

ONLINE BAHNKORREKTUR EINES INDUSTRIEROBOTERS MITTELS OPTISCHER SENSOREN FÜR DEN EINSATZ IM FIBER-PLACEMENT-PROZESS

C. Krombholz, M. Bock, M. Perner, D. Röstermundt, Dr.-Ing. M. Meyer
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie
Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade, Deutschland

Zusammenfassung

Für die Qualitätssicherung im Advanced Automated Fiber Placement Verfahren (AFP) hergestellter Bauteile ist besonders für die Luft- und Raumfahrt eine kontinuierliche Erfassung der Faserkantenlage jeder abgelegten Bahn bezüglich ihrer Position in der Werkzeugebene zwingend erforderlich. Gelingt es zudem, die Faserkanten in „Echtzeit“ zu detektieren, auszuwerten und bei Abweichungen zur Sollkontur als Korrekturvektor der Bahnplanung des laufenden Fertigungsprozesses zur Verfügung zu stellen, ist eine Online-Bahnkorrektur möglich. Entsprechend dieser Zielstellung sind Sensorsysteme ausgewählt, untersucht und bewertet worden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst unter sehr ungünstigen Bedingungen eine Erfassung der Faserkantenlage relativ zum Tool Center Point (TCP) gelingt und dass das Sensorsystem die Voraussetzungen für ein echtzeitfähiges Bahnkorrekturverfahren für den FP-Prozess erfüllt.

1. EINFÜHRUNG

In der Flugzeugbauindustrie werden mit steigender Tendenz Strukturbauteile aus CFK eingesetzt. Ferner wird der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Großserie geplant. Hierzu ist ein Durchsatz an Faserverbundmaterial erforderlich, der auf Basis der derzeit verfügbaren Anlagentechnologie eine nicht zu realisierende Anzahl von neuen Fertigungsanlagen erfordert. Daher ist die Entwicklung einer neuen Anlagentechnologie für die automatisierte Herstellung von Großbauteilen für die Luftfahrtindustrie zwingend erforderlich. Hierbei sind die gegensätzlichen Anforderungen an die Qualität und die Quantität gleichzeitig zu erfüllen. Mit dem bisherigen Ausbau der Forschungsplattform „GroFi“ für AFP ist zunächst die Fertigung von hochwertigen Faserverbundwerkstoffen für z.B. Flügelschalen und Rumpfssegmenten mit einem Massendurchsatz von 150kg/h als realistisches Entwicklungsziel gesetzt. Dies ist gegenüber dem Stand der Technik eine Verzehnfachung der Produktivität einer Anlage. Diese Produktivitätssteigerung wird durch Skalierung der Anzahl gleichzeitig arbeitender Legeköpfe sowie einem intelligenten Anlagenlayout mit umlaufenden autarken Legeeinheiten (Industrierobotern) um ein Mehrfach-Formwerkzeug mit der Möglichkeit, Legeeinheiten ein- und auszukoppeln erzielt. Um jedoch für die Luftfahrt qualifizierte Bauteile herzustellen, ist neben der Erhöhung des reinen Massendurchsatzes die Qualität der Lamine im Vergleich zum Stand der Technik zumindest beizubehalten. Hierzu werden mit dem Ziel ein Online-QS-Verfahren in den Fertigungsprozess zu integrieren Sensorsysteme eingesetzt, die eine kontinuierliche Dokumentation der Faserablage (3D-Raumlage, Breite, Orientierung, Spaltmaße) ermöglichen und auf Grund ihrer Präzision und hohen Messraten eine Online-Einbindung in die Prozesssteuerung erlauben.

Für das Sensorsystem zur Erfassung der Faserlage (Raumlage, Orientierung, Spaltmaße) relativ zum Tool Center Point (TCP) wird im Folgenden die Systementscheidung für ein Laserlichtschnitt-System von der Spezifikation bis zum Leistungsnachweis dargelegt.

2. SENSORANFORDERUNGEN UND STAND DER TECHNIK

Die gewünschte Steigerung der Anlagenflexibilität und -produktivität durch den Einsatz mobiler Industrieroboter führt zu einer Verminderung der Absolutgenauigkeit aufgrund geringerer Anlagensteifigkeit. Diese verminderten Prozessgenauigkeiten gilt es mittels geeigneter Sensorik zu kompensieren.

2.1. Sensoranforderungen

Um diesen Prozessungenauigkeiten entgegenzuwirken und gleichzeitig eine Erhöhung der Bauteilqualität zu erreichen, setzt das ZLP in Stade in der Fiber Placement Technologie einen Sensor ein. Dieser Sensor ist ein vorlaufender Sensor, um die Kante einer bereits abgelegten Materialbahn zu detektieren. Diese gemessene Position soll nahezu in Echtzeit verarbeitet und bei Positionsabweichungen eine Online Bahnkorrektur eingeleitet werden. Mittels dieses Ansatzes können Überlappungen von Materialbahnbereichen und zu großen Spalten, sogenannten Gaps, vermieden und Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden.

Die Anforderungen an das Sensorsystem sind ausgehend von den Materialeigenschaften jedoch nicht trivial. Die aufgetragten Materialbahnen haben sowohl bei Anwendung der Fiber Placement als auch der Tape Laying Technologie eine Höhe von 125µm. Abhängig von Materialvorspannung, -qualität, -kompaktierungskraft und Art des Ablegeuntergrundes wird die Kantenkontur beeinflusst. Daher wird die reale Kante keinen rechtwinkligen Sprung aufweisen, sondern einen gekrümmten Übergang, welcher mittels geeigneter Algorithmen detektiert werden muss. Hinzu kommen zusätzliche Formabweichungen, wenn Faser-Material auf bereits abgelegtes, jedoch nicht ausgehärtetes, sogenanntes „nasses“ Material abgelegt wird. Aufgrund des nicht stabilen Untergrundes sind daher Abweichungen zu erwarten.

Darüber hinaus besitzt CFK einen hohen Lichtabsorptionsgrad, so dass bei optischen Sensorsystemen ein hoher

Lichteintrag gewährleistet werden muss. Die Höhe des notwendigen Lichteintrags ist bei Untersuchung dynamischer Objekte ebenso abhängig von deren Geschwindigkeiten. Der Sensor soll eine Kantendetektion bis Ablegegeschwindigkeiten von 1 m/s und eine Online Bahnkorrektur in Echtzeit ermöglichen.

Des Weiteren muss die Sensorik störkonturneutral sein, so dass der Ablegeprozess durch die Sensorik unbeeinflusst bleibt. Die Kantendetektion sollte berührungslos erfolgen, um das empfindliche Fasermaterial nicht zu beschädigen.

Die Spaltbreite zwischen zwei abgelegten Bahnen sollte $0,1\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$ betragen. Daraus abgeleitet muss das Sensorsystem die Faserkantenlage mit einer Genauigkeit von $50\mu\text{m}$ detektieren, um ein Online-Korrekturverfahren entwickeln zu können.

Im Folgenden wird eruiert, welche Messtechnik diesen Anforderungen gerecht wird und gleichzeitig eine stabile Prozessüberwachung ermöglicht.

2.2. Messprinzipien zur Kantendetektion

Geeignete Sensorsysteme zur prinzipiellen Kantendetektion und nachgeschalteter Bahnführung von Robotern können in optische und nicht-optische Sensorsysteme unterschieden werden [1].

Die nicht-optischen Sensoren messen berührungslos (kapazitiv, akustisch, pneumatisch, induktiv) oder taktil. Die berührungslosen nicht-optischen Verfahren besitzen jedoch eine schlechte laterale Auflösung und können darüber hinaus nicht für die geforderten Vorschubgeschwindigkeiten von 1 m/s eingesetzt werden [1].

Lediglich ein taktiler Messsystem kann die erforderlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit hinreichender Genauigkeit detektieren [1]. Von einer Beschädigung des bereits abgelegten, jedoch nicht ausgehärteten Materials durch den Messfühler ist auszugehen, so dass dieses Verfahren ebenfalls nicht den gestellten Anforderungen entspricht.

Der Einsatz optischer und damit auch berührungsloser Messverfahren ist somit erforderlich. Diese können in eindimensional messende (Fokussierung, Phasenmodulation, Laufzeitmessung, Triangulation, Interferometrie, Holographie), zweidimensional messende (scannende Interferometrie, Scan- und Lichtschnitt-Triangulation, Mikroskopie, Fokussierung) und dreidimensional messende (scannende Lichtschnitt-Triangulation, Interferometrie, Moiré-Prinzip, Fotogrammetrie) Verfahren unterteilt werden [1][2].

2.3. Laserlichtschnittverfahren

Für die Messaufgabe genügt ein zweidimensional messendes Sensorsystem, welches eine Kantenposition quer zur Verfahrerrichtung und in der Werkzeugnormalen liefert. Der Einsatz eines Lichtschnittverfahrens ist bei den gesetzten Aufgaben zweckmäßig. Sie besitzen eine hohe Genauigkeit, eine hohe verfügbare Lichtintensität und eine schnelle Bildrate. Darüber hinaus ist neben der Erfassung geometrischer Strukturen ebenfalls eine Graubildauswertung z.B. zur Fehlstellenerkennung verfügbar [1].

Das Messprinzip des Lichtschnittverfahrens beruht auf der Triangulation und ist in BILD 1 dargestellt.

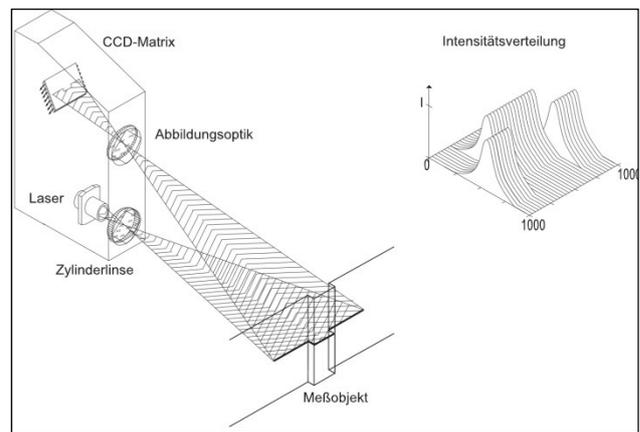


BILD 1. Messprinzip des Laserlichtschnittverfahrens zur Kantendetektion [2]

Ausgangspunkt ist eine geeignete Lichtquelle, die den erforderlichen Lichteintrag auf das Messobjekt ermöglicht. Diese Lichtquelle ist zumeist ein roter Halbleiterlaser mit Wellenlängen von 640 bis 670nm. Der ausgehende Lichtstrahl wird daraufhin durch eine geeignete Zylinderlinse, holographische Projektion oder einen rotierenden Polygonspiegel zu einem Lichtschnitt geringer Dicke aufgeweitet [2].

Die vom Messobjekt ausgehende Lichtreflexion wird unter einem Triangulationswinkel mittels eines optischen Sensors, zumeist eines CCD-Sensors, erfasst und unter Zuhilfenahme geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet. Durch das aufgenommene Intensitäts- und Höhenprofil in der Lichtschnittebene können Aussagen zu Kanten, Fasen oder Kerben im Messobjekt getätigt werden.

2.4. Einsatz optischer Sensoren in Prozessüberwachung

Die Einsatzgebiete des Laserlichtschnittverfahrens in prozessüberwachenden Systemen sind vielfältig. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit, Prozessgeschwindigkeit und Robustheit sind Laserlichtschnittsensoren in der Automatisierungstechnik bereits Stand der Technik.

Sie werden unter anderem zur Vermessung der Stoßgeometrie beim sensorgeführten Lichtbogen- und Schutzgasschweißen eingesetzt, um darauf aufbauend die Prozessparameter wie Schweißgeschwindigkeit, -spannung, -strom und die Fördergeschwindigkeit des Schweißdrahtes anpassen zu können [1]. Darüber hinaus werden Laserlichtschnittsensoren zur Detektion der Fügespaltweite beim Laserstrahlschweißen eingesetzt. Neben dem Einsatz der Lichtschnittsensoren als vorlaufendes Prozesssensorsystem können mit diesem Verfahren in der Schweißtechnik ebenfalls qualitätsbeschreibende Merkmale der Schweißnaht mittels einer nachlaufenden Ausrichtung ermittelt werden [1][3].

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Vermessung von Platinen. Hierbei wird das Messobjekt mit den aufgelöteten Einzelkomponenten durch einen Laserlichtschnittsensor 2D vermessen und anschließend durch die Relativbewegung 3D-Informationen erstellt, um daraus qualitäts-sichernde Merkmale wie Existenz, geometrische Konturtreue und Position der Einzelkomponenten zu gewinnen.

Des Weiteren finden Laserlichtschnittsensoren im Karosseriebau ihren Einsatz. Hier dienen sie der Vermessung von Türspalten.

2.5. Bahnkorrektur bei Robotern

In [4] wurde erläutert, inwieweit die Bahntreue eines Industrieroboters durch den Einsatz von optischen Sensoren trotz Toleranzen eines Fertigungsablaufes gewährleistet werden kann. Dazu wurde ein Laserlichtschnittsensor an die Hand eines Industrieroboters angebracht. Der Produktionsprozess wurde in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt werden Messdaten aufgezeichnet, die die Abweichungen der tatsächlichen Bahn von der Sollbahn dokumentieren. Gründe für die Abweichungen sind die konstruktionsbedingten Positioniergrenzen des Industrieroboters und Fehlausrichtungen von Bauteilen. Nach der Korrekturrechnung erfolgt der zweite Schritt, in dem der Roboter die Bewegungen bzw. Aufgaben anhand der zuvor berechneten Korrekturen ausführt. Als Vorteil dieser Strategie wurde die Unabhängigkeit der Messung und Ausführung zueinander genannt. Dennoch wurde darauf hingewiesen, dass im Falle von anspruchsvollen Toleranzen eine Online-Strategie vielversprechender ist. Zu diesem Schluss findet ebenso [5]. Ziel der Arbeit in [5] ist die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Fräsbahn zu verringern. Dazu werden statische und dynamische Wechselwirkungen zwischen dem Roboter und dem Fräsvorgang analysiert. Statische Abweichungen werden durch Simulation und Korrektur des Fräsprogrammes signifikant reduziert, wohingegen für die Kompensation von dynamischen Vorgängen eine Zusatzsensorik am TCP empfohlen wird, welche tatsächliche Bahnwerte an die Steuerung bzw. Auswertelogik übergibt. Im folgenden Kapitel werden die Versuchsanordnung und -methodik zur Qualifikation des Sensortyps für den erfolgreichen Einsatz im Fiber Placement-Prozess vorgestellt. Im Wesentlichen wird hierbei auf die Anforderungen zur Detektion einer CFK-Kante eingegangen.

3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Zur Optimierung des Anlagendurchsatzes, wurden an Fiber Placement Köpfen Laserlichtschnittsensoren angebracht. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Triangulation. Dadurch können selbst bei geringen Materialhöhen von 125µm Kanten sicher detektiert werden. Durch den geringen Reflexionsanteil der schwarzen Oberfläche stellt CFK für optische Messsysteme eine Herausforderung dar.

Die Untersuchungen der Online Bahnkorrektur wurden an der Wickelanlage des DLR in Braunschweig durchgeführt. Die Wickelanlage des DLR in Braunschweig funktioniert nach dem Drehbankprinzip. Die Anlage setzt sich aus einer Einspannvorrichtung für den Wickelkern und einem verfahrbaren Führungswagen zusammen. Der Führungswagen verläuft parallel zur Rotationsachse des Wickelkörpers auf einer Linearachse. Angesteuert wird die Anlage von einer Siemens 840D-SL.

Zwei Sensorsysteme wurden untersucht:

- Sensortyp 1 mit einer Laserklasse 3R, einer Wellenlänge von $\lambda=660\text{nm}$ und einer Leistung von $P=22\text{mW}$
- Sensortyp 2 der Laserklasse 2, einer Wellenlänge $\lambda=650\text{nm}$ und einer Leistung von $P=0,95\text{mW}$

Die Untersuchung bestand aus drei Abschnitten.

- Bestimmung des idealen Sichtwinkelbereichs
- Detektion CFK-Kante auf Aluminiumkern
- Detektion CFK-Kante auf CFK-Untergrund

3.1. Sichtwinkel

Der Einsatz lichtreflektierender Messverfahren zur Untersuchung kohlenstofffaserverstärkter Bauteile ist aufgrund guter Absorptionseigenschaften des Materials stets mit großen Abhängigkeiten zwischen Einstrahl- und Sichtwinkel verbunden. Darüber hinaus spielt der Triangulationswinkel zwischen Laserlichtschnitt und Sensorsichtwinkel eine entscheidende Rolle bei der gemessenen Intensität aber auch dem messbaren Höhenprofil.

Der Triangulationswinkel zwischen Laserlichtschnitt und Sensorsichtwinkel ist bei beiden Sensortypen aufgrund derer Bauart konstant:

- Sensortyp 1: $\alpha_{Triang_Sensor1} = 45^\circ$
- Sensortyp 2: $\alpha_{Triang_Sensor2} = 50^\circ$

Aufgrund der konstanten Triangulationswinkel beider Sensoren besteht lediglich eine Abhängigkeit der relativen Intensität von:

- Art der Oberfläche
- Einstrahlwinkel des Laserlichtschnitts

Zur Ermittlung des optimalen Einstrahlwinkels bei unterschiedlichen Materialien wurde ein Teststand aufgebaut. Dabei wurden die Messreihen lediglich mit dem Sensor 1 durchgeführt, da das relative Maximum der Intensität von Interesse war, der Sensor 1 eine höhere Ausgangsleistung besitzt, der Triangulationswinkel von Sensor 1 und 2 nahezu identisch ist und die Auswertelogik bereits eine durchschnittliche Intensität jeder Messaufnahme ermittelt.

Die Einflussbestimmung unterschiedlicher Materialarten wurde an einem Trockenfasergewebe und einem -gelege durchgeführt. Diese wurden horizontal positioniert und anschließend der Einstrahlwinkel in den Schritten 90° , 80° , 70° , 60° und 50° variiert. An jeder Winkelstellung wurden 10 Messpunkte an unterschiedlichen Materialpositionen aufgezeichnet. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Laserlichtschnitt bei allen Variationen lediglich CFK-Bereiche und keine Hilfsfäden (Schuss- oder Kettfäden) anderen Materials und somit anderem Absorptions- bzw. Reflexionsgrad trifft.

3.2. Detektion CFK-Kante auf Aluminiumkern

Der Versuchsaufbau zur Detektion einer CFK-Kante auf einem Aluminiumwickelkörper ist in BILD 2 dargestellt.

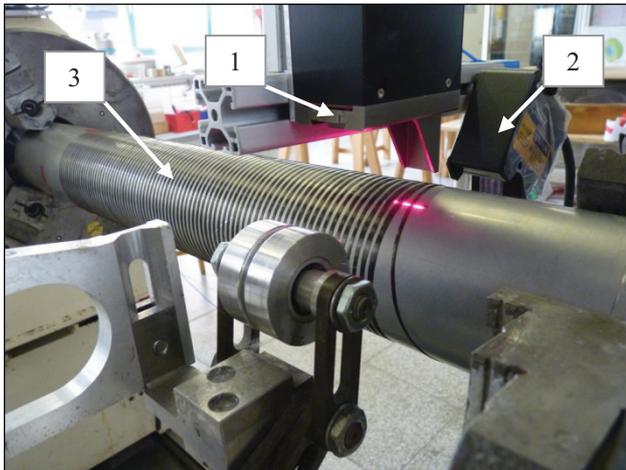


BILD 2. Versuchsaufbau mit Sensortyp 1 (1), Sensortyp 2 (2), gerichtet auf Wickelkörper mit Fasermaterial (3)

Zu erkennen sind beide Sensorsysteme. Die Sensoren wurden an der Wickelanlage unter Berücksichtigung des ermittelten optimalen Sichtwinkels von 70° angebracht (siehe Abschnitt 4.1).

Für die ersten Versuchsreihen wurde Fasermaterial auf einem Aluminiumwickelkörper mit einem Durchmesser von 90mm auf einer Strecke von 400mm gewickelt. Die CFK Rovings bestehen aus 6.000 Einzelfilamenten und haben aufgewickelt auf dem Kern eine Breite von 3mm. Der Gap zwischen den einzelnen Faserrovings beträgt 2,5mm. Die Wiederholgenauigkeit der Wickelanlage beträgt 0,1mm.

Anschließend wurde das Wickelprogramm genutzt, um die bereits abgelegte Materialbahn unter Verwendung gleichbleibender Prozessparameter mit den beiden Lichtschnittsensoren zu vermessen. Auf dem Werkstück wurden Höhenmarkierungen angebracht, um eine Synchronisation der Messwertreihen zu ermöglichen. Innerhalb dieses Messfensters wurde die Anlage bei jedem Zyklus mit einer konstanten Geschwindigkeit von 21,3m/min verfahren.

3.3. Detektion CFK-Kante auf CFK-Untergrund

Für eine praxisnahe Untersuchung wurde für die zweite Versuchsreihe die Detektion der Kante auf bereits abgelegtem CFK-Untergrund durchgeführt. Hierfür wurde eine deckende Ringwicklung aus CFK- Rovings über den Messbereich auf den Aluminiumkörper gewickelt. Hierauf wurde die gleiche Wicklung wie im vorherigen Prozess aufgebracht (Gap-Breite = 2,5mm).

Anschließend wurde die Detektion von CFK-Rovings mit Gaps auf der deckenden CFK-Schicht untersucht. Der stark lichtabsorbierende Untergrund erschwert die Detektion der Kante um ein Vielfaches. Im Anschluss durchliefen die Sensoren mehrfach das Testprogramm mit gleichen Parametern wie die Versuchsreihen CFK auf Aluminiumkern.

4. ANALYSE

In diesem Kapitel werden die Daten aus den experimentellen Untersuchungen analysiert. Zunächst wird der Versuch zum Sichtwinkel des Laserlichtschnittsensors ausgewertet. Ausgehend von diesem Ergebnis werden die beiden

Sensoren für die Detektion der Faserkante zum Einen auf dem Aluminiumwickelkörper und zum Anderen auf bereits gelegtem CFK-Material justiert.

Im Abschnitt 4.2 und 4.3 werden die Daten der Sensoren zur Kantendetektion analysiert. Es wurden zu den beiden Paarungen CFK auf metallischem Untergrund und CFK auf CFK-Lage jeweils zehn Messwertreihen aufgezeichnet. Aufgrund der händischen Start- und Stoppausführung zum Speichern der Daten müssen diese auf die identische Messzeit und beobachtete Topologie synchronisiert werden. Dazu wurden wie beschrieben eine Start- und eine Endmarke auf den Wickelkörper aufgebracht. Parallel zum Signal der Kantenposition im Sichtfeld des Lasers wurde zeitsynchron die Höhe der Kante aufgezeichnet. Durch den signifikanten Höhenunterschied aufgrund dieser Marker lassen sich die Datensätze automatisiert und zuverlässig zueinander synchronisieren.

Anhand dieser Messreihen soll auf die Verlässlichkeit der untersuchten Sensortypen geschlossen werden. Diese wichtige Eigenschaft eines Sensors soll anhand der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse überprüft werden. Das grundsätzliche Vorgehen zur Aufbereitung der Messreihen bei dieser Analyse ist in BILD 3 bis BILD 6 verdeutlicht. Zunächst wird in Schritt 1 der Messvektor aus dem sensortypischen Datenformat extrahiert. Im Schritt 2 erfolgt die Erkennung der Markerpositionen anhand der Maxima der Höhenlinie, wonach im Schritt 3 die Rohdaten entsprechend gekürzt werden. Durch die zuverlässige Erkennung und Identifizierung der Höhenmaxima ist sichergestellt, dass für die weitere Korrelationsanalyse alle Datensätze die identische Topologie beschreiben. Schließlich werden die Daten im Schritt 4 (BILD 6) vom statischen Offset bereinigt und die mittelwertfreien Signale werden für die Analysen genutzt.

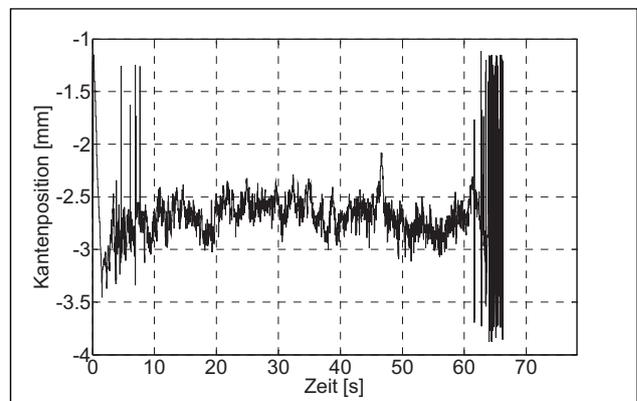


BILD 3. Schritt 1 - Unbearbeitete Messdatei

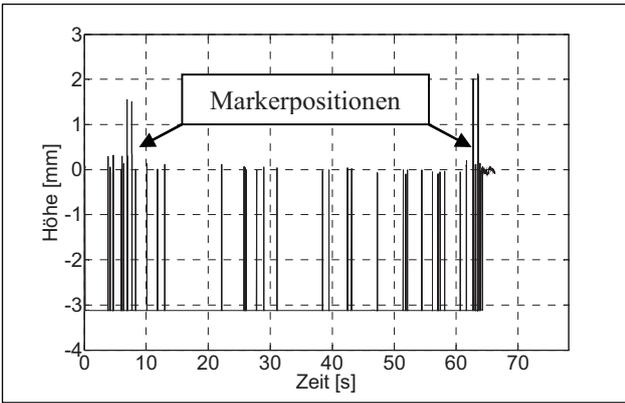


BILD 4. Schritt 2 - Höhenkennlinie mit Erkennung der Markerpositionen

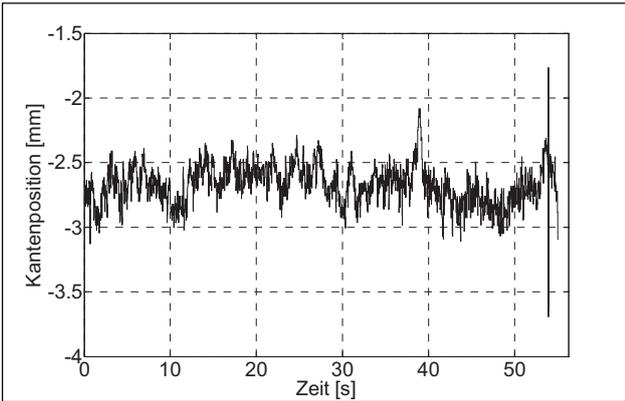


BILD 5. Schritt 3 - Messsignal nach Korrektur gemäß Markierungen auf Wickelkörper

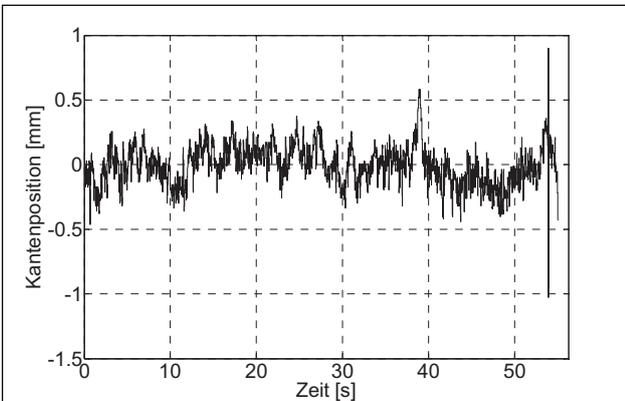


BILD 6. Schritt 4 - Mittelwertfreies Messsignal für Korrelationsanalysen

Die Analysen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der erhaltenen Messergebnisse beruhen zum Einen auf Korrelationsanalysen und zum Anderen auf statistischen Kennzahlen.

Zum Vergleich der Signalverläufe wird deren Ähnlichkeit zueinander anhand der Kreuzkorrelation ermittelt. Jede der zehn Messreihen wird miteinander verglichen, sodass sich eine Vergleichsmatrix mit einer Größe von 10 x 10 Werten ergibt. Dabei wird der Maximalwert x bei einer Verschiebung y von Signal A zu Signal B im Matrixfeld hinterlegt. Eine Darstellung gemäß einer definierten Grauwertskala ermöglicht eine intuitive Beurteilung über der Ähnlichkeit der korrigierten Messreihen. Zur weiteren

Beurteilung wird aus der Vergleichsmatrix der mittlere Korrelationskoeffizient von Messreihe x zu allen weiteren Messreihen gebildet.

4.1. Sichtwinkel

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Ermittlung des optimalen Lasereinstrahlwinkels bzw. des Winkelbereiches auf kohlenstoffaserverstärktem Probenmaterial, der eine ausreichend hohe Messintensität auf dem optischen Sensor ermöglicht.

Zur Vermeidung halbzeugspezifischer Kennwerte wurden Messungen an zwei unterschiedlichen Faserhalbzeugen durchgeführt – einem Gewebe mit Atlasbindung von ECC Cramer und einem 0/90° Multiaxialgelege von Saertex.

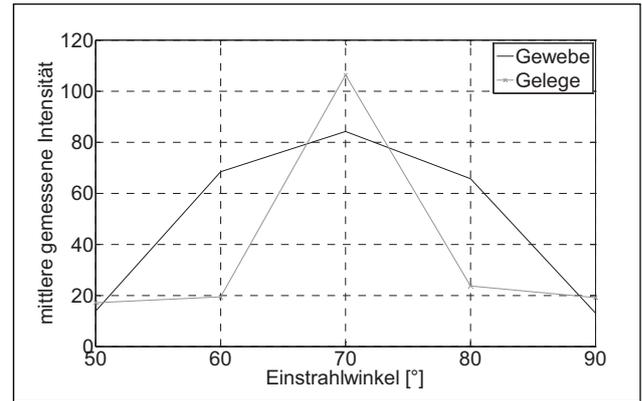


BILD 7. Darstellung der mittleren Intensität in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel des Lichts

Für jede Winkelposition wurden 10 Messwerte aufgezeichnet, deren Mittelwerte in BILD 7 abgebildet sind.

Zum Einen ist ersichtlich, dass sowohl für die Intensitätsmessung auf dem Gelege als auch auf dem Gewebe ein Maximalwert bei ca. 70° vorliegt. Dieser Wert entspricht in guter Näherung dem Kippen des Laserlichtschnitts um den halben Triangulationswinkel. Dies ist plausibel und untermauert die Eingangsvermutung eines Intensitätsmaximums, wenn der Einstrahlwinkel gleich dem Sichtwinkel entspricht.

Zum Anderen kann diesen Daten eine Abhängigkeit der zurückgestreuten Intensität über einen Winkelbereich entnommen werden. So ist ersichtlich, dass beim Gewebe ein deutlich größerer Bereich über eine relativ hohe Intensität verfügt. Dieser Zusammenhang ist in TAB 1 durch den Intensitätsverlust nochmals verdeutlicht.

Halbzeug	Max. Intensität bei 70±10°	Min. Intensität bei 70±10°	Intensitätsverlust bei 70±10°
Gelege	106.3	19.4	81.7 %
Gewebe	84.2	65.7	22.0 %

TAB 1. Berechnung des Intensitätsverlustes bei Winkelabweichung von ±10° vom optimalen Einstrahlwinkel 70°

Es zeigt sich aus TAB 1, dass der Messbereich hoher Intensitäten bei Gelegen deutlich schmalbandiger ist. Grund hierfür könnte sein, dass bei Geweben durch die

größere Faserondulation eine unregelmäßigere Oberflächenstruktur entsteht, die dazu führt, dass mehr diffuses Licht zurückgestreut wird. Dadurch erklärt sich ebenfalls die geringere Maximalintensität von Gewebe im Vergleich zu den Messungen mit Gelege.

Außerdem ist zu betonen, dass die Messungen mit einem Trockenfasermaterial durchgeführt wurden. Bei Einsatz von Prepreg-Materialien, d.h. mit Harz vorimprägnierten Materialien, ist von abweichenden Intensitäten auszugehen. Begründet ist dies in den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Harzsysteme.

Abschließend ist festzustellen, dass ein angewandter Lichteinstrahlwinkel von 70° zu sehr guten Intensitätsverteilungen führt, jedoch während den einzelnen Messungen nicht variiert werden sollte.

In den folgenden Versuchen wurden Lichteinstrahlwinkel von 70° angewandt.

4.2. CFK-Kante auf Aluminiumkern

Kontrolliert man die detektierte Kante auf dem metallischen Wickelkörper, so wird mit einem Korrelationskoeffizienten von über 90% stets eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei beiden Sensortypen erreicht. Zu beachten ist jedoch, dass die Korrelationsergebnisse bei Sensortyp 1 von mindestens 98,68% und höchstens 99,00% stets besser sind als bei Sensortyp 2 mit mindestens 91,78% und höchstens 93,44%. Diese mittleren Korrelationskoeffizienten aus den Messreihen sind in TAB 2 sowie zur Veranschaulichung in Abbildung BILD 8 und BILD 9 dargestellt.

Messsignal X	Mittl. Korrelationskoeffizient [%] (CFK/Alu)	
	Sensortyp 1	Sensortyp 2
1	98,94	91,78
2	99,00	92,85
3	98,81	91,42
4	98,90	93,23
5	98,87	93,35
6	98,91	93,44
7	98,92	92,03
8	98,96	92,10
9	98,93	92,78
10	98,68	93,30

TAB 2. Mittlerer Korrelationskoeffizient der Messreihe X zu allen weiteren Messreihen unterschieden nach Sensortyp A und B

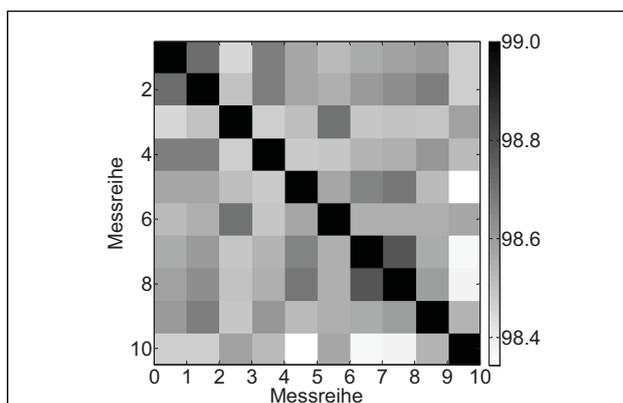


BILD 8. Sensortyp 1: Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den Messreihen [%] (CFK/Wickelkörper)

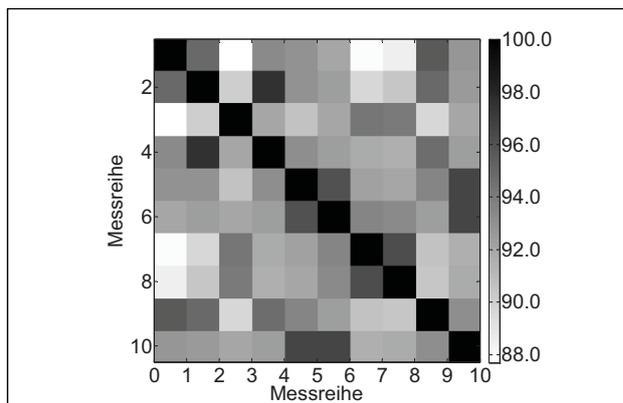


BILD 9. Sensortyp 2: Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den Messreihen [%] (CFK/Wickelkörper)

4.3. CFK-Kante auf CFK-Untergrund

Die Fotografie in BILD 10 zusammen mit den Korrelationsanalysen von Sensortyp 1 (BILD 11) und Typ 2 (BILD 12) zeigen die Aufgabenkomplexität, die abgelegte Kante des CFK-Materials auf den bereits gelegten CFK-Lagen zu detektieren. In dieser Aufgabe zeigen sich deutlich die Leistungsgrenzen der beiden Sensortypen auf. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der höherklassige Sensortyp 1 mit einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von rund 74% gegenüber der Reproduzierbarkeit von nur rund 30% von Sensortyp 2 zur Detektion der Faserkante deutlich besser geeignet erscheint. Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Verfolgung der Kante ist die Robustheit des Algorithmus zur Berechnung. Der Sensortyp 2 konnte in diesem Versuch nicht automatisch die Faserkante detektieren. Hier wurde vom Benutzer eine Höhenlinie eingefügt, deren Schnittpunkt als Faserkante angenommen wurde. Der Algorithmus des Sensortyp 1 war robuster und konnte auch bei diesen schlechteren Bedingungen eine automatische Kantendetektion durchführen. Des Weiteren wird mit dem Protokollieren der Y-Koordinaten der beiden wesentlichen Höhenunterschiede ein Kantenindikator berechnet, der eine Abschätzung der Güte der Messung ermöglicht. Die wesentliche Funktionsweise der beiden Kantenalgorithmen wird in Abschnitt 4.4 erläutert. Alle optimalen Parameter beider Sensortypen zur Ermittlung einer Kante wurden im Rahmen von Voruntersuchungen identifiziert und entsprechend aktualisiert.

Messsignal X	Mittl. Korrelationskoeffizient [%] (CFK/CFK)	
	Sensortyp 1	Sensortyp 2
1	73,80	31,89
2	75,04	27,81
3	75,17	32,08
4	74,80	24,64
5	73,83	25,64
6	75,36	27,32
7	75,18	29,96
8	74,98	23,75
9	74,17	34,64
10	73,51	24,42

TAB 1. Mittlerer Korrelationskoeffizient der korrigierten Messreihe X zu allen weiteren Messreihen unterschieden nach Sensortyp 1 und 2



BILD 10. Detaildarstellung der zu detektierenden CFK-Bahn auf bereits gelegtem CFK-Material

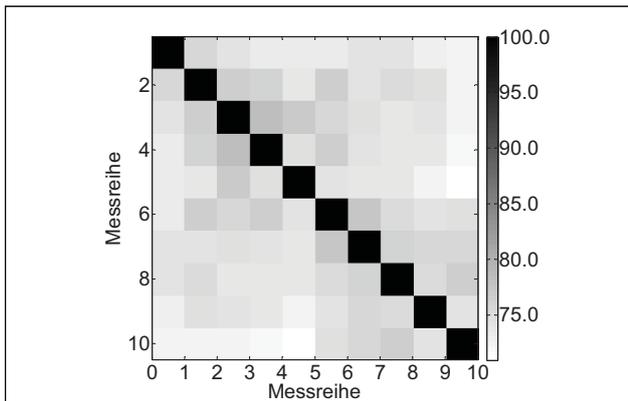


BILD 11. Sensortyp 1: Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den Messreihen [%] (CFK/CFK)

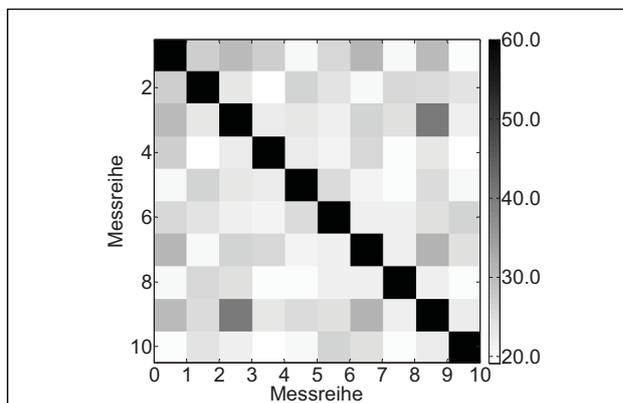


BILD 12. Sensortyp 2: Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den Messreihen [%] (CFK/CFK)

4.4. Sensorvergleich

Für eine direkte Gegenüberstellung der beiden Typenmessreihen ist demnach eine Anpassung der beiden Abtastfrequenzen auf eine einheitliche Datenrate notwendig. Darüber hinaus wird ein digitales Tiefpassfilter ausgelegt, welches bei 15Hz seine Eckfrequenz besitzt. Aus den jeweils zehn Messreihen wird eine repräsentative Mittelwertreihe für jeden Sensortyp gebildet und miteinander verglichen. Diese Vorgehensweise wird für einen Vergleich der Sensorsignale bei der Identifizierung der Bahnkante von CFK auf dem Wickelkörper (CFK/Alu) und der CFK-Bahnkante auf bereits abgelegtem CFK-Material (CFK/CFK) durchgeführt. Im Fall CFK/Alu besitzen die beiden Mittelwertreihen einen maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0.8309, wonach sie mit rund 83% eine befriedigende Ähnlichkeit aufweisen. Um die Unterschiede zwischen den beiden Mittelwertreihen zu verdeutlichen, ist in BILD 14 die Differenz zwischen den beiden Mittelwertreihen dargestellt. Des Weiteren ist die Standardabweichung der einzelnen Messreihen zur Mittelwertreihe von Sensortyp 1 und 2 aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichung bei Sensortyp 1 mit durchschnittlich 4,1µm gegenüber 31,1µm bei Sensortyp 2 deutlich geringer ist. Auffällig ist, dass bei steigender Differenz der Mittelwerte, die Standardabweichung von Sensortyp 2 steigt. Der Grund hierfür könnten Materialfehler bzw. Messstellen sein, an denen das Material den Wickelkörper nicht eindeutig abdeckt. Die Anforderungen steigen demnach zum Einen an die Leistung des Sensors und zum Anderen an die Auswertelogik zur Detektion der Kante. Schließlich existieren Punkte, an denen die Standardabweichung von Sensortyp 2 auf das konstant niedrige Niveau von Sensortyp 1 heranreicht.

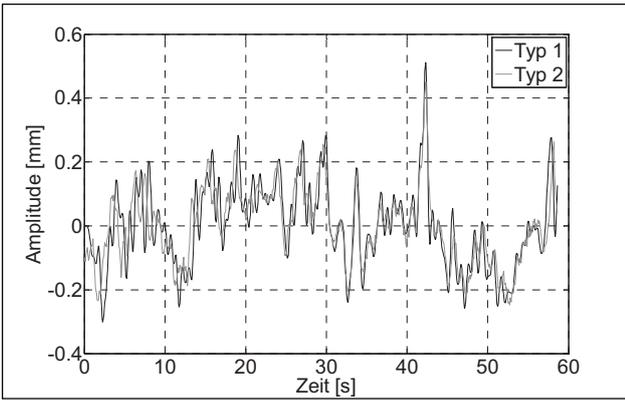


BILD 13. Mittelwertreihe aus zehn Messungen von Sensortyp 1 und 2 (CFK/Alu) nach angepasster Abtastfrequenz

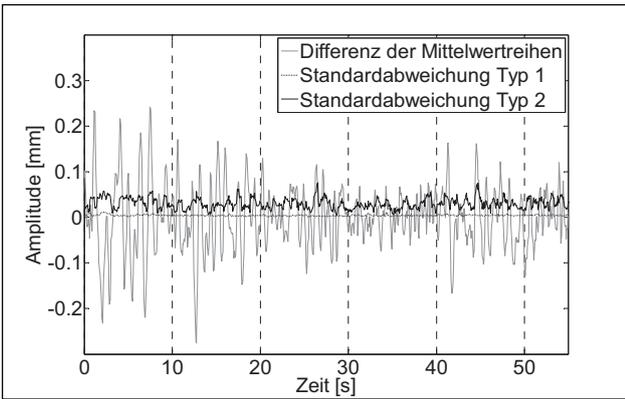


BILD 14. Differenz zwischen den Mittelwertreihen von Sensortyp 1 zu 2 (CFK/Alu) und die Standardabweichung der Einzelreihen zur Mittelwertreihe

Bei der Dokumentation der Kante auf bereits gelegtem CFK-Material zeigen die Ergebnisse deutliche Unterschiede auf. Die beiden Mittelwertreihen besitzen mit einem maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten von 15,29% eine äußerst geringe Ähnlichkeit. Die Messergebnisse zeigen die Komplexität der Messaufgabe. Durch Störeinflüsse wie zusätzliche Reflexionen von CFK-Lagen und Materialfehler steigen die durchschnittlichen Standardabweichungen zur Mittelwertreihe auf $28,3\mu\text{m}$ bei Sensortyp 1 und auf $66,7\mu\text{m}$ bei Sensortyp 2. Die zuverlässige Detektion der Kante ist fehlerbehaftet, lässt jedoch die Feststellung zu, dass die Messergebnisse von Sensortyp 1 eine höhere Reproduzierbarkeit aufweisen bei der Detektion einer CFK-Bahn sowohl auf dem Aluminiumwickelkörper, als auch auf bereits gelegtem CFK-Material.

Zudem erlaubt Sensortyp 1 bereits eine integrierte Kantengüteberechnung. Als Faktoren werden u.a. die Y-Koordinaten zum wesentlichen Höhenunterschied bei der detektierten Kante und die zurückgestrahlte Lichtintensität genutzt. Beispielhaft soll hier die Breite der Kante, repräsentiert durch den Abstand des oberen zum unteren Kantenspektrums analysiert werden. Dazu sind in BILD 16 und BILD 17 die Mittelreihe der Kantendifferenzen mit Standardabweichung angegeben. Es wird deutlich, dass die Breite der Kante bei CFK/CFK deutlich geringer ist als bei CFK/Alu.

Dies bekräftigt die Behauptung, dass eine Kantendetekti-

on auf bereits abgelegtem CFK-Material komplexer ist, da gleichzeitig die Kantenhöhe schwindet. Ferner zeigen die Ergebnisse, dass es jedoch mit dem, in diesem Versuch vorgeschlagenen optischen Sensortyp 1, eine Detektion der Kante zuversichtlich erscheint. Mit weiteren Untersuchungen sollen die bisher erzielten Ergebnisse verbessert werden. Eine geeignete Umsetzung der Kantendetektion zur Online-Bahnkorrektur wird im folgenden Abschnitt näher erläutert. Dabei soll insbesondere auf den notwendigen Datenfluss und den aktiven Eingriff in die Bahnsteuerung eines Standardindustrieroboters eingegangen werden.

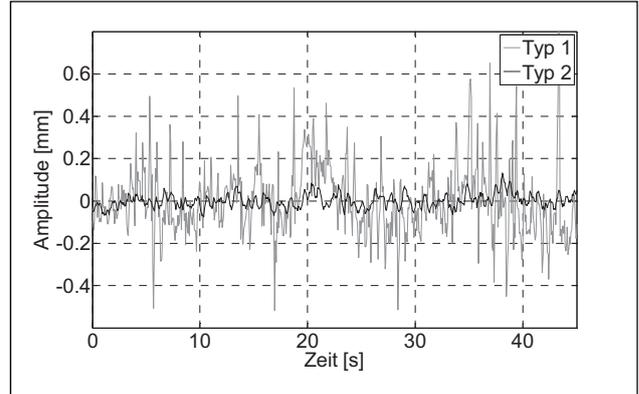


BILD 15. Mittelwertreihe aus zehn Messungen von Sensortyp 1 und 2 (CFK/CFK) nach angepasster Abtastfrequenz

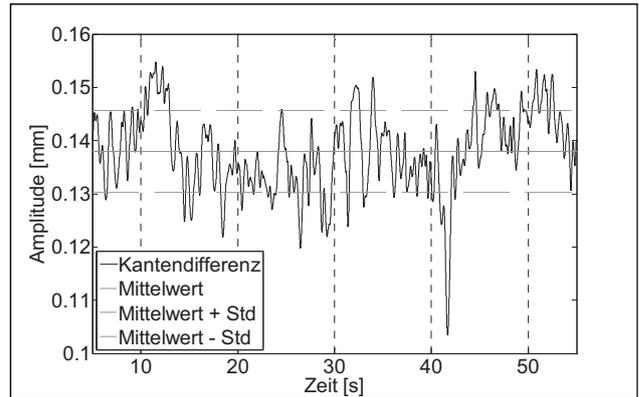


BILD 16. Kantendifferenz der Y-Lage (Laserlinie) als Gütekriterium der ermittelten Kante (CFK/Alu)

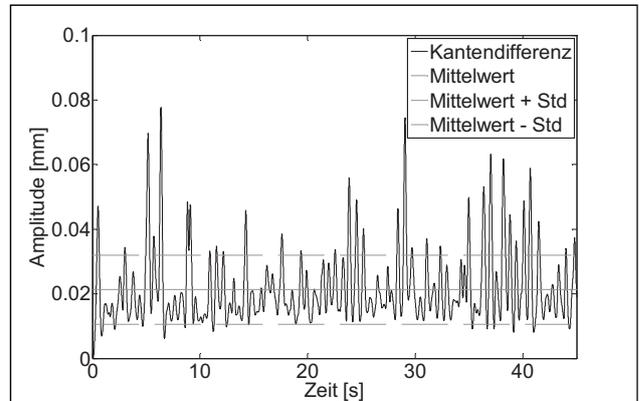


BILD 17. Kantendifferenz der Y-Lage (Laserlinie) als Gütekriterium der ermittelten Kante (CFK/CFK)

5. CNC-SENSORINTEGRATION

Im folgenden Abschnitt wird die Integration des Sensorsystems in eine Siemens 840D-SL Steuerung beschrieben. Diese Untersuchung wurde durch die Fa. *ibs Automation GmbH* durchgeführt. Hierfür wurde das Sensorsystem an den Endeffektor eines 6-Achs-Roboters befestigt und die Faserkante auf einer ebenen Aluminiumplatte detektiert.

Zur Integration in die CNC wird die Sensorkamera in Bearbeitungsrichtung vor dem TCP (Tool Center Point) montiert. Der vektorielle Abstand zwischen TCP und Nullpunkt des Sensors in Achsnullstellung wird „Sensorvorlauf“ genannt (Siehe BILD 18).

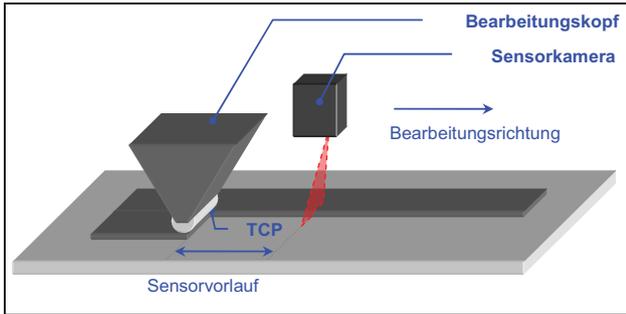


BILD 18. Prinzip des Sensorbaus

Die CNC-integrierte 3D-Konturverfolgung basiert auf einem Industrieroboter mit bis zu 7 Achsen, der mit einer im NC-Kern offenen CNC gesteuert wird. Der Sensorkopf ermittelt über Triangulation geometrische Daten einer im Sensorsichtbereich befindlichen Oberflächenstruktur. Aus diesen Daten berechnet der Sensorrechner, die Position der gemessenen Kante in seinem Sensorfenster. Diese Informationen werden der CNC-Steuerung mit dem Compilezyklus „CNC-integrierte Konturverfolgung“ zyklisch übermittelt.

Aus den in der Steuerung bekannten Positionen des Roboters und den Informationen des aktiven NC-Programms werden neue NC-Sätze generiert. BILD 19 verdeutlicht den Datenfluss zur 3D-Konturverfolgung.

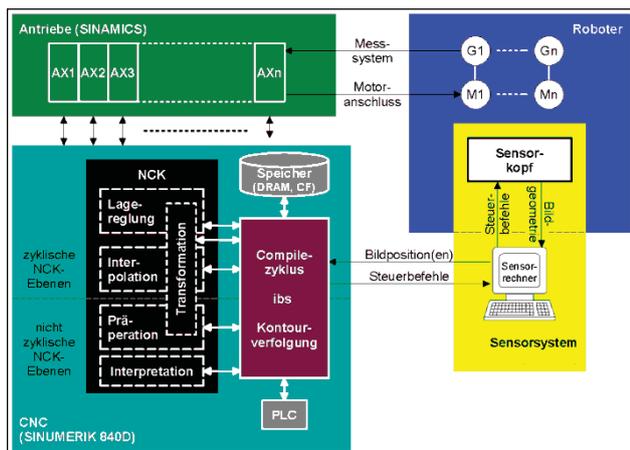


BILD 19. Datenfluss zur CNC-integrierten 3D-Konturverfolgung

Der Compilezyklus ist eine Erweiterung des CNC-Betriebssystems der Steuerung Sinumerik 840D-SL (NCK-OEM Anwendung). Zur automatischen Generierung sensorbasierter neuer NC-Sätze kommuniziert der Com-

pilezyklus mit allen Ebenen des CNC-Betriebssystems, der PLC und des Speichers.

5.1. Vergleich unkorrigierter und korrigierter Sensorfahrten

Der Vergleich der Messdaten einer korrigierten mit einer unkorrigierten Messfahrt soll in diesem Abschnitt der Funktionsdemonstration dienen.

Abbildung BILD 20 zeigt eine Messfahrt mit aktivem Kontursensor ohne Korrektur. In der Abbildung sind das Detailbild 1 als Videobild (frame) der CFK-Kante, Detailbild 2 als Ergebnis der Positionsberechnung der CFK-Kante und Detailbild 3 als Positionen der CFK-Kante längs der CFK-Bahn während der Messfahrt dargestellt.

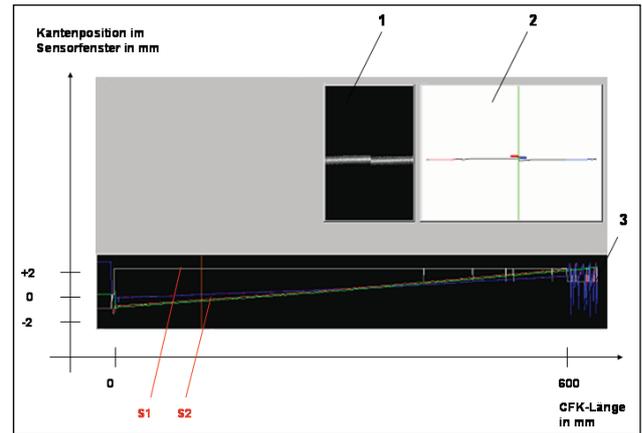


BILD 20. Messung mit Lichtschnittsensor ohne Konturverfolgung

Das Signal S1 gibt die Gültigkeit der berechneten Positionen an. Der Beginn des aktiven Gültigkeitssignals beschreibt damit den Anfang der CFK-Kante. Analog dazu definiert das Ausbleiben des Gültigkeitssignals das Ende der CFK-Kante. Weiterhin sind kurzzeitige Einbrüche des Gültigkeitssignals zu verzeichnen, die keinen Einfluss auf die Konturverfolgung haben. Zur Funktionsdemonstration wurde im zweiten Schritt die CFK-Bahn leicht schräg zur Bewegung des Kantensensors gelegt, wodurch die Position der Kante, grünes Signal S2 im Detailbild 3 schräg zur Bewegungsrichtung verläuft. Der Kantensensor ermittelt exakt die CFK-Kante.

Die Abbildung BILD 21 verdeutlicht eine Messfahrt mit aktiver Konturverfolgung (und ist ebenfalls in drei Detailbildern untergliedert).

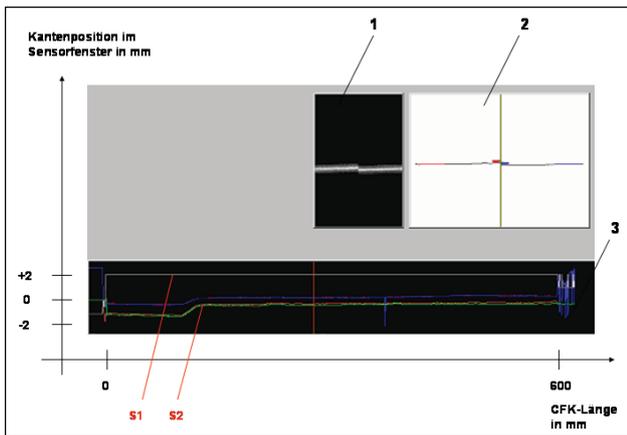


BILD 21. Messung mit Lichtschnittsensor bei aktiver Konturverfolgung

Im Gegensatz zur Messfahrt ohne aktive Konturverfolgung wurde die CFK-Bahn parallel zur Richtung der Messfahrt aber mit einem Versatz von ca. 1mm positioniert. Deutlich wird in der Messfahrt ersichtlich, dass die Konturverfolgung im ersten Drittel eine Ausgleichsbewegung um ca. 1mm ausführt. Wegen des Sensorvorlaufs von ca. 100mm ist diese Ausgleichsbewegung erst nach ca. 100mm Sensorweg notwendig, um das Legewerkzeug am Beginn der CFK-Kante auf die korrekte Position zu bewegen.

Die Messwerte belegen durch die Ausgleichsbewegung die exakte Führung des Legewerkzeuges.

Aktuell werden bei gering beschleunigten und kontinuierlichen Bewegungen des Legeroboters Legegeschwindigkeiten von 10m/min erreicht. Entscheidend für die maximale Legegeschwindigkeit ist die Steifigkeit des Roboters. Da zum Legen von geradlinigen Strukturen alle sechs bzw. sieben Achsen bei Verwendung einer zusätzlichen Linearrachse in aktiver Bewegung sind, konzentriert sich die Diskussion gekrümmt/ungekrümmt auf gering/stark beschleunigte und kontinuierliche Bewegungen.

Da beim Legen der CFK-Bahnen ein Fixieren der CFK-Bahn notwendig ist, ist eine freie 3D-Bewegung mit allen sechs Freiheitsgraden nicht möglich. Zum Beispiel ist eine Positionskorrektur quer zur Verfahrrichtung ausgeschlossen.

Mit weiter optimierten Algorithmen zur Konturverfolgung und unter Berücksichtigung der praktisch eingeschränkten 3D-Orientierung sind jedoch Legegeschwindigkeiten größer 30m/min erreichbar.

6. AUSBLICK

Die Bahnkorrektur des Sensorsystems könnte durch eine stetige Abweichung der Sollgeometrie die Roboterstellungen in Singularitäten bringen. Hierfür wird eine Steuerungsstrategie benötigt, die durch eine Prioritätenverteilung das Verfahren in Singularitäten verhindert.

Für den Einsatz im AFP Prozess sind weitere Untersuchungen des Sichtwinkels vorteilhaft, um auch die Detektion von Prepreg-Material zu optimieren. Weiterhin ist die Nutzung der Sensoren während der Ablage auf (mehrfach-) gekrümmten Werkzeugen zu untersuchen. Hierbei variieren der Messabstand und die Kantenverschiebung quer zur Fahrtrichtung.

Durch die sichere Detektion von Kanten und Unebenhei-

ten wie beispielsweise Markierungen ist eine Referenzierung an Werkzeugen denkbar. Des Weiteren könnten durch die Detektion der Kante auch die Außenabmaße des Werkstücks oder andere Geometrien überprüft werden.

In diesem Zusammenhang ist eventuell eine Überprüfung der Dicke des Bauteils möglich.

Ausgehend von der gezeigten Anwendbarkeit sollen in Zukunft die Messwerte der Laser-Lichtschnitt-Sensorik dazu genutzt werden, die genaue Position der bereits abgelegten Tows bzw. Tapes zu erfassen und unter Nutzung dieser Information die Legeposition der nachfolgenden Bahnen aktiv zu korrigieren. Dadurch soll es ermöglicht werden, dass sowohl die Toleranzen zwischen den Bahnen als auch Anschlüsse an angrenzende Arbeitsbereiche ohne Einmessung der Endposition des jeweiligen Roboters innerhalb der geforderten Grenzen liegen.

Weiterführende geplante Versuchsreihen zur Anlagen- und Prozesscharakterisierung beinhalten die Übertragung der Versuche und der Versuchsergebnisse auf die GroFi-Anlage einschließlich der Kopplung mit zusätzlichen Sensorsystemen bspw. Beschleunigungssensoren, Antriebsmesssystemen, Absolutmesssystemen etc. Des Weiteren sollen Tests bei unterschiedlichen Ablegegeschwindigkeiten, Materialien und Werkzeugkrümmungen erfolgen.

7. DANKSAGUNG

Ein besonderer Dank gilt der Fa. *ibs Automation GmbH* für die Bereitstellung der Versuchsmittel, die Integration in die CNC und die permanente fachliche Unterstützung.

8. LITERATUR

- [1] Reek, A. 2000, „Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen“, Dissertation, TU München, Germany
- [2] Zacher, M. 2003, „Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen“, Dissertation, RWTH Aachen, Germany
- [3] Bollig, A. (u.a.) 2005, „Einsatz optischer Technologien zur Regelung des Laserstrahlschweißprozesses“, in Automatisierungstechnik, Vol.53, pp.513-521
- [4] Roebrock, P. & Boehnke, K. 2007, „Offline Path Correction System for Industrial Robots“, in WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling & Simulation, Istanbul, Turkey, pp. 276-280
- [5] Abele, E. (u.a.) 2011, „Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung“, in Wissenschaftsmagazin der TU Darmstadt, Germany, pp. 44-49