Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-60

Inline-Messtechnik in kontinuierlichen Produktionsprozessen am Beispiel der Pultrusion

Inline-Messtechnik für kontinuierliche Prozesse

T. Dempfle, L. Kläber, M. Rieger, S. Strauß, A. Kabardiadi-Virkovski, Ch. Taudt

ZUSAMMENFASSUNG Das Projekt PulLoop entwickelt kostengünstige, berührungslose Messsysteme für kontinuierliche Produktionsverfahren wie Pultrusion und Extrusion. Ziel ist die Integration eines optischen Messsystems zur Reduzierung von Ausschuss und zur datengetriebenen Prozessoptimierung. Der Closed-Loop-Ansatz ermöglicht eine effiziente Produktion mit präziser Toleranzdokumentation.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Messtechnik, Faserverbundwerkstoffe

Inline measurement technology for continuous processes - Inline technology for continuous production processes using pultrusion as an example

ABSTRACT The PulLoop project develops cost-effective, contactless measurement systems for continuous production processes such as pultrusion and extrusion. Its goal is to integrate an optical measurement system to reduce waste and optimize processes through data-driven methods. The closed-loop approach enables efficient production with precise tolerance documentation.

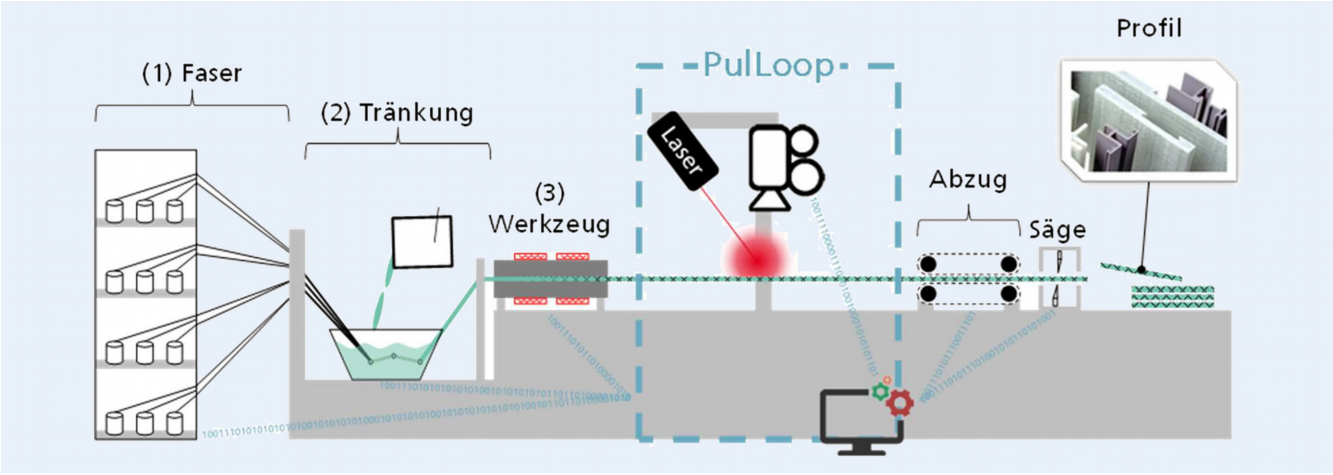

Bild 1. Darstellung einer Pultrusionslinie mit einer schematischen Abbildung des Messaufbaus zur Qualitätskontrolle „PulLoop“. *Grafik: Fraunhofer IGCV*

1 Motivation und Relevanz

Faserverstärkte Kunststoffprofile (FVK) sind für den Leichtbau unverzichtbar. Dabei ist die Pultrusion eines der wirtschaftlichsten Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von FVK [1]. Im Pultrusionsprozess, **Bild 1**, werden zunächst die Verstärkungsfasern (1) mit dem Harzsystem getränkt (2) und anschließend kontinuierlich durch ein temperiertes Formgebungswerkzeug (3) mit der Kontur des späteren Profils gezogen und ausgehärtet. Danach werden die Profile den Anforderungen entsprechend geschnitten.

Pultrusion ist eine Technologie, die im Vergleich zu anderen Faserverbundprozessen mit wenigen €/kg sehr kostengünstig ist [2]. Dadurch ist sie auch für Branchen mit hohem Kostendruck, die von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt sind, international relevant (wie Automotive, Windenergie). Eine unterbrechungsfreie und optimierte Produktion ist daher besonders wichtig. Aufwendige Reinigungs- und Rüstprozesse sind die Folge einer Produktionsunterbrechung, die zu Produktionsausfällen von mehreren Stunden und Tagen führen kann [3]. Daher ist Wissen über die Prozessführung essenziell, insbesondere für kleine Losgrößen, die hauptsächlich von KMU produziert werden. Bedingt durch die hohe Produktionsgeschwindigkeit führen unentdeckte Profilabweichungen zu einer hohen Ausschussrate.

Zur Überwachung und Beurteilung von Faserverbundwerkstoffen während des Produktionsprozesses gibt es eine Reihe an unterschiedlichen Verfahren. Neben Verfahren zur Bestimmung der Oberflächeneigenschaften existieren Verfahren zur Erfassung

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

von Abweichungen [4]. Im Besonderen sind Verfahren bekannt, die den Ablegeprozess einzelner Fasern oder den 3D-Druck von Fasern überwachen [5]. Die Verfahren erfassen in der Regel ein Bild der Oberfläche über entsprechende Kameratechnologie und werten die entstehende zweidimensionale Information auf Fehler oder Abweichungen aus. Bislang fehlt aber eine kostengünstige, objektiv integrierte Qualitätskontrolle, welche eine direkte und verlässliche Rückmeldung über die aktuelle Bauteilqualität in kontinuierlichen Produktionsprozessen wie der Pultrusion ermöglicht. [6]

In Abgrenzung zum Stand der Technik verfolgt das Projekt „PulLoop" den Ansatz, die Oberfläche in dreidimensionaler Weise durch einen optischen Streusensor in Kopplung mit einer kombinierten deterministisch-statistischen Auswertung zu erfassen. Diese Technologie kombiniert kostengünstige Sensorik mit fortschrittlichen Datenauswertungsstrategien, die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen. So wird die Inline-Charakterisierung kontinuierlicher Profile sowie die Closed-Loop-Steuerung auch für den Einsatz in mittelständischen Unternehmen möglich. Die entwickelte Messtechnik trägt zur Steigerung der Qualität pultrudierter Profile bei und beschleunigt gleichzeitig die Einrichtung von Pultrusionsprozessen erheblich.

2 Aufbau einer kostengünstigen optischen Messtechnik für kontinuierliche Produktionsprozesse

Der Aufbau des Messsystems erfolgte anhand ausgewählter Anforderungen im Labormaßstab am Fraunhofer IWS und wurde auf die Pultrusionsanlage des Fraunhofer IGCV transferiert.

2.1 Anforderungsanalyse

Anhand DIN EN 13706 [7] für pultrudierte Profile wurden folgende Anforderungen an das Messsystem formuliert und evaluiert:

- Genauigkeit der Profilbestimmung < 0,1 mm
- Laterale Auflösung entlang des Profils in Zugrichtung: mindestens 1 Höhenschnitt/mm
- Hohe Geschwindigkeit der Profilextraktion (mindestens 60 Hz, um breite Profile oder unterschiedliche Winkel mit mehreren Kameras abzudecken)
- Modulares Messsystem zur universellen Integration in verschiedene Anlagentypen (anpassbare Breite und Höhe zur Anpassung des Messsystems an verschiedene Bauteilgeometrien)
- Modularer Aufbau zur Ansteuerung mehrerer Kameras und Laserquellen
- Datenspeicherung und Übertragung mit marktüblichen Technologien (USB, Ethernet) unter Verwendung offener Netzwerkprotokolle (wie MQTT (Message Queueing Telemetry Transport))
- Auswertung der Streueigenschaften der Oberflächen

Im Verlauf der Anforderungsanalyse wurde die Geschwindigkeit der Profilextraktion als kritischer Faktor identifiziert, da das System skalierbar auf mehrere Kameras ausgelegt werden soll, um verschiedene Perspektiven und größere Profilbereiche abzudecken. Zudem ergab die Analyse der Fehlerarten, dass neben der Profilgeometrie auch die Streueigenschaften der Oberflächen bewertet werden müssen, da nicht alle Fehler zu einer Änderung der Profilgeometrie führen.

2.2 Aufbau des Messsystems

Das im Projekt PulLoop entwickelte Messsystem ist ein modulares und flexibles System, das speziell für die Integration in kontinuierliche Produktionsverfahren entwickelt wurde. Es besteht aus mehreren Messmodulen, welche jeweils einen Linienlaser und eine Kamera mit Objektiv umfassen. Gegenüber am Markt verfügbaren Sensoren, die meist mit dem Ziel konzipiert werden, die Bauteilgeometrie mit einer Präzision von < 0,1 mm zu erkennen, sollen mithilfe dieser kostengünstigen Sensoreinheiten zusätzlich weitere für den Pultrusionsprozess spezifische Merkmale bewertet werden [8].

Die Module sind so konzipiert, dass sie universell in verschiedene Anlagentypen integriert werden können. Sowohl Breite als auch Höhe des Systems sind anpassbar, um den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Produktionsumgebung gerecht zu werden und das Messsystem an verschiedene Bauteilgeometrien anzupassen. Die zentrale Steuerung und Auswertung der Messmodule erfolgt über ein Edge-Device, das eine effiziente Datenverarbeitung sicherstellt. Die Recheneinheit basiert auf einem Jetson-Nano-Modul (Nvidia Corporation), das aufgrund seiner kompakten Bauweise und leistungsfähigen Rechenkapazitäten für die Integration in bestehende Schaltschranksysteme geeignet ist. Dies erlaubt eine nahtlose Einbindung in industrielle Umgebungen, ohne dass umfangreiche Anpassungen erforderlich sind.

Ein wesentlicher Bestandteil des Systems ist die speziell entworfene Platine, welche die Steuerung und Stromversorgung der Laserquellen übernimmt. Diese Platine ist für den Betrieb von bis zu drei Messmodulen ausgelegt, was eine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit des Systems gewährleistet. Mit drei Messmodulen ist es möglich, auch komplexe Geometrien abzudecken. Die Versorgungsspannung beträgt 24 V, und die Integration in Schaltschranksysteme erfolgt über eine Standard-DIN-Hutschiene, um die Installation zu vereinfachen. Die Kommunikation und Datenübertragung zwischen den Modulen und dem Edge-Device erfolgt über marktübliche Technologien wie USB und Ethernet. Es werden offene Netzwerkprotokolle verwendet, um eine flexible Anbindung an die Kommunikationsschnittstellen des Kunden zu erlauben, beispielsweise über MQTT. Dies stellt sicher, dass das System leicht in bestehende IT-Infrastrukturen integriert werden kann und zukunftssicher ist.

Durch zusätzliche Schutzmaßnahmen ist das System vor Ausfällen geschützt. Die Recheneinheit und die Messroutinen können im Falle eines Spannungsabfalls selbstständig neu starten. Durch kontinuierliche Kommunikation des Systems mit einem zusätzlichen Mikrocontroller kann die Funktion der Messroutinen dauerhaft überprüft und auf auftretende Fehler wie Programmfehler oder Netzwerkausfälle automatisiert reagiert werden. So kann eine hohe Resilienz des Systems gegenüber internen und externen Störungen erreicht werden.

Zusätzlich zum Schutz vor Systemausfällen spielt auch die Arbeitssicherheit bei der Inbetriebnahme eines Lasers eine große Rolle. Zum Schutz der Mitarbeitenden muss für das Endprodukt eine Abschirmung gegenüber Augen und Haut erfolgen, sodass hier keine Gefährdung gegeben ist. Dafür wird der Laser durch eine Blende stark abgeschirmt und das Messsystem nach der ersten Testphase eingehaust.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

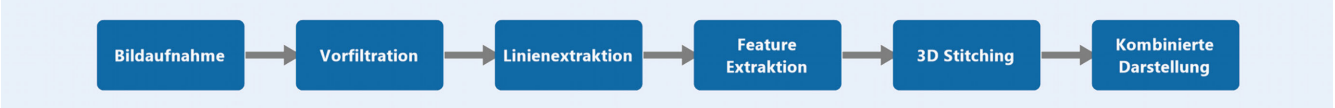

Bild 2. Flussdiagramm zum Ablauf der Auswertung der Bilddateien. *Grafik: Fraunhofer IWS*

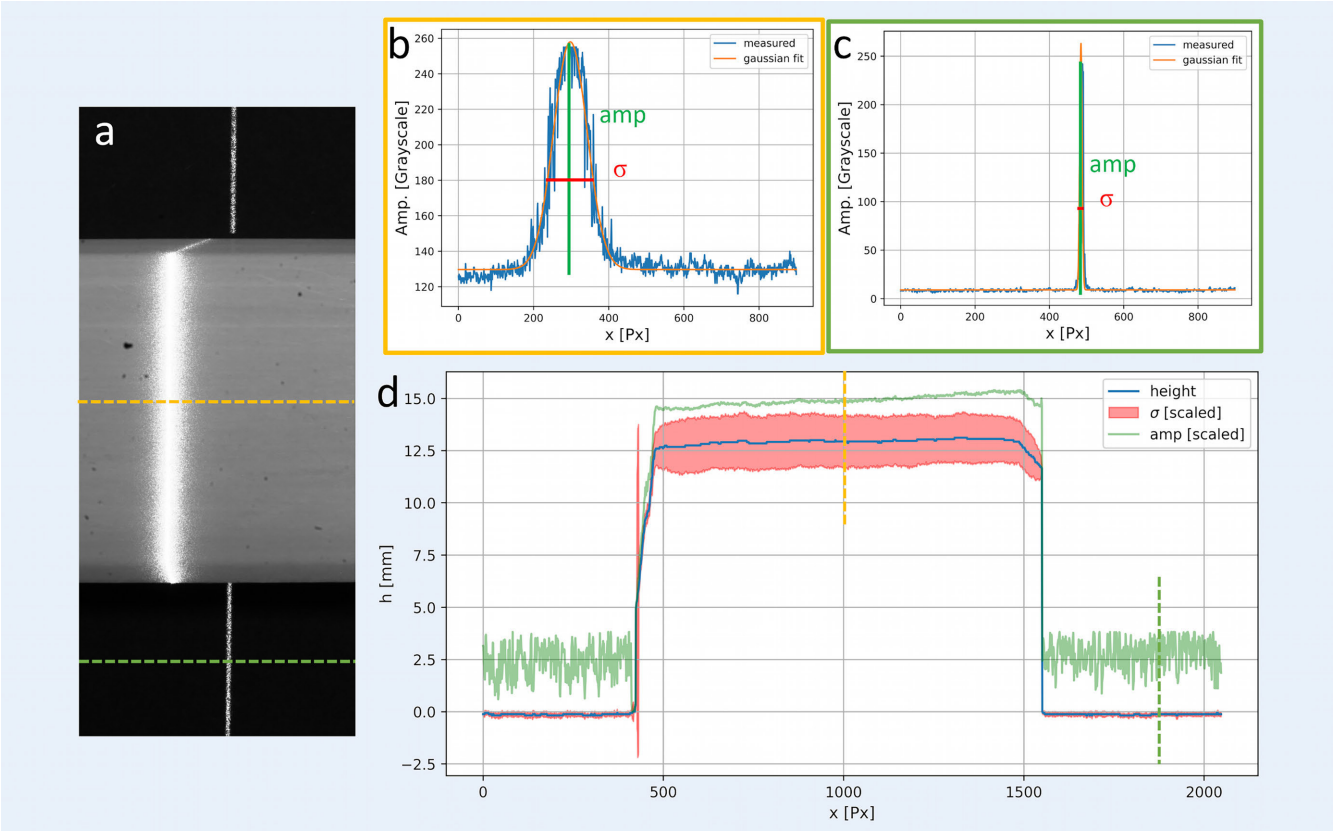

Bild 3. Exemplarische Darstellung eines Testprofils (a) und zweier Linienschnitte (b, c) sowie des extrahierten Profils mit überlagerten Streu- und Amplitudeninformationen (d). *Grafik: Fraunhofer IWS*

2.3 Auswertung der Bilddateien

Der Ablauf der Auswertung ist im Auswerte-Fluss-Diagramm (**Bild 2**) aufgezeigt.

Nach der Datenaufnahme durch das optische Messsystem erfolgt eine Vorfiltrierung der Daten für die Vorbereitung der Analyse. Aus diesen vorverarbeiteten Daten werden im Nachgang die für die Überwachung des Prozesses relevanten Informationen extrahiert. Dabei handelt es sich neben der für die Bestimmung des Höhenprofils herangezogenen Lage des Laserschnittes auch um Informationen über die Breite der Laserlinie. Das sich auf der Oberfläche ergebende Strahlprofil, senkrecht zur Laserlinie, wird als Gauß-Profil angenommen. Basierend auf Kantenerkennungsalgorithmen lässt sich neben der Lage der Laserlinie im Kamerabild auch die Breite dieser Linie σ extrahieren. Diese wird im Wesentlichen durch die Streueigenschaften der beleuchteten Oberfläche beeinflusst. Die Streueigenschaften verändern sich durch unterschiedliche Ablenkung der Laserstrahlung auf dem Profil, sodass sich hieraus Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit gewinnen lassen. Ein Beispiel dieser extrahierten Informationen ist in **Bild 3** dargestellt.

Bild 3 a zeigt das Livebild des aufgenommenen Profils. Neben einer kombinierten Darstellung des Höhenprofils mit Amplituden und Streuinformationen (d) sind auch zwei an unterschiedlichen Stellen extrahierte Linienschnitte dargestellt (b, c). Die Positionen dieser Linienschnitte sind durch die gestrichelten Linien auf dem Livebild (a) und der kombinierten Darstellung (d) in Bild 3 gekennzeichnet. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften ergeben sich insbesondere in der Breite der Laserlinie deutliche Unterschiede. Die Extraktion dieser Parameter erfolgt durch deterministische Algorithmen, die direkt auf dem sich an der Anlage befindlichen Edge-Device implementiert sind. Danach erfolgt die Fehlererkennung, bei der die Profilgeometrie und die Streueigenschaften der Oberfläche bewertet werden, um Produktionsfehler zu identifizieren. Abschließend werden die analysierten Daten gespeichert und über marktübliche Technologien wie USB oder Ethernet übertragen. Mittels Zeitstempel werden die analysierten Daten mit den jeweiligen Produktionsdaten synchronisiert. Gleichzeitig können die über die Kommunikationsschnittstelle zur Verfügung gestellten Prozessdaten, wie die Abzugsgeschwindigkeit, für weitergehende Analysen entweder direkt auf dem sich an der Anlage befindlichen Gerät oder auf zusätzlicher, netzwerkgebundener Hardware mit den Anlagendaten korreliert werden. So wird es möglich prozessbegleitend Datensätze zu erheben und zu erweitern, wie sie vor allem für statistische Auswerteverfahren notwendig sind. Dieses Verfahren ermöglicht eine effiziente und

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-80 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

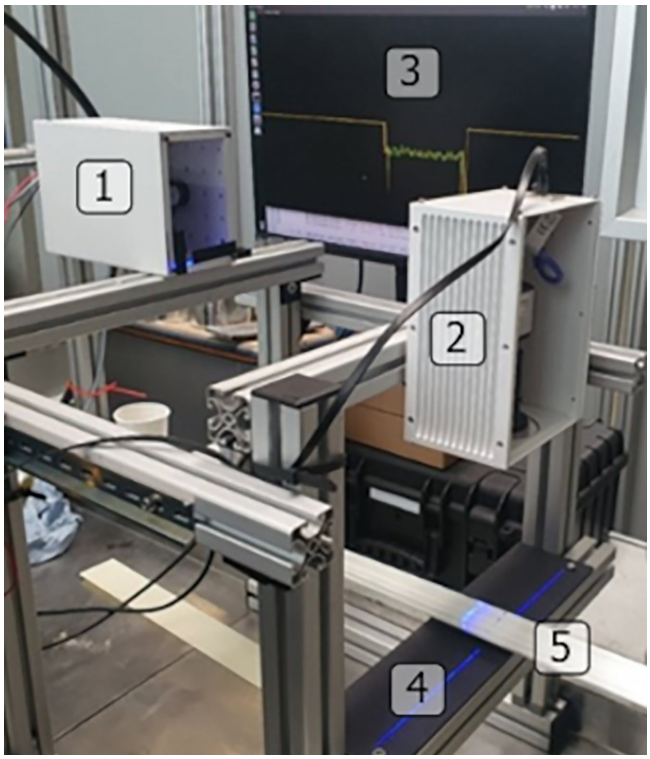

Bild 4. Messung vor Ort an der Pultrusionsanlage des Fraunhofer IGCV. *Foto: Fraunhofer IGCV*

präzise Überwachung der Profilgeometrie und ist besonders vorteilhaft für kontinuierliche Produktionsverfahren.

3 Testmessungen im Pultrusionsprozess

Für Testmessungen im Produktionsprozess wurde der Messaufbau mit einem Messmodul, **Bild 4**, im Pultrusionsprozess am Fraunhofer IGCV getestet.

Dieser Aufbau besteht aus einem Linienlaser (1), einer Kamera (2), einem Bildschirm zur Anzeige der Messung (3) und einer Referenzfläche (4). Zum Test des Messsystems wurden diverse Testreihen für ein glasfaserverstärktes Flachprofil (5) durchgeführt, indem gezielt durch Veränderungen der Produktionsparameter (vor allem der Abzugsgeschwindigkeit und dem Faservolumengehalt) als auch durch Einbringen von Fremdfasern (dunkle Kohlefaser statt heller Glasfaser) Fehlerbilder erzeugt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Fehlerbilder, welche die Streueigenschaften verändern, als auch Geometrieveränderungen, wie sie zum Beispiel durch Einbringen zusätzlicher oberflächennaher Fremdfasern erzeugt wurden, mit den vom Messsystem erfassten Daten korrelieren. Zudem wurde der Einfluss von Störungen überprüft, die extern nur schwer simulierbar sind, wie etwa Lageveränderungen des Profils beim Schließen der Abzugseinheiten.

3.1 Mögliche Fehlerbilder in der Pultrusion

In der Pultrusion lassen sich bestimmte Fehler optisch am Endprodukt erkennen. **Bild 5** zeigt drei Beispiele: Abrieb (1), Imprägnierungsfehler (2) und Deformation (3).

Abrieb ist das am häufigsten auftretende Fehlerbild und kann im Pultrusionsprozess in verschiedenen Formen auftreten. Dazu gehören pulverförmige Harzablagerungen auf der Profiloberfläche (Bild 5, 1), feste Harzablagerungen oder Riefen. Die Ursachen für die Entstehung des Abriebs sind vielfältig und umfassen zum Beispiel einen nicht angepassten Faservolumengehalt, ein für das Harzsystem ungeeignetes Temperaturprofil im Werkzeug sowie Beschädigungen oder Ablagerungen auf der Werkzeugoberfläche. Diese Faktoren können die Oberflächenqualität erheblich beeinträchtigen und zu einer erhöhten Ausschussrate führen, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt und korrigiert werden.

Imprägnierungsfehler können einerseits durch das Vorhandensein von trockenen Fasern auf der Oberfläche (Bild 5, 2), sowie durch Risse im Profil identifiziert werden. Diese Fehler können

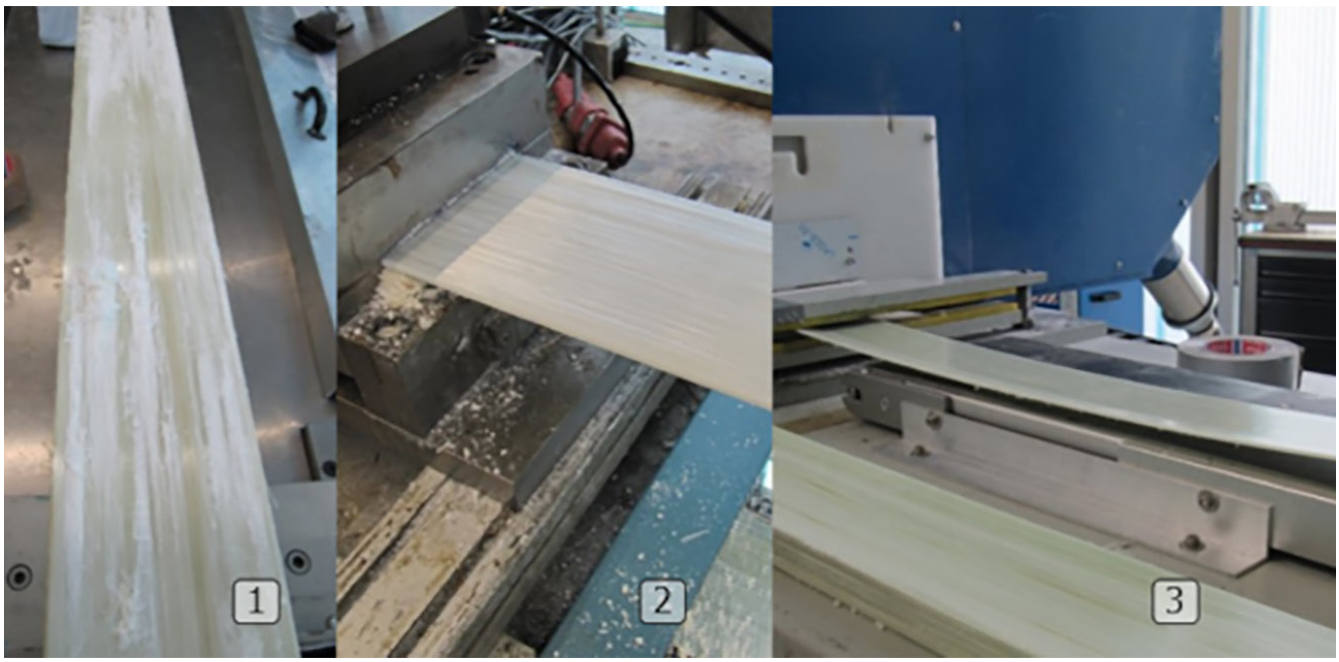

Bild 5. Potenzielle Fehlerbilder in der Pultrusion. *Foto: Fraunhofer IGCV*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-80 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

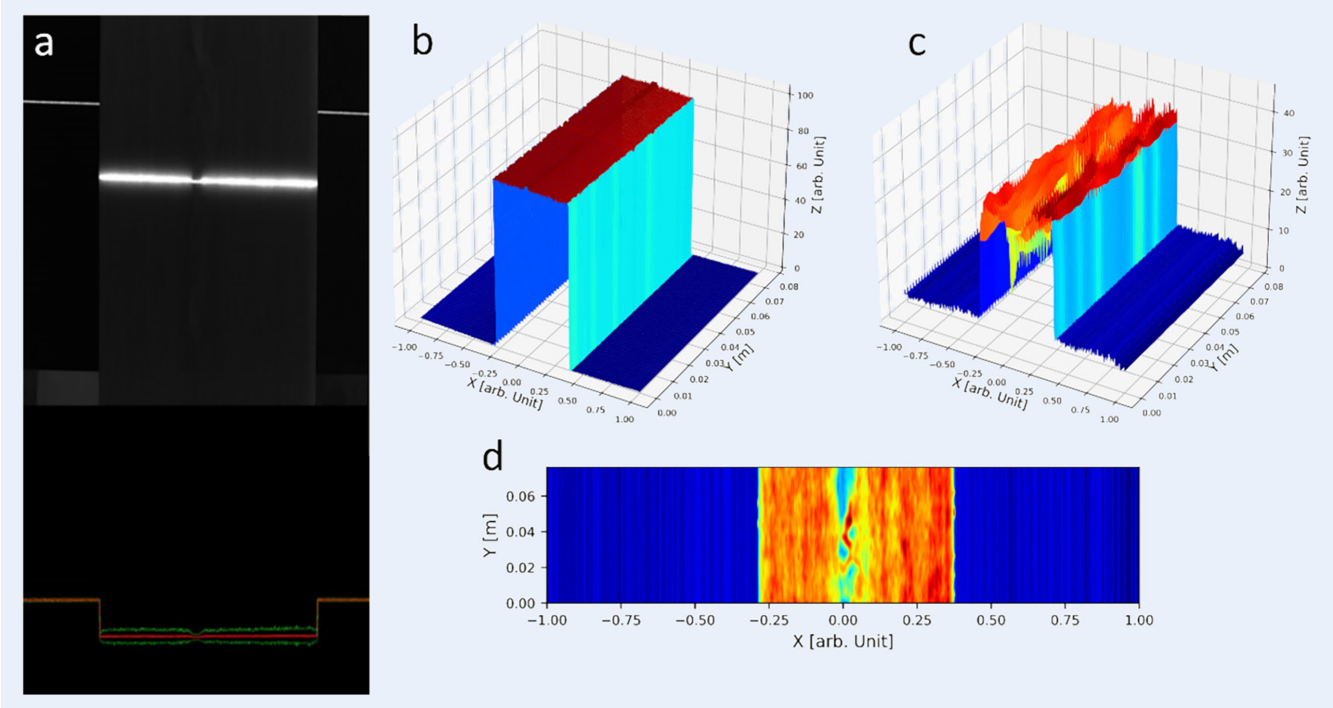

Bild 6. Auswertung des Fehlerbild einer eingebrachten Fremdfaser; (a) Ausschnitt des Livebildes bei der Messung an der Anlage, (b) extrahiertes Höhenprofil, (c) extrahierte Streuinformation und (d) 2D Darstellung beziehungsweise Draufsicht auf die extrahierten Streuinformationen. *Grafik: Fraunhofer IWS*

beispielsweise auf eine zu hohe Viskosität des Harzsystems bei einer zu hohen Produktionsgeschwindigkeit, einen zu niedrigen Druck in der Imprägnierungskammer oder einen zu hohen Faservolumengehalt zurückgeführt werden. Solche Imprägnierungsfehler können die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts erheblich beeinträchtigen und erfordern daher eine sorgfältige Überwachung und Anpassung der Prozessparameter.

Eine Deformation kann durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten zwischen Faser und Matrix des Profils entstehen. Zudem kann eine fehlerhafte Faserverteilung zu einer Deformation führen. (Bild 5, 3). Eine Deformation kann zu Mikrorissen und damit zu strukturellen Schwächen führen, die die Leistungsfähigkeit des Profils unter Belastung beeinträchtigen. [9]

3.2 Fehlerbilder in den Testmessungen

Durch die Analyse des aufgezeichneten Livebildes konnten verschiedene Fehlerbilder untersucht werden. Ein Test zur Validierung der Datenanalyse bestand im Einbringen einer Fremdfaser, konkret einer schwarzen Carbonfaser, die in einem hellen Profil deutlich sichtbar ist (**Bild 6**).

Der obere linke Bereich des Bildes stellt das Livebild des durchlaufenden Profils dar (a). Unter dem Livebild (a) befinden sich entsprechende Livedaten, die aus dem Höhenprofil (rote Kurve) und der Streuung (grüne Kurve) bestehen. Diese Daten werden extrahiert dargestellt in den Diagrammen b (extrahiertes Höhenprofil), c (extrahierte Streuinformationen) und d (Draufsicht auf die extrahierten Streuinformationen. Sie sind entscheidend für die Bewertung der Profilqualität und ermöglichen eine Echtzeitüberwachung des Produktionsprozesses.

Durch Kalibrierung des Systems bezogen auf eine Referenzfläche lässt sich der Abstand der Profiloberfläche zur Referenzfläche im extrahierten Höhenprofil bestimmen, was Rückschlüsse auf die Profilgeometrie zulässt. Derartige Messungen sind von entscheidender Bedeutung für die Einhaltung der Produktspezifikationen und die Sicherstellung der Funktionalität des Endprodukts. Zusätzlich liefern die extrahierten Streuinformationen (**Bild 7**, b) Daten zur Oberflächenbeschaffenheit des Profils. Diese Informationen sind nicht nur für die Qualitätskontrolle wichtig, sondern auch für die Optimierung der Produktionsparameter. Auffällig ist, dass die durch die Carbonfaser herbeigeführte optische Veränderung (schwarze Faser in weißem Profil) der Oberfläche vor allem in den extrahierten Streuinfomationen klar erkennbar ist, während die Auswirkungen auf das resultierende Höhenprofil wesentlich geringer ausfallen.

Typische Fehlerbilder im Pultrusionsprozess beeinflussen, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, die Profiloberfläche. Werden diese Fehlerarten frühzeitig erkannt, kann in den Produktionsprozess eingegriffen und Ausschuss vermieden werden. Durch Bestimmungen der Profilgeometrie, wie in Bild 7 (a) dargestellt, können derartige Fehler nur schwer identifiziert werden. Am besten zeigen sich diese Punktfehler in den extrahierten Streuinformationen (b) durch die starken Ausreißer in der Streuung. Im Oberflächenprofil werden die gemessenen Informationen zusammengefügt, was die Positionierung der Fehlstellen im Profil verdeutlicht.

Besonders problematisch sind die Vibrationen des Profils, die durch die Abzugseinheiten in der Pultrusion hervorgerufen werden. Diese Vibrationen führen dazu, dass das Profil seine Lage in Bezug auf die Referenzfläche verändert. Solche regelmäßigen Vorfälle müssen von der Auswertungssoftware erkannt und eliminiert werden, um die Integrität der Datenanalyse sicherzustellen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-80 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

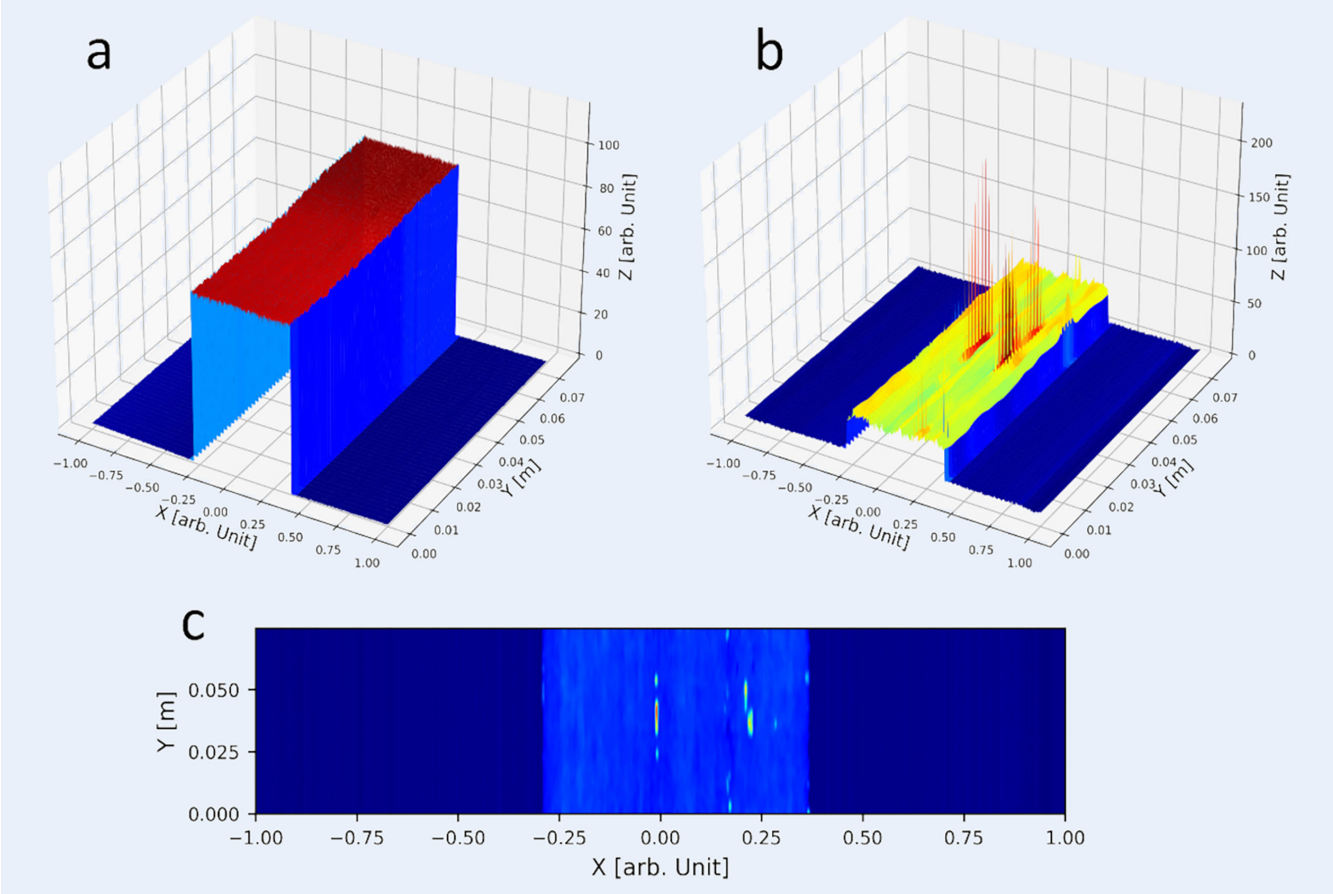

Bild 7. Auswertung des Fehlerbildes von Oberflächendefekten im Pultrusionsprozess. Oben: extrahiertes Höhenprofil (a) und extrahierte Streuinformation (b), unten: 2D-Darstellung beziehungsweise Draufsicht auf die extrahierten Streuinformationen (c). *Grafik: Fraunhofer IWS*

4 Ausblick

Die Auswirkung verschiedener auftretender Fehlerbilder auf die Messsignale konnte demonstriert werden (Bild 6 und Bild 7). Durch Nutzung deterministischer Auswerteroutinen können Anomalien in den Daten identifiziert werden, welche auf potenzielle Fehler hinweisen. Die Bewertung der Streueigenschaften der Oberfläche zusätzlich zu den extrahierten geometrischen Parametern ist besonders vielversprechend zur Erkennung von Fehlerbildern, die keinen nennenswerten Einfluss auf die Bauteilgeometrie haben. Diese Methode erlaubt es, Abweichungen zu identifizieren, die andernfalls unentdeckt bleiben könnten.

Die Entwicklung prädiktiver Algorithmen, welche basierend auf den fortlaufend aufgenommenen Daten Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern zulassen, ist ein weiterer vielversprechender Ansatz. Diese Algorithmen könnten es ermöglichen, proaktiv auf potenzielle Probleme zu reagieren, bevor sie sich auf die Produktqualität auswirken.

Strategien zur Prozessregelung sollen in weiterführenden Arbeiten verfolgt werden, um eine noch präzisere Kontrolle über den Herstellungsprozess zu erlangen. Durch Langzeitversuche an der Pultrusionsanlage sollen hierzu zukünftig Korrelationen zwischen den auftretenden Fehlerbildern und den entsprechenden Produktionsparametern identifiziert werden. Diese Versuche könnten wertvolle Einblicke in die komplexen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Prozessvariablen liefern und dazu beitragen, die Effizienz und Qualität der Produktion weiter zu steigern.

Zur Durchführung der Langzeitversuche wurde an der Pultrusionsanlage des Fraunhofer IGCV eine optimierte Variante des ersten Prototyps aufgebaut. Zusätzlich zur Untersuchung der Messdaten soll getestet werden, ob das Messsystem so in den Produktionsbetrieb integriert werden kann und alle Komponenten dafür ausreichend geschützt sind beziehungsweise ob die Messdaten nicht nur im Testbetrieb zuverlässige Ergebnisse liefern. Als mögliche Probleme wurden zum einen die Staubbildung auf der Profiloberseite detektiert sowie der Carbonfaserflug in FVK-Produktionsumgebungen, der bei elektrischen und elektronischen Bauteilen zu Beschädigungen führen kann.

Literatur

[1] Ahlborn, H.; Bezerra, R.; Middendorf, P. et al.: PulForm – Manufacturing of complex parts by combination of braiding, pultrusion and blowmoulding. Stuttgart: Institut für Kunststofftechnik 2015

[2] Volk, M.; Yuksel, O.; Baran, I. et al.: Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies. Composites Part B: Engineering 246 (2022) #110135

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

[3] Wilhelm, F.; Wedel, A.; Wilfert, J. et al.: Prozessdigitalisierung von Bestandsanlagen. Intelligente Prozessdigitalisierung am Beispiel des Fertigungsverfahrens Pultrusion. wt Werkstattstechnik 112 (2022) 3, S. 154–160. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
[4] Canevarolo, S. V. J.; Gasparini, T. M.; Costa, L. C. et al.: Apparatus for in-line optical detection of low-angle laser light scattering (lalls), use of same and method for real-time morphological monitoring of polyphase systems. Patent WO2017136910 vom 10.02.2017
[5] Xian Jiaotong University: Continuous fiber 3D printing process monitoring method based on artificial intelligence image recognition. Patent CN115457476A vom 09.12.2022
[6] Talabi, S. I.; Tobin, J.; Strom, B. et al.: Recent and future developments in pultrusion technology with consideration for curved geometries: A review. Composites Part B: Engineering 283 (2024), # 111678, S. 13
[7] DIN EN 13706–2:2002. Verstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe – Spezifikationen für pultrudierte Profile – Teil 2. Deutsche Fassung, Ausgabe Oktober 2002
[8] Taudt, C.; Leyens, C.; Hartmann, P. et al.: Darkfield-scattering surface analysis in powder-based AM-processes: analysis of a multi-wavelength approach. Conference LA401: Laser 3D Manufacturing XIII, San Francisco/California USA, 2025, Paper 13354–16
[9] Baran, I.: Pultrusion: State-of-the-art Process Models. Amsterdam: Elsevier Inc 2015

Tobias Dempfle, B.Eng.
tobias.dempfle@igcv.fraunhofer.de
Foto: Autor

Maximilian Rieger, M.Sc.

Dr. Sebastian Strauß

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

Leander Kläber, M.Eng.

Alexander Kabardiadi-Virkovski, M.Eng.

Dr. Christopher Taudt

Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Winterbergstr. 28, 01277 Dresden
www.iws.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY