

# EINFLUSS EINER ONLINE BAHNKORREKTUR AUF DIE MATERIALEIGENSCHAFTEN VON PREPREG TOWS IM FIBER PLACEMENT PROZESS

C. D. Nguyen, C. Krombholz, D. Röstermundt  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie  
Ottenbecker Damm 12, 21682 Stade, Deutschland

## Zusammenfassung

Seitliche Korrekturen von Prepreg Tows während eines Automated Fiber Placement Prozesses können zur Einhaltung beziehungsweise Erhöhung der geforderten Bauteilqualität dienen. Die dabei auftretenden Scherkräfte zwischen Werkzeugoberfläche, Material und Kompaktierungsrolle beeinflussen das Materialverhalten während des Korrekturprozesses. Dieses Verhalten in Abhängigkeit verschiedener Ablegeparameter wie Anpresskraft, Korrekturwinkel oder Ablegegeschwindigkeit wurde hier untersucht. Mit Hilfe eines Faserkantendetektors konnte die Qualität des abgelegten Materials bezüglich Position, Geometrie oder Defekte erfasst werden. Die Versuche haben gezeigt, dass eine Variation der Parameter erhebliche Einflüsse auf das abgelegte Material haben kann und dass es aufgrund der seitlichen Auslenkungen zu Abweichungen zwischen der real abgelegten Bahn und der Sollbahn kommt. Erst durch die hier ermittelten Erkenntnisse über das Materialverhalten kann eine online Bahnkorrektur erfolgreich durchgeführt werden und die Qualität des Ablegeprozesses im Vergleich zur aktuellen Fertigungstechnologien gesteigert werden.

## 1. EINFÜHRUNG

Die Anforderungen nach immer leichteren Flugzeugen aus Gründen des Treibstoffverbrauches haben zu einem steigenden Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in der Flugzeugbauindustrie geführt. Um den Bedarf von Großbauteilen wie Flügelschalen, Flugzeugrumpfe oder Leitwerke aus CFK decken zu können, muss der Durchsatz an Faserverbundmaterial erheblich erhöht werden. Mit den vorhandenen Technologien ist dies nur durch radikale Vervielfachung der Anlagen zu realisieren und wäre somit nicht wirtschaftlich.

Dementsprechend sind neue Anlagentechnologien zu entwickeln, die eine erheblich höhere Produktivität als vorhandene Anlagen aufweisen. Auf dieser Grundlage entsteht am DLR Standort Stade die Forschungsanlage *GroFi* (Großbauteile in Fiberplacementtechnologie) zur Fertigung von Großbauteilen aus CFK. Ziel ist das Erreichen eines Material Massendurchsatzes von 150kg/h. Verglichen mit heute zur Verfügung stehende Anlagen [1] wäre die Produktivität einer GroFi Anlage um den Faktor sechs höher. Grundlage hierfür bilden acht simultan agierende Ablegeroboter sowie eine Logistik, die eine Aufrüstung und Wartung der Ablegeeinheiten parallel zur Produktion ermöglicht. Durch Qualitätssicherung während des Ablegeprozesses können Stillstandzeiten auf ein Minimum reduziert werden. Weiterhin dient der Einsatz von Multi-Form-Werkzeugen der Produktivität und Flexibilität der Anlage.

Um die hohen Anforderungen der Luftfahrtindustrie bezüglich der Ablegequalität mindestens gerecht zu werden, wird in *GroFi* ein korrigiertes Ablegen des Materials durchgeführt. Um Gaps (Abstand zwischen zwei abgelegten Bahnen) auf ein Minimum zu reduzieren und Überlappungen unbedingt zu vermeiden, kann das abzulegende

Material durch seitliche Auslenkungen an die bereits abgelegte Lage angepasst werden.

Durch diese seitlichen Korrekturen treten Scherkräfte auf, die Einflüsse auf das Verhalten des Materials haben. Deshalb wird im Folgenden das Materialverhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ablegeparametern wie Anpresskraft, Korrekturwinkel oder Ablegegeschwindigkeit untersucht. Durch das bessere Verständnis kann eine bestmögliche Ablegequalität erreicht werden.

## 2. STAND DER TECHNIK UND ABLEGEPROZESS IM PROJEKT GROFI

In Bezug auf die Ablegequalität weisen vorhandene Technologien einige Nachteile auf. Auf diese und auf bereits bekannte, ähnliche Effekte beim Ablegen von gekrümmten Bahnen wird im Folgenden eingegangen. Weiterhin wird der korrigierte Ablegeprozess im GroFi beschrieben und die Verwendung der hier ermittelten Erkenntnisse für eine Online Bahnkorrektur verdeutlicht.

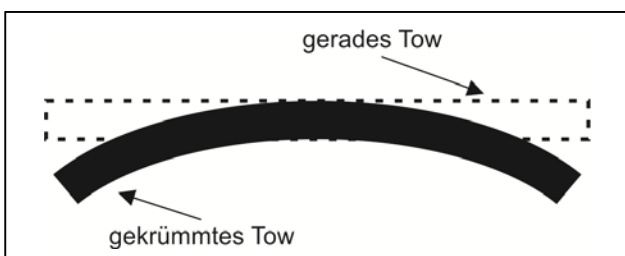
### 2.1. Ablegeprozess

Das Aufbringen des mit Harz vorimprägnierten und auf einer Spule aufgerollten Materials, sogenanntes Prepreg (**preimpregnated fibres**), erfolgt mit Hilfe einer Kompaktierungsrolle. Diese besteht zur besseren Konturanpassung aus mehreren Einzelrollen und befindet sich am Fiber-Placement Kopf. In der Regel wird das Material bestehend aus 16 oder 32 schmalen Prepreg Streifen (Tows, 3,175 – 12,7mm Breite) oder aus breiten Prepreg Bändern (Tapes, 150 – 300mm Breite) zeitgleich auf einer Bahn (Course) abgelegt. Mehrere Courses aneinander abgelegt ergeben eine Laminatschicht (Ply).

Aktuell werden die Bahnen nach und nach durch ein im Vorfeld generiertes NC-Programm abgelegt [2]. Eventuell auftretende Änderungen während des Prozesses, beispielsweise wenn eine Bahn nicht wie definiert abgelegt wurde, werden nicht erfasst und können somit nicht für den weiteren Ablegeprozess berücksichtigt werden. Dies kann zu Gaps oder auch Überlappungen führen, die nicht mehr im Toleranzfenster der Fertigungsrichtlinien liegen und im ungünstigsten Fall ein Ausschuss des Bauteils zur Folge haben.

## 2.2. Tack zwischen Material und Werkzeugoberfläche

Wird das Tow quer zur Faserrichtung verformt, in diesem Fall gekrümmt, treten über die Towbreite unterschiedliche Spannungen auf. Zugspannungen am Außenradius und Druckspannungen am Innenradius führen dazu, dass das Tow auch ohne äußere Maßnahmen zur Rückverformung in seine Ausgangsform tendiert (BILD 1).



**BILD 1: Längenänderung zwischen Innen- und Außenradius durch Krümmung**

Diesem Drang kann durch ausreichenden Tack zwischen dem Material und der Werkzeugoberfläche entgegen gewirkt werden. In der Faserverbundtechnologie beschreibt der Tack die Adhäsion zwischen einer CFK-Lage mit einer weiteren Oberfläche während des Ablegeprozesses, bevor sie ausgehärtet werden [3]. Ist dieser zu gering, kann die Krümmung des Tows nach dem Ablegen nicht weiter aufrechterhalten werden. Durch die Spannungsunterschiede würde sich das Tow von der Oberfläche, sich teilweise zurück verformen und somit nicht mehr an der definierten Position befinden. Ausreichend hoher Tack ist somit unabdingbar für eine gute Ablegequalität, vor allem bei gekrümmten Bahnen.

Der Tack kann zum einen durch Erhöhung der Kompaktierungskraft und zum anderen durch Erhöhung der Materialtemperatur erreicht werden. Bei der Temperatur gilt es jedoch den optimalen Wert zu ermitteln, da eine zu hohe Temperatur auch zu einer Abnahme des Tacks führen kann [4]. Weitere Tack beeinflussende Parameter sind die Kompaktierungszeit und die Alterung des Materials bei Raumtemperatur [5]. Diese werden hier jedoch nicht weiter berücksichtigt.

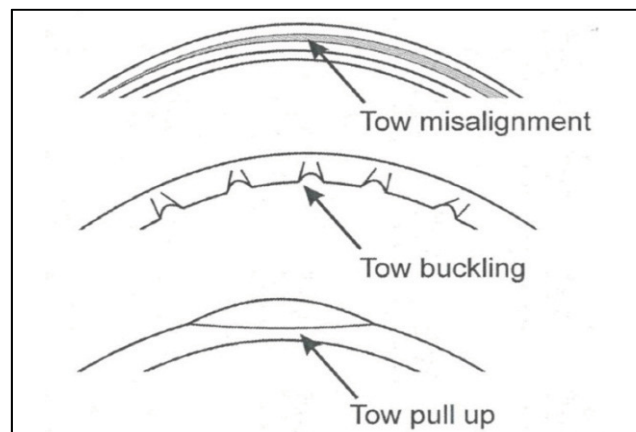
## 2.3. Materialbeeinflussung

Im Vergleich zum Ablegen von gekrümmten Bahnen, wo die Ablegeeinheit sich immer zur Ablegerichtung dreht, findet eine Drehung des Kopfes bei einer Korrektur nicht statt (Abschnitt 2.4). Trotzdem treten während der Anfangs- und Endphase einer Online Bahnkorrektur Effekte auf, die sehr denen von gekrümmt abgelegten Bahnen

ähneln. Diese Effekte werden aus diesem Grund im Folgenden zusammengefasst.

Sobald das Material seitlich umgelenkt wird, ob mit Drehung der Kompaktierungsrolle um die  $Z_{TCP}$ -Achse (BILD 3) oder nur durch seitlichen Versatz, treten daran Kräfte auf, die neben der eigentlichen Umlenkung auch weitere Verformungen des Materials zur Folge haben. Im Gegensatz zu den Umlenkungen verursachen diese Verformungen ungewollte Defekte im Bauteil, die zu erheblichen Verminderungen der mechanischen Eigenschaften führen. Das Beulen, wie sie am Innenradius einer gekrümmten Bahn auftreten können, kann zu einem Verlust der mechanischen Eigenschaften von bis zu 36% führen [6]. Generell können bei Krümmungen von Tows drei Effekte auftreten. Diese sind Beulen am Innenradius, Lösen von der Oberfläche und Hochziehen des Tows am Außenradius sowie Falsch ausgerichtung aufgrund der Krümmung [7]. Im BILD 2 sind die unterschiedlichen Effekte schematisch dargestellt.

Ein Parameter, der ein Anwachsen der Defekte wesentlich mit beeinflusst, ist der Krümmungsradius. Je kleiner dieser ist, desto mehr tendiert das Tow zum Beulen und Ablösen. Wiehn und Hale [8] beziffern den minimalen Radius in dem Tows noch ohne Beulen abgelegt werden können, mit 508 mm.



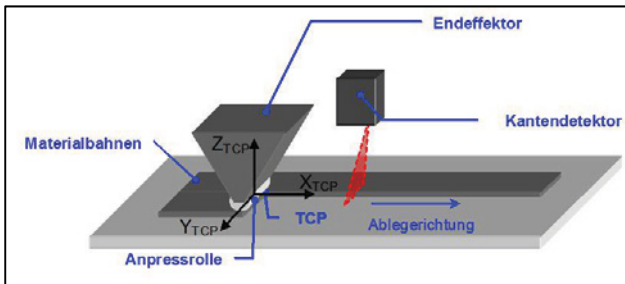
**BILD 2: Auftretende Effekte beim Ablegen von gekrümmten Bahnen [3]**

## 2.4. Qualitätssteigerung durch Online-Bahnkorrektur

Zur Verbesserung der Ablegequalität im Vergleich zu heutigen Fertigungstechnologien, werden im Projekt *GroFi* qualitätssteigernde Sensoriken eingesetzt. Um Gaps so gering wie möglich zu halten, gleichzeitig aber auch Überlappungen den Fertigungsrichtlinien der Flugzeughersteller nach unbedingt zu vermeiden, werden Sensorsysteme zur Erfassung der Faserlage auf dem Tool eingesetzt. Faserkantendetektoren, die an der Ablegeeinheit integriert sind, erfassen die Kante der im Vorfeld abgelegten Bahn, nehmen dessen Position in den automatisierten Auswertalgorithmus auf und korrigieren gegebenenfalls die im Vorfeld programmierte Sollbahn BILD 3. Der Ablegeprozess kann dadurch online an die Gegebenheiten des bereits abgelegten Bauteils angepasst werden. Zu große Gaps und Überlappungen können vermieden und die Bauteilqualität dadurch erhöht werden.

Der derzeitige eingesetzte Korrekturalgorithmus verschiebt

die Ablegeeinheit zur Korrektur entlang der  $Y_{TCP}$ - und  $Z_{TCP}$ -Achse (BILD 3). Eine gleichzeitige Drehung der Ablegeeinheit um  $Z_{TCP}$  wie es heutzutage beispielsweise beim Ablegen von Kurven durchgeführt wird, findet nicht statt.



**BILD 3: Schematische Darstellung einer Online-Bahnkorrektur mit vorlaufendem Kantendetektor zur Erfassung der Faserkante**

Ziel ist es, Tows mit Gaps von circa 0,1mm abzulegen. Dazu ist ein genaues Verständnis über das Verhalten des Materials bezüglich Positionstreuung, Towgeometrie und Ablegequalität während eines korrigierten Ablegeprozesses unbedingt erforderlich. Die ermittelten Daten und Informationen werden im Anschluss benötigt, um sowohl Korrektur- als auch Fehlermanagementstrategien zu entwickeln. Durch die ermittelten Grenzen eines Materials kann ebenfalls darüber entschieden werden, ob und ab wann eine Korrektur überhaupt zielführend ist. Beispielsweise wenn die Korrektur so klein ist, dass sie auch mit korrekturoptimierten Parametern nicht erreicht werden.

Die Ergebnisse dienen somit auch zum materialoptimierten Ablegen und zum Erreichen einer bestmöglichen Bauqualität.

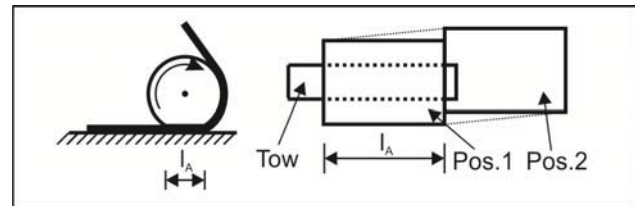
### 3. DURCH OFFSET HERVORGERUFENE EFFEKTE

Durch die Variationen der unterschiedlichen Parameter wie Anpresskraft, Offsetwinkel oder Ablegegeschwindigkeit traten während der Versuche immer wieder die gleichen Effekte auf. Aus diesem Grund werden diese vorab dargestellt bevor darauffolgend auf die Einflüsse der Ablegeparameter eingegangen wird.

#### 3.1. Scherkräfte zwischen Kompaktierungsrolle, Material und Werkzeugoberfläche

Aufgrund des elastischen Verhaltens der Kompaktierungsrolle wirken während der Korrekturphase Scherkräfte auf das Tow. Die Rolle verformt sich unter Druck, wodurch nicht eine Linien- sondern Flächenlast auf das Tow ausgeübt wird. Wird nun noch eine Korrektur vorgenommen, führt die Ablegeeinheit beziehungsweise auch die Kompaktierungsrolle zusätzlich noch einen seitlichen Offset aus, schematisch dargestellt in BILD 4, rechts. Bei Position 1 der Kompaktierungsrolle wird das Material bereits auf die Oberfläche angedrückt, wodurch seine Position anschließend feststeht. Wenn die Kompaktierungsrolle nun weiter in Ablegerichtung verfährt, drückt sie weiterhin auf die gleiche Position des Materials. Ein Offset würde zu einer Scherung des Materials an diese Stelle führen. Diese Scherung findet somit so lange statt bis die Kompaktie-

rungsrolle die Strecke  $l_A$  zurückgelegt hat (Position 2, BILD 4). Zu diesem Zeitpunkt enden das Andrücken und die Scherung durch die Kompaktierungsrolle auf die bereits abgelegte Position



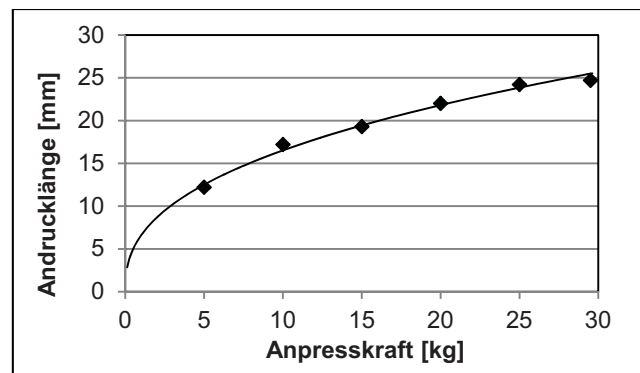
**BILD 4: Seitlicher Versatz der Kompaktierungsrolle beim Überfahren einer Position**

Sind die Scherkräfte größer als die vom Tack zwischen Tow und Werkzeugoberfläche hervorgerufene Scherfestigkeit, löst sich das Tow von der Oberfläche und ein erfolgreiches Ablegen ist nicht möglich. Je größer dabei die Andrucklänge  $l_A$  ist, desto länger wird auch über eine Position des Tows geschert und die Gefahr, dass sich das Tow vom Werkzeug löst, steigt.

Neben dem Tack zwischen der Werkzeugoberfläche und dem abzulegenden Material ist somit auch eine möglichst geringe Andrucklänge anzustreben.

#### 3.2. Änderung der Kontaktfläche

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, kommt es aufgrund der elastischen Kompaktierungsrolle beim Andrücken der Rolle auf das Werkzeug nicht zu einer Linien- sondern zu einer Flächenlast. Während die Breite der Rolle bei zunehmender Druckkraft relativ konstant bleibt, nimmt die Anpresslänge immer weiter zu. In (BILD 5) sind die Andrucklänge für Druckkräfte von 5 bis 30kg dargestellt.



**BILD 5: Andrucklänge in Abhängigkeit der Anpresskraft**

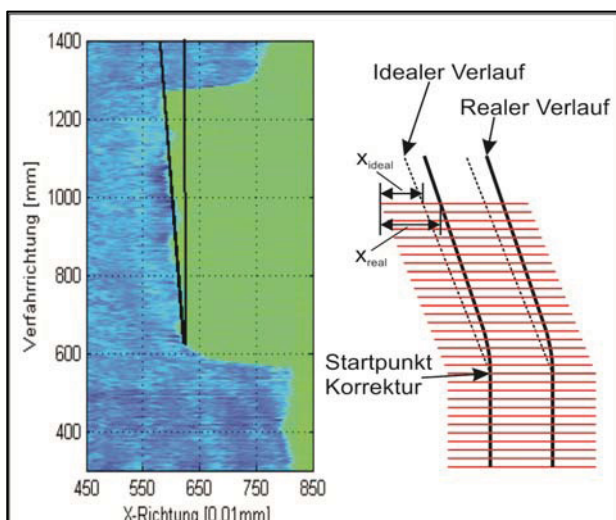
#### 3.3. Fließende Übergänge der Bereiche Gerade – Offset – Gerade

Der Korrekturablauf kann in drei Bereiche unterteilt werden. Im ersten Bereich findet die Korrektur noch nicht statt und die Ablegerichtung ist parallel zur Längsrichtung der Kompaktierungsrolle. Dieser Bereich dient lediglich zum Einpendeln des Tows auf der Kompaktierungsrolle. Im zweiten, im Offset-Bereich, führt die Ablegeeinheit zusätzlich zur Ablegerichtung eine Bewegung quer dazu aus. In diesem Fall ist der Winkel zwischen Ablegerichtung und

Querrichtung größer als null. Im dritten Bereich, wenn die Korrektur ausgeführt wurde, sind Ablegerichtung und Längsrichtung der Rolle wieder parallel zueinander.

In Laserlichtschnittscans (BILD 6, links) sind seitliche Sprünge des Tows an den Übergängen zwischen den Bereichen zu erkennen. Würde das Tow die von der Ablegeeinheit vorgenommenen Bewegungen ideal umsetzen und das abgelegte Material wird im Anschluss gescannt werden, würden sich die Abstände zwischen der Faserkante und dem Rand des Laserlichtschnittfensters  $x_{ideal}$  über den gesamten Ablegevorgang lediglich im Bereich der Breittoleranz des Materials variieren. Die deutlichen Sprünge deuten somit daraufhin, dass es in diesem Bereich zu einer Relativbewegung zwischen dem abgelegten Tow und dem Laserlichtschnittsensor kommt. Da der Sensor fest an der Ablegeeinheit angebracht ist und somit die einprogrammierten Bahnen ohne Verzögerungen durchführt, bedeutet es ein nicht ideales Umsetzen der Bewegungen des Tows.

Die Übergänge in die einzelnen Bereiche werden von der Ablegeeinheit ohne Verzögerung durchgeführt. Dadurch weisen die Übergänge idealerweise einen scharfkantigen Knick mit dem eingestellten Korrekturwinkel auf (BILD 6, rechts). Diese abrupte seitliche Bewegung kann nicht direkt auf das Material übertragen werden, das heißt wenn die Ablegeeinheit den Offset durchführt, versucht das Tow zunächst einmal geradeaus weiterzulaufen. Der eingestellte Offsetwinkel kann vom Tow erst nach einer kurzen Verzögerung erreicht werden, sodass der Übergang vom unkorrigierten in den korrigierten Bereich fließend und nicht scharfkantig erfolgt. Erst nach einer kurzen Übergangsphase stellt sich auch beim Tow der eingestellte Offset ein. Die kurze Verzögerung im Übergangsbereich hat somit zur Folge, dass das Tow im gesamten, korrigierten Bereich einen seitlichen Versatz im Vergleich zum idealen, einprogrammierten Course aufweist. Dieser Versatz kann im Laserlichtschnittscan durch die Größe des seitlichen Sprungs ermittelt werden. Weiterhin sagt die Größe des Sprunges darüber aus, wie stark verzögert das Material auf die Offsetbewegung der Ablegeeinheit reagiert. Je größer der Sprung ist, desto zeitlich und streckenmäßig länger tendierte das Material dazu, geradeaus weiterzulaufen.



**BILD 6:** Kante einer abgelegten Bahn mit deutlichem Versatz am Anfang und Ende einer Korrektur

### 3.4. Relativbewegung zwischen Tow und Rolle

Weiterhin ist BILD 6 eine Verschiebung der Faserkante im Laserlichtschnittscan während der Korrekturphase zu erkennen. Diese wächst mit zunehmender abgelegter Strecke bis zum Abschluss der Korrekturphase kontinuierlich an. Angenommen der Tow verläuft nach dem fließenden Übergang vom unkorrigierten in den korrigierten Bereich weiter parallel zur idealen Ablegestrecke, so wäre  $x_{real}$  über die gesamte Korrekturphase konstant geblieben. Da dies nicht der Fall ist, sondern  $x_{real}$  immer größer wird deutet dies auch in diesem Fall auf eine Relativbewegung zwischen Tow und Kompaktierungsrolle hin. Der Tow kann den von der Ablegeeinheit ausgeführten Offsetwinkel nicht folgen und dementsprechend ist der reale Offsetwinkel kleiner als der ideale.

### 3.5. Beulen am Innenradius und Ablösen am Außenradius der Korrektur

Beim Korrigieren wird der Tow ausgelenkt und dadurch gekrümmt. Durch diese Krümmung muss der Tow am Innenradius eine kürzere und am Außenradius eine längere Strecke im Vergleich zur Tow-Mittellinie zurücklegen. Aufgrund der niedrigen Elastizität der Tows in Faserrichtung kommt es am Innenradius des Tows zu Stauchungen in Faserrichtung und folglich zum Beulen der Fasern (BILD 7, oben). Am Außenradius kommt es zu einem Lösen der Fasern von der Werkzeugoberfläche, da dort aufgrund der theoretisch längeren Strecke hohe Spannungen auf die Fasern wirken, die ein Hochklappen der Fasern in diesem Bereich bewirken (BILD 7, unten).

Weiterhin wurde ein Anwachsen der auftretenden Effekte mit der Zeit beobachtet. Dies ist durch die Spannungen begründet, die auch nach der Kompaktierungsphase im Material gespeichert sind. Beim Versuch, sich zu entspannen, löst es sich immer weiter von der Oberfläche. Wie weit sich das Material wieder von der Oberfläche löst und in welcher Zeit dieser Vorgang stattfindet, hängt sehr stark vom Tack zwischen Material und Oberfläche ab. Ist dieser sehr gering und kann den Spannungen des Materials nur geringfügig entgegenhalten, erfolgt ein schnelles und starkes Anwachsen. Dementsprechend wird bei einem hohen Tack das Anwachsen verzögert und verringert.



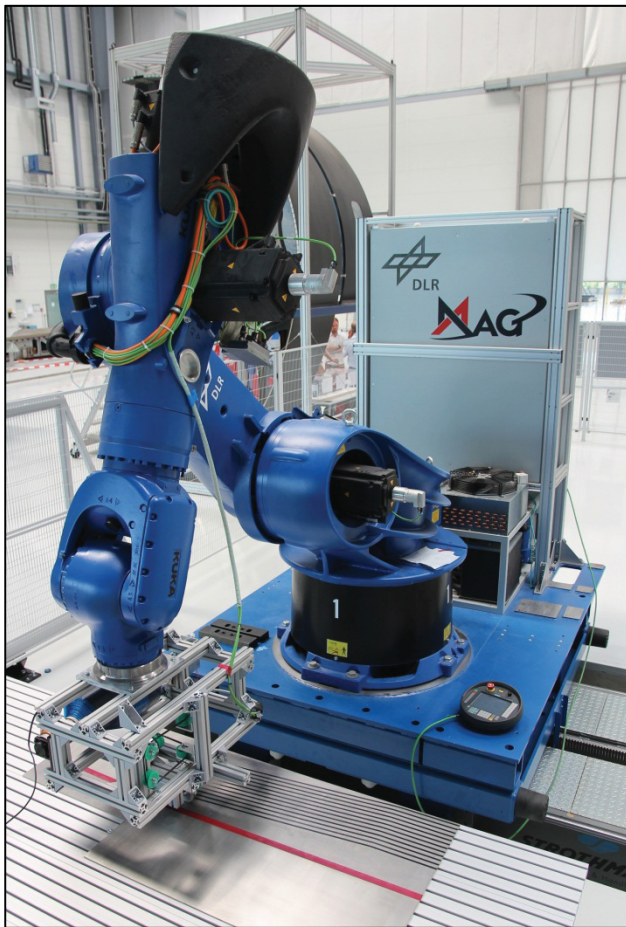
**BILD 7:** Beulen am Innenradius (a und b) und Lösen am Außenradius (c und d)

#### 4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Der Einsatz von Laserlichtschnittsensoren mit der online Bahnkorrektur erlaubt eine Qualitätssteigerung durch Minimierung bzw. Kontrolle der Gapgrößen auf einen sehr genauen Bereich. Der erfolgreiche Einsatz einer solchen Sensorik konnte bereits in [9] und [10] nachgewiesen werden. Die Ermittlung von Prozessparametern und deren Abhängigkeiten zur erfolgreichen Ablage auch unter extremen Korrekturbedingungen ist Bestandteil dieser Experimente.

Die Untersuchungen wurden in einem Teilbereich der Automated Fiber Placement Forschungsanlage des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Stade durchgeführt.

Zur Verfügung stand hierbei eine Roboterkinematik eines KUKA KR 500 auf einer Linearschiene. Die 6-Achsenknickarmroboterkinematik wird über eine Siemens 840D-SL angesteuert und verfügt zusammen mit der Linearachse über sieben Achsen.



**BILD 8: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus mit CNC-gesteuerter Roboterkinematik und Materialuntersuchungskopf**

Die Ablegeversuche wurden auf einem Werkzeittisch durchgeführt. Die Hauptablegerichtung war entlang der Linearachse und circa 1,5m lang, so dass die Bewegung über eine reine Achsbewegung der Roboterkinematik vollzogen werden konnte. Die in [10] ermittelten Standardabweichungen für eine reine Roboterbewegung lagen bei jeder Geschwindigkeit unter  $5,8\mu\text{m}$ , so dass eine sehr genaue Messung vorausgesetzt werden kann.

Als Endeffektor wurde ein eigens entwickelter Materialuntersuchungskopf verwendet, der die Materialrolle eines  $\frac{1}{4}$ “-Tows aufnehmen und nach geschickter Umlenkung ablegen kann. Das verwendete Prepreg-Material war Hexcel AS4/8552 mit einer Materialdicke von 0,25mm. Dieses konnte mit einer an der Materialrolle gekoppelten Hysteresebremse vorgespannt werden. Die Erwärmung des Materials erfolgte mittels einer temperaturgesteuerten thermischen Konvektion – die Steuerung der Anpresskraft über eine spiralfedergelagerte Anpressrolle. Die Formwerkzeugoberfläche wurde bei jedem Versuch mit Tack Enhancer behandelt.

Zur Ermittlung der Ablegequalität wurde im Nachlauf ein 3D-vermessender Laserlichtschnittsensor angebracht, der mit einer Auflösung von  $640 \times 480\text{Px}$ , einem Hörsichtbereich von 8mm und einem Seitensichtbereich von 11mm das Profil eines Tows erfassen kann. Die Aufnahmezeit des Sensors betrug 320Hz. Der Laserlichtschnittsensor erfasst die Oberflächengeometrie des abgelegten Tows und kann somit Steering Defekte erfassen.

##### 4.1. Vorversuche

In Vorversuchen wurden erste Ablegeparameter definiert, die einen erheblichen Einfluss auf die Ablegequalität aufweisen.

Die Anpresskraft, die Towtemperatur im Moment der Ablage aber auch die Ablegegeschwindigkeit sind die wichtigsten Einflussgrößen, die vor allem den Tack des Materials beeinflussen und deshalb genau kontrolliert oder berücksichtigt werden müssen.

Im ersten Vorversuch wurde daher die Anpresskraft in Abhängigkeit des Federwegs der Anpressrollenlagerung erfasst. Hierfür wurde die Anpressrolle des Materialuntersuchungskopfes senkrecht über einer Digitalwaage positioniert und anschließend nach unten verfahren. Die zum Erreichen von verschiedenen Federkräften erforderlichen Federwege wurden dann aufgezeichnet.

Eine Berechnung der Federwege bei vorgegebener Kraft bzw. Gewicht konnten nicht herangezogen werden, da die Anpressrolle durch die Eigenelastizität des Silikons ebenfalls einen Anteil am Gesamtfederweg besaß.

Die Gesamtfederwege wurden für 10kg, 20kg, 30kg und 40kg erfasst.

Die ermittelten Gesamtfederwege konnten anschließend als Offset in das NC-Programm übertragen werden.

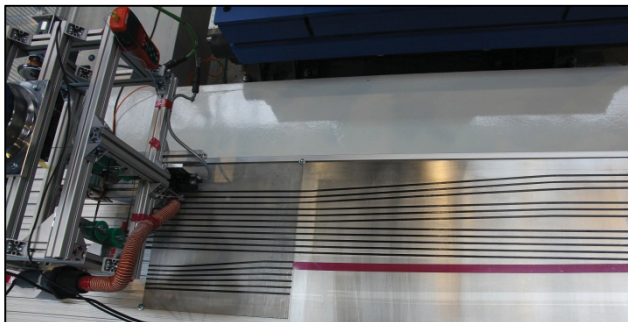
Neben der Anpresskraft besitzt ebenfalls die Tow-Temperatur einen großen Einfluss auf das Verhalten des Prepreg-Materials. Den Einfluss dieser Temperatur auf die Tackeigenschaften wurden in diesem Versuch untersucht.

In einer ersten Untersuchung wurde die thermische Absorption ermittelt. Bei voreingestellter Temperatur der Konvektionsströmung wurden für unterschiedliche Ablegegeschwindigkeiten und somit unterschiedlichen Einwirkzeiten die Tow-Temperaturen ermittelt. Die Tow-Temperatur wurde mittels eines Infrarotthermometers und die Temperatur des Luftstroms mittels eines Thermoelements erfasst.

Die Temperaturen des Luftstroms wurden in den Stufen  $60^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$  und  $160^\circ\text{C}$  jeweils bei Variation der Verfahrgeschwindigkeiten in den Stufen 2,5m/min,

5m/min, 7,5m/min und 10m/min ermittelt.

Anschließend wurde das Tow entlang einer Bahn auf dem Formwerkzeug abgelegt. Der Verlauf der Bahn ist in BILD 9 dargestellt.



**BILD 9: Darstellung der Ablegebahnen mit unterschiedlichen Versatzwinkeln**

Der Korrekturwinkel betrug 6°. Durch Variation der Tow-Temperatur und anschließender visueller Überprüfung der Ablegequalität kann somit die optimale Tow-Temperatur für dieses Szenario erfasst werden.

#### 4.2. Variation der Prozessparameter

Die Ergebnisse der Vorversuche ermöglichen die Steuerung der Prozessparameter über die hergeleiteten Abhängigkeiten mit den Anlagenparametern.

Damit lassen sich drei wesentliche Untersuchungen durchführen:

- Untersuchung des Korrekturwinkels auf die Ablegequalität
- Untersuchung der Anpresskraft bei extremem Korrekturwinkel und deren Abhängigkeit
- Untersuchung des Einflusses der Ablegegeschwindigkeit auf die Ablegequalität unter Verwendung einer optimalen Anpresskraft bei extremen Korrekturwinkeln

In allen Fällen wurden Materialbahnen auf einer Gesamtlänge von 1550 mm entlang der Linearachse abgelegt. (siehe BILD 10) Die unterschiedlichen Versuche wurden mit folgenden Variationen durchgeführt:

- Korrekturwinkel:  
Winkelvarianten = 2°, 4°, 6°;  
v=5m/min, Anpresskraft = 20kg, Korrekturlänge = 700mm
- Anpresskraft:  
Anpresskraftvarianten = 10kg, 20kg, 30kg, 40kg  
Korrekturwinkel = 6°, v=5m/min, Korrekturlänge = 700mm
- Geschwindigkeit:  
Geschwindigkeitsvarianten = 2,5m/min, 5m/min, 7,5m/min und 10m/min  
Korrekturwinkel = 6°, Anpresskraft = 20kg

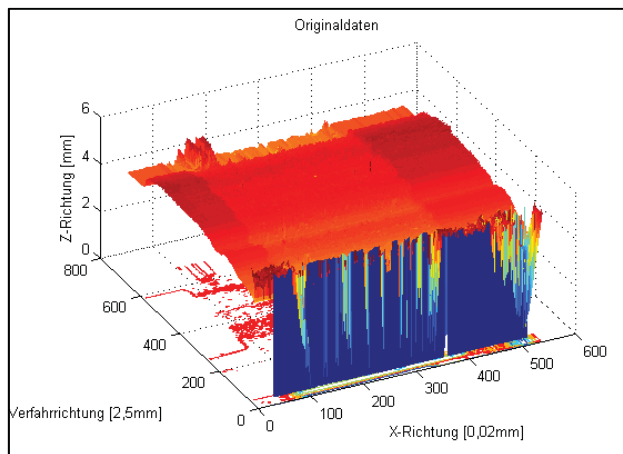
Die Ergebnisse der Untersuchungen ermöglichen die genaue Parametereinstellung zur Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Faserablage und eines stabilen und sicheren Prozesses.

## 5. ANALYSE

Die Variationen der unterschiedlichen Ablegeparametern riefen unterschiedlichste Effekte des Materials während des Ablegeprozesses hervor. Deren Auftreten wurde in Abschnitt 3 erläutert und beschrieben. Im Folgenden wird ermittelt, welchen Einfluss die verschiedenen Parametervariationen auf die beschriebenen Effekte haben.

Die Bewertung des Einflusses von Prozessparametern auf die Ablegequalität wurde zumeist durch die Messwerte des Laserlichtschnittsensoren ermöglicht. In einigen wenigen Fällen konnten bereits auftretende Fehler visuell festgestellt werden.

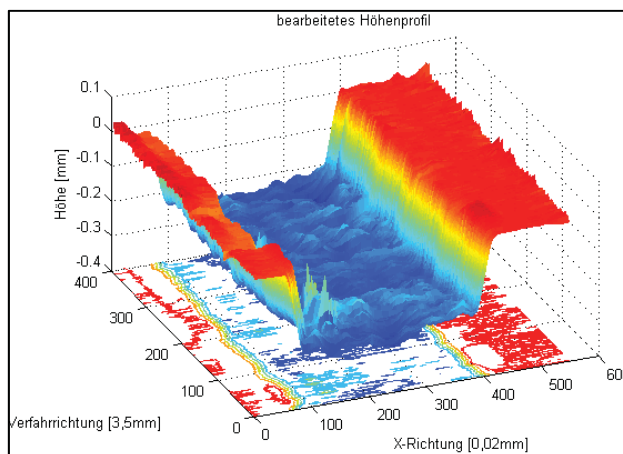
Zur Auswertung der mittels des Laserlichtschnittsensoren erfassten Höhenprofile wurde ein Matlab® Tool entwickelt.



**BILD 10: In Matlab® Tool importierte Originaldaten**

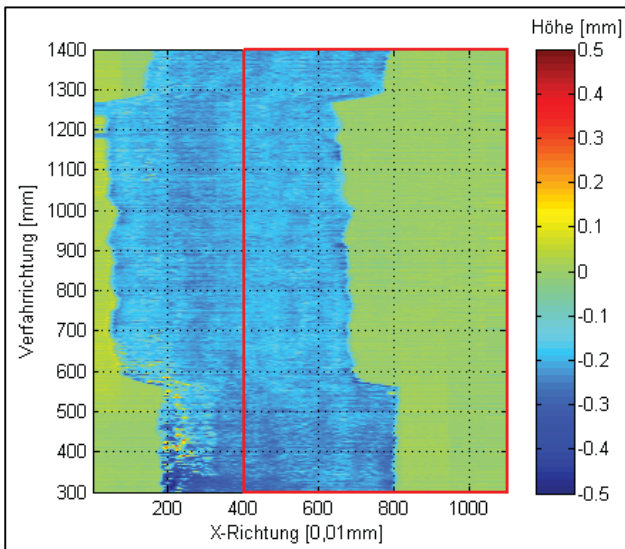
Zu Beginn der Auswertung wurden die Profilsignale interpoliert und anschließend durch einen Prefilter weiter verarbeitet (BILD 10).

Anschließend wurden alle Messreihen auf ein einheitliches Höhenniveau angepasst. Hierfür wurde die Ablegeplatte als Referenzuntergrund herangezogen. Die Referenzierung zum Ablegeuntergrund ermöglicht eine einfache Detektion von Ablöseeffekten des Tows.



**BILD 11: Bearbeitetes Höhenprofil zur weiteren Verarbeitung**

Die 3D-Daten wurden zur einfacheren visuellen Auswertung anschließend in einen 2D-Plot übertragen (BILD 12).



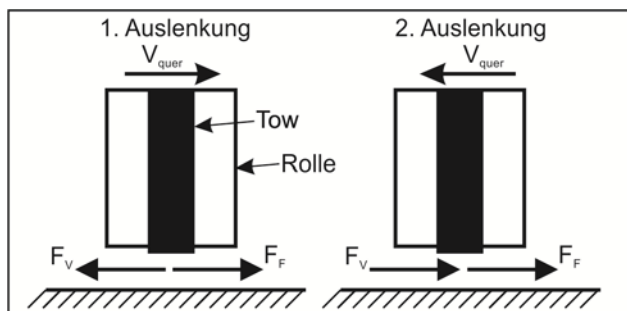
**BILD 12: 2D-Plot mit Auswertebereich (rot)**

Das BILD 12 zeigt außerdem den Datenbereich, der für die spätere Auswertung genutzt wurde und welcher stets eine Tow-Kante beinhaltet.

### 5.1. Relativbewegung zwischen Kompaktierungsrolle und Tow

In Abschnitt 3.4 wurde das wandern des Tows auf der Kompaktierungsrolle beschrieben. Die Ablegeeinheit ist so konstruiert, dass der Tow bis kurz vor Erreichen der Kompaktierungsrolle in Längsrichtung geführt wird. Auf der Kompaktierungsrolle selber findet keine Führung statt. Auf diesem nicht geführten Abschnitt von ca. 80mm wird der Tow somit durch den Offset kontinuierlich aus seiner Ausgangsposition auf der Kompaktierungsrolle gedrängt.

Durch den Offset treten am Tow am Ablegepunkt zwei Kräfte auf (BILD 13). Zum einen eine Kraft, die aufgrund des Offsets den Tow aus der Ausgangsposition drängt. Diese Kraft wirkt immer entgegengesetzt zur Offsetrichtung. Zum anderen hat der Tow durch die Nutenführung bis kurz vor der Kompaktierungsrolle immer wieder die Tendenz, sich zurück in die Ausgangsposition zu bewegen. Diese zweite Kraft entsteht, sobald der Tow aus der Ausgangslage bewegt wird und nimmt mit zunehmender Auslenkung des Tows aus der Ausgangslage ebenfalls zu. Die Auslenkung des Tows findet so lange statt bis sich ein Gleichgewicht zwischen den beiden Kräfte einstellt. Ist dies der Fall, kommt es zu einem Stopp der Relativbewegung zwischen Tow und Rolle.



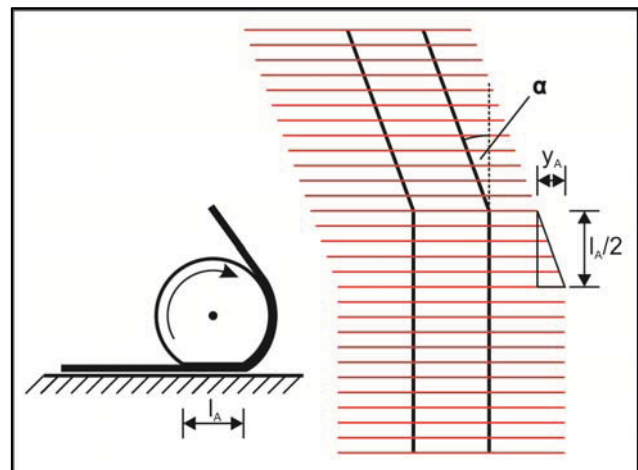
**BILD 13: Auf das Material wirkende Kräfte am Anfang und Ende einer Korrektur**

Bei der vorhandenen Versuchsstrecke, bei der der Offset immer über eine Länge von 700mm durchgeführt wurde, ist ein Einstellen des Gleichgewichtes zwischen den Kräften bis zum Ende des Offsets nicht zu erkennen. Bei einer Offsetstrecke, die weit über 700mm hinausgeht ist damit zu rechnen, dass dieser Effekt auftritt und  $x_{real}$  sich nicht weiter vergrößert.

Im dritten, unkorrigierten Bereich ist der Effekt der Relativbewegung zu erkennen. Allerdings ist dieser in diesem Bereich noch ausgeprägter als im korrigierten Bereich. Beim Übergang in den korrigierten Bereich wirken auf dem Tow die Kräfte  $F_V$  und  $F_F$  entgegengesetzt zueinander, wobei die Kraft  $F_V$  zunächst größer ist als  $F_F$ . Die resultierende Kraft auf, die auf den Tow wirkt, ist somit geringer ist als  $F_V$  und verursacht eine Auslenkung des Tows aus der Ausgangslage. Bei der zweiten Auslenkung vom korrigierten in den geraden Bereich kommt es zu einer Aufsummierung der Kräfte  $F_V$  und  $F_F$ , die den Tow wieder in die Ausgangslage verschieben. Die Richtungsänderung der Kraft  $F_V$  ist somit ein Grund für die stärkere Relativbewegung im korrigierten als im unkorrigierten Bereich.

### 5.2. Variation der Anpresskraft

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, ist die Andruckfläche von der Anpresskraft abhängig. Zu beachten ist hier, dass das erste Anpressen des Tows auf das Werkzeug nicht direkt über der Achse der Kompaktierungsrolle stattfindet, sondern um die Strecke  $l_A/2$  in Ablegerichtung versetzt ist (BILD 14). Somit bildet dieser Punkt auch den Beginn eines Offsets und nicht der Punkt über der Kompaktierungsachse. Dieser variiert dementsprechend mit der Anpresskraft (Abschnitt 3.2). Bei Korrekturoffsets ist unbedingt auf diesen Effekt zu achten, da sonst Start- und Endpunkte einer Korrektur nicht mit den definierten Positionen übereinstimmen.



**BILD 14: Einfluss der Nichtberücksichtigung des Kompaktierungspunktes auf das Bild des Laserlichtschnittscans**

In BILD 15 sind Laserlichtschnittscans der jeweiligen Towkante für die Anpresskräfte 10, 20, 30 und 40kg dargestellt. Eine Berücksichtigung der Andrucklänge  $l_A$  erfolgte allerdings noch nicht, wodurch der Offset des Sensors um die Strecke  $l_A/2$  vor dem eigentlichen Offsetbeginn des abgelegten Tows durchgeführt wurde. Die Folge ist eine Zunahme des Versatzes im Laserlichtschnittscan welches

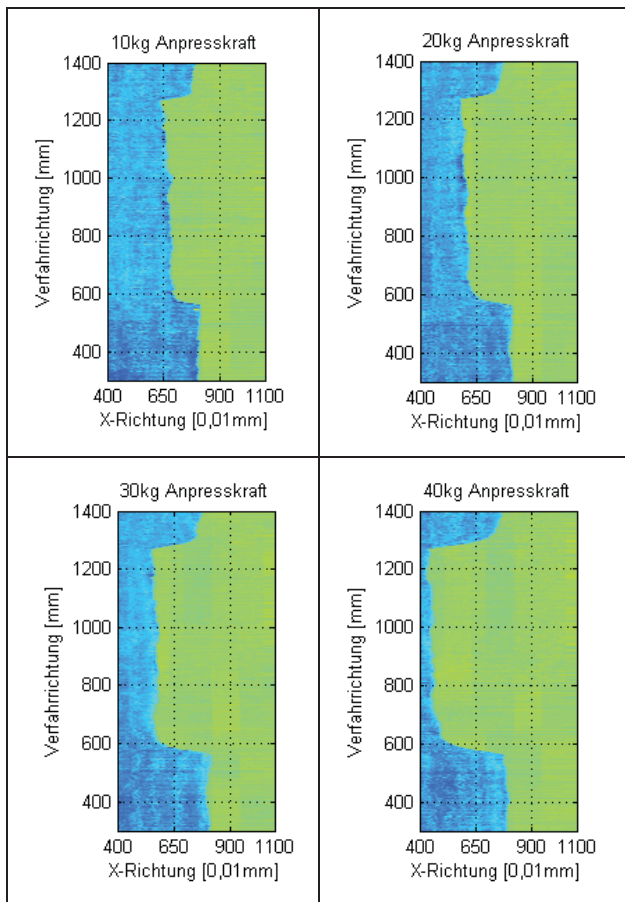
bei der Auswertung korrigiert werden muss, um nur den Einfluss der Anpresskraft darstellen zu können. Der durch die Nichtberücksichtigung von  $l_A$  entstandene Versatz  $y_A$  kann durch

$$y_A = \frac{l_A}{2} \cdot \tan(\alpha) \quad (1)$$

ermittelt werden. Der seitliche, nur durch die Anpresskraft verursachte Versatz  $y_F$  lässt sich somit folgendermaßen ermitteln:

$$y_F = \Delta y - y_A \quad (2)$$

$\Delta y$  entspricht dabei dem im Laserlichtschnittscan ermittelten unkorrigierten Versatz.



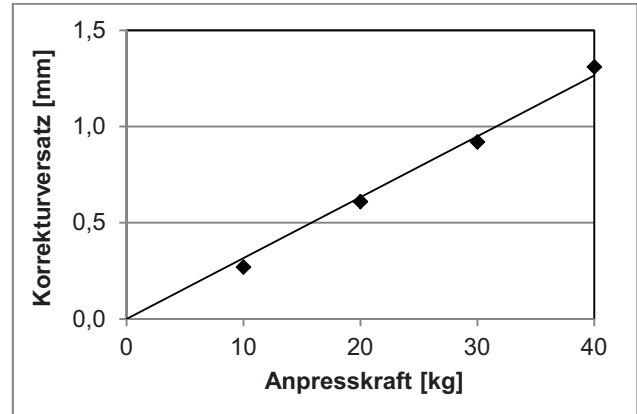
**BILD 15: Laserlichtschnittscan der Towkanten für unterschiedliche Anpresskraft**

BILD 16 stellt den um  $l_A/2$  korrigierten Versatz in Abhängigkeit der Anpresskraft dar. Es handelt sich dabei um eine lineare Abhängigkeit. Je höher die Anpresskraft ist, desto mehr versucht das Material, sich gegen den Offset zu wehren. Bis der Tow auch den von der Ablegeeinheit vorgegebenen Offset durchführt, vergeht somit eine längere Zeit als bei geringeren Anpresskräften. Die Folge ist ein größerer Versatz des Tows zwischen real und ideal abgelegter Bahn.

Ein Grund für die Zunahme des Offsets bei steigender Anpresskraft könnte in den unterschiedlichen Reibungsbeiwerten  $\mu_{WM}$  (Werkzeug-Material) und  $\mu_{MK}$  (Material-Kompaktierungsrolle) liegen. Nimmt die Anpresskraft zu, nehmen auch beide Reibkräfte zu, wobei  $F_{R,WM}$  aufgrund

des höheren Reibungsbeiwertes schneller zunimmt als  $F_{R,MK}$ . Durch die schneller zunehmende Reibkraft  $F_{R,WM}$  wird das Auslenken des Tows weiter erschwert. Ein höherer Versatz ist die Folge

Da es sich je nach Anpresskraft um einen Versatz weit über der anvisierten Genauigkeit von unter 0,1mm handelt, muss dies im Prozess unbedingt berücksichtigt werden. Dabei sind der Versatz und somit auch die Anpresskraft nach Möglichkeit immer konstant zu halten.



**BILD 16: Korrekturversatz in Abhängigkeit der Anpresskraft**

Bei Betrachtung des Korrekturbereiches ist der Effekt des langsamen Wanderns des Tows auf der Kompaktierungsrolle zu erkennen. Eine Tendenz in Abhängigkeit der Anpresskraft ist hier allerdings nicht zu erkennen (TAB 1).

**TAB 1: Wandern des Tows in Abhängigkeit der Anpresskraft**

Anpresskraft [kg]	10	20	30	40
Wandern des Tows nach 700mm Offset [mm]	0,55	0,5	0,44	0,72

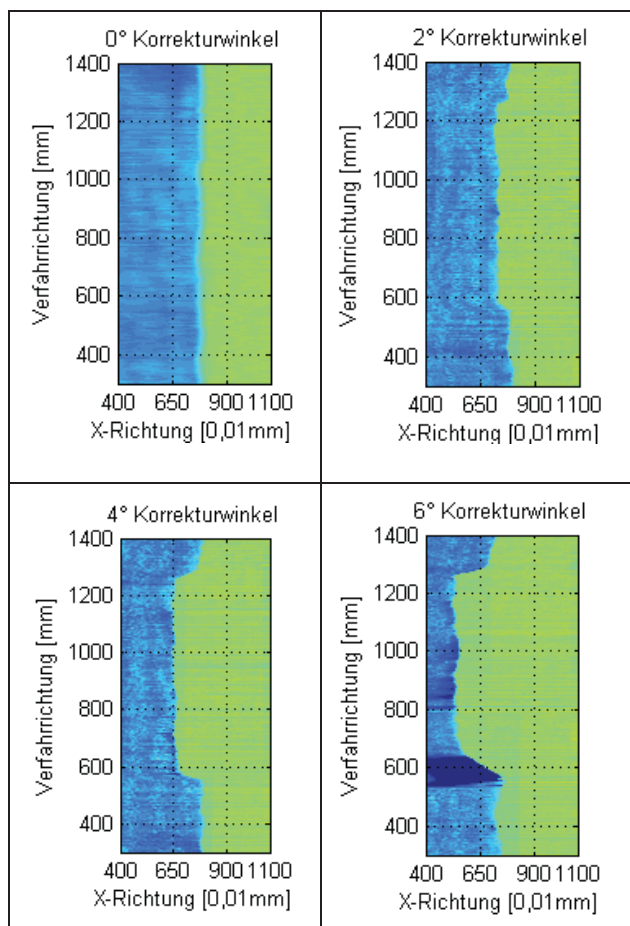
### 5.3. Variation des Korrekturwinkel

Unabhängig von der Qualität des abgelegten Materials hängt der maximal mögliche Offsetwinkel zunächst einmal vom Tack zwischen Werkzeugoberfläche und Material ab. Wenn das Material auf die Oberfläche mit einer definierten Druckkraft abgelegt wurde, hält der Tack das Material auf seine Position. Ist dieser nicht hoch genug, verursachen die seitlichen Kräfte auf das Material (Abschnitt 3.2) ein seitliches Rutschen, nachdem das Material bereits abgelegt wurde. In ersten Versuchen, als noch kein Tack Enhancer verwendet und das Material nicht ausreichend erwärmt wurde, konnte aus diesem Grund bereits ein Ablegen mit 4° Offsetwinkel nicht erfolgreich durchgeführt werden.

Durch erhöhen der Materialtemperatur und Verwendung eines Tackifiers konnte der Offsetwinkel auf 6° erhöht werden. In BILD 17 sind Laserlichtschnittscans einer Kante für Offsetwinkel 0°, 2°, 4° und 6° dargestellt. Hier ist allerdings wieder darauf zu achten, dass auch in diesem Fall der Versatz des Korrekturpunktes von Anpressrollenachse noch nicht berücksichtigt wurde. Berücksichtigt man diesen Effekt, ergeben sich die in BILD 18 dargestellten

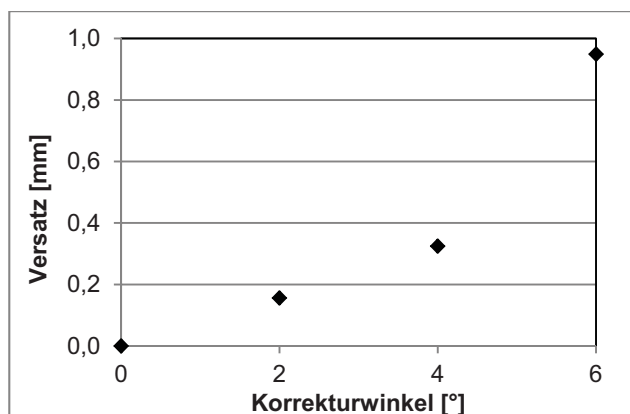


Versätze.



**BILD 17: Laserlichtschnittscan der Towkanten für unterschiedliche Korrekturwinkel**

Wie auch bei der Variation der Anpresskraft ist auch in diesem Fall ein Anwachsen des Versatzes mit steigendem Offsetwinkel zu erkennen. Dies liegt daran, dass bei geringem Offsetwinkel das Material diesen Winkel schneller erreicht. Andersherum benötigt das Material eine längere Zeit um den Offsetwinkel von 6° zu erreichen. Ein Größerer Versatz ist die Folge.



**BILD 18: Korrekturversatz in Abhängigkeit des Korrekturwinkel**

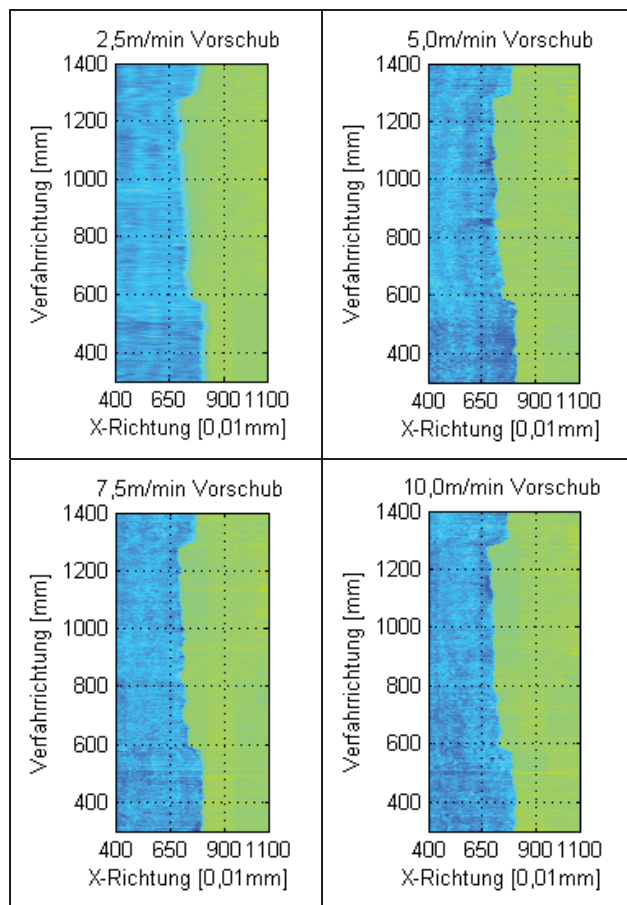
Weiterhin ist bei hohem Offsetwinkel auch eine Zunahme der Defekte an den Übergangstellen zu erkennen. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, erfolgen die Übergänge flie-

ßend. Das Tow wird in diesem Bereich gekrümmt. Je größer dabei der Offsetwinkel ist, desto kleiner wird der Krümmungsradius und umso mehr wird das Tow am Innenradius gestaucht und am Außenradius gestreckt, beziehungsweise es löst sich aufgrund der sehr geringen Dehnfähigkeit von der Werkzeugoberfläche. Während bei 4° Offset das Tow trotz Krümmung komplett auf die Werkzeugoberfläche angepresst werden kann, ist dies bei 6° nicht mehr der Fall.

**5.4. Variation der Geschwindigkeit**

Aufgrund der Anforderung nach einer möglichst hohen Produktivität gilt es vor allem die Ablegegeschwindigkeit soweit wie möglich zu steigern. Gleichzeitig sollte die Ablegequalität durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit nicht negativ beeinflusst werden.

In BILD 19 sind Laserlichtschnittscans der Towkanten für unterschiedliche Geschwindigkeiten dargestellt. Eine Abhängigkeit der Towverläufe ist dabei nicht zu erkennen. Sowohl die Versätze bei den Übergängen als auch das Wandern des Tows während der Korrektur bleiben bei zunehmender Geschwindigkeit konstant. Auch wenn für die durchgeführten Geschwindigkeiten keine Unterschiede zu erkennen sind, sollte dieser Parameter weiter untersucht werden, da die zu erwartenden Ablegegeschwindigkeiten im Bereich von 30 – 60m/min liegen werden. In diesen Geschwindigkeitsbereichen ist durchaus mit unterschiedlichem Materialverhalten zu rechnen.



**BILD 19: Laserlichtschnittscan der Towkanten für unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten**

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Durch aktive Bahnkorrekturen während eines Ablegeprozesses können Gaps und Überlappungen auf ein Minimum reduziert und die Bauteilqualität verglichen mit heutigen Fertigungstechnologien deutlich erhöht werden. Dies erfordert allerdings Auslenkungen des Materials normal zur Ablegerichtung in der Werkzeugebene. Dabei auftretende Effekte in Abhängigkeit verschiedener Ablegeparameter wie Anpresskraft, Korrekturwinkel oder Ablegegeschwindigkeit wurden hier untersucht.

Die von der Ablegeeinheit abrupten, vorgegebenen Auslenkungen können nicht ohne zeitliche Verzögerungen auf das Material übertragen werden. Dies führt dazu, dass am Anfang und Ende der Korrektur die reale abgelegte Bahn zur ideal abzulegenden Bahn seitlich versetzt ist. Der Versatz steigt sowohl mit zunehmender Anpresskraft als auch mit zunehmendem Korrekturwinkel. Da diese je nach Parametereinstellung bei über 1mm liegen können und somit weit außerhalb des Toleranzbereiches der Fertigungsrichtlinien, müssen sie im Korrekturprozess unbedingt berücksichtigt werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass das Tow während der Korrekturphase kontinuierlich auf der Kompaktierungsrolle wandert. Über eine Korrekturstrecke von 700mm betrug der Versatz je nach Parameter zwischen 0,44mm und 0,72mm, wobei keine klare Abhängigkeit von den Parametern zu erkennen ist. Für den Korrekturprozess gilt es zu untersuchen, ob dieser Effekt einen Einfluss darauf hat, da eine Korrektur mit großer Wahrscheinlichkeit bereits in der in den Versuchen beschriebenen Übergangsphase durchgeführt wird.

Eine Abhängigkeit des Ablegeprozesses von der Ablegegeschwindigkeit konnte für die durchgeführten Geschwindigkeiten von 2,5 bis 10 m/min nicht festgestellt werden.

## 7. AUSBLICK

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Verhalten des Materials während des Korrekturprozesses sehr stark von den Reibungseigenschaften zwischen Werkzeugoberfläche, Material und Kompaktierungsrolle abhängig ist. Für veränderte Reibungseigenschaften, beispielsweise durch Verwendung anderer Materialien oder Einsatz anderer Tack Enhancer sollten die Untersuchungen dementsprechend auch durchgeführt und aus diesen Ergebnissen eine Materialdatenbank erstellt werden.

Bisher wurde hier nur das Verhalten zwischen der Werkzeugoberfläche und der ersten Lage untersucht. Durch den höheren Tack zwischen zwei Materialschichten ist für die weiteren Lagen mit einem veränderten Materialverhalten während des Korrekturprozesses zu rechnen. Von daher ist dies ebenfalls zu untersuchen.

Da in GroFi eine Bahnkorrektur ebenfalls bei Tape-Legeeinheiten stattfindet, sollte auch für diese Materialarten das Korrekturverhalten untersucht werden.

Weiterhin gilt es, die ermittelten Erkenntnisse in den Korrekturalgorithmus der GroFi Anlage zu integrieren, da ohne Kenntnis über die verzögerten Reaktionen des Materials eine Bahnkorrektur im Bereich von 0,1mm nicht möglich wäre.

## LITERATUR

- [1] B. Morey, "Innovation Drives Composites Production," Manufacturing Engineering, 2009.
- [2] G. Marsh, "Automating aerospace composites production with fibre placement," Reinforced Plastics Volume 55, Issue 3, 2011.
- [3] R.J. Crossley, P.J. Schubel, N.A. Warrior, "The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness," Composites: Part A, 2012.
- [4] K. J. Ahn et al., "Deformation Parameters Influencing Prepreg Tack," SAMPE, 1992.
- [5] O. Dubois, J.-B. Le Cam, A. Béakou, "Experimental Analysis of Prepreg Tack," Experimental Mechanics, 2010.
- [6] D.O. Adams, M.W. Hyer, "Effects of Layer Waviness on the Compression Strength of Thermoplastic Composite Laminates," Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993.
- [7] D.H.-J.A. Lukaszewicz, C. Ward, K.D. Potter, "The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future," Composites: Part B, 2012.
- [8] M. Wiehn, R.D. Hale, "Low Cost Robotic Fabrication Methods for Tow Placement," SAMPE, 2002.
- [9] C. Krombholz et al., "Online Bahnkorrektur eines Industrieroboters mittels optischer Sensoren für den Einsatz im Fiber-Placement-Prozess," DLRK, 2011.
- [10] C. Krombholz et al. "Improving the Production Quality of the Advanced Automated Fiber Placement Process by Means of Online Path Correction," (Submitted) ICAS, 2012.