminatdicke zur Auslegung des Aushärtprozesses genutzt werden. Beispielhaft sind in Abbildung 52 zwei Szenarien dargestellt. Die blaue Linie stellt die eingestellte Temperatur an der Werkzeugoberseite dar. Diese wird durch eine Kombination von Heizung und Kühlung auf der jeweiligen Temperatur gehalten. Beim konservativen Szenario wird die Heiz- bzw. Kühltemperatur relativ niedrig gehalten, um die Exothermie zu begrenzen. Erst nachdem der Exothermie-Peak überschritten ist, wird die Temperatur schrittweise erhöht. Im Gegensatz dazu stellt das kritische Szenario den Fall dar, dass die Temperatur aktiv eingestellt und das Isolationsvlies ab- und aufgelegt werden muss, da ansonsten die Temperatur auf über 100°C ansteigt, was zu einem Champagnerlaminat führen kann. Dafür ist der Aushärtgrad zur gleichen Zeit bereits deutlich höher. Die konservative Regelung stellt jedoch den deutlich robusteren Prozess dar.

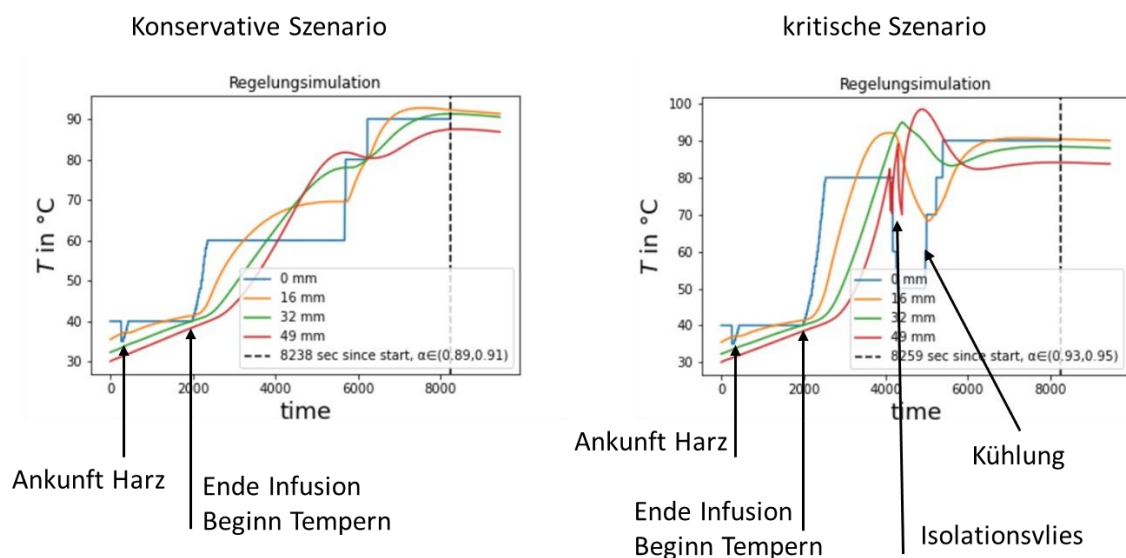


Abbildung 52: Vergleich möglicher Aushärtesszenarien

Aufgrund der Echtzeitfähigkeit der Simulation und der Schnittstelle zu den Temperatursensoren kann das Tool während des Aushärtprozesses die Prozesskennwerte kontrollieren. Bei den Versuchen am Fraunhofer IWES wurde das Skript erfolgreich am Formdemonstrator getestet (vgl. Abbildung 53). Die Temperatursensoren an der Werkzeugoberseite wurden direkt vom Skript verarbeitet, um als Dirichlet-Randbedingung in der thermischen Simulation genutzt zu werden. Anhand der drei Vorhersagen des Tools für die aktuelle Heizplattentemperatur und der alternativen Heizplattentemperaturen von $\pm 20^\circ\text{C}$ kann der Aushärtprozess durch Anpassung der Heizung und Kühlung so gesteuert werden, dass die Temperaturgrenzen nicht überschritten werden.

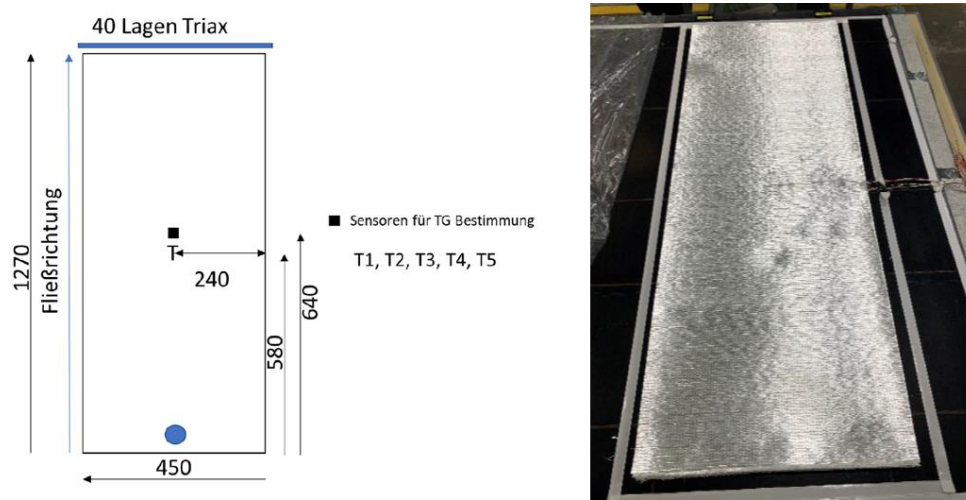


Abbildung 53: Versuchsaufbau am Fraunhofer IWES für das "Flanschpaket"

Die Daten der DEA-Sensoren (vgl. Abbildung 54) werden in der aktuellen Version des Skripts nicht verarbeitet. Die Integration der Daten mit Hilfe des DEA-TG-Skripts in R sollen zu einer weiteren Verbesserung des „BladeControl“-Skriptes führen.

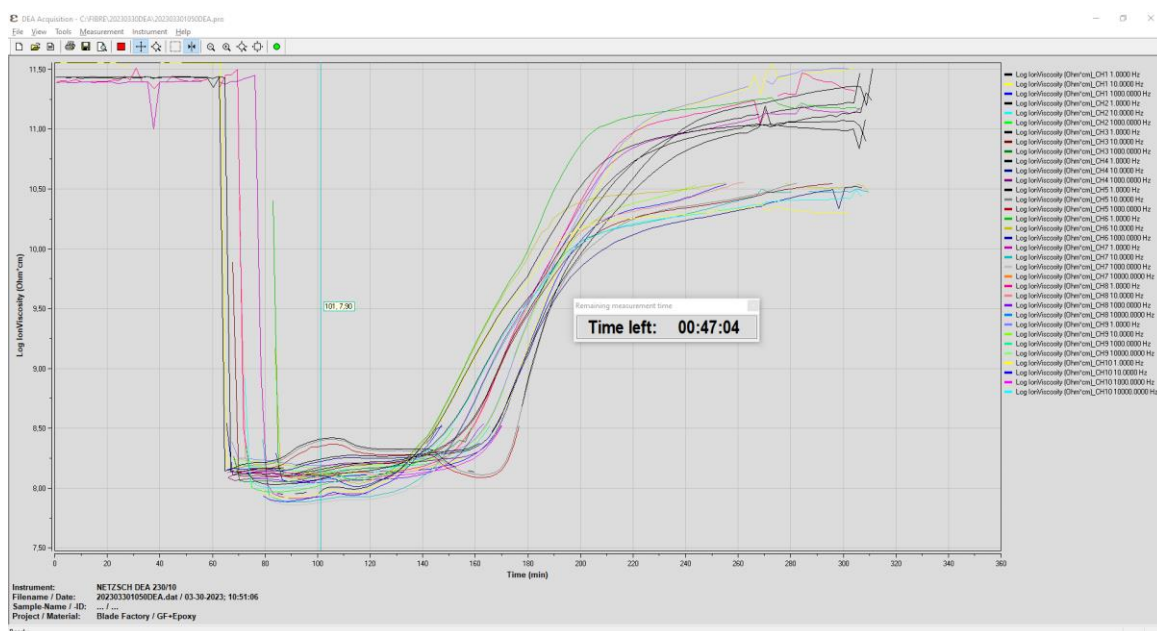


Abbildung 54: DEA-Messungen während eines Infusionsversuchs am Fraunhofer IWES

Eine abschließende Validierung des Tools für unterschiedliche Aufbauten steht noch aus.

Überführung in die industriennahe Anwendung

Für die Nutzung des Systems wird nachfolgend das Anwendungsszenario erläutert. Das Tool „BladeControl“ greift vier wesentliche Schwerpunkte auf, welche so direkt an die Rotorblatthersteller adressiert werden können.

- Dokumentation und Transparenz
- Überwachung und Steuerung des Infusions- und Aushärtevorgangs
- Verkürzung der Fertigungszeit durch optimierten Aushärtezyklus
- Beitrag zur gläsernen Form / Digitales Formwerkzeug

Dokumentation und Transparenz

Die grundlegende Funktion des Programms ist die Aufnahme von Temperaturen im Bauteil und das Ableiten des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit des Lagenaufbaus und der eingestellten Heiztemperatur am Formwerkzeug. Die mitgeschriebenen Daten können gespeichert werden und stehen so als Information zur Fertigung jedes einzelnen Blattes zur Verfügung. Dies stellt einen wesentlichen Beitrag im Qualitätsmanagement dar und ermöglicht einen Vergleich und Abgleich der Fertigungsbedingungen einzelner Blätter, die Reproduzierbarkeit von Prozessen und im Falle von im Betrieb auftretenden Blattschäden die rückwirkende Betrachtung von Fertigungsparametern zur Ursachenforschung. Durch die Dokumentation der Daten kann dazu ein Beitrag geleistet werden.

Überwachung und Steuerung des Infusions- und Aushärtevorgangs

Durch die Vorhersage des Temperaturverlaufes während der Infusion und besonders bei anschließenden Tempervorgängen kann die an der Formheizung eingestellte Heiztemperatur geregelt werden. Durch die Vorgabe eines Grenzwertes für die zu erwartende maximal Temperatur, ist es möglich, mit Hilfe visueller und akustischer Signale den Werker darauf aufmerksam zu machen, dass die Temperaturen zu hoch sind und regulierend eingegriffen werden muss. So würde die Heiztemperatur herabgesetzt oder, wenn vorhanden, mit einer Kühlung gegengesteuert werden. Das „BladeControl“ Tool kann so in schon bestehende Überwachungsprogramme integriert werden und die Steuerung und Handhabung erleichtern.

Verkürzung der Fertigungszeit durch optimierten Aushärtezyklus

Durch die zuvor genannten Steuerungsmöglichkeiten kann durch eine gezielt hohe Heiztemperatur der Tempervorgang verkürzt werden. Oftmals werden zum Tempern Temperaturen zwischen 70 und 80°C angestrebt. Ist die

Temperatur jedoch zu hoch, besteht die Gefahr, das Exothermieverhalten des Harzes zu stark werden zu lassen und so Temperaturen jenseits der 100°C zu erreichen, welche im Zweifel das Bauteil und die Form schädigen können. Aus diesem Grund wird die Temperatur beim Tempern eher konservativ geringgehalten. Eine geringe Temperatur bedeutet aber auch eine längere Zeit bis das Harz seinen gewünschten Aushärtegrad erreicht hat. Ein Zusammenspiel von „BladeControl“ und einem temperierbaren Formwerkzeug (wie im Projekt in Tischform genutzt) hat daher das Potential, die Temperatur beim Aushärten früher zu erhöhen und insgesamt höher anzusetzen. Bevor die Temperatur einen kritischen Wert erreicht, kann die Kühlung mit Hilfe der Simulation rechtzeitig gegensteuern. Das zeitliche Einsparpotential ist bedingt durch die Art des Harzes, dem Materialaufbau und der Harzmenge. Nach Einschätzung des Fraunhofer IWES gibt es pro Infusion einer Halbschale ein mögliches zeitliches Einsparpotential zwischen 60 und 120 Minuten. Dies ist gerade bei Fertigung im Schichtbetrieb und einer strengen zeitlichen Taktung ein Ansatz die Produktionszeit zu verkürzen oder dadurch mehr Zeit für andere Tätigkeiten zu schaffen (Qualitätskontrolle, Fehlerbehebung usw.)

Beitrag zur gläsernen Form / digitales Formwerkzeug / Erhöhung der Reproduzierbarkeit

Der Bedarf während der Produktion möglichst viele Daten zu generieren besteht nicht nur in der Erzeugung eines Digitalen Zwillings vom Bauteil. Er beginnt bei den Formwerkzeugen. Besonders die Größe der Formwerkzeuge und deren Oberfläche sowie die im Rotorblatt vorliegende inhomogene Materialverteilung bedingen die Verwendung von Sensoren im Formwerkzeug, um Qualität, Prozesse und Abläufe reproduzierbar darstellen zu können. Die Messungen von Temperaturen und der Fließfront stellen dabei nur zwei Möglichkeiten der Datenerfassung dar. Diese Daten müssen jedoch in Echtzeit verarbeitet werden, um sie für den Prozess nutzbar zu machen. Genau dies geschieht mit dem „BladeControl“ Tool. Es erhöht die Akzeptanz der Digitalisierung und schafft so neue Anwendungsfälle und Messverfahren im Formwerkzeug.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt bestand das übergeordnete Ziel in der weiteren Senkung der Fertigungskosten für Rotorblätter sowie in einer Stärkung der deutschen Rotorblatt- und Zuliefererindustrie. Dazu wurden Technologien entwickelt, mit denen sich die Fertigungsschritte parallelisieren und verkürzen lassen. Zusätzlich wurde durch die Prozesseinflussanalysen das Prozess- und Materialverständnis gesteigert, um die Reproduzierbarkeit guter Fertigungsqualität zu erhöhen.

Der DTP-Prozess wurde optimiert und dadurch die Robustheit gesteigert werden. Die digitale Abbildung des Prozesses ermöglicht die automatische Generierung von NC-Code anhand einer vorgegebenen Bahn, die anhand der Zuschnitte der Textillagen im Formwerkzeug definiert werden. Der Prozess wurde für verschiedene Ablageszenarien dargestellt.

Zur Materialevaluierung wurden vier unterschiedliche Gelege charakterisiert und in verschiedenen Versuchsreihen wurde die Tauglichkeit für eine automatisierte Ablage und Drapierung untersucht. Weiterhin wurden Einflussparameter untersucht, um das Prozessverständnis zwischen DTP-Effektor, Gelege und Formwerkzeuggeometrie zu steigern. Die Erkenntnisse fließen in den DTP-Prozess ein und dienen als Grundlage für die Effektorkonfiguration. Es wurde ein Konzept auf Basis der RFID-Technik entwickelt, welches auf der eingesetzten Siemens-Steuerung programmiert und am Technikum im BIK umgesetzt und getestet wurde.

Das Aushärteverhalten von drei unterschiedlichen Harzsystemen wurde mit Hilfe von DSC- und DEA-Messungen untersucht und die Reaktionskinetik modelliert. Neben zwei klassischen Windkraft-Harzsystemen wurde das latente Harzsystem RIMR1037 LV untersucht. Die Kinetik konnte bei diesem Harz nicht mit dem Kamal-Sourour-Modell dargestellt werden, sondern musste aus sich überlagernden Reaktionen modelliert werden. Ein weiterer Schwerpunkt bei der Harzcharakterisierung lag in der Betrachtung des Feuchteinflusses, der durch Balsa-Holz potentiell in den Prozess eingebracht werden kann. Der prozentuale Gewichtsanteil von Wasser, der im Harz während der Reaktion vorliegt, wurde analytisch-experimentell bewertet. Je nachdem wie feucht das Holz ist, können bis zu 5 Gew.-% Feuchte enthalten sein. Die Feuchte zeigt einen deutlichen Einfluss auf das Reaktionsverhalten. Durch den höheren Anteil an OH-Gruppen, verliert die Reaktion ihre autokatalytische Charakteristik und verhält sich wie eine Reaktion n-ter Ordnung. Der Einfluss der Feuchte ist sowohl mit DSC- als auch mit DEA-Messungen nachweisbar. Bei den DEA-Messungen verändert sich durch den Feuchteanteil zudem die „Basis“-Ionenviskosität, sodass der Feuchtegehalt auch im ausgehärteten Zustand nachgewiesen werden kann.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Charakterisierungen wurde das simulationsbasierte Regelungstool „BladeControl“ in Python entwickelt, das die Temperatur und den Aushärtegrad während des Aushärteprozesses (bzw. Tempern) vorhersagen kann. Grundlage des Tools ist die sehr effiziente und schnelle thermo-chemische 1D-Simulation, die in Echtzeit Vorhersagen treffen kann. Die Temperaturdaten aus der Werkzeugform können direkt durch ein DAQ-System verarbeitet werden und als Randbedingung in der Simulation genutzt werden. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Temperaturszenarien ($\pm \Delta T$) kann abgeschätzt werden, ob eine Temperaturerhöhung oder eine Temperaturreduktion notwendig ist, um den idealen Temperaturverlauf zu gewährleisten. Mit Hilfe dieses Tools ist die Optimierung des Aushärteprozesses möglich. Im Rahmen des Projekts wurde das Tool für einen spezifizierten Parameterraum (Fasermaterial, Harz etc.) kalibriert. Die Übertragung auf andere Systeme ist prinzipiell möglich.

Da das Regelungstool aktuell nur Vorhersagen zu den Verläufen von Temperatur und Aushärtung macht, soll das Tool zukünftig durch einen geschlossenen Regelkreislauf ergänzt werden. Zusätzlich ist die Erweiterung des DAQ-Systems des Tools sinnvoll, um die DEA-Sensormessungen als Input zu nutzen. Aufgrund der 1D-Simulation ist nur die Vorhersage an den Sensorpositionen möglich. Temperaturpeaks an anderen Stellen können so nicht erkannt werden. Aus diesem Grund wird eine Erweiterung auf 2D oder sogar 3D angestrebt, die jedoch weiterhin in Echtzeit erfolgen muss. Alternativ können Methoden des maschinellen Lernens im Tool aufgenommen werden.

Es konnte ein Beitrag zur Rotorblattfabrik der Zukunft geleistet werden. Die entwickelten Lösungen bieten Ansätze zur Automatisierung der Fertigung von Rotorblättern für Windenergieanlagen.

8 Voraussichtlicher Nutzen

Das Projekt hat einen Beitrag zur Automatisierung von Prozessschritten bei der Rotorblattfertigung geleistet. Die Komplexität des DTP-Effektors, insbesondere durch die zahlreichen Zusatzachsen, stellte für die Implementierung in die Roboterportalanlage im BladeMaker-Demozentrum am Fraunhofer IWES eine große Herausforderung dar. Siemens konnte die Machbarkeit des Prozesses mit Hilfe der eingesetzten Steuerung aufzeigen. Zur Darstellung der im Projekt entwickelten Prozesse, hat Siemens ein Video produziert (https://www.youtube.com/watch?v=0zH-U_HP6tl).

Auch SWMS konnte ihre Software CAESA® dahingehend erweitern, Zusatzachsen zur Anpassung von Drapiermodulen an komplexe, dreidimensionale Formen in den bestehenden 6-Achs-Prozess einzubinden. Der Ablage- und Drapierprozess kann mit Hilfe der Software simuliert und visualisiert werden. Zudem wurde die Relevanz der Rückführung von Daten aus dem Inbetriebnahmeprozess deutlich. Am Beispiel der Entwicklung des Versuchsstandes zur automatisierten Drapierung im Technikum am BIK wurde die Aufnahme von Sensordaten genutzt, um die Bewegungen des Roboters mit einer höheren Genauigkeit an die Formwerkzeuggeometrie anzupassen.

Die wirtschaftliche Verwertung der entwickelten Handhabungseinheit ist momentan, aufgrund der sich noch stetig ändernden Längen und Geometrien der Rotorblätter von Windenergieanlagen, als gering einzustufen. Da die Produktion von Rotorblättern vollständig ins Ausland verlagert wurde, kämpfen die Unternehmen allerdings mit Fachkräftemangel. In Zukunft wird eine Automatisierung von Prozessen daher nicht ausgeschlossen.

Das Regelungskonzept zusammen mit dem entwickelten Tool „BladeControl“ kann der Industrie und anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt werden. Damit steht eine Software zur Verfügung, um dem Aushärteprozess optimal auszulegen und diesen in Echtzeit zu kontrollieren. Im Projekt wurde das Prinzip für einen spezifischen Aufbau und Material aufgezeigt. Für weitere Materialien muss eine erneute Kalibrierung vom Anwender durchgeführt werden.

Das Tool „BladeControl“ stellt einen ersten Schritt zur Digitalisierung und Automatisierung des Aushärteprozesses dar. Um einen digitalen Zwilling des Prozesses zu erstellen, muss weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeit in das Tool investiert werden. Folgende Ergänzungen wären sinnvoll:

- Erweiterung der Simulation auf 2D oder 3D unter Beachtung der Echtzeitauffähigkeit → Aussagen außerhalb des Sensorbereichs möglich
- Integration eines Surrogate-Modells → Beschleunigung der Simulation für 2D bzw. 3D

- Geschlossenen Regelkreis implementieren → Automatisierte Steuerung des Prozesses

Die wissenschaftliche Verwertung der Inhalte des Projektes wurde durch die Einbindung in Abschlussarbeiten und Dissertationen gewährleistet. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen der Fachgemeinschaft vorgestellt. Durch die Verwendung von Projektinhalten in Dissertationen einzelner wissenschaftlicher Mitarbeiter wird die Reichweite in Zukunft weiter erhöht. Darüber hinaus hat das Projekt gezeigt, dass weiterer Forschungsbedarf besteht, der im Rahmen von Dissertationen oder Forschungsprojekten bearbeitet werden kann.

9 Veröffentlichung der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts entstanden zahlreiche Veröffentlichungen in Form von Konferenzbeiträgen, Artikeln in Fachzeitschriften und studentischen Abschlussarbeiten. Diese eigenen Veröffentlichungen über das Projekt werden im Folgenden aufgelistet.

Konferenzbeiträge:

- [GHM22] N. Gushurst, A.S. Herrmann, L. Meyer, A. Mändle (FIBRE, Uni Bremen): Untersuchungen zum Feuchtegehalt und dessen Einfluss auf das Aushärteverhalten von Epoxidharzen in der Rotorblattfertigung, 23. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 2022, (Posterbeitrag)
- [GMD23] N. Gushurst, A. Mändle, D. Droste, A. Dimassi, A.S. Herrmann (FIBRE, Uni Bremen): Development of a thermo-chemical curing simulation for monitoring and control in rotor blade production, Future Trends in Rotor Blade Manufacturing 2023, (Posterbeitrag)
- [RFB23] M. Richrath, J. Franke, M. Brink, J.-H. Ohlendorf, K.-D. Thoben, (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen): *Direct Textile Placement - Automated lay-up and draping of dry non-crimp fabrics*, Future Trends in Rotor Blade Manufacturing 2023, (Posterbeitrag)

Artikel in Fachzeitschriften:

- [FOT19] J. Franke, J.-H. Ohlendorf, K.-D. Thoben (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen): *Solutions for a continuous direct textile layup*, Materials Science & Engineering Technology 50(11):1326–1342 2019. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.201700197>.
- [ORF20] J.-H. Ohlendorf, M. Richrath, J. Franke, M. Brink, K.-D. Thoben (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen): *Towards automation of wind energy rotor blade production: a review of challenges and application examples*, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science 2020. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/20550340.2020.1838224>.
- [ROT23] M. Richrath, J.-H. Ohlendorf, K.-D. Thoben (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen): *Investigating the factors influencing the bridging of dry non-crimp fabric on a concave L-shaped mold in an automated draping process*, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/20550340.2023.2286127>.

Studentische Arbeiten:

- [Die19] M. Diehl: Konstruktion einer Sensoreinheit zur modularen Integration unter Berücksichtigung des Schwingungsverhaltens, 2019 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Lan19] M. Landwehr: Analyse technischer Textilien zur Gegenüberstellung relevanter Kriterien für eine automatisierte Handhabung, 2019 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Hor19] M. Horstmann: Konstruktion und Inbetriebnahme eines Umformtisches zur Erzeugung von Oberflächen, 2019 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Kal20] J. Kaltenbach: Entwicklung und Evaluation von Konzepten zur Drapierung technischer Textilien auf komplexe Geometrien, 2020 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Beh20] A. Behrens: Entwicklung eines Versuchsstandes zur Evaluation von Drapierkonzepten durch Adaption eines bestehenden automatisierten Ablageprozesses, 2020 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Mey21] L. Meyer: Untersuchungen zum Feuchteinfluss von Balsaholz auf das Aushärteverhalten von Epoxidharzen im Vakuuminfusionsverfahren (Faserinstitut Bremen e.V., Uni Bremen)
- [Buc22] R. Buchholz: Prozessanalyse und Optimierung von Prozessschritten eines automatisierten Ablageprozesses für technische Textilien, 2022 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Brü22] A. Brünjes: Konstruktiver Entwurf einer adaptiven Handhabungseinheit zur Drapierung technischer Textilien, 2022 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [FHK22] J. Fleder, N. Howe, T. Klenner, M. Landwehr: Experimentelle Untersuchung des Textilverhaltens von Glasfasergelegen in einem automatisierten Drapierprozess, 2022 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)
- [Lan22] M. Landwehr: Der Spring-Back-Effekt bei Glasfasergelegen - Experimentelle Untersuchung an einer Flatback-Geometrie bei der automatisierten Ablage, 2022 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)

[AP23] J. Ahrens, T. Prabakaran: Quantifizierung des Spring-Back-Effektes von Glasfasergelegen, 2023 (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen)

Videobeitrag:

Siemens: https://www.youtube.com/watch?v=OzH-U_HP6tl

10 Literaturverzeichnis

- [AES16] A. C. Arriola, A. X. Eraña, S.M. Sastre et al.: *System for automatically producing wind turbine blades*, Danobat, S. Coop.: Schutzrecht: EP 2 433 782 B1, 2016
- [BBH14] A. Breede, C. Brauner und A.S. Herrmann: *Dielectric infusion and cure monitoring for thick composite parts*, 36th Colloquium of Automation, Steinfeld, 2014.
- [BGR17] R. Braun, I. Gebauer, H. Rosemann, M. Lindermann, O. Bagemiel, F. Klaenfoth, F. Sayer (Fraunhofer IWES): *Next Step to Industrialization with the BladeMaker Demo-Center: Direct Molding & Direct Infusion*, Wind Turbine Blade Manufacture, Düsseldorf, 12.-14.12.2017
- [BFP18] R. Braun, E. Fröse, F. Prissok, et al.: *Gemeinsamer technischer Schlussbericht zum Verbundprojekt Blademaker*, Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES); 2 Komponenten Maschinenbau GmbH; BASF Polyurethanes GmbH; fibretech composites GmbH; Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM); Hexion Stuttgart GmbH; J. Schmalz GmbH; P-D Glasseiden GmbH Oschatz; Siemens AG; Universität Bremen, Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK); Universität Bremen, Fachgebiet 12 Werkstofftechnik, Fasern und Faserverbundwerkstoffe (FIBRE), November 2018.
- [Bra12] J. Brandes (fibretech): *More efficient production provided by more functionality in heatable moulds*, 4. Fachveranstaltung Rotorblätter von Windenergieanlagen, Haus der Technik, Essen, 19.-20.06.2012
- [Bra13] J. Brandes (fibretech): *Taktzeiten im Griff mit aktiv geregelter Prozesstemperatur in CFK-Formenwerkzeugen*, 5. Fachveranstaltung Rotorblätter von Windenergieanlagen, Haus der Technik, Essen, 12.-13.06.2013
- [BRB16] R. Braun, H. Rosemann, O. Bagemiel, C. Dörsch, I. Gebauer (Fraunhofer IWES): *Contributions to the Industrialization of Rotor Blade Production within the Project BladeMaker*, 8. Tagung Rotorblätter von Windenergieanlagen, Haus der Technik, Essen, 16.-17.06.2016
- [Bru98] R. Bruce Prime: *Thermosets (Chapter 6 of Thermal Characterisation of Polymeric Materials)*, 2nd Edition, Editor Edith A. Turi, Academic Press, San Diego (1998) 2, p1380.

- [BSH15] C. Brauner, P. Soprano, A.S. Herrmann und D. Meiners: *Cure-dependent thermo-chemical modelling and analysis of the manufacturing process of an aircraft composite frame*, Journal of Composite Materials, 49(8), 921-938, 2015.
- [CBM15] A. Chaloupka, R. Bezerra, V. Madaksira, I. Taha, N.M. Rudolph and I.C.T. Fraunhofer: *Detection and modelling of thermal and rheological transitions of a 2-step-curing thermoset using dielectric and standard measuring techniques*, Proceedings of ICCM20, 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Denmark (pp. 4206-4), 2015.
- [Dan15] Danobat: *DFS-WB - Automated wind blade manufacturing system*; 2015. Online verfügbar: https://www.danobatcomposites.com/wp-content/uploads/2016/09/2015_DFS-WB_en.pdf.
- [Den18] Dencam Composite: Unternehmenswebsite, <http://www.dencam.com>, aufgerufen am 11.03.2018
- [Dom18] J.C. Domínguez: *Rheology and curing process of thermosets*, In Thermosets (pp. 115-146). Elsevier, 2018.
- [GTH20] N. Gushurst, T. Frerich und A.S. Herrmann: *Investigations on the Influence of High Pressures on the Curing Behaviour and Material Properties of Composite Structures for the Development of a Material Model*, Advances in Polymer Processing 2020 (pp. 313-323). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [HJP13] R. Hardis, J.L. Jessop, F.E. Peters und M.R. Kessler: *Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 49, 100-108, 2013
- [HH95] M. Hojjati und S.V. Hoa: *Some observations in curing of thick thermosetting laminated composites*, Science and Engineering of Composite Materials, 4(2), 89-108, 1995
- [HXZ22] Hui, X., Xu, Y., Zhang, W., & Zhang, W.: *Cure process evaluation of CFRP composites via neural network: From cure kinetics to thermochemical coupling*. Composite Structures, 288, 115341, 2022.
- [KOB21] Krishnappa, L., Ohlendorf, J.-H., Brink, M., Thoben, K.-D.: *Investigating the factors influencing the shear behaviour of 0/90° non-crimp fabrics to form a reference shear test*, Journal of Composite Materials, 2021; 55(20): 2739-2750, <https://doi.org/10.1177/002199832199162>

- [Kri17] Krimmer (Euros): *Einfluss der Prozessführung auf Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden*, 6. VDI-Fachkonferenz Rotorblätter von Windenergieanlagen, Bremen, 27.-28.06.2017
- [LJP17] C. Lauter, K.-P. Jaquemotte (Carbon Rotec), N. Pantelelis (Synthesites): *Advanced process control for higher productivity and online quality control*, Wind Turbine Blade Manufacture, Düsseldorf, 12.-14.12.2017
- [LM05] M. Lodeiro und D. Mulligan: *CURE MONITORING TECHNIQUES FOR POLYMER COMPOSITES, ADHESIVES AND COATINGS*. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2005
- [NHC21] S. A. Niaki, E. Haghighat, T. Campbell, A. Poursartip und R. Vaziri: *Physics-informed neural network for modelling the thermochemical curing process of composite-tool systems during manufacture*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 384, 113959, 2021.
- [RFO17] M. Richrath, J. Franke, J.-H. Ohlendorf et al.: *Effektor für die automatisierte Direktablage von Textilien in der Rotorblattfertigung*, Lightweight Des 2017, 10(5): 48–53, <https://doi.org/10.1007/s35725-017-0043-2>
- [ROT23] M. Richrath, J.-H. Ohlendorf, K.-D. Thoben (Institut für integrierte Produktentwicklung – BIK, Uni Bremen): *Investigating the factors influencing the bridging of dry non-crimp fabric on a concave L-shaped mold in an automated draping process*, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science 2023, <https://doi.org/10.1080/20550340.2023.2286127>.
- [SZH21] S. Shevtsov, I. Zhilyaev, J.P. Huang und N. Snezhina: *Numerical Optimization of Vacuum Assisted Manufacturing of Aircraft Composite Parts Using the Predictive Assessment of Objectives*, 12th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). IEEE, 2021
- [Zhu15] S. Zhu.: *An automated method for the layup of fiberglass fabric*, Dissertation, Ames (Iowa), Iowa State University, 2015

Universität Bremen

Institut für integrierte Produktentwicklung

Fachbereich 04, Fachgebiet 09

Produktionstechnik:

Maschinenbau & Verfahrenstechnik,

Badgasteiner Straße 1

28359 Bremen

richrath@uni-bremen.de

www.bik.uni-bremen.de

**Fachgebiet 12: Werkstofftechnik/Fasern und
Faserverbundwerk-stoffe (FIBRE)**

Fachbereich 04, Fachgebiet 12

Produktionstechnik:

Maschinenbau & Verfahrenstechnik,

Am Biologischen Garten 2

28359 Bremen

droste@faserinstitut.de

www.faserinstitut.de

Herausgeber

Universität Bremen, Stand 2023