

eingereicht/handed in: 25.10.2021
angenommen/accepted: 28.01.2022

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann, Nadine Magura, M.Sc., Robert Müller, M.Sc., Daniel Schneider, M.Sc., Dr.-Ing. Kai Fischer
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Einsatz einer Industriekamera zur Qualitätskontrolle bei der Herstellung des zylindrischen Bereichs von Typ-IV Druckbehältern im Nasswickelverfahren

Das Auftreten von prozessspezifischen Fehlstellen im Nasswickelverfahren erfordert eine Überdimensionierung der Bauteile, die insbesondere bei 700 bar Typ-IV Druckbehältern zu hohen zusätzlichen Materialkosten führt. In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer Qualitätskontrolle zusammen mit einem Bildverarbeitungsalgorithmus auf Basis einer Industriekamera vorgestellt, mit welchen sich Fertigungsabweichungen im zylindrischen Bereich der Behälter ermitteln lassen. Dazu wird eine Abstimmung der Einzelkomponenten des Messsystems sowie eine Integration in die Anlagentechnik durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass vor dem Ablagepunkt gemessen und über einen empirischen Spreizungsfaktor auf das endgültige Maß umgerechnet werden muss. Im Vergleich zu anderen Messverfahren ergibt sich ein hohes Potenzial zum industriellen Einsatz der Prüftechnik.

Use of an industrial camera for quality control in the production of the cylindrical area of type-IV pressure vessels in the wet filament winding process

The occurrence of process-specific defects in the wet filament winding process requires an oversizing of the components which leads to high additional material costs, especially for 700 bar type-IV pressure vessels. This paper presents the development of a quality control together with an image processing algorithm based on an industrial camera with which manufacturing deviations in the cylindrical area of the vessels can be determined. For this purpose, the individual components of the measuring system are adapted and integrated into the machine. It is shown that measurements must be taken before the deposition point and converted to the final dimension via an empirical spread factor. Compared to other measuring methods, there is a high potential for industrial use of the testing technology.

Einsatz einer Industriekamera zur Qualitätskontrolle bei der Herstellung des zylindrischen Bereichs von Typ-IV Druckbehältern im Nasswickelverfahren

C. Hopmann, N. Magura, R. Müller, D. Schneider, K. Fischer

1 EINLEITUNG

Wickelverfahren sind eine etablierte Fertigungstechnologie für konvexe rotationssymmetrische faserverstärkte Bauteile wie Antriebswellen und Rohre sowie aktuell verstärkt für mobile Druckbehälter zur Wasserstoffspeicherung für brennstoffzellenbasierte Antriebstechnologien [1]. Unabhängig von der Mobilitätsindustrie führt die steigende Nachfrage nach brennstoffzellenbasierten Antriebstechnologien zu einem wachsenden Markt für Druckbehälter mit einem Betriebsdruck von 700 bar [2].

Deren gebräuchlichste Ausführung für diese Art von Anwendungen ist der Typ-IV Druckbehälter [3]. Aufgrund des Gefährdungspotenzials von Druckwasserstoff werden für Speicherbehälter hohe gesetzliche Sicherheitsfaktoren von 2,25 gefordert [4]. Zur Einhaltung des daraus resultierenden Mindestberstdruckes einer Charge müssen Druckbehälter zusätzlich überdimensioniert werden, was einen vermeidbaren Kostenaufwand darstellt [5].

Um ein besseres Verständnis des Herstellungsprozesses zur effizienteren Auslegung von Typ-IV Druckbehältern mit verringerter Überdimensionierung zu erlangen, ist es wichtig, die Art, den Ort und die Größe von Abweichungen zwischen dem entwickelten Laminataufbau und dem gefertigten Bauteil zu verstehen. In diesem Beitrag wird ein Konzept zum Aufbau vom Prozessverständnis durch die Inline-Erfassung der Faserbandablage im zylindrischen Bereich des Druckbehälters vorgestellt. Durch Bestimmung der realen Faserbandbreite, der Orientierung der Fasern und der Position des Faserbandes auf dem Druckbehälter kann die Faserbandablage beschrieben werden. Diese Informationen können zur Identifizierung von nachweislich festigkeitsmindernden Defekten, wie Lücken oder Überlappungen zwischen benachbarten Faserbändern, verwendet werden, die durch Abweichungen des Faserbandes im Herstellungsprozess im Vergleich zum simulierten Design des Druckbehälters induziert werden.

In diesem Beitrag werden zunächst Anforderungen an ein solches Messsystem zur inline-Erfassung der Faserbandablage definiert. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass sich die Faserbandbreite durch mechanische Spreizungseffekte noch nach der Ablage verändern kann, weshalb eine

Detektion der Bandbreite nach der Ablage angestrebt wird [5]. Anschließend wird ein geeignetes Industriekerasystem ausgewählt und in eine Nasswickelanlage zur Prozessüberwachung während der Herstellung von Umfangslagen eines Druckbehälters installiert. Zusätzlich wird ein Bildverarbeitungsalgorithmus zur automatisierten Detektion von Faserbandbreite und -kantenwinkel vorgestellt.

Zuletzt wird das vorgestellte Messsystem mit einer bestehenden Lösung zur Erfassung der Faserbandablage auf Basis einer Infrarotkamera verglichen, um die Unterschiede der Systeme bezüglich Bilderfassung und Prozessintegrierbarkeit zu diskutieren. Dabei wird Bezug zu einer eigenen Veröffentlichung genommen, in welcher das entsprechende Kerasystem ausführlich vorgestellt wurde [6].

2 GRUNDLAGEN

2.1 Bauteilfertigung im Nasswickelverfahren

Der konventionelle Prozessablauf beim Duroplast-Nasswickelverfahren ist in Bild 1 dargestellt. Ausgehend vom Gatter werden die einzelnen Rovings bei einer definierten Fadenspannung abgezogen, zu einem Faserband zusammengefasst und in einer Imprägniereinheit mit Harz beladen. Die Imprägnierung der Fasern kann durch Tauch-, Walzen-, Druck- und Vakuumimprägnierung erfolgen [7]. Bei der Walzenimprägnierung wird das Faserband über eine rotierende Imprägnierwalze geführt, die mit einem definierten Harzfilm beladen ist. Das Harz wird durch die Rotation der Walze aus einem temperierten Vorratsbehälter transportiert und durchströmt das Faserband in Dickenrichtung. Die im Faserband enthaltene Luft kann so nach oben entweichen, und die Imprägnierqualität steigt entsprechend [7]. Voraussetzung für eine gute Imprägnierung ist eine ausreichend niedrige Viskosität des Harzes ($< 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), weshalb das Harzbad beheizt wird [1]. Das imprägnierte Faserband wird von einem Ablage-Manipulator entlang des Wickelweges auf dem Wickelkern platziert. Das Wickelmuster besteht aus helixförmigen und umlaufenden Lagen. Umfangsschichten bedecken den zylindrischen Teil des Behälters und dienen zur Aufnahme von radialen Kräften durch den Behälterinnendruck, wodurch in den Fasern vornehmlich eine Zugbelastung vorliegt [8]. Eine hohe Kompressionswirkung dieser Schicht auf die darunterliegenden Lagen ist für Umfangslagen ebenso charakteristisch wie die Möglichkeit hoher Wickelgeschwindigkeiten. Helixlagen lassen jedoch mehr Variationen zu. Abhängig vom Wickelwinkel können diese von verschiedenen Teilen des Kuppelbereichs helixförmig in den anderen Kuppelbereich gewickelt werden. Diese Lagen dominieren die axiale Festigkeit des Druckbehälters [8].

Abhängig vom verwendeten Harzsystem kann dessen Vernetzungsreaktion bereits im Wickelprozess beginnen. In der Regel folgt im Anschluss an den Wickelprozess die vollständige Aushärtung des Harzsystems in Temperieröfen.

Das Bauteil wird während dieses Vorgangs rotiert, um eine schwerkraftgetriebene einseitige Harzanhäufung zu vermeiden [7].

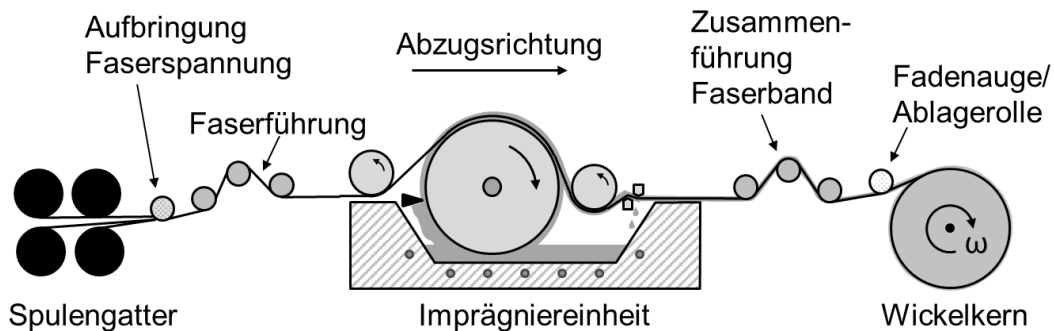


Bild 1: Schematischer Ablauf des Nasswickelprozesses

2.2 Einflüsse auf die Qualität gewickelter Bauteile

Verschiedene Defekte im Laminat gewickelter Bauteile wie Lücken und Überlappungen zwischen benachbarten Faserbändern, Luftschlüsse oder Schwankungen im Faservolumengehalt können einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben. Das Vorliegen von Lücken und Überlappungen zwischen benachbarten Faserbändern ist im Polkappenbereich des Druckbehälters und an den Kreuzungspunkten von Helixlagen ein prozessbedingter Normalzustand. Im zylindrischen Bereich sind Lücken und Überlappungen in den meisten Fällen jedoch auf eine fehlerhafte Ablage des Faserbandes zurückzuführen und bieten ein vergleichsweise hohes Potenzial zur prozessbegleitenden Erfassung. Aus diesem Grund wird ein Messsystem zur Qualitätskontrolle im Umfeld des Ablagepunktes installiert. Im folgenden Kapitel erfolgt zunächst eine geometrische Beschreibung des Faserbandes, auf dessen Basis anschließend die verschiedenen möglichen Fehlerbilder erklärt werden können.

2.2.1 Geometrische Beschreibung des Faserbands

In vielen Anwendungen wie FEM-Simulationen und der Erstellung von Wickelprogrammen wird das Faserband mit einem rechteckigen Querschnitt angenähert. Wie in Bild 2 gezeigt, kann mit dieser Annahme ein theoretisch gut definiertes Laminat aufgebaut werden. Lokale Defekte wie Lücken und Überlappungen können visualisiert werden. Ausgehend von der Annahme eines rechteckigen Querschnittes kann das Band und damit das Laminat durch die Bandbreite und -höhe, den Platzierungswinkel (Faserorientierung) und die Position des Bandes auf dem Wickelkern definiert werden. Diese Annahmen sind für viele Anwendungen ausreichend präzise. Um den Herstellungsprozess besser zu verstehen, muss jedoch erkannt werden, dass die Gültigkeit dieser Annäherung begrenzt ist. Die geometrische Verteilung des Faserbandes quer zur Ablagerichtung in einem realen Nasswickelprozess ist kaum bekannt, eine

geeigneter Annäherung könnte jedoch die Beschreibung des Faserbandquerschnittes mit einer Ellipse (frei geführt) bzw. halben Ellipse (nach der Ablage auf dem Wickelkern) sein. Auch wenn diese Annahme, wie in Bild 2 gezeigt, zu einem inhomogenen Design der Lamine führt, ist es dennoch mit Hilfe der Faserbandbreite, -orientierung und -position möglich, die Faserdisposition während des Herstellungsprozesses zu beschreiben. Zur Breitenänderung des Faserbands bei der Ablage infolge von mechanischen Spreizungsvorgängen und in Abhängigkeit von Wickelprozessparametern wurden weitere Analysen durchgeführt, welche separat publiziert werden.

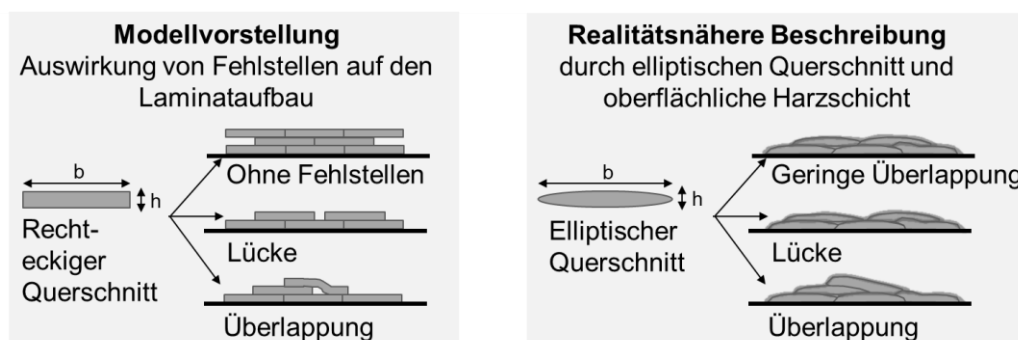


Bild 2: Auswirkungen von Lücken und Überlappungen auf den Laminataufbau mit rechteckigem (links) und elliptischem (rechts) Faserbandquerschnitt

2.2.2 Mögliche Fehlstellen im Laminat gewickelter Bauteile

Mögliche Defekte bei der Herstellung von Typ-IV Druckbehältern lassen sich nach ihrer Ursache oder dem Ort ihres Auftretens im Druckbehälter kategorisieren. Im Hinblick auf den Ort werden in Bild 3 drei Gruppen genannt: Defekte, die während des Herstellungsprozesses in der Oberfläche der Laminatschicht auftreten (Kategorie I), Defekte, die im Inneren des Laminats auftreten (Kategorie II), sowie Defekte, die zu Formabweichungen des Bauteils führen (Kategorie III). Die Ursache der Defekte kann aus vielen verschiedenen Aspekten abgeleitet werden, wie beispielsweise einer ungenauen Faserbandablage, dessen Harzbeladung, Schwankungen in der Faserbandbreite, einer abweichenden Faserbandspannung während der Verarbeitung oder Anomalien in der Linergeometrie.

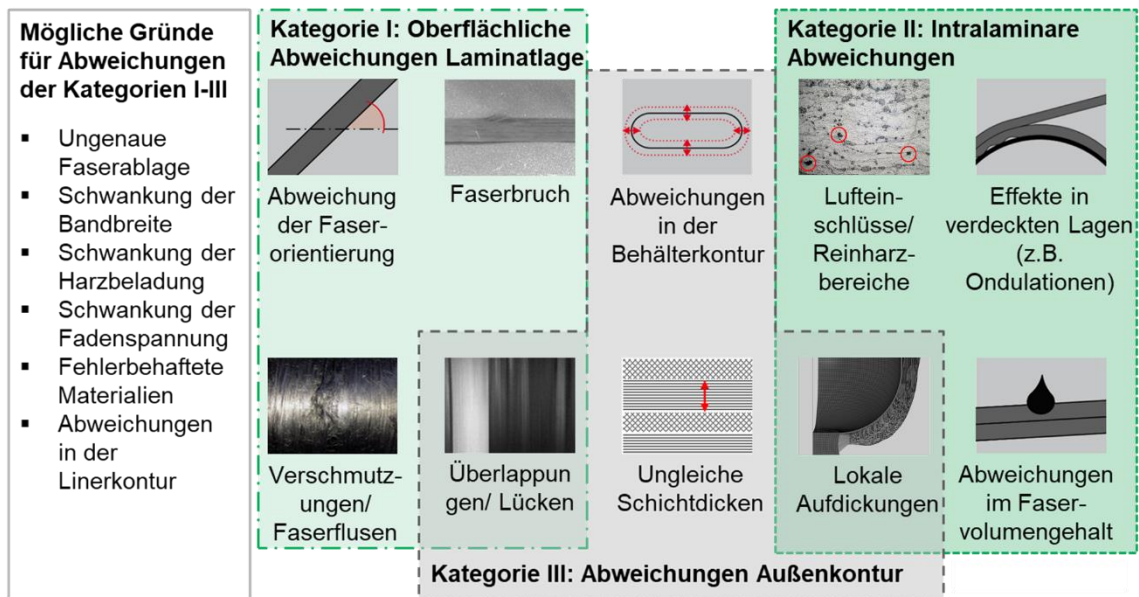


Bild 3: Einordnung hinsichtlich des Entstehungsorts von möglichen Fehlstellen beim Nasswickeln [9-15]

Im Folgenden werden Defekte im Zusammenhang mit der Bandgeometrie bei der Faserablage diskutiert. Bei der Herstellung können Abweichungen der Faserbandbreite oder Ungenauigkeiten bei der Faserablage zu Lücken oder Überlappungen führen. Daher wird ein besseres Verständnis des Herstellungsprozesses des Druckbehälters zu einem effizienteren Design und einer realitätsnahen Simulation von Composite-Druckbehältern beitragen.

2.2.3 Lücken und Überlappungen

Das Faserband besteht aus mehreren Rovings und diese wiederum aus einer Vielzahl von Einzelfilamenten. Das Faserband ist während des Prozesses in der geometrischen Form der Querschnittsfläche und in den Abmessungen in Breiten- und Höhenrichtung nicht konstant. Die endgültige Geometrie am Ablagepunkt ist abhängig vom Rovingtyp, der jeweiligen Materialcharge, der Faserzahl, der Harzbeladung, den zwischengeschalteten Führungs- und Spreizeinrichtungen, der aufgetragenen Faserspannung und der resultierenden Normalkraftkomponente, abhängig vom Krümmungsradius der Außenfläche des Wickelkerns.

Ist die tatsächliche Ausdehnung des Faserbandes kleiner oder größer als die bei der Simulation des Wickelweges angenommene Faserbandbreite oder treten Positionierungsungenauigkeiten bei der Faserbandablage auf, entstehen Lücken zwischen den Faserbändern oder Überlappungen der benachbarten Faserbänder, die wiederum zu einer ungleichmäßigen Schichtdicke führen. Während der Verarbeitung können sich Unregelmäßigkeiten in den nachfolgenden Lagen ausbreiten und zu Folgefehlern im Laminataufbau führen. Aus diesem Grund sind Lücken und große Überlappungen zu vermeiden.

Lücken

Wird das Band über einer Lücke in ähnlicher Orientierung, d. h. eine Umfangslage auf einer Umfangslage abgelegt, kann dies zu einem Abfall der Faserspannung in einem Abschnitt des über der Lücke liegenden Faserbandes führen. Durch den aufgrund der sinkenden Faserspannung geringeren Verdichtungsdruck an dieser, über der Lücke liegenden Stelle sinkt der lokale Faservolumengehalt [16], was die Festigkeit und Steifigkeit des Verbundwerkstoffes beeinflussen kann. In Untersuchungen von *Croft et al.* wurden in unidirektional verstärkten Testplatten Lücken und Überlappungen mit einer Ausdehnung von einer Faserbandbreite und der doppelten Faserbandhöhe integriert. Dabei zeigte sich, dass die Faserbewegung alle Lücken mit Fasern schloss. Dies führt jedoch zu einer hohen Faserwelligkeit im Laminat. Bei kleineren Lücken (halbe Faserbandbreite) wird dieser Effekt gehemmt und die Schlißbilder zeigen reine Harzbereiche [16]. Faserwelligkeiten stellen eine häufig in gewickelten Bauteilen auftretende Defektart dar [17], deren Entstehung durch die Homogenisierung von Lücken zusätzlich begünstigt wird. Deren negativer Effekt auf die Lamineigenschaften wurde beispielsweise von *Kreikemeier et al.* anhand von numerischen Analysen auf Basis der Methode der finiten Elemente (FEM) an einem repräsentativen Volumenelement untersucht. Dabei fiel die Steifigkeit in Faserrichtung bei einem Wellenamplituden/-längenverhältnis von 0,2 um 68 % ab [18].

Untersuchungen zum Einfluss von Lücken auf die mechanischen Eigenschaften von gewickelten Bauteilen sind bisher noch nicht durchgeführt worden. Verschiedene Ergebnisse wurden jedoch anhand von Plattenprüfkörpern generiert. In Berechnungen von *Heinecke et al.* wurden Lücken bzw. Überlappungen mit einem Ausmaß von ca. 10 % der Faserbandbreite in Platten angenommen, welche im Automated-Dry-Fibre-Placement (AFP)-Verfahren gefertigt und anschließend im Resin-Transfer-Molding (RTM)-Verfahren imprägniert wurden. Dabei wurden Lücken als Reinharzbereiche und Überlappungen als Bereiche mit erhöhter Nennsteifigkeit berechnet. Hierbei zeigte sich für Lücken und Überlappungen eine Reduktion der Zugfestigkeit um bis zu 9 % respektive 22 % [19]. In AFP-Testplatten mit Lücken und Überlappungen im Größenbereich einer halben Faserbandbreite konnten *Lan et al.* Einfallstellen und Fehlerfortpflanzungen in oberliegenden Faserlagen bis hin zu lokalen Aufdickungen an der Bauteiloberfläche feststellen. Prüfkörper mit Lücken zeigten dabei einen Abfall um 5-10 % im Schermodul in der Ebene [20].

Überlappungen

Wenn die tatsächliche Breite des Faserbandes größer ist als die angenommene Faserbandbreite bei der Berechnung des Wickelmusters oder wenn bei der Platzierung des Faserbandes Positionierungsfehler auftreten, kommt es zu einer Überlappung benachbarter Faserbänder. Eine leichte Überlappung ist aufgrund des elliptischen Querschnitts des Faserbandes am Ablagepunkt sogar vorteilhaft für die Bildung einer gleichmäßigen Schichtdicke. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine leichte Überlappung nicht mit einem

Verlust der mechanischen Eigenschaften verbunden ist. In der Theorie kann eine stärkere Überlappung jedoch zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung über dem Faserband führen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Wickelanlage näherungsweise keine Relativbewegungen der Faserfilamente in Abzugsrichtung zugelassen werden und die eingestellte Faserspannung theoretisch ausschließlich in den Filamenten auf dem größten Ablageradius (Überlappung) vorliegt. Im nicht-überlappenden Teil werden Filamente mit identischer Länge auf einer kürzeren Umfangsstrecke abgelegt, wodurch sich deren Spannung verringert. Dadurch wird die Bildung von festigkeitsmindernden Welligkeiten in diesen Fasern begünstigt, was zu einem reduzierten Verdichtungsdruck und in der Folge zu einem lokal verringerten Faservolumengehalt führt. Faserwelligkeiten können darüber hinaus ebenfalls in den nachfolgenden Lagen entstehen, welche auf Überlappungen mit entsprechender lokaler Aufdickung abgelegt werden [16]. *Rach* und *Ivanovskii* untersuchten den Einfluss des Überlappungsgrades auf die Laminat-Zugfestigkeit in Faserrichtung an unidirektional gewickelten Aramidfaser-Epoxidharz-Proben mit einem Kerndurchmesser von 200 mm. Eine Überlappung von ca. 25 % der Faserbandbreite führte dabei zu einer Verringerung der ursprünglichen Festigkeit um ca. 20 % [21]. Auch wenn das Vorliegen von Welligkeiten in diesen Untersuchungen nicht explizit nachgewiesen wurde, liegt dennoch eine signifikante Festigkeitsminderung durch Überlappungen vor. Die Spannung bei einem Überlappungsgrad von 2,5 % wurde verwendet, um die maximal zulässige Spannung zu normalisieren. Dies unterstützt die Annahme, dass eine geringfügige Überlappung nicht mit einem Verlust der mechanischen Eigenschaften verbunden ist.

3 Ansatz der inline Erfassung der Faserbandgeometrie im Nasswickelverfahren mit einer Industriekamera

3.1 Lösungsweg

Ein wichtiges Kriterium für die Inline-Detektion von qualitätsbestimmenden Fehlstellen im Wickelprozess ist die berührungslose Erfassung der benötigten Daten. Flächenhafte hochauflösende Industriekameras haben sich in industriellen Anwendungen, z. B. zur Qualitätsmessung von Vorformlingen [22], aufgrund ihrer hohen Robustheit und einfachen Handhabung etabliert. Das Funktionsprinzip entspricht herkömmlichen Kameras, jedoch weisen Systeme für den industriellen Gebrauch zumeist keine Bedienelemente wie Tasten oder Schalter auf und verfügen stattdessen über leistungsfähigere Schnittstellen zu Messrechnern und entsprechende Software. Daher wird die Inline-Bestimmung des Faserbandes im Nasswickelprozess durch den Einsatz einer Industriekamera untersucht.

Bei automatisierten Bildverarbeitungssystemen kommt der Bildakquisition eine zentrale Bedeutung zu. Aufwendige Algorithmen sind oftmals vermeidbar, wenn

die Qualität der Aufnahmen an die zu bearbeitende Messaufgabe angepasst ist. Die charakteristischen Merkmale der Fehler müssen in ausreichendem Kontrast abgebildet und gleichzeitig störende Fremdeinflüsse nach Möglichkeit unterdrückt werden [23]. Daher wird im Folgenden der Einfluss verschiedener Parameter bezüglich der Kamerapositionierung sowie der Bildaufnahmeparameter untersucht, um einen geeigneten Messaufbau für die Inline-Detektion des Faserbandes zu identifizieren.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der inline-fähigen Erfassung der Faserbandbreite im zylindrischen Bereich des Druckbehälters, welche aufgrund des maschinenseitig konstanten Vorschubs einen direkten Einfluss auf die Entstehung von Lücken und Überlappungen zwischen benachbarten Faserbändern hat. In Kapitel 2 wurde aufgeführt, dass derartige Fehlstellen einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Lamineigenschaften haben können. Die aus den Bandkanten berechenbare Position des Faserbandes auf dem Druckbehälter wird zukünftig in eine 3D-Rekonstruktion des Behälters implementiert, um über einen Soll-Ist-Abgleich Lücken und Überlappungen zu visualisieren und diese durch iterative Anpassungen des Wickelprogramms und der Prozessparameter zu eliminieren. Für eine präzise Bestimmung der Faserbandkanten, aus welchen sich die Faserbandbreite und die -orientierung berechnen lassen, muss der geeigneten Wahl von Kameraeinstellungen und Beleuchtungsparametern sowie dem Messort eine entscheidende Bedeutung beigemessen werden. Es ist ein Messort zu wählen, an dem die Faserbandkanten sicher erfasst werden können und gleichzeitig das Faserband eine repräsentative Geometrie erreicht hat. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass sich die Faserbandbreite durch mechanische Spreizungsvorgänge im Umfeld des Ablagepunktes erhöhen kann. Aus diesem Grund sollte eine Ermittlung der Bandbreite bestenfalls hinter dem Ablagepunkt erfolgen, um dessen endgültigen Wert aufzuzeichnen.

Die Messaufgabe besteht somit darin, die linke und rechte Kante des Faserbandes zu detektieren. Für die Entwicklung einer Messstrategie mit der Industriekamera wird folgendes Vorgehen gewählt:

- Es wird ein geeigneter Messort für die Bandüberwachung ausgewählt.
- Die Kamera und Beleuchtung werden relativ zum Messort positioniert.
- Die Beleuchtungsparameter werden definiert.
- Es wird die Eignung der Bilder für eine Kantenerkennung diskutiert.
- Es wird ein Algorithmus zur inline-fähigen Bildverarbeitung entwickelt und dessen Eignung für den realen Nasswickelprozess diskutiert.

3.2 Anlagen- und Messtechnik

Die Versuche werden auf einer Portalwickelmaschine vom Typ WSE IV der Fa. Josef BAER Maschinenfabrik KG, Weingarten, durchgeführt. Als Wickelkern

dient ein PVC-Rohr, das den zylindrischen Teil des Druckbehälters mit einem Außendurchmesser von 200 mm darstellt. Als Materialien werden Kohlenstofffasern des Typs ITS50 der Fa. Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, zusammen mit einem Epoxidharz des Typs EPIKOTE Resin 04976 der Fa. Hexion Inc., Columbus, USA, eingesetzt.

Die monochromatischen Aufnahmen werden mit einer Industriekamera vom Typ VLXT-50M.I der Fa. Baumer Electric AG, Frauenfeld, Schweiz, erstellt. Die Kamera basiert auf einem CMOS-Sensor mit einer Auflösung von 2448 x 2048 Pixel und kann Bilder mit einer maximalen Bildwiederholrate von 163 fps aufnehmen. Zum maximalen Auflösungsvermögen macht der Hersteller in den Datenblättern keine Angaben. Diese kann jedoch aus der Pixelgröße von 3,45 µm berechnet werden (Kapitel 3.4). Die Kamera wird in dieser Arbeit mit einem Objektiv des Typs LM12JC5M2 der Fa. KOWA Europe GmbH, Düsseldorf, betrieben. Das Objektiv besitzt eine verstellbare Blende (Blendenzahl zwischen 1,4 und 16). Der minimale Arbeitsabstand wird mit 100 mm angegeben. Als Beleuchtung wird ein LED-Flachleuchtschirm (DTL-1010-BE, Fa. MBI Imaging GmbH, Hamburg) verwendet, dessen Strahlengang in der optischen Achse der Kamera angeordnet ist.

3.3 Versuchsaufbau

Die Position der verwendeten Kamera liegt im Zenit über dem Ablagepunkt des einlaufenden Faserbandes und kann dort flexibel in alle Raumrichtungen verändert werden. Eine Mattscheibe auf dem Leuchtschirm erzeugt diffuse Strahlung, wodurch störende Reflexionen reduziert werden können. Die Anordnung der Kamera auf dem Wickelkörper ist zusammen mit einer repräsentativen Aufnahme in Bild 4 dargestellt.

3.4 Anforderungen an das Kamerasystem

Bereits im Vorfeld der Untersuchungen muss sichergestellt sein, dass das gewählte Kamerasystem für die Bilderfassung im Prozess geeignet ist. Dabei ergeben sich verschiedene Anforderungen hinsichtlich Robustheit für industrielle Umfelder, aber insbesondere auch an Kontrastierung, Bildwiederholrate, Messbereich und Auflösung.

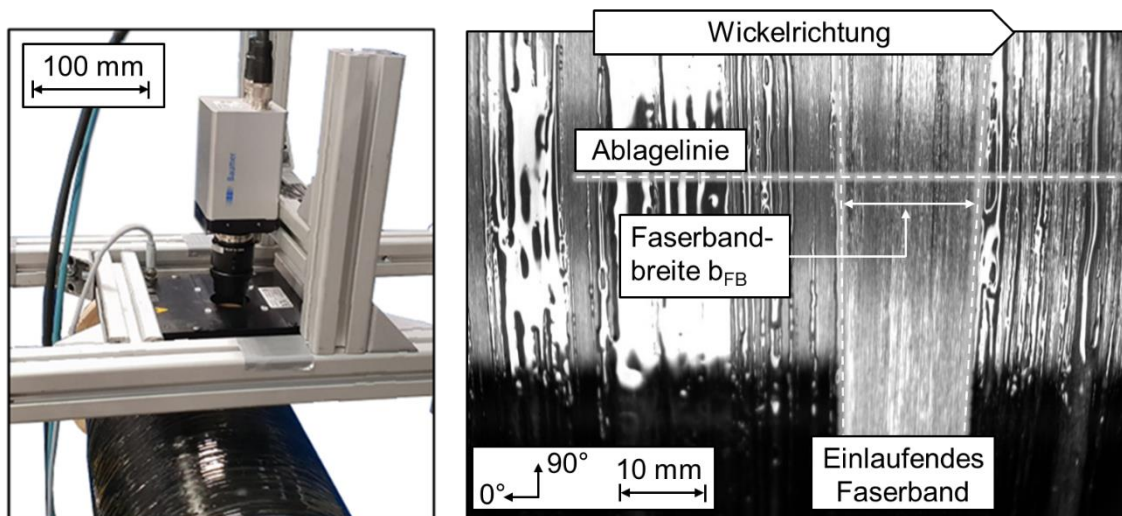


Bild 4: Darstellung des Versuchsaufbaus und repräsentative Aufnahme des Messsystems

Kontrastierung

Für die inline-Erfassung der Faserbandgeometrie am Ablagepunkt muss das Messsystem eine eindeutige Identifikation der beiden Faserbandkanten ermöglichen. Eine Herausforderung dabei ist der geringe Kontrast zwischen den schwarzen Kohlenstofffasern und dem ebenfalls schwarzen Untergrund. Erschwerend kommen die richtungs- und winkelabhängigen Reflektionseigenschaften der Fasern und des Harzfilms hinzu. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird untersucht, inwieweit eine ausreichende Kontrastierung durch Messposition und Belichtungseigenschaften sichergestellt werden kann.

Bildwiederholrate

Die Bildwiederholrate beschreibt die Anzahl der Bildaufnahmen pro Zeiteinheit und gibt damit an, wie groß der Abstand zweier Messpunkte auf dem Wickelkörper in Abhängigkeit der Wickelgeschwindigkeit ist. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass der Abstand zweier aufeinanderfolgender Bilder kleiner als die minimale Defektgröße in Wickelrichtung sein muss. Zum aktuellen Zeitpunkt liegen noch keine Informationen über reale Defektgrößen vor, weshalb dieser Wert im Rahmen dieser Veröffentlichung zu maximal 30 mm abgeschätzt wird. Bei einer anlagenbedingt maximalen Wickelgeschwindigkeit von $v_{\max} = 0,97 \text{ m/s}$ ergibt sich folglich eine minimale Bildwiederholrate von 33 frames per second (fps).

Messbereich

Bei der optischen Bilderfassung ist der Messbereich, bedingt durch die begrenzte Tiefenschärfe einer Kamera, auch in vertikaler Richtung limitiert. Aus diesem Grund bestehen Anforderungen an den Messbereich in allen drei Raumrichtungen. Die Winkel der Faserbandablage im Bezug zur Wickelkörper-

längsachse kann im realen Nasswickelprozess theoretisch zwischen 0° und 90° variieren. Bei der Herstellung von Typ-IV Druckbehältern treten üblicherweise Wickelwinkel α zwischen $\alpha = 22^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ auf. Der laterale Messbereich des Kamerasystems muss demnach ausreichend groß gewählt werden, dass die beiden Faserbandkanten bei jedem Wickelwinkel erfasst werden. Hierzu werden zwei laterale Hilfswerte ΔL_1 und ΔL_2 entlang der x- und y-Richtung der Messwerterfassung bestimmt, um den minimalen Bereich zur Erfassung der angenommenen Faserbandbreite zu definieren, Bild 5.

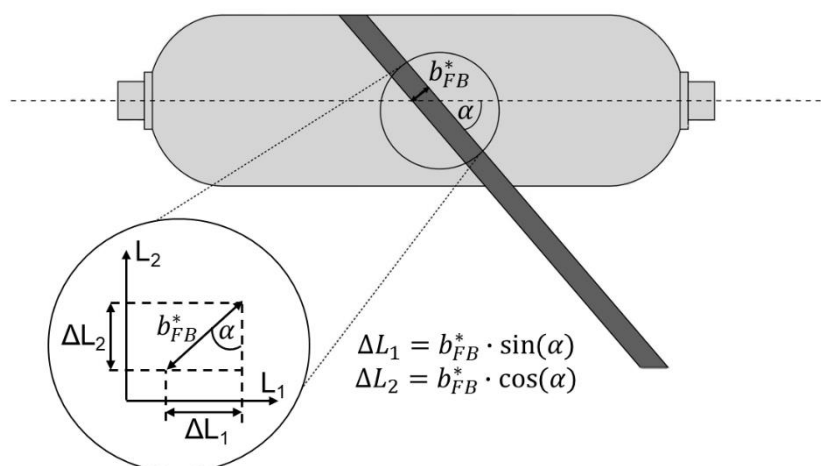


Bild 5: Konstruktion des minimalen lateralen Messbereiches ΔL_1 und ΔL_2 aus Faserbandbreite b_{FB}^* und -winkel α

Um die Faserbandbreite auch unter schwankenden Prozessbedingungen verlässlich zu erfassen, wird der Messbereich um einen Sicherheitsfaktor k mit einem angenommenem Wert von $k = 1,75$ erweitert. Die Ermittlung dieses Faktors erfolgte iterativ im Rahmen von Voruntersuchungen. Der berechnete laterale Messbereich ist in Tabelle 1 dargestellt.

Auch in vertikaler Richtung ergeben sich Anforderungen an den Messbereich. Da sich der Abstand des Faserbandes zur Linse aufgrund einer vorhandenen Behälterunwucht von ca. 3 mm im Prozess periodisch ändert, muss eine ausreichende Tiefenschärfe des Messsystems sichergestellt sein. Zur Gewährleistung einer durchgehend scharfen Aufnahme muss der vertikale Messbereich mindestens dem Produkt aus Behälterunwucht und dem Sicherheitsfaktor gegenüber prozessbedingten Schwankungen $k = 1,75$ entsprechen, Tabelle 1. Während eine Definition der notwendigen Tiefenschärfe aus der Behälterunwucht für den zylindrischen Bereich zulässig ist, müssen bei der Übertragung des Systems auf den Polkappenbereich zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden. Beispielhaft zu nennen sind die komplexe Krümmung der Polkappe und der lokale Schichtdickenaufbau. Abhängig von der individuellen Kinematik der Wickelmaschine müssen zudem möglicherweise variierende Kameraabstände berücksichtigt werden, die durch Zustellen des Fadenauges zur Wickelkörper-längsachse entstehen können. Beim Einsatz des

Messsystems für die vollumfängliche Produktionsüberwachung sollte folglich eine externe oder softwareseitige Adaptierbarkeit der Tiefenschärfe der Kamera in die Messsystemspezifikationen aufgenommen werden.

Auflösung

Als Auflösung wird die Fähigkeit eines Messgerätes bezeichnet, zwischen zwei nah beieinanderliegenden Messwerten zu unterscheiden [24]. Die Auflösung A eines Messsystems zur optischen Bilderfassung muss kleiner oder gleich fünf Prozent der Toleranz T des zu messenden Merkmals betragen [25]:

$$A \leq 0,05 T \quad (1)$$

Aus den Untersuchungen von *Rach* und *Ivanovskii* ist bekannt, dass geringe Überlappungen benachbarter Faserbänder von bis zu 2,5 % ihrer Breite einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die mechanischen Lamineigenschaften haben und daher als zulässig angenommen werden können [21]. Somit kann der maximale d_{max} und minimale d_{min} zulässige Abstand zwischen zwei angrenzenden Faserbändern mit einer Bandbreite von 24 mm ermittelt werden. Hieraus ergeben sich die untere (USG) und die obere Spezifikationsgrenzen (OSG) für den Abstand benachbarter Faserbänder:

$$OSG = d_{max} = 0 \text{ mm} \quad (2)$$

$$USG = d_{min} = -(0,025 * 24 \text{ mm}) = -0,6 \text{ mm} \quad (3)$$

Die Toleranz kann nun als Differenz der oberen und unteren Spezifikationsgrenze berechnet werden [26]. Hieraus folgt aus Gleichung 1 für die Auflösung A :

$$T = OSG - USG \quad (4)$$

$$A \leq 0,05 (d_{max} - d_{min}) \quad (5)$$

Aus diesen Annahmen errechnet sich eine erforderliche Auflösung von $A = 30 \mu\text{m}$ zur Lösung der Messaufgabe, Tabelle 1. Da die Faser im Bild unterschiedlich ausgerichtet sein kann, wird diese Auflösung für die x- und y-Richtung der Messwerterfassung gefordert.

Kennwert	Formel	Wert
Lateraler Messbereich L_1	$L_1 = \Delta L_1 * k$	42,00 mm
Lateraler Messbereich L_2	$L_2 = \Delta L_2 * k$	38,94 mm
Vertikaler Messbereich V	$V = Unwucht * k$	5,25 mm
Auflösung A	$A \leq 0,05 * T$	30 μm

Tabelle 1: Geforderte Kennwerte des Kamerasystems

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Analyse geeigneter Einstellungen zur Bilderfassung

Zur Vereinfachung der späteren Bildverarbeitung sollten bereits bei der Bilderfassung große Bemühungen hinsichtlich eines ausreichenden Kontrastes sowie Auflösung unternommen werden. Im folgenden Unterkapitel werden die Untersuchungen zur Findung geeigneter Kamera- und Beleuchtungseinstellungen sowie deren Positionierung unter Berücksichtigung der zuvor definierten Anforderungen vorgestellt und diskutiert.

Bei der Positionierung der Kamera und ihren Einstellungen wird eine hohe Auflösung in Kombination mit einem hohen Kontrast angestrebt. Der Kontrast ist definiert als der Helligkeitsunterschied zwischen benachbarten Bildelementen. Zwischen Kontrast und Auflösung besteht ein Zusammenhang, der auf den Wellencharakter des Lichts zurückzuführen ist. Das Licht wird an der Blende gebeugt, was zu einem Beugungsmuster mit konzentrischer Intensitätsverteilung auf dem Sensor führt. Liegen gegensätzliche Signale wie Hell und Dunkel nahe beieinander, kommt es zu einer Überlappung der Signale, was den Kontrast verringert. Daraus folgt, dass der Kontrast mit der Auflösung bei sehr kleinen Abständen abnimmt und die Blendenöffnung folglich einen Einfluss auf den Kontrast hat.

Positionierung des Messsystems relativ zum Messobjekt

Da die Objektbreite vom Arbeitsabstand der Kamera abhängt, folgt daraus, dass auch die Auflösung vom Arbeitsabstand abhängt. Um die auflösbaren Distanzen zu minimieren, sollte die Kamera so nah wie möglich am Objekt positioniert werden. Die begrenzenden Faktoren sind in diesem Fall der minimale Arbeitsabstand a des Objektivs und die Grenzen durch die Integration in den Wickelprozess. Bei einem vom Objektiv vorgegebenen minimalen Arbeitsabstand von $a = 100$ mm beträgt die physikalische Genauigkeit der Kamera $24 \mu\text{m}$. Dies ist lediglich ein theoretischer Wert. In der Praxis muss die Auflösung mit dem Nyquist-Faktor 2 multipliziert werden [27]. Dies ergibt sich aus dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, das besagt, dass mindestens $2 \cdot f$ äquidistante Messpunkte erforderlich sind, um ein Signal mit der Frequenz f zu rekonstruieren. Übertragen auf die Bildverarbeitung bedeutet dies, dass zur Rekonstruktion des Bildmaterials die doppelte Anzahl von Pixeln erforderlich ist. Damit verdoppelt sich die reale Auflösung der Kamera auf $A = 48 \mu\text{m}$.

Bei einem Arbeitsabstand von $a = 100$ mm betragen die Maße des erfassten Bildausschnittes $59,15 \text{ mm} \times 49,49 \text{ mm}$. Die Größe des lateralen Messbereichs h_{eff} liegt damit oberhalb der in Kapitel 3.2 definierten Mindestmaße von $42,0 \text{ mm} \times 38,94 \text{ mm}$. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Tiefenschärfe des Bildes muss jedoch die Blendeneinstellung angepasst werden, wodurch der scharf eingestellte Messbereich reduziert werden könnte. Aus diesem Grund kann an dieser Stelle noch keine Aussage über die Eignung des Messsystems für den Anwendungsfall getroffen werden.

Objektiveinstellungen

Aus der gekrümmten Oberfläche des Wickelkörpers ergeben sich im Bild unterschiedliche Arbeitsabstände. Die Größen der scharfen Bildbereiche sind in Bild 6 in Abhängigkeit von der Blendenöffnung grafisch dargestellt. Unter Berücksichtigung des geforderten lateralen Messbereichs von 42,0 mm x 38,94 mm (Kapitel 3.2) wurde für die Untersuchungen in dieser Veröffentlichung eine Blendenöffnung von f/8 gewählt.

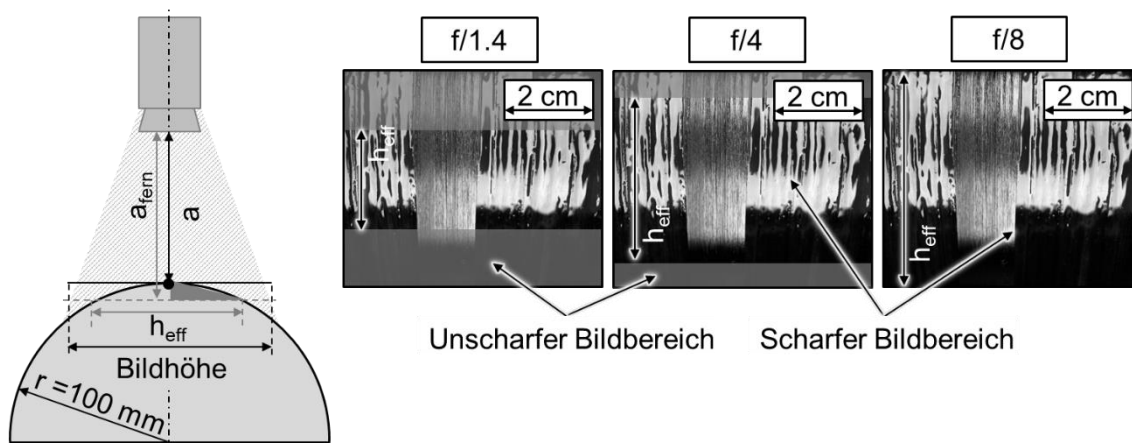


Bild 6: Einfluss der Blendenöffnung auf den lateralen Messbereich h_{eff} bei einem Arbeitsabstand von $a = 100 \text{ mm}$

In Tabelle 2 sind die Anforderungen bezüglich lateralem und vertikalem Messbereich sowie der Auflösung für verschiedene Arbeitsabstände aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Anforderungen an Tiefenschärfe und Auflösung mit dem eingesetzten Objektiv bei einem Arbeitsabstand von $a = 100 \text{ mm}$ nicht erfüllt werden können. Die hieraus resultierende Auflösung von $A = 48 \mu\text{m}$ entspricht einer Breitenabweichung des erfassten Faserbandes von unter einem halben Millimeter für jede Bandkante, was zunächst für die Untersuchungen in dieser Veröffentlichung als akzeptabel angenommen wird. Zukünftig könnten Tiefenschärfe und Auflösung durch eine Anpassung des Objektivs oder eine Verringerung der Formabweichung des Wickelkörpers reduziert werden.

Anforderung	Arbeitsabstand [mm]	100	115
42,00 x 38,94	Lateraler Messbereich L1 x L2 [mm ²]	59,15 x 49,49	72,67 x 60,08
5,25	Vertikaler Messbereich/ ferne Tiefenschärfe [mm]	3,66	4,87
30	Reelle Auflösung A [µm]	48	76

Tabelle 2: Vergleich der erreichbaren Werte für lateralen und vertikalen Messbereich sowie der reellen Auflösung unter verschiedenen Arbeitsabständen

Messort in Bezug zum Ablagepunkt

Bei der Auswahl eines geeigneten Messortes muss beachtet werden, dass die Kontrastierung der Aufnahme einer Industriekamera im sichtbaren Lichtspektrum erfolgt. Der sichtbare Unterschied zwischen schwarzer Faser und schwarzem Untergrund auf dem Kern ist dementsprechend gering. Eine mögliche Ausnahme hiervon stellt der Ablagepunkt der Fasern dar. Das einlaufende Faserband verläuft bis zu diesem Punkt oberhalb des Kerns, womit die Winkel zwischen einfallender Strahlung und Oberfläche am Kern und am Band unterschiedlich sind. In Bild 7 sind die Grauwerte in Querrichtung zum einlaufenden Faserband in vier verschiedenen Messpositionen dargestellt. Eine Aufnahme am Ablagepunkt (Position 1) oder dahinter wird angestrebt, da dort Spreizungseffekte durch die Interaktion zwischen Faserband und Untergrund berücksichtigt werden, welche einen signifikanten Einfluss auf die Geometrie des abgelegten Faserbandes haben. An dieser Messposition liegt für eine automatisierte Kantendetektion mittels eines Bildverarbeitungsalgorithmus jedoch kein ausreichender Kontrast zwischen Faserband und Untergrund mehr vor. Eine Messung vor dem Ablagepunkt (z. B. an Position 4) ermöglicht zwar einen ausreichenden Kontrast, allerdings wird die Faserbandspreizung bei der Ablage dort nur bedingt berücksichtigt. Folglich muss ein Kompromiss zwischen Datenqualität hinsichtlich der Kantendetektierbarkeit und der Aussagekraft auf die spätere Faserbandgeometrie getroffen werden. In dieser Veröffentlichung wird vor dem Ablagepunkt gemessen und der Effekt der Spreizung auf die Faserbandbreite über einen empirisch ermittelten Faktor berücksichtigt. Eine ausführliche Erläuterung der Vorgehensweise zur Ermittlung dieses Faktors ist in Kapitel 4.2.2 aufgeführt.

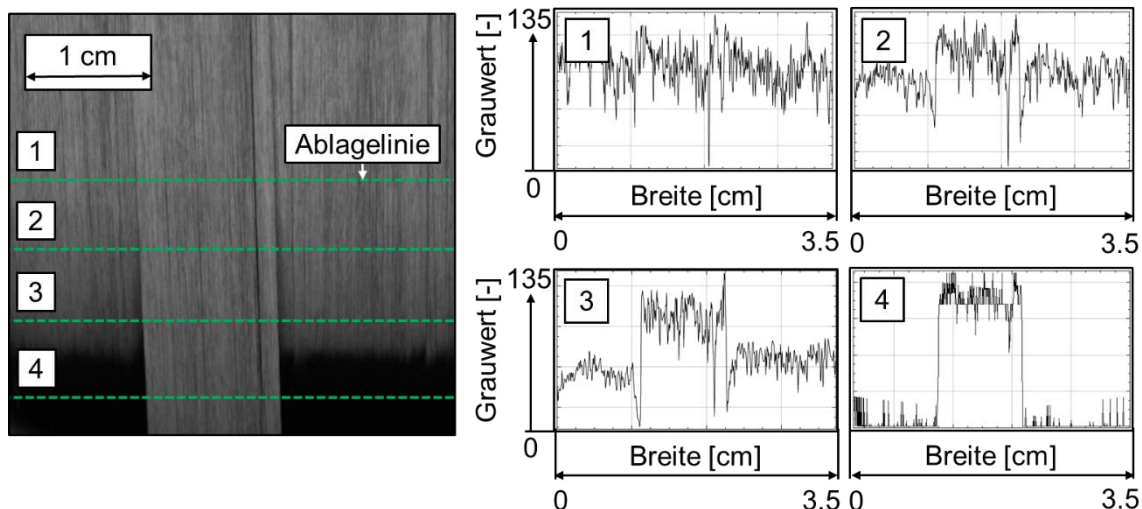


Bild 7: Grauwertverteilung im Umfeld des Ablagepunkts beispielhaft verdeutlicht mit trockenen Kohlenstoffasern

Beleuchtungsparameter

Die Bildhelligkeit nimmt mit der Belichtungszeit t_B zu, da mehr Licht pro Bild die Fotodioden erreichen kann. Bei einer statischen Bildaufnahme erwies sich eine Belichtungszeit von $t_B = 2000 \mu\text{s}$ als geeignet. Hohe Wickelgeschwindigkeiten von $v = 1 - 2 \text{ m/s}$ führen dazu, dass sich einzelne Bildelemente während dieser Belichtungszeit um bis zu 4 mm verschieben und dadurch in der Aufnahme verwischen. Die Belichtungszeit sollte daher möglichst weit reduziert werden. Um dennoch eine ausreichende Helligkeit sicherzustellen, kann über die Betriebssoftware eine künstliche Aufhellung (Gain) vorgenommen werden. Der Gain wird dimensionslos angegeben, wobei ein Wert von 1 keiner zusätzlichen Aufhellung entspricht. Es ist zu beachten, dass sehr hohe Gain-Werte zu einer Körnigkeit des Bildes führen, die die Auswertung beeinflussen kann.

Für die minimale Belichtungszeit von $t_B = 15 \mu\text{s}$ der Kamera ergibt sich bei der maximalen Geschwindigkeit der verwendeten Wickelmaschine von $v_{\text{max}} = 0,959 \text{ m/s}$ ein Versatz von 0,014 mm pro Bild, so dass auch bei höheren Wickelgeschwindigkeiten eine hohe Qualität der Bilder erreicht werden kann. Bei dieser Einstellung sind die Bilder deutlich unterbelichtet, sodass zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung ein Kompromiss zwischen Wickelgeschwindigkeit und Bildqualität getroffen werden muss. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erwies sich eine Belichtungszeit von $t_B = 200 \mu\text{s}$ als geeignet.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Bildhelligkeit bei geringen Belichtungszeiten stellt eine kurzzeitige Überversorgung der LED-Beleuchtung auf bis zu 400 % (2,4 A) dar, welche nicht dauerhaft, sondern lediglich im Blitzbetrieb angewendet werden kann. In Bild 8 ist ein Vergleich der verschiedenen Beleuchtungs-, Kamera- und Softwareeinstellungen bei einer Wickelgeschwindigkeit von ca. $v = 0,1 \text{ m/s}$ dargestellt. Es ist ersichtlich, dass

eine Erhöhung der Beleuchtungsintensität im Zusammenspiel mit dem Gain-Faktor als aussichtsreiche Option zur Reduktion der Belichtungszeit festgehalten werden kann.

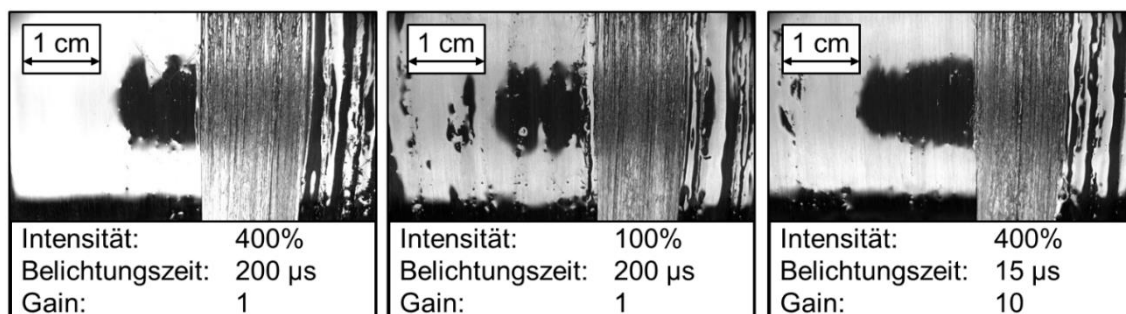


Bild 8: Vergleich der Bildhelligkeit bei unterschiedlichen Belichtungsparametern bei einer Wickelgeschwindigkeit von $v = 0,1$ m/s

Bildwiederholrate

Die verwendete Kamera ermöglicht eine Bildwiederholrate von maximal 163 fps. Bedingt durch eine begrenzte Übertragungs- und Speichergeschwindigkeit des Computers wird diese im realen Anwendungsfall jedoch auf 85 fps reduziert. Aus den Berechnungen in Kapitel 3.2 ergibt sich eine Forderung nach einer minimalen Bildwiederholrate von 33 fps bei einer anlagenbedingt maximalen Wickelgeschwindigkeit von $v = 0,959$ m/s und einer angenommenen minimalen Defektgröße von 30 mm. Für den industriellen Einsatz bei Wickelgeschwindigkeiten von ca. $v = 2$ m/s ergibt sich eine minimal geforderte Bildwiederholrate von 67 fps. Folglich liegt die effektive Bildwiederholrate des hier verwendeten Kamerasystems für jeden Anwendungsfall oberhalb des geforderten Minimums.

4.2 Bildverarbeitungsalgorithmus zur Bestimmung der Faserbandkanten

Der nachfolgend beschriebene Bildverarbeitungsalgorithmus verfolgt das Ziel einer automatisierten Fehlererkennung bei der Faserbandablage auf dem Wickelkörper. Als Fehler werden hierbei Lücken und Überlappungen sowie Winkelabweichungen der Faserbandkanten betrachtet. Für einen ausreichenden Kontrast zur präzisen Kantenbestimmung müssen jedoch zuvor einige Schritte zur Bildvorverarbeitung unternommen werden.

4.2.1 Bildvorverarbeitung

Als Grundlage für eine schnelle und präzise automatisierte Bildverarbeitung muss bereits bei der Bildaufnahme eine bestmögliche Kontrastierung und Auflösung sichergestellt sein. Nichtsdestotrotz müssen die erfassten Bilder zur

Kantendetektion zunächst vorverarbeitet werden. Dazu werden verschiedene Schritte durchgeführt, deren jeweiliger Effekt qualitativ in Bild 9 dargestellt ist.

Schritt 1: Verkleinerung

Die Bildaufnahme hat eine Größe von 2448 px x 2048 px mit einer Auflösung von 48 $\mu\text{m}/\text{px}$ und ist damit deutlich größer als notwendig. Eine Verkleinerung des Bildes auf eine Breite von 800 px (Faktor 3,06) ist für die Fehlererkennung ausreichend und führt zu einer höheren Rechenleistung (verarbeitbare Bilder pro Zeiteinheit) und geringerem Speicherbedarf.

Schritt 2: Histogrammausgleich

Im nächsten Schritt wird ein Histogrammausgleich aus der Open-Source-Bibliothek „OpenCV“ angewendet, welcher die Häufigkeit der 256 Grauwerte des 8-bit Bildes darstellt. Diese Funktion gleicht die Helligkeitsverteilung des Originalbildes an eine Gleichverteilung an und erhöht den sichtbaren Kontrast deutlich.

Schritt 3: Binarisierung

Nach dem Schwellwertverfahren wird anschließend für jeden Pixel anhand einer Binarisierungsschwelle von 150 entweder der Wert 0 (schwarz) oder 255 (weiß) zugewiesen. Dieser Grenzwert wurde in Vorversuchen ermittelt.

Schritt 4: Gaborfilter

Bei einem Gaborfilter handelt es sich um einen Bandpassfilter aus der Gruppe der Quadraturfilter [28]. Abhängig von dessen Einstellparametern ergeben sich für unterschiedliche Texturen im Bild unterschiedliche Resonanzen, sodass gegebenenfalls vorhandene Texturen erkannt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall entsteht eine Textur im Bild durch die größtenteils vertikal verlaufenden Kohlenstofffasern. Der Gaborfilter hebt folglich Pixelgruppen hervor, die in vertikalen Linien im Bild angeordnet sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Kohlenstofffaser darstellen.

Schritt 5: Vordergrundextraktion

Durch die Anwendung einer Vordergrundextraktion werden letztendlich alle bewegten Objekte eines Bildes hervorgehoben und die statischen Bereiche ausgeblendet. Die Anwendung dieser Methodik hat sich in den Voruntersuchungen als hilfreich erwiesen und wurde daher in den Algorithmus implementiert. Da allerdings bei einer qualitativen Betrachtung der Kontrastierung kein signifikanter Unterschied zum Bild nach Schritt 4 erkennbar ist, sollte die Notwendigkeit der Vordergrundextraktion kritisch untersucht werden.

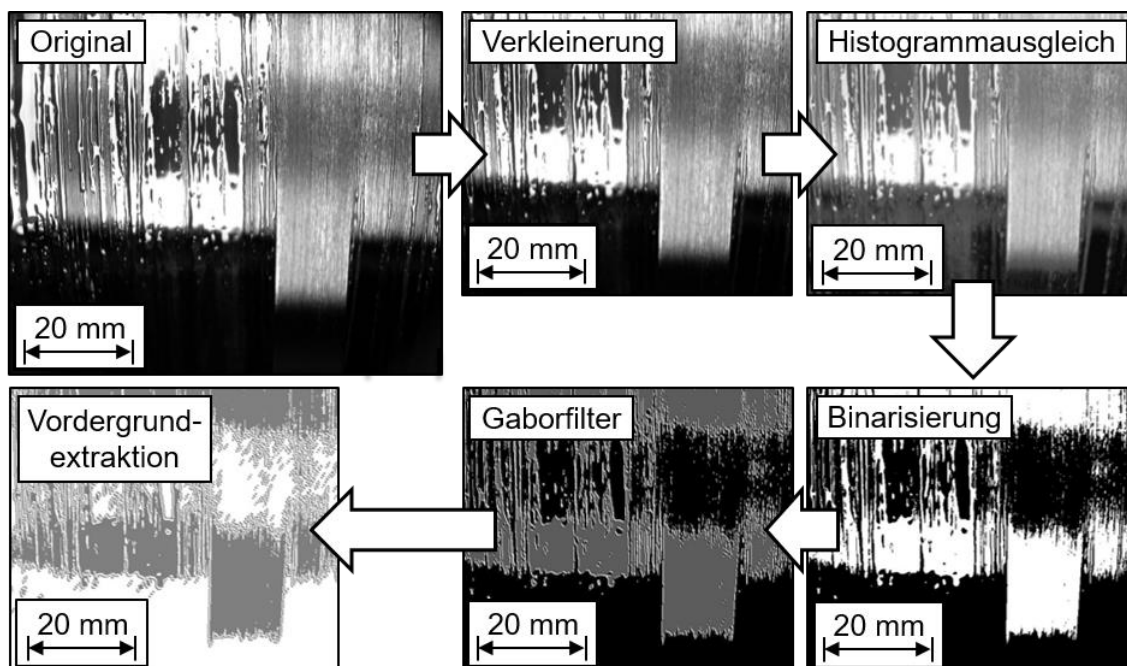


Bild 9: Ablauf der Bildvorverarbeitung zur Erfassung der Faserbandkanten

4.2.2 Spreizungsfaktor

Da vor dem Ablagepunkt gemessen wird, muss die erwartete Faserbandspreizung durch einen empirischen Faktor eingerechnet werden. Zur Ermittlung des Spreizungsfaktors wurde anhand von 30 Bildern die Faserbandbreite manuell in zwei Positionen vermessen, Bild 10. Position 1 stellt die spätere Messposition dar und liegt deutlich vor dem Ablagepunkt (Zeile 1400). Position 2 befindet sich direkt am Ablagepunkt, wo sich die Faserbandbreite deutlich gesteigert hat. Da an dieser Position aufgrund eines zu geringen Kontrastes keine automatisierte Messung möglich ist, wird die Faserbandbreite manuell bestimmt. Aus den Mittelwerten dieser 30 Messungen kann der Spreizungsfaktor S zu 1,05 berechnet werden, Tabelle 3. Hieraus resultiert, dass an der Messposition die Faserbandbreite im Vergleich zum Ablagepunkt um ca. 5 % unterschätzt wird. Bei einer Faserbandbreite von ca. 10 mm resultiert hieraus ein Messunterschied von einem halben Millimeter.

Die Notwendigkeit eines Spreizungsfaktors wirkt sich negativ auf die Messgenauigkeit des Systems aus, da das Toleranzfeld ebenfalls um den Wert des Spreizungsfaktors erhöht wird. Aus diesem Grund sollte zukünftig geprüft werden, inwieweit die Distanz zwischen Mess- und Ablagepunkt reduziert werden kann.

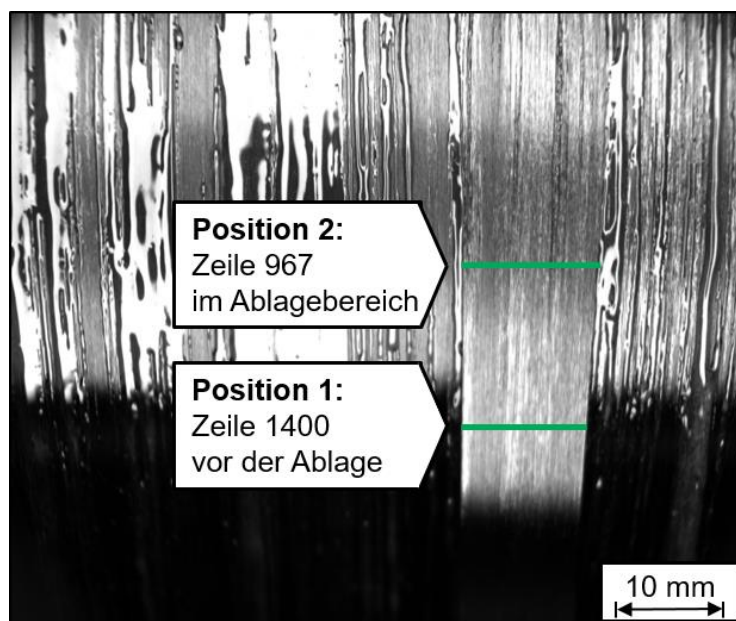


Bild 10: Positionen der Bandbreitenbestimmung zur Berechnung des Spreizungsfaktors

Position 1 [Zeile]	Position 2 [Zeile]	Mittelwert Position 1 [px]	Mittelwert Position 2 [px]	Spreizungs- faktor [-]
1.400	967	413,20	437,56	1,05

Tabelle 3: Berechnung des Spreizungsfaktors anhand von empirisch ermittelten Faserbandkanten vor und am Ablagepunkt

4.2.3 Methodik der Fehlererkennung

Vor Beginn der eigentlichen Fehlererkennung wird eine „Region of interest“ (ROI) definiert und aus dem Bild geschnitten, wodurch sich die analysierte Datenmenge reduziert und deren Verarbeitungsgeschwindigkeit erhöht. Die ROI muss geringfügig größer als die Fläche des einlaufenden Faserbandes im Bild sein, um dessen linke und rechte Kante zu beinhalten. Da sich die Position des einlaufenden Faserbandes innerhalb des Prozesses verändern kann, wird eine automatisierte Verfolgungsfunktion in Form eines „Kernelized Correlation Filter-Trackers“ (KCF-Tracker) eingesetzt, welche die ROI in jedem Bild aktualisiert. Dieser Algorithmus eignet sich durch seine effiziente Methodik für einfache Verfolgungsaufgaben mit hohen Bildwiederholungsraten [29].

Für die Bestimmung der Faserbandbreite durch Detektion der Bandkanten wird das Schwellwertverfahren genutzt. Zeilenweise wird in der ROI das erste und letzte Pixel mit dem Wert 0 (schwarz) ermittelt und deren Abstand in x-Richtung berechnet.

Zur Bestimmung der Kantenwinkel an der linken und rechten Seite des Faserbandes werden die zuvor ermittelten Bandgrenzen herangezogen. Das erste schwarze Pixel aus Zeile 1 wird mit dem ersten schwarzen Pixel aus Zeile 10 verbunden und damit die linke Bandkante bestimmt. Analog dazu kann die rechte Bandkante ermittelt werden. Die numerischen Werte beider Winkel werden mit Hilfe einer horizontalen Verbindungslinie zwischen den beiden Pixeln aus Zeile 10 berechnet.

Um die Entstehung von Wickelfehlern aus den ermittelten Daten automatisiert zu erkennen, ist eine Definition von Grenzen zur Einteilung der Daten in die Klassen „Fehler“ und „Kein Fehler“ erforderlich. In Anlehnung an die Untersuchungen von *Rach* und *Ivanovskii* wird ein Fehler ab einer Abweichung der angenommenen Faserbandbreite im Wickelprogramm von 10 mm ab 5 % bzw. 0,5 mm gemeldet.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Fehlerklassifizierung bei Winkelabweichungen des Faserbandes. Diese können aktuell zwar fortlaufend erfasst und festgehalten, jedoch noch nicht in Fehler eingeteilt werden.

4.2.4 Validierung mit manuellen Messungen

Als entscheidendes Beurteilungskriterium für die Qualität des Bildverarbeitungsalgorithmus wird die Genauigkeit der automatisierten Messung der Faserbandbreite herangezogen. Dafür wurde bei 60 Originalbildern mit einer Größe von 2448 px x 2048 px die Grenzen des Faserbandes in Zeile 1.400 manuell bestimmt und anschließend die Breite berechnet und mit dem Spreizungsfaktor von 1,05 multipliziert. Die mittlere Faserbandbreite dieser 60 Bilder beträgt 11,67 mm bei einer Standardabweichung von 0,31 mm.

Anschließend wurde die Faserbandbreite derselben Bildserie durch den Bildverarbeitungsalgorithmus in Zeile 467 bestimmt. Diese Zeile entspricht im vorbereiteten und daher komprimierten Bild in etwa der Auswerteposition der manuellen Messung. Eine Auswertung in derselben Zeile konnte nicht realisiert werden, da die ROI im ersten Bild händisch ausgewählt werden muss und daher keine exakte Zeilenwahl möglich ist. Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass die Breitenabweichung bei einem Abstand der Auswerteposition von 10 - 20 Zeilen im Bereich weniger Pixel und damit unter 0,1 mm liegt, was im Rahmen dieser Analyse als hinnehmbar erachtet wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Versuch	Mittelwert [mm]	Standardabweichung [mm]
Manueller Messwert	11,67	0,31
Automatisierte Auswertung	11,59	0,92

Tabelle 4: Validierung der ermittelten Faserbandbreite des Bildverarbeitungsalgorithmus im Vergleich zur manuellen Referenzmessung

4.3 Echtzeitfähigkeit des Messsystems

Die Geschwindigkeit des Algorithmus ist neben der Rechenleistung des bearbeitenden Computers unter anderem abhängig von der Größe der Bildaufnahmen und der Übertragungsgeschwindigkeit der Daten. In der aktuellen Konfiguration wurden die Versuche mit 85 fps durchgeführt, sodass zwischen zwei Bildern etwa 0,0118 Sekunden vergehen.

Die Bewertung der Geschwindigkeit des Algorithmus erfolgte mit einer Laufzeitmessung durch das „timeit“-Modul in Python dar. Hierzu wurde die finale Konfiguration des Algorithmus mit einem Dateipfad mit 100 Bildern verknüpft und durch das „timeit“-Modul über zehn Iterationen gemessen. Hierbei schwankten die Ergebnisse abhängig von der Auslastung des Messrechners. Die Ergebnisse der zehn Messreihen reichen von 9,58 Sekunden bis zu 19,31 Sekunden, was einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 5 - 10 fps entspricht.

Damit sich der vorgestellte Algorithmus für inline-Qualitätskontrollen in Echtzeit eignet, muss die verarbeitete Bildrate über der Aufnahme rate der Kamera von 85 fps liegen. Da dies aktuell nicht der Fall ist, muss die Auswertegeschwindigkeit in weiteren Forschungsarbeiten optimiert werden. Potenziale liegen beispielsweise in einer weiteren Verkleinerung der ROI in Faserbandlängsrichtung zur Beschränkung auf den minimal notwendigen Bildbereich. Des Weiteren sollten die eingesetzten Methoden zur Bildvorverarbeitung hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und gegebenenfalls ihrer Notwendigkeit untersucht werden.

4.4 Vergleich der Messsysteme mit Industrie- und Infrarotkamera

In *Hopmann et al.* [6] wurde die Faserbandkantenerkennung im Nasswickelverfahren mittels einer Infrarotkamera vorgestellt. Die Kontrastierung des Bildes entsteht dabei durch den Temperaturunterschied zwischen dem vergleichsweise warmen einlaufenden Faserband und dem bereits abgekühlten Untergrund des Wickelkörpers.

Die eingesetzte Infrarotkamera des Typs A655sc der Fa. FLIR Systems Inc., Wilsonville, USA, weist eine Auflösung 170 $\mu\text{m}/\text{px}$ bei einem Arbeitsabstand von 250 mm und eine maximale Bildwiederholrate von 50 fps auf. Analog zur hier vorgestellten Industriekamera wird die Infrarotkamera rechtwinklig über dem Ablagepunkt positioniert. In den folgenden Unterkapiteln werden relevante Unterschiede bezüglich Bilderfassung und Prozessintegration zwischen beiden Kamerasystemen erläutert.

Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit beider Systeme wird durch Auflösung der Kombination aus Kamera und Linse bestimmt. Im Vergleich zum Infrarotkamarasystem aus *Hopmann et al.* [6] mit einer Auflösung von 170 $\mu\text{m}/\text{px}$ weist die hier vorgestellte Industriekamera eine deutlich geringere Auflösung von 48 $\mu\text{m}/\text{px}$ auf. Die

Messgenauigkeit der Industriekamera ist also mehr als dreimal so hoch wie die der Infrarotkamera.

Aussagekraft der Bildaufnahmen

Aufgrund des mangelhaften Kontrastes zwischen Faserband und Wickelkörper kann die hier vorgestellte Industriekamera ausschließlich für Messungen vor dem Ablagepunkt eingesetzt werden. Demgegenüber basiert die Kontrastierung bei der Infrarotkamera auf dem Temperaturunterschied zwischen den benannten Elementen, weshalb eine Faserbandkantenbestimmung auch noch hinter dem Ablagepunkt durchgeführt werden kann [6]. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass sich die Faserbandbreite durch mechanische Spreizungsvorgänge im Umfeld des Ablagepunktes erhöhen kann. Ausschließlich mit der Infrarotkamera ist eine Faserbandbreitenmessung nach dem Ablagepunkt und daher mit Einschließung der Spreizung möglich. Der Einfluss von Spreizungsvorgängen auf die Faserbandbreite bis zum Ablagepunkt wird bei der hier vorgestellten Industriekamera durch einen empirischen Faktor berücksichtigt, in dem jedoch mögliche Änderungen der Bandbreite nach dessen Ablage auf dem Wickelkörper nicht enthalten sind. Es muss geprüft werden, inwieweit ein konstanter Wert auch bei wechselnden Prozessbedingungen oder Wickelwinkeln präzise Ergebnisse liefert. Weiter kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage darüber getroffen werden, ob der ermittelte Spreizungsfaktor auf nachfolgende Wickelkörper übertragen werden kann oder angepasst werden muss. Insgesamt weisen die Bildaufnahmen des Infrarotmesssystems somit eine deutlich höhere Realitätsnähe als die der Industriekamera auf.

Verarbeitung der Bildaufnahmen

Signifikante Unterschiede zwischen den Kamerasystemen bestehen in den Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Bildaufnahmen. Während für Industriekameras zahlreiche öffentliche Auswertelgorithmen auf Basis etablierter Softwareprodukte und Programmiersprachen, wie MATLAB® oder Python™, zur Verfügung stehen, müssen diese für die weniger verbreiteten Infrarotkameras meist eigenständig und bedarfsgerecht programmiert werden. Der dadurch entstehende Aufwand erhöht den oben erwähnten Kostenunterschied zwischen den Systemen.

5 Fazit und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurden die Forschungsarbeiten zur Entwicklung einer inline-fähigen Prozesskontrolle für das Nasswickelverfahren mittels optischer Bildgebung vorgestellt. Ziel ist dabei die Ermittlung von oberflächlich auftretenden Fehlern, wie Lücken und Überlappungen, am Beispiel des zylindrischen Bereichs von Typ-IV Druckbehältern.

Zunächst wurden die Anforderungen an das Kamerasystem zur Lösung der Messaufgabe hinsichtlich dessen Positionierung sowie den Objektiv- und

Belichtungseinstellungen definiert. Unter strenger Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde ein leistungsfähiges Kamerasystem in eine Wickelanlage integriert und die Qualität der erfassten Bildaufnahmen diskutiert. Dabei wurde festgestellt, dass mit dem vorliegenden Objektiv ein Kompromiss zwischen Auflösung und Tiefenschärfe geschlossen werden muss. Weiterhin ist die aktuell notwendige Belichtungszeit auf Grund der begrenzten Lichtintensität der LED-Beleuchtung zu hoch, um die Anforderungen an die Bilderfassung zu erfüllen. Die Verwendung einer Lichtquelle mit höherer Belichtungsintensität im Zusammenspiel mit einer softwareseitig eingestellten künstlichen Aufhellung (Gain-Faktor) ermöglicht höhere Wickelgeschwindigkeiten. Das Faserband wurde vor der Ablage auf dem Wickelkern vermessen, sodass der Kontrast zum Untergrund ausreichend hoch ist und die Bandkanten sicher erfasst werden können. Der Spreizungseffekt des Faserbandes wurde mithilfe eines empirisch ermittelten Faktors berücksichtigt.

Anschließend wurde ein Bildverarbeitungsalgorithmus zur automatisierten Berechnung von Faserbandbreite und -kantenwinkel vorgestellt. Die erfassten Bilder müssen dafür zunächst mehrere Vorverarbeitungsschritte zur Fokussierung auf eine „Region of interest“, zur Binarisierung der Grauwerte und deren Texturfiltrierung durchlaufen. Im Anschluss kann über das Schwellwertverfahren neben der Faserbandbreite auch der Kantenwinkel ausgegeben werden. Nach einer Definition von geeigneten Grenzen können die erfassten Werte hinsichtlich einer Klassifizierung als Fehler eingeteilt werden. Aktuell ist der Algorithmus hinsichtlich der Bildaufnahme rate der Kamera von 85 fps noch nicht echtzeitfähig. Es existieren jedoch verschiedene aussichtsreiche Ansatzpunkte zur Erhöhung der Auswertegeschwindigkeit.

Zuletzt wurde das hier vorgestellte Messsystem auf Basis einer Industriekamera mit einem bestehenden System aus Vorarbeiten verglichen, welches eine Infrarotkamera zur Bildaufnahme nutzt. Dabei wurden deutliche Unterschiede hinsichtlich der Bilderfassung und Prozessintegration festgestellt und erläutert. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die ausgegebenen Qualitätsdaten des Infrarotmesssystems zwar, dank der Fähigkeit zu einer Kantenbestimmung nach erfolgter Faserbandablage, einer höheren Realitätsnähe entsprechen, das Kamerasystem allerdings mehr als siebenmal so teuer in der Anschaffung ist wie das Industriekamerasystem. Hinzu kommen hohe Kosten zur Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus. Im vorliegenden Fall betragen die Investitionskosten der Infrarotkamera etwa 5 % der Kosten einer Wickelanlage, weshalb der finanzielle Aufwand in Relation zum Nutzen des Messsystems kein Ausschlusskriterium darstellt. Zusammenfassend empfiehlt es sich, das Infrarotmesssystem zu Forschungszwecken und das System auf Basis der Industriekamera für die Serienfertigung einzusetzen.

Diese Forschungsarbeit liefert aussichtsreiche Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Technologie zu einer vollumfänglichen Lösung zur Qualitätskontrolle bei der Fertigung von Typ-IV Druckbehältern im Nasswickelverfahren. Zukünftig soll das Messsystem auf Basis der Industriekamera in eine roboterbasierte Wickelanlage der Fa. Hille Engineering, Roetgen, integriert

werden, Bild 11. Dabei kann in umfangreichen Maße der Einfluss verschiedenster Prozessparameter auf die Auswertegenauigkeit des Messsystems analysiert werden. Dank der Freiheitsgrade der Anlage bezüglich einstellbarer Bewegungen der verschiedenen Achsen können verschiedenste Einsatzszenarien untersucht werden. Vor dem Hintergrund dieser Forschungsarbeit soll die Eignung des Messsystems erstmals auch im Polkappenbereich von Druckbehältern analysiert werden. Mittels der ausgegebenen Daten von Roboter- und Wickelachsenposition sowie denen des Messsystems wird ein Soll-Ist-Abgleich der Faserbandposition durchgeführt und in einer 3D-Rekonstruktion des Druckbehälters visualisiert. Dieser digitale Zwilling liefert wichtige Erkenntnisse bezüglich des realen Lagenaufbaus und kann dadurch zur realitätsgetreuen Simulation der Behältereigenschaften sowie zur Optimierung des Laminat-aufbaus herangezogen werden.

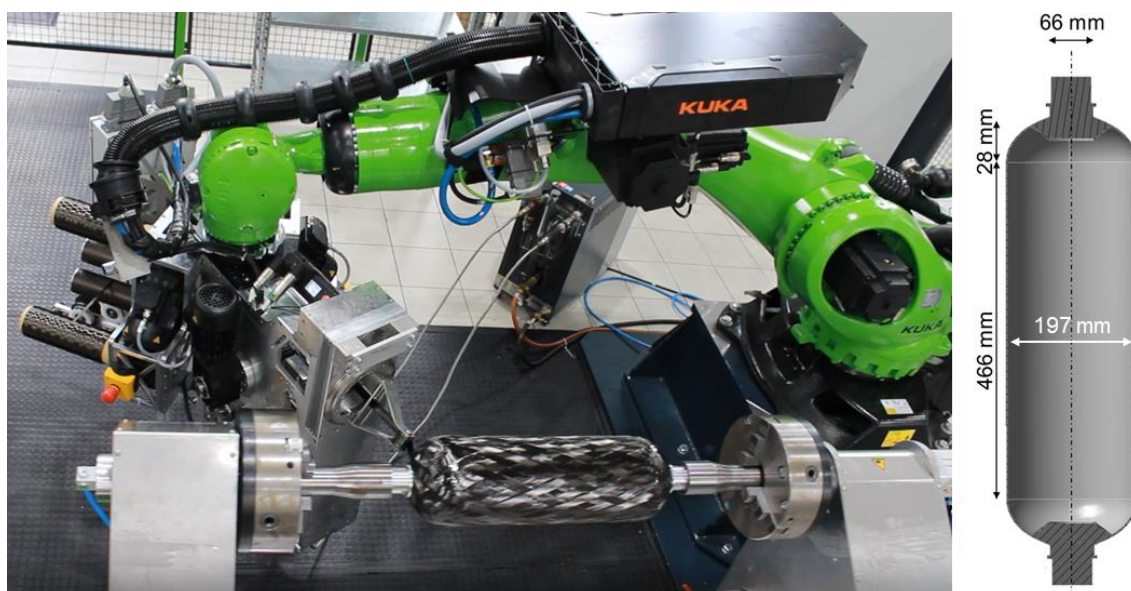


Bild 11: Roboterbasierte Wickelanlage des IKV zur Bauteilfertigung im Nass-, Trocken- oder Towpregwickelverfahren und Linergeometrie

6 DANKSAGUNG

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unter dem Förderkennzeichen 03B10104D gefördert. Die Autoren bedanken sich beim BMVI, dem Projektträger Jülich (PtJ) und der Now GmbH für die Unterstützung sowie allen Projektpartnern (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), BMW AG, cellcentric GmbH & Co. KG, Elkamet Kunststofftechnik GmbH, Ford-Werke GmbH, ISATEC GmbH, NPROXX Jülich GmbH, Teijin Carbon Europe GmbH) für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2. Auflage
Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [2] Arena, F.; Spera, D.; Laguardia, F. What's in the future for fuel cell vehicles?
Firmenschrift der Arthur D. Little Partnership, Brüssel, 2017
- [3] Franzen, J.; Maus, S.; Potzel, P. Hydrogen Storage in Vehicles
In: Hydrogen science and engineering
Wiley-VCH, Weinheim, 2016
DOI: 10.1002/9783527674268.ch28
- [4] Hua, T.; Ahluwalia, R.; Peng, J.-K.; et al. Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications
Amtsblatt des U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, Oak Ridge, USA, 2011
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.090
- [5] Hopmann, Ch.; Magura, N.; Müller, R.; et al. Impact of winding parameters on the fiber bandwidth in the cylindrical area of a hydrogen pressure vessel for generating a digital twin
Polymer Composites, Wiley Periodicals LLC, Hoboken, 2022
DOI: 10.1002/pc.26479
- [6] Hopmann, Ch.; Magura, N.; Rozo Lopez, N.; et al. Detection and evaluation of the fibers' deposition parameters during wet filament winding
Polymer Engineering & Science, Wiley Periodicals LLC, Hoboken, 2021
DOI: 10.1002/pen.25649
- [7] AVK – Industrie-vereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 4. Auflage
Springer-Verlag, Wiesbaden, 2013
- [8] Christ, T. K. Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zum Versagensverhalten CFK-umwickelter Kryo-Druckbehälter
Dissertation an der Technischen Universität München, 2017

- [9] Hopmann, Ch.; Otremba, F.; Fischer, K.; et al. New Methods for testing and quality assurance of high-performance FRP
30. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik, Aachen, 2020
- [10] Lasn, K.; Mulelid, M. The effect of processing on the microstructure of hoop-wound composite cylinders
Journal of Composite Materials, SAGE Publications, Thousand Oaks, USA, 2020
DOI: 10.1177/0021998320923139
- [11] Hsiao, H. M.; Daniel, I. M. Effect of fiber waviness on stiffness and strength reduction of unidirectional composites under compressive loading
Composites Science and Technology, Elsevier Ltd., United Kingdom, 1996
DOI: 10.1016/0266-3538(96)00045-0
- [12] Cohen, D.; Mantell, S. C.; Zhao, L. The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength
Composites Part B: Engineering, Elsevier Ltd., United Kingdom, 2001
DOI: 10.1016/S1359-8368(01)00009-9
- [13] Duffner, E.; Gregor, Ch.; Bohse, J. Überwachung der Fertigungsqualität von Faserverbund-Druckbehältern mittels Schallemissionsprüfung
18. Kolloquium Schallemission, Wetzlar, 2011
- [14] Kobayashi, S.; Kawahara, M. Effects of stacking thickness on the damage behavior in CFRP composite cylinders subjected to out-of-plane loading
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier Ltd., United Kingdom, 2012
DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.10.004

- [15] Gerhardt, E.; Marczak, R. J.; Amico, S. C. Numerical-experimental structural instability analysis of composite tubes considering manufacturing parameters and imperfections
Polymer Composites, Wiley Periodicals LLC, Hoboken, 2020
DOI: 10.1002/pc.25921
- [16] Croft, K.; Lessard, L.; Pasini, D.; et al. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier Ltd., United Kingdom, 2011
DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.01.007
- [17] Thor, M.; Sause, M. G. R.; Hinterhölzl, R. M. Mechanisms of Origin and Classification of Out-of-Plane Fiber Waviness in Composite Materials - A Review
Journal of Composites Science, MDPI, Basel, Schweiz, 2020
DOI: 10.3390/jcs4030130
- [18] Kreikemeier, J.; Chrupalla, D.; Khattab, A.; Krause, D. Experimentelle und numerische Untersuchungen von CFK mit herstellungsbedingten Fehlstellen
10. Magdeburger Maschinenbau-Tage, Magdeburg, 2011
- [19] Heinecke, F.; van den Brink, W.; Wille, T. Assessing the structural response of automated fibre placement composite structures with gaps and overlaps by means of numerical approaches.
Tagungsband der 20th International Conference on Composite Materials, Kopenhagen, 2015
- [20] Lan, M.; Cartié, D.; Davies, P.; Baley, C. Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon–epoxy laminates
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier Ltd., United Kingdom, 2016
DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.12.007
- [21] Vasiliev, V. V. Composite pressure vessels: Analysis, design and manufacturing
Bull Ridge Corporation, Blacksburg, 2009

- [22] Schmitt, R.; Mersmann, C.; Schoenberg, A. Machine Vision Industrialising the Textile-Based FRP Production
Tagungsband des 6. Internationalen Symposiums über Bild- und Signalverarbeitung und Analyse (ISPA), Salzburg, 2009
DOI: 10.1109/ISPA.2009.5297720
- [23] Keferstein, C. B.; Marxer, M.; Bach, C. Fertigungsmesstechnik
Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018
DOI: 10.1007/978-3-658-17756-0
- [24] N.N. DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik
Teil 1: Grundbegriffe
Beuth Verlag, Berlin, 1995
DOI: 10.31030/2713411
- [25] Dietrich, E.; Radeck, M. Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7
Carl Hanser Verlag, München, 2015
DOI: 10.3139/9783446443778.fm
- [26] Witte, A. Einsatz optischer Messtechnik zur Qualitäts-sicherung eines Thermoplast-Wickelprozesses für die Faserverbundtankherstellung
Dissertation am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, 2015
- [27] N.N. Online-Tools für die optische Berechnung
URL: <https://www.vision-doctor.com/optik-berechnungen.html>, 21.05.2021
- [28] Jähne, B. Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung
7. Auflage Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012
DOI: 10.1007/978-3-642-04952-1
- [29] Henriques, J. F.; Caseiro, R.; Martins, P.; Batista, J. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 37 (2015) 3, S. 583 - 596
DOI: 10.1109/TPAMI.2014.2345390

Bibliography

DOI 10.3139/O999.01022022
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 18 (2022) 2; page 62–92
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Optische Qualitätskontrolle, Nasswickelverfahren, Bildverarbeitung, Bildverarbeitungsalgorithmus

Keywords:

Optical quality control, filament winding, image processing, image processing algorithm

Autor / author

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
Nadine Magura, M.Sc.
Robert Müller, M.Sc.
Daniel Schneider, M.Sc.
Dr.-Ing. Kai Fischer
Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und
Handwerk an der RWTH Aachen
RWTH Aachen University
Seffenter Weg 201
52074 Aachen

E-Mail: robert.mueller@ikv.rwth-aachen.de
Webseite: www.ikv-aachen.de
Tel.: +49 (0)241/80-28330
Fax: +49 (0)241/80-92262

Herausgeber / Editors**Europa / Europe**

Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe
Technische Universität Hamburg
Denickestr. 15 (K)
21073 Hamburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)40 42878 3038
E-Mail: fiedler@kunststofftech.com

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Institut für Produkt Engineering
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, MA 222
47057 Duisburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)203 379 2500
E-Mail: schiffers@kunststofftech.com

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608 263 9538
E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Jo Lendle, Oliver Rohloff
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
81679 München
Germany
Tel.: +49 (0)89 99830 0
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Janina Mittelhaus, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com / www.plasticseng.com