

Sensorentwicklung zur Inline-Qualitätsüberwachung von Carbonfaser-Rovings

Lukas Lechthaler

**„Sensorentwicklung zur Inline-Qualitätsüberwachung
von Carbonfaser-Rovings“**

**„Sensor Development for Inline Quality Monitoring
of Carbon Fibre Rovings“**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Lukas Lechthaler

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Februar 2023

„Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online
verfügbar.“

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

Univ. Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

Lukas Lechthaler

**Sensorentwicklung zur Inline-Qualitätsüberwachung
von Carbonfaser-Rovings**

Shaker Verlag

Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9018-5

ISSN 1618-8152

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Wesentliche Teile des Inhalts entstanden während des Forschungs-Vorhabens „EddySCARF“ (ZF4558940) der AiF Projekt GmbH im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das ich von 2019 bis 2022 bearbeitet habe. Die Inhalte basieren zum Teil auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University. Ich danke meinem Doktorvater Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries für die Möglichkeit zur Promotion und Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach für die Übernahme des Korreferats und die fachliche Betreuung.

Ein besonderer Dank gilt all meinen Kolleginnen, Kollegen und Freunden, die mich bei der Entstehung der Arbeit unterstützt haben. Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Christoph Peiner, Herrn Dr.-Ing. Thilo Becker, Herrn Felix Pohlkemper und Herrn Stefan Hesseler möchte ich für ihre moralische Unterstützung, den exzessiven Kaffeekonsum und die Hilfe in jeder Lebenslage danken. Auch Dr. Peacock danke ich für seine stets motivierende und aufbauende musikalische Unterstützung. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen meines Bereichs Staple Fibre Technologie für die immer vertrauensvolle, konstruktive und rücksichtsvolle Zusammenarbeit. Zudem danke ich all meinen Studierenden und besonders meinen Hiwis Marie-Isabell Glaubke, Kees Egbers, Pierre Lanfer und Maurice Lanfer für ihre unermüdliche Unterstützung und die gemeinsame Forschung. Auch danken möchte ich Frau Cremer für die vielen guten Gespräche, ihre unerschöpfliche Geduld und das stets wertvolle Feedback.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung meines Bildungswegs und ihre uneingeschränkte Unterstützung. Meiner Schwester Simone danke ich für ihr stets offenes Ohr, ihre Herzlichkeit und jeden gemeinsamen Espresso. Meiner Frau Jaqueline danke ich für ihre grenzenlose Unterstützung, ihre Rücksichtnahme während meiner Zeit am ITA und für den Freiraum, die Promotion abzuschließen.

Aachen, im Februar 2023

gg ez

Kurzfassung

Das EU-Parlament und die EU-Kommission schaffen den rechtlichen Rahmen einer CO₂-neutralen und nachhaltigen Zukunft für Europa. Hierzu trägt die Verwendung von CFK-Strukturbauteilen im Straßenverkehr und in der Luftfahrt bei und führt durch signifikante Gewichtsreduktion zu einem reduzierten CO₂-Ausstoß. Hohe Kosten verhindern derzeit einen flächendeckenden Einsatz von CFK. Um wirtschaftlichen Leichtbau zu ermöglichen und Material und Kosten einzusparen, ist eine genaue Materialkenntnis notwendig. Ein Sensorsystem, das inline eine 100%-Qualitätsüberwachung erlaubt, übernimmt an dieser Stelle eine Schlüsselrolle. In der industriellen Praxis erfolgt die Qualitätsüberwachung dagegen nur stichprobenartig mithilfe sensortechnischer Insellösungen der CFK-Hersteller, die weder standardisiert noch kommerziell verfügbar sind.

Ziel dieser Dissertation ist daher die Entwicklung eines Sensorsystems, das die Inline-Detektion von Filamentbrüchen in CF-Rovings erlaubt. Filamentbrüche stellen eine geeignete Qualitätsmessgröße dar, da sie ein Maß für die Verarbeitbarkeit eines CF-Rovings sind und eine Vielzahl von Folgefehlern verursachen. Zu diesem Zweck wird zunächst das Messprinzip „Wirbelstrom“ als geeignetes Messprinzip identifiziert. Anschließend werden notwendige Zusatzkomponenten entwickelt, wie ein Kameramodul zur Positionskorrektur und ein Druckluftmodul zur Inline-Reinigung, und zu einem multimodalen Sensorsystem kombiniert. In einem nächsten Schritt werden verschiedene Ansätze zur Auswertung der mehrdimensionalen Messgrößen des multimodalen Sensorsystems entwickelt und bewertet. Neben künstlichen, neuronalen Netzen und Machine-Learning-Algorithmen ist vor allem die \bar{x} -Qualitätsregelkarte der klassischen Prozesssteuerung eine geeignete Methode zur Auswertung und Darstellung der Messwerte.

Nutzer der entwickelten Technologie sind CFK-Hersteller und Verarbeiter, die das Sensorsystem als Warenein- bzw. -ausgangskontrolle und entlang der Prozesskette einsetzen. Für beide Nutzergruppen ist die Investition in das Sensorsystem wirtschaftlich sinnvoll und amortisiert sich innerhalb eines Jahres. Der Nutzen des Sensorsystems liegt in der Reduktion zeit- und kostenintensiver Offline-Prüfung und in der Möglichkeit zur schnellen Anpassung der Prozessparameter.

Abstract

The EU Parliament and the EU Commission are establishing the legal framework for a CO₂-neutral and sustainable future for Europe. The use of CFRP structural components in both automotive and aerospace applications contributes to this and leads to reduced CO₂ emissions through significant weight reduction. High costs currently prevent the comprehensive use of CFRP. In order to enable economical lightweight construction and to save material and costs, precise knowledge of the material is crucial. A sensor system that permits 100% quality monitoring inline provides a key role in this regard. In industrial practice, however, quality monitoring is only carried out on a random inspection basis with the help of individual sensor solutions from CF manufacturers, which are neither standardised nor commercially available.

The objective of this dissertation is therefore to develop a sensor system that allows the inline detection of filament breakage in CF rovings. Filament breakage presents a suitable quality parameter, as it is a measurement value of the processability of a CF roving and causes a large number of subsequent defects. For this purpose, the measurement principle "eddy current" is initially identified as a suitable measurement principle. Following this, necessary additional components are developed, such as a camera module for position correction and a compressed air module for inline cleansing, and then are combined to a multimodal sensor system. In a further step, different approaches for evaluating the multidimensional measurement values of the multimodal sensor system will be developed and evaluated. In addition to artificial neural networks and machine learning algorithms, the \bar{x} -quality control chart of the classical process control is a suitable method for evaluating and displaying the measured values.

Users of the developed technology are CF manufacturers and processors, who use the sensor system as an incoming and outgoing goods inspection and along the process chain. For both user groups, the investment in the sensor system is economically viable and amortises within one year. The benefits of the sensor system include the reduction of time-consuming and cost-intensive off-line inspections and the possibility to quickly adapt the process parameters.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation und Motivation der Arbeit | 1 |
| 1.2 | Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit | 6 |
| 1.3 | Vorgehen zur Zielerreichung | 7 |
| 2 | Qualitätssicherung an Carbonfaser-Rovings | 9 |
| 2.1 | Defekte in Carbonfasern | 9 |
| 2.2 | Prüf- und Messtechnik für Carbonfaser-Rovings | 14 |
| 2.2.1 | Genormte Offline-Prüfung | 15 |
| 2.2.2 | Laseroptische Messsysteme | 16 |
| 2.2.3 | Kameraoptische Messsysteme | 18 |
| 2.3 | Identifiziertes Defizit | 20 |
| 3 | Technische Zielsetzung | 22 |
| 4 | Methodische Auswahl des Prüfverfahrens | 24 |
| 4.1 | Definition zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) | 25 |
| 4.2 | Vorauswahl geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren | 26 |
| 4.3 | Kurzbeschreibung geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren | 29 |
| 4.3.1 | Ultraschallprüfung | 29 |
| 4.3.2 | Wirbelstromverfahren | 32 |
| 4.3.3 | Radiografische Prüfverfahren | 37 |
| 4.3.4 | Thermografie | 41 |
| 4.4 | Anforderungen zur Bewertung der vorausgewählten ZfP | 47 |
| 4.5 | Methodische Bewertung der vorausgewählten ZfP | 48 |
| 5 | Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens | 52 |
| 5.1 | Elektromagnetische Grundlagen | 52 |
| 5.2 | Auswertung der Impedanz | 57 |
| 5.3 | Einflüsse auf das Wirbelstromverfahren | 61 |
| 5.3.1 | Leitfähigkeit | 61 |
| 5.3.2 | Frequenz | 61 |
| 5.3.3 | Skin-Effekt | 63 |
| 5.3.4 | Lift-Off | 66 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.5 | Sensortyp | 67 |
| 5.3.6 | Spulengeometrie | 70 |
| 5.3.7 | Wechselwirkungen | 71 |
| 5.4 | Das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren | 72 |
| 5.5 | Messkette des Wirbelstromverfahrens | 75 |
| 5.5.1 | Aufnehmer | 77 |
| 5.5.2 | Anpasser | 77 |
| 5.5.3 | Ausgeber | 79 |
| 5.6 | Stand der Technik, Patentsituation und Stand der Forschung | 80 |
| 5.6.1 | Stand der Technik | 80 |
| 5.6.2 | Internationale Patentsituation | 81 |
| 5.6.3 | Stand der Forschung | 82 |
| 5.7 | Funktionsnachweis | 85 |
| 6 | Zwischenfazit | 87 |
| 7 | Entwicklung des multimodalen Sensorsystems | 89 |
| 7.1 | Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Messsystems | 89 |
| 7.2 | Versuchsaufbau | 91 |
| 7.2.1 | Tribologischer Prüfstand: ITA-Tribometer | 91 |
| 7.2.2 | Prototyp des Wirbelstromsensors | 93 |
| 7.2.3 | Manipulation der Faserschädigung | 94 |
| 7.2.4 | Adaption des Prüfstands | 98 |
| 7.3 | Übersicht der wichtigsten Entwicklungsschritte | 103 |
| 7.4 | Entwicklung einer Inline-Reinigung mittels Druckluftmodul | 104 |
| 7.5 | Verhinderung von Faserablagerungen mittels PTFE-Inlay | 108 |
| 7.6 | Kameraoptische Datenbereinigung | 109 |
| 7.6.1 | Datenbasis und Datenvorverarbeitung | 111 |
| 7.6.2 | Multiple lineare Regression | 113 |
| 7.6.3 | Erweiterung des Regressionsmodells um nichtlineare Terme | 116 |
| 7.6.4 | Bereinigung der Magnitude | 117 |
| 7.6.5 | Validierung bei wechselnder Schädigung | 119 |
| 7.7 | Fazit der Entwicklung des multimodalen Sensorsystems | 120 |
| 8 | Auswertung der multimodalen Messgrößen | 123 |
| 8.1 | Verwendete Datenbasis | 125 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.1.1 | Datensätze mit im Labor manipulierter Schädigung | 125 |
| 8.1.2 | Datensätze mit realer Schädigung auffälliger Spulen | 127 |
| 8.2 | Klassifizierung mittels künstlichen neuronalen Netzen | 128 |
| 8.2.1 | Definition und Motivation | 128 |
| 8.2.2 | Entwicklung eines vorwärts gerichteten neuronalen Netzes | 130 |
| 8.2.3 | Klassifizierung von im Labor manipulierten Schädigungsgraden | 136 |
| 8.2.4 | Klassifizierung von realen Schädigungsgraden | 137 |
| 8.3 | Cluster-Analyse über Machine Learning-Algorithmen | 138 |
| 8.3.1 | Definition und Motivation | 138 |
| 8.3.2 | Vorauswahl eines geeigneten Clustering-Algorithmus | 139 |
| 8.3.3 | Entwicklung eines hierarchischen Cluster-Algorithmus | 142 |
| 8.3.4 | Hierarchische Cluster-Analyse von im Labor manipulierten Schädigungsgraden | 146 |
| 8.3.5 | Hierarchische Cluster-Analyse von realen Schädigungsgraden | 148 |
| 8.4 | Statistische Prozesskontrolle mittels Qualitätsregelkarte | 150 |
| 8.4.1 | Definition und Motivation | 150 |
| 8.4.2 | Auslegung einer Qualitätsregelkarte | 152 |
| 8.4.3 | x-Qualitätsregelkarte für im Labor manipulierte Schädigungsgrade | 156 |
| 8.4.4 | x-Qualitätsregelkarte für reale Schädigungsgrade | 156 |
| 8.5 | Nutzwertanalyse der verschiedenen Auswertungsmethoden | 157 |
| 8.6 | Fazit | 161 |
| 9 | Ausbreitung von Wirbelströmen in Carbonfaser-Rovings | 163 |
| 9.1 | Adaption der klassischen Wirbelstromtheorie | 165 |
| 9.1.1 | Klassische Wirbelstromtheorie | 165 |
| 9.1.2 | Adaption auf Durchlaufsensoren | 166 |
| 9.1.3 | Adaption Werkstoffe mit anisotoper Leitfähigkeit | 168 |
| 9.2 | Ableitung einer Hypothese zum Einfluss der Schädigung auf die elektrische Leitfähigkeit eines Carbonfaser-Rovings | 170 |
| 9.3 | Überprüfung der Hypothese | 172 |
| 9.3.1 | Entwicklung einer Inline-Resistanzmessung | 173 |
| 9.3.2 | Versuchsdurchführung und -ergebnisse | 175 |
| 9.3.3 | Statistische Analyse | 176 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 9.3.4 | Kontrollversuche | 178 |
| 9.3.5 | Bewertung der Gültigkeit der Hypothese | 179 |
| 9.4 | Ableitung einer schematischen Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings | 179 |
| 9.5 | Fazit | 183 |
| 10 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 185 |
| 10.1 | Carbonfaser-Hersteller | 187 |
| 10.2 | Carbonfaser-Verarbeiter | 194 |
| 10.3 | Gesamtheitliche Betrachtung | 199 |
| 11 | Zusammenfassung | 201 |
| 12 | Ausblick | 205 |
| 12.1 | Integration in einen textilen Veredelungsprozess | 205 |
| 12.2 | Bewertung anhand des Industrie 4.0-Maturity-Index | 211 |
| 12.3 | Adaption auf weitere Werkstoffklassen | 213 |
| 13 | Summary | 216 |
| 14 | Abbildungs- und Tabellenverzeichnis | 220 |
| 14.1 | Abbildungsverzeichnis | 220 |
| 14.2 | Tabellenverzeichnis | 228 |
| 15 | Literaturverzeichnis | 230 |
| 16 | Verzeichnis Studentischer Arbeiten | 267 |
| 17 | Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen | 271 |
| 17.1 | Abkürzungsverzeichnis | 271 |
| 17.2 | Formelverzeichnis – Latein | 272 |
| 17.3 | Formelverzeichnis – Griechisch | 276 |
| 18 | Anhang B: Basisdaten zur methodischen Bewertung | 277 |
| 19 | Anhang C: Versuchsparameter | 281 |
| 20 | Anhang D: Zusätzliche Informationen | 285 |