

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
Univ.-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 CF-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 CF-Hersteller und Verarbeiter, die das Sensorsystem als Wareneins- bzw. -eingangskontrolle 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

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation der Arbeit

EU: Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien

Die Europäische Kommission (EK) zeichnet in ihrem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050“ die Vision einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Zukunft für Europa. In diesem Dokument werden Kernmaßnahmen formuliert, die auf eine Reduktion der Emissionen und eine Steigerung der Effizienz in allen Wirtschaftssektoren abzielen. Der Fokus liegt auf einer Reduktion der Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emission, das durch seine Eigenschaft als Treibhausgas signifikant zum Klimawandel beiträgt [Ber06]. Neben Energiewirtschaft und Industrie ist der Straßen- und Luftverkehr mit rund 23 % hauptverantwortlich für einen Großteil der CO₂-Emissionen innerhalb der Europäischen Union (EU). [Eur11]

Im Zuge einer Reduktion der CO₂-Emissionen novellierte das EU-Parlament 2014 die Verordnung Nr. 443/2009 durch die überarbeitete Version Nr. 333/201. Diese Verordnung reguliert europaweit den zulässigen CO₂-Grenzwert von Neufahrzeugen ab 2020. Entsprechend gilt ein Grenzwert für den zulässigen CO₂-Ausstoß von 95 g CO₂/km, der von 95 % der Neuwagenflotte jedes Automobilherstellers eingehalten werden muss. Im Folgenden wird dieser Prozentsatz ab 2021 auf die gesamte Neuwagenflotte ausgeweitet, wobei ein CO₂-Ausstoß von 95 g CO₂/km einem Kraftstoffverbrauch von 3,6 l Diesel resp. 4,1 l Benzin pro 100 km entspricht. [Bun09]

Ein Ansatz zur Einhaltung dieser Grenzwerte ist die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und die damit verbundene Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Neben effizienteren Verbrennungsmotoren und alternativen Antrieben birgt hierfür vor allem die Reduktion der Fahrzeugmasse durch Leichtbaustrategien ein hohes Potenzial [Kel16; KFE+16; Wan12]. Gemäß einer Studie des Ministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) werden durch eine Gewichtsreduktion von 100 kg Fahrzeugmasse bis zu 8,8 g CO₂/km eingespart [EEO12]. Werkstoffliche Leichtbaustrategien im Automobilsektor umfassen den Einsatz bestimmter

Werkstoffklassen mit dem Ziel einer Gewichtsreduktion [DHM+11]. Durch Aluminiumkonstruktionen können beispielsweise bis zu 40 % Gewicht gegenüber konventioneller Stahlbauweise eingespart werden. Struktureller Leichtbau unter Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) bietet eine zusätzliche, signifikante Gewichtsersparnis von bis zu 40 % gegenüber Aluminium. Damit werden durch die Verwendung von CFK insgesamt etwa 64 % Gewichtsersparnis gegenüber der konventionellen Stahlbauweise realisiert (Abb. 1.1). [EEO12]

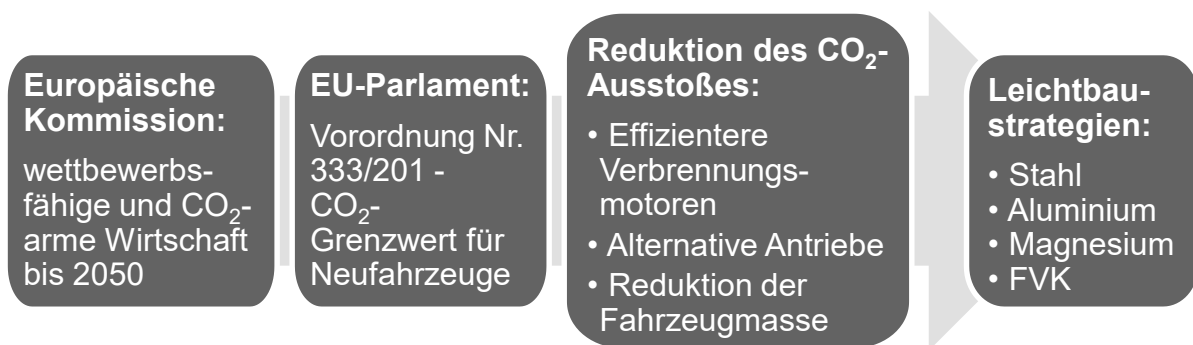


Abb. 1.1: Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien durch Vorgaben der EK und des EU-Parlaments [Bun09; Eur11; Wan12]

Außer in der Automobilindustrie finden CFK insbesondere in der zivilen und militärischen Luftfahrt Verwendung. Hinzu kommen auch exotischere Einsatzgebiete, wie die unbemannte Luftfahrt, die Raumfahrt oder die Satellitentechnik. Die Gründe hierfür liegen vor allem in den hohen, spezifischen mechanischen Eigenschaften sowie in der Gestaltungsfreiheit der CFK-Bauteile hinsichtlich optimierter, aerodynamischer Anforderungen. Das Linienflugzeug vom Typ A380 der Fa. Airbus S.A.S., Toulouse (Frankreich), besteht beispielsweise zu ca. 22 % aus Verbundwerkstoffen, sodass allein im Flügelmittelfeld rund 1,5 t an Gewicht durch die Verwendung von FVK eingespart werden [KFE+16; PL11; Spa05]. Bei solch konventionellen Linienflugzeugen führt eine Gewichtsreduktion um 1 kg zu einer jährlichen Treibstoffersparnis von rund 2000 l Kerosin. [Sou05]

Die Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien wird damit aus den Vorgaben der Europäischen Kommission und des EU-Parlaments zur CO₂-Reduktion abgeleitet [Bun09; Eur11]. Eine CO₂-Reduktion in Straßenverkehr und

Luftfahrt kann über eine Reduktion der Fahrzeugmasse durch geeignete Leichtbaustrategien realisiert werden [EEO12].

CFK-basierter Leichtbau führt zu einer CO₂-Reduktion in den Bereichen Straßenverkehr und Luftfahrt, die zu einem Großteil der CO₂-Emission in der EU beitragen.

Wirtschaftliche Leichtbaustrategien brauchen zerstörungsfreie Prüfverfahren

Faserverbundkunststoffe (FVK) bezeichnen eine Werkstoffklasse, bei der Faser- und Matrix-Materialien zur Erzielung von Synergieeffekten kombiniert werden [Ehr06]. Die bedeutendsten Verstärkungsfasern sind Glas-, Carbon- und Aramidfasern [AVK14]. Für sicherheitskritische Anwendungen und Anforderungen höchster Festigkeit werden Carbonfasern (CF) aufgrund ihrer spezifischen strukturmechanischen Eigenschaften eingesetzt [NMB14]. Dem Vorteil einer signifikanten Gewichtsreduktion und der damit verbundenen reduzierten CO₂-Emission von CFK stehen die Nachteile von vergleichsweise hohen Material- sowie Herstellungskosten gegenüber (Abb. 1.2).

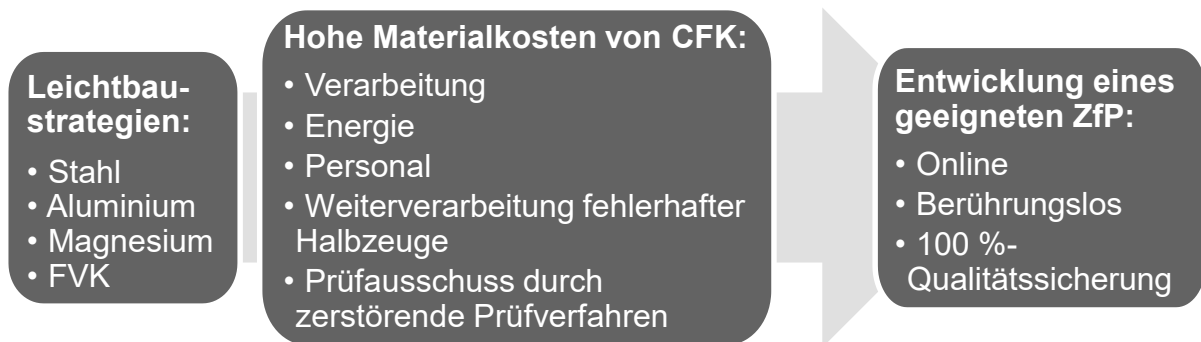


Abb. 1.2: Notwendigkeit der Entwicklung eines geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahrens (ZfP) zur Qualitätssicherung an CF [Bun09; JH14; Mor05; Wan12]

Während die Automobilindustrie Preise von 25 €/ kg_{CFK} für den wirtschaftlichen Einsatz fordert, liegen die über den Automobilsektor gemittelten Preise mit 82 €/ kg_{CFK} deutlich darüber [WKK16; Hof17]. Die hohen Kosten der CFK-Strukturbauteile verhindert einen wirtschaftlichen Einsatz in der Serienproduktion, so dass CFK hauptsächlich im Motorsport und im Sichtbereich in Kleinserien Anwendung findet [Fri13; Leo11; KFE+16]. Verantwortlich für die hohen Kosten

faserverstärkter Kunststoffe sind mit bis zu 42 % die Materialkosten (Abb. 1.3), im Fall von CFK-Bauteilen sogar bis zu 45 % [Bei10; JH14; Mor05; SÖG12].

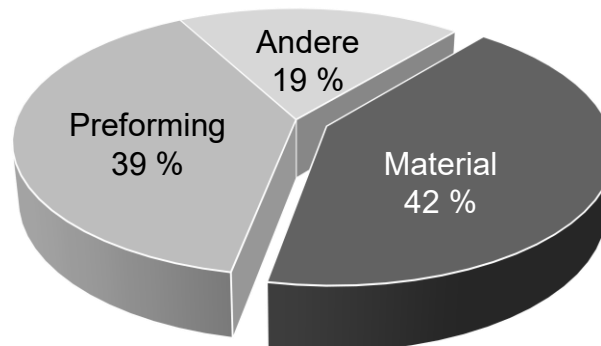


Abb. 1.3: Kostentreiber faserverstärkter Kunststoffe [Bei10; SÖG12]

Hinzu kommen Kosten, die durch die Weiterverarbeitung fehlerhafter Halbzeuge und den Prüfausschuss durch zerstörende Prüfverfahren für die Qualitätssicherung entstehen. Eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Nutzung von CFK liegt somit in einer Reduktion des Materialeinsatzes des kostenintensiven Werkstoffs Carbon. Ansätze hierzu sind:

- Reduktion der Prüfausschuss zerstörender Prüfverfahren
- 100 %-ige Kenntnis der Materialeigenschaften zur exakten Auslegung von CFK-Strukturen ohne Überdimensionierung
- Frühes Ausschleusen fehlerhafter Halbzeuge aus der Prozesskette

Ohne die Verwendung zerstörender Prüfverfahren ist kein zusätzlicher Prüfausschuss notwendig. Eine 100 %-ige Kenntnis der Materialeigenschaften erlaubt eine belastungsgerechte Auslegung sicherheitsrelevanter Strukturen, sodass auf eine Überdimensionierung aufgrund von Materialunsicherheit verzichtet werden kann. Ein frühes Ausschleusen fehlerhafter Halbzeuge in der Prozesskette trägt ebenfalls zu einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit bei, da fehlerhafte Halbzeuge von weiterer Wertschöpfung ausgeschlossen werden [HSM13]. Je früher ein Fehler in der Prozesskette detektiert wird, desto geringer sind die Verluste in der Wertschöpfung [SGH+11]: Ein nicht detektierter Fehler verursacht mit jeder Prozessstufe eine Erhöhung der Fehlerkosten um den Faktor 10 [SP15].

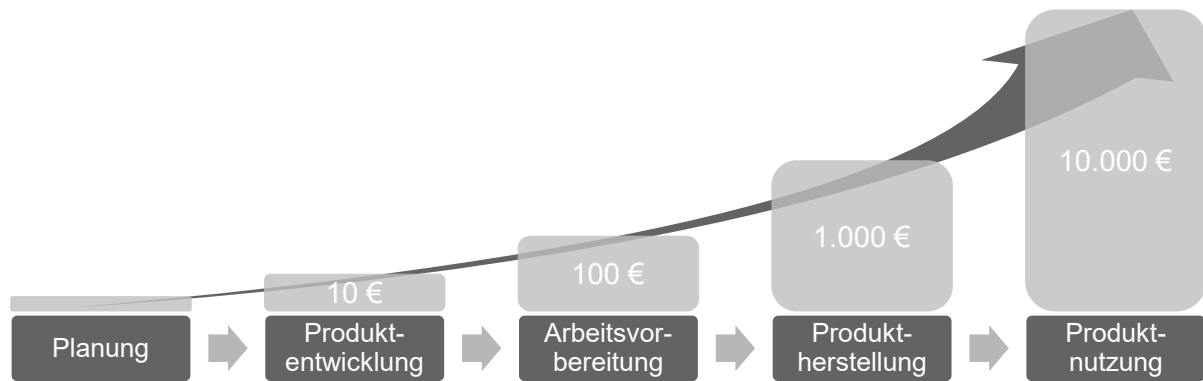


Abb. 1.4: Empirische Zehner-Regel nach [SP15]

Mit dem weltweit steigenden Bedarf und der steigenden Kapazität der globalen CF-Produktion nehmen auch die Anforderungen an eine Qualitätssicherung zur Gewährleistung einer gleichbleibenden Faserqualität zu. Folglich erhöht sich der Bedarf nach einem Prüfverfahren zur Inline-Charakterisierung von trockenen CF-Halbzeugen und Bauteilen [HSM13; HSP+15; Moo15]. Daher besteht seitens der CF-Halbzeug- und CFK-Hersteller die Forderung nach einem Qualitätspass, der die Eigenschaften einer CF sowohl über die gesamte Lauflänge einer Spule als auch zwischen verschiedenen Chargen garantiert [LKE19]. Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) erlauben inline eine 100 %-Prüfung in Echtzeit und können somit diese Forderung erfüllen [KFE+16]. Ein geeignetes ZfP übernimmt somit eine Schlüsselposition und stellt die Qualitätsüberwachung in der CF-Prozesskette sicher, indem herstellungsbedingte Materialschädigungen frühzeitig detektiert werden [KFE+16]. Damit trägt ein geeignetes ZfP für eine Inline-Qualitätssicherung trotz der Zusatzkosten zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei, da fehlerhafte CF-Rovings aus dem Prozess ausgeschleust und von weiterer Wertschöpfung in der Produktion oder Weiterverarbeitung ausgeschlossen werden [LKE19].

Ein geeignetes ZfP trägt zur Kostenreduktion in der CFK-Prozesskette bei und ermöglicht wirtschaftlichen Leichtbau.

1.2 Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit

Während für metallische Werkstoffe bereits eine zertifizierte Qualitätssicherung mit entsprechenden Prüfverfahren existiert, befinden sich Prüfung und Qualitätssicherung der CFK-Prozesskette und deren Normung (Herstellung und Verarbeitung) noch im Entwicklungsstadium [KFE+16; SHK+10]. So führen auch in metallischen Werkstoffen verdeckte Fehler, die die gesamte Prozesskette durchlaufen, zu Ausschuss und zu hohen Kosten [LSK+13]. Eine Inline-Qualitätssicherung trägt hier bereits zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei [LKD+12; LSK+13]. Im Gegensatz dazu ist inline eine 100%-Prüfung während der CF-Herstellung und -Verarbeitung nach gegenwärtigem Stand der Technik nicht möglich [KJN+20]. Aktuell wird die Qualitätssicherung für Carbonfaser-Rovings in Form von Warenausgangs- bzw. -eingangskontrollen offline und stichprobenartig durchgeführt [LGK+20a]. Zu den dabei eingesetzten zerstörenden Prüfverfahren zählen unter anderem Rovingzugversuche, Einzelfilament-Tests oder mikroskopische Schliffbildanalysen [Ehr06]. Offline-Prüfungen sind bedingt durch den hohen Prüf- und Personalaufwand zeit- und kostenintensiv und führen zu einer Unterbrechung des kontinuierlichen Produktionsprozesses. Hierdurch entstehen Effizienzverluste, die zusätzliche Kosten verursachen. Zudem werden Offline-Prüfungen nur stichprobenartig durchgeführt, so dass die Qualitätskontrolle der gesamten CF-Spule nicht zu 100 % erfolgt und eine Unsicherheit der Warenqualität verbleibt [LGK+20b].

Zentrales Ziel dieser Dissertation ist daher die Entwicklung eines geeigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahrens (ZfP), das inline eine 100 %-Prüfung von CF-Rovings erlaubt und verdeckte Fehler in der Herstellung und Verarbeitung detektiert. Ein solches ZfP reduziert somit die Prüfkosten für die Qualitätssicherung durch die Substitution zeitintensiver, zerstörender Offline-Prüfungen mit hohem Personalaufwand und kostenintensivem Prüfausschuss des Werkstoffs „Carbon“. Das ZfP soll entlang der gesamten Wertschöpfungskette eingesetzt werden und detektiert fehlerhafte CF-Rovings früh im Prozess. Die fehlerhaften Rovings können dann aus der Prozesskette entfernt werden, ohne sie weiterer Wertschöpfung zuzuführen. Insgesamt führt ein geeignetes ZfP so zu einer Res-

sourcenschonung und einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette. Damit wird ein hoher Qualitätsstandard nachhaltig und wirtschaftlich sichergestellt [Sie10]. Zudem ist durch die Verwendung von Offline-Prüfverfahren der Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad der Qualitätssicherung im Vergleich zu anderen Branchen gering, sodass ein geeignetes ZfP ein Enabler für die Digitalisierung der CFK-Prozesskette ist.

1.3 Vorgehen zur Zielerreichung

Das Vorgehen zur Zielerreichung orientiert sich am Fünfklang des Instituts für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University. Der ITA Fünfklang ist eine Methode zur Strukturierung von Forschungsprojekten und gliedert sich in fünf Fragestellungen, die nacheinander durchlaufen werden (Abb. 1.5).

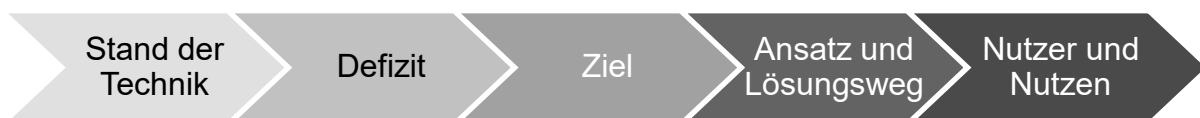


Abb. 1.5: ITA-Fünfklang zur Strukturierung von Forschungsprojekten

Ausgehend vom Stand der Technik hinsichtlich der Qualitätssicherung (QS) an Carbonfasern wird das Defizit kommerziell verfügbarer Sensorsysteme für die Qualitätsüberwachung von Carbonfasern identifiziert (Kap. 2). Daraus wird die technische Zielsetzung dieser Dissertation abgeleitet (Kap. 3). Der Ansatz zur Erreichung dieses Ziels liegt in der methodischen Identifikation eines geeigneten ZfP mit dem höchsten Potenzial zur Erfüllung der Messaufgabe (Kap. 4). Der Lösungsweg zur Entwicklung des ZfP bildet den Hauptteil der Arbeit und umfasst mehrere Kapitel. Hierzu zählen einerseits die Beschreibung des physikalischen Messprinzips unter Berücksichtigung wichtiger Effekte und Einflussgrößen (Kap. 5) sowie die Sensorentwicklung (Kap. 7). Andererseits werden die Auswertung der komplexen Impedanz über Ansätze aus den Bereichen Machine Learning, Neuronale Netze und klassische Statistik (Kap. 8) sowie die Ableitung einer schematischen Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in CF-Rovings unter Verwendung von Außendurchlaufspulen (Kap. 9) ebenfalls dem Lösungsweg zugeordnet. Abschließend werden Nutzer und Nutzen der

entwickelten Technologie im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufgezeigt (Kap.10). Abb. 1.6 zeigt die Anwendung des ITA-Fünfklangs auf die vorliegende Fragestellung und visualisiert das Vorgehen zur Zielerreichung.

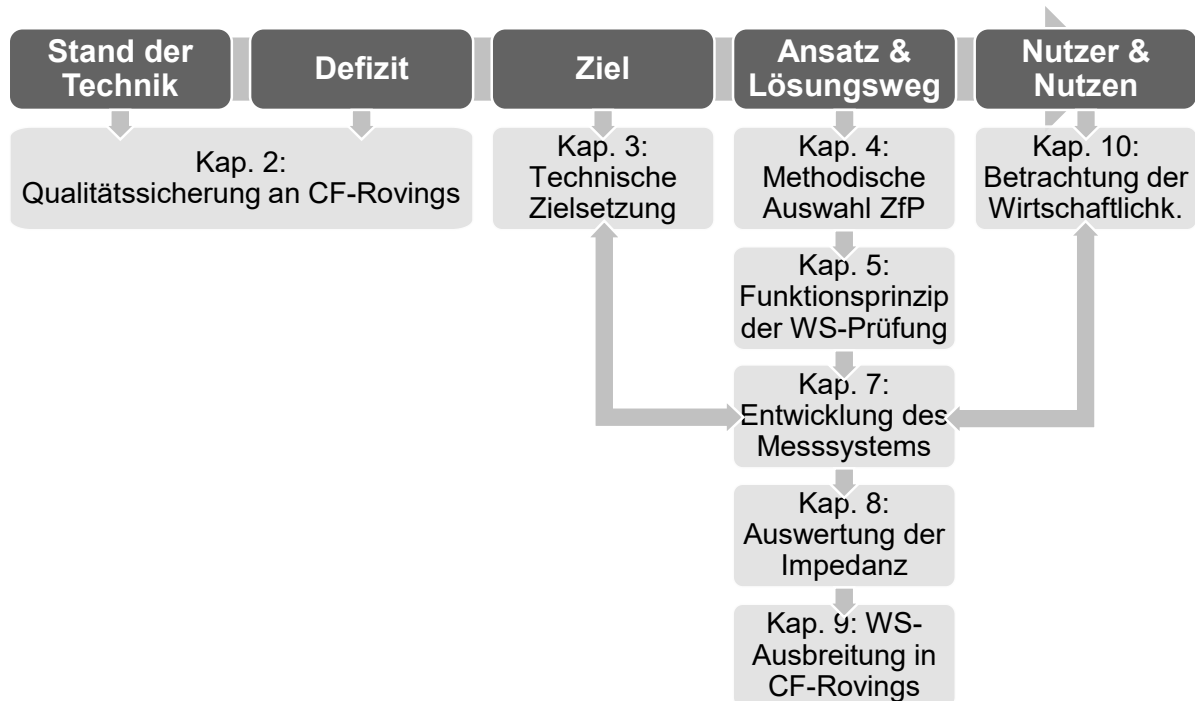


Abb. 1.6: ITA-Fünfklang und Zuordnung der Kapitel zur Zielerreichung

Ein Zwischenfazit (Kap. 6) sowie eine Zusammenfassung (Kap. 11) ergänzen diese Struktur und geben einen Überblick über die erarbeiteten Ergebnisse. Final werden in einem Ausblick anhand industrieller Anwendungsbeispiele weitere Forschungs- und Entwicklungspotenziale aufgezeigt (Kap. 12).

2 Qualitätssicherung an Carbonfaser-Rovings

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik der CF-Herstellung und -Verarbeitung beschrieben (Abb. 2.1). Hierbei werden zunächst relevante Defekte in CF-Rovings dargestellt (Kap. 2.1) und anschließend ein Überblick über die Prüf- und Messtechnik von CF-Rovings gegeben (Kap. 2.2). Abschließend wird das Defizit der aktuellen Qualitätssicherung abgeleitet (Kap. 2.3).

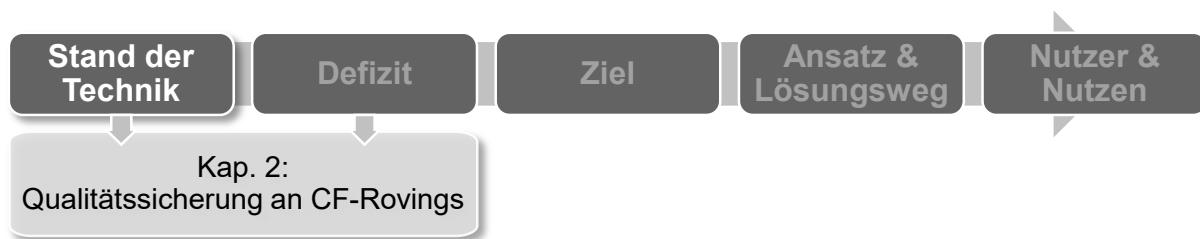


Abb. 2.1: Einordnung von Kap. 2 in das Vorgehen zur Zielerreichung

2.1 Defekte in Carbonfasern

Defekte in Carbonfasern (CF) werden in globale und lokale Defekte differenziert. Globale Defekte erstrecken sich über gesamte Fertigungs-Lots, während lokale Defekte diskret und zufällig im Lot verteilt sind [Ber19; BL15]. Zu den globalen Defekten zählt ein durchgehend falscher Filamentdurchmesser, der etwa aus einer fehlerhaften Prozessführung resultiert und zu einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften führt [JD71]. Lokale Defekte sind beispielsweise Twists (Dreher), bei denen die CF stellenweise verdreht vorliegt. Mikroskopische lokale Fehler, wie Fremdatome, molekulare Fehlstellen oder Frakturen auf der Filamentoberfläche, sind in der Regel nur unter Laborbedingungen zu erkennen und beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften [GMW+16; TOO+14]. Im Gegensatz dazu sind makroskopische Fehler inline detektierbar [GMW+16]. Während globale Defekte im Rahmen einer stichprobenartigen Qualitätskontrolle identifiziert und durch Anpassung der Prozessparameter behoben werden können, bedarf es einer 100 %-Prüfung, um lokale Defekte in einem Fertigungs-Lot vollständig zu detektieren. Da lokale mikroskopische Fehler nur offline unter Laborbedingungen quantifizierbar sind, sind lediglich lokale makroskopische

Fehler im Rahmen einer Inline-Qualitätssicherung detektierbar. Die häufigsten, lokalen makroskopischen Fehler werden im Folgenden beschrieben.

Gaps (Gassen)

Gaps bezeichnen das Teilen eines Rovings in zwei Teilrovings (Abb. 2.2). Dies tritt, analog zum Spreizprozess, bei Umlenkung des Rovings unter Zugspannung auf. Fügt sich der gesplittete Roving im weiteren Prozessverlauf nicht wieder zusammen, kann dies zu Einschränkungen in der Verarbeitbarkeit führen.

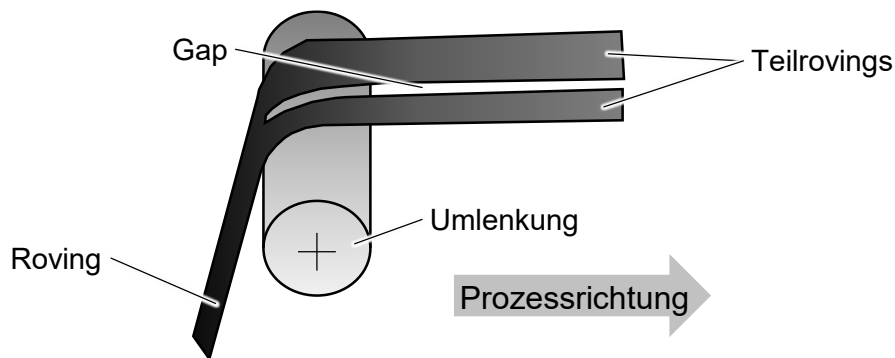


Abb. 2.2: Skizze einer Gap-Entstehung nach [BG20]

Twists (Dreher)

Twists bezeichnen ein Verdrehen des Rovings um die eigene Achse (Abb. 2.3). Twists entstehen bei der Herstellung während der Aufwicklung, wenn der Roving beim Verlegen auf der Spule in den Umkehrpunkten der Changierung über den Spulenrand umklappt. Durch das Knicken des Rovings beim Umklappen wird Faserschädigung induziert, sodass eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften möglich ist [EMK16; GMW+16].

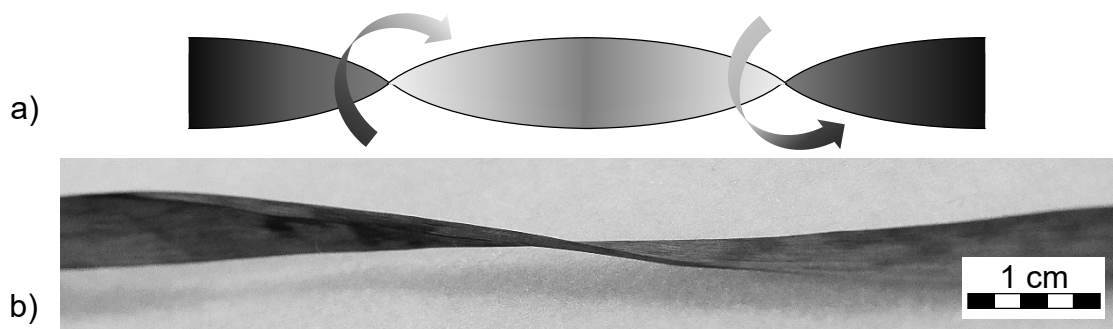


Abb. 2.3: a) Skizze und b) Foto eines Twists nach [BG20]

Filamentbrüche

Bei Filamentbrüchen brechen einzelne oder mehrere Filamente aufgrund ihrer Quersprödigkeit bei mechanischer Belastung quer zur Faserachse. Je kleiner der Radius der Umlenkung einer Fadenführung ist, desto höher ist die Faserschädigung in Form von Filamentbrüchen. Untersuchungen zeigen, dass mit zunehmendem Umlenkradius mehr Halblastzyklen einer Querbeltung ertragen werden (Abb. 2.4) [Kun04]. Ab einem Radius von etwa 3,5 cm führt eine zusätzliche Vergrößerung des Radius offenbar zu keinem weiteren Anstieg der ertragbaren Halblastzyklen, was in etwa dem Durchmesser kommerzieller Hüllen für CF-Rovings entspricht. Filamentbrüche führen zu einem Abfall der mechanischen Eigenschaften und erhöhen die Wickelneigung an rotierenden Fadenleitelementen [Ber19; GMW+16]. So wird beispielsweise die Zugfestigkeit gewebeverstärkter CFK-Bauteile in Kettrichtung bei einer Filamentbruchrate von 5 % um rund 10 % vermindert [Wen15]. Darüber hinaus leiden die optischen Eigenschaften bei Sichtcarbon und die Verarbeitbarkeit wird reduziert [EMK16].

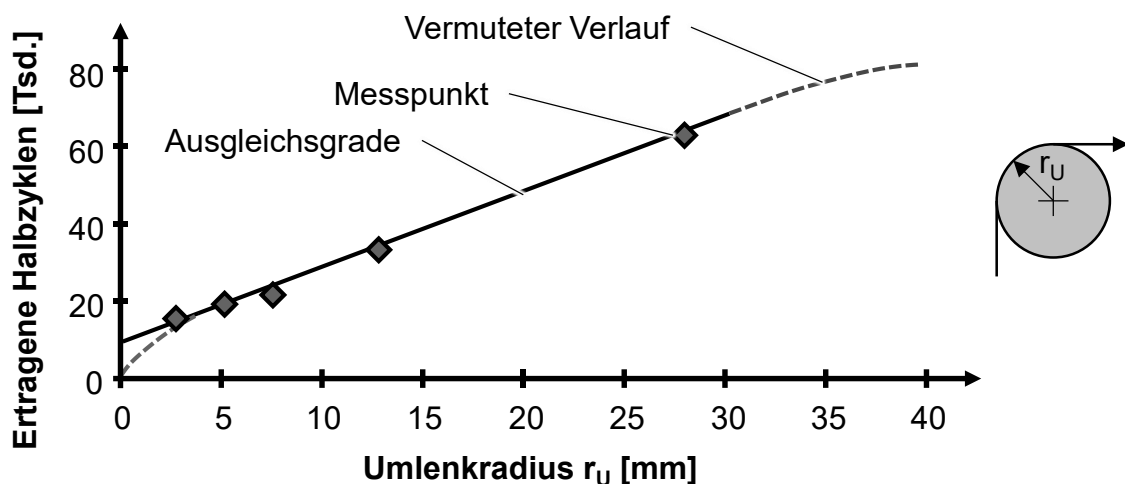


Abb. 2.4: Einfluss des Umlenkradius auf Faserschädigung nach [Kun04]

Abrieb

Erfahren bereits gebrochene Filamente zusätzliche Reibung oder mechanische Belastung, so werden einzelne Filamente, Filamentfragmente oder Stäube aus dem Roving-Verbund herausgelöst. Sichtbare Ablagerungen dieser Fragmente

werden als Abrieb bezeichnet (Abb. 2.5). Lagert sich Abrieb an fadenkontaktierenden Elementen ab, so erhöht sich aufgrund der veränderten tribologischen Bedingungen in der Kontaktzone die Reibung zwischen Roving und Fadenleitelement. Die erhöhte Reibung führt zu weiterer Schädigung, sodass Abrieb an Fadenleitelementen ein selbstverstärkender Defekt ist. Im Extremfall wird die resultierende Schädigung so stark, dass der CF-Roving reißt. Abrieb ist folglich ein Indikator für einen vorausgegangenen Filamentbruch und damit eine vorangegangene Schädigung des CF-Rovings.

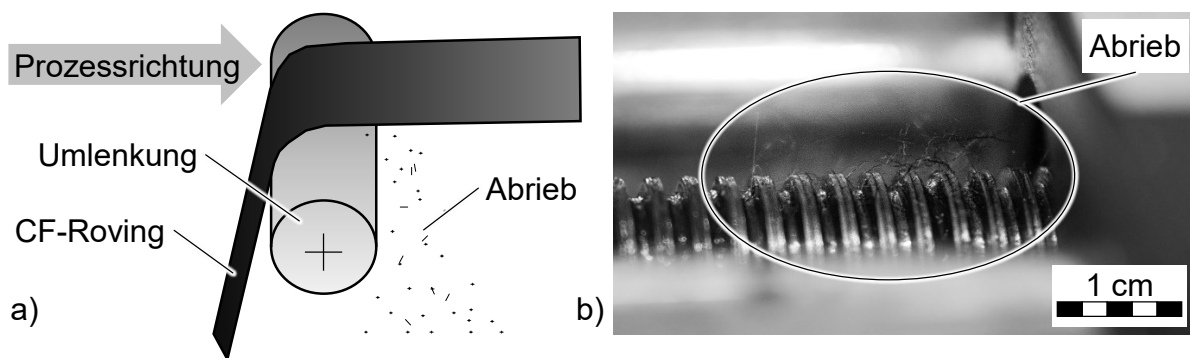


Abb. 2.5: Abrieb a) schematisch und b) als Abbildung am ITA-Tribometer dargestellt, nach [BG20]

Fuzz-Ball (Fluse)

Verbleibt der Abrieb am Roving, so werden diese Ansammlungen als Fuzz-Balls (Flusen) bezeichnet. Während die CF-Fragmente im Abrieb klein sind, umfasst Fuzz auch längere Filamentabschnitte (Abb. 2.6 a). Gebrochene, abstehende Filamente erhöhen die Reibung zwischen der Oberfläche des Rovings und den Fadenleitelementen, sodass weitere Filamente geschädigt werden und anhaften. Der so entstehende Abrieb verknotet sich und bildet einen Fuzz-Ball, der die Faserschädigung zusätzlich verstärkt. Auch Fuzz ist damit ein selbstverstärkender Defekt und führt, analog zu Abrieb, im Extremfall zu einem Abreißen des Rovings. Fuzz ist dementsprechend ebenfalls ein Indikator für eine vorangegangene Schädigung und vorangegangene Filamentbrüche. Fuzz führt ebenfalls zu einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften [GMW+16].

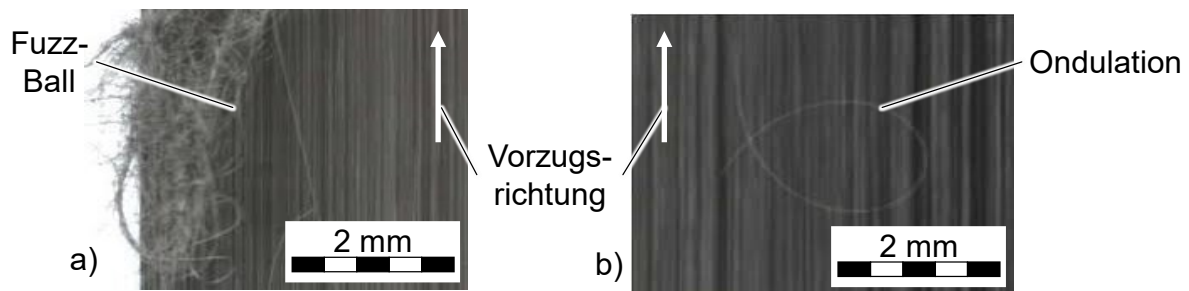


Abb. 2.6: a) Fuzz-Ball und b) Ondulation als Folge einer Faserschädigung nach [GMW+16]

Filamentorientierung

Die Filamentorientierung bezeichnet die Abweichung einzelner Filamente von der Vorzugsrichtung eines CF-Rovings. Dabei kann es sich um kleine Abweichungen im Roving-Verbund handeln oder, bei vorangegangenen Filamentbruch, um Ondulationen, bei denen sich eine schleifenförmige Struktur ausbildet. Abweichende Filamente und Ondulationen führen ebenfalls zur einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften, da bspw. Zugfestigkeit und E-Modul um den Sinus der Winkelabweichung geschwächt werden [Ehr06; GLL+18; GMW+16]. Ein Filamentbruch stellt ebenfalls eine Ursache für Filamentorientierungen und Ondulationen dar. Tab. 2.1 zeigt alle genannten Defekte.

Tab. 2.1: Übersicht über lokale makroskopische Defekte in Carbonfasern

Defekt	Folge	Quelle
Gaps	Beeinträchtigung in der Verarbeitbarkeit	
Twist	Faserschädigung durch Knicken beim Umklappen und Reduktion der mech. Eig.	[GMW+16]
Filamentbruch	Reduktion der mech. Eig.	[Ber19; Wen15]
	Wickelneigung an rotierenden Bauteilen	[EMK16]
Abrieb	Indikator für vorangegangenen Filamentbruch	[EMK16]
	Kurzschlussrisiko für elektrische Geräte ohne IP6-Schutzklasse	[Ehr06]
Fuzz-Ball	Indikator für vorangegangenen Filamentbruch	[EMK16]
	Schädigung nachfolgender CF-Abschnitte bei Ablagerungen an Fadenleitelement	[GMW+16]
Filamentorientierung	Bei Ondulation Indikator für vorangegangenen Filamentbruch	
	Reduktion der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Winkel	[Ehr06; GMW+16]

Aus Tab. 2.1 wird ersichtlich, dass Abrieb, Fuzz und Ondulationen ein Filamentbruch vorausgegangen sein muss, da jeder dieser Defekte jeweils ein einfach oder doppelt gebrochenes Filament voraussetzt. Ein Prüfverfahren, das Filamentbrüche detektiert, ist dementsprechend auch indirekt in der Lage, Abrieb, Fuzz und Ondulationen vorherzusagen.

Filamentbrüche sind ein geeignetes Maß zur Bewertung der Qualität von CF-Rovings, da sie Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben und notwendige Bedingung für Folgefehler, wie Abrieb, Fuzz etc. sind.

2.2 Prüf- und Messtechnik für Carbonfaser-Rovings

Der Einsatz von Prüf- und Messtechnik entlang der CFK-Prozesskette ist für die Qualitätssicherung von CF-Rovings von zentraler Bedeutung. Dabei wird der Integrationsgrad der Messtechnik, abhängig vom Einsatzort, in fünf Abstufungen unterteilt (Abb. 2.7) [SD08].

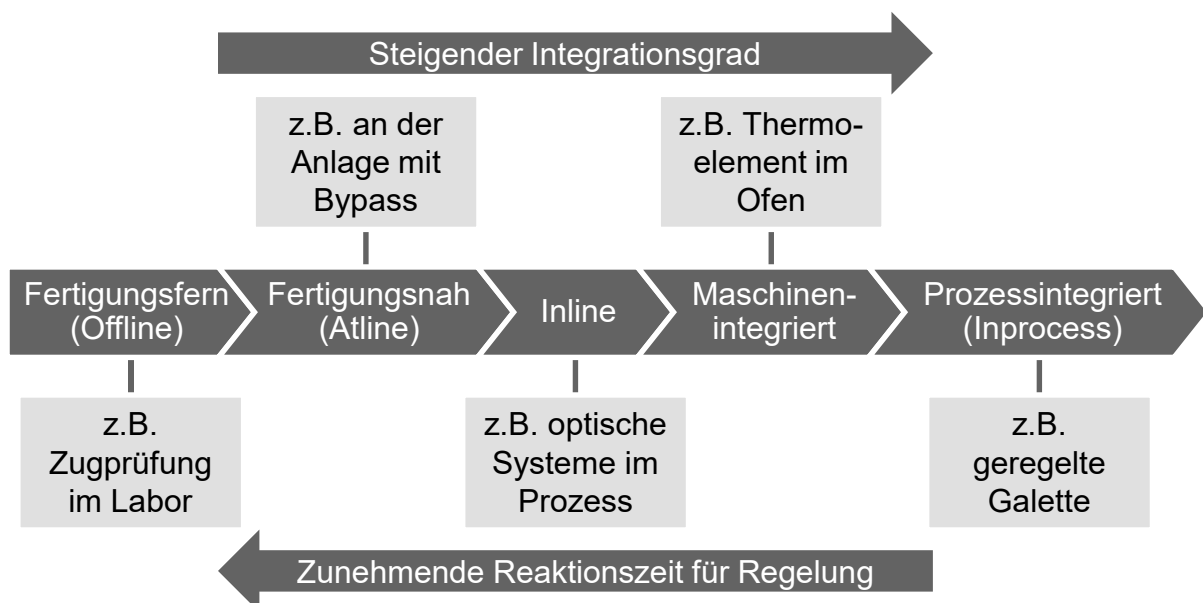


Abb. 2.7: Integrationsgrad von Prüf- und Messtechnik nach [SD08]

In der Herstellung und Verarbeitung von CF ist die Detektion lokaler Defekte (vgl. Kap. 2.1) relevant, um Aussagen über die Qualität der CF zu treffen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt die Detektion lokaler Defekte in der Regel offline im Labor, wo Stichproben eines Fertigungslots, z.B. im Zugversuch, analysiert werden (Kap. 2.2.1) [Ehr06; LGK+20a]. Eine Alternative dazu bieten laser-

(Kap. 2.2.2) oder kameraoptische (Kap. 2.2.3) Messsysteme, die inline eingesetzt werden können. Im Bereich der CF-Herstellung existiert auch maschinenintegrierte Messtechnik, wie Thermoelemente in den Carbonisierungs- oder Stabilisierungsöfen. Allerdings kann hier zwar der Herstellungsprozess geregelt, jedoch nicht die Qualität der CF in Bezug auf lokale Defekte überwacht werden. Prozessintegrierte Messtechnik existiert ebenfalls im Bereich der CF-Herstellung, beispielsweise in Form geregelter Antriebsgaletten. Allerdings erlaubt auch diese Messtechnik keine Detektion lokaler Defekte. [Mor05]

2.2.1 Genormte Offline-Prüfung

Die Qualitätssicherung von CF-Rovings in Herstellung und Verarbeitung wird derzeit in Form von Wareneingangs- und Eingangskontrollen durchgeführt [LGK+20b]. Diese erfolgen in der Regel stichprobenartig als Offline-Prüfung, da nach gegenwärtigem Stand der Technik keine geeignete Inline-Messtechnik kommerziell verfügbar ist¹. Die existierende Normen-Landschaft der CF-Prüfung veranschaulicht diesen Sachverhalt (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Normenlandschaft der CF-Prüfung [DIN92; DIN99; DIN13]

Messgröße	Normen
Dichte [g/cm ³]	DIN 65 569, ISO 10119
Feinheit [tex]	DIN 53 830, EN ISO 1889
Präparationsmassenanteil [%]	DIN 65 566, EN ISO 10548
Thermooxidative Beständigkeit [%]	DIN 65 568
Filamentdurchmesser [µm]	DIN 65 571
Zugfestigkeit [N/mm ²]	EN ISO 10618, DIN EN ISO 6892-1, EN ISO 5079, EN ISO 9163, DIN 65 382
E-Modul (aus Zugversuch) [N/mm ²]	
Bruchdehnung [%]	

Nachteil dieser Offline-Prüfverfahren ist der damit verbundene Zeitaufwand und die stichprobenartige Prüfung, sodass eine Unsicherheit bezüglich der Waren-

¹ Virtuelles Projekt Treffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Pawel Latasiewicz, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 04.08.2021

qualität verbleibt. Eine Alternative bieten laser- und kameraoptische Messsysteme, die inline einsetzbar sind.

2.2.2 Laseroptische Messsysteme

Ein Laser bezeichnet einen Lichtverstärker, bei dem ein konzentrierter Strahl kohärenten Lichts erzeugt wird [TMW15]. In modernen Lasern wird zusätzlich mittels einer geeigneten Optik der Lichtstrahl parallelisiert, sodass hohe Positionierungsgenauigkeiten des Lichtstrahls realisiert werden, ohne diffuses Streulicht zu erzeugen [TMW15]. Diese Eigenschaften werden für verschiedenste Anwendungen in der Messtechnik ausgenutzt (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Anwendungen laserbasierter Messtechnik (Beispiele)

Messsystem	Beschreibung	Anwendung	Quelle
Shaerografie	Messung einer flächigen Verformung	Zug-Dehnungs-Verhalten textiler Flächen	[DIN15]
Laser-Triangulation	Bestimmung eines Oberflächenprofils	Detektion von Faserüberhang an gepressten CFK-Strukturen	[RBB+20]
Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	Mehrdimensionale Erfassung einer Geschwindigkeit	Analyse der Drehungserteilung an der Abzugsdüse beim OE-Rotorspinnen	[Abu08]
Profilometrie	Konturbestimmung durch Kombination zweier 2D-Laser	Detektion von Fuzz in PAN-Precursor-Fadenscharen	[Str17]
Particle Image Velocimetry (PIV)	Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern	Analyse der Luftströmungsgeschwindigkeit im OE-Rotorspinnen	[Abu08]
Laserbrücke	Detektion von Abschattungen	Detektion von Filamentbrüchen an Hochmodulfasern	[EMK16; GBH+13; SCK+97]

Für die Detektion von Filamentbrüchen sind insbesondere Laserbrücken in der Lage, mithilfe des Abschattungsprinzips eine quantitative Messgröße der Faserschädigung zu erzeugen [GBH+13]. Die Anzahl der detektierten, gebrochenen Filamente ist proportional zum Grad der Faserschädigung [GBH+13]. Die Laserbrücke besteht aus einem Diodenlaser und einer Empfängerdiode, die abstehende Filamente durch eine Abschattung des Laserstrahls auf der Empfängerdiode detektiert (Abb. 2.8) [SCK+97].

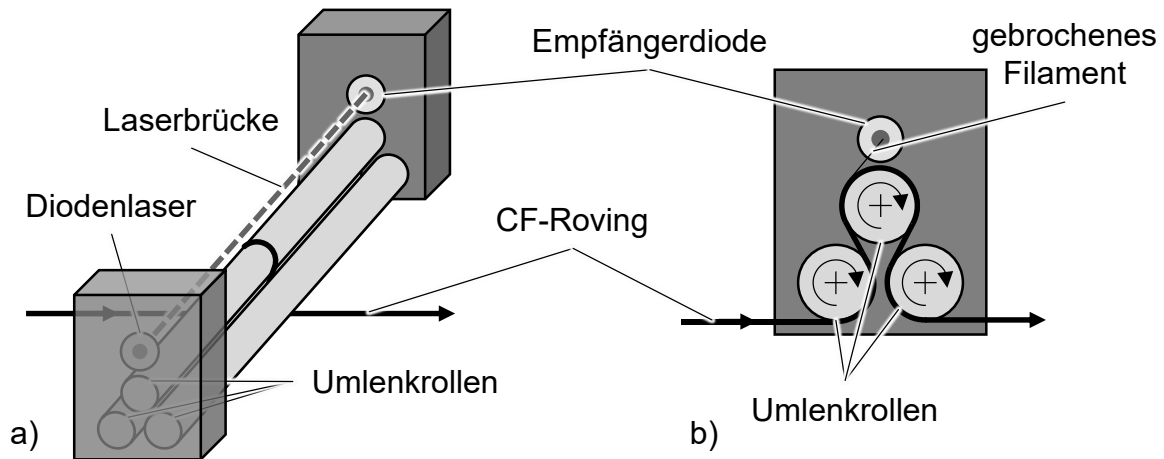


Abb. 2.8: Am ITA entwickelte Filamentbruchsensoren a) Schemazeichnung und b) Querschnitt nach [GBH+13; SCK+97]

Die am ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University entwickelten Filamentbruchsensoren detektieren Einzelfilamente mit einem Durchmesser von bis zu 5 μm bei Geschwindigkeiten von bis zu 1000 m/min zu [GBH+13; SCK+97]. Um gebrochene Filamente aus dem CF-Rovingverbund aufzurichten, erfolgt eine Umlenkung des Rovings über mehrere Umlenkrollen [SCK+97]. Alternativ werden mehrere Laserbrücken kombiniert, um gebrochene, abstehende Filamente des CF-Rovings in alle Raumrichtungen und über einstellbare Abstände in verschiedenen Längen zu detektieren (Abb. 2.9) [EMK16].

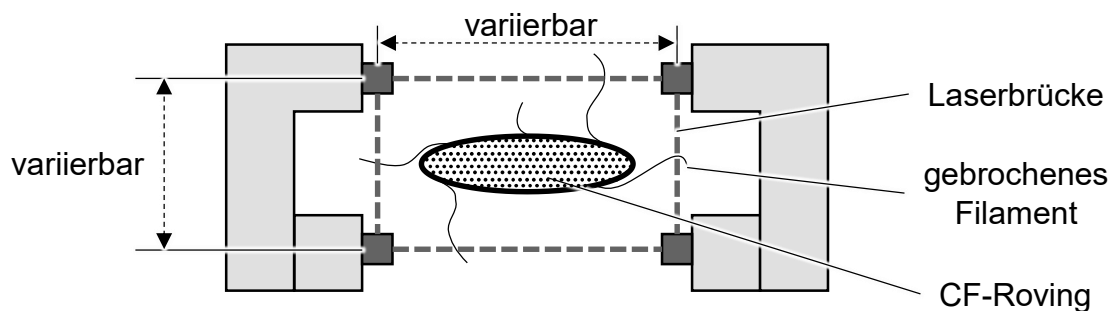


Abb. 2.9: Zusammenschaltung mehrerer Laserbrücken mit einstellbaren Abständen nach [EMK16]

Ein kommerziell verfügbares System, das über Lichtschranken Filamentbrüche detektiert, ist der Carbon Fibre Analyzer von Izumi International Inc., Greenville, SC (USA) [Izu12]. Gemäß Herstellerangaben kann das System für die Inline-

Qualitätssicherung in der CF-Produktion eingesetzt werden [Izu12]. Harper International Corporation, Buffalo, NY (USA) bietet kommerziell ein System zur 3D-Charakterisierung von CF-Rovings an, das aus zwei 2D-Lasern und einer Kamera besteht und Faserschädigung detektiert [Str17]. In diesem Bereich existieren zudem von CF-Herstellern patentrechtlich geschützte Lösungen. So hält Teijin Ltd., Tokyo (Japan) ein Patent, dessen Funktionsprinzip ähnlich den am ITA entwickelten Laser-Sensoren ist (Abb. 2.8), d.h. bei dem gebrochene Filamente über eine Umlenkung und eine Laserbrücke detektiert werden [TT86].

2.2.3 Kameraoptische Messsysteme

Kameraoptische Messsysteme sind mit einer geeigneten Bildverarbeitung ebenfalls in der Lage, abstehende, gebrochene Filamente zu detektieren. Kommerziell verfügbare Varianten dieser Sensoren stammen ursprünglich aus der Chemiefasertechnik, sind aber teilweise auch für die Überwachung von CF geeignet oder werden dafür adaptiert. Der PROMPT FFD der Firma Lenzing Instruments, Gampern (Österreich) ist für Filamentgarne ausgelegt und detektiert Filamentbrüche und Flusen [Len19b]. In Kombination mit einer hochauflösenden Kamera erzeugt der Sensor Bilder der detektierten Defekte (FRAY VIEW) [Len19a]. Mit einer Auflösung von bis zu 5 μm ist der Sensor prinzipiell auch für die Überwachung von CF geeignet, aber nicht explizit für diese Anwendung vorgesehen [Len19a; Len19b]. Der Fibrevision Fraytec FV2 der Firma Saurer Intelligent Technology AG, Arbon (Schweiz), wurde zur Detektion von Filamentbrüchen entwickelt [Sau19b]. Der Sensor ist nach Herstellerangaben für alle technischen Fasern und mit einer Auflösung von bis zu 5 μm prinzipiell auch für CF-Garne geeignet [Sau19b]. Die Fibrevision Fraycam 2 von Saurer ist analog zum FRAY VIEW der Gebrüder Loepfe AG, Wetzikon (Schweiz) mit einer hochauflösenden Kamera ausgestattet, um bei der Detektion gebrochener Filamente Bilder der Defekte aufzunehmen [Sau19a; Sau19a]. Der Weftmaster Falcon i der Firma Gebrüder Loepfe AG, Wetzikon (Schweiz), ursprünglich für die Detektion von Knoten, Flusen und Filamentbrüche von Chemiefasern konzipiert, wurde adaptiert und ist mittlerweile gemäß Herstellerangaben für die Detektion von CF-Filamentbrüchen geeignet [Geb21].

In der Forschung werden in den vom BMWi geförderten Verbundprojekten AirCarbon II und AirCarbon III hochauflösende Stereovision-Zeilenkameras zur Qualitätssicherung an CF-Rovings und Halbzeugen eingesetzt [MG21]. Dazu werden die Bilder zweier Kameras überlagert, um den Roving über Triangulation und Mustererkennung dreidimensional zu analysieren [GMW+16]. Über Filter und digitale Bildverarbeitung werden so bei ausreichender Auflösung Fuzz, Ondulationen sowie Filamentorientierungen und -brüche inline detektiert [MSE+17]. Aktuelle Ansätze zur automatisierten Auswertung der Bilddaten umfassen Organic-Computing-Methoden und Machine-Learning-Algorithmen aus dem Bereich des Stream Clustering [MHB+20].

Auch in der Qualitätsüberwachung von CF-Rovings durch kameraoptische Systeme sind einige Ansätze durch CF-Hersteller patentrechtlich geschützt. So hält Toray Industries Inc., Tokyo (Japan) ein Patent zur optischen Detektion von Faserschädigung, bei dem mehrere Rovings rückwärtig über eine Lichtquelle angestrahlt und vorderseitig von einem Kamerasystem erfasst werden (Abb. 2.10 a) [MKN13]. Teijin Ltd., Tokyo (Japan) hält zwei Patente im Bereich der Detektion von Faserschädigung über Kamerasysteme: Einerseits wird ein Verfahren geschützt, bei dem Fuzz über eine Hintergrundbeleuchtung und eine Kamera detektiert wird (Abb. 2.10 a) [Tom95]. Andererseits bestehen Schutzansprüche für eine Methode, bei der die Faserschädigung über eine Kamera, kombiniert mit einer Lichtquelle, in Draufsicht detektiert wird (Abb. 2.10 b) [HY04].

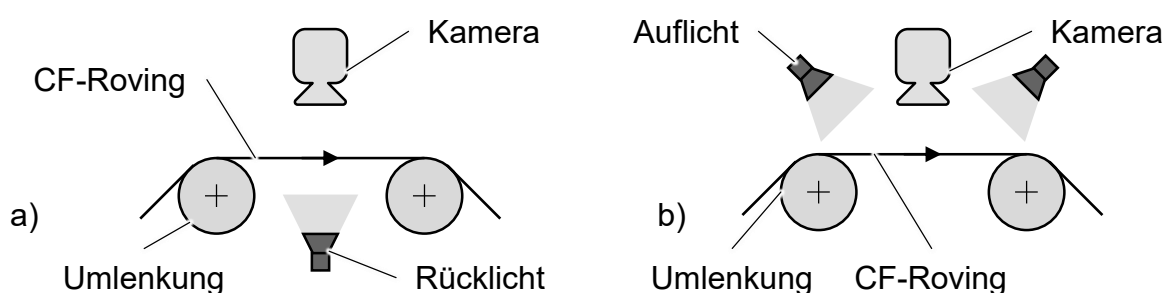


Abb. 2.10: Kameraoptische Qualitätsüberwachung a) im Rücklicht- und b) im Auflichtverfahren

2.3 Identifiziertes Defizit

Für die Qualitätsbewertung von CF-Rovings sind insbesondere Filamentanzahl, CF-Typ und Faserschädigung bzw. Filamentbrüche von Bedeutung [HSP+15]. Derzeit werden zu deren messtechnischer Erfassung vor allem optische Sensoren eingesetzt (Kap. 2.2). Ein Nachteil laser- und kameraoptischer Messtechnik liegt in der Detektion von ausschließlich oberflächennahen Filamentbrüchen [LGK+20a]. Bei einem 12k-Roving sind jedoch nur rund 1.600 CF-Filamente auf der Oberfläche sichtbar, während etwa 10.400 Filamente im Innern des Rovings liegen (Abb. 2.11) [LGK+20b; Mor05; Sch07]. Damit sind optische Verfahren für eine 100 %-Prüfung des CF-Rovings nicht geeignet, da Filamentbrüche im Inneren des Rovings nicht detektiert werden können und somit eine Unsicherheit bezüglich der Warenqualität verbleibt [GMW+16; LGK+20a; LGK+20b].

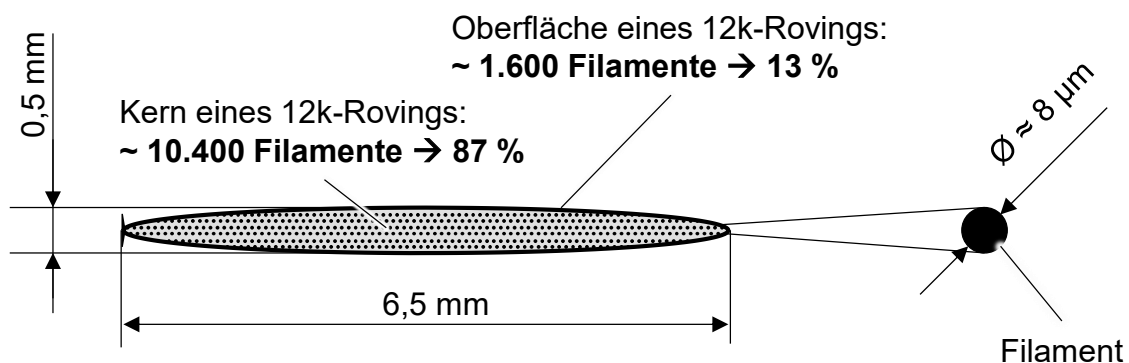


Abb. 2.11: Schnittdarstellung eines 12k-CF-Rovings [LGK+20b]

Somit werden verdeckte Fehler im Kern des CF-Rovings nicht detektiert, verbleiben in der Prozesskette und können zu Ausschuss führen. Aufgrund der Warenunsicherheit dieser verdeckten, nicht detektierbaren Fehler und aus Sicherheitsaspekten werden CFK-Bauteile überdimensioniert. Sicherheitsfaktoren für Standardbauteile liegen bei $j = 1,5$ [Sch07], während sie für sicherheitskritische Bauteile bei bis zu $j = 3$ liegen können.²

² Telefonat mit Herrn Willem Jan Ter Steeg, General Manager Development & Laboratories der Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, vom 16.06.2020

Überdimensionierung und hohe Sicherheitsfaktoren sind eine direkte Folge nicht detektierbarer Fehler, die zu den hohen Kosten der CFK-Produktion beitragen [SKH+09]. Um verdeckte Filamentbrüche mittels optischer Sensoren zu detektieren, kann nur auf zerstörende Prüfverfahren zurückgegriffen werden. Dadurch wird das Innere des CF-Rovings für optische Sensoren zugänglich. Nachteile zerstörender Prüfverfahren sind der Prüfausschuss des hochpreisigen Werkstoffs Carbon sowie die fehlende Möglichkeit einer Inline-Prozessüberwachung. Wird beispielsweise in der CF-Herstellung im Zuge einer Offline-Prüfung festgestellt, dass die geprüfte Charge nicht den Anforderungen entspricht, so kann die gesamte Charge nicht zum Zielpreis verkauft werden [LKE19]. Dies mindert den Gewinn der CF-Hersteller [LKE19]. Tab. 2.4 bietet eine Übersicht der Vor- und Nachteile optischer sowie zerstörender Prüfverfahren. Nach gegenwärtigem Stand der Technik, Stand der Forschung und Patent-situation existiert für CF kein Prüfverfahren, das allen genannten Nachteilen begegnen und zerstörungsfrei sowie inline eine 100 %-Prüfung durchführen kann [SHK+10].

Tab. 2.4: Übersicht über Vor- und Nachteile von optischen sowie zerstörenden Prüfverfahren

Optische Prüfverfahren	Zerstörende Prüfverfahren
+ kein Prüfausschuss	- Prüfausschuss
+ inline einsetzbar	- nicht inline einsetzbar
- Fehlerdetektion nur auf Oberfläche	+ Tiefeninformation möglich
- keine 100 %-Prüfung möglich	- keine 100 %-Prüfung möglich

Identifiziertes Defizit dieser Dissertation ist damit das Fehlen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens, dass inline einsetzbar ist und eine 100 %-Qualitätssicherung von CF-Rovings erlaubt.

Nach aktuellem Stand der Technik und Stand der Forschung existiert kein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das inline eine 100 %-Qualitätssicherung von CF-Rovings erlaubt.

3 Technische Zielsetzung

In diesem Kapitel wird die technische Zielsetzung dieser Dissertation vorgestellt (Abb. 3.1). Die Zielsetzung wird aus dem identifizierten Defizit des Stands der Technik zur Qualitätssicherung von CF-Rovings (Kap.2.3) abgeleitet.

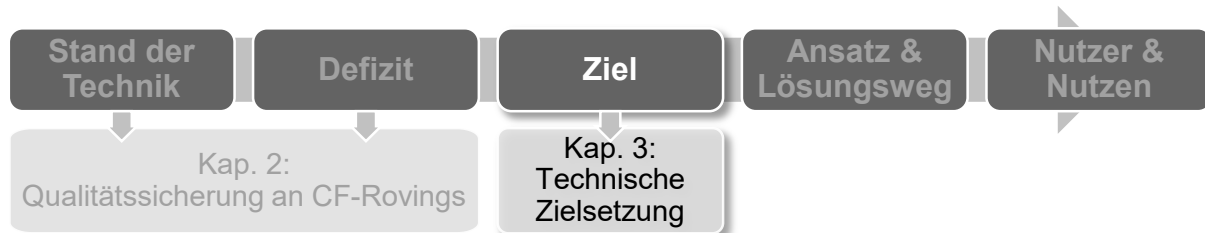


Abb. 3.1: Einordnung von Kap. 3 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Zentrales Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Prüfverfahrens, das für die Qualitätssicherung an CF und die damit verbundenen Werkstoffeigenschaften (elektrische Leitfähigkeit etc.) geeignet ist. Nachteile bestehender, genormter Offline-Prüfverfahren sind die nur stichprobenartige und zum Teil zerstörende Prüfung (Kap. 2.2.1). Für eine durchgehende Qualitätskontrolle muss das zu entwickelnde Prüfverfahren dagegen inline-fähig und zerstörungsfrei sein. Bestehende Ansätze umfassen laser- (Kap. 2.2.2) und kameraoptische (Kap. 2.2.3) Messsysteme, die jedoch nur oberflächennahe Defekte detektieren und keine Tiefeninformation gewähren, sodass keine 100 %-Prüfung des CF-Rovings möglich ist. Das zu entwickelnde zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) muss dementsprechend fähig sein, eine Volumenprüfung vorzunehmen und somit 100 % des CF-Rovings zu vermessen. Prüfziel ist die Quantifizierung der Verarbeitbarkeit des CF-Rovings in Folgeprozessen, wie im Tailored Fibre Placement (TFP) oder in der Gelegeherstellung³. Da die Verarbeitbarkeit nicht direkt gemessen werden kann, wird auf eine Vergleichsgröße zurückgegriffen.

³ Virtuelles Projekt Treffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Peter Vojcena, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 03.02.2021

Eine schlechte Verarbeitbarkeit zeigt sich durch hohen Abrieb an fadenkontaktierenden Filamenten, Faserschädigung und Wickelneigung an rotierenden Bauteilen⁴. Sowohl Abrieb als auch Faserschädigung und erhöhte Wickelneigung können auf vorausgegangene Filamentbrüche zurückgeführt werden [EMK16; GMW+16]. Die Anzahl der Filamentbrüche ist demnach ein geeignetes Maß zur Quantifizierung der Verarbeitbarkeit eines CF-Rovings. Eine solche, quantitative Messgröße existiert derzeit nicht und übertrifft damit den aktuellen Stand der Technik, da sie, analog zu den Uster-Statistics für Fasern und Garne, als Diskussionsgrundlage zwischen CF-Herstellern und Verarbeitern dienen kann⁴. Tab. 3.1 zeigt eine Übersicht aller Kernanforderungen an das zu entwickelnde ZfP.

Tab. 3.1: Kernanforderungen an das zu entwickelnde ZfP

Nr.	Kernanforderungen
1	für CF geeignet
2	Zerstörungsfreiheit
3	Inline-Messung
4	100 %-Prüfung
5	Tiefeninformation (Detektion von innenliegenden Fehlern)
6	Quantifizierung der Verarbeitbarkeit (Filamentbrüche)

Ein solches ZfP kann einerseits bei CF-Herstellern als 100 %-Prüfung zur Warenausgangskontrolle eingesetzt werden, um Produktionschargen für bestimmte Anwendungen zu klassifizieren. Entlang der Prozesskette eingesetzt können durch die 100 %-Prüfung Prozessparameter in Echtzeit angepasst sowie Ausschuss reduziert werden [HSM13; HSP+15]. Andererseits kann ein ZfP als Wareneingangskontrolle oder entlang der Prozesskette zur Qualitätsüberwachung bei CF-Verarbeitern eingesetzt werden. Das ZfP ist damit über die gesamte CFK-Prozesskette einsetzbar und sowohl zur Prüfung von CF, trockenen Halbzeugen, Preforms als auch konsolidierten CFK-Bauteilen geeignet [HSP+15].

⁴ Virtuelles Projekttreffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Pawel Latasiewicz, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 04.08.2021

4 Methodische Auswahl des Prüfverfahrens

Gemäß dem definierten Vorgehen zur Zielerreichung erfolgt in diesem Kapitel die methodische Auswahl eines geeigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahrens (ZfP) (Abb. 4.1).

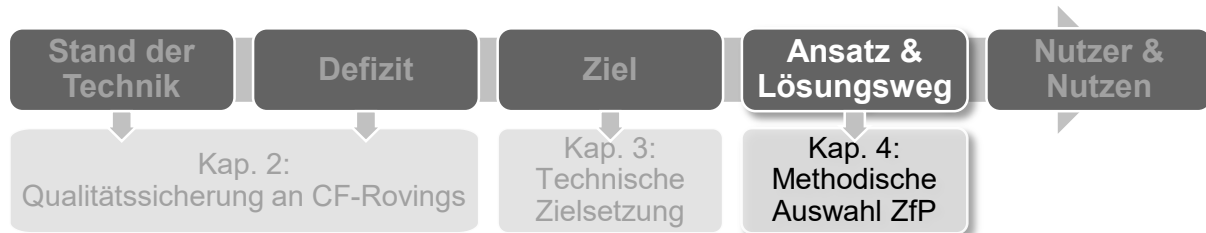


Abb. 4.1: Einordnung von Kap. 4 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Dazu werden ZfP zunächst definiert (Kap. 4.1). Anschließend erfolgen eine Klassifikation nach physikalischem Wirkprinzip sowie eine Vorauswahl geeigneter ZfP, die die Forderungen des Prüfziels gemäß Tab. 3.1 erfüllen (Kap. 4.2). Die Funktionsprinzipien der vorausgewählten ZfP werden beschrieben und Vor- und Nachteile erläutert (Kap. 4.3). Abschließend erfolgt anhand einer Anforderungsanalyse und daraus abgeleiteten Kernanforderungen (Kap. 4.4) die Bewertung der erarbeiteten ZfP mittels House of Quality (HoQ) (Kap. 4.5). Abb. 4.2 visualisiert das Vorgehen.

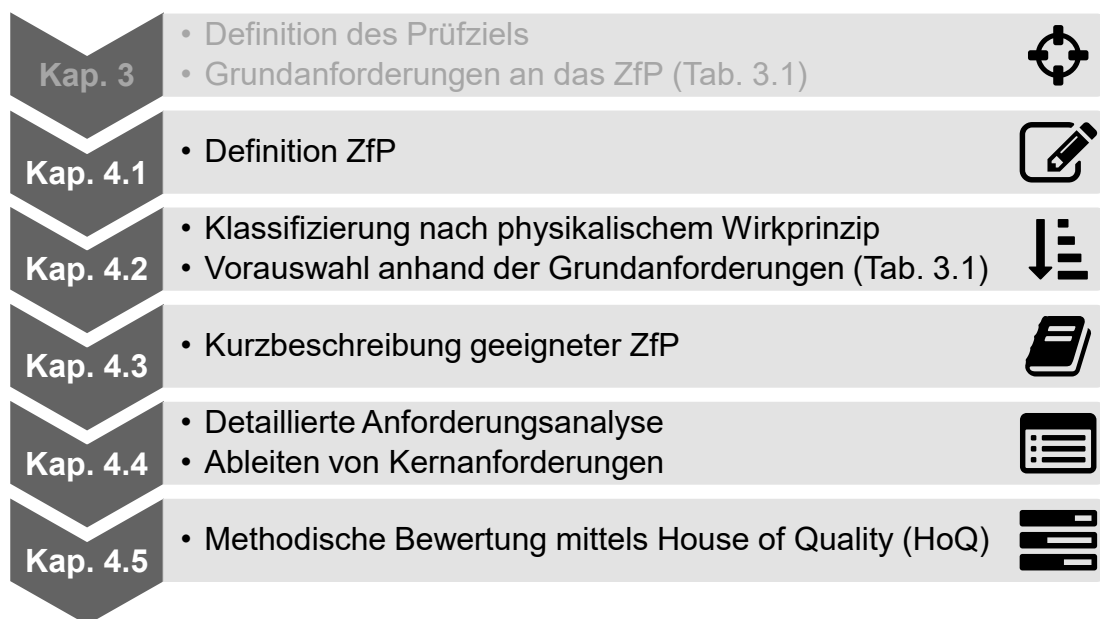


Abb. 4.2: Vorgehen zur methodischen Auswahl eines geeigneten ZfP

4.1 Definition zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP)

Prüftechnik bezeichnet die experimentelle Bestimmung quantitativer Größen, während die Messtechnik die technische Realisierung der Prüfung beschreibt [GF07]. Anschaulich kann dies über den Ort der Datenaufnahme differenziert werden (Abb. 4.3).

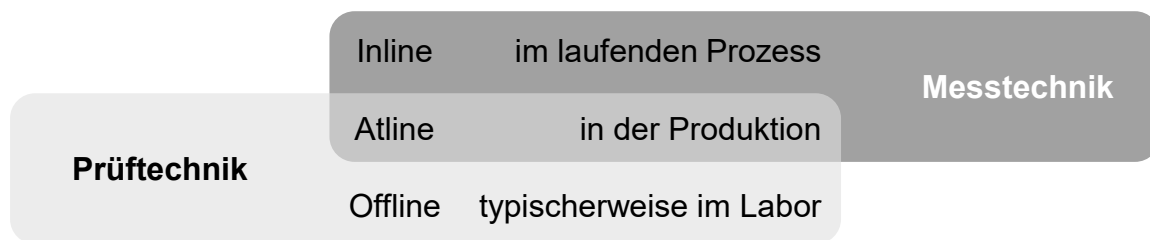


Abb. 4.3: Differenzierung Prüf- und Messtechnik nach [GF07]

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) werden als Untersuchung, Prüfung oder Bewertung definiert, die an jeder Art von Prüfkörper durchgeführt werden können, ohne den Prüfkörper in irgendeiner Weise zu verändern oder zu beeinflussen [Gho16]. Hierbei wird der Terminus ZfP synonym für sowohl Prüf- als auch für Messverfahren verwendet. Ziel ist die Detektion von Zuständen oder Inhomogenitäten im Prüfkörper, die sich auf die Gebrauchs- oder Einsatzfähigkeit auswirken [Hel13]. Dabei liegt der Fokus zum einen auf der Bestimmung von Fehlern in Lage, Form und Größe und zum anderen in der Charakterisierung von Materialeigenschaften [Ste95]. Aktuelle Normen, wie ISO/IEC 17025:2017, DIN EN ISO 9712 und DIN CEN/TS 15053 ergänzen diese Definition [DIN12; DIN18a; DIN05].

Gemeinsamkeit aller ZfP ist, dass Energie in den Prüfkörper eingebracht und die Interaktion mit dem Prüfkörper ausgewertet wird (Abb. 4.4). Die Energie kann sowohl aus dem Produktionsprozess (z.B. Abkühlungsthermographie [Mal94]) als auch aus dem im Gebrauch wirkenden Belastungskollektiv (z.B. Schallemissionsverfahren [Hel13]) stammen oder extern in den Prüfkörper eingebracht werden (z.B. Ultraschallprüfung). Die eingebrachte Energie wechselwirkt mit Inhomogenitäten im Innern des Prüfkörpers und führt zu lokalen Änderungen der Energiedichte, die durch geeignete ZfP detektiert werden. [Per12]

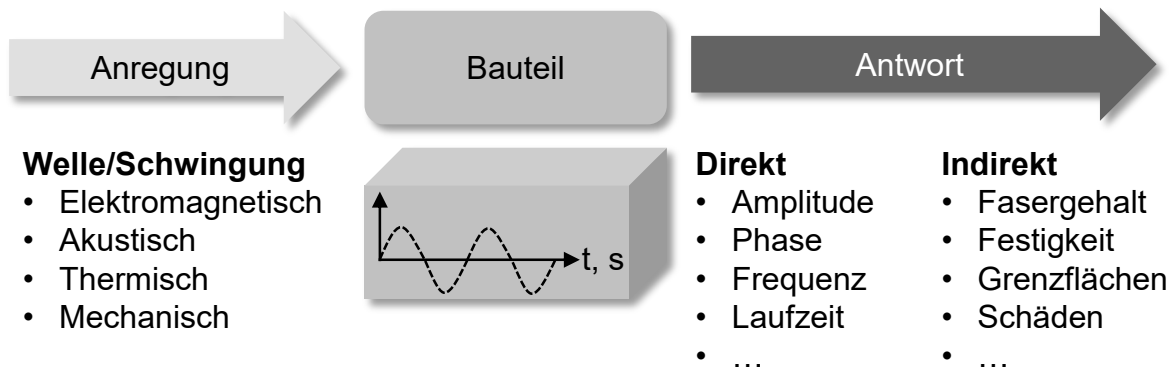


Abb. 4.4: Verwendung des Antwortverhaltens zur Prüfkörpercharakterisierung mittels ZfP nach [GS15]

4.2 Vorauswahl geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren

Die Klassifikation der ZfP kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Eine gängige Einteilung folgt der Unterteilung nach dem physikalischen Wirkprinzip, sodass in Anlehnung an [HM11; SBT04] und den am ITA entwickelten Konstruktionskatalog für Sensorsysteme [RBG06] folgende Differenzierung getroffen wird (Abb. 4.5):



Abb. 4.5: Klassifizierung der ZfP nach physikalischem Wirkprinzip

Die physikalischen Wirkprinzipien unterscheiden sich sowohl grundlegend in ihrer Funktionsweise als auch in der Fähigkeit, verschiedene Fehler in der CF zu detektieren [Per12]. In Abhängigkeit von Prüfziel und Messobjekt werden einzelne Prüfverfahren auch in Kombination miteinander eingesetzt [Sch92]. Im Folgenden wird zu jedem physikalischen Wirkprinzip eine Auswahl konkreter Prüfverfahren vorgestellt (Tab. 4.1). Neben der Nennung konkreter Prüfverfahren erfolgt eine Überprüfung der Kernanforderungen an das ZfP (vgl. Tab. 3.1).

Tab. 4.1: Übersicht existierender ZfP mit physikalischem Wirkprinzip [BSC16; Bue17; DIN05; DGZ20; DIN12; Gho16; RBG06; GS15; Hel13; HF15; HS12; HSP+15; IAK+19; Koc12; KFE+16; Per12; MBC+15; Sie10; SBD+19; SBT04; SKS+01; WZL+20; YHZ16]

Wirkprinzip	Prüfverfahren	Kernanforderungen				
		Eignung für CF	Tiefeninformation	Inline-Prüfung	100 %-Prüfung	Zerstörungsfrei
Optisch	Direkte Sichtprüfung	✓	✗	✓	✗	✓
	Indirekte Sichtprüfung (Kamerasysteme)	✓	✗	✓	✗	✓
	Lasertriangulation	✓	✗	✓	✗	✓
	Shearografie	✓	✗	✗	✗	✗
	Electronic-Speckle-Interferometrie	✓	✗	✗	✗	✗
	Laser-Holografie (Wambologie)	✓	✗	✓	✗	✓
Akustisch	Ultraschallprüfung	✓	✓	✓	✓	✓
	Schallemissionsanalyse/Akustische Resonanzanalyse	✓	✓	✓	✓	✗
	Klangprüfung	✓	✓	✓	✓	✗
Elektrisch/ Magnetisch	Dielektrische/kapazitive Verfahren	✗	✓	✓	✓	✓
	Impedanztomographie	✗	✓	✓	✓	✓
	Wirbelstromverfahren	✓	✓	✓	✓	✓
	Magnetpulverprüfung	✗	✗	✓	✗	✓
	Magnetische Streufeldmessung	✗	✓	✓	✓	✓
Radiografisch	Röntgenprüfung	✓	✓	✓	✓	✓
	Computertomografie	✓	✓	✓	✓	✓
Mechanisch	Eindringprüfung	✓	✓	✗	✗	✗
	Permeabilitätsprüfung	✓	✓	✗	✗	✗
Thermisch	Aktive Thermografie (Transienten- oder Modulationsthermografie)	✓	✓	✓	✓	✓
	Passive Thermografie	✓	✓	✓	✓	✓

Prüfverfahren, die nicht die technischen Forderungen der Zielsetzung (Tab. 3.1) erfüllen, werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. So ist die visuelle Sichtprüfung aufgrund der menschlichen Fehleranfälligkeit als ZfP ungeeignet [Sch15b]. Die indirekte Sichtprüfung und die Lasertriangulation erlauben keine Tiefeninformation, sodass keine innenliegenden Fehler detektiert werden können [Hel13; Per12]. Shearografie und Electronic-Speckle-Interferometrie nutzen eine Deformation des Prüfkörpers [Per12]. Die Laserholographie ist ein Offline-Prüfverfahren [GS15]. Akustische Prüfverfahren, wie die Schallemissionsanalyse oder die akustische Resonanzanalyse, nutzen eine Schädigung des Prüfkörpers während der Qualitätssicherung, während die Klangprüfung über eine zu niedrige Auflösung verfügt [GS15; Per12]. Dielektrische und kapazitive Verfahren sind für die Prüfung leitfähiger Materialien ungeeignet [HS12]. Die Impedanztomographie ist ein berührendes Prüfverfahren und wird hauptsächlich in der Medizintechnik eingesetzt [KDM04]. Die Magnetpulverprüfung und die magnetische Streufeldmessung eignen sich nur für ferromagnetische Werkstoffe [Hel13; SL18]. Die Eindringprüfung kann aufgrund der absorbierenden Oberfläche eines CF-Rovings nicht eingesetzt werden [Hel13; HM11]. Für die Permeabilitätsprüfung ist eine Druckbelastung notwendig. Damit ergibt sich eine Vorauswahl geeigneter ZfP, die alle Mindestanforderungen erfüllen (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Vorauswahl geeigneter Prüfverfahren

Wirkprinzip	Prüfverfahren	Kurzbeschreibung
Akustisch	Ultraschallprüfung	Einkopplung einer Ultraschallwelle und Auswertung des transmittierten Signals oder des reflektierten Echos [Hel13; Sch15c]
Elektrisch/ magnetisch	Wirbelstromverfahren	Induzierung von Wirbelströmen und Auswertung deren Wechselwirkung mit einer Induktivität [HSP+15; MPM+11]
Radiografisch	Röntgenprüfung	2D-Interpretation von transmittierten Röntgenstrahlen [Sch15a; SBD+19]
	Computertomografie	3D-Interpretation von transmittierten Röntgenstrahlen [Sch15a; SBT04]
Thermisch	Aktive Thermografie	Grafische Auswertung der Wärmestrahlung nach externem Energieeintrag [Mal01; Per12]
	Passive Thermografie	Grafische Auswertung der intrinsischen Wärmestrahlung [Mal94; Mal01]

Die gefundene Auswahl entspricht den in der Literatur angegebenen Verfahren, die bereits erfolgreich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie für die Qualitätssicherung an Carbonfaser-basierten Werkstoffen eingesetzt werden [BBN+10; HSM13; HSP+15]. Dies stützt aus technologischer Sicht die getroffene Vorauswahl.

4.3 Kurzbeschreibung geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der geeigneten ZfP gegeben (vgl. Tab. 4.2). Dabei werden die messtechnischen Randbedingungen aufgezeigt und Vor- und Nachteile der jeweiligen Prüfverfahren herausgestellt. Auf dieser Basis erfolgen in Kap. 4.4 die methodische Bewertung der Prüfverfahren sowie die finale Auswahl des favorisierten ZfP.

4.3.1 Ultraschallprüfung

Bei der Ultraschallprüfung (UT) handelt es sich um ein zerstörungsfreies Verfahren zur Materialprüfung, das für die industrielle Qualitätssicherung an Faserverbundbauteilen derzeit am häufigsten eingesetzt wird [HM11; Sch15c]. Dabei wird eine Ultraschallwelle in den Prüfkörper eingekoppelt und das Antwortsignal ausgewertet (Abb. 4.6) [Hel13].

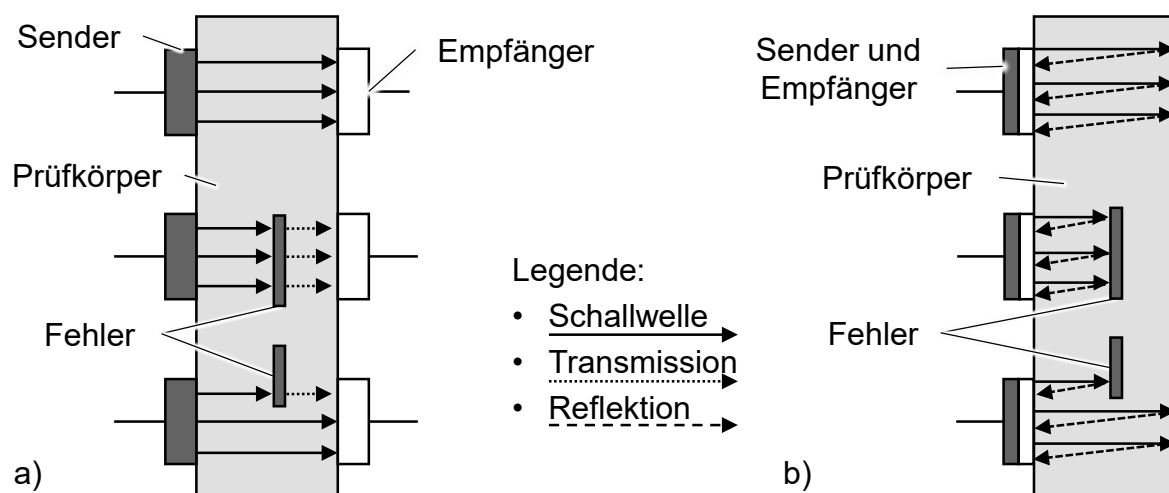


Abb. 4.6: Schematische Darstellung der Ultraschallverfahrensvarianten a) Durchschall- und b) Reflexionsverfahren nach [SBD+19]

Ultraschall ist definiert als akustische Welle mit einer Frequenz > 20 kHz, wobei für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung vor allem der Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 15 MHz zum Einsatz kommt [SBD+19; Sch15c]. Es werden die Verfahrensvarianten Durchschall- und Reflexionsverfahren differenziert. Beim Durchschallverfahren wird eine Schallwelle in den Prüfkörper eingekoppelt und die transmittierten Anteile werden ausgewertet, während beim Reflexionsverfahren die reflektierten Anteile ausgewertet werden [Sch15c]. Über einen piezoelektrischen Schwinger werden die Schallwellen sowohl erzeugt als auch ausgewertet und über die Grenzfläche in den Prüfkörper bzw. in den Empfänger übertragen [BDP01]. Die Dämpfung im Antwortsignal der Schallwelle und die Zeitverzögerung zwischen Senden und Empfangen der Ultraschallwelle, verursacht von Fehlern im Prüfkörper, wird genutzt, um Größe und Ausprägung des Fehlers zu bestimmen [BPF12]. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit können im Reflexionsverfahren zudem die Dicke des Bauteils und die Lage der Fehler bestimmt werden [Koc12]. Um Dämpfungsverluste bei der Einleitung der Schallwelle in den Prüfkörper zu minimieren, wird auf Kopplungsmedien, wie Wasser oder Gele, zurückgegriffen [GS15; KJE+17]. Damit wird die niedrige akustische Leitfähigkeit der Luft kompensiert [DJM+11].

Ein Ultraschallimpuls besteht aus mehreren Schallwellen, die zeitlich verzögert in den Prüfkörper eingebracht werden. Dies resultiert in einer räumlichen Breite des Impulses innerhalb des Prüfkörpers, abhängig von der Schallleitfähigkeit bzw. der materialspezifischen Wellenlänge. Die räumliche Breite des Impulses wird als Impulsbreite W bezeichnet und limitiert die mit dem Verfahren realisierbare Auflösung (4.1). Zwei Fehler im Prüfkörper, die $< W$ voneinander entfernt sind, erzeugen so ein einzelnes, sich überlagerndes Signal, dessen Anteile nicht separat ausgewertet werden können. [Hel13]:

$$W = n \cdot \lambda \quad (4.1)$$

mit:

W	Impulsbreite	[m]
n	Anzahl Schallwellen pro Schallimpuls	[-]
λ	Wellenlänge	[m]

Vor- und Nachteile

Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit einer CF von 1080 m/s (HST) bis 1300 m/s (HM) und der Prüfkörperdicke eines CF-Rovings von wenigen Millimetern ergeben sich Prüfzeiten inklusive Signalverarbeitung von weniger als einer Sekunde. Die Sicherheitsanforderungen bei der Verwendung von Ultraschall sind gering, da keine für den Menschen gefährliche Strahlung entsteht. Die Kosten für portable Ultraschallgeräte liegen in der Größenordnung von mehreren tausend Euro [GAZ21], während die Kosten für Inline-Messsysteme für Anwendungen in der CFK-Prozesskette im Bereich von einigen 10.000 Euro liegen⁵. Der Bauraum von Sender und Empfänger des Ultraschallverfahrens liegt im Bereich weniger Zentimeter [SBD+19]. Der Messkopf kann daher über die räumliche Trennung zur Auswerteeinheit in CF-Herstellungs- oder -Verarbeitungslinien eingesetzt werden. Dem Nachteil einer kontaktierenden Prüfung bzw. der Verwendung von Gelen zur Schalleinkopplung kann mit dem Luftultraschallverfahren begegnet werden, bei dem der Schall über einen Luftspalt in den Prüfkörper eingekoppelt wird [GS15]. Dieses Verfahren führt ebenfalls zu guten Ergebnissen und wurde für CFK-Bauteile in der Luftfahrt als Prüfverfahren qualifiziert [HAR+04; ICW+04; Ost13].

Ein Nachteil in Bezug auf die Messung an CF liegt in der offenen, ungleichmäßigen Oberfläche des CF-Rovings. Bei der Schalleinkopplung in ungleichmäßige Oberflächen muss die Messfrequenz des Ultraschallsignals reduziert werden, was zu einem reduzierten Auflösungsvermögen führt [Hel13]. Zudem müssen sich detektierbare Inhomogenitäten deutlich in der Größenordnung von der Materialstruktur unterscheiden, um ein akzeptables Signal-Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR) zu erzielen [Hel13]. Die Abstände zwischen Einzelfilamenten im CF-Roving liegen in der gleichen Größenordnung wie potenzielle Filamentbrüche, sodass eine Detektion von Filamentbrüchen mittels Ultraschall bis dato nicht nachgewiesen wurde [Ost13]. Folglich wird die Detektion von Filamentbrüchen in CF und CFK-Bauteilen als nicht möglich oder nicht

⁵ Schriftverkehr per E-Mail mit Herrn Bertrand Richard, Technical Sales Manager, Testia GmbH, Bremen vom 11.06.2020

nachweislich möglich bewertet [SB17]. Darüber hinaus ist für die Interpretation der grafisch aufbereiteten Messwerte ein geschulter Prüfer erforderlich, sodass zwar eine Vollautomatisierung des Prüfverfahrens, nicht jedoch der Auswertung erfolgen kann [Hel13; Koc12].

Abb. 4.7 veranschaulicht Vor- und Nachteile der Ultraschallprüfung. Die Zuordnung der Erfüllungsgrade der verschiedenen Vor- und Nachteile kann Anhang B I entnommen werden.

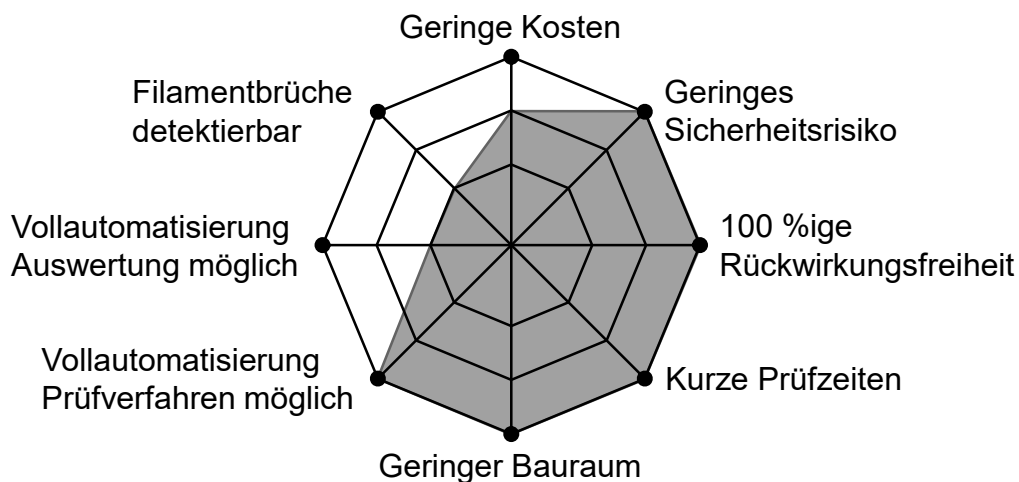


Abb. 4.7: Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der Ultraschallprüfung

4.3.2 Wirbelstromverfahren

Das Wirbelstromverfahren ist ein induktives Verfahren, bei dem Wirbelströme im Prüfkörper induziert werden und das resultierende Magnetfeld über verschiedene Techniken erfasst und ausgewertet wird [DIN89]. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein etabliertes ZfP, das zur berührungslosen Prüfung von elektrisch leitfähigen Materialien eingesetzt wird [HSM13]. Das Phänomen der Wirbelströme wurde von Maxwell 1864 in den Maxwell'schen Gleichungen formuliert und 1879 messtechnisch zur Differenzierung von Metallen genutzt [Hel13]. Das Verfahren existiert seit den 1960er Jahren in genormter Form und wird konventionell zur 100 %-Prüfung von Metallen zur Detektion von Oberflächenfehlern, wie Risse und Gefügeänderungen, oder zur Prüfung von Werkstoffeigenschaften, wie Oberflächenhärte oder Einhärtetiefe, einge-

setzt [DIN19a; Mag21; TMW15; HSP+15]. Seit einigen Jahren wird das Wirbelstromverfahren ebenfalls für die Qualitätsprüfung von CF-basierten Werkstoffen und Dünnschichtsystemen eingesetzt [HHR+10; HSK12]. Die elektrische Leitfähigkeit des Prüfkörpers ist dabei eine notwendige Voraussetzung, da bei dem Wirbelstromverfahren hochfrequente Wirbelströme im Prüfkörper induziert und deren Wechselwirkung mit einer Induktivität ausgewertet werden [HSP+15; MPM+11]. Typischerweise werden Frequenzen im Bereich von einigen kHz bis 10 MHz eingesetzt [HHK+10]. Durch die Verwendung von Frequenzen von bis zu 100 MHz im Radiowellenbereich kann die Wirbelstromtechnik für die Prüfung schlecht leitfähiger Materialien, wie CFK, adaptiert werden [BBN+10; HSM13; HHR+10; LM94]. Das Wirbelstromverfahren nutzt dabei die elektrische Leitfähigkeit des Prüfkörpers zur Materialcharakterisierung [Moo15]. Zwar liegt die elektrische Leitfähigkeit von CF Größenordnungen unter der Leitfähigkeit von Metallen (Tab. 4.3), doch können mit geeigneter Sensorik Rückschlüsse auf Inhomogenitäten, wie z.B. Faserbrüche, gezogen werden [Moo15; MPM+11]. Es konnte gezeigt werden, dass für CFK mittels Wirbelstrom eine umfassende Materialcharakterisierung vorgenommen werden kann, da Informationen wie Faserorientierung, Gaps oder Ondulationen aus der Leitfähigkeit abgeleitet werden können [HSP+15].

Tab. 4.3: Leitfähigkeiten ausgewählter Werkstoffe

Material	Bemerkung	Leitfähigkeit σ [kS/m]	Quelle
Kupfer	-	59.000	[Gäb17]
Graphit	-	130	[Li12]
Kohlenstoff	-	30	
CF-Roving	normal	32 - 40	[Sum90]
	HM	172 - 190	
UD-CFK	CFK in Faserrichtung	7,7 - 50	[KHK13; Moo15; Li12; YPD04; PW96]
	CFK _⊥ quer zur Faserrichtung	0,0048 - 1	[KHK13; PW96; Li12; Moo15]

Das Wirbelstromverfahren basiert auf dem physikalischen Prinzip der elektromagnetischen Induktion, bei dem eine Spannung in einem elektrischen Leiter induziert wird, die proportional zur Änderung des magnetischen Flusses durch die vom Leiter umschlossene Fläche ist. Die induzierte Spannung folgt dabei

dem Faraday'schen Induktionsgesetz, das sich für den eindimensionalen Fall eines homogenen Magnetfeldes zu (4.2) vereinfacht: [TMW15]

$$U_{\text{ind}} = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (4.2)$$

mit:

U_{ind}	Induzierte Spannung	[V]
N	Windungszahl der Spule	[-]
A	Querschnittsfläche der Spule	[mm ²]
B	Magnetische Flussdichte	[T]

Das Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens wird in Abb. 4.8 dargestellt.

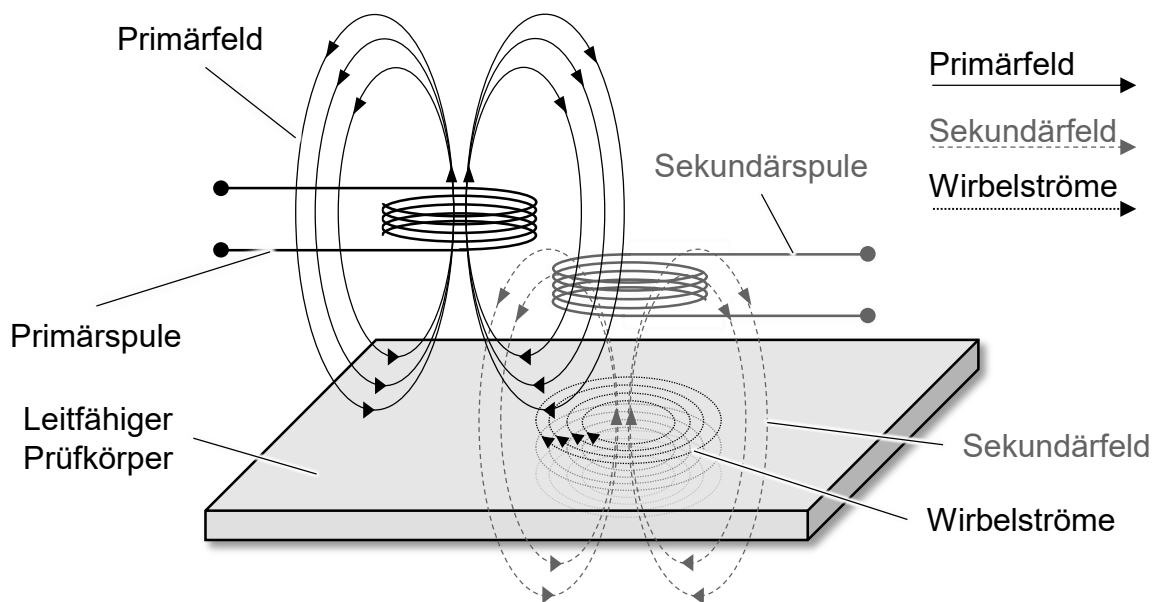


Abb. 4.8: Schematische Darstellung des physikalischen Funktionsprinzips des Wirbelstromverfahrens nach [HHK+10]

Wird die Primärspule von einem Wechselstrom durchflossen, erzeugt sie ein magnetisches Feld, das als Primärfeld bezeichnet wird. Wird nun ein Prüfkörper, bestehend aus einem leitfähigen Material, im Wirkungsbereich des Primärfeldes platziert, so werden durch das Primärfeld Wirbelströme innerhalb des Prüfkörpers induziert. Die Wirbelströme im Prüfkörper erzeugen ihrerseits ein zweites Magnetfeld, das als Sekundärfeld bezeichnet wird und dem Primärfeld invers orientiert ist. Eine zweite Spule, die sogenannte Empfängerspule, wird im überlagerten Primär- und Sekundärfeld platziert. Die überlagerten Magnetfelder rufen in der Empfängerspule einen Wechselstromwiderstand hervor, der als Impedanz bezeichnet wird und eine komplexe Messgröße ist, bestehend aus Real-

und Imaginärteil. Ändert sich die Leitfähigkeit des Prüfkörpers durch lokale Inhomogenitäten, wie etwa Risse oder Einschlüsse, so ändert sich auch das Sekundärfeld. Dies kann als Änderung der Impedanz durch die Empfängerspule detektiert und als Vektor in der komplexen Ebene dargestellt werden. Durch eine geeignete Auswertung der Real- und Imaginärteile können Rückschlüsse auf die lokale Leitfähigkeit des Prüfkörpers und damit auf Inhomogenitäten im Prüfkörper gezogen werden. [BBN+10; HSM13; HSP+15]

Vor- und Nachteile

Der größte Vorteil des Wirbelstromverfahrens, die Empfindlichkeit des Prüfverfahrens gegenüber einer Vielzahl von Einflüssen, ist zugleich einer der größten Nachteile des Verfahrens. Zu den Einflussgrößen auf das Wirbelstromsignal zählen unter anderem die elektrische Leitfähigkeit, die magnetische Permeabilität, die Dicke sowie Inhomogenitäten im Prüfkörper und der Abstand zwischen Spule und Prüfkörper. Dementgegen ist das Wirbelstromverfahren jedoch unempfindlich gegenüber den Einflüssen von Flüssigkeiten und nichtmetallischen und elektrisch nicht leitfähigen Verunreinigungen, sodass auch unter widrigen Produktionsbedingungen reproduzierbare Messergebnisse erzeugt werden können [BBN+10; HS12]. Dabei ist das Prüfverfahren einfach zu implementieren, berührungslos und rückwirkungsfrei gegenüber dem Prüfkörper [HSM13; HSP+15]. Mit dem Wirbelstromverfahren werden Auflösungen zwischen 2,5 nm bis 100 nm erreicht, was mit Blick auf den Faserdurchmesser der CF von rund 7 μm ausreichend erscheint [HHK+10; HS12]. Darüber hinaus ist Wirbelstromsensorik portabel, klein und leicht, sodass sich bezüglich des Bau- raums kaum Limitierungen ergeben [HS18; Kon14]. Weiterhin können die Messwerte in Echtzeit ausgelesen und interpretiert werden, da die Daten vorliegen, sobald die Empfängerspule auf den Prüfkörper reagiert [BBN+10; Hel13]. Damit ist ein Einsatz als Inline-Messverfahren gewährleistet. Eine Stärke des Wirbelstromverfahrens liegt in der iO/niO-Klassifizierung, da auf Basis der Leitfähigkeit Schwellenwerte für die Klassifikation hinterlegt werden können. Dies ist zusammen mit der einfachen Bedienbarkeit der Prüfgeräte die Grundlage für eine Vollautomatisierung von Prüfverfahren und Auswertung [HSM13; HSP+15;

Koc12; MM14]. Vom Prüfverfahren geht keine Gesundheitsgefährdung aus, sodass keine Sicherheitsmaßnahmen für das Bedienpersonal getroffen werden müssen [HSM13]. Für schlecht leitende Materialien, wie CF und CFK, können hohe Eindringtiefen im Bereich einiger mm bis cm realisiert werden [HSM13; KHK13]. Nachgewiesen wurde eine Fehlerdetektion bis in eine Tiefe von 8 mm bzw. bis zur siebten Faserlage in Gelegen, was mit Blick auf die Prüfung von CF-Rovings ausreichend ist [BBN+10; Bül14]. Die Fähigkeit des Prüfverfahrens für den Nachweis von gebrochenen Rovings in CFK-Bauteilen wurde bereits erbracht [Moo01]. Die Prüfgeschwindigkeit des Wirbelstromverfahrens liegt bei bis zu 2 m/s bzw. 120 m/min für konventionelle Prüfgeräte [BBN+10]. Gemessen an der Produktionsgeschwindigkeit von CF, die in der Größenordnung von 10 bis 20 m/min liegt, ist die Prüfgeschwindigkeit des Wirbelstromverfahrens ausreichend hoch. Die Kosten für einen einzelnen Sensor belaufen sich gegenwärtig auf rund 20.000 €, wobei mehrere Sensoren mit einer einzelnen Steuer elektronik betrieben werden können, sodass sich bei der Ausnutzung von Skaleneffekten die Kosten auf etwa 1.000 € pro Sensor senken lassen⁶. Das Prüfverfahren ist damit im Vergleich zu anderen ZfP relativ kostengünstig [BBN+10]. [Hel13]

Nachteile des Prüfverfahrens liegen in der Notwendigkeit einer hinreichend großen elektrischen Leitfähigkeit des Prüfkörpers, sodass das Verfahren mit Blick auf Faserstoffe lediglich für CF, CF-Hybridgarne oder leitfähige Fasern (beschichtet oder leitfähiges Material in der Faser dispergiert) eingesetzt werden kann. Zudem ist die Empfindlichkeit des Prüfverfahrens gegenüber verschiedensten Einflüssen eine Herausforderung bei der Auswertung. Der Nachteil liegt hierbei in der Vektoraddition der verschiedenen Einflüsse im Messsignal. Dabei werden die Einflüsse auf das Messsignal zu einem einzigen Signal kombiniert, sodass die Trennung der Einflüsse im Messsignal eine große Herausforderung darstellt. Weiterhin ist die Theorie hinter dem Wirbelstromverfahren komplex und im Bereich der Prüfung von trockenen CF wenig erforscht,

⁶ Telefonat mit Herrn Richard Kupke, Prokurist, SURUGS GmbH, Dresden, vom 16.12.2020

sodass ein hohes Maß an Kompetenz für eine aussagekräftige Prüfung notwendig ist [Hel13]

Abb. 4.9 fasst Vor- und Nachteile des Wirbelstromverfahrens grafisch zusammen. Die Zuordnung der Erfüllungsgrade der Vor- und Nachteile erfolgt in Anhang B II.

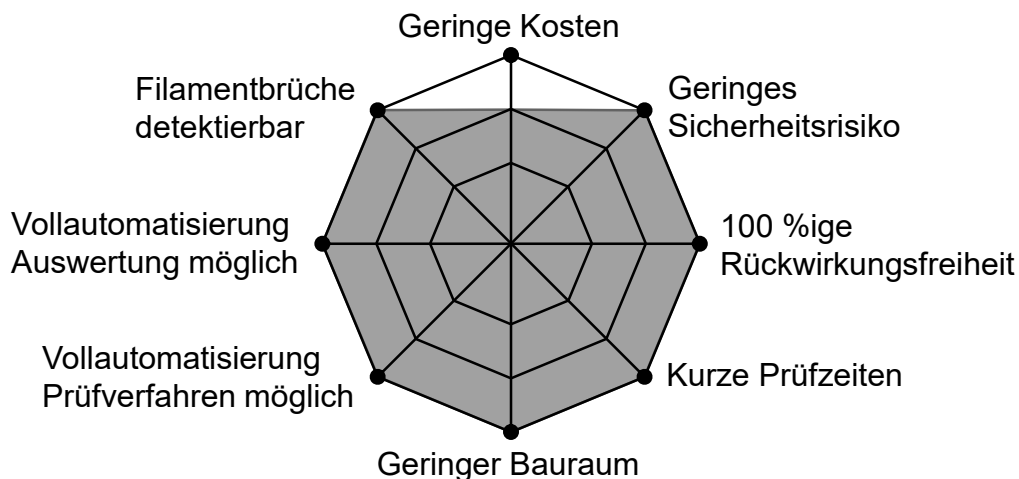


Abb. 4.9: Netzdiagramm über Vor- und Nachteile des Wirbelstromverfahrens

4.3.3 Radiografische Prüfverfahren

Zu den radiographischen Prüfverfahren zählen [Sch15a; SB17; Ste95]:

- Röntgenprüfung
- Durchstrahlungsprüfung mittels Gammastrahlen
- Computertomografie (CT)

Allgemein handelt es sich bei radiografischen Prüfverfahren um ein ZfP, bei welchem der Prüfkörper einer hochenergetischen elektromagnetischen Strahlung ausgesetzt und die transmittierten Strahlungsanteile ausgewertet werden. Die elektromagnetische Strahlung verfügt über eine Energie im Bereich mehrerer tausend bis mehrerer Millionen Elektronenvolt, die mit einer entsprechend kleinen Wellenlänge im Pikometer-Bereich korreliert. Der Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge einer elektromagnetischen Wellenlänge folgt Gleichung (4.3). [Ste95]

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (4.3)$$

mit:

E	Energie	[eV]
h	Planck'sches Wirkungsquantum	[Js]
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	[m/s]
λ	Wellenlänge	[m]

Einerseits wird die radiografische Durchstrahlungsprüfung in Radiografie und Radioskopie unterteilt [SBD+19]. Bei der Radiographie wird die transmittierte Strahlung auf einem Röntgenfilm oder -papier aufgefangen und damit in ein analoges Abbild umgewandelt. Im Gegensatz dazu wird bei der Radioskopie die transmittierte Strahlung über Bildschirme oder digitale Bildverarbeitung ausgewertet. [Sch15a]

Andererseits wird die radiographische Durchstrahlungsprüfung auch nach der Art der Erzeugung der elektromagnetischen Strahlung in Röntgenprüfung und Durchstrahlungsprüfung mittels Gammastrahlen differenziert [SBD+19]. Röntgenstrahlung entsteht, wenn beschleunigte Elektronen auf die Valenzelektronen eines geeigneten Anodenmaterials treffen und dabei ein Valenzelektron auf eine energetisch höhere Schale heben. Fällt das Valenzelektron anschließend in den energetisch günstigeren Zustand auf die ursprüngliche Schale zurück, wird Energie frei. Diese Energie wird als Photon in Form von elektromagnetischer Strahlung emittiert und als Röntgenstrahlung bezeichnet. Gammastrahlung dagegen entsteht, wenn ein Atomkern durch beschleunigte Elektronen, Neutronenbeschuss etc. in einen energetisch höheren Zustand versetzt wird oder dabei zerfällt. Beim Zerfall sowie bei der Rückkehr in seinen Grundzustand emittiert der Atomkern die freiwerdende Energie in Form elektromagnetischer Strahlung, die als Gammastrahlung bezeichnet wird. [Ste95]

Bei der Röntgenprüfung wird aus dem durchstrahlten Prüfkörper mittels Projektion eine 2D-Abbildung generiert. Dabei absorbieren verschiedene Dicken, Dichten und Materialien die hoch energetische Strahlung unterschiedlich stark, sodass sich die unterschiedlichen Absorptionsgrade als Kontrast auf dem Detektor darstellen. Die Absorption der Röntgen- bzw. Gammastrahlung folgt dem Lambert-Beer'schen Schwächungsgesetz (4.4) [GS15; Koc12; Sch15a]

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (4.4)$$

mit:

$I(x)$	Intensität in Abhängigkeit von der durchstrahlten Dicke	[mS/h]
I_0	Intensität vor dem Prüfobjekt	[mS/h]
μ	Absorptionskoeffizient	[m ⁻¹]
x	Wegkoordinate der Materialdicke	[m]

Abb. 4.10 zeigt stellvertretend den schematischen Aufbau der Röntgenprüfung, bei welcher der Prüfkörper im Kegelstrahl zwischen Röntgenquelle und Flächendetektor angeordnet wird. Die hochenergetische Strahlung wird von der Röntgenquelle mit der Anfangsintensität I_0 emittiert und trifft auf den Prüfkörper. Beim Durchgang durch den Prüfkörper nimmt die Intensität in Abhängigkeit von der durchstrahlten Dicke x und dem werkstoffspezifischen Absorptionsgrad μ auf $I(x)$ ab. Die transmittierte, abgeschwächte Strahlung wird vom Flächendetektor als Projektion aufgefangen. Die Kontraste in der Projektion des Prüfkörpers und enthaltener Defekte resultieren aus den lokal variierenden Absorptionsgraden. [Koc12]

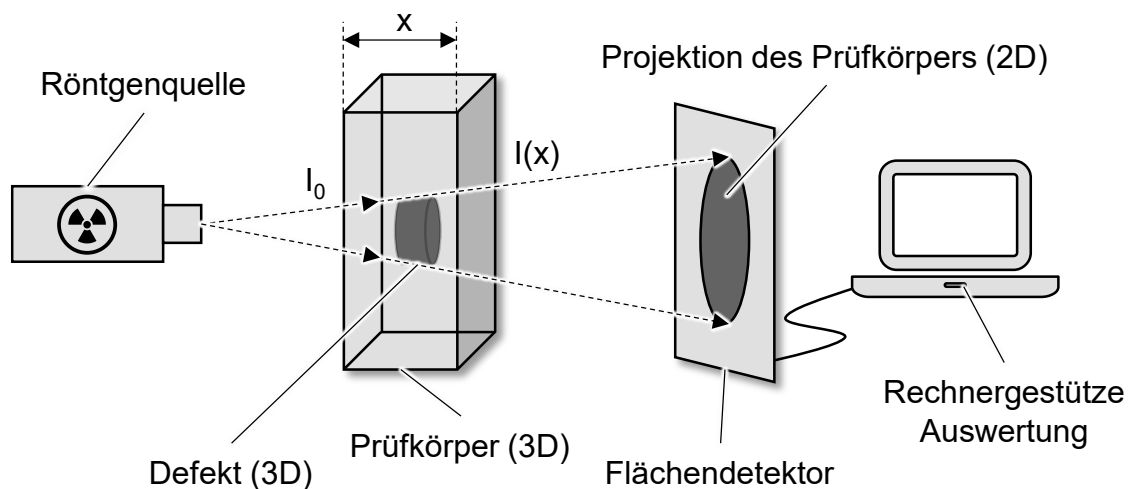


Abb. 4.10: Schematische Darstellung der Röntgenprüfung nach [Koc12]

Um den Nachteil einer 2D-Darstellung des Prüfkörpers zu kompensieren, erfolgt die Röntgenprüfung unter verschiedenen Winkeln. Somit können Fehler in Lage und Geometrie exakt bestimmt werden [Koc12]. Geschieht dies automatisch über einen geeigneten Manipulator und werden die Bilder anschließend rechnerisch zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt, wird das Verfahren

als Computertomografie bezeichnet [SSP+02]. Zur Erzeugung eines dreidimensionalen Scans des Prüfkörpers wird eine Serie von Röntgenbildern entlang einer definierten Trajektorie angefertigt [Kle18]. Anschließend werden die Bilder rechnerisch mittels eines Rekonstruktionsalgorithmus zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt [FDK84]. Das Verfahren wird bereits erfolgreich an Faserverbundwerkstoffen, wie CFK und GFK, eingesetzt [Koc12; Sch17].

Vor- und Nachteile

Bei der Durchstrahlungsprüfung mittels Röntgen- oder Gammastrahlung handelt es sich um ein etabliertes Verfahren, das für variable Formen, Geometrien und eine Vielzahl von Werkstoffen geeignet ist [Hel13; Per12]. Nach aktuellem Stand der Technik existieren Echtzeit-Röntgenprüfungen, sodass das Verfahren hierdurch sowie durch seine Automatisierbarkeit für eine Inline-Qualitätssicherung geeignet ist [BBN+10; GS15]. Es ist eine hohe Auflösung von Defekten möglich, sofern durch den Defekt eine hinreichend hohe Querschnittsänderung verursacht wird [GS15; Ste95]. So sind beispielweise Mikrorisse durch Röntgenabsorption nur schwer zu detektieren [GS15; Koc12]. Auch resultiert aus dem relativ geringen Dichteunterschied zwischen CF und Matrix eine geringe Kontrastierung, was die Auswertung des Messsignals erschwert [BBN+10]. Allerdings kann bei Verwendung eines geeigneten Manipulators eine Ortsauflösung von 10 μm sowie eine strukturelle Auflösung im Bereich von 100 μm bis 0,1 nm erzielt werden, sodass prinzipiell alle relevanten Defekte im Rahmen traditioneller ZfP abgedeckt werden können [Ost13; Per12]. Die Detektion von Filamentbrüchen mittels CT kann nach gegenwärtigem Stand der Technik sichergestellt werden [Ost13]. Bei der Verwendung von Gammastrahlung ergibt sich der Vorteil einer deutlich höheren Kontrastierung in der Projektion des Prüfkörpers, da wasserstoffhaltige Moleküle stärker auf Gammastrahlung reagieren [Per12]. Da die meisten Kunststoffe aus langkettigen Kohlenwasserstoffen bestehen, ist diese Art der Strahlung bei der Prüfung von FVK vorzuziehen [MHM+14].

Zu den Nachteilen zählen insbesondere die notwendigen umfangreichen Sicherheitsmaßnahmen, die aus der radioaktiven Strahlung resultieren, und erfahrene, gut ausgebildete Prüfer voraussetzen [BBN+10; Hel13]. Letztere sind

darüber hinaus auch für die grafische Interpretation der resultierenden Messergebnisse notwendig, sodass zwar eine Vollautomatisierung des Prüfverfahrens, nicht jedoch der Auswertung möglich ist [Hel13]. Eine Volumenprüfung ist zwar möglich, doch kann aufgrund der 2D-Projektion der Messung die Tiefeninformation von Defekten im Prüfkörper nicht dargestellt werden [Sch15a]. Defekte können einander zudem überlagern und zu fehlerhaften Aussagen über die Defektgröße führen [Sch15a]. Auch ist die Probendicke in Abhängigkeit vom Material des Prüfkörpers und seinem Absorptionsgrad limitiert, wobei die Probendicke bei der Prüfung von CF-Rovings als unkritisch eingestuft wird [Per12]. Zusätzlich liegt der benötigte Bauraum von mindestens 100 m³ um Größenordnungen über dem vergleichbarer Prüfverfahren [WZL+20]. Schließlich liegen die Anschaffungs- und Verbrauchskosten im Bereich von rund 100.000 €, womit das Verfahren deutlich kostenintensiver ist als alternative ZfP [KFE+16].

Abb. 4.11 veranschaulicht die Vor- und Nachteile der radiografischen Prüfung. Die Zuordnung der Erfüllungsgrade der verschiedenen Vor- und Nachteile kann Anhang B III entnommen werden.

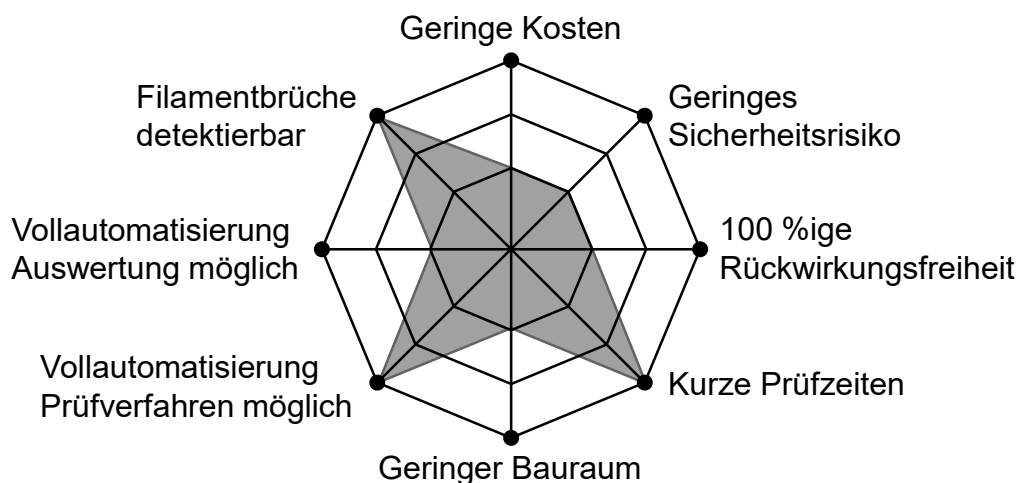


Abb. 4.11: Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der radiografischen Prüfung

4.3.4 Thermografie

Bei der Thermografie wird die von einem Prüfkörper emittierte Wärmestrahlung im Infrarotbereich sowie die sich ausbildende Temperaturverteilung im

Prüfkörper detektiert und analysiert [VM18]. Elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich verfügt über Wellenlängen von bis zu 100 μm und schließt sich an den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts von 400 – 780 nm an (Abb. 4.12) [TMW15]. Dem Messprinzip der Thermographie liegt die physikalische Eigenschaft zugrunde, dass jeder Körper mit einer Temperatur $T > 0\text{ K}$ elektromagnetische Strahlung emittiert, die im Bereich der Infrarotstrahlung liegt [Meo12].

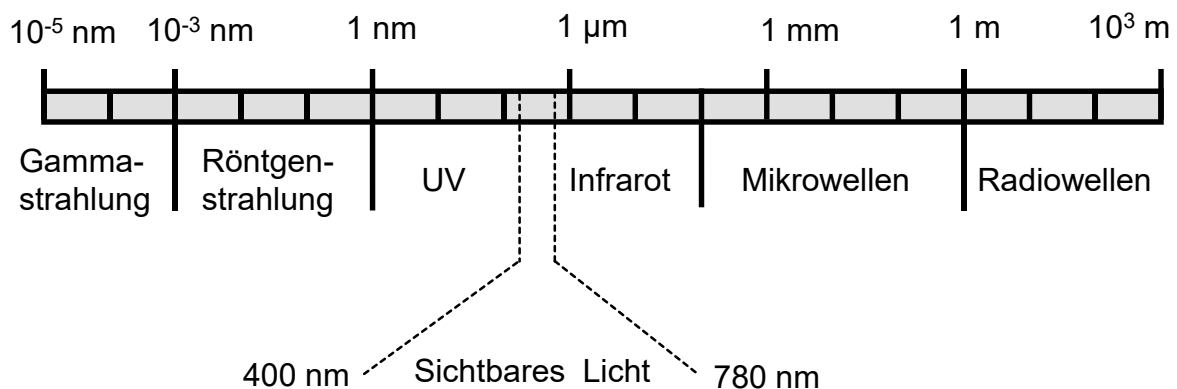


Abb. 4.12: Schematische Darstellung des elektromagnetischen Spektrums nach [TMW15]

Die Verfahrensvarianten der Thermografie können nach Art der analysierten, vom Prüfkörpers emittierten Wärmestrahlung sowie bei der aktiven Thermografie zusätzlich nach Art der Anregung unterteilt werden [DIN16]:

- Passive Thermografie
- Aktive Thermografie
 - Transiententhermografie
 - Modulationsthermografie

Bei der passiven Thermografie wird die emittierte Wärmestrahlung des Prüfkörpers analysiert, die durch intrinsische Wärme hervorgerufen wird. Intrinsische Wärme wird im Innern des Prüfkörpers erzeugt oder beispielsweise durch Wärmebehandlung in vorangegangenen Prozessstufen eingebracht. Im Gegensatz dazu wird bei der aktiven Thermografie einzig zum Ziel einer thermografischen Prüfung ein instationärer Wärmestrom in den Prüfkörper eingebracht und die emittierte Wärmestrahlung analysiert. Die aktive Thermographie wird nach Art

der thermischen Anregung in Transienten- und Modulationsthermografie differenziert. Bei der Transiententhermografie (z.B. Impuls- oder Stufenthermografie) erfolgt die Anregung einmalig, während bei der Modulationsthermografie (z.B. Lock-In- oder Burst-Thermografie) die Anregung periodisch erfolgt. [DIN16]

Zur thermischen Anregung bei der aktiven Thermografie können verschiedene physikalische Wirkmechanismen und unterschiedliche Technologien eingesetzt werden. Tab. 4.4 gibt einen Überblick über verschiedene Mechanismen und die gängigsten Technologien. [Sie10]

Tab. 4.4: Übersicht über verschiedene Wirkmechanismen zur thermischen Anregung nach [Sie10]

Thermische Anregung	Technologie
Optisch	Blitz, Laser, Halogenstrahler
Mechanisch	Ultraschall
Elektrisch	Induktion
Konvektion	Heißluft, Kaltluft

Die Analyse der vom Prüfkörper emittierten Wärmestrahlung erfolgt qualitativ, vergleichend oder quantitativ. Bei der qualitativen Auswertung genügt die Bildanalyse der resultierenden Wärmeverteilung, während bei der vergleichenden Auswertung Temperaturdifferenzen ausgewertet werden. Bei der quantitativen Auswertung wird dagegen die Temperatur exakt bestimmt und zusammen mit den Strahlungswerten analysiert. Dazu ist eine genaue Kenntnis der physikalischen Werkstoffparameter, wie der Emissionsgrad ε , sowie deren Temperaturabhängigkeiten notwendig. [DIN16]

Nach der externen Einbringung thermischer Energie in den Prüfkörper im Falle der aktiven Thermographie (Abb. 4.13) bzw. nach Freisetzung der intrinsischen Wärme im Falle der passiven Thermografie finden im Prüfkörper Temperaturausgleichsvorgänge statt. [Sie10]

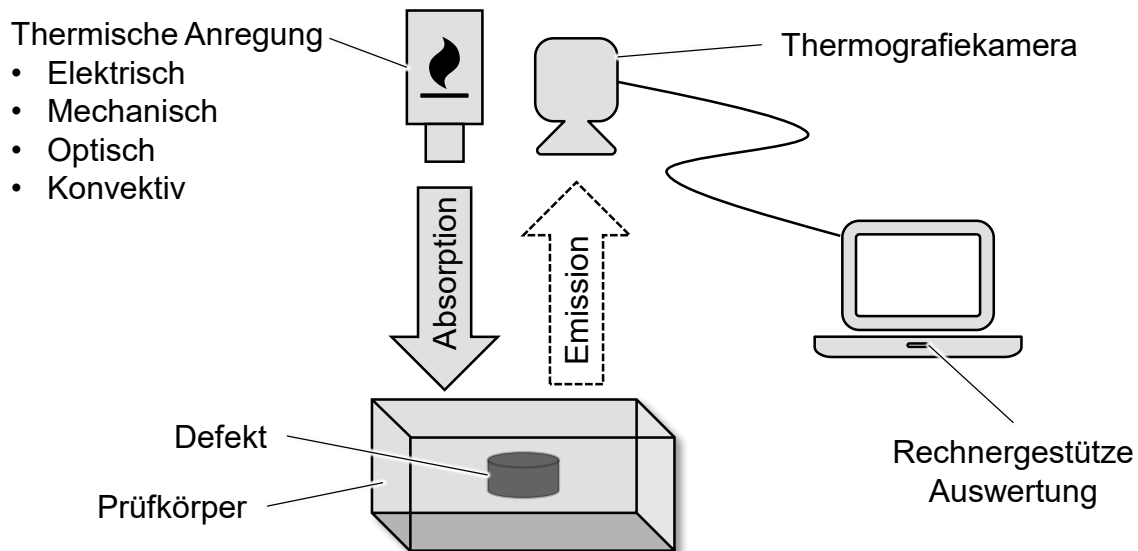


Abb. 4.13: Schematische Darstellung der aktiven Thermografie mit verschiedenen Methoden zur thermischen Anregung

Die Temperatúrausgleichsvorgänge folgen der Fourier-Differentialgleichung (DGL), die die infinitesimale lokale Temperaturänderung $\partial T(x,y,z)$ in einem kartesischen Koordinatensystem in Abhängigkeit von der Zeit t beschreibt (4.5) [CJ08]:

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho \times c_w \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.5)$$

mit:

κ	Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$
T	Temperatur	$[^\circ \text{K}]$
x, y, z	Kartesische Koordinaten	$[-]$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$[\text{W}]$
ρ	Dichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$
c_w	Spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
t	Zeit	$[\text{s}]$

Die Fourier-Gleichung veranschaulicht, dass die Temperatúrausgleichsvorgänge insbesondere von den physikalischen Stoffeigenschaften der Wärmeleitfähigkeit κ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_w abhängen. Die Stoffeigenschaften sind im Allgemeinen orts- und temperaturabhängig, wobei in (4.5) zur Übersichtlichkeit der Temperatúrausgleich für homogene und isotrope Stoffeigenschaften dargestellt ist. [Sie10]

Die sich ausbildende Temperaturverteilung erzeugt eine temperaturabhängige Infrarotstrahlung, die von einer Thermografiekamera detektiert und mittels digitaler Bildverarbeitung visuell aufbereitet werden kann, sodass sich ein virtuelles Bild der Temperaturverteilung ergibt [MC06]. Inhomogenitäten bzw. Fehlstellen im Prüfkörper können eine vom restlichen Prüfkörper abweichende Wärmeleitfähigkeit κ , Dichte ρ oder spezifische Wärmekapazität c_W aufweisen und so zu einer Änderung der ansonsten homogenen Temperaturverteilung führen. Die Abweichungen der homogenen Temperaturverteilung wird mit der Thermografiekamera erfasst, sodass Rückschlüsse auf Form und Lage der Inhomogenitäten gezogen werden können.

Vor- und Nachteile

Da bei der Thermografie keine für den Menschen schädliche Strahlung entsteht, sind die Sicherheitsanforderungen gering. Zudem ist das Prüfverfahren im Vergleich zu anderen Verfahren relativ kostengünstig. Als ZfP bietet die Thermografie eine berührungslose und schnelle Fehlererkennung, mit der große Flächen sowie komplexe Geometrien geprüft werden können [Sie10; ZTL+11]. Hierbei beträgt die Erzeugung eines thermografischen Bildes nur wenige Sekunden und verfügt über eine Auflösung von bis zu 0,04 °K [Hel13]. Die Thermographie wird nach gegenwärtigem Stand der Technik daher mit Bezug auf Fa-serverbundbauteile insbesondere in der Luftfahrtindustrie eingesetzt [WZL+20]. In diesem Zusammenhang werden Einschlüsse, Delaminationen und Risse detektiert [GPE+11]. Mit einer geeigneten Bildverarbeitung können Fehler im Prüfkörper zudem orts aufgelöst und grafisch dargestellt werden [Sie10]. Mit Blick auf die 100 %-Prüfung bietet die Thermographie ein hohes Automatisierungspotenzial sowie die Möglichkeit einer Integration in eine Industrieumgebung [Sie10].

Zu den Nachteilen der Thermografie zählt, dass nur die Oberfläche des Probekörpers direkt vermessen werden kann [Hel13]. Zwar können Anomalien im Inneren des Prüfkörpers zu einer abweichenden Temperaturverteilung auf der Oberfläche führen, sodass Volumenprüfungen möglich sind, doch ist hier die Auflösung der Anomalien mit zunehmender Tiefe im Prüfkörper begrenzt. Als Grenze werden in der Literatur Tiefen zwischen 5 und 8 mm genannt [BBN+10;

Ede12; USH+10]. Mit Blick auf die Prüfung von CF-Rovings ist diese Tiefe ausreichend. Da die Änderung der Wärmeleitfähigkeit zwischen zwei Filamenten in der Größenordnung der Änderung der Wärmeleitfähigkeit zwischen gebrochenen Filamenten liegt, können Filamentbrüche nur schwer mittels Thermografie detektiert werden [Ost13]. Die Prüfdauer liegt, abhängig von der Art der thermischen Anregung, in einem Bereich von weniger als einer Sekunde bis zu einigen Minuten und ist damit im Vergleich zu anderen Prüfverfahren länger [Ede12; ZRD+03]. Zudem ist eine genaue Kenntnis der physikalischen Eigenschaften notwendig, insbesondere des Emissionsgrades, um quantitative Aussagen über die Temperaturverteilungen zu erhalten. Mit Blick auf die unregelmäßige Oberfläche eines CF-Rovings, der aus mehreren tausend Einzelfilamenten besteht, kann kein exakter Emissionsgrad bestimmt werden. Ein gängiger Ansatz ist die Verwendung eines angenäherten Emissionsgrads von $\varepsilon \approx 0,95$ [Bri79]. Zudem erfordert die Auswertung der graphisch aufbereiteten Temperaturverteilung gut geschultes Prüfpersonal, sodass eine vollständige Automatisierung des Prüfverfahrens, allerdings nicht der Auswertung, möglich ist [Hel13].

Abb. 4.13 veranschaulicht die Vor- und Nachteile der Thermografie. Die Zuordnung der Erfüllungsgrade erfolgt in Anhang B IV.

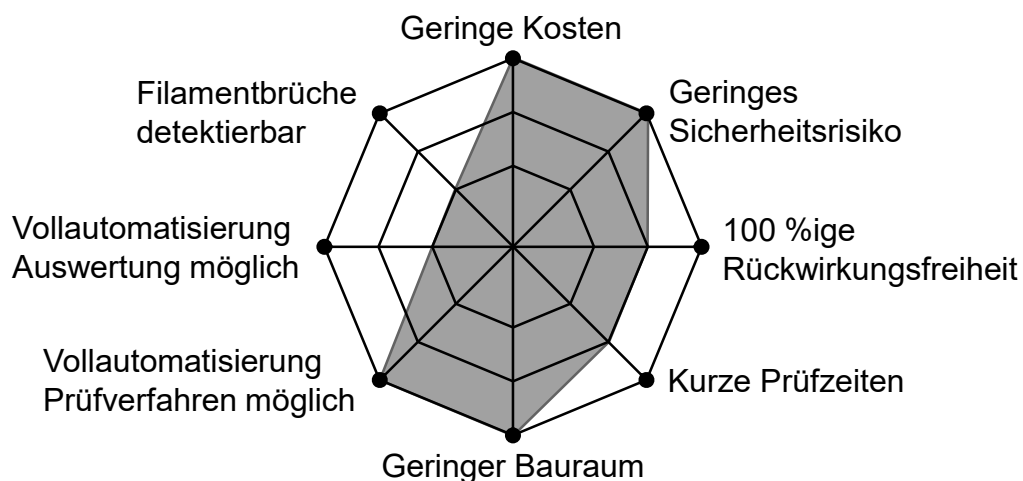


Abb. 4.14: Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der Thermografie

4.4 Anforderungen zur Bewertung der vorausgewählten ZfP

Die Bewertung der vorausgewählten ZfP (vgl. Kap. 4.3) erfolgt auf Basis einer Anforderungsliste, die ausführlich die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Leistungen beschreibt, die zur Zielerreichung eines Projekts erforderlich sind [DIN09; VDI01]. In der vollständigen Anforderungsliste (Anhang D I) werden alle Anforderungen an das ZfP gesammelt.⁷ Die Kategorien der Anforderungsliste werden in Anlehnung an die Hauptmerkmalsklassen technischer Systeme aufgestellt [FG13].

Zur methodischen Bewertung der ZfP werden aus der umfänglichen Anforderungsliste (Anhang D I) acht Kernanforderungen abgeleitet (Tab. 4.5), deren Erfüllungsgrad methodisch bewertet wird (Kap. 4.5). Die Kernanforderungen der Zielsetzung (Tab. 3.1) zur Erfüllung des Prüfziels sind implizit enthalten, da im Rahmen von Kap. 4.2 und 4.3 nur ZfP betrachtet werden, die den Kernanforderungen genügen.

Tab. 4.5: Kernanforderungen zur finalen Auswahl eines geeigneten ZfP

Nr.	Kernanforderungen
1	Detektion von Filamentbrüchen
2	Minimaler Bauraum für Implementierung in CF-Herstellung und -Verarbeitung
3	Echtzeitmessung möglich
4	Vollautomatisierte Prüfung möglich
5	Vollautomatisierte Auswertung möglich
6	100 %ige Rückwirkungsfreiheit auf CF
7	Geringe Kosten
8	Geringes Sicherheitsrisiko

Auf dieser Basis wird im Folgenden dasjenige ZfP identifiziert, das das höchste Potenzial zur Erfüllung der Kernanforderungen bietet.

⁷ Forschungsvorhaben „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 9/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

4.5 Methodische Bewertung der vorausgewählten ZfP

Die Bewertung der vorausgewählten ZfP (Kap. 4.2 und 4.3) erfolgt in Anlehnung an [SBT04] auf Basis des Quality Function Deployment (QFD) durch die Methode des House of Quality (HoQ) unter Berücksichtigung der Kernanforderungen (Kap 4.4). Da hierbei ein geeignetes Prüfverfahren für das Health Monitoring von Strukturbauteilen in der Luftfahrt identifiziert wurde, wird das verwendete QFD für die vorliegende Problemstellung adaptiert [SBT04]. Allgemein ist QFD eine Methode der Qualitätssicherung und wird eingesetzt, um Produkte zu entwickeln, die im hohen Maße dem Kundenwunsch entsprechen. Die Übertragung der Anforderungen auf die Zielvorgaben erfolgt mittels HoQ, die im Weiteren für die Bewertung der ZfP genutzt wird (Abb. 4.15) [Sch15d]:

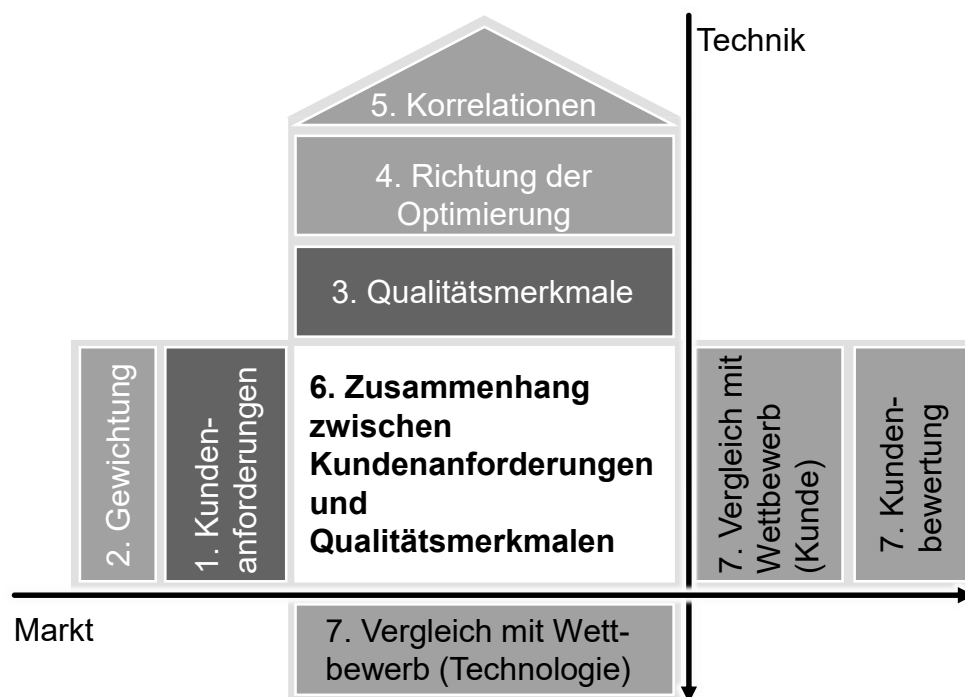


Abb. 4.15: Schematische Darstellung der HoQ-Methode nach [Sch15d]

Zunächst werden die Kundenanforderungen (1) ermittelt und mittels paarweisen Vergleiches gewichtet (2). Anschließend werden quantitative Qualitätsmerkmale zu den Kundenanforderungen erarbeitet (3) und die Optimierungsrichtung jedes quantitativen Qualitätsmerkmals festgelegt (4). Dabei werden mit der Kor-

relationsmatrix Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Qualitätsmerkmalen bestimmt (5). Den Kern der HoQ-Methode bildet die Ableitung des Zusammenhangs zwischen Kundenanforderungen und Qualitätsmerkmalen (6). Letztlich erfolgt ein Vergleich mit dem Wettbewerb, sowohl auf technologischer Ebene als auch auf Ebene des Kunden, mit abschließender Bewertung (7). [Sch15d]

Adaptiert für die vorliegende Fragestellung zur Bewertung der prinzipiell geeigneten ZfP wird die Methodik des HoQ auf Abb. 4.16 reduziert.

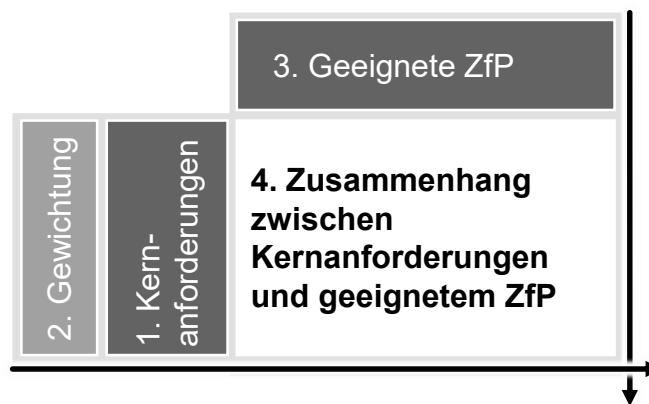


Abb. 4.16: Adaption und Reduktion des HoQ zur Bewertung der ZfP

Im Gegensatz zur vollständigen Methode werden zur Bewertung der prinzipiell geeigneten ZfP nur die Schritte 1, 2, 3 und 6 durchlaufen, die im Folgenden kurz erläutert werden:

1. Kernanforderungen ermitteln

Die Anforderungen und Wünsche der Kunden werden durch Befragung und Analysen ermittelt und in Gruppen strukturiert [Sch15d]. Bezogen auf die Bewertung der Messprinzipien entspricht dieser Schritt der in Kap. 4.4 erstellten Anforderungsliste und insbesondere den dabei identifizierten Kernanforderungen (Tab. 4.5).

2. Kernanforderungen gewichten

Die Kernanforderungen werden im paarweisen Vergleich priorisiert und daraus die für die HoQ notwendigen Gewichtungen G_i nach (4.6) abgeleitet. [Sch15d]

$$G_i = Rd \cdot \left((n_A - 1) \cdot \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} + 1 \right) \quad (4.6)$$

mit:

G_i	Gewichtung der Anforderung	[-]
n_A	Anzahl der Anforderungen	[-]
S_i	Summierter Wert der Anforderung	[-]
$S_{\min}$	Minimaler summierter Wert der Anforderungen	[-]
$S_{\max}$	Maximaler summierter Wert der Anforderungen	[-]

Hierbei sind die Bewertungen 2 mit „wichtiger als“, 1 mit „ebenso wichtig wie“ und 0 mit „weniger wichtig als“ definiert. Im paarweisen Vergleich (Tab. 4.6) wird lediglich die obere, rechte Dreiecksmatrix ausgefüllt, da die untere, linke Dreiecksmatrix invers dazu ist. Die Gewichtung G_i der Kernanforderungen erfolgt in Abhängigkeit von der resultierenden Zeilenzusammen nach (4.6). [Sch15d]

Tab. 4.6: Paarweiser Vergleich zur Berechnung der Gewichtungen G_i

		Kriterien									
		Detektion Faserschädigung	Minimaler Bauraum	Echtzeitmessung möglich	Vollautomat. Prüfung	Vollautomat. Auswertung	100 % rückwirkungsfrei	Geringe Kosten	Geringes Sicherheitsrisiko	Summe	Gewichtung
Kriterien	Detektion Faserschädigung	■	1	2	2	2	2	2	2	→ 13	→ 8
	Minimaler Bauraum	1	■	2	2	2	2	2	2	→ 13	→ 8
	Echtzeitmessung möglich	0	0	■	1	1	1	2	2	→ 7	→ 5
	Vollautomat. Prüfung	0	0	1	■	1	1	2	2	→ 7	→ 5
	Vollautomat. Auswertung	0	0	1	1	■	1	2	2	→ 7	→ 5
	100 % rückwirkungsfrei	0	0	1	1	1	■	1	1	→ 5	→ 3
	Geringe Kosten	0	0	0	0	0	1	■	2	→ 3	→ 2
	Geringes Sicherheitsrisiko	0	0	0	0	0	1	0	■	→ 1	→ 1

Der paarweise Vergleich zeigt, dass die Detektion der Faserschädigung und ein minimaler Bauraum die wichtigsten Anforderungen sind und ein geringes Sicherheitsrisiko und geringe Kosten am wenigsten relevant sind. Dies ist plausibel, da der Zweck des Prüfverfahrens die Detektion von Faserschädigung ist und ein Prüfverfahren mit zu großem Bauraum nicht in der CF-Herstellung und

-Verarbeitung eingesetzt werden kann. Demgegenüber werden ein geringes Sicherheitsrisiko und geringe Kosten als weniger relevant identifiziert. Dies ist ebenfalls plausibel, da beide Kernanforderungen dem Erreichen des Prüfziels untergeordnet sind.

3. Geeignete ZfP

Die Vorauswahl prinzipiell geeigneter ZfP erfolgte im Rahmen von Kap. 4.2.

4. Zusammenhang zwischen Kernanforderung und geeignetem ZfP

Im Kernelement des HoQ erfolgt die Ableitung der Zusammenhänge zwischen Kernanforderungen und geeignetem ZfP [Sch15d]. Hierbei wird die Fähigkeit jedes ZfP hinsichtlich der Erfüllung der Kernanforderungen gewichtet bewertet (Tab. 4.7). Die Gewichtung erfolgt anhand der Erfüllungsgrade stark (3), mittel (2) und schwach (1). Die Erfüllungsgrade der Kernanforderungen können Anhang B I bis Anhang B IV entnommen werden.

Tab. 4.7: Zusammenhang zwischen Kernanforderungen und ZfP

Kernanforderungen	G _i	Ultraschall- prüfung	Wirbelstrom- prüfung	Radiograf. Prüfung	Thermo- grafie
Detektion Faserschädigung	8	1	3	3	1
Minimaler Bauraum	8	3	3	1	3
Echtzeitmessung möglich	5	3	3	3	2
Vollautomatisierung Prüfung	5	3	3	3	3
Vollautomatisierung Auswertung	5	1	3	1	1
100 %ige Rückwirkungsfreiheit	3	3	3	1	2
Geringe Kosten	2	2	2	1	3
Geringes Sicherheitsrisiko	1	3	3	1	3
Absolute Bewertung		83	109	73	77
Relative Bewertung		75 %	98 %	66 %	69 %

Tab. 4.7 zeigt, dass das Wirbelstromverfahren mit einer relativen Bewertung von 98 % am höchsten bewertet und daher im Folgenden verwendet wird.

Das Wirbelstromverfahren verfügt über das höchste Potenzial zur Erfüllung des Prüfziels und wird daher im weiteren Verlauf dieser Dissertation favorisiert.

5 Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens

Dem in Kap. 1.3 definierten Vorgehen zur Zielerreichung folgend, wird in Kap. 5 das Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens erläutert (Abb. 5.1).



Abb. 5.1: Einordnung des Kap. 5 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Zunächst werden die elektromagnetischen Grundlagen (Kap. 5.1) und die Auswertung der Impedanz (Kap. 5.2) beschrieben. Anschließend werden Einflüsse auf das Wirbelstromverfahren (Kap. 5.3) und die Besonderheiten des Hochfrequenz-Wirbelstromverfahrens erläutert (Kap. 5.4). In einem nächsten Schritt werden die Komponenten der zugehörigen Messkette vorgestellt (Kap. 5.5) und der aktuelle Stand der Technik und Forschung sowie die Patentsituation im Bereich Wirbelstrom dargelegt (Kap. 5.6). Abschließend erfolgt ein Funktionsnachweis für die Adaption des Verfahrens für CF-Rovings (Kap. 5.7).

5.1 Elektromagnetische Grundlagen

Das Wirbelstromverfahren basiert auf dem physikalischen Prinzip der Induktion. Dabei wirkt einerseits die elektromagnetische Induktion nach Faraday, andererseits ihr Pendant im Magnetismus, die Durchflutung nach Ampere. Beim Wirbelstromverfahren wird eine Wechselspannung U an eine Primärspule angelegt, sodass ein Wechselstrom der Stärke I die Primärspule durchfließt. Als direkte Folge davon tritt Elektromagnetismus auf und die Primärspule erzeugt ein primäres Magnetfeld (Primärfeld), das mit der Frequenz der angelegten Wechselspannung oszilliert. Das Wirkprinzip der Erzeugung von Wirbelströmen in einem leitfähigen Prüfkörper wird in Abb. 5.2 schematisch dargestellt.

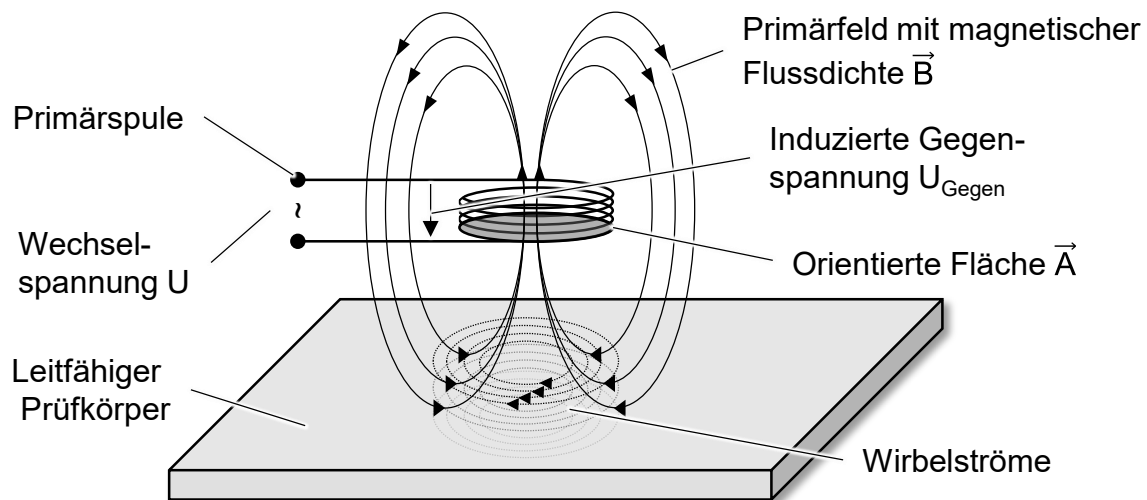


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in einem leitfähigen Prüfkörper nach [Hel13]

Die Erzeugung des Primärfelds folgt dem Biot-Savart'sche Gesetz (5.1), wonach bewegte Ladungen in einem stromdurchflossenen Leiter ein magnetisches Feld mit der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ erzeugen [TMW15].[Hel13; HSP+15]

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (5.1)$$

mit:

$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte	[T]
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$[4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2]$
I	Elektrischer Strom	[A]
$\hat{r}$	Einheitsvektor	[-]

Die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ des Primärfelds, das durch die Primärspule fließt, kann nach einer Vereinfachung des Biot-Savart'schen Gesetzes (5.2) für lange Spulen, deren Länge groß ist im Vergleich zu ihrem Radius, berechnet werden. [TMW15]

$$\vec{B} = \mu_r \times \mu_0 \times I \times \frac{N}{l} \quad (5.2)$$

mit:

$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte	[T]
μ_r	Permeabilitätszahl des Spulenkerne	[-]
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$[4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2]$
I	Elektrischer Strom	[A]
N	Windungszahl der Spule	[-]
l	Spulenlänge	[m]

Der resultierende magnetische Fluss Φ_m , der durch den Spulenquerschnitt fließt und ebenfalls mit der Frequenz der angelegten Wechselspannung variiert, folgt dem Gauß'schen Satz für Magnetfelder (5.3) [Hel13; TMW15].

$$\Phi_m = \oint_A \vec{B} \cdot N \, d\vec{A} \quad (5.3)$$

mit:

Φ_m	Magnetischer Fluss durch die Spule	[Wb]
$\vec{A}$	Orientierte Fläche	[m ²]
$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte durch die orientierte Fläche $\vec{A}$	[T]
N	Windungszahl der Spule	[-]

Da sich die Primärspule im Feld ihres eigenen, variierenden magnetischen Flusses Φ_m befindet, kommt es zur Selbstinduktion. Hierdurch wird gemäß dem Faraday'schen Induktionsgesetz eine zusätzliche Spannung U_{Gegen} in der Spule induziert, die gegenüber der angelegten Wechselspannung um 90° phasenverschoben und für Zylinderspulen Gleichung (5.4) folgt. [Hel13; TMW15]

$$U_{\text{Gegen}} = \oint_C \vec{E} \, d\vec{l} = -N \times \dot{\Phi} = -N \times A \times \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (5.4)$$

mit:

U_{Gegen}	Induzierte Gegenspannung	[V]
C	Geschlossene Kurve	[-]
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke	[V/m]
N	Windungszahl der Spule	[-]
A	Querschnittsfläche der Spule	[mm ²]
$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte	[T]

Wird im Wirkungsbereich des Primärfelds ein elektrischer Leiter mit der elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ positioniert, so werden in diesem Leiter ebenfalls nach dem Farady'schen Induktionsgesetz Wirbelströme induziert, die proportional zur Änderung des Primärfeldes und damit proportional zur Frequenz f der an die Primärspule angelegten Wechselspannung sind (5.5) [TMW15; Yas08].

$$U_{\text{ind}} = \oint_C \vec{E} \, d\vec{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (5.5)$$

mit:

U_{ind}	Induzierte Spannung	[V]
C	Geschlossene Kurve	[-]
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke	[V/m]
Φ_m	Magnetischer Fluss durch die Spule	[Wb]

Die Wirbelströme verlaufen parallel zu den Windungen der Primärspule in konzentrischen Bahnen und orthogonal zum magnetischen Fluss, sodass die Geometrie der Spule die Anordnung der Wirbelströme vorgibt. Die Wirbelströme ihrerseits induzieren ein sekundäres Magnetfeld (Sekundärfeld) im Prüfkörper (Abb. 5.3). [Hel13].

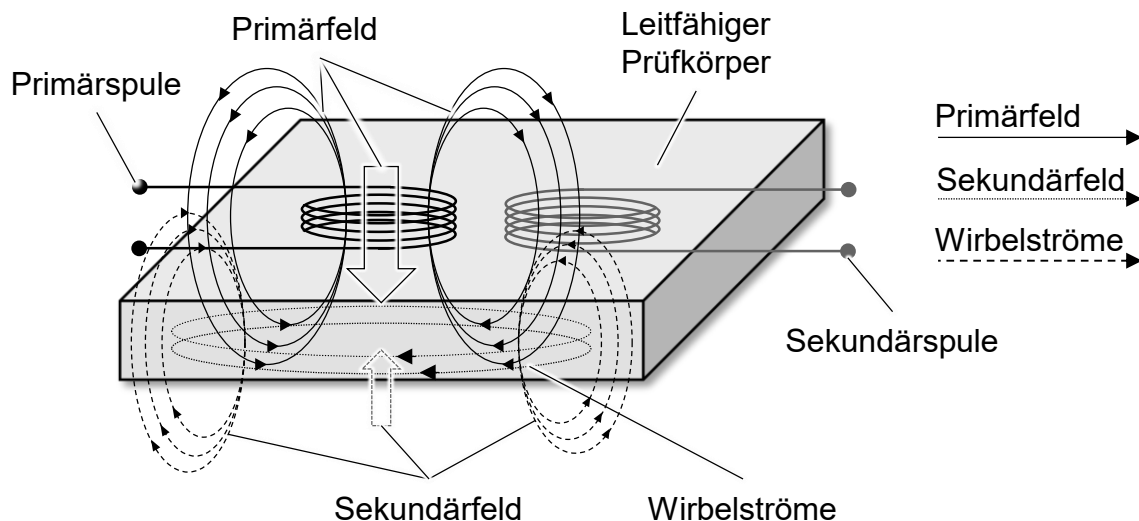


Abb. 5.3: Schematische Darstellung der Wirbelströme und der Überlagerung von Primär- und Sekundärfeld [HHK+10; HS12]

Der magnetische Fluss Φ_m durch die von den Wirbelströmen umschlossene Fläche berechnet wird analog nach Gleichung (5.3) berechnet [Hel13; TMW15]. Das Sekundärfeld ist dem Primärfeld, der Lenz'schen Regel folgend, entgegengesetzt orientiert [Hel13; HSP+15; TMW15]. Somit schwächt das Sekundärfeld das Primärfeld, abhängig von der lokalen elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ des Prüfkörpers, ab [Hel13; HSK12]. Das durch die Wirbelströme induzierte, sekundäre Magnetfeld folgt dem Ampere'schen Durchflutungsgesetz (5.6) [TMW15]:

$$\oint_C \vec{B} \times d\vec{l} = \mu_0 \times I \quad (5.6)$$

mit:

C	Geschlossene Kurve	$[-]$
$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte	$[T]$
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$[4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2]$
I	Elektrischer Strom	$[A]$

Primär- und Sekundärfeld überlagern einander zu einem Gesamtmagnetfeld, in dem bei dem Wirbelstromverfahren die Empfänger- bzw. Sekundärspule positioniert wird [HHK+10]. Der Einfluss lokaler Inhomogenitäten auf das Sekundärfeld und die messbare Reaktion darauf in der Sekundärspule wird in Abb. 5.4 vereinfacht skizziert.

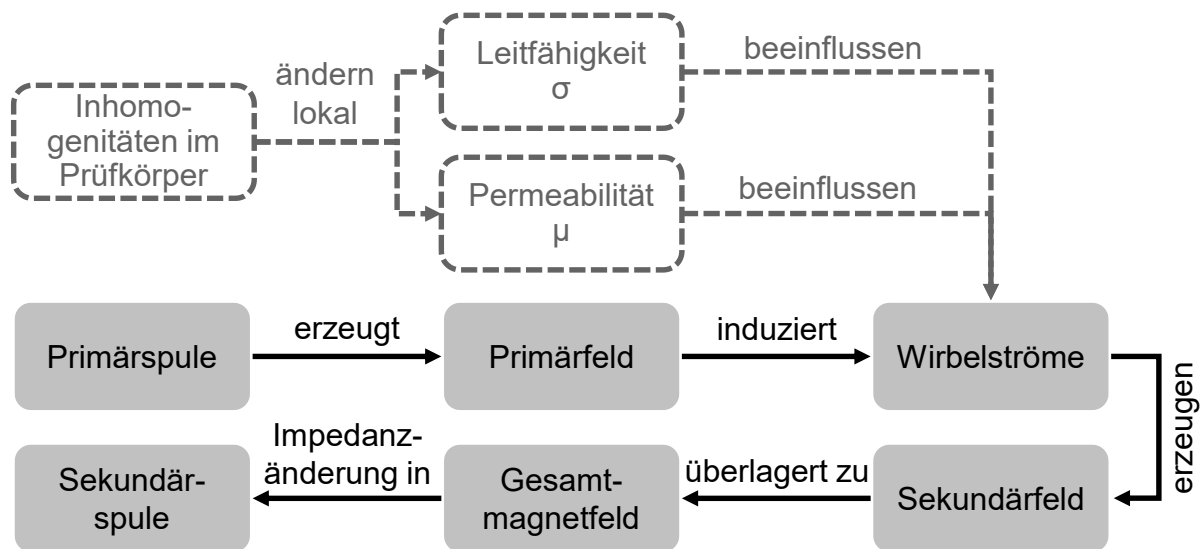


Abb. 5.4: Vereinfachter Wirkzusammenhang der Impedanzänderung

Da das überlagerte Magnetfeld seinen Ursprung im Primärfeld und damit in der angelegten Wechselspannung hat, oszilliert das überlagerte Magnetfeld ebenfalls mit der Frequenz f der angelegten Wechselspannung und induziert in der Sekundärspule eine Wechselspannung der Frequenz f . Die induzierte Wechselspannung ist abhängig von der lokalen elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ des Prüfkörpers, die die Wirbelströme und damit das von den Wirbelströmen induzierte, sekundäre Magnetfeld beeinflussen. Dieser induzierten Wechselspannung setzt die Sekundärspule als Reaktion einen Wechselstromwiderstand, eine sogenannte Impedanz Z , entgegen. Diese ist folglich eine Funktion des überlagerten Primär- und Sekundärfeldes, das auf Änderungen der lokalen, elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ durch Inhomogenitäten im elektrischen Leiter reagiert. Diese Inhomogenitäten bzw. die Änderungen der lokalen Leitfähigkeit oder Permeabilität können als Änderung der Impedanz in der Sekundärspule detektiert und ausgewertet werden. [Hel13; HHK+10; HSK12; HSM13; HSP+15; MPM+11; Yas08]

5.2 Auswertung der Impedanz

Eine Impedanz ist der frequenzabhängige elektrische Widerstand, den eine stromdurchflossener Leiter einem Wechselstrom entgegensetzt. Mathematisch betrachtet werden Impedanzen aufgrund ihrer Eigenschaft als frequenzabhängige komplexe Größe als Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt. Als komplexe Zahl bestehen Impedanzen aus einem Realteil und einem Imaginärteil und werden einerseits über Betrag $|Z|$ und Phasenwinkel φ ausgedrückt, andererseits als kartesische Koordinate in der Notation $a+j\cdot b$ mit der imaginären Einheit j . Übertragen auf die Impedanz folgt die Notation $R+j\cdot X$ mit dem Realanteil $\text{Re}(Z)$ als Ohm'scher Anteil R und dem Imaginärteil $\text{Im}(Z)$ als Reaktanz X . Die Notationen über Betrag und Phase sowie die Notation in kartesischen Koordinaten lassen sich über trigonometrische Winkelbeziehungen der Gleichungen (5.7) und (5.8) ineinander umrechnen. [DIN84; FB06; Hel13; HHR+10]

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j\varphi} = |Z| \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \quad (5.7)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(X/R) \quad (5.8)$$

mit:

Z	Impedanz	[Ω]
R	Resistanz (Ohm'scher Widerstand)	[Ω]
X	Reaktanz (kapazitiv/induktiver Widerstand)	[Ω]
φ	Phasenwinkel	[$^\circ$]

Abb. 5.5 zeigt die komplexen Zeiger der Impedanz Z_i zum Zeitpunkt t_i und deren Änderung ΔZ in die Impedanz Z_{i+1} zum Zeitpunkt t_{i+1} . [FB06; HSM13]

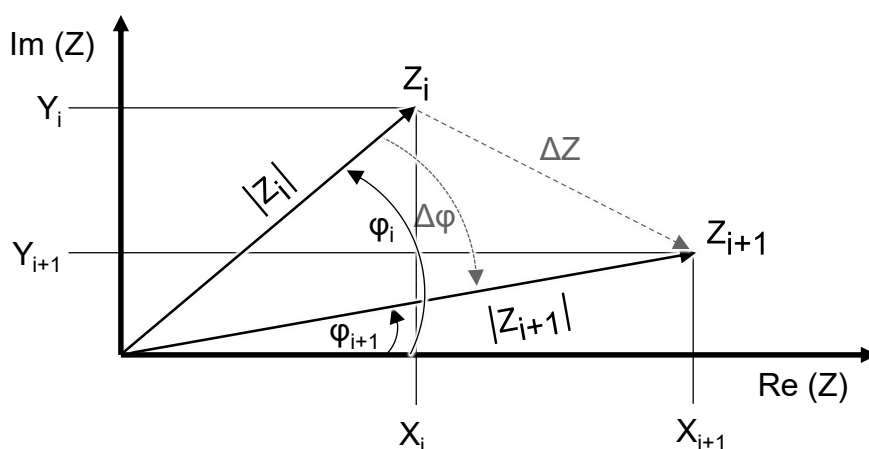


Abb. 5.5: Infinitesimalen Impedanzänderung in der komplexen Ebene mit den partiellen Differenzialen ∂Z und $\partial \varphi$ nach [HSM13]

Die Änderung ΔZ wird im Wirbelstromverfahren gemessen, um Rückschlüsse auf lokale Inhomogenitäten zu ziehen, die sich durch lokale Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität μ in der Impedanz zeigen [BBN+10; HHK+10; MPM+11]. Über den Real- $\text{Re}(Z)$ und Imaginärteil $\text{Im}(Z)$ der Impedanz wird auf Eigenschaften der Inhomogenitäten im Prüfkörper geschlossen (Abb. 5.6).

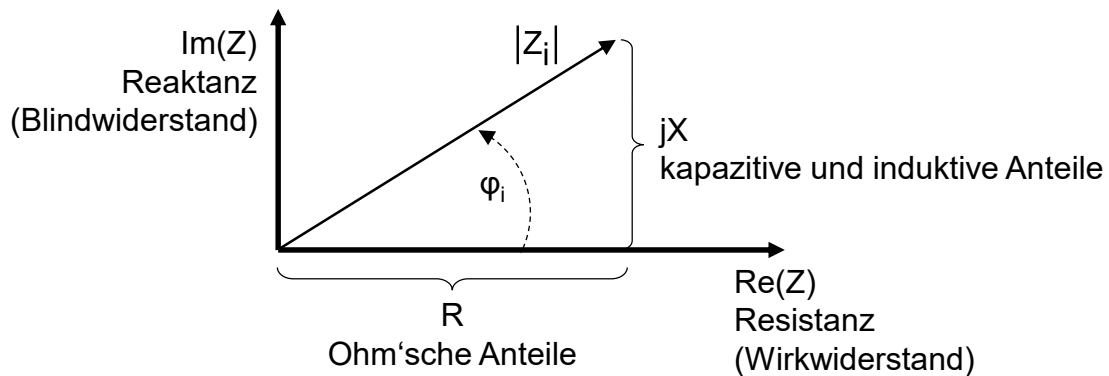


Abb. 5.6: Ohm'sche und kapazitiv/induktive Anteile der Impedanz

Der Realteil $\text{Re}(Z)$ wird als Wirkwiderstand oder Resistanz bezeichnet und beschreibt die Ohm'schen Anteile des Wechselstromwiderstands. Der Imaginärteil $\text{Im}(Z)$ wird als Blindwiderstand oder Reaktanz bezeichnet und beschreibt die kapazitiven und induktiven Anteile des Wechselstromwiderstands. Die Zerlegung der Impedanz in Resistanz und Reaktanz bzw. in Ohm'sche und kapazitiv/induktive Anteile ist vorteilhaft, da die induzierten Wirbelströme beim Hochfrequenz-Wirbelstrom-Verfahren ebenfalls diesen beiden Kategorien zugeordnet werden können (vgl. Kap. 5.4). Die in der CF fließenden Wirbelströme werden nach Leitungs- und Verschiebeströmen unterteilt [KM96]. Die Leitungsströme fließen entlang der CF bzw. über Kontaktpunkte zwischen einzelnen Filamenten und rufen eine Resistanz hervor, die dem Ohm'schen Anteil der Impedanz entspricht. Verschiebeströme rufen eine Reaktanz hervor, die den kapazitiv/induktiven Anteilen der Impedanz entspricht. Verschiebeströme fließen zwischen den Filamenten des CF-Rovings und hängen von der Frequenz, den dielektrischen Eigenschaften des Umgebungsmediums der Filamente, dem Filamentdurchmesser, dem Filamentabstand und der Oberfläche der Filamente ab. Bei der oxidativen Oberflächenbehandlung von CF entsteht beispielsweise

eine dünne Oxidschicht, die einen hohen elektrischen Widerstand aufweist und als Dielektrikum fungiert [LM94]. Abb. 5.7 stellt Leitungs- und Verschiebestrome beim Wirbelstromverfahren beispielhaft dar. [Hel13; HSP+15; Moo01; Moo15; MPM+11]

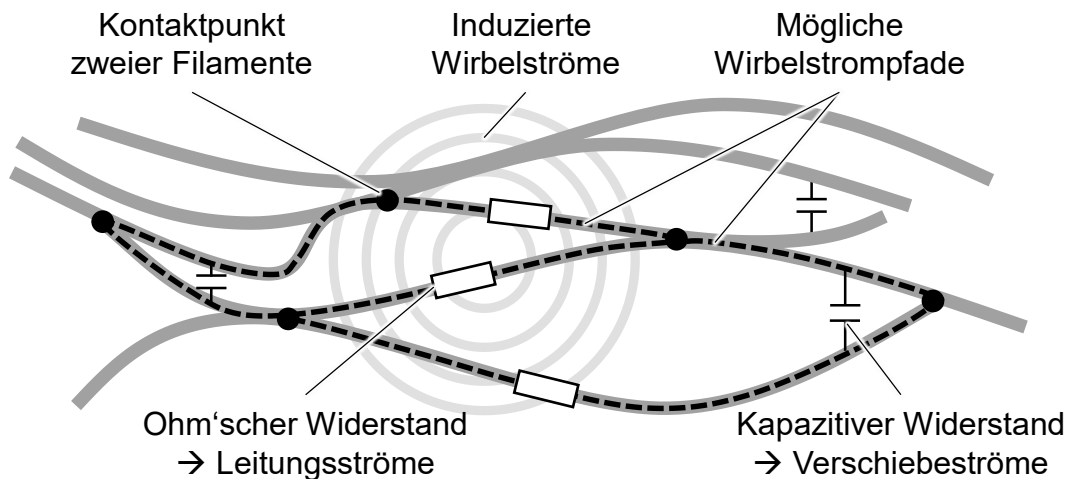


Abb. 5.7: Leitungs- und Verschiebestrome beim Wirbelstromverfahren von CF nach [HSP+15; Lan97; LM94; Moo01; PHM+13]

Die mathematische Zerlegung der Impedanz Z in den Realteil (Ohm'schen Anteil R) und den Imaginärteil, der die kapazitiv/induktiven Anteile X_C und X_L beschreibt, ergibt sich gemäß (5.9). [DIN84; Sch18]

$$Z = R + jX = R + j(X_L - X_C) \quad (5.9)$$

mit:

R	Resistanz (Ohm'scher Widerstand)	$[\Omega]$
X	Reaktanz (kapazitiv/induktiver Widerstand)	$[\Omega]$
j	Imaginäre Einheit	$[-]$
X_L	Induktive Reaktanz	$[\Omega]$
X_C	Kapazitive Reaktanz	$[\Omega]$

Während der Ohm'sche Anteil R frequenzunabhängig ist, sind die induktiven und kapazitiven Anteile X_L (5.10) und X_C (5.12) frequenzabhängig [DIN84; Sch18]

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad (5.10)$$

$$\text{dazu: } L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{A \cdot N^2}{l} \quad (5.11)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (5.12)$$

mit:

X_L	Induktive Reaktanz	[Ω]
ω	Kreisfrequenz	[Hz]
L	Induktivität der Spule	[H]
f	Prüffrequenz	[Hz]
μ_0	Magnetische Feldkonstante	[$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$]
μ_r	Permeabilitätszahl des Spulenkerne	[-]
A	Querschnittsfläche der Spule	[mm^2]
N	Windungszahl der Spule	[-]
l	Spulenlänge	[m]
X_C	Kapazitive Reaktanz	[Ω]
C	Kapazität	[F]

Den elektrotechnisch einfachsten Fall, in dem die Senderspule gleichzeitig als Empfängerspule fungiert, zeigt das elektrische Ersatzschaltbild (Abb. 5.8).

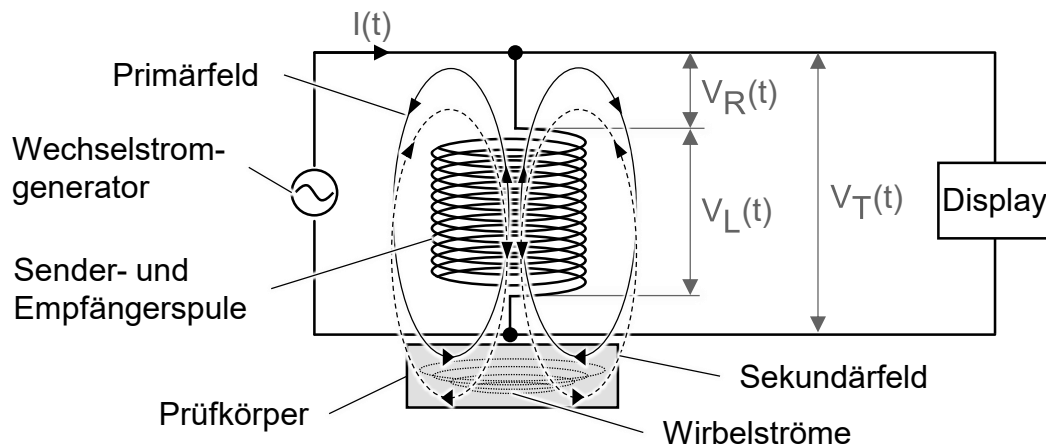


Abb. 5.8: Ersatzschaltbild des Wirbelstromverfahrens nach [Hel13]

Die Wechselstromquelle mit fester Frequenz f treibt im induktiven Schwingkreis einen Strom der Stärke I an, der durch die Spule fließt. Hierdurch werden im Prüfkörper Wirbelströme induziert, die ihrerseits ein sekundäres Magnetfeld hervorrufen. Die Überlagerung des primären und sekundären Magnetfeldes wechselwirkt mit der Spule. Diese Wechselwirkung wird elektrotechnisch erfasst und messtechnisch aufbereitet. [Hel13]

Zur Auswertung der Wechselwirkung werden die Gesamtspannung V_T im induktiven Schwingkreis und die Phasenverschiebung φ zwischen V_T und dem Strom $I(t)$ im induktiven Schwingkreis gemessen. Über die Phase φ kann V_T vektoriell in seine Komponenten V_R und V_L zerlegt werden. Hierbei wird V_R als Widerstandsspannung bezeichnet und ist die treibende Kraft hinter dem Stromfluss durch die Spule. V_L ist der um 90° -phasenverschobene Spannungsfall durch die Selbstinduktion der Spule und wird als Induktionsspannung oder Gegenspannung bezeichnet. Gemäß der Kirchhoff'schen Maschenregel, nach der die Summe aller Spannungen in einer Masche gleich Null ist, können nun im Schaltkreis der Spule die Ohm'schen und die kapazitiv/induktiven Anteile der Impedanz bestimmt werden. Anhand der Widerstandsspannung V_R und der Induktionsspannung V_L werden bei bekannter Stromstärke I gemäß dem Ohm'schen Gesetz die Resistanz $\operatorname{Re}(Z) = R = V_R(t)/I(t)$ und die Reaktanz $\operatorname{Im}(Z) = X_L = V_L(t)/I(t)$ der komplexen Impedanz berechnet. [GF07; Hel13; TMW15]

5.3 Einflüsse auf das Wirbelstromverfahren

5.3.1 Leitfähigkeit

Je höher die Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers ist, desto stärker zeigen sich Inhomogenitäten auf der Prüfkörperoberfläche im Wirbelstromsignal. Allerdings dringen die Wirbelströme gleichzeitig weniger tief in den Prüfkörper ein, da das expandierende Primärfeld zuerst auf die Oberfläche des Prüfkörper trifft und das induzierte Sekundärfeld das Primärfeld gemäß der Lenz'schen Regel (Kap. 5.1) abschwächt. Damit durchdringt nur ein abgeschwächter Anteil des Primärfelds den Prüfkörper in der Tiefe, sodass Inhomogenitäten mit zunehmender Tiefe weniger gut detektiert werden. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Tiefe und mit zunehmender Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers. [GGV11; Hel13; HSM13]

5.3.2 Frequenz

Die Frequenz f der an der Spule angelegten Wechselspannung entspricht der Frequenz, mit der das Primärfeld dynamisch oszilliert [HSP+15]. Für das konventionelle Wirbelstromverfahren werden Frequenzen im Bereich von einigen

kHz bis 10 MHz eingesetzt [HHK+10]. Durch die Ausweitung des Frequenzbandes auf bis zu 100 MHz wird das Verfahren für die Prüfung schlecht leitfähiger Materialien, wie CF und CFK, nutzbar, da Wirbelströme bei höheren Frequenzen tiefer in einen Prüfkörper eindringen (Abb. 5.9) [BBN+10; HSM13; LM94].

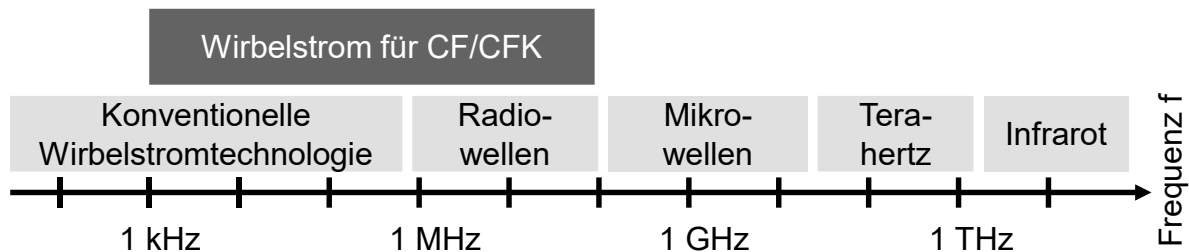


Abb. 5.9: Prüffrequenzen der Wirbelstromtechnologie nach [SUR21b]

Der in der Literatur empfohlene Frequenzbereich für die Hochfrequenz (HF)-Messung an CF liegt bei 3 MHz bis 30 MHz [HSP+15]. Diese Frequenz hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Eindringtiefe des Wirbelstromfeldes in den Prüfkörper und auf die Sensitivität des Messprinzips. Beide Größen sind von der Frequenz abhängig und stehen im Zielkonflikt zueinander. Einerseits dringen die Wirbelströme bei niedrigen Frequenzen tiefer in den Prüfkörper ein, so dass auch tieferliegende Inhomogenitäten detektiert werden können [Hel13]. Andererseits steigt mit zunehmender Frequenz die Signalamplitude des Prüfsystems, sodass kleinere Inhomogenitäten im Prüfkörper bei höheren Frequenzen besser detektiert werden [Hel13; HSK12; HSP+15; Yas08]. Die bei höheren Frequenzen gemäß Gleichung (5.4) höhere Signalamplitude $U_{\text{ind}} \sim d\Phi/dt \sim f$ wird durch eine höhere Änderung des magnetischen Flusses bzw. durch eine Zunahme der induktiven Reaktanz der Sekundärspule $X_L \sim f$ gemäß Gleichung (5.10) hervorgerufen [HSK12; HSM13; HSP+15; PHM+13]. Damit nehmen mit steigender Frequenz die Eindringtiefe der Wirbelströme in den Prüfkörper ab und die Signalamplitude zu, die zur Detektion kleinerer Defekte notwendig ist [HSK12; HSP+15].

Das für das Wirbelstromverfahren von CF und CFK geeignete Frequenzband ist begrenzt. Die Untergrenze von 0,5 MHz resultiert aus einer Mindestwirbelstromdichte, die im Prüfkörper erzeugt werden muss, um das hervorgerufene Messsignal auswerten zu können [HSK12; HSP+15; Moo01]. Die Obergrenze

von 100 MHz resultiert aus dem aktuellen Stand der Gerätetechnik [SKH+09]. Ein geeigneter Frequenzbereich für die Prüfung von trockenen CF wird in der Literatur mit $1 \text{ MHz} < f < 50 \text{ MHz}$ angegeben [HSM13]. Eine weitere Einschränkung der Frequenz folgt aus der Spulengeometrie, die in Abhängigkeit von den Spulenparametern eine Resonanzfrequenz aufweist. Bei Messungen im Bereich der Resonanzfrequenz f_r heben sich die Einflüsse der Reaktanz X_L und der Resistanz X_R auf die Impedanz auf, sodass die Intensität des empfangenen Signals über alle Grenzen wächst und zu deformierten Signalen führt (5.13) [ISU21].

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{LC}} \quad (5.13)$$

mit:

f_r	Resonanzfrequenz	[Hz]
L	Induktivität der Spule	[H]
C	Kapazität	[F]

Im angegebenen Frequenzband sind höhere Frequenzen eher für die Prüfung von CF und CFK geeignet, da höhere Frequenzen zu einer höheren, zeitlichen Änderung des Magnetfelds führen, was gemäß Induktionsgesetz (5.4) proportional zur Spannung der induzierten Wirbelströme ist. Darüber lassen sich in Materialien mit relativ niedriger elektrischer Leitfähigkeit, wie CF und CFK, ein ausreichend hoher Stromfluss und eine gut messbare Magnetfeldänderung erzeugen. Auch der Effekt der reduzierten Eindringtiefe mit zunehmender Frequenz wird durch die niedrige Leitfähigkeit von CF und CFK kompensiert, da, bedingt durch die schlechte Leitfähigkeit, ausreihend hohe Eindringtiefen von $> 1 \text{ cm}$ erreicht werden können. [Gäb17; Ows76]

5.3.3 Skin-Effekt

Der elektromagnetische Skin-Effekt, auch Stromverdrängung genannt, beschreibt die Konzentration der Wirbelströme auf der Oberfläche des Prüfkörpers und ist abhängig von der Frequenz f der angelegten Wechselspannung und der Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers [HSP+15; MM14]. Hierbei liegt die höchste Wirbelstromdichte auf der Oberfläche vor und nimmt mit zunehmender Tiefe exponentiell ab [MM14; Yas08]. Der Skin-Effekt limitiert somit die Tiefe, mit der die

Wirbelströme in den Prüfkörper eindringen und Inhomogenitäten durch Impedanzänderungen detektiert werden können [HSP+15]. Die Wirbelstromdichte $J(d)$ ist das Verhältnis der senkrecht durch die Fläche fließenden Wirbelströme zum Flächeninhalt [DIN89]. Für als isotrop angenommene, CF-basierte Materialien kann $J(d)$ über Gleichung (5.14) abgeschätzt werden [Hag85; HSP+15].

$$J(d) = J_0 \times e^{-d/\delta} \quad (5.14)$$

mit:

J_0	Wirbelstromdichte auf der Oberfläche	[-]
d	Tiefe	[mm]
δ	Standardeindringtiefe	[mm]

Die Standardeindringtiefe, auch Skin-Tiefe, δ der Wirbelströme in den Prüfkörper ist antiproportional zur Frequenz f der angelegten Wechselspannung, der elektrischen Leitfähigkeit σ sowie der magnetischen Permeabilität μ und folgt der empirischen Gleichung (5.15) [DIN89; HHK+10; HSP+15; PHM+13]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (5.15)$$

mit:

δ	Standardeindringtiefe	[mm]
f	Frequenz der angelegten Wechselspannung	[Hz]
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$[1,2566 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2]$
μ_r	Relative Permeabilität	[-]
σ	Elektrische Leitfähigkeit	[MS/m]

Die magnetische Permeabilität μ setzt sich aus der relativen Permeabilität μ_r und der magnetischen Feldkonstante μ_0 zusammen und ist eine quantitative Beschreibung für die Durchlässigkeit eines Werkstoffes gegenüber magnetischen Feldlinien. Die relative Permeabilität μ_r ist eine physikalische Eigenschaft ferromagnetischer Werkstoffe und liegt für diamagnetische Werkstoffe, wie Kohlenstoff, bei $\mu_r = 1$ [Hel13; HSM13; TMW15]. Abb. 5.10 zeigt den Verlauf der Wirbelstromdichte $J(d)$ über die Tiefe d und die Standardeindringtiefe δ .

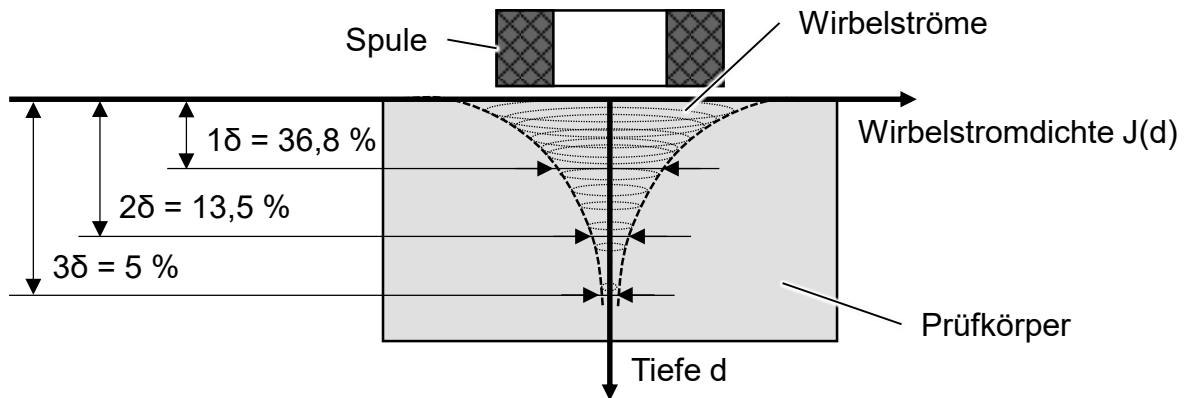


Abb. 5.10: Qualitative Darstellung des Skin-Effekts und der Standardeindringtiefe nach [GGV11]

Die Standardeindringtiefe δ bezeichnet die Tiefe, in der die Wirbelstromdichte $J(d)$ auf $1\delta = 1/e \approx 36,8\%$ abgesunken ist und dient als Kriterium für die Auswahl einer geeigneten Frequenz f [HHK+10; HSM13]. Ab einer Tiefe von 3δ sind in der Regel keine Impedanzänderungen detektierbar, da kein ausreichend hoher magnetischer Fluss erzeugt wird [Hel13]. Abb. 5.11 zeigt die Standardeindringtiefe δ für Materialien verschiedener Leitfähigkeit σ in Abhängigkeit von der Frequenz.

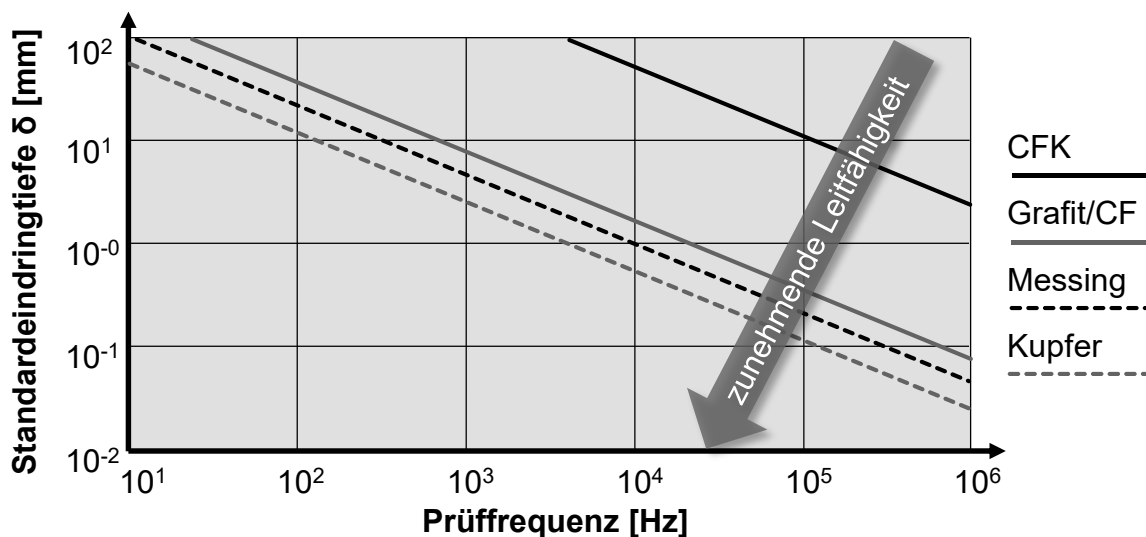


Abb. 5.11: Standardeindringtiefe in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Werkstoffe in Anlehnung an [SUR21b; Yas08]

Es zeigt sich, dass die Wirbelströme bei gleicher Frequenz mit abnehmender Leitfähigkeit tiefer in das Material eindringen. So können für ferromagnetische

Werkstoffe kaum Fehler unterhalb der Oberfläche detektiert werden, da sich die Wirbelströme aufgrund der hohen Leitfähigkeit auf der Oberfläche konzentrieren. Im Gegensatz dazu ermöglicht die relativ niedrige Leitfähigkeit von CF eine Tiefen- bzw. Volumenprüfung, da die Wirbelströme aufgrund der niedrigen Leitfähigkeit tief in das Material eindringen können [HSM13; KHK13].

5.3.4 Lift-Off

Der Lift-Off (Abb. 5.12) beschreibt den Abstand zwischen Spule und Prüfkörper und hat einen großen Einfluss auf die Sensitivität des Sensorsystems, da die Felddichte des Primärfeldes exponentiell zum Abstand der Spule abnimmt. Je kleiner der Lift-Off ist, desto höher ist die realisierbare Wirbelstromdichte im Prüfkörper, sodass das Sensorsystem sensibler auf Inhomogenitäten im Prüfkörper reagiert. Ein geringer Lift-Off wird dementsprechend für eine hohe Sensitivität angestrebt, falls der Prüfkörper eine glatte Oberfläche besitzt. Bei einer hohen Welligkeit der Prüfkörperoberfläche ist der Sensor bei geringem Lift-Off jedoch anfällig für eine hohe SNR (Signal-to-Noise Ratio), da der Abstand von Spule und Prüfkörperoberfläche mit der Welligkeit des Prüfkörpers variiert. [Hel13]

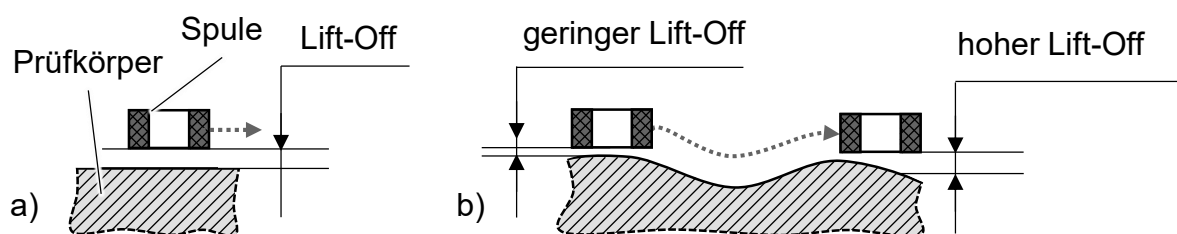


Abb. 5.12: Lift-Off a) konstant bei planem Prüfkörper und b) variierend bei welligem Prüfkörper

Folglich sollte der Lift-Off für eine höhere Sensitivität des Wirbelstromverfahrens für kleinere Defekte möglichst klein und möglichst konstant sein [Rao11]. Der Einfluss eines variierenden Lift-Offs kann durch eine Multifrequenzmessung kompensiert werden, da dabei die resultierende Verschiebung im Messsignal durch verschiedene Lift-Offs herausgerechnet werden kann [HSM13].

5.3.5 Sensortyp

Als Sensortyp wird die Spulenordnung von Sender- und Empfängerspule bezeichnet. Im Allgemeinen werden vier verschiedene Spulenordnungen unterschieden, die in Abhängigkeit von ihrem Anwendungsfall variieren und auch in Kombination eingesetzt werden (Abb. 5.13) [DIN89; Hel13].

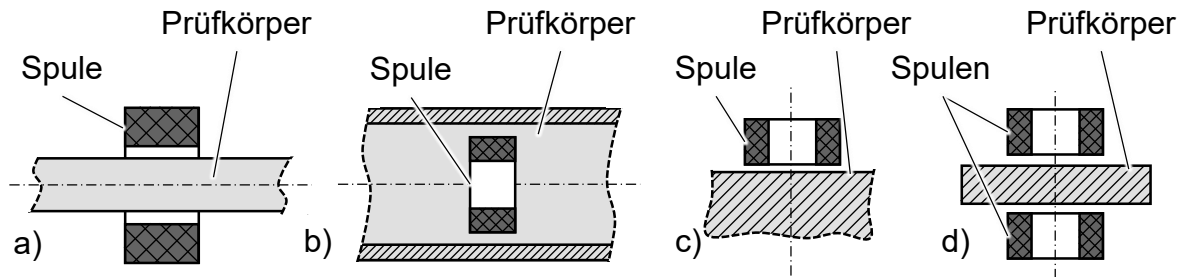


Abb. 5.13: Spulenordnungen a) Außendurchlauf-, b) Innendurchlauf-, c) Tast- und d) Transmissions-Tastspule nach [DIN89]

Außendurchlaufspulen

Während Außendurchlaufspulen (Abb. 5.13 a) für die Prüfung von CF prinzipiell geeignet sind, existieren zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Erkenntnisse zur Prüfung von CF. Daher bedarf es der Entwicklung eines Modells zur Ausbreitung von Wirbelströmen in CF-Rovings (vgl. Kap. 9), um die gemessenen Impedanzänderungen physikalisch zu bewerten und Rückschlüsse auf den Zustand der geprüften CF zu ziehen. Aus der bekannten Orientierung des Magnetfeldes wird eine erste, qualitative Orientierung der Wirbelströme im Roving abgeleitet, die an der Ausbreitung in homogenen Werkstoffen angelehnt ist.

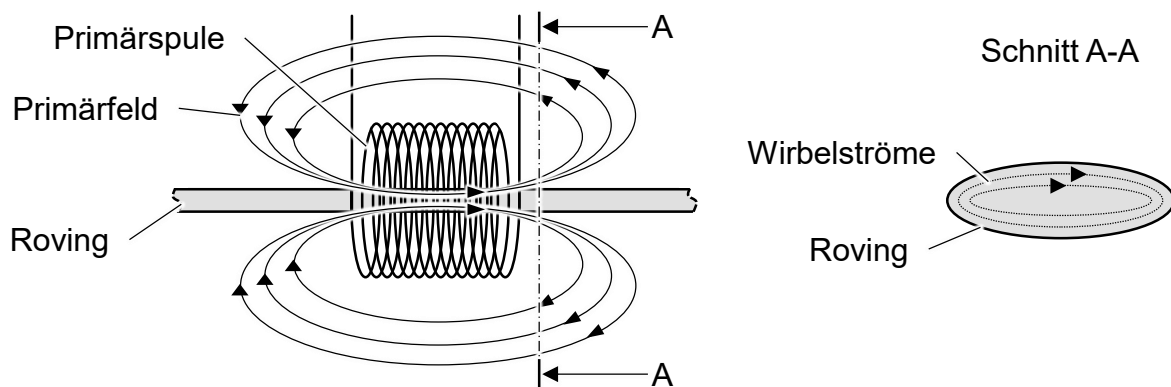


Abb. 5.14: Schematische Darstellung einer Durchlaufspule mit eingezeichneter Orientierung der Wirbelströme nach [GGV11; Hel13]

Ein Vorteil dieser Spulenanordnung liegt in der Vermeidung von Randeffekten (vgl. auch Abb. 5.17), da die Wirbelstrompfade der Außenkontur des Rovings ungestört folgen können. Damit ist dieser Spulentyp für faserförmige Strukturen besonders geeignet.

Innendurchlaufspule

Innendurchlaufspulen (Abb. 5.13 b) werden für die Prüfung rotationssymmetrischer Hohlkörper verwendet und sind dementsprechend für CF-Rovings ungeeignet. Innendurchlaufspulen werden daher nicht weiter betrachtet.

Tastspule

Tastspulen bezeichnen Spulenanordnungen, bei denen der Prüfkörper einseitig von einer Spule vermessen wird. Abb. 5.15 zeigt gängige Anordnungen.

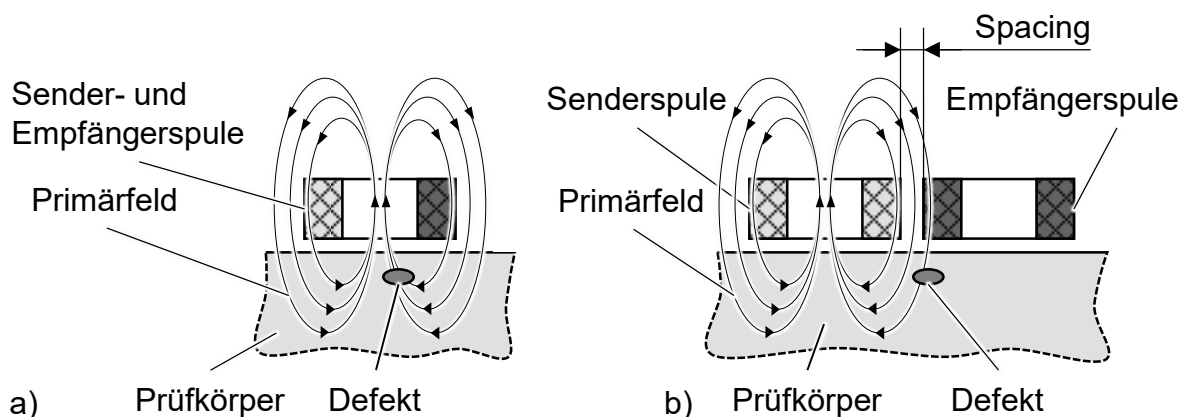


Abb. 5.15: Verschiedene Tastspulentypen a) Absolutsensor und b) Halbtransmissionssensor nach [MM14; MMS08; MS10]

Absolutsensoren (auch koaxiale Sensoren, Abb. 5.15 a) bestehen aus lediglich einer Spule, die gleichzeitig Sender- und Empfängerspule ist, bzw. bei der Sender- und Empfängerspule um denselben Kern gewickelt sind. Bei einem Absolutsensor werden alle von der Senderspule emittierten Feldlinien des Primärfeldes von der Sekundärspule aufgefangen. Damit ist der Anteil der Feldlinien, die tief in den Prüfkörper eindringen, klein gemessen an der Gesamtheit aller Feldlinien. Folglich sind Defekte in tieferen Schichten im Messsignal schwer zu detektieren, da der Signalanteil der Defekte in tieferen Schichten nur einen geringen Anteil des Messsignals ausmacht. [MMS08; MM14]

Im Gegensatz dazu kann bei Halbtransmissionssensoren (Abb. 5.15 b) der Abstand von Sender- und Empfängerspule, das sog. Spacing, vorgegeben werden. Darüber wird der Anteil der Feldlinien, die eine bestimmte Tiefe im Prüfkörper erreichen, eingestellt. Halbtransmissionssensoren werden auch als azentrisch koplanare Empfängersysteme, Differenz-, Fernfeld- oder Pitch-Catch-Sensoren bezeichnet. [MM14; MMS08; MPM+11; MS10].

Halbtransmissionssensoren sind zudem in der Lage, Aussagen über die anisotropen elektrischen Eigenschaften von CF-Rovings zu treffen [Moo01; MPM+11]. Wird ein Halbtransmissionssensor über einem CFK-Laminat gedreht und die Signalstärke in Polarkoordinaten aufgetragen, so zeigt das Messsignal ein Maximum in Richtung der größten elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 5.16) [MPM+11]. Diese liegt für CF-Rovings in Faserrichtung und kann über geeignete Sensoren auf $0,5^\circ$ genau bestimmt werden [MKL97; MPM+11]. Das Wirbelstromsignal eines unidirektional verstärkten CF-Halbzeugs (Abb. 5.16 a) zeigt neben dem Maximum in Faserrichtung (0°) ein kleineres Maximum quer zur Fasserrichtung, das als „Plateau“ bezeichnet wird und die Leitfähigkeit zwischen CF-Filamenten bzw. deren kapazitive Kopplung charakterisiert (vgl. auch Kap. 5.4) [LM94; MKL97; MLK01]

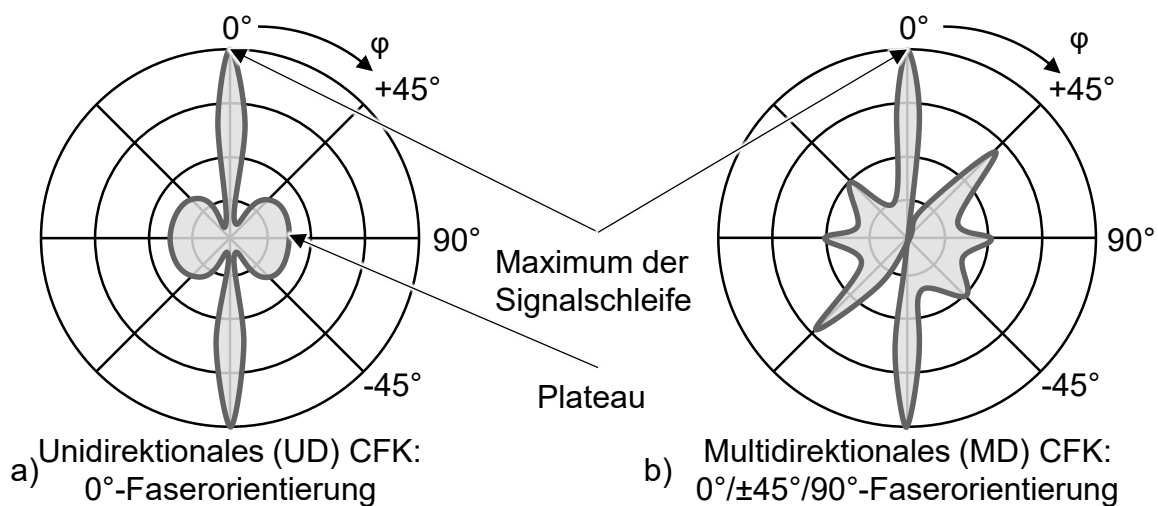


Abb. 5.16: Polardiagramm für a) UD und b) MD-CFK [MLK01; MPM+11]

Ein Nachteil der Halbtransmissionssensoren liegt in der Orientierung der Wirbelströme im Prüfkörper. Da die Spulenachse bei dieser Sensoranordnung orthogonal zur Oberfläche des Prüfkörpers orientiert ist, werden die Wirbelströme auf der Oberfläche induziert und deformiert, sobald sie auf den Rand des Prüfkörpers treffen (Abb. 5.17). Während dieser Effekt bei der Prüfung von großflächigen CFK-Bauteilen nur in Randbereichen zum Tragen kommt, führt er bei der Prüfung von CF-Rovings, die in der Regel schmaler sind als das ungestörte Wirbelstromfeld, zu deformierten Wirbelstromfeldern und einer Verschiebung der Impedanz im Messsignal. Folglich überlagert der Randeffect das eigentliche Messsignal, sodass Tastspulen nur bedingt für die Prüfung von CF-Rovings geeignet sind.

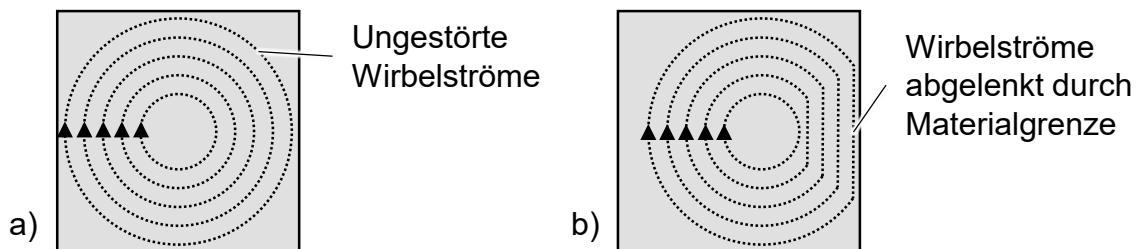


Abb. 5.17: Ausbreitung von Wirbelströmen im Prüfkörper a) ungestört und b) mit Ablenkung durch Randeffect

Transmissions-Tastspulen

Transmissions-Tastspulen haben zu Tastspulen vergleichbare Eigenschaften, wobei sie sich gegenüber Tastspulen durch die Spulenordnung über und unter dem Prüfkörper unterscheiden. In Bezug auf die Prüfung von CF-Rovings ergibt sich die gleiche Limitierung durch den Randeffect (Abb. 5.17), da die resultierenden Wirbelstromfelder breiter sind als der CF-Roving. Folglich ist das Messsignal durch den Messfehler des Randeffects überlagert, sodass Transmissions-Tastspulen ebenfalls nur bedingt geeignet für die Prüfung von CF-Rovings sind.

5.3.6 Spulengeometrie

Eindringtiefe und Sensitivität der Spule werden jeweils von der Spulengeometrie beeinflusst, stehen jedoch im Zielkonflikt zueinander. Da der Innendurchmesser der Primärspule den magnetischen Fluss der Spule limitiert (vgl. Gleichung

(5.3)), dringen Wirbelströme weniger tief in den Prüfkörper ein, je kleiner der Durchmesser der Spule ist. Als Faustregel gilt, dass der Durchmesser der Primärspule mindestens 3δ (vgl. Gleichung (5.15)) betragen sollte, um in einer Tiefe von 3δ einen ausreichend großen magnetischen Fluss zu erzeugen. Folglich liegt der Durchmesser der Spule etwa in der gleichen Größenordnung wie die Tiefe, bis zu der Inhomogenitäten detektiert werden können. Vor diesem Hintergrund erscheinen Spulen mit großem Durchmesser als zielführend. Andererseits nimmt jedoch mit zunehmendem Durchmesser der Spule die Feldstärke des Primärfeldes ab, sodass gleichzeitig die Sensitivität der Spule abnimmt. Insgesamt erzielen Spulen mit größerem Durchmesser eine höhere Eindringtiefe, aber eine geringere Sensitivität für kleinere Inhomogenitäten, sodass ein Optimum des Durchmessers für Eindringtiefe und Sensitivität gefunden werden muss. [Hel13]

5.3.7 Wechselwirkungen

Die Wechselwirkungen der Einflussgrößen Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers (Kap. 5.3.1), der Frequenz f der angelegten Wechselspannung (Kap. 5.3.2) und der Spulengeometrie (Kap. 5.3.6) auf Eindringtiefe δ und Sensitivität des Wirbelstromverfahrens werden in Tab. 5.1 zusammengefasst.

Tab. 5.1: Wechselwirkungen der Einflussgrößen auf das Wirbelstromsignal [GGV11; Hel13; HSK12; HSM13; HSP+15; Yas08]

Parameter	Einfluss auf	
	Eindringtiefe δ	Sensitivität
Niedrige Leitfähigkeit σ	→ Hohe Eindringtiefe	→ Hohe Sensitivität
Hohe Frequenz f	→ Niedrige Eindringtiefe	→ Hohe Sensitivität
Kleiner Spulendurchmesser $\varnothing$	→ Niedrige Eindringtiefe	→ Hohe Sensitivität

Mit abnehmender Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers dringen die Wirbelströme tiefer in das Material ein, sodass auch Inhomogenitäten unter der Oberfläche detektiert werden können [GGV11; Hel13; HSM13]. Bei niedrigen Frequenzen dringen die Wirbelströme ebenfalls tiefer in den Prüfkörper ein [Hel13]. Ande-

rerseits sinkt mit abnehmender Frequenz die Signalamplitude, sodass die Sensitivität für Inhomogenitäten im Prüfkörper gleichermaßen sinkt [Hel13; HSK12; HSP+15; Yas08]. Bei kleinen Spulendurchmesser sinkt der magnetische Fluss durch die Spule (5.3), sodass auch die Eindringtiefe der Wirbelströme in den Prüfkörper abnimmt [Hel13]. Allerdings steigt bei abnehmendem Durchmesser die Felddichte, sodass eine höhere Sensitivität für Inhomogenitäten erreicht wird [Hel13].

5.4 Das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren

Das Hochfrequenz-Wirbelstrom (HFWS)-Verfahren verwendet Frequenzen zwischen 100 kHz und 100 MHz und ist gegenüber dem konventionellen WS-Verfahren um ein Vielfaches sensitiver. Damit ist es im Vergleich besser für die Messung an schlecht leitenden Materialien geeignet, wie Titanlegierungen, CF, CFK oder keramische Werkstoffe. Nachteil des HFWS-Verfahrens ist die Sensitivität gegenüber kleinsten Lift-Off-Variationen, sodass eine hohe Positionsgenauigkeit zwischen Sensor und Prüfkörper notwendig ist. [IM19]

Bei der Verwendung hoher Prüffrequenzen im HFWS-Verfahren lassen sich kapazitive Effekte zwischen den Filamenten eines Rovings im Gegensatz zum konventionellen Wirbelstromverfahren nicht länger vernachlässigen [HSP+15; IM19; Moo01; MKL97]. Diese kapazitiven Effekte verstärken die zwischen den Filamenten auftretenden Verschiebestrome und führen zu einem chaotischen elektrischen Netzwerk im Prüfkörper [JK20]. Die kapazitiven Effekte sind proportional zur Permittivität des Werkstoffs, die im Fall trockener CF-Rovings die dielektrischen Eigenschaften des Sizings und der umgebenden Luft und im Fall von ausgehärteten CFK-Bauteilen die dielektrischen Eigenschaften der Matrix sind [HSP+15; IM19]. Folglich ist die konventionelle Berechnung der Standardeindringtiefe δ (5.15) nicht länger gültig, da hier die Einflüsse der Permittivität und der Verschiebestrome vernachlässigt werden [JK20]. Eine analytische Herleitung der Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Verschiebestrome δ_v erfolgt anhand der Maxwell-Gleichungen (5.16) [JK20]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + i\omega \cdot \vec{D} = \sigma \cdot \vec{E} + i\omega \epsilon \cdot \vec{E} = \vec{E} \cdot (\sigma + i\omega \epsilon) \quad (5.16)$$

mit:

$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator	[-]
$\vec{H}$	Magnetische Feldstärke	[A/m]
$\vec{J}$	Zeitlich veränderliche Stromdichte	[A]
$\vec{D}$	Elektrische Verschiebungsflussdichte	[C/m ²]
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke	[V/m]
σ	Elektrische Leitfähigkeit	[S/m]
ω	Kreisfrequenz mit $\omega = 2\pi f$	[Hz]
ϵ	Permittivität	[F/m]

Die Gleichung wird unter verschiedenen Annahmen und Vereinfachungen in eine homogene Differenzialgleichung zweiter Ordnung überführt, deren Lösung (5.17) über eine Grenzwertbetrachtung für $\omega \rightarrow \infty$ die Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Verschiebestrome δ_v liefert [JK20]:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta_v(\omega) = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad (5.17)$$

mit:

δ_v	Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Verschiebestrome	[mm]
ω	Kreisfrequenz mit $\omega = 2\pi f$	[Hz]
σ	Elektrische Leitfähigkeit	[S/m]
μ	Magnetische Permeabilität	[H/m]
ϵ	Permittivität	[F/m]

Gleichung (5.17) zeigt, dass die Eindringtiefe der Wirbelströme bei hohen Frequenzen lediglich eine Funktion der Werkstoffparameter ist [JK20]. Im Allgemeinen treten Verschiebestrome bzw. kapazitive Kopplungen zwischen zwei spannungsführenden, voneinander isolierten Leitern auf, wenn sich die anliegende Spannung zeitlich ändert [Rod00]. Bei Änderung der anliegenden Spannung ändert sich das elektrische Feld zwischen den beiden Leitern und ein Verschiebestrom (Abb. 5.18) fließt durch das elektrische Feld [Rod00]. Der Effekt der kapazitiven Kopplung bzw. das Auftreten von Verschiebestromen wurde zunächst für Frequenzen von mehr als 15 MHz [Pra76] bzw. 10 MHz [LM94] beobachtet. Neuere Forschungen zeigen, dass der Effekt bereits ab Frequenzen

von 200 kHz auftritt und damit für das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren relevant ist [CJQ+15]. Die in der CF fließenden Wirbelströme können ebenfalls den Leitungs- und Verschiebeströmen zugeordnet werden [KM96; Moo01].

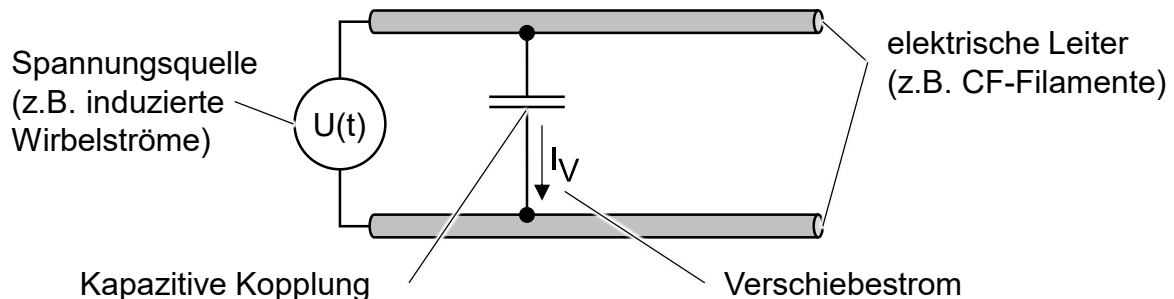


Abb. 5.18: Verschiebestrom I_v bei kapazitiver Kopplung zwischen zwei spannungsbeladenen elektrischen Leitern nach [Rod00]

Von der gemessenen Impedanz der Spule wird über die Aufteilung nach Real- und Imaginärteil bzw. Ohm'schem und kapazitiv/induktivem Anteil auf die Leitungs- und Verschiebeströme geschlossen (vgl. auch Kap. 5.2) [Moo01]. Diese sind direkt abhängig von der lokalen Leitfähigkeit der CF. Da sich die lokale Leitfähigkeit der Carbonfaser mit dem Auftreten bestimmter Merkmale wie etwa Filamentbrüche, Fuzz, Ondulationen oder Splitting ändert, kann bei einer geeigneten Auswertung der Impedanz einer bestimmten Kombination von Ohm'schem und kapazitivem Anteil auf die Art des Merkmals geschlossen werden. Die Aufteilung der Impedanz in Resistanz und Reaktanz bzw. die Zerlegung der Impedanz in Ohm'sche und kapazitiv/induktive Anteil ist folglich zur Identifikation bestimmter Merkmale geeignet, da die induzierten Wirbelströme ebenfalls diesen Kategorien zugeordnet werden können. Hierbei ist der induktive Anteil der Reaktanz proportional zu der Frequenz (5.10), während die kapazitiven Anteile der Reaktanz antiproportional (5.12) sind (Abb. 5.19). Die Reduktion der Reaktanz durch die Abnahme der kapazitiven Widerstände bei hohen Frequenzen führt zu einer Steigerung der Leitfähigkeit und damit zu höheren Wirbelstromdichten [CJQ+15; Pra76; LM94]. Dies wird als ausgeprägter „Plateau“-Effekt (vgl. Abb. 5.16) im Polardiagramm der Frequenz sichtbar [LM94]. [HSK12; HSP+15; Moo01; SKH+09]

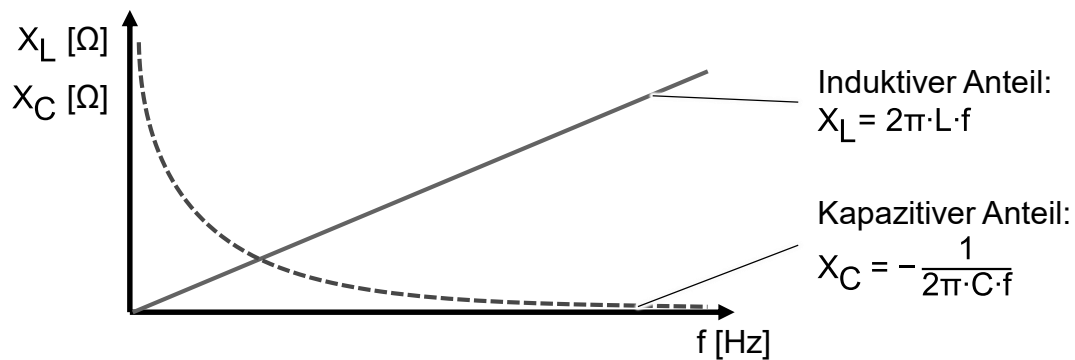


Abb. 5.19: Qualitative Darstellung der Frequenzabhängigkeit der induktiven X_L und kapazitiven Anteile X_C der Reaktanz

Bei ausreichend hohen Frequenzen sinken die kapazitiven Widerstände der Reaktanz zwischen den einzelnen Filamenten soweit, dass die Wirbelströme nicht länger als Leitungsstrom den Ohm'schen Widerständen der Filamente folgen, sondern als Verschiebestrom über die kapazitive Kopplung zweier benachbarter Filamenten fließen (Abb. 5.20) [Pra76]

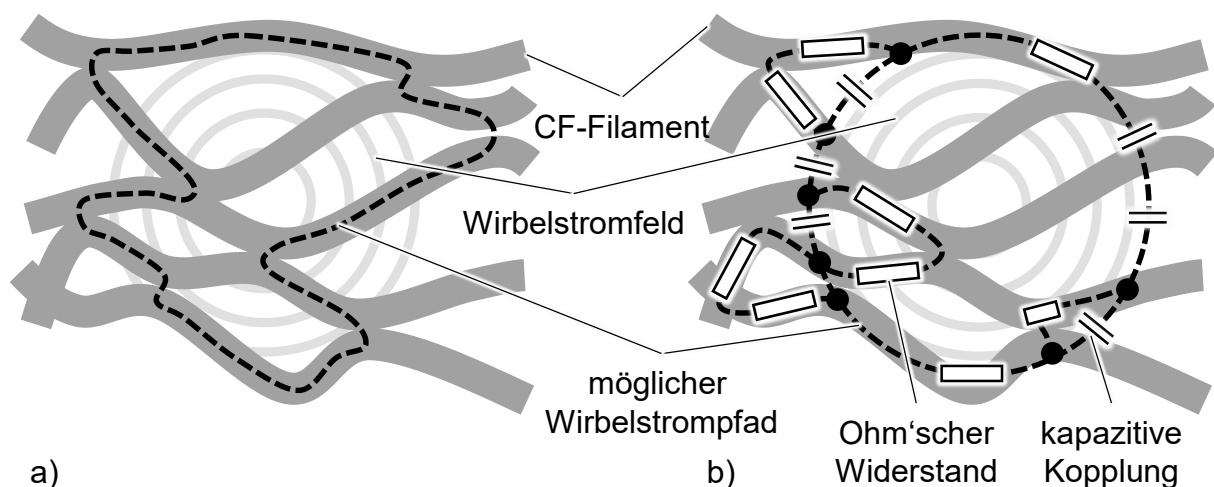


Abb. 5.20: Wirbelstrompfade bei a) niedrigen und b) hohen Frequenzen unter Berücksichtigung kapazitiver Effekte nach [Pra76; CJQ+15]

5.5 Messkette des Wirbelstromverfahrens

Eine Messkette bezeichnet die Abfolge aller Elemente eines Messgeräts oder einer Messeinrichtung, in der das Messsignal von der Signalaufnahme bis zur Signalausgabe geleitet wird. Die Komponenten einer Messkette werden den

drei Komponenten Aufnehmer, Anpasser und Ausgeber zugeordnet, wobei zusätzlich ein Hilfsgerät eingesetzt werden kann (Abb. 5.21). [DIN95]

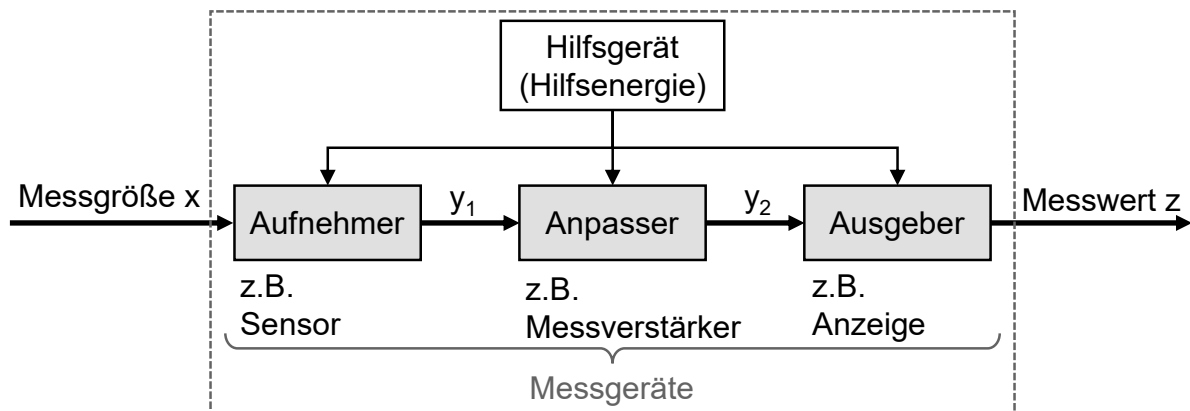


Abb. 5.21. Komponenten einer Messkette nach [Ler16; VDI13]

Analog zur allgemeinen Darstellung der Messkette (Abb. 5.21) folgt eine mögliche Konfiguration der Messkette des Wirbelstromverfahrens (Abb. 5.22).

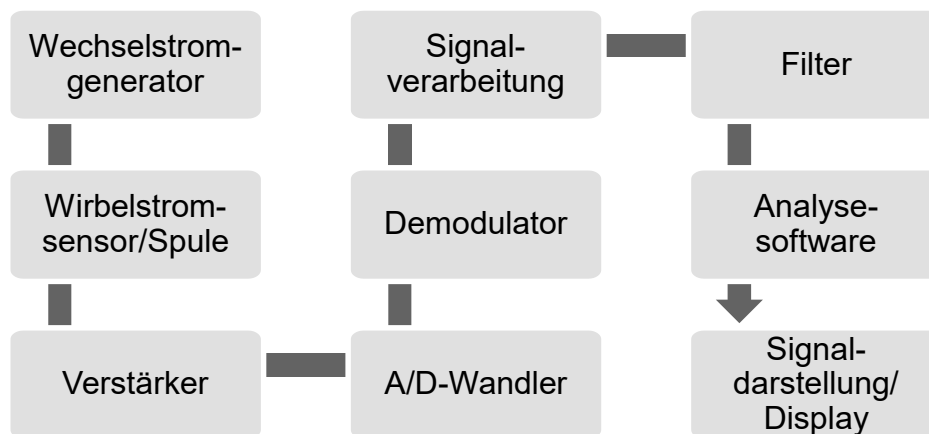


Abb. 5.22: Mögliche Konfiguration einer WS-Messkette⁸ [BG20; SBD+19]

Übertragen auf die Messkette des Wirbelstromverfahrens werden die spezifischen Komponenten des Wirbelstromverfahrens den allgemeinen Komponenten einer Messkette zugeordnet (Tab. 5.2).

⁸ Virtuelles Gespräch über Suragus Whereby Technical Meeting Room mit Florian Koch, Anwendungsingenieur bei der Suragus GmbH, Dresden vom 28.07.2020

Tab. 5.2: Zuordnung der Komponenten des Wirbelstromverfahrens zu den Komponenten einer Messkette [DIN19a; Hel13; SBD+19]

Komponenten Messkette	Komponenten Wirbelstromverfahren
Aufnehmer	Wirbelstromsensor/Spule
Anpasser	Verstärker
	AD-Wandler
	Demodulator
	Signalverarbeitung
	Filter
Ausgeber	Analysesoftware
	Signaldarstellung/Display
Hilfsgerät	Wechselstromgenerator

Im Folgenden werden die Komponenten der Messkette Aufnehmer (Kap. 5.5.1), Anpasser (Kap. 5.5.2) und Ausgeber (Kap. 5.5.3) im Detail vorgestellt.

5.5.1 Aufnehmer

Der Aufnehmer ist die erste Komponente der Messkette und nimmt mit dem Sensor das Messsignal auf [Ler16]. Über den Sensor wird die elektrische Eingangsgröße erfasst und in das Messsignal umgewandelt, das im Falle des Wirbelstromsensors sowohl amplituden- als auch frequenzanalog ist [Ler16]. Damit sind Amplitude und Frequenz des Messsignals proportional zu Amplitude und Frequenz der Messgröße [Ler16]. Als Wirbelstromsensor wird die Anordnung eines Senderelements (Senderspule) zusammen mit einem Empfängerelement (Empfängerspule bzw. nichtinduktiver Magnetfeldsensor) bezeichnet [HSK12]. In der Praxis werden auch Spulenanordnungen eingesetzt, die aus mehreren Senderelementen und/oder Empfängerelementen bestehen (Differenz- und Multidifferenzsensoren, Kompensationsspulen, Sensorarrays etc.) sowie Ferritkerne und Abschirmungen enthalten können [HSK12]. Einen Überblick über gängige Sensortypen gibt Kap. 5.3.5.

5.5.2 Anpasser

Der Anpasser der Messkette umfasst im Fall des Wirbelstromverfahrens die Komponenten Verstärker, A/D-Wandler, Demodulator, Signalverarbeitung und Filter. Ausgangssignal des Aufnehmers (vgl. Kap. 5.5.1) bzw. der Empfängerspule, sind Wechselspannungen und Wechselströme, die an verschiedenen

Punkten des elektromagnetischen Schwingkreises abgegriffen werden und in der Empfängerspule eine Impedanz als Reaktion auf den Wechselstrom hervorrufen (vgl. Kap. 5.2) [Hel13]. Um die vergleichsweise niedrige Wechselspannung auf ein Leistungsniveau zu heben, das messtechnisch verarbeitet werden kann, wird das Messsignal zunächst verstärkt. Bei der Verwendung von Wirbelstromsensoren werden sowohl ein Vor- als auch ein Nachverstärker verwendet, um das Anregungs- und Rücksignal zu verstärken⁹. Da es sich bei der in der Empfängerspule induzierten Spannung um eine elektrische Wechselspannung handelt, ist das resultierende Messsignal analog. Um dieses Signal rechnergestützt verarbeiten zu können, wird das verstärkte, analoge Signal über einen Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) in ein digitales Signal überführt. [BG20; Hel13; ZDR+09]

Das digitalisierte Messsignal der Wirbelstromprüfung wird anschließend über den Demodulator nach Betrag und Phase demoduliert. Hierbei werden die Gesamtspannungen U_T und ihre Phasenverschiebung φ zum Strom I im induktiven Schwingkreis betrachtet (vgl. Abb. 5.8). Aus beiden Messwerten können der Ohm'sche sowie die kapazitiv/induktiven Anteile der Impedanz berechnet werden, die Rückschlüsse auf bestimmte Eigenschaften eines CF-Rovings erlauben (vgl. Kap. 5.2 und insb. Abb. 5.6 und Abb. 5.7). Abb. 5.23 zeigt qualitativ den Verlauf beider Größen im elektromagnetischen Schwingkreis.

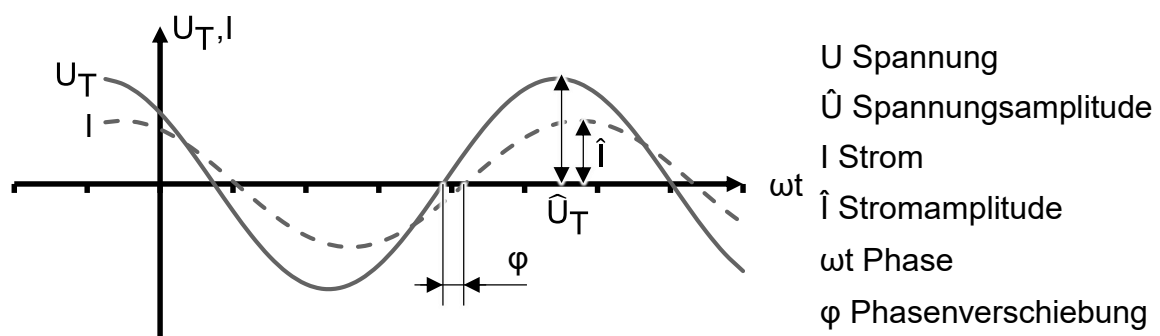


Abb. 5.23: Schematischer Verlauf von Strom I und Gesamtspannung U_T im elektromagnetischen Schwingkreis nach [DIN94]

⁹ Virtuelles Gespräch über Suragus Whereby Technical Meeting Room mit Florian Koch, Anwendungingenieur bei der Suragus GmbH, Dresden vom 28.07.2020

Anschließend erfolgt die Signalverarbeitung, um Störeffekte, wie z.B. durch Temperatureinflüsse, Sensorposition, Lift-Off, oder Fremdpartikel im Messbereich zu eliminieren [LBG+00]. Dies erfolgt beispielsweise über eine Kompensation, bei der das Messsignal in Relation zu einem bestimmten Arbeitspunkt gesetzt wird [DIN19b]. Eine weitere Signalverarbeitung kann über eine Wiener-Kolmogoroff-Filterung zur Rauschunterdrückung und Fast-Fourier-Transformationen (FFT) zur Frequenzanalyse erfolgen [LM94; HSM13]. Zusätzlich werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Messaufgabe und dem Signalverlauf Hoch-, Tief- oder Bandpassfilter eingesetzt [HSM10].

5.5.3 Ausgeber

Abschließend wird das angepasste Signal im Ausgeber verarbeitet. Dazu wird das Messsignal mit Hilfe von Algorithmen komprimiert und relevante Größen werden aus dem Messsignal abgeleitet [Ise08; Par16]. Dies ist beispielsweise die Berechnung der komplexen Impedanz oder die Umrechnung in einen Leitfähigkeitskennwert.

Beim konventionellen Wirbelstromverfahren erfolgt die Darstellung der Impedanz als Real- und Imaginärteil in der komplexen Ebene oder als Aufteilung nach Amplitude und Phase über der Zeit [HH09; Moo07]. Die Visualisierung des Messergebnisses erfolgt analog oder digital mit einem Oszilloskop, einen Schreiber oder einem Anzeigeelement [SBD+19]. Bei der analogen Darstellung ist ein vorgeschalteter A/D-Wandler nicht notwendig [Par16].

Bei der Impedanzspektroskopie, dem bildgebenden Wirbelstromverfahren, wird dem lokalen Wirbelstromsignal in Abhängigkeit von der Impedanz oder der Leitfähigkeit ein Grauwert zugeordnet [Bül14]. Dazu wird der Wirbelstromsensor um einen Manipulator ergänzt, sodass der Sensor definiert über einen Prüfkörper bewegt und das lokale Wirbelstromsignal einer Koordinate zugeordnet werden kann [HSM10]. Aus der Gesamtheit aller lokalen Signale wird das Gesamtbild rekonstruiert und als C-Scan dargestellt [HSK12; HSM10; MS10].

5.6 Stand der Technik, Patentsituation und Stand der Forschung

5.6.1 Stand der Technik

Während eine Vielzahl von Herstellern für Wirbelstromprüftechnik für metallische Halbzeuge existiert, sind kaum Anbieter für die Qualitätssicherung von CF und CF-Halbzeugen vorhanden. So vertreiben etwa die Rohmann GmbH, Frankenthal, und die OLYMPUS EUROPA SE & CO. KG, Hamburg, Wirbelstromprüfgeräte für den Einsatz an und in metallischen Prüfkörpern, verfügen jedoch nicht über kommerziell verfügbare Lösungen für die Prüfung von CF-basierten Werkstoffen. Im europäischen Raum erfolgen Entwicklung und Vertrieb kommerziell verfügbarer Systeme insbesondere über die SURAGUS GmbH, Dresden, sowie das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden. Beide Unternehmen weisen eine gemeinsame Historie auf und sind Vorreiter auf dem Gebiet des Wirbelstromverfahrens für CF-basierter Werkstoffe in Europa. Tab. 5.3 zeigt eine Auswahl verfügbarer Prüfsysteme beider Hersteller.

Tab. 5.3: Ausgewählte, kommerziell verfügbare Wirbelstromprüfgeräte für CF und CF-Halbzeuge [IKT21; SUR20]

SURAGUS GmbH		Fraunhofer IKTS	
Gerät	Beschreibung	Gerät	Beschreibung
EddyCus® CF rob	Robotergetstützte Detektion von Struktur und Defekten	EddyCus® MPECS	Bildgebendes Wirbelstromverfahren für flächige CF-Halbzeuge
EddyCus® CF inline GAP	Inline-Prozesskontrolle von CF-Geweben für Orientierung und Lücken	Texturanalyse von CFK	Robotergetstützte Detektion von Struktur und Defekten an komplexen CF-Formen
EddyCus® CF inline TOW	Qualitätsprüfung von trockenen und vorimprägnierten CF	EddyCus® Wetcoating	Charakterisierung des Trocknungsverhaltens leitfähiger Schichten

Das System EddyCus® CF inline TOW der SURAGUS GmbH, Dresden, weist Parallelen zu dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Sensorsystem auf. Das System ist ebenfalls für die Prüfung von CF-Rovings geeignet, erlaubt

gegenwärtig jedoch keine Quantifizierung von Faserschädigung oder Verarbeitbarkeit. Gemäß Datenblatt ist der EddyCus® CF inline TOW zur Leitfähigkeitsmessung von leitfähigen, faserförmigen Halbzeugen geeignet und ermöglicht im Falle der Prüfung von CF-Rovings unter anderem Rückschlüsse auf Carbonisierungsgrad, Risse und die Quantifizierung von trockenen und feuchten Abschnitten bei Prepreg-Materialien. Das Messsystem wird sowohl eigenständig als auch als Komponente des tribologischen Prüfstands ROVINGTEST der Fa. Textechno H. Stein GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, vertrieben [Tex21]. Gemäß Herstellerangaben befindet sich der EddyCus® CF inline TOW derzeit noch im Entwicklungsstadium. [SUR21a]

5.6.2 Internationale Patentsituation

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum Anbieter kommerzieller Wirbelstromtechnik für CF und CFK am Markt existieren, konzentriert sich der Einsatz dieser Technologie auf patentgeschützte Insellösungen innerhalb verschiedener Unternehmen. Diese Unternehmen stammen zum Großteil aus der Luftfahrt, dem Automobil- sowie dem Energie- und Ressourcensektor. In der Luftfahrt wird das Wirbelstromverfahren beispielsweise zur Schichtdickenmessung an Faserverbundbauteilen [FF08], zur Detektion von Inhomogenitäten in CFK-Bauteilen [Bra10] oder zur Beurteilung der Leitfähigkeit elektrisch leitender Komponenten [DRB17] genutzt. Im Automobilsektor wird die Wirbelstromtechnologie unter anderem zur Evaluation der Faserorientierung [LU17], zur Detektion von Oxidation in CF und CF-Halbzeugen [CH04] und zur Untersuchung des Verschleißzustands von Carbon-Keramik-Bremsscheiben [JMD13] verwendet. Im Bereich des Energie- und Ressourcensektors wird das Verfahren unter anderem zur Prüfung von rohrförmigem CFK-Bauteilen [TKY+95; NK95; AHM93] oder zur Detektion von Delaminationen in Faserverbundbauteilen [YKT+97] verwendet. Weiterhin wird die Verschaltung mehrerer, flächiger Wirbelstromsensoren mit dreieckigem Spulenquerschnitt zum Testen leitfähiger Substrate, wie zweidimensionale, plane CFK-Strukturen, verwendet [HSL+20]. Darüber hinaus behandeln weitere Patente im Bereich der Wirbelstromtechnologie die Bewertung der lokalen Permeabilität [GHK17], Systeme zum 3-Achs-in-situ-Scan zur

Defektdetektion [PHM+18], flächige Wirbelstromsensorarrays [Sch12], ein Sensorsystem zur Detektion des Auftretens und der Ausbreitung von Delaminationen [XJH+17] sowie ein Scansystem für gekrümmte Flächen [CXF+17].

Die internationale Patentsituation im Bereich der Wirbelstromtechnologie zeigt, dass derzeit keine Schutzrechtsansprüche im Bereich der Qualitätsüberwachung eindimensionaler Faserhalbzeuge bestehen. Dabei existieren keine Patente zur Faserüberwachung mittels Wirbelstrom im Allgemeinen oder zur Qualitätssicherung an Carbonfasern im Besonderen.

5.6.3 Stand der Forschung

Im Bereich der Wirbelstromtechnologie bestehen derzeit fünf große Forschungsbereiche, die eine Weiterentwicklung des Prüfverfahrens hinsichtlich Auflösung, Verkürzung der Prüfzeit, Adaption für weitere Werkstoffklassen etc. zum Ziel haben. Darüber hinaus existieren Bestrebungen, Defizite des Verfahrens, wie Lift-Off- oder Rand-Effekte, zu kompensieren (Abb. 5.24).

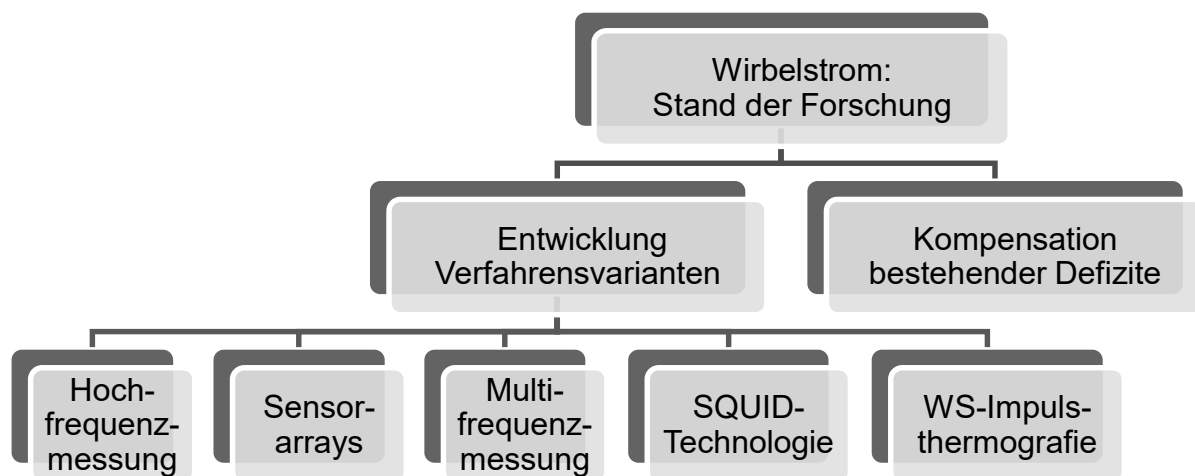


Abb. 5.24: Übersicht des aktuellen Stands der Forschung „Wirbelstrom“

Beim Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren wird der verwendete Frequenzbereich zur Anregung der Primärspule von konventionell wenigen kHz bis ca. 10 MHz auf bis zu 100 MHz durch eine geeignete Elektronik ausgeweitet [HHK+10]. Durch die Verwendung höherer Frequenzen wird das Messprinzip auch für schlecht leitfähige Materialien nutzbar, wie CF, CFK und Smart Textiles mit integrierter Sensorik (vgl. auch Kap. 5.4) [BBN+10; HSM13; MLK01].

Über Sensorarrays werden zeitgleich mehrere Messgrößen aufgenommen, die Auflösung verbessert und der Messbereich vergrößert [ILS90; MMS08; MS10]. Wirbelstromsensor-Arrays kommen insbesondere im Preforming beim Resin-Transfer-Moulding (RTM)-Prozess zum Einsatz, mit dem CFK-Bauteile mit duroplastischer Matrix in Serie hergestellt werden [BES+17; BWT+17]. Hierdurch wird inline eine 100 %-Qualitätskontrolle direkt im Umformprozess und eine überwachte Großserienproduktion von CFK-Bauteilen im RTM-Prozess realisiert [BES+17; BWT+17]. Darüber hinaus ermöglichen Wirbelstromsensor-Arrays eine Steigerung der Messtiefe, bis zu der Inhomogenitäten detektiert werden können [HS11]. Über Multifrequenzmessungen werden Volumenleitfähigkeitsprüfungen, Richtungscharakterisierungen und eine Bildgebung für CFK und Al/CFK-Hybridbauteile umgesetzt [YLW+10; YWS+09]. Eine Kombination aus Array und Multifrequenzmessung bietet ein Multi-Sensor-Ansatz, bei dem mehrere Sensoren bei verschiedenen Frequenzen zeitgleich betrieben werden. Hierdurch wird die Tiefenauflösung stark verbessert, da die Wirbelströme bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich tief in den Prüfkörper eindringen [NSC+19]. Bei der SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)–Technologie handelt es sich um hoch sensitive Magnetfeldsensoren, die in Kombination mit Wirbelstromsensoren zur Realisierung hoher Eindringtiefen genutzt werden [Yas08]. Mit dieser Technologie lassen sich beispielsweise Impact-Schäden in großen Tiefen in CFK-Bauteilen detektieren [CGM+03a; CGM+03b]. Über HTS (High Temperature Superconductur)-SQUIDS können zudem auch teilweise durchtrennte Rovings messtechnisch aufgelöst werden [SYH+11]. Bei der Wirbelstrom-Impulsthermografie wird das konventionelle Wirbelstromverfahren mit der Impulsthermografie kombiniert, um höhere Messgeschwindigkeiten und -tiefen zu erzielen und Risse und Impact-Schäden zu detektieren [CT11; HTP+14].

Bestehende Defizite des Wirbelstromverfahrens resultieren aus der Sensitivität des Verfahrens gegenüber einer Vielzahl von Einflüssen (vgl. Kap. 5.3), was zugleich Vor- und Nachteil des Prüfverfahrens ist. Zu den Einflüssen zählen unter anderem die Anisotropie der Leitfähigkeit, der Lift-Off-Effekt, der Randeffect,

der Skin-Effekt sowie zum Teil ein niedriges SNR. Bei Materialien mit anisotroper, elektrischer Leitfähigkeit, wie CF und CFK, wird das Wirbelstromfeld in Richtung der höchsten Leitfähigkeit deformiert. Um die gemessenen Impedanzen dieser deformierten Wirbelströme zu analysieren, existieren Bestrebungen, das resultierende Wirbelstromfeld mittels FEM (Finite-Elemente-Methode) zu simulieren. Hierbei werden Formulierungen für das elektrische Vektorpotenzial T und das magnetische Skalarpotenzial ϕ genutzt, wobei die Diskretisierung auf elektrische aktive Bereiche zur Reduktion der Komplexität reduziert wird [MF09]. Anschließend erfolgt durch inverse Interpolation numerischer Näherungslösungen die Entwicklung eines analytischen Zusammenhangs zwischen anisotroper Leitfähigkeit und Impedanz, über die mittels Wirbelstrom die anisotrope Leitfähigkeit berührungslos charakterisiert wird [MF11]. Von experimenteller Seite wird die Anisotropie der Leitfähigkeit anhand der Orientierung der Spule beobachtet [CT11]. Ein schwankender Lift-Off, bedingt durch eine nicht ideal plane Oberfläche des Prüfkörpers, resultiert in Störsignalen und damit einer Steigerung des SNR. Dies kann durch eine Peak-Shift-Korrektur der Messfrequenz [YWS+09], eine Kombination des Wirbelstromverfahrens mittels Impulsthermografie [CT11] oder durch Theta-Sonden, eine Spulenanordnung mit senkrecht stehender Empfängerspule [HK03; KHK13], kompensiert werden. Beim Randeffect wird das Wirbelstromfeld durch einen Sprung der elektrischen Leitfähigkeit am Rand des Prüfkörpers deformiert. Lösungsansätze zur Begegnung dieser Problematik liegen in der Verwendung rechteckiger, planarer Spulentypen [FR04], dem Einsatz der SQUID-Technologie [BVP+07; Ruo05] oder der Wirbelstrom-Impulsthermografie [Swi16]. Ein zu starker Einfluss des Skin-Effekts kann über volumetrisches Heizen in der Wirbelstrom-Impulsthermografie zur Detektion tiefer liegender Defekte [HTP+14], einer Verwendung ferritischer Spulenkerne in der SQUID-Technologie [CGM+03a; HKT+02], der analytischen Berechnung der Skin-Tiefe [MMT+15] oder der Verwendung niedriger Frequenzen kompensiert werden [CQJ+17]. Zur Steigerung des SNR werden Theta-Sonden [KHK13], vertikale Doppelfunktionssonden [DXC+17] oder Howland-Pumpen zur Erzeugung extrem gleichmäßiger Spannungen bei variierendem Strom oder Widerstand eingesetzt [HDT+16].

5.7 Funktionsnachweis

Der Funktionsnachweis der Adaption des Wirbelstromverfahrens zur Qualitätssicherung von CF-Rovings erfolgt im Rahmen eines rudimentären Vorversuchs. Ziel des Vorversuchs ist der Nachweis, dass eine Faserschädigung im CF-Roving durch eingebrachte Filamentbrüche zu einer Änderung der gemessenen Impedanz führt. Dazu wird ein CF-Roving von einem Fadenvorrat abgezogen, kontinuierlich manuell geschädigt und über mehrere Umlenkrollen durch einen Wirbelstromsensor geführt (Abb. 5.25). Der Wirbelstromsensor vom Typ „Durchlaufsensor“ ist mit einem Messrechner zur Datenaufnahme verbunden. Da Durchlaufsensoren sehr sensitiv auf abstehende Filamente reagieren, wird zur Schädigung des CF-Rovings eine Umlenkung um zwei Umlenkstifte mit einem Durchmesser $\varnothing \approx 2$ mm gewählt, um Filamente der querspröden CF zu brechen, ohne dabei abstehende Filamente zu erzeugen.

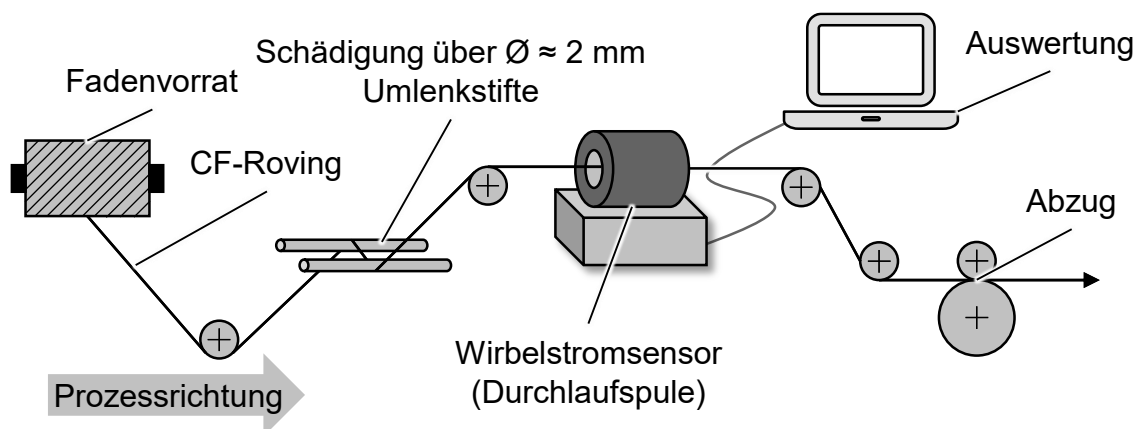


Abb. 5.25: Schematische Darstellung des Vorversuchs

Nacheinander werden sechs Messreihen mit einer Dauer von je 5 min durchgeführt, wobei in den Messreihen 1, 3 und 5 der Roving über die Umlenkstifte manuell geschädigt und in den Messreihen 2, 4 und 6 auf eine Schädigung verzichtet wird (Abb. 5.26). Es wird jeweils die resultierende Impedanz-Magnitude gemessen und Mittelwert und Standardabweichung jeder Messreihe aufgetragen. Bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 2 m/min repräsentiert jede Messreihe eine getestete Länge von 10 m CF-Roving und entspricht rund 7.000 Messpunkten.

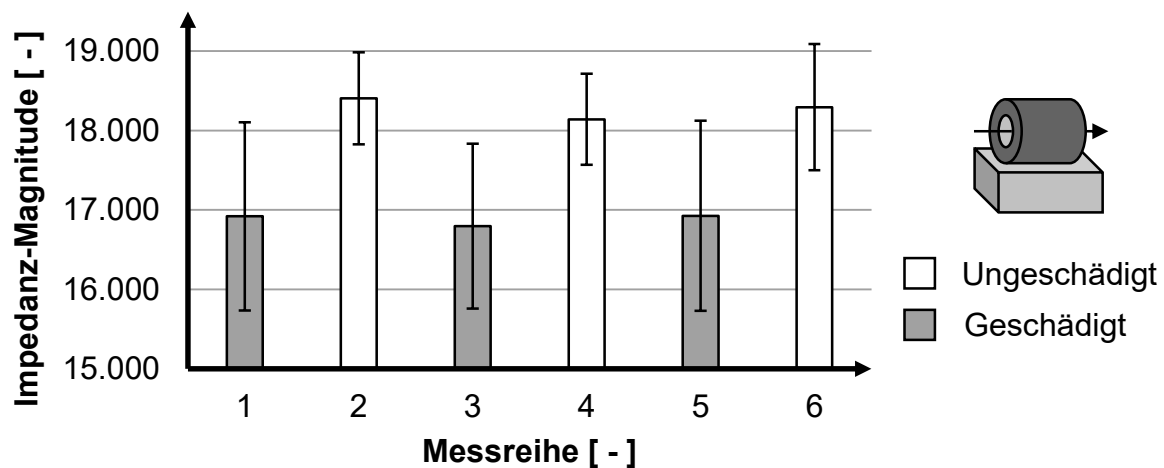


Abb. 5.26: Mittelwert und Standardabweichung der Impedanz-Magnitude

Die Versuchsergebnisse zeigen im Mittelwert der gemessenen Impedanz-Magnitude einen Unterschied zwischen geschädigten und ungeschädigten CF-Rovings. Damit wird das Messprinzip „Wirbelstrom“ als prinzipiell geeignet zur Detektion von Filamentbrüchen in CF-Rovings eingestuft.

Das Messprinzip Wirbelstrom ist prinzipiell zur Detektion von Filamentbrüchen in CF-Rovings geeignet.

Zu beachten ist jedoch die starke Streuung der Messwerte, die zu einer Überlappung der Standardabweichungen geschädigter und ungeschädigter Versuchsreihen führt. Folglich kann zwar ein erster Trend zur Abnahme der Impedanz-Magnitude bei Schädigung eines CF-Rovings beobachtet, aber keine statistisch abgesicherte Differenzierung zwischen geschädigten und ungeschädigten CF-Rovings getroffen werden. [LGK+20a; LGK+20b]

6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wird ein Zwischenfazit der erarbeiteten Ergebnisse und der vorgestellten Technologie „Wirbelstrom“ gezogen (Abb. 6.1).



Abb. 6.1: Einordnung des Kap. 6 in das Vorgehen zur Zielerreichung

In Kap. 1 wird die Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien aus den Vorgaben der Europäischen Kommission und des EU-Parlaments zu einer CO₂-armen und nachhaltigen Zukunft abgeleitet [Bun09; Eur11; Wan12]. CFK-basierter Leichtbau trägt diesen Zielen Rechnung und ermöglicht eine CO₂-Reduktion in Straßenverkehr und Luftfahrt, die zu den größten CO₂-Emittenten zählen [Eur11]. Die Wirtschaftlichkeit der CFK-Prozesskette kann durch ein Ausschließen fehlerhafte Rovings von weiterer Wertschöpfung und Materialeinsparung gesteigert werden [HSM13; HSP+15; KFE+16; LKE19]. Dies kann durch ein geeignetes Inline-Prüfverfahren zur berührungslosen 100 %-Qualitätsüberwachung von CF-Rovings realisiert werden [Bun09; JH14; Mor05; Wan12]. Unter den in Kap. 2 beschriebenen, relevanten Defekten in CF-Rovings (vgl. Tab. 2.1) sind vor allem Filamentbrüche ein relevantes Maß für die Qualität eines CF-Rovings, da sie sowohl die mechanischen Eigenschaften mindern als auch notwendige Bedingungen für Folgefehler, wie Abrieb, Fuzz oder Ondulationen, sind. Zudem erhöhen gebrochene Filamente die Wickelneigung an rotierenden Fadenleitelementen und senken damit die Verarbeitbarkeit [EMK16; GMW+16]. Insbesondere die Relevanz einer schlechten Verarbeitbarkeit als Maß für die Qualität eines CF-Rovings, bedingt durch Filamentbrüche, wird von der Industrie bestätigt: Reklamationen von CF-Verarbeitern

an den CF-Hersteller erfolgen in aller Regel nicht aufgrund mangelnder mechanischer Eigenschaften, sondern aufgrund schlechter Verarbeitbarkeit¹⁰. Die Verarbeitbarkeit einer CF bzw. korrelierende Messgrößen, wie Filamentbrüche, die Menge an Abrieb pro Lauflänge oder die Haarigkeit eines Rovings, werden intern durch sensortechnische Insellösungen der CF-Hersteller stichprobenartig überprüft¹⁰. Diese sensortechnischen Insellösungen sind jedoch weder standardisiert noch kommerziell verfügbar. Identifiziertes Defizit ist, dass derzeit kein Prüfverfahren existiert, das inline eingesetzt werden kann und eine zerstörungsfreie 100 %-Qualitätssicherung von CF-Rovings erlaubt (Abb. 6.2).

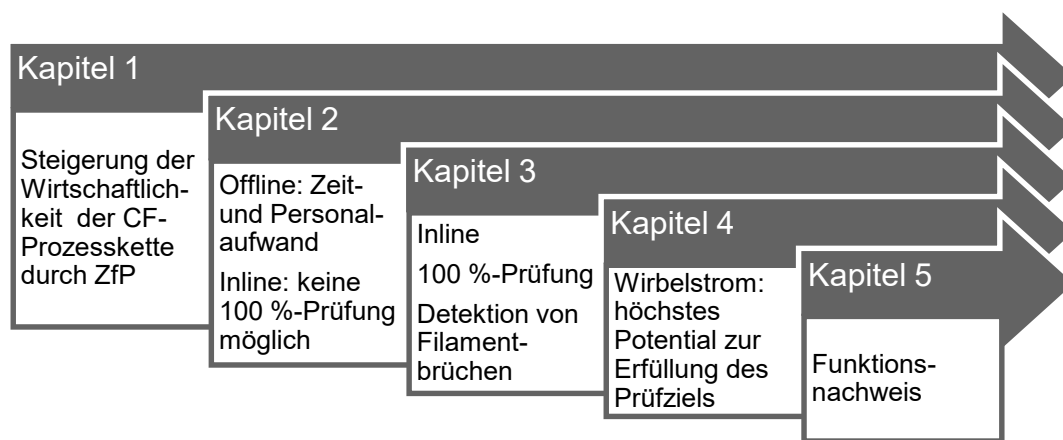


Abb. 6.2: Visualisierung der bisher gefundenen Ergebnisse

Aus diesem Defizit wird in Kap. 3 das Ziel dieser Dissertation abgeleitet, die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens (ZfP), das inline eine 100 %-Prüfung von CF-Rovings erlaubt und auch verdeckte Fehler detektiert, um die Verarbeitbarkeit eines Rovings anhand der Anzahl der Filamentbrüche zu quantifizieren. Dazu erfolgt in Kap. 4 die methodische Bewertung vorausgewählter ZfP, wobei das Wirbelstromverfahren das höchste Potenzial zur Erfüllung des Prüfziels aufweist. In Kap. 5 folgen eine detaillierte Beschreibung des Wirbelstromverfahrens und der Nachweis, dass das Wirbelstromverfahren prinzipiell für die Detektion von Filamentbrüchen geeignet ist.

¹⁰ Virtuelles Projekttreffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Peter Vojcena, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 03.02.2021

7 Entwicklung des multimodalen Sensorsystems

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des multimodalen Sensorsystems, basierend auf dem Wirbelstromsensor, beschrieben (Abb. 7.1).

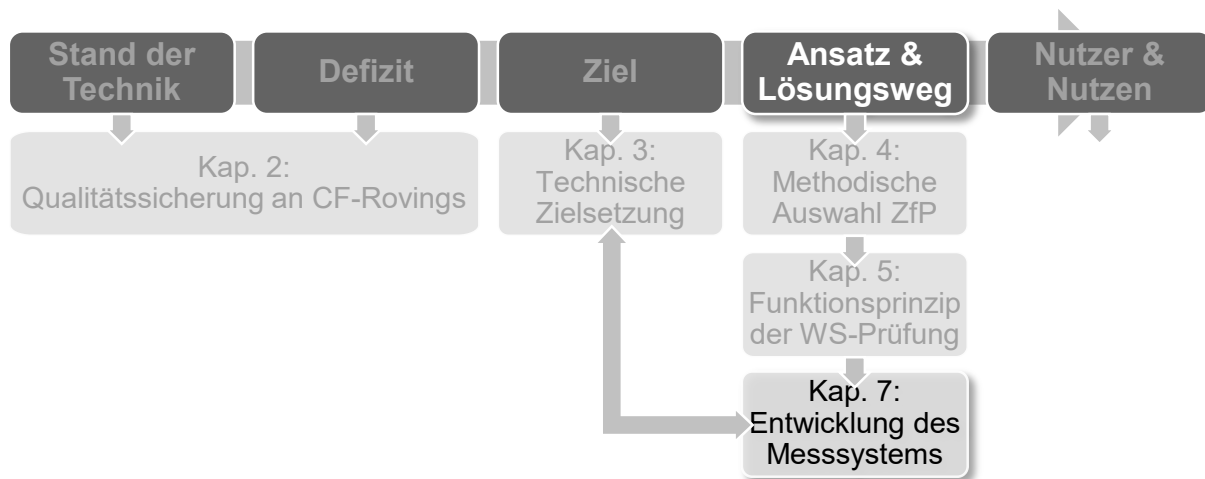


Abb. 7.1: Einordnung von Kap. 7 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Die Entwicklung des multimodalen Messsystems ist abgeschlossen, wenn die technische Zielsetzung (Tab. 3.1) erfüllt wird. Zu diesem Zweck werden zunächst das methodische Vorgehen zur Entwicklung des Messsystems (Kap. 7.1) und der verwendete, adaptierte Versuchsaufbau (Kap. 7.2) beschrieben. Anschließend wird eine Übersicht über die wichtigsten, technischen Entwicklungsschritte gegeben (Kap. 7.3) und diese im Folgenden detailliert beschrieben. Dazu zählen insbesondere die Entwicklung eines Druckluftmoduls zur Reinigung des Wirbelstromsensors im laufenden Betrieb (Kap. 7.4), die Verwendung eines PTFE-Inlays zur Verhinderung von Ablagerungen im Sensor (Kap. 7.5) sowie die kameraoptische Bereinigung des Messsignals über Breite und Lageversatz des CF-Rovings (Kap. 7.6). Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse und Entwicklungen in einem Fazit zusammengefasst (Kap. 7.7).

7.1 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Messsystems

Die Entwicklung des Messsystems erfolgt in Anlehnung an die Methoden der agilen Softwareentwicklung (z.B. Scrum) und der agilen Produktion (z.B. Lean

Manufacturing) [RS21]. Hierbei werden kurze Entwicklungszyklen iterativ durchlaufen, um schnell funktionsfähige Prototypen zu erhalten, die getestet und überarbeitet werden. Zur methodischen Messsystementwicklung wird daher der Deming-Zyklus verwendet, der eine Methode des Gestaltungsprinzips der kontinuierlichen Verbesserung ist und sich in vier Phasen gliedert, die iterativ durchlaufen werden [DIN18b; DM15; Sch15d]. Die vier Phasen des Deming-Zyklus und deren Adaption für die Messsystementwicklung sind in Abb. 7.2 dargestellt.

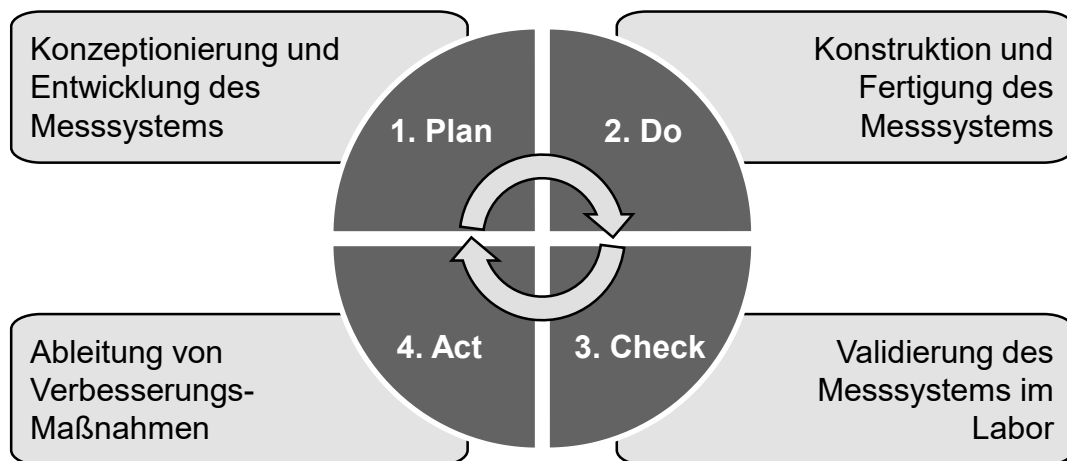


Abb. 7.2: Adaptierter Deming-Zyklus nach [DIN18b]

In der ersten Phase „Plan“ des Deming-Zyklus erfolgt die Konzeptionierung und theoretische Entwicklung des Messsystems. Dies beinhaltet das Systemdesign und damit die Auslegung des gesamten Messsystems. Dies umfasst einerseits Hardware-Komponenten, wie Spule und Messelektronik, und andererseits Software-Komponenten, wie eine entsprechende Firmware zur Signalverarbeitung. In der zweiten Phase „Do“ erfolgt die Konstruktion und Fertigung des Wirbelstromsensors, in der die entwickelten Teillösungen für Spule, Messelektronik und Firmware zu einem funktionsfähigen Messsystem kombiniert werden. Anschließend wird das gefertigte Messsystem im Rahmen der dritten Phase „Check“ im Labormaßstab getestet. Hierzu wird auf einem tribologischen Prüfstand die Inline-Prüfung am kontinuierlichen Fadenlauf abstrahiert nachgestellt, die für die Nutzer der Technologie, CF-Hersteller und Verarbeiter, relevant ist. Auf dem Prüfstand wird die Qualität des CF-Rovings in Versuchsreihen reproduzierbar manipuliert und die Auswirkung auf das resultierende Messsignal des Wirbelstromsensors untersucht. Aus der Datenanalyse der aufgenommenen

Messdaten werden abschließend, in der vierten Phase „Act“, Verbesserungsmaßnahmen für die nächste Sensorgeneration abgeleitet. Diese werden im erneuten Durchlauf des Deming-Zyklus in der folgenden „Plan“-Phase bei der Konzeptionierung umgesetzt.

Der Deming-Zyklus wird iterativ durchlaufen, um nicht nur Verbesserungen an Teillösungen vorzunehmen, sondern identifizierte Defizite ganzheitlich als Messsystem zu beheben. Mit jedem Durchlauf des Deming-Zyklus wird so eine neue Generation des Messsystems konzeptioniert, gefertigt und getestet. Basis für den ersten Durchlauf des Deming-Zyklus ist ein erster Prototyp des Wirbelstromsensors, der auf Grundlage von Erfahrungswerten und Vorversuchen entworfen wird. Der Deming-Zyklus wird so oft durchlaufen, bis die technische Zielsetzung (Kap. 3) erreicht wird und ein marktreifer Demonstrator vorliegt.

7.2 Versuchsaufbau

Das Testen des Wirbelstromsensors erfolgt auf dem tribologischen Prüfstand „ITA-Tribometer“ (Kap. 7.2.1) des Instituts für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University, Aachen. In den Prüfstand werden ein Wirbelstromsensor (Kap. 7.2.2) zur Datenaufnahme sowie ein Schädigungsmodul (Kap. 7.2.3) zur Manipulation der Faserschädigung implementiert. Abschließend wird die Peripherie des Prüfstands überarbeitet, um Störeinflüsse zu minimieren und die Aufnahme repräsentativer Daten zu gewährleisten (Kap. 7.2.4).

7.2.1 Tribologischer Prüfstand: ITA-Tribometer

Das ITA-Tribometer ist ein textiltribologischer Prüfstand zur Quantifizierung von Reibung und Faserschädigung für Hochmodulfasern. Das Tribometer wurde am ITA unter Prof. Dr. Burkhard Wulfhorst und Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries entwickelt und vereint Elemente der tribologischen Prüfstände beider Professoren [FG03; FG04; WG92]. Zur tribologischen Prüfung wird ein Garn oder Roving von einer Spule über einen Abzugsmotor abgezogen und durch den Prüfstand über einen zylindrischen Reibkörper geführt. Vor und hinter dem Reibkörper durchläuft das Garn jeweils sowohl optische

Filamentbruch- als auch Zugspannungssensoren. Der Originalaufbau des ITA-Tribometer ist in Abb. 7.3 dargestellt.

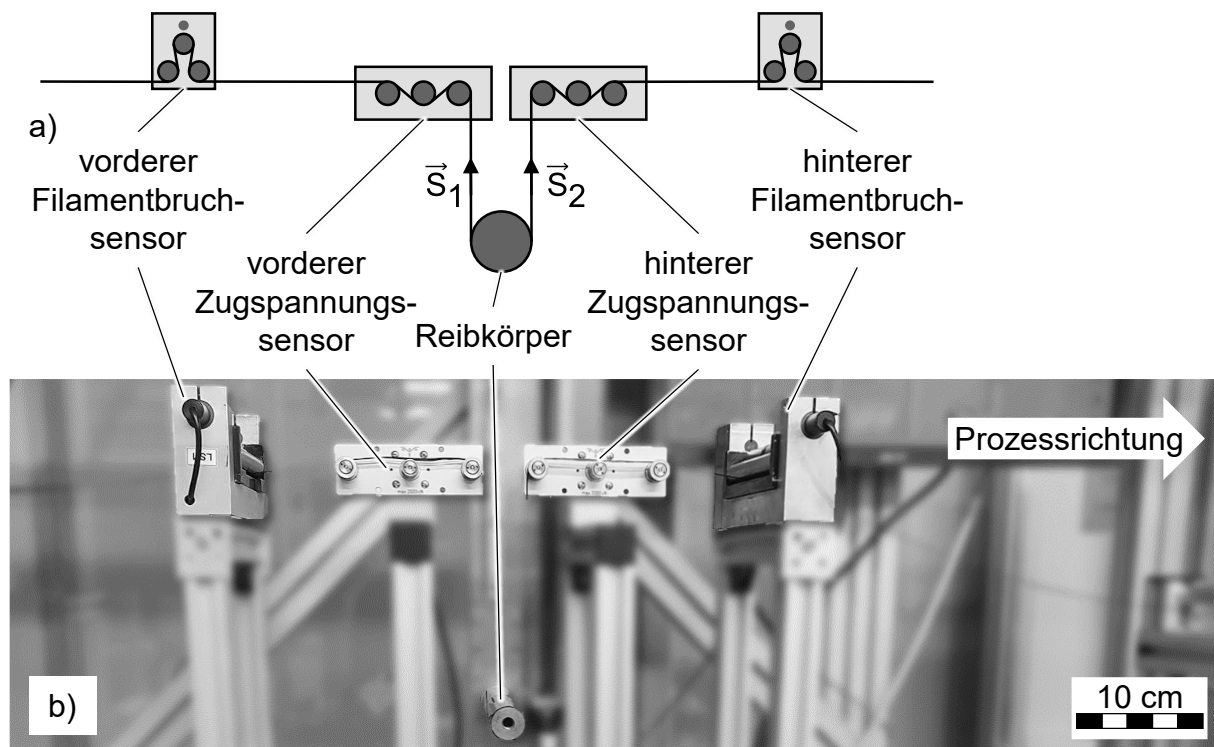


Abb. 7.3: Darstellung des ITA-Tribometers a) schematisch und b) als Bild

Der Reibwert wird zwischen einem beliebigen Garn oder Roving und dem zylindrischen Reibkörper mit definierter Oberfläche ermittelt. Dazu werden über die Zugspannungssensoren die Fadenzugkräfte vor S_1 und hinter S_2 dem Reibkörper gemessen (Abb. 7.3). Anhand der Eytelwein'schen Seilreibungsformel (7.1) wird der Reibungskoeffizient μ bei bekanntem Umschlingungswinkel α aus dem Verhältnis der Fadenspannungen berechnet [Gri95; Gup08; Weg81].

$$S_2 = S_1 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \Leftrightarrow \mu = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (7.1)$$

mit:

S_1	Seilkraft im Leertrum	[N]
S_2	Seilkraft im Lasttrum	[N]
μ	Reibungskoeffizient	[-]
α	Umschlingungswinkel	[rad]

Die Quantifizierung der Faserschädigung erfolgt über optische Filamentbruchsensoren, die nach dem Prinzip einer Laserbrücke arbeiten (vgl. Abb. 2.8).

Über einen Zähler wird die Anzahl abstehender Filamente gezählt, die die Lichtschranke durchbrechen. Die Differenz der Filamentbrüche vor und hinter dem Reibkontakt dient als quantitative Beschreibung der Faserschädigung.

7.2.2 Prototyp des Wirbelstromsensors

Bei dem verwendeten Wirbelstromsensor handelt es sich um einen Prototyp, der im Rahmen von Voruntersuchungen des Forschungsvorhabens „EddySCARF“ ausgewählt wird¹¹. Hierbei liegt der Fokus auf einem niedrigen Signal-to-Noise-Ratio (SNR). Unter den drei grundlegend verschiedenen Spulentypten (Abb. 7.4) vom Typ Durchlaufsensor wird eine Vorauswahl auf Basis einer Messsystemanalyse getroffen.

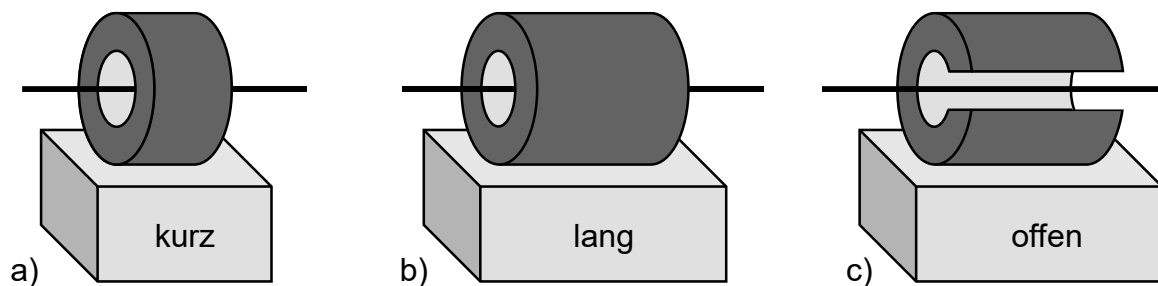


Abb. 7.4: Grundlegende Spulentypten vom Typ Durchlaufsensor: a) kurze Spule, b) lange Spule und c) offene Spule

Zur Messsystemanalyse werden abstrahierte Referenzfehler aus manipulierten CF genutzt, die in Glasröhren als Fehlerlehre konserviert werden. Als Fehlerlehre werden verschiedene Referenzfehler, wie abstehende Filamente, Fuzz, Filamentbrüche etc. eingesetzt. In Wiederholversuchen zur Vermessung der Referenzfehler werden die resultierenden Impedanzen der drei Spulentypten untersucht und die SNR verglichen (Tab. 7.1). Je höher das SNR ist, desto fähiger ist der untersuchte Sensortyp bei der Vermessung des jeweiligen Referenzfehlers.

¹¹ Antrag des Forschungsvorhabens „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 12/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

Tab. 7.1: SNR der Sensortypen für verschiedene Referenzfehler¹²

Referenzfehler	Sensortyp		
	Kurz	Lang	Offen
Fehlerfrei	115	162	27
Abstehendes Filament	261	3.455	87
Filamentbruch	79	519	22
Fuzz	236	8.670	85
Einschnitt	138	1.413	25
Einschnürung	123	113	16
Aufgeriebene Stelle	254	7.644	130

Der lange Sensortyp (Abb. 7.4 b) weist im Vergleich zum kurzen (Abb. 7.4 a) und zum offenen Sensortyp (Abb. 7.4 c) das höchsten SNR auf. Da dieser Sensortyp weniger sensitiv auf geometrische Änderungen reagiert und gleichzeitig eine hohe Wiederholgenauigkeit bei der Vermessung der Referenzfehler zeigt, wird der lange Sensortyp im weiteren Verlauf favorisiert (Abb. 7.5).

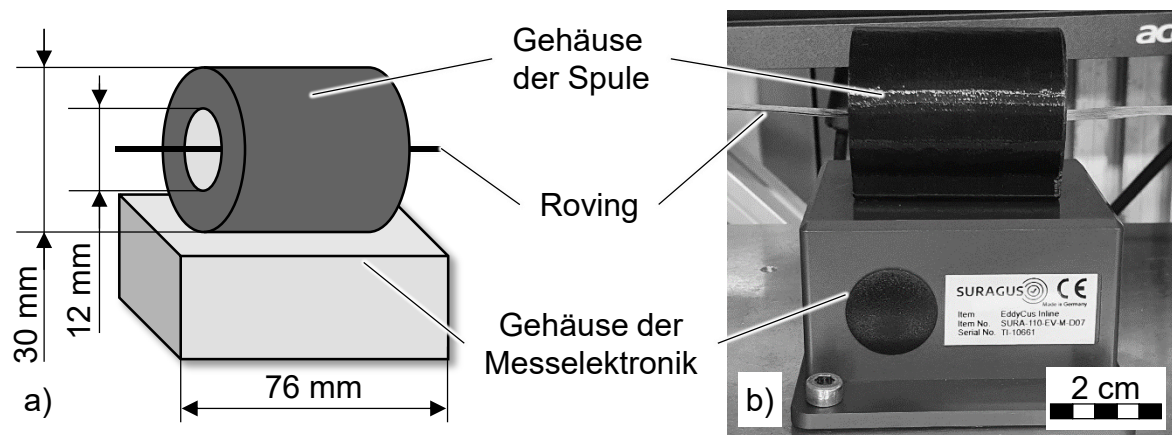


Abb. 7.5: a) Schemazeichnung und b) Bild des verwendeten Wirbelstromsensors

7.2.3 Manipulation der Faserschädigung

Zur Manipulation der Faserschädigung im Labormaßstab wird ein Schädigungsmodul entwickelt, über das gezielt und reproduzierbar verschiedene Niveaus an Faserschädigung in einen CF-Roving eingebracht werden. Hierdurch wird bei

¹² Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 12/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

anschließender Vermessung des geschädigten Rovings mittels Wirbelstrom das resultierende Signal mit dem Grad der Faserschädigung korreliert und der Wirbelstromsensor im Labormaßstab validiert. Aus der Messsystemanalyse zur Wahl eines geeigneten Prototyps des Wirbelstromsensors (Kap. 7.2.2) ist bekannt, dass Sensoren vom Typ Durchlaufsensor sensitiv auf abstehende Filamente reagieren. Folglich ist bei der Entwicklung des Schädigungsmoduls zu berücksichtigen, dass Faserschädigung ohne abstehende Filamente erzeugt wird. Dementsprechend wird auf eine abrasive Faserschädigung (z.B. durch raue Oberflächen) verzichtet und stattdessen die Quersprödigkeit der CF ausgenutzt und Faserschädigung durch Brechen der Filamente über enge Umlenkradien realisiert.

Dem Konstruktionsprozess nach VDI-Richtlinie 2221 folgend, werden über einen morphologischen Kasten verschiedene Teillösungen zu zwei Varianten des Schädigungsmoduls kombiniert und gefertigt [VDI19a; VDI19b]. Variante 1 (Abb. 7.6 a) realisiert die Schädigung über eine S-förmige Umlenkung der CF über Umlenkstifte, bei denen der Grad der Schädigung über den Umschlingungswinkel und den Durchmesser der Umlenkstifte eingestellt wird. Variante 1 erzeugt eine kontinuierliche Schädigung. Bei Variante 2 (Abb. 7.6 b) wird der Grad der Schädigung über eine wechselbare, scharfe Spitze eingestellt, deren Grundkörper durch die vorbeigeführte CF mitgedreht wird. Variante 2 erzeugt eine periodische Schädigung.

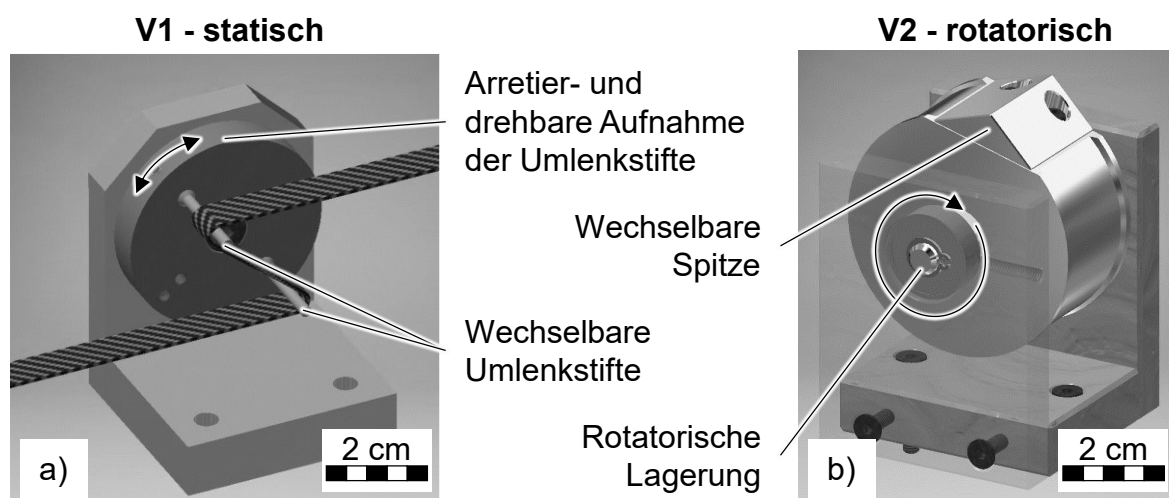


Abb. 7.6: Gefertigte Varianten des Schädigungsmoduls: a) V1 und b) V2

Beide Varianten werden nacheinander in den tribologischen Prüfstand ITA-Tribometer integriert und die resultierende Schädigung mittels Wirbelstrom gemessen. Da in Vorversuchen gezeigt wurde, dass eine Faserschädigung zu einem Ausschlag im Messsignal führt (Kap. 5.7), wird die Stärke des Ausschlags im Messsignal zur Bewertung der realisierbaren Faserschädigung herangezogen. Abb. 7.7 zeigt den Messschrieb des statischen Schädigungsmoduls V1.

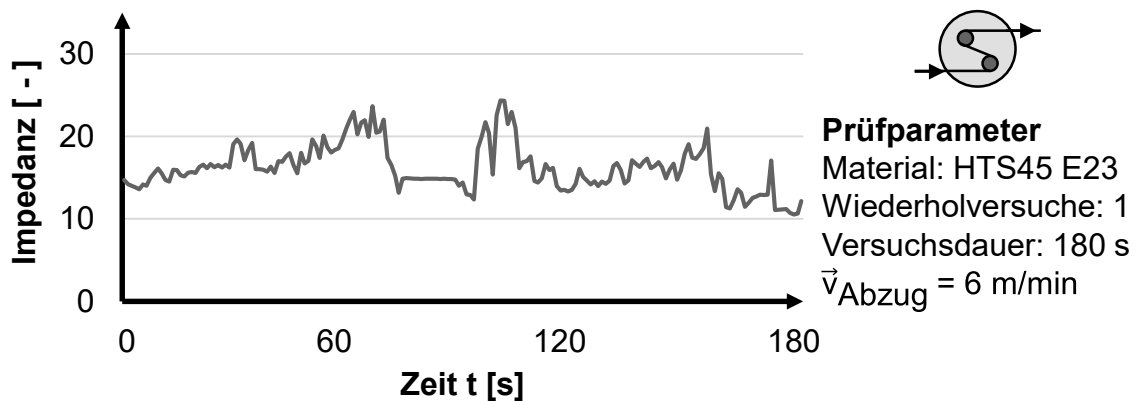


Abb. 7.7: Messschriebe des statischen Schädigungsmoduls V1

Das statische Schädigungsmodul (Abb. 7.7) führt zu höheren Ausschlägen im Messsignal des Wirbelstromsensors im Vergleich zum rotatorischen Schädigungsmodul (Abb. 7.8).

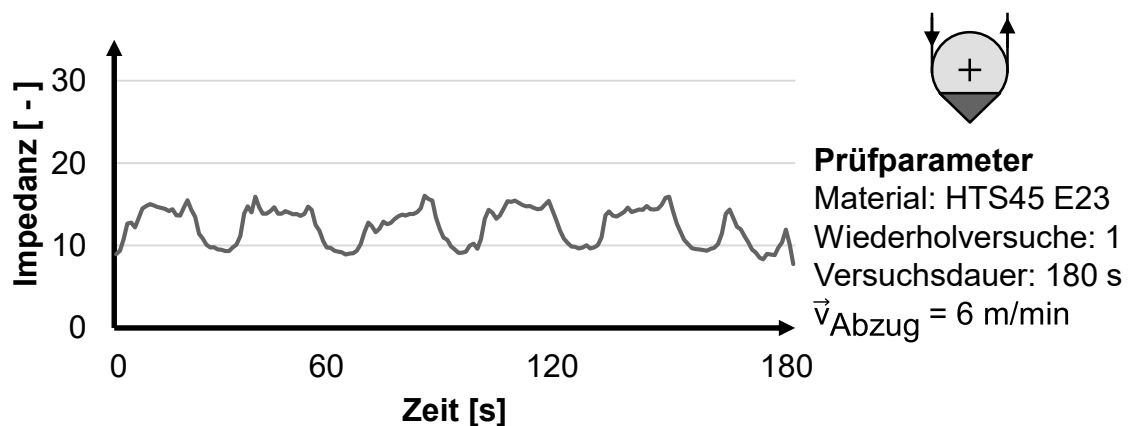


Abb. 7.8: Messschriebe des rotatorischen Schädigungsmoduls V2

Im weiteren Verlauf wird daher das statische Schädigungsmodul V1 verwendet (Abb. 7.9).

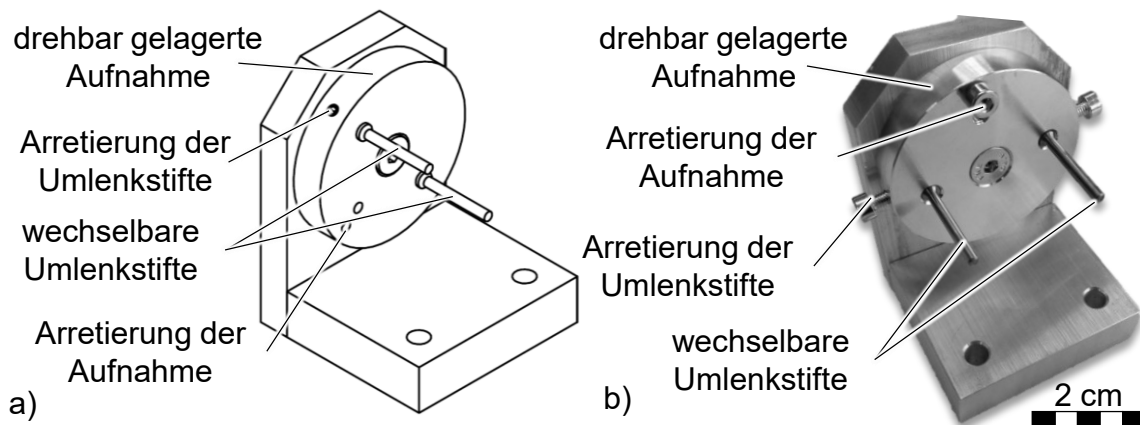


Abb. 7.9: a) Technische Zeichnung, b) Bild des Schädigungsmoduls V1

Die Umlenkstifte werden aus Edelstahl gefertigt, der neben Topocrom-Beschichtungen der Standardwerkstoff für fadenkontaktierende Elemente in der CF-Herstellung und -Verarbeitung ist. Die Oberfläche wird auf einen Mittenrauwert von $R_a \approx 1,02 \mu\text{m}$ poliert, um abstehende Filamente über abrasive Schädigung durch Rauheitsspitzen zu vermeiden. Durch das Umlenken des CF-Rovings über die Umlenkstifte unter Zugspannung können Spreizeffekte auftreten, die im Folgenden in Abhängigkeit von dem Schädigungsgrad untersucht werden. Dazu werden die Breitenschwankung (Breite) und der laterale Lageversatz (Center) des CF-Rovings relativ zum Wirbelstromsensor bei Variation des Schädigungsgrades über eine Kamera inline aufgezeichnet (Abb. 7.10).

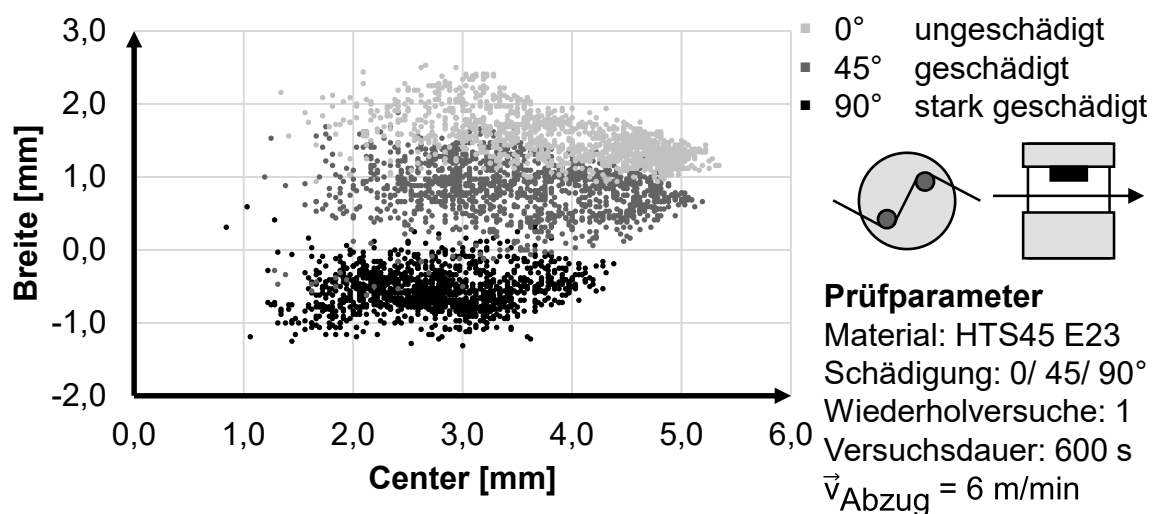


Abb. 7.10: Breitenschwankung (Breite) und lateraler Lageversatz (Center) des CF-Rovings relativ zum Wirbelstromsensor bei Schädigung

Es zeigt sich, dass die drei Schädigungsgrade $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ über das Kameramodul anhand der Messwerte Breite und Center optisch unterschieden werden können. Zur Verifizierung wird der Korrelationskoeffizient ρ zwischen Breite, Center und gemessener Magnitude betrachtet. Der Korrelationskoeffizient beschreibt die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Zufallsvariablen und liegt zwischen $-1 \leq \rho \leq 1$ [DC22]. Hierbei bedeutet $\rho = -1$ einen perfekt linearen, antiproportionalen Zusammenhang und $\rho = 1$ einen perfekt linearen, proportionalen Zusammenhang, während ein ρ gegen Null keinen Zusammenhang indiziert [DC22]. Tab. 7.2 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Messwerten Breite und Center des Kameramoduls und der Magnitude als Messwert des Wirbelstromsensors.

Tab. 7.2: Berechnung des Korrelationskoeffizienten zur Identifikation von Scheinkorrelationen [Lan22]

Zufallsvariable	Korrelationskoeffizient		
	Gemessene Magnitude [Ω]	Breite [mm]	Center [mm]
Gemessene Magnitude [Ω]	1	0,41	0,34
Breite [mm]	0,41	1	0,14
Center [mm]	0,34	0,14	1

Es zeigt sich ein starker Zusammenhang zwischen der gemessenen Magnitude und den geometrischen Daten Breite und Center. Bei der Analyse von im Labor mittels Schädigungsmodul manipulierter Messdaten existiert somit eine Scheinkorrelation zwischen Breite, Center und der gemessenen Magnitude bzw. der über Wirbelstrom gemessenen Qualität des CF-Rovings. Folglich dürfen die Messwerte Breite und Center nicht bei der Klassifizierung des Schädigungsgrades von im Labor manipultierten Messdaten verwendet werden, da diese direkt durch das Schädigungsmodul beeinflusst werden [May21].

7.2.4 Adaption des Prüfstands

Das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren reagiert, bedingt durch die hohe Prüffrequenz, äußerst sensibel auf kleinste Änderungen des Lift-Offs (vgl. Kap. 5.3.4), d.h. auf kleinste Abstandsänderungen zwischen Spule und Prüfkörper [IM19]. Übertragen auf die hier verwendeten Durchlaufsensoren bedeutet

dies hohe Impedanzänderungen als Reaktion auf kleinste Lageänderungen des CF-Rovings im Spuleninneren. Dies konnte bereits bei der Auswahl eines geeigneten Prototyps (Kap. 7.2.2) gezeigt werden, da einige Prototypen empfindlich auf die Positionsgenauigkeit der Referenzfehler reagierten oder sehr sensitiv für abstehende Filamente waren. Die Ursache für die Lageempfindlichkeit des verwendeten Sensortyps resultiert aus der Verteilung des Magnetfelds im Innern der Spule. Während ideale Zylinderspulen ein über dem Radius konstantes Magnetfeld aufweisen [TMW15], zeigt die Simulation des Magnetfelds einer realen Spule eine Zunahme der magnetischen Feldstärke vom Zentrum zum Rand der Spule (Abb. 7.11).¹³

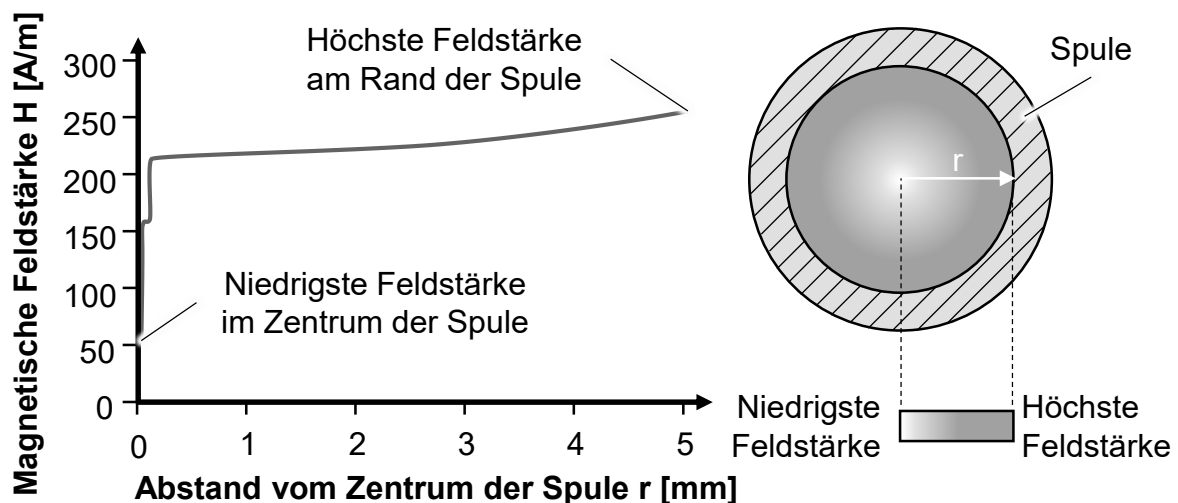


Abb. 7.11: Simulation des Verlaufs der magnetischen Feldstärke H als Funktion des Radius r

Folglich führt leitfähiges Material am Rand der Spule zu einem stärkeren Messausschlag als leitfähiges Material im Zentrum der Spule. Im Vergleich zu einem zentrierten Roving (Abb. 7.12 a) zeigen sich abstehende Filamente (Abb. 7.12 b) bereits durch hohe Impedanzänderungen, während aus der Mitte ausgeleitete Rovings (Abb. 7.12 c) noch höhere Impedanzänderungen hervorrufen.

¹³ Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Testverfahrens zur Online-Qualitätskontrolle von elektrisch leitfähigen Fasermaterialien – LeiFaTest“ (5/2015 – 4/2017) der AiF Projekt GmbH, ITA, Texttechno Herbert Sein GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, SURAGUS GmbH, Dresden

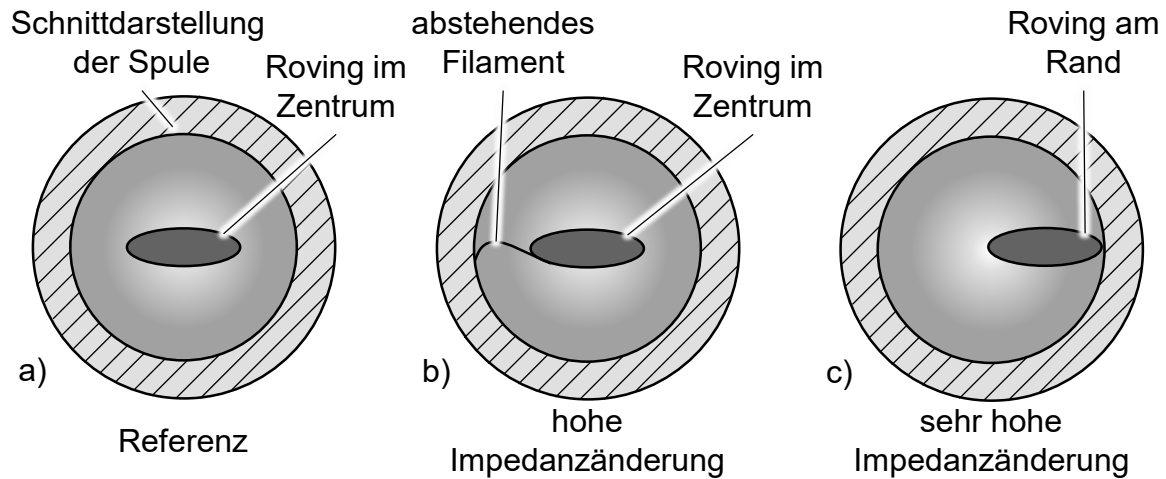


Abb. 7.12: Impedanzänderung zur a) Referenz bei b) abstehendem Filament und c) aus dem Zentrum ausgelenkten Roving

Daher ist ein Fadenlauf mit einer ortsfesten Positionierung des Rovings im Sensor notwendig, um ein niedriges Messrauschen zu gewährleisten. Ein Nullversuch zeigt, dass im Messsignal eine Periodizität mit einer Schwingungsdauer von $T \approx 30$ s auftritt (Abb. 7.13). Im Nullversuch wird ein CF-Roving vom Typ Tenax HTS40 F13 (12k, 800 tex) der Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, verwendet, der in der Luft- und Raumfahrt- sowie der Automobilindustrie weit verbreitet ist.

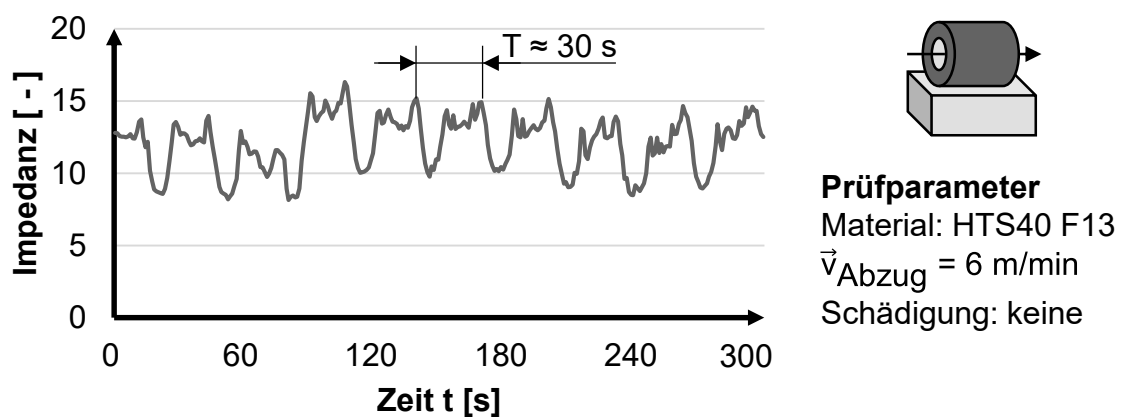


Abb. 7.13: Messschrieb des Nullversuchs

Die Schwingungsdauer von $T = 30$ s der beobachteten Periodizität entspricht der Zeit, die der Roving beim Abzug von der Spule für eine Changierung benö-

tigt. Die Periodizität im Messsignal wird damit auf die Changierung zurückgeführt, die sich als Schwingung über den gesamten Prüfstand fortsetzt und zu einer periodischen Lageänderungen des Rovings innerhalb des Sensors führt. Um einer Lageänderung des Rovings in der Messstrecke entgegenzuwirken, wird das Fadenauge am Anfang der Messstrecke mit $\varnothing = 15$ mm durch ein Fadenauge mit $\varnothing = 5$ mm ersetzt, um den Roving lateral zu führen. Abb. 7.14 zeigt den resultierenden Messschrieb für den Vergleich beider Fadenaugen.

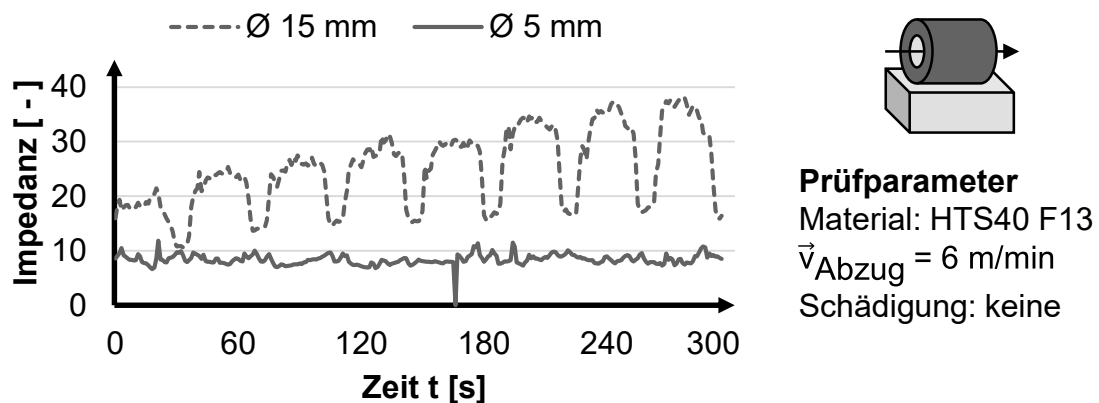


Abb. 7.14: Impedanzverläufe bei Verwendung verschiedener Fadenaugen

Durch den Einsatz des 5 mm-Fadenauges wird die Standardabweichung um 87 % gegenüber dem 15 mm-Fadenauge reduziert. Zudem wird der Mittelwert ebenfalls reduziert und die Drift im Messsignal vermindert. Um den Einfluss der Changierung weiter zu kompensieren, wird die freie Weglänge zwischen Spule und erster Umlenkung erhöht, sodass der Einlaufwinkel des CF-Rovings in die erste Umlenkung reduziert wird (Abb. 7.15).

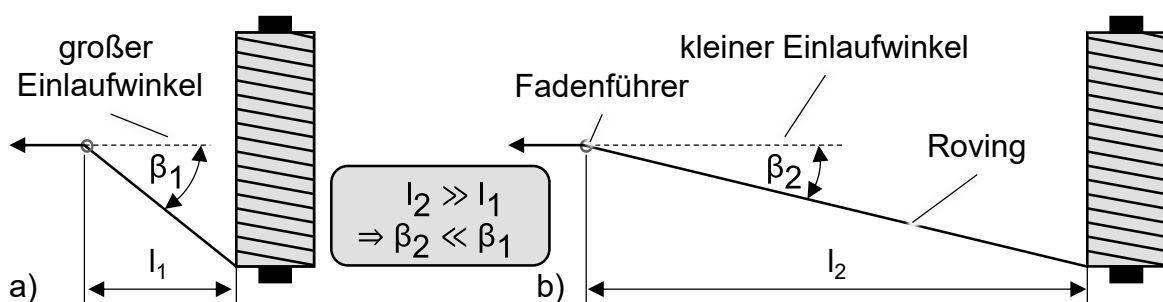


Abb. 7.15: Einlaufwinkels bei a) niedriger und b) hoher freier Weglänge

Durch Verlagerung der Spule und die Verwendung weiterer Umlenkungen wird die freie Weglänge zwischen CF-Spule und erstem Fadenleitelement von ca. 0,8 m auf 3,1 m erhöht und der Einlaufwinkel entsprechend reduziert. Abb. 7.16 zeigt die gemessenen Impedanzen für den Nullversuch im Vergleich zum adaptierten Fadenlauf. Der adaptierte Fadenlauf reduziert durch die freie Weglänge von 3,1 m und eine engere, laterale Führung durch ein 5 mm Fadenauge die Schwingung des Rovings im Prüfstand und die daraus resultierenden Schwankungen der gemessenen Impedanzen.

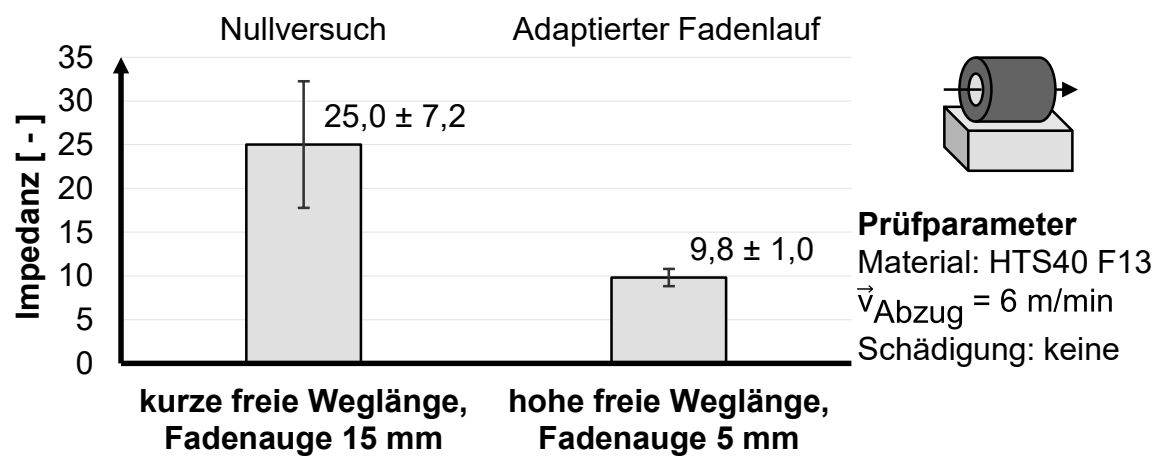


Abb. 7.16: Impedanzen für ursprünglichen und adaptierten Fadenlauf

Im Vergleich zum Nullversuch werden durch den adaptierten Fadenlauf der Mittelwert der gemessenen Impedanz um 61 % und die Standardabweichung um 87 % reduziert. Die enge, laterale Führung des 5 mm-Fadenauges führt zu einem ruhigeren Fadenlauf und reduziert das Messrauschen und damit auch die gemessene Standardabweichung. Gleichzeitig bewirkt die enge, laterale Führung eine Reduktion im Mittelwert der gemessenen Impedanz, da der stabilere Fadenlauf zu einer Positionierung des Rovings in der Sensormitte führt, woraus eine niedrigere, gemessene Impedanz resultiert. Die höhere, freie Weglänge unterstützt den Effekt des stabileren Fadenlaufs in der Sensormitte und führt zu einer weiteren Reduktion der gemessenen Impedanz. Die Reduktion von Mittelwert und Standardabweichung entspricht somit den Erwartungen und wird zur Bewertung des adaptierten Fadenlaufs herangezogen. Der adaptierte Fadenlauf wird als zielführend für die Untersuchung des Einflusses von Faserschädigung auf das Impedanzsignal eingestuft und im Folgenden verwendet.

7.3 Übersicht der wichtigsten Entwicklungsschritte

In diesem Unterkapitel wird eine Übersicht über die wichtigsten, technischen Entwicklungsschritte des multimodalen Sensorsystems gemäß des adaptierten Deming-Zyklus (Abb. 7.2) gegeben. Tab. 7.3 gibt einen Überblick über die Generationen des Sensorsystems unter Berücksichtigung deren Eigenschaften und umgesetzten Verbesserungsmaßnahmen.

Tab. 7.3: Übersicht der Sensorgenerationen mit relevanten Eigenschaften und abgeleiteten Verbesserungsmaßnahmen

Generation	Eigenschaften	Verbesserungsmaßnahme	Kap.
1. Prototyp erster Durchlauf Deming-Zyklus	High-Performance-Messelektronik	Adaption auf ARM-basierte Einplatinen-Computer	-
		Druckluftmodul zur Drift-Kompensation	7.4
		Kameramodul zur Quantifizierung der Position	7.6
2. Zwischenstufe zweiter Durchlauf Deming-Zyklus	Medium-Budget-Messelektronik, Druckluftmodul, Kameramodul	Positionsbereinigung anhand der Kameradaten	7.6
		Verwendung eines PTFE-Inlays zur Verhinderung von Ablagerungen im Sensor	7.5
3 Demonstrator dritter Durchlauf Deming-Zyklus	Medium-Budget-Messelektronik, Druckluftmodul, Kameramodul, PTFE-Inlay	Auswahl reduzierter Daten für die Regressionsanalyse	7.6.1
		Regressionsanalyse zur Auswahl optimaler Parameter zur Positionsbereinigung	7.6.2, 7.6.3
		Nachweis der Eignung des multimodalen Messsystems zur Inline-Qualitätssicherung von CF-Rovings	7.6.4, 7.6.5

Der Prototyp des ersten Durchlaufs des Deming-Zyklus umfasst eine ESP32-Plattform der Messelektronik und ein Spulendesign auf Basis der Vorversuche (Kap. 7.2.2). Für die Plattform der Messelektronik stehen drei Varianten in verschiedenen Preisklassen zur Verfügung, die als Low-Budget-Variante einen Arduino, als Medium-Budget-Variante eine ARM-Chip-Architektur und als High-Performance-Variante eine ESP32-Plattform vorsehen. Da sich über die High-Performance-Variante keine Steigerung der Messfähigkeit gegenüber der Medium-Budget-Variante realisieren lässt, wird für die folgende Sensorgeneration

die Medium-Budget-Variante verwendet. Zusätzlich werden ein Druckluftmodul zur Inline-Reinigung des Sensors und damit zur Drift-Kompensation des Messsignals vorgesehen sowie ein Kameramodul zur kameraoptischen Datenbereinigung der gemessenen Impedanz.¹⁴

Die Zwischenstufe des zweiten Durchlaufs des Deming-Zyklus umfasst die Medium-Budget-Variante der Messelektronik sowie ein Druckluft- und ein Kameramodul. Als Verbesserungsmaßnahme werden eine Positionsbereinigung des Messsignals anhand der Kameradaten abgeleitet sowie ein zusätzliches PTFE-Inlay, um die Ablagerungen von CF-Fragmenten im Wirbelstromsensor weiter zu reduzieren.

Der Demonstrator des dritten Durchlaufs des Deming-Zyklus umfasst unverändert die Medium-Budget-Variante der Messelektronik sowie ein Druckluftmodul mit zusätzlichem PTFE-Inlay und ein Kameramodul. In diesem Zyklus erfolgt die Regressionsanalyse zur kameraoptischen Datenbereinigung des Messsignals unter Auswahl reduzierter Daten und optimaler Regressionsparameter zur Positionsbereinigung. Abschließend erfolgt der Nachweis der Eignung des multimodalen Sensorsystems zur Inline-Klassifizierung der Qualität von CF-Rovings.

7.4 Entwicklung einer Inline-Reinigung mittels Druckluftmodul

Bei der Verwendung des Wirbelstromverfahrens in CF-kontaminierten Umgebungen kann die Ablagerung von elektrisch leitfähigen CF-Stäuben und Fragmenten im Wirkbereich des Sensor das Messsignal verfälschen [IM19; HSP+15]. Elektrisch leitfähige Ablagerungen über die Zeit äußern sich durch einen Drift im Messsignal. Folglich muss der Sensor einerseits dicht gegenüber leitfähigen Stäuben sein, um die Funktionsfähigkeit zu erhalten [HSP+15]. Der verwendete Wirbelstromsensor ist daher in der Schutzklasse (International Protection) IP65 ausgeführt, sodass der Sensor staub- und strahlwasserdicht

¹⁴ Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 12/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

ist [ISO13]. Andererseits muss der Sensor robust gegenüber Ablagerungen sein, sodass das Messsignal nicht durch leitfähige Ablagerungen verfälscht wird. Abb. 7.17 zeigt die Messschriebe drei verschiedener Schädigungsgrade (0° , 90° und 175°) über einer Versuchsdauer von 10 min. Zusätzlich werden die zugehörigen Ausgleichsgraden und deren lineare Regression in der Form $y = mx + b$ dargestellt, um den Drift als Trend im Messsignal anhand der Steigung m zu visualisieren.

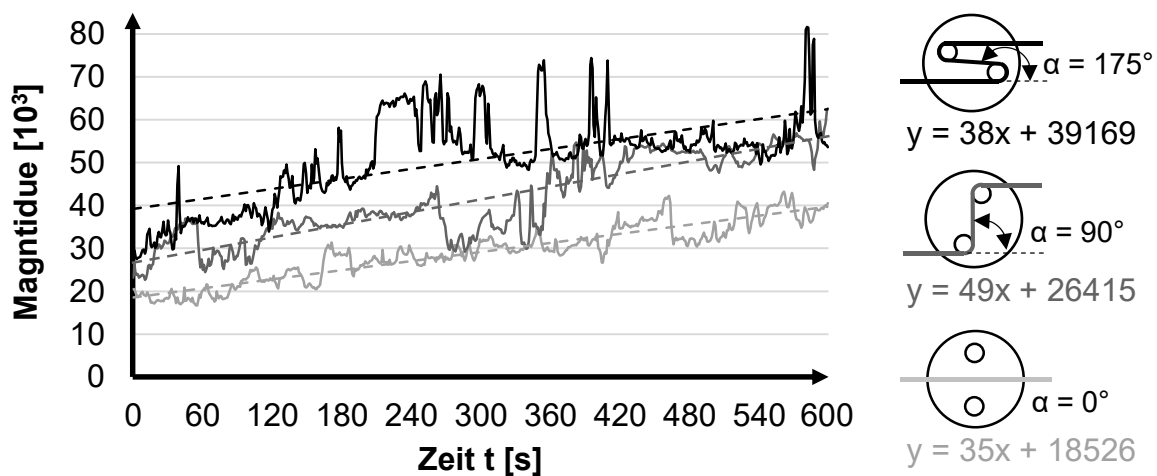


Abb. 7.17: Drift im Messsignal bei verschiedenen Schädigungsgraden

Die unterschiedlichen Niveaus der Rohdaten und der zugehörigen Trendlinien bei verschiedenen Schädigungsgraden entsprechen den Erwartungen und sind ein Indiz für die unterschiedlichen Niveaus der eingebrachten Schädigungen. Die Zunahme der Magnitude entspricht nicht den Erwartungen, da unter konstanten Versuchsbedingungen bzw. mit konstanter Schädigung gemessen und dementsprechend eine Konstante (Steigung $m = 0$) als Ausgleichsgrade erwartet wird. Dementgegen zeigen die Ausgleichsgraden der verschiedenen Schädigungsgrade Steigungen $35 \geq m \geq 49$ und damit eine deutliche Zunahme der gemessenen Magnitude über der Zeit. Diese Zunahme wird auf eine Ablagerung von gebrochenen CF-Fragmenten und Stäuben zurückgeführt, die sich im Inneren des Sensors ablagern. Da sich so mit der Zeit zunehmend leitfähiges Material im Sensor ansammelt, führt dies zu einer Zunahme der gemessenen Magnitude und damit zu einer Drift im Messsignal.

Um die Drift zu kompensieren, muss ein Ansammeln von gebrochenen CF-Fragmenten im Innern des Sensors unterdrückt werden. Zu diesem Zweck werden zwei Varianten eines Druckluftmoduls (DLM) konstruiert, das den Sensor inline und im laufenden Betrieb reinigt. Druckluft wird als Reinigungsmechanismus gewählt, da Druckluftanschlüsse bei CF-Herstellern und Verarbeitern in der Industrie weit verbreitet sind. Zwei Varianten der Druckluftmodule werden konstruiert und gemäß dem agilen Ansatz zur Entwicklung des Messsystems mit Methoden des Rapid Prototyping gefertigt. Zum Einsatz kommt das Fused Deposition Modeling (FDM)-Verfahren, bei dem ein polymeres Monofilament aufgeschmolzen und strangförmig abgelegt wird. Abb. 7.18 a) und b) zeigen die CAD-Modelle zweier Varianten an untersuchten Druckluftmodulen, die auf Basis des Biopolymers Polylactid (PLA) gefertigt werden.

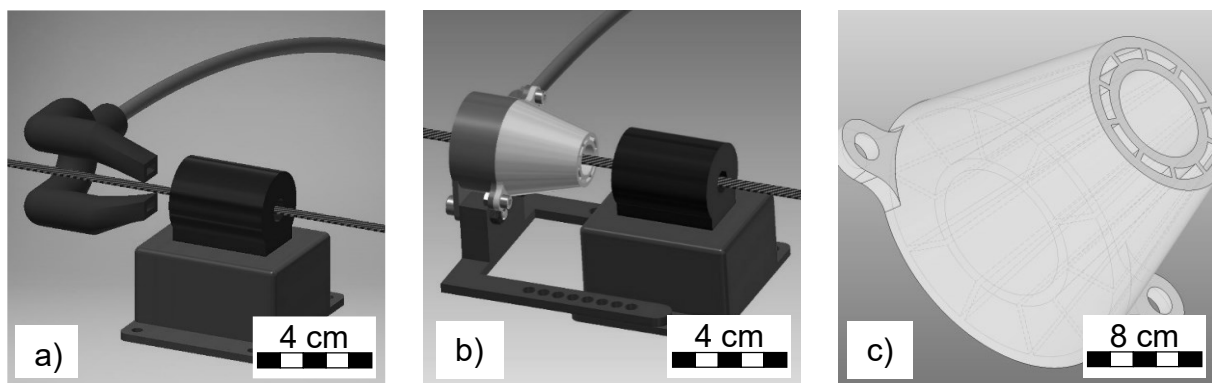


Abb. 7.18: Druckluftmodule (DLM) zur Inline-Reinigung des Sensors: a) DLM 1, b) DLM 2 und c) Detailansicht der Düse des DLM 2

Abb. 7.18 a) zeigt das DLM 1, das über einen rechteckigen Düsenquerschnitt verfügt und gebrochene Filamente flächig über und unter dem Roving entfernt. Abb. 7.18 b) zeigt das DLM 2, das über einen ringförmigen Düsenquerschnitt verfügt und damit Ablagerungen über den gesamten Umfang des Wirbelstromsensors entfernt. Das Funktionsprinzip des DLM 2 ist an das Pinolenwerkzeug des Extrusionsblasformens angelehnt, bei dem eine Kunststoffschmelze schlauchförmig über eine Düse mit ringförmigem Querschnitt extrudiert wird [Mic10]. Die beiden Druckluftmodule unterscheiden sich damit sowohl hinsichtlich der Düsengeometrie als auch im Düsenquerschnitt. DLM 1 verfügt im Vergleich zu DLM 2 über einen niedrigeren Düsenquerschnitt und bei glei-

chem Eingangsdruck über eine höhere Strömungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt und damit über höhere dynamische Drücke. Während höhere dynamische Drücke voraussichtlich besser zur Reinigung geeignet sind, besteht die Gefahr einer Schwingungsanregung des Rovings und einer damit verbundenen Störgröße auf das Messsignal. Abb. 7.19 zeigt die Auswertung einer Versuchsreihe zum Vergleich der beiden DLMs bei einem Eingangsdruck von $p_{\text{ein}} = 6 \text{ bar}$.

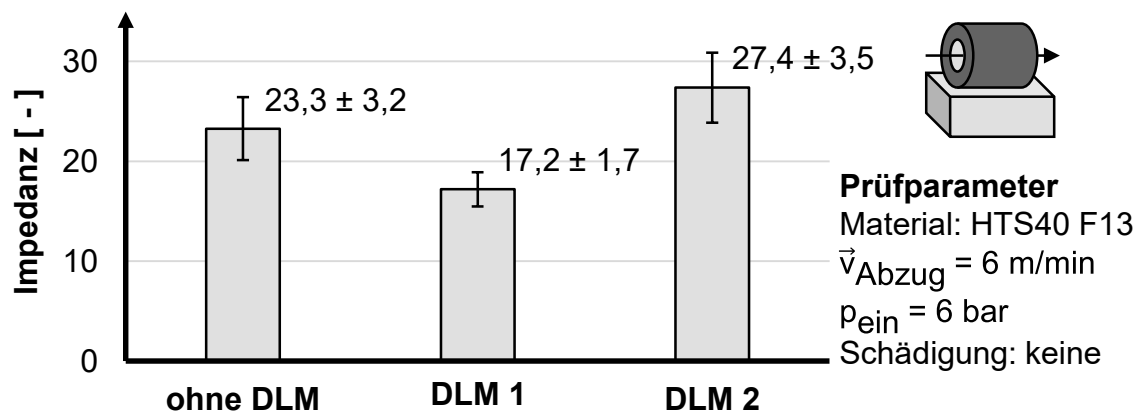


Abb. 7.19: Vergleich der Druckluftmodule (DLM) zur Drift-Kompensation

Im Vergleich zu einer Messung ohne Druckluftmodul weist DLM 1 einen niedrigeren Mittelwert über der gesamten Versuchsdauer auf. Da zunehmende Ablagerungen eine Drift zu höheren Impedanzen bewirken (Abb. 7.17), wird auf eine Reduktion der Ablagerung von CF-Fragmenten im Sensor durch DLM 1 geschlossen. Da zudem die Standardabweichung bei DLM 1 geringer ist als bei einer Messung ohne Druckluftmodul, scheint der höhere dynamische Druck am Düsenaustritt den Fadenlauf im Sensor nicht durch Schwingungsanregung zu stören, sondern zu stabilisieren. Im Gegensatz dazu zeigt DLM 2 einen höheren Mittelwert bei einer annähernd gleichen Standardabweichung im Vergleich zur Messung ohne Druckluftmodul. Folglich ist DLM 2 nicht geeignet, Ablagerungen von CF-Fragmenten im Sensor zu verhindern. Im weiteren Verlauf wird daher ab der zweiten Sensorgeneration das DLM 1 verwendet (Tab. 7.3).

Eine Kombination des DLM 1 mit einer Absaugung, bei der ein Unterdruck über eine Venturi-Düse erzeugt wird und die ebenfalls per Druckluft betrieben wird, zeigt keine weitere Verbesserung. Auch eine Reinigung mit gepulster Druckluft, bei der die Druckluftzufuhr des DLM 1 über ein schaltbares Ventil und einen

Arduino gesteuert wird, reduziert Mittelwert oder Standardabweichung nicht weiter. Im weiteren Verlauf wird daher DLM 1 mit konstanter Druckluft ohne zusätzliche Absaugung eingesetzt.

7.5 Verhinderung von Faserablagerungen mittels PTFE-Inlay

Da es sich bei dem verwendeten Wirbelstromsensor um einen Prototyp handelt, der gemäß dem agilen Entwicklungsansatz des Messsystems ebenfalls im Rapid Prototyping hergestellt wurde, ist die Topografie der Sensorinnenfläche den Verfahrensgrenzen entsprechend rau. Abstehende Filamente oder CF-Fragmente verfangen sich trotz Druckluftmodul in den Rauheiten und verbleiben im Sensor. Daher wird zusätzlich zum Druckluftmodul (Kap. 7.4) ein Inlay mit einer glatten Oberfläche in den Sensor eingesetzt. Als Material für das Inlay wird Polytetrafluorethylen (PTFE) gewählt, da es unter allen Kunststoffen die besten Antihafteigenschaften mit den niedrigsten dynamischen und statischen Reibkoeffizienten aufweist [BBO+13]. Die Inlays werden aus PTFE-Schläuchen der Fa. Bohlender GmbH, Grünsfeld, zugeschnitten und die Schnittkanten geschliffen. Es werden sowohl Inlays aus einem konventionellen PTFE-Schlauch, als auch aus einem antistatischen PTFE-Schlauch mit einer Leitfähigkeit von 10^6 Ohm getestet [Boh22a; Boh22a]. Abb. 7.20 zeigt Mittelwert und Standardabweichung von je fünf Wiederholversuchen, die mit einem normalen und einem antistatischen PTFE-Inlay bei einem Schädigungsgrad von 90° durchgeführt wurden.

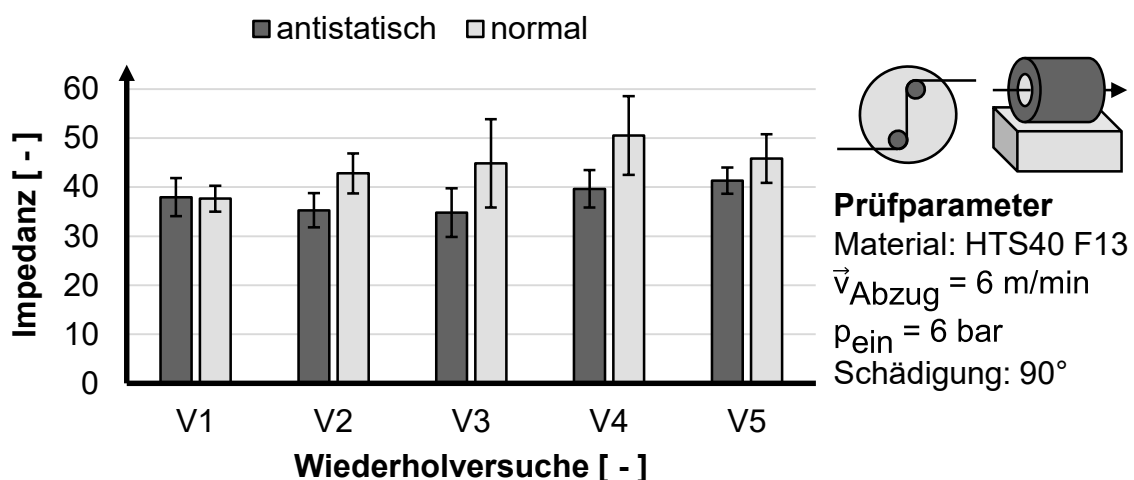


Abb. 7.20: Wiederholversuche zur Drift-Kompensation mittels Inlay

Im Vergleich der beiden Inlays führt das antistatische Inlay zu gleichmäßigeren Mittelwerten zwischen den Wiederholversuchen und zu einer durchgängig geringeren Standardabweichung. Die geringere Standardabweichung ist ein Indikator für eine niedrigere Schwankung der Messwerte und damit eine geringere Drift über die Versuchsdauer bei Verwendung des antistatischen PTFE-Inlays. Die Analyse der Messdatenverläufe über der Zeit bestätigt diese Annahme. Im weiteren Verlauf wird daher aber der dritten Generation des Sensorsystems (Tab. 7.4) das antistatische PTFE-Inlay in Kombination mit dem DLM 1 verwendet (Abb. 7.21). PTFE-Inlay und DLM 1 haben eine Verhinderung von CF-Ablagerungen im Innern des Sensors und eine Drift-Kompensation zum Ziel.

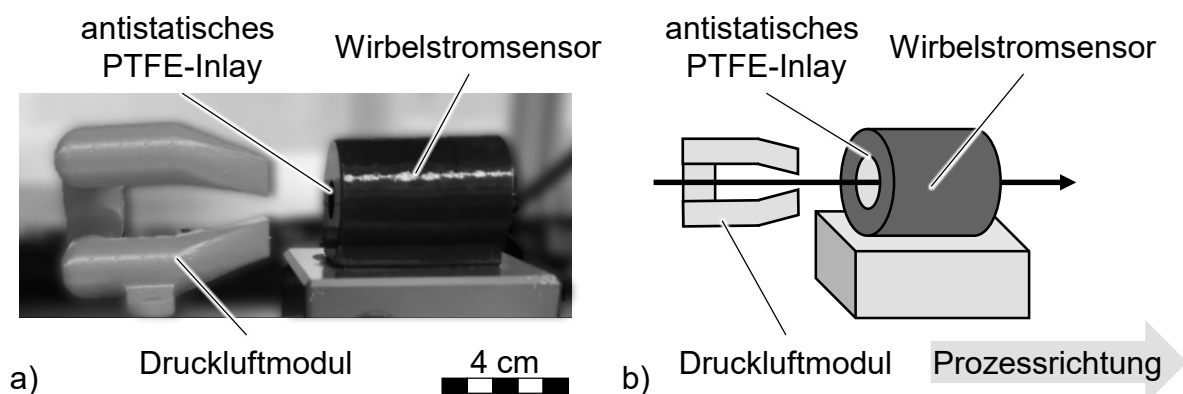


Abb. 7.21: Final verwendetes PTFE-Inlay in Kombination mit dem Druckluftmodul 1 a) Bild und b) schematische Darstellung

7.6 Kameraoptische Datenbereinigung

Aus den Voruntersuchungen der Prototypen verschiedener Spulengeometrien (Kap. 7.2.2) sowie aus der Adaption des Fadenlaufes zur Reduktion des Messrauschens (Kap. 7.2.4) ist bekannt, dass das Wirbelstromsignal äußerst sensitiv auf Lageänderungen des Rovings im Wirbelstromsensor reagiert. Da eine Lageänderung des Rovings im Herstellungs- oder Verarbeitungsprozess nicht ausgeschlossen werden kann, muss dies im laufenden Prozess kompensiert werden, um die Inline-Fähigkeit des Messsystems zu erhalten. Zu diesem Zweck wird der Wirbelstromsensor um ein Kameramodul zu einem multimodalen Messsystem erweitert (Abb. 7.22), sodass auch geometrische Parameter

des CF-Rovings, wie Lageänderungen und Breitschwankungen, optisch erfasst und mittels digitaler Bildverarbeitung quantifiziert werden können.

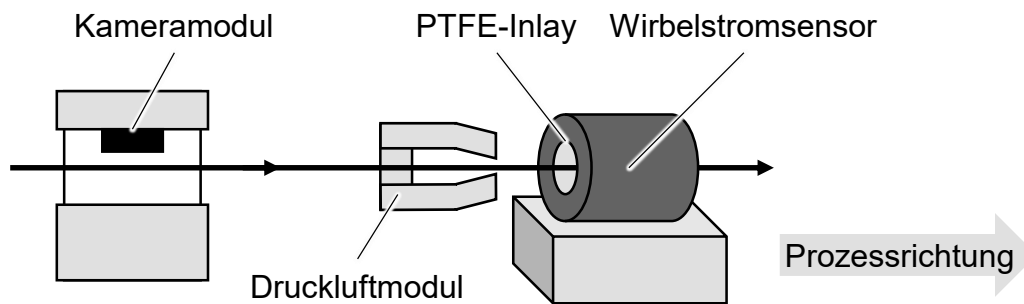


Abb. 7.22: Schematische Darstellung des verwendeten Messaufbaus

Anhand der optisch bestimmten, geometrischen Messwerte wird eine theoretische Magnitude Mag_T approximiert, die dem Sollwert eines ungeschädigten CF-Rovings in Abhängigkeit von den geometrischen Daten entspricht. Anschließend wird die theoretische Magnitude Mag_T mit der gemessenen Magnitude Mag_G verrechnet, um die gemessene Magnitude um die Geometrieinflüsse zu bereinigen. Der resultierende Messwert wird als bereinigte Magnitude Mag_B bezeichnet und stellt die Magnitude des CF-Rovings in Abhängigkeit von der Faserschädigung dar, da die Geometrieinflüsse kompensiert werden. Es gilt:

$$Mag_B = Mag_G - Mag_T \quad (7.2)$$

mit:

Mag_B	Bereinigte Magnitude	[Ω]
Mag_G	Gemessene Magnitude	[Ω]
Mag_T	Theoretische Magnitude	[Ω]

Die theoretische Magnitude wird als abhängige Variable über eine Regressionsanalyse anhand der unabhängigen Variablen des Kameramoduls gebildet. Zur Identifikation optimaler Regressionsparameter wird zunächst eine Datenvorverarbeitung vorgenommen, um ausschließlich Daten ohne Schädigung zur Bildung der Regressionsparameter zu verwenden (Kap. 7.6.1). Anschließend werden relevante Variablen anhand einer schrittweisen multiplen linearen Regression bestimmt (Kap. 7.6.2) und das lineare Modell um nichtlineare Terme erweitert (Kap. 7.6.3). Abschließend erfolgen die Bereinigung der Magnitude (Kap. 7.6.4) und eine Validierung bei randomisiert wechselnder Schädigung

(Kap. 7.6.5). Abb. 7.23 zeigt das gewählte Vorgehen zur kameraoptischen Datenbereinigung schematisch.

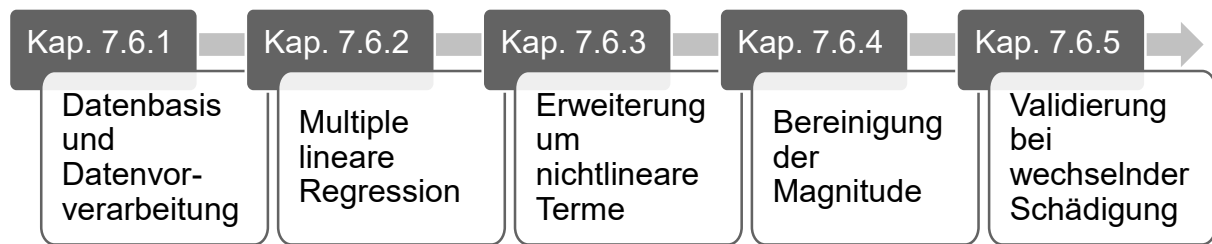


Abb. 7.23: Vorgehen zur kameraoptischen Datenbereinigung

7.6.1 Datenbasis und Datenvorverarbeitung

Mit einer Datenrate von jeweils 2 Hz werden Wirbelstrom- und Kameradaten eines CF-Rovings vom Typ Tenax HTS45 E23 aufgenommen. Die wichtigsten Messwerte des Kamerasystems werden in Abb. 7.24 grafisch dargestellt und in Tab. 7.4 definiert. Zusätzlich werden mit einer Datenrate von 10 Hz Messdaten über die Fadenzugkraft- und die Filamentbruchsensoren aufgenommen, die manuell mit der 2 Hz Datenrate des Wirbelstromsensors synchronisiert werden. Es werden drei Teilversuche mit den Schädigungsgraden $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ über einer Versuchsdauer von 10 min pro Teilversuch durchgeführt, sodass sich in Summe 360 mehrdimensionale Datensätze ergeben.

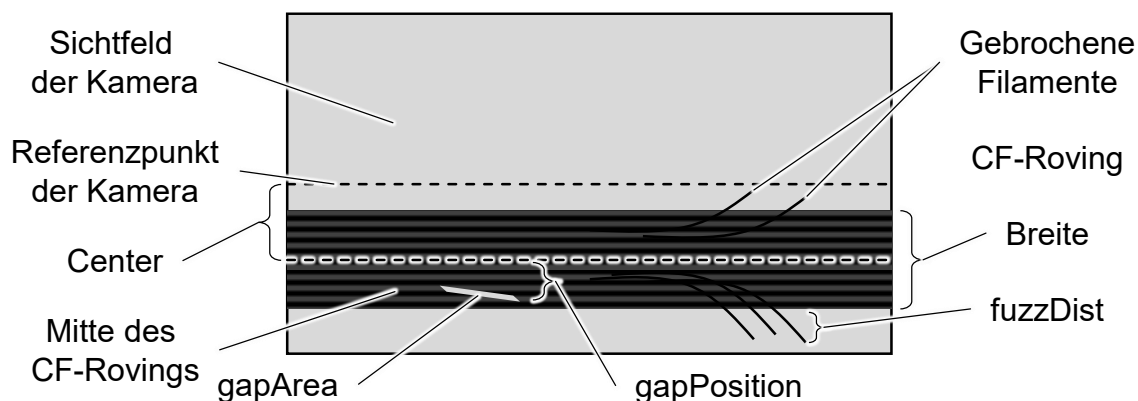


Abb. 7.24: Grafische Darstellung ausgewählter Kameradaten nach [Lan22]

Eine umfassende Übersicht der Versuchsbedingungen kann Anhang C I entnommen werden. Tab. 7.4 zeigt alle Messwerte, die mit dem multimodalen Sensorsystem und der Sensorik des ITA-Tribometers aufgezeichnet werden.

Tab. 7.4: Übersicht über alle Messwerte des multimodalen Sensorsystems und der Sensorik des ITA-Tribometer nach [Lan22; May21]

	Messwert	Definition	Einheit
Wirbelstromsensor	X	Realteil der Impedanz (Ohm'scher Anteil)	[Ω]
	Y	Imaginärteil der Impedanz (kapazitiv/induktiver Anteil)	[Ω]
Kamera-modul	Breite	Breite des CF-Rovings	[mm]
	Center	Laterale Position des CF-Rovings	[mm]
	fuzzArea	Fläche eines abstehenden Fuzz	[mm ²]
	fuzzDist	Maximaler Abstand eines Fuzz	[mm]
	fuzzStrength	Dichte eines abstehenden Fuzz	[-]
	gapArea	Fläche einer Lücke/Spreizung	[mm ²]
	gapPos	Position einer Lücke/Spreizung	[mm]
Sensorik des ITA-Tribometer	Fadenzugkraft	Fadenzugkraft des CF-Rovings	[N]
	Filamentbrüche	Anzahl gebrochener Filamente	[-]

Für das Regressionsmodell werden Messdaten ohne Schädigung verwendet. Es werden Grenzwerte für X und Y gewählt, sodass 95 % der Werte des 0°-Schädigungsgrades innerhalb der Grenzen liegen. Diese Grenzwerte liegen für die verwendeten Versuchsdaten bei $X \geq -23,4$ und $Y \geq 36,4$ (Abb. 7.25).

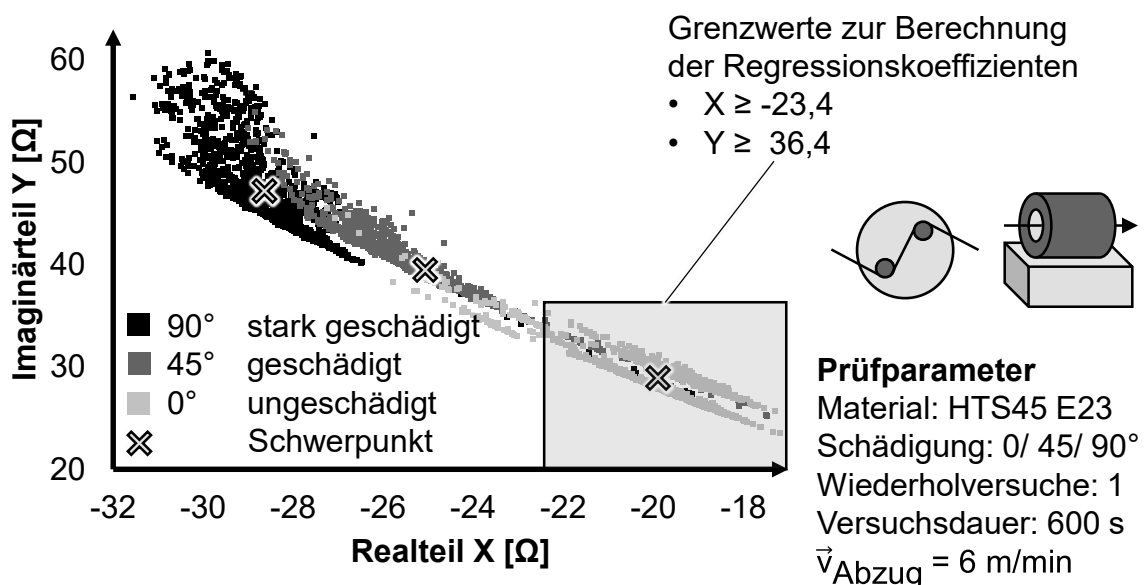


Abb. 7.25: Rohdaten der gemessenen Impedanzen und Grenzwerte zur Regressionsanalyse nach [Lan22]

Zusätzlich werden alle Messwerte der 45°- und 90°-Schadigungsgrade verwendet, die ebenfalls innerhalb dieser Grenzen liegen. Hierdurch werden auch mehrdimensionale Messwerte berücksichtigt, deren Impedanzen zwar im angestrebten Bereich liegen, die jedoch über abweichende, geometrische Daten verfügen können. Dies entspricht neben den 95 % der 0°-Daten auch 25,1 % der 45°-Daten und 7,3 % der 90°-Daten und in Summe 33,1 % aller aufgenommenen Daten bzw. 1164 mehrdimensionalen Datensätzen.

7.6.2 Multiple lineare Regression

Bei einem Modell der multiplen linearen Regression existieren p Einflussgrößen $X_1, \dots, X_p$, die als unabhängige Variablen bezeichnet werden. Die unabhängigen Variablen beschreiben auf Basis von n Beobachtungen eine Zielgröße Y , die als abhängige Variable bezeichnet wird. Übertragen auf die Berechnung der theoretischen Magnitude Mag_T als abhängige Variable Y , entsprechen die unabhängigen Variablen $X_1, \dots, X_{11}$ den $p = 11$ Messwerten des multimodalen Sensorsystems (Tab. 7.4). Das multiple, lineare Regressionsmodell wird anhand der $n = 1164$ Beobachtungen der mehrdimensionalen Datensätzen aufgestellt, die in den Grenzen $X \geq -23,4$ und $Y \geq 36,4$ liegen (Abb. 7.25). Tab. 7.5 zeigt die Adaption der allgemeinen Modellparameter für die multiple, lineare Regression der theoretischen Magnitude Mag_T . [Gro10; Lan22]

Tab. 7.5: Modellparameter der multiplen, linearen Regression zur Berechnung der theoretischen Magnitude Mag_T

Modellparameter		Transfer auf multimodales Sensorsystem	Anzahl
Abhängige Variable	Y	theoretische Magnitude Mag_T	1
Unabhängige Variablen (vgl. Tab. 7.4)	X_1	X-Wert	$p = 11$
	X_2	Y-Wert	
	X_3	Breite des CF-Rovings	
	...	...	
	X_{11}	Filamentbrüche	
Beobachtungen	n	mehrdimensionale Datensätze in den Grenzen $X \geq -23,449$ und $Y \geq 36,352$ (vgl. Abb. 7.25)	$n = 1164$

Multiple, lineare Regressionsmodelle folgen allgemein Gleichung (7.3) [Gro10]:

$$\mu_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} \quad i = 1, \dots, n \quad (7.3)$$

mit:

μ_i	Abhängige Variable	[-]
i	Laufvariable der Beobachtungen	[-]
β_0	Interzept (Regressionskoeffizient der Ordnung 0)	[-]
β_i	Regressionskoeffizient	[-]
x_{ip}	Unabhängige Variable	[-]
p	Anzahl der unabhängigen Variablen	[-]
n	Anzahl der Beobachtungen der abhängigen Variable	[-]

Es existieren $2^p - 1 = 2^{11} - 1 = 2047$ Kombinationsmöglichkeiten der unabhängigen Variablen für Modelle mit Interzept, d.h. mit Regressionskoeffizienten der Ordnung 0. Ein zufälliges Aufstellen und Bewerten aller möglichen Regressionsmodelle ist daher zeitintensiv und nicht zielführend, sodass stattdessen eine schrittweise Regression verwendet wird. [Gro10; Lan22]

Bei der schrittweisen Regression werden in Abhängigkeit vom einfachen Bestimmtheitsmaß R^2 sukzessive Variablen zum Regressionsmodell hinzugefügt oder entfernt, sodass nicht alle Kombinationen geprüft werden müssen. Das einfache Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß für den Anteil der Zielgröße, der durch die Regression beschrieben wird. Per Definition gilt $0 \leq R^2 \leq 1$, wobei für $R^2 = 1$ die Regression die Zielgröße perfekt und für $R^2 = 0$ überhaupt nicht approximiert. Bei der Verwendung des einfachen Bestimmtheitsmaßes R^2 wird jedoch die Anzahl der erklärenden unabhängigen Variablen nicht berücksichtigt. Daher wird auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß $\bar{R}^2$ betrachtet, um die Güte von Modellen mit unterschiedlicher Anzahl verwendeter, erklärender Variablen zu vergleichen. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß sinkt, wenn eine zusätzliche Variable zum Modell hinzugefügt wird, die keine oder nur geringe Erklärungskraft besitzt und das Regressionsmodell nicht verbessert. Zusätzlich wird der Omnibus-F-Test verwendet, mit dem die Relevanz der Einflussgrößen eines Regressionsmodells bewertet wird. Hierbei wird überprüft, ob ein kleineres Regressionsmodell die Zielgröße Y ausreichend gut approximiert, oder ob das Verwenden einer zusätzlichen, abhängigen Variable X_p das Modell weiter verbessert. Diese Überprüfung erfolgt anhand des F-Werts. Je größer der F-Wert und je niedriger die Signifikanz des F-Werts ist, desto relevanter ist die Einflussgröße. Für weiterführende Informationen zu Modellbildung, Bestimmtheitsmaß,

F-Wert etc. sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. [BEP+18; GSS13; Gro10; KÖ11; Lan22; Tim13]

Tab. 7.6 zeigt die schrittweise, multiple Regression, bei der mit jedem Schritt eine Messgröße des multimodalen Messsystems bzw. der Sensorik des ITA-Tribometers (vgl. Tab. 7.4) als abhängige Variable zum Modell hinzugefügt wird. Zur Bewertung der abhängigen Variablen und der Modellgüte werden neben aufsummiertem $\bar{R}^2$ und Änderung in R^2 auch die Änderung des F-Werts und die Signifikanz der Änderung des F-Werts angegeben. Nach dem Grundprinzip der schrittweisen Regression definiert die Reihenfolge in Tab. 7.6 die Relevanz der abhängigen Variablen. So verfügen relevante Variablen, die in den Schritten eins und zwei hinzugefügt werden, über eine hohe Änderung im Bestimmtheitsmaß und damit über ein hohes, summiertes korrigiertes Bestimmtheitsmaß, bei gleichzeitig hoher Änderung in F und einer niedrigen Signifikanz der Änderung in F. Für weniger relevante Variablen, die in den Schritten drei bis elf zum Modell hinzugefügt werden, sinken die Änderung in R^2 und in F, während gleichzeitig die Signifikanz der Änderung in F steigt.

Tab. 7.6: Bewertung mittels Bestimmtheitsmaß und F-Wert zur Identifikation relevanter abhängiger Variablen nach [Lan22]

Schritte der Regression		$\Sigma \bar{R}^2$ [-]	Änderung in R^2 [-]	Änderung in F [-]	Signifikanz der Änderung in F [%]
Nr.	Verwendete, unabhängige Variablen				
1	Interzept + Breite	0,169	0,169	237	$<1,1 \cdot 10^{-14}$
2	+ Center	0,250	0,082	128	$<1,1 \cdot 10^{-14}$
3	+ Fadenzugkraft hinten	0,280	0,030	49	$1,1 \cdot 10^{-9}$
4	+ Filamentbruchsensor hinten	0,304	0,024	41	$2,2 \cdot 10^{-8}$
5	+ fuzzDist	0,314	0,011	18	$2,4 \cdot 10^{-3}$
6	+ Filamentbruchsensor vorne	0,318	0,004	7	0,7
7	+ fuzzStrength	0,320	0,003	5	2,2
8	+ fuzzArea	0,322	0,002	3	6,2
9	+ Fadenzugkraft vorne	0,322	0,001	2	21,8
10	+ gapArea	0,322	0,000	0	54,2
11	+ gapPos	0,321	0,000	0	74,1

Die Auswahl der für die Regression verwendeten Variablen folgt damit den Schritten eins und zwei der Tab. 7.6, da ab Schritt drei kaum eine Verbesserung des Modells durch das Hinzufügen einer weiteren Variable erzielt wird. Für die multiple, lineare Regression werden somit lediglich ein Interzept, Breite und Center als abhängige Variablen verwendet. Dieses Ergebnis trifft die Anforderungen der Industrie, da Breite und Center inline über das multimodale Sensorsystem gemessen werden können, während Fadenzugkraft oder Anzahl der Filamentbrüche im Produktions- oder Verarbeitungsprozess in der Regel nicht gemessen werden. Damit ergibt sich für das lineare Regressionsmodell der theoretischen Magnitude Mag_T gemäß Gleichung (7.4) [Lan22]

$$\text{Mag}_T = \beta_0 + \text{Breite} \cdot \beta_B + \text{Center} \cdot \beta_C \quad (7.4)$$

mit:

Mag_T	Theoretische Magnitude	[Ω]
β_0	Interzept	[-]
Breite	Breite des CF-Rovings	[mm]
β_B	Regressionskoeffizient der Breite	[-]
Center	Laterale Position des CF-Rovings	[mm]
β_C	Regressionskoeffizient des Centers	[-]

7.6.3 Erweiterung des Regressionsmodells um nichtlineare Terme

Gemäß Kap. 7.2.4 ist die Magnetfeldstärke H im Innern des Wirbelstromsensors nicht ideal konstant, sondern annähernd parabelförmig über dem Radius r ($H \sim r^2$). Um diesen quadratischen Verlauf im Regressionsmodell abzubilden, wird der lineare Term $\text{Center} \cdot \beta_C$ in Gleichung (7.4) durch einen quadratischen Term ersetzt. Hierbei stehen zwei Optionen zur Verfügung, bei denen Center entweder direkt quadriert, oder um ein Interzept erweitert und anschließend quadriert wird. Tab. 7.7 zeigt analog die Bewertung beider Optionen. [Lan22]

Tab. 7.7: Bewertung nichtlinearer Terme im Regressionsmodell [Lan22]

Option	Lineare und quadratische Terme	$\Sigma \bar{R}^2$ [-]	Änderung in R^2 [-]	Änderung in F [-]	Signifikanz der Änderung in F [%]
Standard	Center	0,250	0,082	128	$<1,1 \cdot 10^{-14}$
Option 1	Center ²	0,238	0,070	106	$<1,1 \cdot 10^{-14}$
Option 2	$(\text{Center} + \beta_{C,0})^2$	0,294	0,126	208	$<1,1 \cdot 10^{-14}$

Die einfache Quadrierung Center^2 bietet keine Verbesserung gegenüber der linearen Verwendung von Center, sondern führt zu schlechteren Ergebnissen und einer niedrigeren Approximation durch das Regressionsmodell. Im Gegensatz dazu erzielt die Verwendung eines zweiten Interzepts mit anschließender Quadrierung $(\text{Center} + \beta_{C,0})^2$ eine erhebliche Verbesserung, führt zu einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von $\bar{R}^2 = 0,294$ und zeigt auch eine höhere Änderung in F. Die Verwendung von Funktionen dritten, vierten oder höheren Grades wird ebenfalls untersucht, bringt jedoch keine weitere Verbesserung des Regressionsmodells. Zur Berechnung der bereinigten Magnitude wird daher im weiteren Verlauf Option 2 genutzt, sodass für die theoretische Magnitude Gleichung (7.5) gilt. [Lan22]

$$\text{Mag}_T = \beta_0 + \text{Breite} \cdot \beta_B + \left(\text{Center} + \beta_{C,0} \right)^2 \cdot \beta_C \quad (7.5)$$

mit:

Mag_T	Theoretische Magnitude	[Ω]
β_0	Interzept	[-]
Breite	Breite des CF-Rovings	[mm]
β_B	Regressionskoeffizient der Breite	[-]
Center	Laterale Position des CF-Rovings	[mm]
$\beta_{C,0}$	Interzept des Centers	[-]
β_C	Regressionskoeffizient des Centers	[-]

7.6.4 Bereinigung der Magnitude

Nach den Gleichungen (7.2) und (7.5) folgt für die bereinigte Magnitude final Gleichung (7.6).

$$\text{Mag}_B = \text{Mag}_G - \left[\beta_0 + \text{Breite} \cdot \beta_B + \left(\text{Center} + \beta_{C,0} \right)^2 \cdot \beta_C \right] \quad (7.6)$$

mit:

Mag_B	Bereinigte Magnitude	[Ω]
Mag_G	Gemessene Magnitude	[Ω]
β_0	Interzept	[-]
Breite	Breite des CF-Rovings	[mm]
β_B	Regressionskoeffizient der Breite	[-]
Center	Laterale Position des CF-Rovings	[mm]
$\beta_{C,0}$	Interzept des Centers	[-]
β_C	Regressionskoeffizient des Centers	[-]

Zur Berechnung der Regressionskoeffizienten der vorliegenden Datenbasis (Kap. 7.6.1) werden gemäß Abb. 7.25 alle Impedanzen in den Grenzen $X \geq -$

23,4 und $Y \geq 36,4$ verwendet. Damit folgt für die Regressionskoeffizienten zur Berechnung der bereinigten Magnitude Mag_B für die gewählten Daten (7.7).

$$Mag_B = Mag_G - [28,21 + Breite \cdot 2,10 + (Center + 3,31)^2 \cdot 2,12] \quad (7.7)$$

Abb. 7.26 zeigt die Verläufe der gemessenen Magnitude, der theoretischen Magnitude gemäß Gleichung (7.7) und die bereinigte Magnitude als Differenz gemäß Gleichung (7.2) der 0°-Schädigung der verwendeten Datenbasis (Kap. 7.6.1).

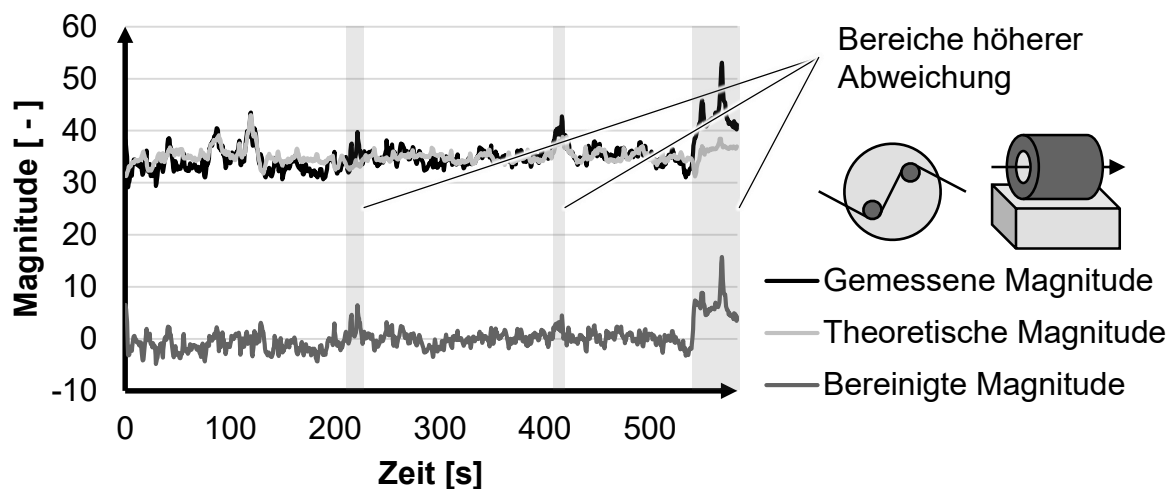


Abb. 7.26: Gemessene, theoretische und bereinigte Magnitude der 0°-Schädigung nach [Lan22]

Es zeigt sich ein hoher Approximationsgrad der theoretischen für die gemessene Magnitude, der dadurch gekennzeichnet ist, dass beide Verläufe kaum Abweichungen voneinander aufweisen. Erst gegen Ende der Messung steigt die gemessene Magnitude schlagartig an. Dies ist vermutlich auf eine Vorschädigung des CF-Rovings im Produktionsprozess oder das Anhaften von CF-Fragmenten im Sensor zurückzuführen, da die theoretische Magnitude nicht ansteigt. Die bereinigte Magnitude schwankt für weite Teile der Messung um den Sollwert Null, der einem ungeschädigten CF-Roving und damit dem Erwartungswert für den 0°-Schädigungsgrad entspricht. Dies ist ein Indiz für den hohen Approximationsgrad zwischen theoretischer und gemessener Magnitude und stützt die These, dass in den Bereichen hoher Abweichung eine Vorschädigung des CF-Rovings vorliegt.

7.6.5 Validierung bei wechselnder Schädigung

Abschließend erfolgt die Validierung der kameraoptischen Datenbereinigung bei wechselnder Schädigung. Hierzu werden erneut zwei Teilversuche mit einer Laufzeit von je 30 min durchgeführt, wobei ein CF-Roving vom Typ Tenax HTS45 E23 bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 6 m/min verwendet wird. Eine umfassende Übersicht der Versuchsbedingungen kann Anhang C II entnommen werden. Der eingebrachte Schädigungsgrad wird alle 5 min randomisiert zwischen den Schädigungsgraden 0°, 45° und 90° gewechselt (vgl. Abb. 7.9 und Abb. 7.10). Anschließend werden die nichtlinearen Regressionskoeffizienten berechnet und der resultierende Schädigungsgrad anhand der bereinigten Magnitude abschnittsweise über je 5 min bestimmt. Die Regressionskoeffizienten für die vorliegende Messreihe zur Berechnung der bereinigten Magnitude Mag_B können Gleichung (7.8) entnommen werden [Lan22].

$$Mag_B = Mag_G - [29,86 + Breite \cdot 2,26 + (Center + 2,92)^2 \cdot (-3,33)] \quad (7.8)$$

Abb. 7.27 zeigt die über die bereinigte Magnitude bestimmten Schädigungsgrads im Vergleich zum real eingebrachten Schädigungsgrad.

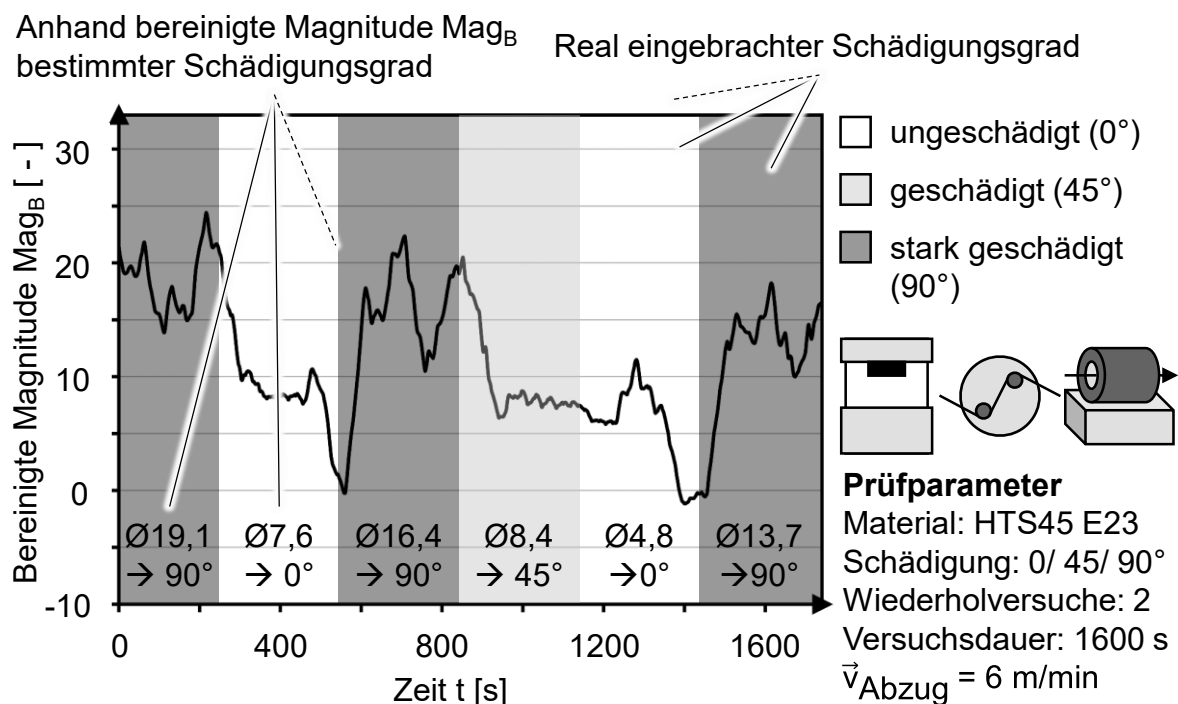


Abb. 7.27: Bestimmung des Schädigungsgrades anhand der bereinigten Magnitude Mag_B nach [Lan22]

Die Bestimmung des Schädigungsgrades anhand der bereinigten Magnitude erfolgt abschnittsweise über einen Zeitraum von 5 min. Dazu wird der Mittelwert der bereinigten Magnitude über jeweils 5 min gebildet und den Schädigungsgraden 0° für $\emptyset \text{Mag}_B < 8$, 45° für $8 \leq \emptyset \text{Mag}_B \leq 13$ und 90° für $\emptyset \text{Mag}_B > 13$ zugeordnet. Bei den verwendeten Regressionsparametern lassen sich dadurch alle eingebrachten Schädigungsgrade anhand der bereinigten Magnitude korrekt klassifizieren. Die bereinigte Magnitude wird somit als geeignete Messgröße eingestuft und im weiteren Verlauf verwendet.

7.7 Fazit der Entwicklung des multimodalen Sensorsystems

Zur Entwicklung und Validierung des multimodalen Sensorsystems ist ein geeigneter Versuchsaufbau (Kap. 7.2.1) mit einer adaptierten Fadenführung notwendig (Kap. 7.2.4). Die adaptierte Fadenführung umfasst insbesondere eine Steigerung der freien Weglänge zwischen CF-Spule und Wirbelstromsensor sowie eine enge, laterale Führung zur Stabilisierung des Fadenlaufs. Dies resultiert in einer Reduktion des Messrauschens und führt versuchsstandseitig zu einer Steigerung der SNR. Abb. 7.28 zeigt den final verwendeten Versuchsaufbau und das multimodale Sensorsystem innerhalb der Messstrecke.

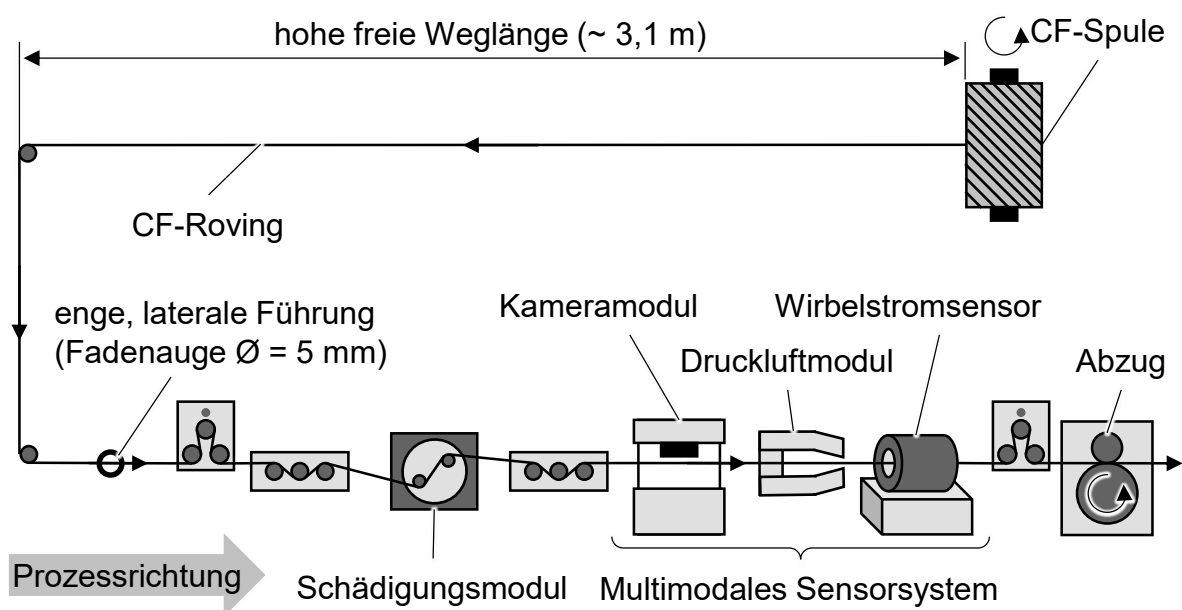


Abb. 7.28: Schematische Darstellung des finalen Versuchsaufbaus

Das multimodale Sensorsystem besteht in finaler Konfiguration aus einem Kameramodul und einem Wirbelstromsensor. Zusätzlich werden ein Druckluftmodul und ein PTFE-Inlay sowie ein Kameramodul eingesetzt (Abb. 7.29). Über das Druckluftmodul wird der Wirbelstromsensor im laufenden Betrieb gereinigt, sodass CF-Fragmente inline aus dem Sensor entfernt werden (Kap. 7.4). Zusätzlich wird der Sensor mit einem PTFE-Inlay ausgerüstet, um das Anhaften von CF-Fragmenten im Sensor weiter zu reduzieren (Kap. 7.5). Über Druckluftmodul und PTFE-Inlay wird die Ablagerung von CF-Fragmenten im Sensor und damit eine Drift im Messsignal verhindert, die das Messsignal überlagern und verfälschen würde.

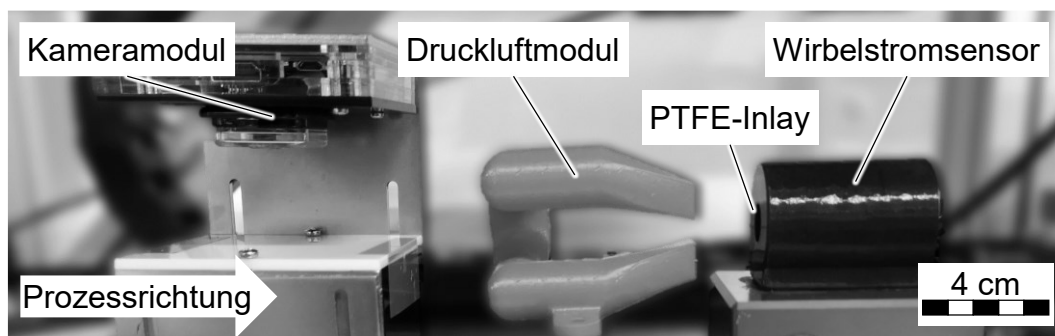


Abb. 7.29: Detailansicht des multimodalen Sensorsystems

Über das Kameramodul werden geometrische Daten des CF-Rovings aufgenommen und zur kameraoptischen Bereinigung der gemessenen Impedanz genutzt (Kap. 7.6). Zu den geometrischen Daten zählen insbesondere die Breite des Rovings sowie der laterale Lageversatz aus dem Center des Wirbelstromsensors, die jeweils mit zugehörigem Zeitstempel ausgegeben werden. Breite und lateraler Lageversatz (Center) werden über eine multiple nichtlineare Regressionsanalyse in eine theoretische Magnitude überführt, die mit dem Messwert des Wirbelstromsensors, der gemessenen Magnitude, zu einer bereinigten Magnitude verrechnet werden. Abb. 7.30 zeigt die Fusion der Datensätze des Kameramoduls und des Wirbelstromsensors zur bereinigten Magnitude.

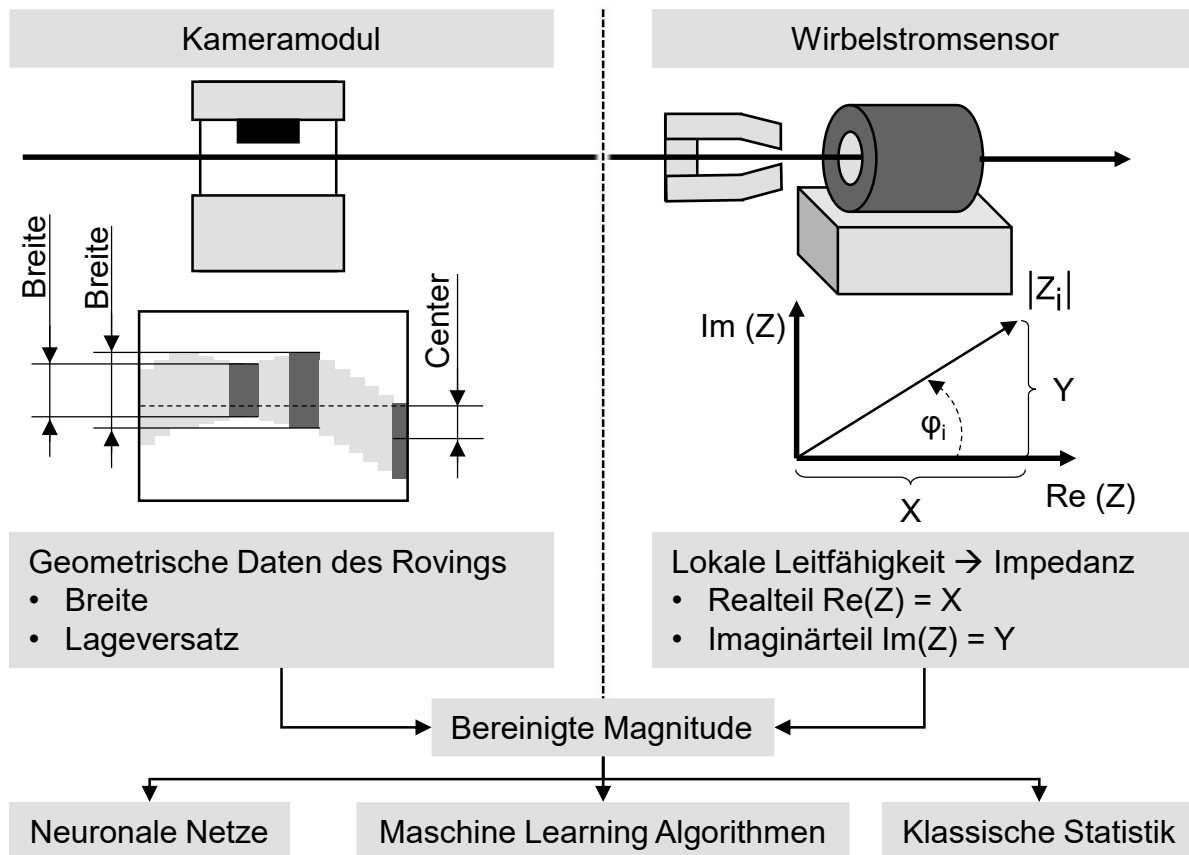


Abb. 7.30: Fusion von Kamera- und Wirbelstromdaten zur bereinigten Magnitude und Ansätze zur Auswertung

Die bereinigte Magnitude ist somit um die Einflüsse von Breitenschwankung und lateraler Verschiebung bereinigt, sodass von der bereinigten Magnitude auf die lokale Faserschädigung geschlossen werden kann. Es wird gezeigt, dass die bereinigte Magnitude eine geeignete Messgröße zur Bewertung der Faserschädigung bzw. der Qualität eines CF-Rovings ist (vgl. insb. Kap. 7.6.4 und Kap. 7.6.5). Anhand des zugehörigen Zeitstempels wird die bereinigte Magnitude über die Abzugsgeschwindigkeit in eine Laufkoordinate des geprüften CF-Rovings umgerechnet, sodass die Qualitätsmessgröße orts aufgelöst zugeordnet werden kann. Diese orts aufgelöste Qualitätsmessgröße wird im Folgenden über verschiedene Ansätze ausgewertet, um die Qualität des CF-Rovings zu klassifizieren.

Über ein multimodales Messsystem, bestehend aus Wirbelstromsensor und Kameramodul, wird eine bereinigte Magnitude erzeugt, die zur Bewertung der Qualität eines CF-Rovings geeignet ist.

8 Auswertung der multimodalen Messgrößen

Kap. 8 ordnet sich gemäß Abb. 8.1 in das in Kap. 1 definierte Vorgehen zur Zielerreichung ein. In diesem Kapitel werden verschiedene Auswertungsansätze der bereinigten Magnitude entwickelt und bewertet. Die bereinigte Magnitude Mag_B ist die komplexen Messgrößen (Impedanz) des multimodalen Messsystems, die im Rahmen von Kap. 7 als geeignete Qualitätsmessgröße für CF-Rovings identifiziert wurde.

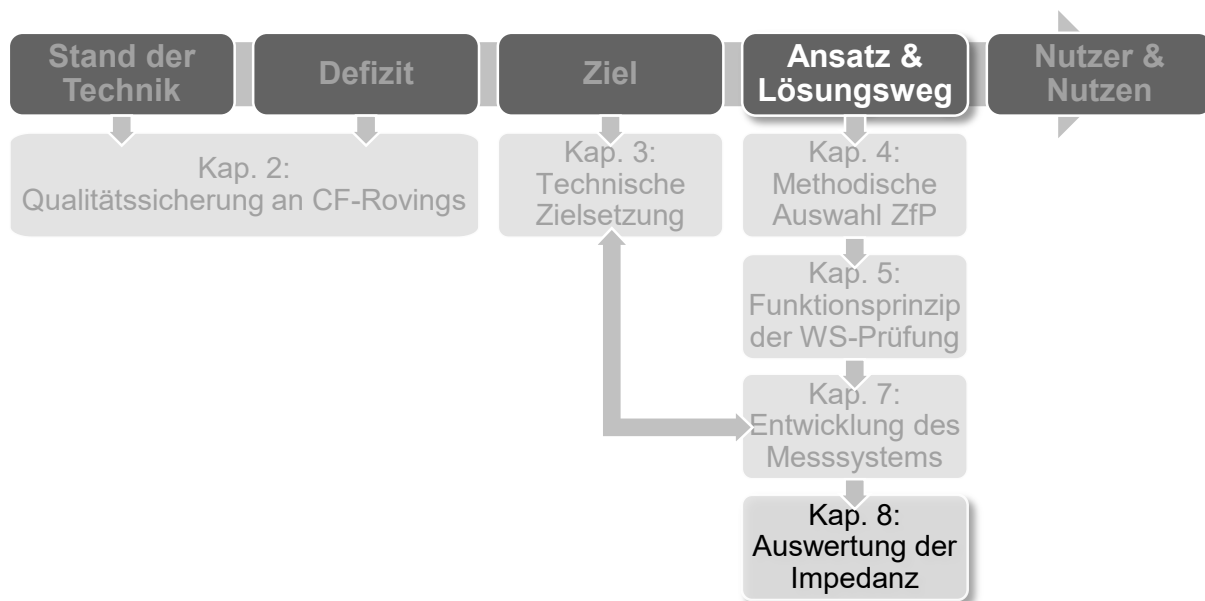


Abb. 8.1: Einordnung von Kap. 8 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Zur Auswertung der komplexen Messgröße des multimodalen Messsystems werden verschiedene Ansätze gewählt, für die vorliegende Messgröße adaptiert und hinsichtlich der erzielbaren Klassifizierungsgenauigkeit bewertet. Die Auswertung erfolgt dabei sowohl über Methoden des Machine Learning (ML) als auch im Vergleich zum Benchmark einer klassischen Auswertungsmethode. ML-Methoden werden zur Auswertung eingesetzt, um die Mehrdimensionalität der Messgrößen des multimodalen Sensorsystems und das hohe Messrauschen zu beherrschen (Abb. 8.2). ML ist neben Deep Learning, Kybernetik u.a. ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz (KI) und beschreibt die Befähigung von Computersystemen zur selbstständigen Wissensaufnahme und -erweiterung [LC12; LS18].

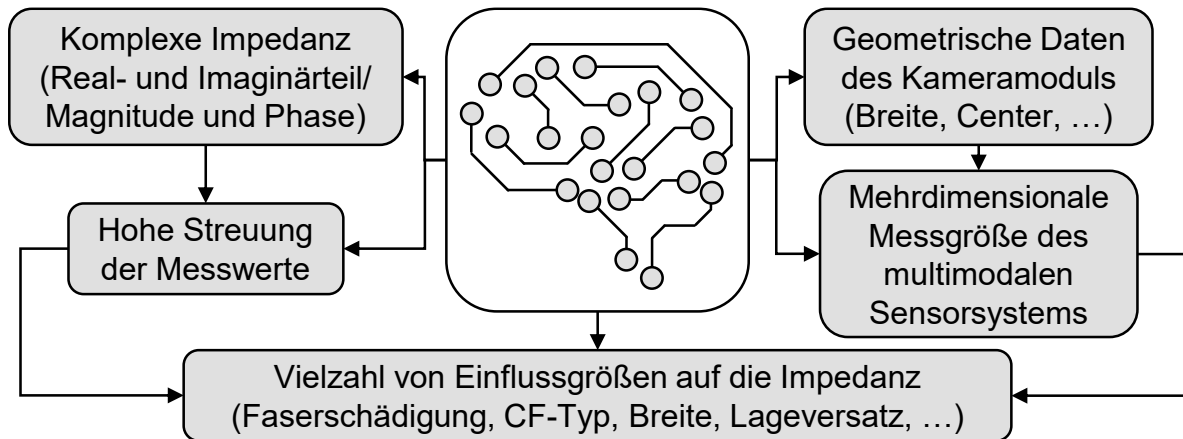


Abb. 8.2: Motivation zur Verwendung von ML zur Auswertung der mehrdimensionalen Messgrößen des multimodalen Sensorsystems

Im Bereich des ML wird eine Methode des überwachten und des unüberwachten Lernens verwendet (Abb. 8.3). Einerseits wird überwachtes Lernen eingesetzt, um einen Auswertungsalgorithmus zu trainieren, bis eine ausreichend hohe Genauigkeit bei der Klassifizierung des Schädigungsgrades erreicht wird. Andererseits wird unüberwachtes Lernen eingesetzt, um zu prüfen, ob eine Klassifizierung ohne vorheriges, aufwändiges Training erfolgen kann.

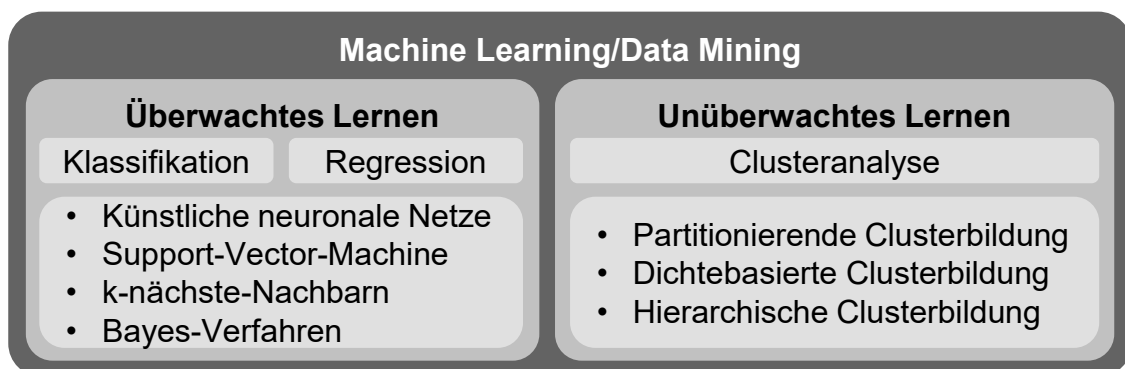


Abb. 8.3: Ausgewählte ML-Verfahren [CL16; ML13; Zho21]

Die beiden ML-Ansätze werden anschließend mit der Klassifizierungsgenauigkeit einer konventionellen, auf klassischer Statistik basierender Auswertungsmethode als Benchmark verglichen. Abb. 8.4 zeigt das gewählte Vorgehen zur Entwicklung der drei verschiedenen Auswertungsmethoden schematisch. Zunächst wird die Datenbasis beschrieben, anhand der die Entwicklung der Auswertungsmethoden erfolgt (Kap. 8.1).

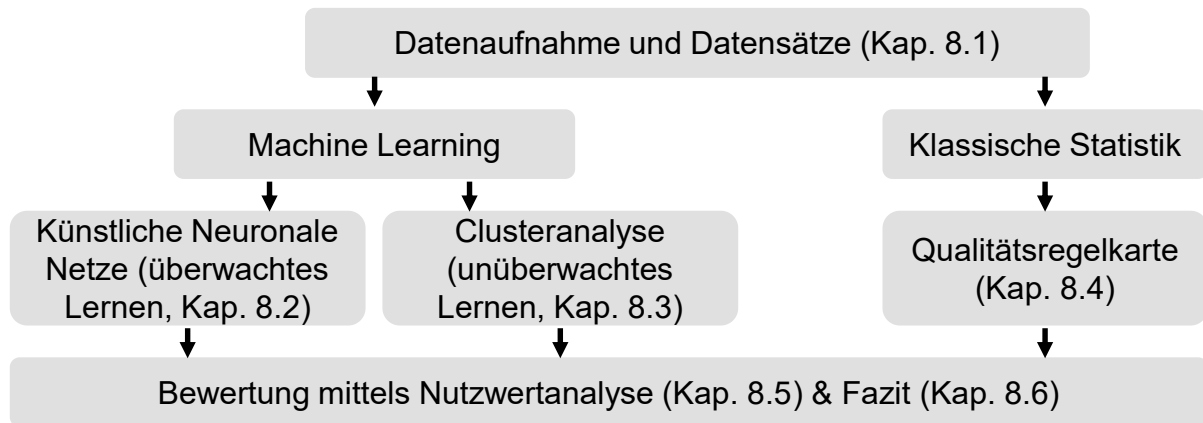


Abb. 8.4: Ablaufdiagramm zur Identifizierung einer geeigneten Auswertungsmethode der komplexen Impedanz

Im Bereich des Machine Learning werden als Methode des überwachten Lernens vorwärts gerichtete, künstliche neuronale Netze (KNN) (Kap. 8.2) verwendet. Als Methode des unüberwachten Lernens werden verschiedene Algorithmen der Clusteranalyse (Kap. 8.3) eingesetzt. Im Bereich der statistischen Methoden werden Qualitätsregelkarten verwendet (Kap. 8.4). Abschließend werden die verschiedenen Ansätze zur Auswertung über eine Nutzwertanalyse bewertet (Kap. 8.5) und ein Fazit gezogen (Kap. 8.6).

8.1 Verwendete Datenbasis

Die Aufnahme der verwendeten Datenbasis erfolgt durch das entwickelte, multimodale Messsystem (Kap. 7). Als Peripherie wird der tribologische Prüfstand „ITA-Tribometer“ (Kap. 7.2.1) genutzt. Es werden sowohl über das Schädigungsmodul im Labor manipulierte Datensätze (Kap. 8.1.1) zu Trainingszwecken als auch Datensätze auffälliger Spulen der realen Produktion (Kap. 8.1.2) zur Validierung aufgenommen.

8.1.1 Datensätze mit im Labor manipulierter Schädigung

Zum Training der verschiedenen Auswertungsansätze wird ein ausreichend großer Datensatz mit bekannter Schädigung benötigt. Hierzu wird eine definierte Schädigung durch das entwickelte Schädigungsmodul (Kap. 7.2.3) in die CF eingebracht, in dem anhand der eingestellten Winkel die verschiedene Schädigungsgrade realisiert werden (Abb. 8.5).

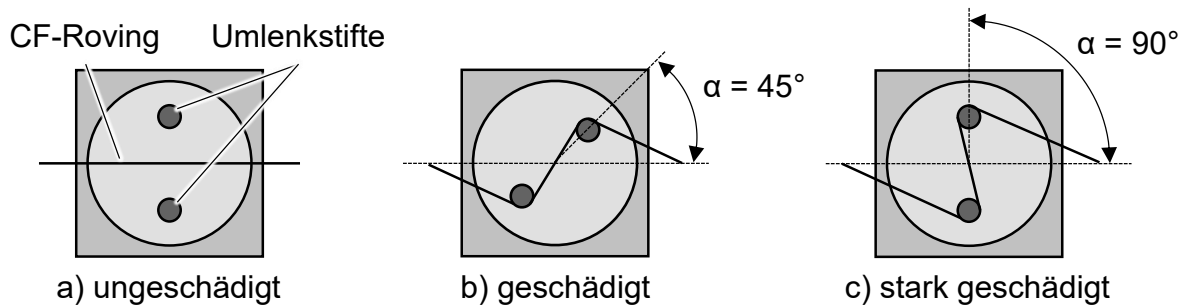


Abb. 8.5: Über das Schädigungsmodul einstellbare Schädigungsgrade: a) ungeschädigt, b) geschädigt und c) stark geschädigt

Mit einer Datenrate von 1 Hz über 5 min pro Teilversuch werden Wirbelstrom- und Kameradaten eines CF-Rovings vom Typ Tenax HTS40 F13 aufgenommen. Es werden drei Versuchspunkte mit unterschiedlichen Schädigungsgrade ($0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$) untersucht und mit jeweils fünf Wiederholversuchen abgesichert. Es ergeben sich in Summe 15 Teilversuche mit insgesamt 4.500 Datenpunkten über eine geprüfte Roving-Länge von 450 m (Abb. 8.6). Alle Randbedingungen der durchgeführten Versuche können Anhang C III entnommen werden.

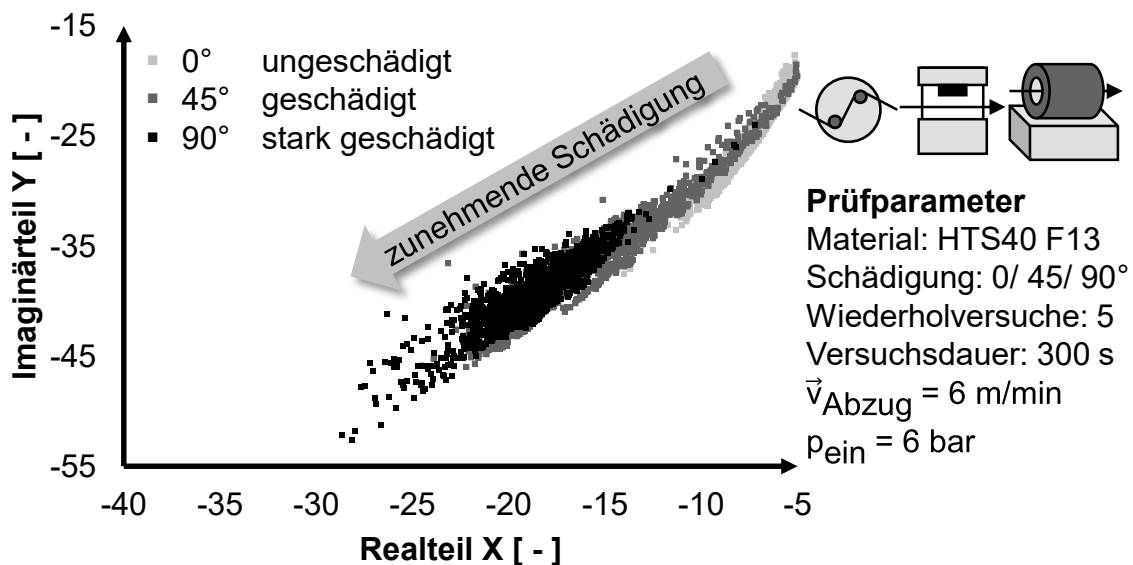


Abb. 8.6: Rohdaten der Trainingsdatensätze

Analog zu den Vorversuchen (Kap. 5.7) zeigt sich eine Zunahme der gemessenen Magnituden mit steigendem Schädigungsgrad (Abb. 8.7).

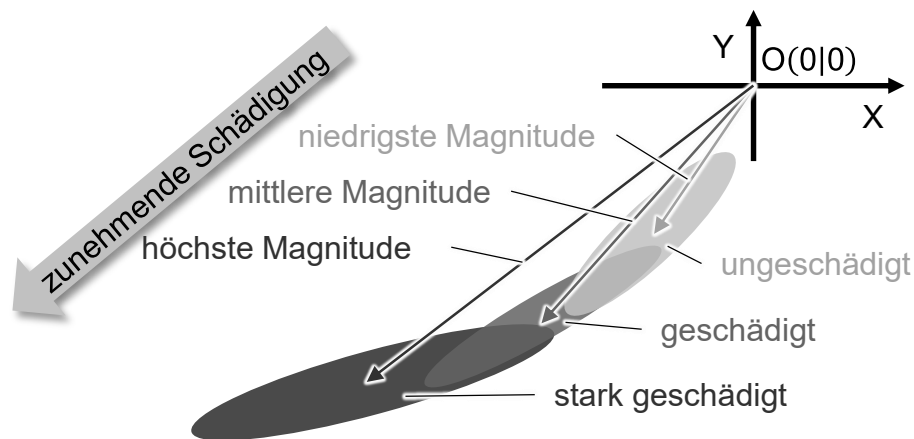


Abb. 8.7: Zunahme der gemessenen Magnituden mit zunehmender Schädigung

Die Impedanzen des ungeschädigten CF-Rovings weisen den geringsten Abstand zum Ursprung und damit die kleinste Magnitude auf. Mit zunehmendem Schädigungsgrad verschieben sich die Impedanzen in Richtung negativer Real- und Imaginär-Achse, sodass sie weiter vom Ursprung entfernt sind und größere Magnituden zeigen. Die Ergebnisse entsprechen damit den Erwartungen.

8.1.2 Datensätze mit realer Schädigung auffälliger Spulen

Zur Validierung der Auswertungsmethoden, die anhand von Trainingsdaten (Kap. 8.1.1) entwickelt wurden, werden realitätsnahe Daten verwendet. Hierbei werden zwei Spulen vom Typ Tenax HTS40 F13 desselben Fertigungs-Lots 210420320 einer realen CF-Produktion verwendet, die unter gleichen Bedingungen produziert wurden und somit vergleichbar sind. Abb. 8.8 zeigt die zugehörigen Rohdaten des Wirbelstromsensors, die mit einer Datenrate von 2 Hz über eine Dauer von je 3 h aufgezeichnet wurden und in Summe 43.200 Datenpunkte über einer vermessenen Roving-Länge von 2,16 km zeigen. Die Übersicht der gesamten, zugehörigen Versuchsbedingungen zeigt Anhang C IV. Spule 3A21 zeigt eine breitere Streuung der Messwerte und höhere Magnituden als Spule 2B09. Dies indiziert einen höheren Schädigungsgrad von Spule 3A21, sodass Spule 2B09 in der Qualität höher bewertet wird.

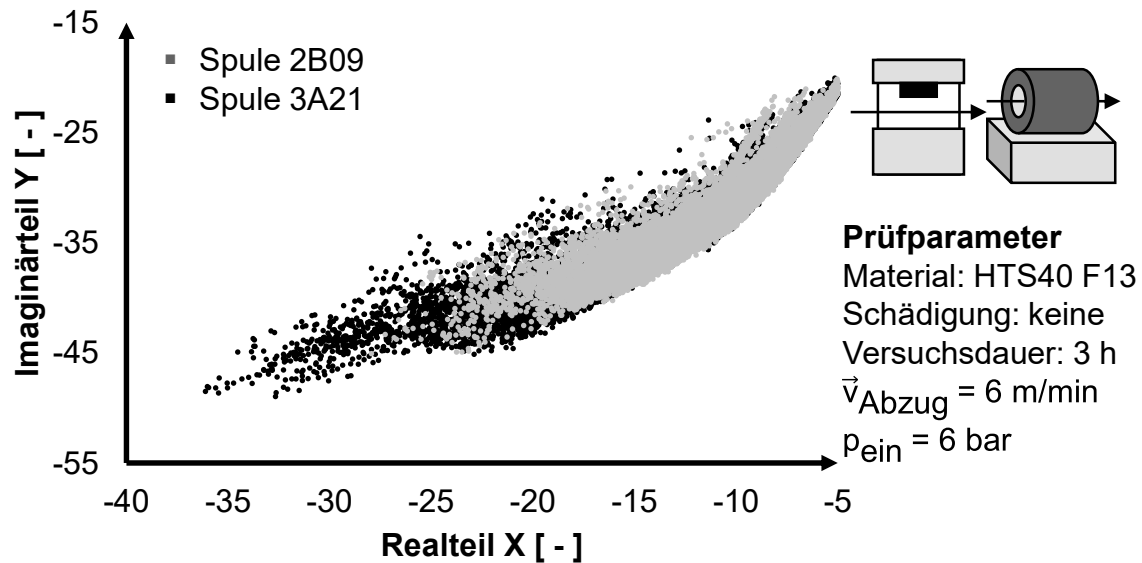


Abb. 8.8: Rohdaten der Validierungsdatensätze

Eine unabhängige Messung der gleichen Lots bei der SURAGUS GmbH, Dresden, bestätigen diese Klassifizierung¹⁵. Die Ergebnisse entsprechen damit den Erwartungen und werden zur Validierung der verschiedenen Auswertungsmethoden herangezogen.

8.2 Klassifizierung mittels künstlichen neuronalen Netzen

8.2.1 Definition und Motivation

Künstliche neuronale Netze (KNN) bestehen im Allgemeinen aus einer Eingabeschicht, einer oder mehreren verdeckten Schichten und einer Ausgabeschicht. Jede Schicht enthält Neuronen, die die kleinste Einheit eines KNN darstellen (Abb. 8.9). In ein Neuron j fließen die Eingabewerte o_k ein, die entweder aus den gewichteten Verbindungen w_k mit vorangegangenen Neuronen oder direkt aus Eingabewerten stammen, wenn das Neuron Teil der Eingabeschicht ist. Die Propagierungsfunktion Σ berechnet die gesamte Netzeingabe

¹⁵ Virtuelles Projektentreffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Pawel Latasiewicz, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 07.07.2021

$net_j = \sum o_k w_k$ in das Neuron, summiert über alle gewichtete Eingabewerte. Unter Berücksichtigung eines Schwellenwerts bestimmt die Aktivierungsfunktion F aus der Netzeingabe den Ausgabewert o_j des Neurons, der an alle folgenden Neuronen nach dem Feed-Forward-Prinzip weitergeleitet wird. [CGF+20; LC12]

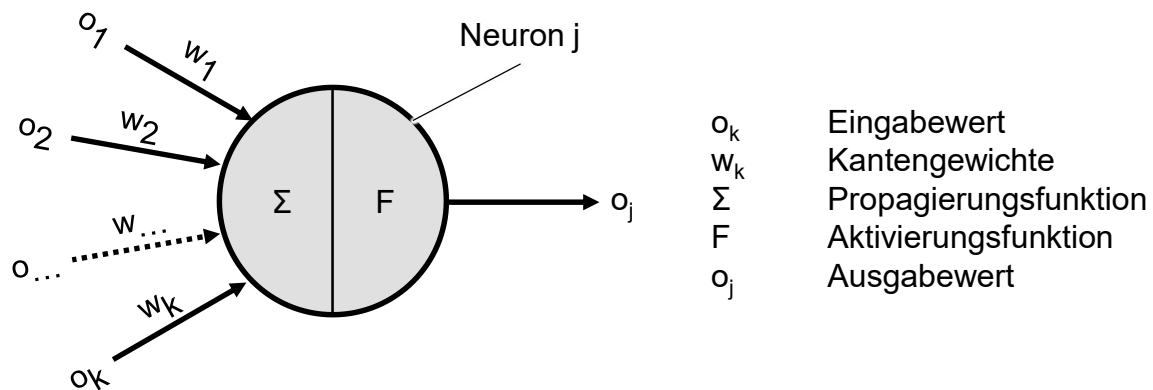


Abb. 8.9: Darstellung eines Neurons nach [KBB+15; LC12]

Über die Anpassung der Kantengewichte während einer Trainingsphase sind KNNs in der Lage, Muster und Zusammenhänge zu erlernen und zu speichern. Die Speicherkapazität ist proportional zur Anzahl der Verbindungen zwischen den Neuronen. Die Anzahl der Verbindungen, die Anzahl an Neuronen in der Ein- und Ausgabeschicht sowie die Anzahl an verdeckten Schichten und die Anzahl der Neuronen in den verdeckten Schichten definieren die Architektur eines KNN. Abb. 8.10 zeigt exemplarisch ein vollvernetztes KNN mit einer 2-4-1-Netzwerkarchitektur, bei der jedes Neuron mit allen Neuronen der benachbarten Schichten verbunden ist [CGF+20; LC12].

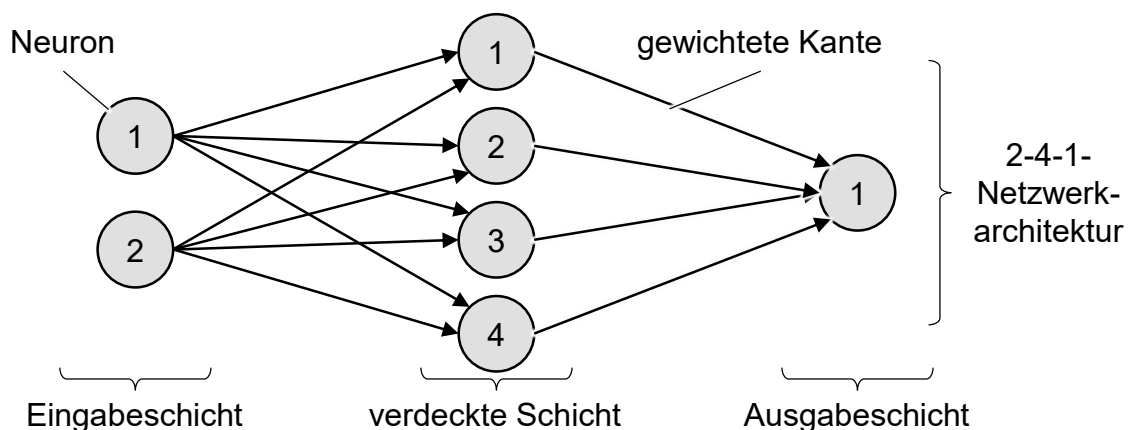


Abb. 8.10: Schematische Darstellung eines KNN nach [LC12]

KNNs gehören zu den mächtigsten Verfahren zur Klassifizierung von Objekten, da sie für spezifische Klassifizierungsaufgaben trainiert werden können. Bei der Klassifizierung werden Objekte, deren Klassenzugehörigkeit unbekannt ist, vordefinierten Klassen zugeordnet. Hierbei wird ein Modell entwickelt, das für gegebene Messdaten die zutreffende Klasse prognostiziert. Ein solches Modell kann durch ein vorwärts gerichtetes KNN abgebildet werden, das dem überwachten Lernen zugeordnet wird. Beim überwachten Lernen wird das Modell mit Trainingsdaten trainiert, bei denen sowohl Eingabe- als auch Ausgabewerte bekannt sind, bis eine ausreichend hohe Klassifizierungsgenauigkeit vorliegt. Bei vorwärts gerichteten KNNs wird über einen Backpropagation-Algorithmus der Fehler der Ausgabeschicht zwischen dem berechneten Wert und dem Sollwert des Trainingsdatensatzes an die Eingabeschicht zurückgegeben. Die Kantengewichte werden anschließend in Iterationszyklen angepasst, sodass der Fehler minimiert wird. Ein Vorteil des überwachten Lernens ist, dass das Modell die Abbildung zwischen Eingangs- und Ausgabewert erlernt und diese Abbildung selbstständig überprüft und anpasst. Ein Vorteil bei der Verwendung von KNNs ist, dass auch mehrdimensionale Eingangswerte zur Klassifizierung verwendet werden können. [CL16; ML13; Mur13; OZ96; WFH11]

KNNs sind folglich für die vorliegende Klassifizierung des Schädigungsgrades geeignet, da die Eingangswerte in das KNN die mehrdimensionalen Datensätze eines multimodalen Sensorsystems sind. Zudem kann das KNN als Methode des überwachten Lernens durch Trainingsdaten (Kap. 8.1.1) mit bekannten Schädigungsgraden trainiert werden, um die Klassifizierungsgenauigkeit zu steigern.

8.2.2 Entwicklung eines vorwärts gerichteten neuronalen Netzes

Das Vorgehen zur Entwicklung eines vorwärts gerichteten KNN ist schematisch in Abb. 8.1 dargestellt. Zunächst wird die vorhandene Datenbasis aufgeteilt. Anschließend wird eine geeignete Netzwerkarchitektur entwickelt, indem die Anzahl der Knoten der Ein- und Ausgabeschicht sowie in einer etwaigen verdeckten Schicht variiert werden. Abschließend erfolgt die Optimierung der Hyperparameter, die das Training eines KNN strukturieren und damit einen großen Einfluss auf das Lernverhalten und damit die Klassifizierungsgenauigkeit haben.

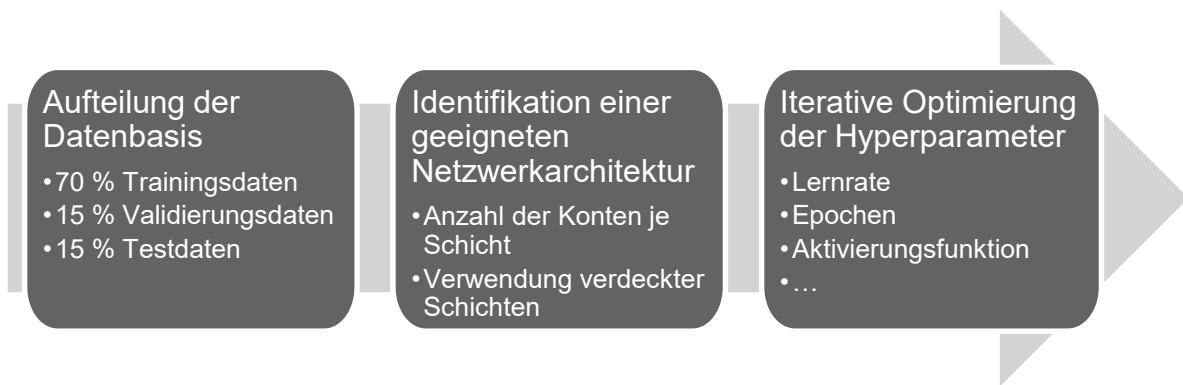


Abb. 8.11: Gewähltes Vorgehen zur Entwicklung des KNN

Aufteilung der Datenbasis

Tab. 8.1 zeigt die Aufteilung der vorhandene Datenbasis (Kap. 8.1.1) in Trainings-, Test- und Validierungsdaten. Die Trainingsdaten werden zur Entwicklung des KNN verwendet und stellen mit 70 % den größten Anteil der verwendeten Datenbasis. Zum Training des KNN wird eine ausreichend große Datenbasis benötigt, da hierbei die Kantengewichte iterative angepasst werden, bis eine möglichst hohe Klassifizierungsgenauigkeit erzielt wird. Die Klassifizierungsgenauigkeit wird während der Trainingsphase anhand der Validierungsdaten und nach Abschluss des Trainings anhand der Testdaten bewertet. Weder Validierungs- noch Testdaten werden zur Optimierung der Kantengewichte genutzt. Beim Zusammenführen von Kamera- und Wirbelstromdaten in der kameraoptischen Datenbereinigung (Kap. 7.6) wird ein Teil der Messwerte zu Beginn der Messung manuell entfernt, um beide Datensätze zu synchronisieren. Dadurch werden die 4.500 Datenpunkte der Datensätze zu Trainingszwecken (Kap. 8.1.1) auf 3.600 Datenpunkte reduziert. Hierbei entfallen jeweils 1.200 Datenpunkte auf die drei verschiedenen Schädigungsgrade 0°, 45° und 90°.

Tab. 8.1: Aufteilung der Datenbasis [AR10; DMA+16; LC12; SW21]

Datensätze	Anteil	Verwendung
Trainingsdaten	70 %	Training des KNN
Validierungsdaten	15 %	Bewertung der Genauigkeit während des Trainings
Testdaten	15 %	Bewertung der final erreichbaren Genauigkeit

Das KNN wird in der Programmiersprache Python programmiert. Hierbei werden verschiedene Bibliotheken implementiert, um bestimmte Operationen innerhalb von Python effizient ausführen zu können (Tab. 8.2).

Tab. 8.2: Verwendete Python-Bibliotheken [SW21; Zho21]

Bibliothek	Funktion	Anwendung
Pandas	Einlesen von CSV-Dateien und Verarbeitung zu Matrix-ähnlichen Datenstrukturen (Dataframes)	Einlesen und Verarbeiten der Rohdaten des multimodalen Messsystems
Numpy	Speicherung großer Datensätze in Matrix-ähnlichen Strukturen (Numpy-Arrays)	Speicherung der umfangreichen Rohdaten in einfacher Struktur
	Erzeugung von Datenobjekten, die in KNNs implementiert werden	Einlesen der aufbereiteten Rohdaten in KNN
Scikit-learn	Funktionen, die in Machine Learning und Data-Science-Anwendungen genutzt werden	Zufällige Ordnung, Normierung und Unterteilung von Daten und Datensätzen
Tensorflow	Framework zur Entwicklung von Machine-Learning-Anwendungen in Python	Optimizer sowie Fehler-, Aktivierungs- und Callback-Funktionen zum Netzaufbau

Entwicklung der Netzwerkarchitektur

Die Netzwerkarchitektur beschreibt die Anzahl an verdeckten Schichten neben der Eingabe- und der Ausgabeschicht sowie die Anzahl an Neuronen je Schicht. Zur Bestimmung der Anzahl an Neuronen in der Eingabeschicht existiert nach aktuellem Stand der Technik kein standardisiertes Vorgehen, sodass hier die heuristische Methode von Versuch und Irrtum verwendet wird. Die Anzahl an Neuronen in der Eingabeschicht entspricht den Datenpunkten pro Eingabe in das KNN und wird zwischen zehn und 30 Neuronen variiert. Die höchste Klassifizierungsgenauigkeit wird mit zehn Neuronen erzielt, während 30 Neuronen zu einer niedrigeren Klassifizierungsgenauigkeit führen [Köt20; SW21; Zho21]. Im weiteren Verlauf werden daher zehn Neuronen in der Eingabeschicht verwendet. Die Anzahl verdeckter Schichten orientiert sich an der Komplexität des Zusammenhangs, der über das KNN abgebildet werden soll. Während KNNs ohne verdeckte Schicht nur lineare Zusammenhänge abbilden können, können KNNs mit einer verdeckten Schicht bereits jede kontinuierliche Abbildung von einem endlichen Raum in einen anderen endlichen Raum approximieren. KNNs

mit zwei oder mehr verdeckten Schichten können darüber hinaus jeden beliebigen Entscheidungsprozess nachbilden. Für das vorliegende Klassifizierungsproblem, bei dem ein nicht linearer Zusammenhang zwischen den Messwerten des multimodalen Sensorsystems und der Qualität eines CF-Rovings vermutet wird, wird eine verdeckte Schicht als zielführend eingestuft und im weiteren Verlauf verwendet. Im direkten Vergleich werden mit einer verdeckten Schicht höhere Genauigkeiten erzielt als ohne verdeckten Schicht [Zho21]. In der Literatur wird für die Neuronen in der verdeckten Schichte eine Anzahl zwischen den Neuronen in der Ein- und der Ausgabeschicht empfohlen [Hea17]. Die Neuronen der verdeckten Schicht werden zwischen fünf und 15 variiert und die resultierenden Klassifizierungsgenauigkeiten verglichen. Die Versuche zeigen die höchste Klassifizierungsgenauigkeit für acht Neuronen [SW21; Zho21]. Da die Ausgabeschicht über drei Neuronen verfügt, um eine Klassifizierung in drei Schädigungsklassen vornehmen zu können und die Eingabeschicht zehn Neuronen enthält, wird die Empfehlung der Literatur mit 8 Neuronen in der verdeckten Schicht mit $10 > 8 > 3$ eingehalten. Abb. 8.12 zeigt die finale Architektur des entwickelten KNN. [CL16; Hea17; Köt20; LC12; Zho21]:

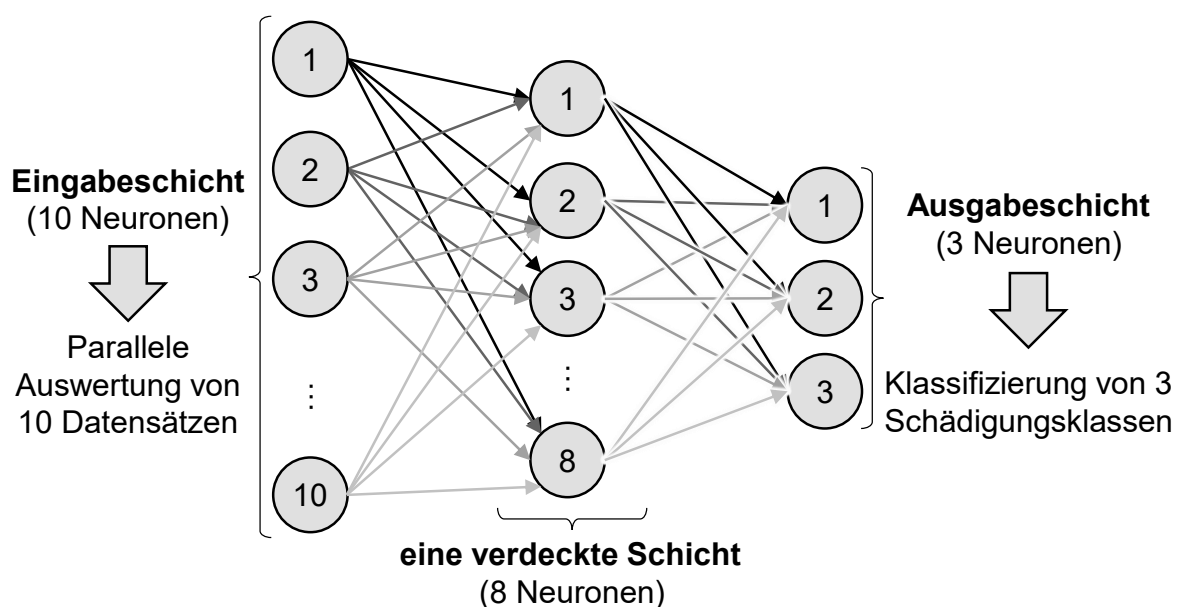


Abb. 8.12: Finale 10-8-3-Netzwerkarchitektur des entwickelten KNN

Optimierung der Hyperparameter

Abschließend werden geeignete Hyperparameter für das KNN bestimmt. Hyperparameter strukturieren das Training eines KNN und haben großen Einfluss auf das Lernverhalten und damit die realisierbare Genauigkeit des KNN. Hyperparameter werden vor dem Training festgelegt und können in der Regel nicht während, sondern erst nach Abschluss des Trainings angepasst werden. Ein Durchlauf aller Trainingsdaten, nachdem die Hyperparameter angepasst werden, wird als Epoche bezeichnet. Da die Hyperparameter voneinander abhängig sind und Wechselwirkungen aufweisen, ist die Bestimmung eines globalen Optimums aller Hyperparameter mit erheblichem Rechen- und Zeitaufwand verbunden. Stattdessen werden die Hyperparameter in Iterationszyklen angepasst, um ein lokales Optimum für jeden Parameter zu finden. [CGF+20; LC12]

Die Auswahl der Hyperparameter erfolgt auf Basis der erzielbaren Genauigkeiten, die anhand der Testdaten berechnet wird. Eine Übersicht der erzielten Genauigkeiten kann Anhang D II entnommen werden. Die verwendeten Hyperparameter werden im Folgenden dargestellt und beschrieben [SW21]:

Aktivierungsfunktion

Die Aktivierungsfunktion bestimmt auf Basis der Netzeingabe in ein Neuron, ob das Neuron aktiviert wird [LC12]. Prinzipiell kann jede differenzierbare Funktion als Aktivierungsfunktion verwendet werden, wobei die Sigmoid-Funktion, der Tangens hyperbolicus ($\tanh$), die Rectifier-Funktion (ReLU) und die Softmax-Funktion am weitesten verbreitet sind. Besonderheit der Softmax-Funktion ist, dass die Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit einer bestimmten Klasse zurückgegeben werden, sodass sich diese Funktion insbesondere für die Ausgabeschicht eignet. Als Aktivierungsfunktion für die Ausgabeschicht wird daher die Softmax-Funktion gewählt [SW21]. Als Aktivierungsfunktion in allen übrigen Schichten werden mit der Sigmoid-Funktion die höchsten Genauigkeiten erzielt und im Weiteren verwendet [SW21]. [RM17]

Fehlerfunktion und Optimizer

Die Fehlerfunktion berechnet für Trainingsdaten mit bekannten Ein- und Ausgabewerten die Differenz zwischen dem Ausgabewert des KNN und dem Sollwert.

Der berechnete Fehler wird bis zur Eingabeschicht zurück propagiert und die Kantengewichte werden iterativ in jeder Epoche angepasst, bis der Fehler minimal ist. Bei diesem Optimierungsproblem wird der Optimizer genutzt, um die Fehlerfunktion gegen ein Minimum zu konvergieren. Da in der Ausgabeschicht die Softmax-Funktion unter Angabe von Wahrscheinlichkeiten der korrekten Klassenzugehörigkeit verwendet wird, kann als Fehlerfunktion die Crossentropie-Funktion genutzt werden. Die Crossentropie-Funktion vergleicht und bewertet die berechneten Wahrscheinlichkeiten der Klassenzugehörigkeit mit denen der tatsächlichen Klassifizierung. Als Optimizer wird die ADAM-Funktion gewählt, die eine Erweiterung des Gradientenabstiegverfahrens ist, und mit der die höchsten Genauigkeiten erzielt werden. [SW21]

Lernrate

Die Lernrate beschreibt die Höhe der Änderung bei jeder iterativen Anpassung der Kantengewichte je Epoche und liegt meist zwischen 0 und 1. Eine zu kleine Lernrate kann dazu führen, dass sehr viele Iterationen notwendig sind, um ein Minimum der Fehlerfunktion zu finden. Eine zu große Lernrate kann dazu führen, dass kein Minimum gefunden wird (Abb. 8.13). Um diesem Risiko zu begegnen, können Callback-Funktionen der Tensorflow-Bibliothek verwendet werden. Hierbei wird die Lernrate zunächst auf den Wert 1 gesetzt und im weiteren Verlauf gesenkt, je nachdem wie stark sich der Wert der Fehlerfunktion ändert. So wird eine schnelle Konvergenz in ein Minimum der Fehlerfunktion sichergestellt, während gleichzeitig Overfitting verhindert wird. Die selbstanpassende Lernrate wird im weiteren Verlauf verwendet.

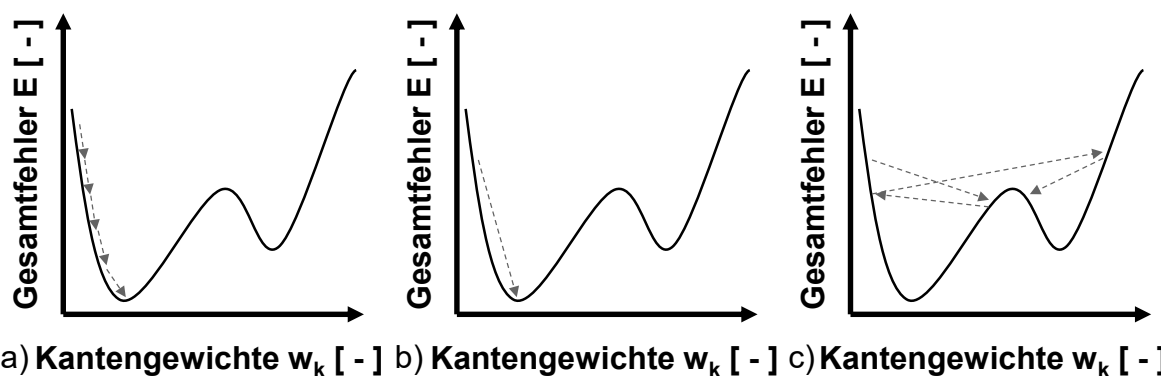


Abb. 8.13: Auswirkungen a) zu kleiner, b) optimaler und c) zu großer Lernrate nach [SW21]

Tab. 8.3 gibt einen Überblick über die final verwendeten Hyperparameter des entwickelten KNN.

Tab. 8.3: Übersicht final verwendeter Hyperparameter [RM17; SW21]

Hyperparameter	Wert	Beschreibung
Aktivierungsfunktion	Sigmoid	Höchste Sensibilität im Bereich des Arbeitspunktes, dennoch stetig differenzierbar
Aktivierungsfunktion der Ausgabeschicht	Softmax	Ausgabe von Wahrscheinlichkeiten der Klassenzugehörigkeit in der Ausgabeschicht
Fehlerfunktion	Cross-entropie	Vergleich der Wahrscheinlichkeiten der Klassenzugehörigkeit mit denen der tatsächlichen Klassifizierung
Optimizer	ADAM	Erweiterung des Gradientenabstiegsverfahrens, für die Optimierung von KNN entwickelt
Epochen	500	Anzahl an Durchläufen aller Trainingsdaten
Lernrate	selbstanpassend	Reduktion der Lernrate während der Trainingsphase zur Verhinderung von Overfitting

8.2.3 Klassifizierung von im Labor manipulierten Schädigungsgraden

Dem entwickelten KNN werden die 3.600 Datenpunkte der Datensätze mit im Labor eingebrachter, definierter Schädigung (Kap. 8.1.1) zur Klassifizierung vorgelegt. Jeweils zehn Datenpunkte werden zu einem Eingabedatensatz zusammengefasst, da die Eingabeschicht über zehn Knoten verfügt und damit zehn Datenpunkte parallel auswerten kann. Die daraus resultierenden 360 Datensätze entfallen zu je 120 Datensätzen auf die Schädigungsgrade 0° , 45° und 90° und werden gemäß Tab. 8.1 in 252 Trainingsdatensätze, 54 Validierungsdatensätze und 54 Testdatensätze unterteilt. Die Trainingsdatensätze werden zum Training des KNN und zur Optimierung der Klassifizierungsgenauigkeit genutzt, während die Validierungs- und Testdatensätze zur Berechnung der Klassifizierungsgenauigkeit während und nach dem Training verwendet werden.

Zur Auswertung werden die gesamten Messdaten des multimodalen Sensorsystems als Eingabewerte in das KNN untersucht, um die Klassifizierungsgenauigkeit zu verbessern. Dies umfasst sowohl die Messdaten des Wirbelstromsensors und des Kameramoduls als auch bereits vorverarbeitete bzw. bereinigte Messdaten (vgl. insb. Kap. 7.6). Hierzu werden mit verschiedenen

Kombinationen an Eingabewerten jeweils zehn KNNs trainiert und die erzielbaren Genauigkeiten berechnet. Die höchste erzielbare Genauigkeit von 83,4 % ohne Ausnutzung von Scheinkorrelationen (vgl. Kap. 7.2.3 und Abb. 7.10) wird mit der Kombination von Eingabewerten Mag_B / fuzzDist / fuzzArea erzielt. Diese Kombination an Eingabewerten wird daher im Folgenden und zur Klassifizierung realer Schädigungsgrade verwendet. Eine Übersicht der erzielten Genauigkeiten bei Variation der Eingabewerte kann Anhang D III entnommen werden.

8.2.4 Klassifizierung von realen Schädigungsgraden

Dem entwickelten KNN mit einer 10-8-3-Netzwerkarchitektur unter Verwendung geeigneter Hyperparameter (Kap. 8.2.2) werden Datensätze in der beschriebenen Kombination von Eingabewerten Mag_B / fuzzDist / fuzzArea (Kap. 8.2.3) zur Klassifizierung vorgelegt. Die verwendeten Datensätze stammen von auffälligen Spulen der realen Produktion (Kap. 8.1.2). Abb. 8.14 zeigt eine Möglichkeit zur Echtzeitauswertung dieser Datensätze, bei denen das KNN die Qualität des CF-Rovings klassifiziert und die drei Schädigungsgrade 0° / 45° / 90° kontinuierlich über der Zeit ausgibt. Hierbei wird exemplarisch ein Zeitraum von 25 min dargestellt, der einer geprüften Roving-Länge von 150 m entspricht.

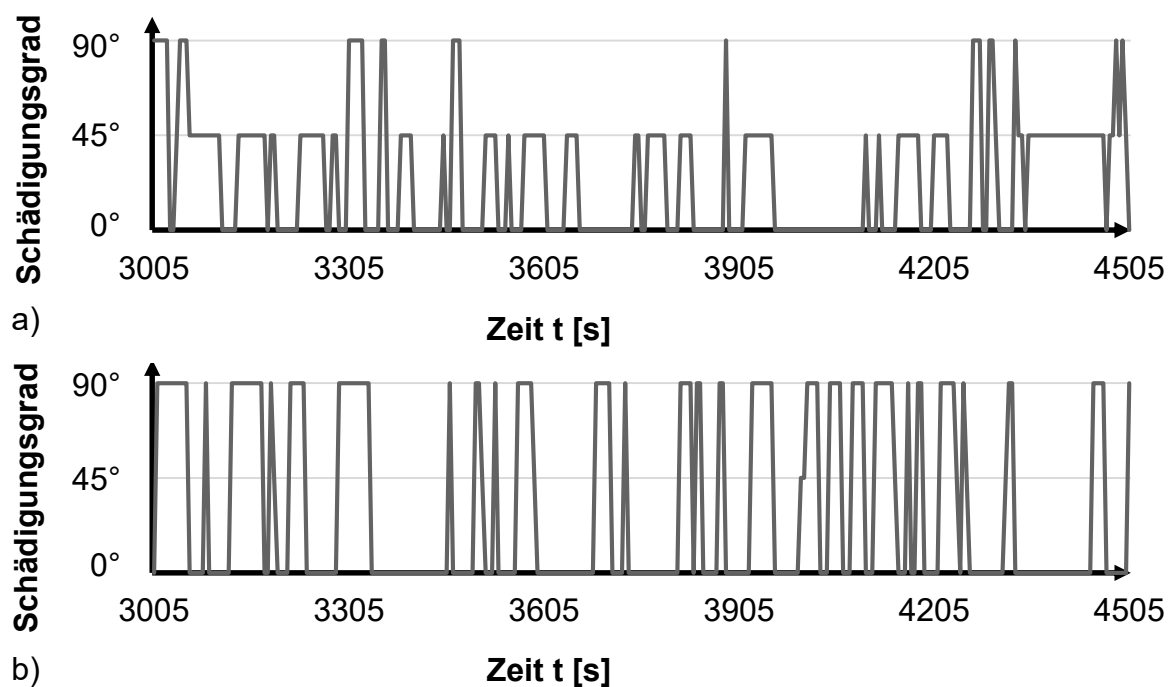


Abb. 8.14: KNN-Echtzeitklassifizierung auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mit a) Spule 2B09 und b) Spule 3A21 nach [Zho21]

Spule 2B09 (Abb. 8.14 a) zeigt im Mittel über die gesamte Messdauer einen niedrigeren Schädigungsgrad als Spule 3A21 (Abb. 8.14 b), sodass Spule 2B09 in der Qualität besser als Spule 3A21 bewertet wird. Das Ergebnis entspricht damit den Erwartungen.

8.3 Cluster-Analyse über Machine Learning-Algorithmen

8.3.1 Definition und Motivation

Bei der Clusteranalyse wird eine endliche Menge von Datenpunkten anhand spezifischer Merkmale in eine definierte Anzahl Gruppen, sog. Cluster, unterteilt. Dabei wird eine möglichst hohe Ähnlichkeit hinsichtlich bestimmter Merkmale aller Datenpunkte eines Clusters angestrebt und eine möglichst geringe Ähnlichkeit zwischen Datenpunkten verschiedener Cluster. Abb. 8.15 zeigt exemplarisch eine Clusterbildung für zweidimensionale Datenpunkte, die anhand der beiden Merkmale X und Y klassifiziert werden. [CL16; GSS13; ML13]

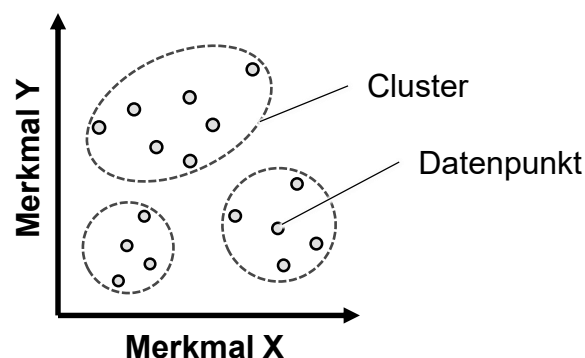


Abb. 8.15: Schematische Clusterbildung für zweidimensionale Datenpunkte nach [CL16]

Die Clusteranalyse wird dem unüberwachten Lernen zugeordnet. Unüberwachtes Lernen wird eingesetzt, wenn die erwarteten Ausgabewerte im Vorfeld unbekannt sind, sodass das Modell lediglich mit Eingabewerten trainiert wird. Vorteil der Clusteranalyse bei der Zuordnung der Messwerte des multimodalen Sensorsystems zu Schädigungsgraden gegenüber einer Klassifizierung mit

KNN ist damit die Möglichkeit einer Klassifizierung ohne vorheriges, aufwändiges Training. Damit ist die Clusteranalyse ohne Adaption zur Klassifikation verschiedener CF-Typen geeignet und flexibel einsetzbar. [CL16; ML13; WFH11]

8.3.2 Vorauswahl eines geeigneten Clustering-Algorithmus

Grundlegend werden vier verschiedene Typen der Clusteranalyse unterschieden: partitionierend, hierarchisch, dichtebasiert und gitterbasiert (Abb. 8.16). [HKP12; Mad12]

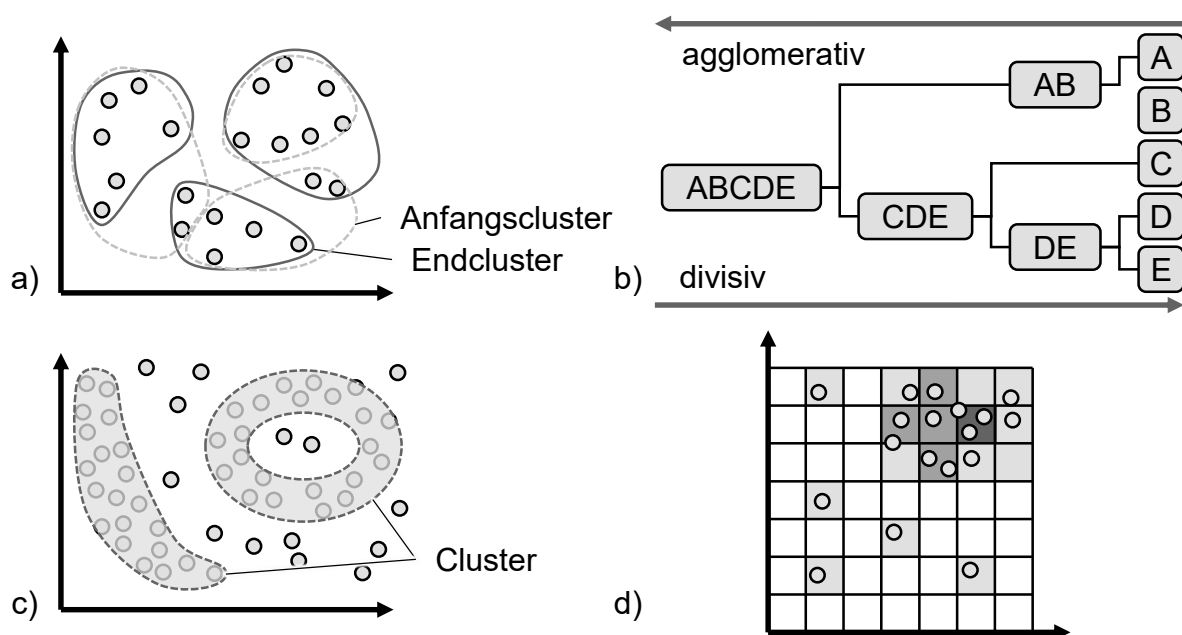


Abb. 8.16: Schematische Darstellung der vier gängigsten Cluster-Algorithmen a) partitionierend, b) hierarchisch, c) dichtebasiert und d) gitterbasiert nach [ASG07; HKP12]

Partitionierende Cluster-Algorithmen

Beim partitionierenden Cluster-Algorithmus liegt initial eine Anzahl von Datenpunkten vor, die anschließend iterativ Clustern zugeordnet werden, bis ein bestimmtes Qualitätskriterium erreicht wird. Das Qualitätskriterium ist beispielsweise von der Distanz zwischen den Datenpunkten eines Clusters abhängig, für die ein Minimum gesucht wird. In der Regel bestimmen solche Partitionierungsmethoden alle Cluster simultan und ordnen sie anschließend iterativ neu, bis das Qualitätskriterium erreicht wird. Dazu wird zunächst der Schwerpunkt eines Clusters bestimmt und die Clustergrenzen so verschoben, dass die Abstände

der Datenpunkte innerhalb eines Clusters minimal werden (Abb. 8.16 a). Partitionierende Clustering-Algorithmen benötigen eine im Vorfeld definierte Anzahl an Clustern, sind in der Programmierung wenig aufwändig und können auch komplexere Cluster-Formen abbilden. Im Gegenzug sind sie schlecht skalierbar und können nur bedingt mit Ausreißern umgehen. [HKP12; Mad12]

Hierarchische Cluster-Algorithmen

Die hierarchische Cluster-Analyse erfolgt agglomerativ oder divisiv, sodass der Datensatz hierarchisch entweder zu Clustern kombiniert oder in Cluster partitioniert wird (Abb. 8.16 b). Die agglomerative Methode verfolgt einen Bottom-up-Ansatz, bei dem zunächst jeder Datenpunkt einem eigenen Cluster zugeordnet wird. Anschließend werden pro Iterationsschritt jeweils zwei Cluster aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu einem neuen Cluster kombiniert, bis alle Datenpunkte einem einzigen Cluster zugeordnet sind oder ein Abbruchkriterium erreicht ist. Die divisive Methode verfolgt dagegen einen Top-down-Ansatz, bei dem zunächst alle Datenpunkte einem einzigen Cluster zugeordnet werden. Anschließend wird dieser Cluster mit jedem Iterationsschritt in sogenannte Sub-Cluster unterteilt, bis alle Datenpunkte in einzelnen Clustern vorliegen oder ebenfalls ein Abbruchkriterium erreicht wird. Bei beiden Methoden kann als Abbruchkriterium die gewünschte Anzahl an Clustern vorgegeben werden. Vorteil der hierarchischen Clusteranalyse ist die Auswahl der Cluster-Anzahl auch nach Durchlauf des Algorithmus und die Fähigkeit zur Darstellung von Zusammenhängen zwischen einzelnen Clustern. Zudem ist die Methode skalierbar. Dementgegen sind Ausreißer aufgrund von Ketteneffekten schlecht kompensierbar. [CL16; HKP12]

Dichtebasierte Cluster-Algorithmen

Beim dichtebasierten Clustering werden Regionen in einem Datenraum zu Clustern zusammengefasst, die eine hohe Dichte an Datenpunkten aufweisen, und von Regionen niedriger Dichte getrennt sind. Im Gegensatz zu anderen Cluster-Algorithmen werden beim dichtebasierten Clustering Cluster beliebig komplexer Form und nicht nur sphärische Cluster erzeugt (Abb. 8.16 c). Im Gegenzug benötigt die Berechnung der komplexen Cluster-Formen einen höheren Rechenaufwand, während Ausreißer gut kompensiert werden, da nur Bereiche hoher Dichte betrachtet werden. [KBB+15; San10]

Gitterbasierte Cluster-Algorithmen

Bei der gitterbasierten Cluster-Analyse wird eine Gitterstruktur verwendet, um den Datenraum in eine finite Anzahl an Zellen zu unterteilen. Hierbei werden die Zellen anhand der Anzahl an Datenpunkten pro Zelle gewichtet und Zellen mit ähnlichen Gewichtungen zu Clustern zusammengefasst (Abb. 8.16 d). Gitterbasierte Cluster-Algorithmen benötigen im niedrigdimensionalen Raum einen geringen Rechenaufwand, da der Rechenaufwand proportional zur Anzahl der Zellen ist. Dementsprechend ist diese Methode nicht geeignet für höherdimensionale Datenräume, da die Anzahl der Zellen exponentiell mit der Anzahl der Dimensionen wächst. Gitterbasierte Clustering-Algorithmen können damit im niedrigdimensionalen Raum sehr große Datenmengen bei geringem Rechenaufwand verarbeiten. [ASG07; HKP12]

Auswahl eines Cluster-Algorithmus

Nun erfolgt die Auswahl eines geeigneten Cluster-Algorithmus anhand einer Nutzwertanalyse nach technisch-methodischen Gesichtspunkten [VDI98]. Folgende Bewertungskriterien werden genutzt [Pil20]:

1. Anzahl berechneter Cluster ist variabel
2. Skalierbarkeit für Verarbeitung großer Datenmengen
3. Cluster mit beliebiger Form sind bestimmbar
4. Kompensation von Ausreißern ist möglich
5. Möglichst geringer Rechenaufwand bei der Cluster-Berechnung

Eine variable Anzahl berechneter Cluster ist notwendig, um später, je nach Anwendungsfall, die resultierenden Messwerte flexibel in eine beliebige Anzahl an Qualitätsklassen unterteilen zu können. Die Skalierbarkeit des Cluster-Algorithmus ist relevant für die Verarbeitung großer Datenmengen. Die Abbildung von Clustern beliebiger Form ist von Bedeutung, da unterschiedliche CF-Typen zu unterschiedlichen Impedanzwolken führen können. Zusätzlich wird bewertet, ob der Cluster-Algorithmus empfindlich gegenüber Ausreißern ist und wie hoch der Rechenaufwand bei der Klassifizierung relativ zu anderen Cluster-Algorithmen ist. Die Bewertungskriterien werden, analog zur HoQ-Methode (vgl. Kap. 4.5 und insb. Tab. 4.6) in einem paarweisen Vergleich priorisiert und daraus die für

die Nutzwertanalyse notwendigen Gewichtungen G_i nach Gleichung (4.6) abgeleitet. Anschließend wird der Nutzwert als Produkt aus Gewichtung und Erfüllungsgrad berechnet und je Cluster-Algorithmus über alle Bewertungskriterien summiert. Der paarweise Vergleich kann Anhang B V und die Nutzwertanalyse kann Anhang B VI entnommen werden. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse werden in Abb. 8.17 dargestellt.

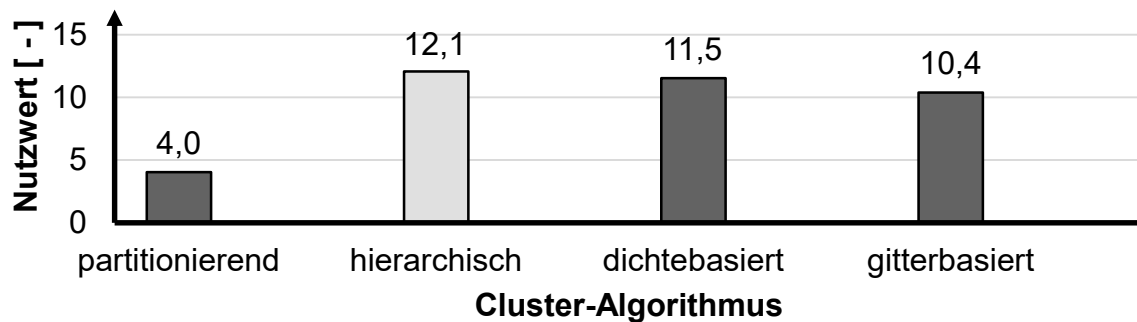


Abb. 8.17: Nutzwerte verschiedener Cluster-Algorithmen

Die hierarchische Cluster-Analyse verfügt mit einem Wert von 12,1 über den höchsten Nutzwert und wird daher im weiteren Verlauf verwendet.

8.3.3 Entwicklung eines hierarchischen Cluster-Algorithmus

Die zwei grundlegenden Methoden der hierarchischen Cluster-Analyse, die agglomerative und die divisive Methode, arbeiten im Wesentlichen gleich, sodass die Wahl der Methode kaum die resultierende Cluster-Bildung beeinflusst. Jedoch existieren bei der Clusterbildung von n Datenpunkten pro Schritt agglomerativ $O = (n^2)$ Möglichkeiten zur Clusterbildung, während divisiv $O = (2^n)$ Möglichkeiten existieren. Da der Rechenaufwand der agglomerativen Methode damit lediglich mit n^2 skaliert, während der Aufwand der divisiven Methode mit 2^n skaliert, ist die agglomerative Methode weniger rechenintensiv und wird im Folgenden verwendet. [HKP12]

Die Programmierung des agglomerativen, hierarchischen Cluster-Algorithmus erfolgt analog zum KNN in der Programmiersprache Python. Es wird die Python-Bibliothek SciPy implementiert, die numerische Routinen und damit fundamentale Bausteine zur Programmierung von Cluster-Algorithmen beinhaltet. SciPy

stellt auch Fusionierungsalgorithmen zur Berechnung der Abstände zweier Cluster zur Verfügung. Der Fusionierungsalgorithmus beeinflusst ebenfalls das Ergebnis der Cluster-Analyse, da die Agglomeration zweier Cluster anhand der berechneten Abstände erfolgt. Tab. 8.4 gibt einen Überblick über die gängigsten Fusionierungsalgorithmen und die realisierbaren Klassifizierungsgenauigkeiten, die beim Clustern der Testdaten (Kap. 8.1.1) erzielt werden. [VGO+20]

Tab. 8.4: Fusionierungsalgorithmen zur agglomerativen Fusion zweier Cluster nach [May21; Mül11; VGO+20; Zho21]

Fusionierungsalgorithmus	Beschreibung	Genauigkeit
Single-Linkage	Minimaler Abstand aller Datenpunktpaare	33,4 %
Complete-Linkage	Maximaler Abstand aller Datenpunktpaare	64,0 %
Average-Linkage	Mittlerer Abstand aller Datenpunktpaare	63,3 %
Centroid	Abstand der Schwerpunkte	61,1 %
Median	Abstand der Zentren	64,2 %
Ward	Abstand der minimalen Varianz	63,4 %

Mit Ausnahme der Single-Linkage-Funktion weisen alle Fusionierungsalgorithmen ähnlich hohe Klassifizierungsgenauigkeiten in einem Bereich von 61,1 % bis 64,2 % auf. Da die höchste Klassifizierungsgenauigkeit mit 64,2 % unter Verwendung des Fusionierungsalgorithmus Median erzielt wird, wird dieser Fusionierungsalgorithmus im weiteren Verlauf verwendet.

Neben der Wahl eines geeigneten Fusionierungsalgorithmus beeinflusst auch die Wahl der ausgewerteten Daten maßgeblich das Ergebnis der Cluster-Analyse. Zum einen wird die bereinigte Magnitude Mag_B ausgewertet, die bereits als geeignete Größe zur Bewertung der Qualität eines CF-Rovings identifiziert wurde. Zum anderen kann parallel ein weiterer Messwert des multimodalen Sensorsystems ausgewertet werden, sodass die Cluster-Analyse im zweidimensionalen Raum erfolgt. Hierfür dürfen unter allen Messwerten des multimodalen Sensorsystems (vgl. Tab. 7.4) lediglich diejenigen ausgewählt werden, die keiner Scheinkorrelation (vgl. Kap. 7.2.3 und insb. Abb. 7.10) unterliegen. Tab. 8.5 zeigt die Messwerte des multimodalen Sensorsystems, die keiner Scheinkorrelation unterliegen und somit in Kombination mit der bereinigten Magnitude Mag_B ausgewertet werden dürfen.

Tab. 8.5: Potentielle Messwerte des multimodalen Sensorsystems zur Auswertung in Kombination mit der bereinigten Magnitude Mag_B

Nr.	Messwert	Definition	Einheit
1	fuzzArea	Fläche eines abstehenden Fuzz	[mm ²]
2	fuzzStrength	Dichte eines abstehenden Fuzz	[-]
3	gapArea	Fläche einer Lücke/Spreizung	[mm ²]
4	gapPos	Position einer Lücke/Spreizung	[mm]
5	fuzzDist	Maximaler Abstand eines Fuzz-Filaments	[mm]
6	Zeit	Zeitstempel des Messwerts	[s]

Gemäß Tab. 8.5 existieren sechs Messwerte, die in Kombination mit der bereinigten Magnitude Mag_B ausgewertet werden können. Alle sechs Möglichkeiten werden im Folgenden untersucht, um denjenigen Messwert zu identifizieren, der in Kombination mit der bereinigten Magnitude das höchste Potential für eine zweidimensionale Clusterung bietet. Abb. 8.18 zeigt qualitativ die ersten vier Messwerte fuzzArea, fuzzStrength, gapArea sowie gapPos über der bereinigten Magnitude aufgetragen, um grafisch Korrelationen zu identifizieren.

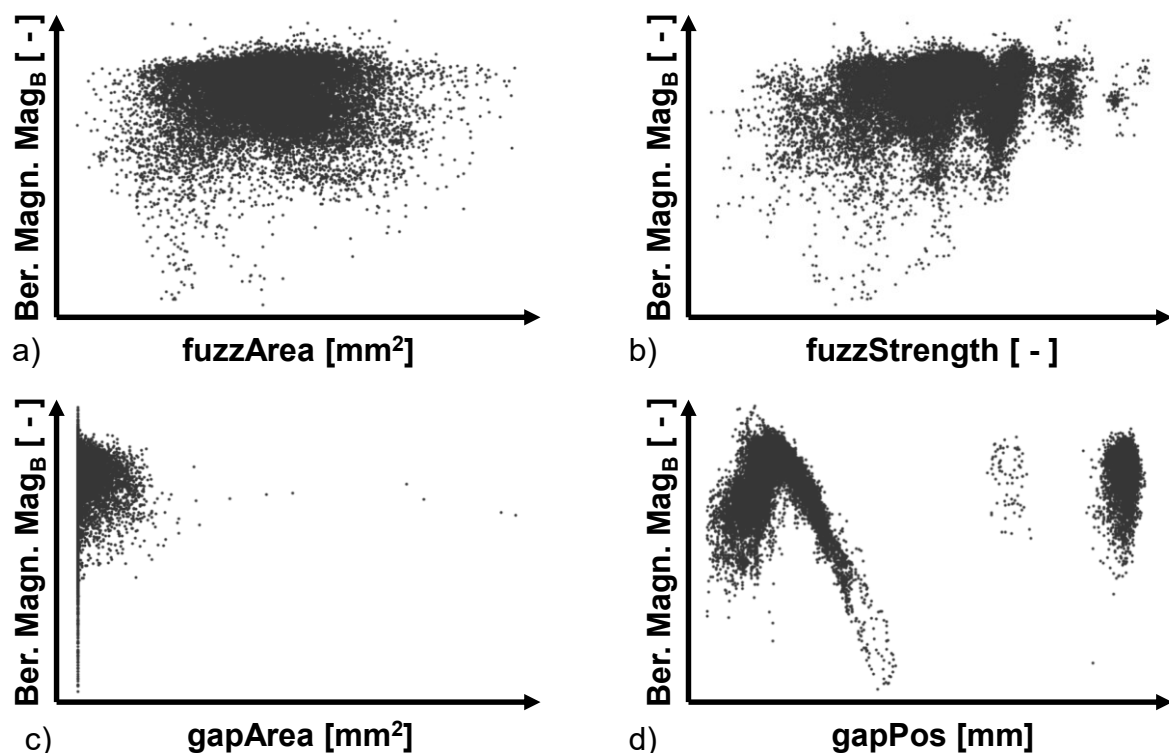


Abb. 8.18: Qualitative Darstellung ungeeigneter Messwertkombinationen aus bereinigter Magnitude Mag_B und a) FuzzArea, b) FuzzStrength, c) GapArea und d) GapPos nach [May21]

Die ersten vier Messwertkombinationen sind zur Auswertung über eine Cluster-Analyse ungeeignet, da keine erkennbare Korrelation zwischen bereinigter Magnitude und fuzzArea, fuzzStrength, gapArea oder gapPos besteht. Die gezeigten Grafen (Abb. 8.18 a-d) können als Korrelationsdiagramm interpretiert werden, in denen eine Korrelation besteht, falls ein Zusammenhang grafisch identifiziert werden kann. Dies ist hier nicht der Fall. Da die bereinigte Magnitude ein Indikator für die Faserschädigung ist und keine Korrelation zu fuzzArea, fuzzStrength, gapArea oder gapPos aufweist, korrelieren diese Messgrößen im Umkehrschluss nicht mit der Faserschädigung. Sie werden im weiteren Verlauf für eine Auswertung über eine Cluster-Analyse folglich nicht weiter betrachtet. Die Auswertung von bereinigter Magnitude in Kombination mit der Zeit entspricht im Wesentlichen einer Qualitätsregelkarte. Eine Auswertung über eine Qualitätsregelkarte erfolgt in Kap. 8.4 und wird an dieser Stelle daher ebenfalls nicht weiter betrachtet. Abb. 8.19 zeigt die letzte, mögliche Messwertkombination von bereinigter Magnitude und FuzzDist.

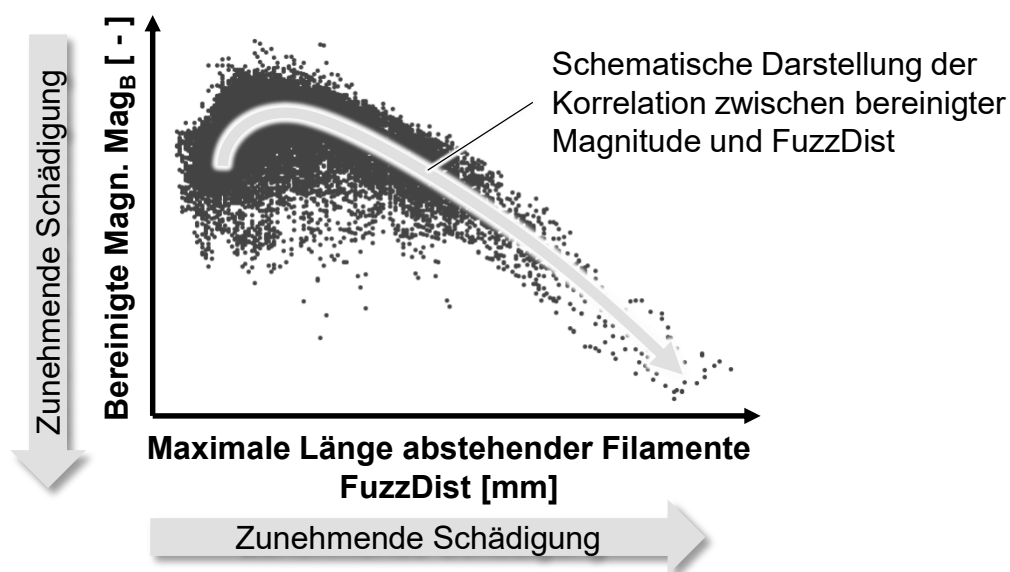


Abb. 8.19: Qualitative Darstellung der Kombination von bereinigter Magnitude und FuzzDist mit schematisch eingezeichneter Korrelation nach [LMG+22a; LMG+22b; LMG+23]

Die gemeinsame Darstellung von bereinigter Magnitude und FuzzDist zeigt grafisch einen annähernd linearen Zusammenhang. Mit zunehmender Schädigung

verschiebt sich die bereinigte Magnitude zu niedrigeren Werten, während Fuzz-Dist mit zunehmender Schädigung steigt. Damit ist die Voraussetzung für die Cluster-Analyse der zweidimensionalen Messwertkombination Mag_B und Fuzz-Dist gegeben und wird im weiteren Verlauf verwendet. Tab. 8.6 zeigt die finalen Eigenschaften des entwickelten, hierarchischen Cluster-Algorithmus.

Tab. 8.6: Finale Eigenschaften des entwickelten Cluster-Algorithmus nach [LMG+22a; LMG+22b; LMG+23; May21; Pil20]

Eigenschaft	Wert	Beschreibung
Cluster-Algorithmus	hierarchisch	Höchster Nutzwert für die gegebene Cluster-Analyse (Abb. 8.17)
Unterart	agglomerativ	Niedrigerer Rechenaufwand im Vergleich zur divisiven Methode
Fusionierungsalgorithmus	Median	Höchste, erzielbare Genauigkeit mit 64,2 % bei der Cluster-Analyse (Tab. 8.4)
Messwertkombination	Mag_B ; FuzzDist	Einzige Messwertkombination mit grafisch detektierbarer Korrelation (Abb. 8.19)

8.3.4 Hierarchische Cluster-Analyse von im Labor manipulierten Schädigungsgraden

Nun erfolgt die Klassifizierung der 3.600 Datenpunkte des Datensatzes mit im Labor eingebrachter, definierter Schädigung (Kap. 8.1.1) über den entwickelten, hierarchischen Cluster-Algorithmus (Tab. 8.6). Abb. 8.20 visualisiert die Ergebnisse der Cluster-Analyse als Dendrogramm, das in Form eines Baumdiagramms die Reihenfolge des hierarchischen Clusters der Datenpunkte zeigt. Im Dendrogramm wird die Anzahl der Cluster und die Anzahl der Datenpunkte je Cluster als Funktion der Distanz zwischen den Clustern dargestellt. Abb. 8.20 zeigt aus Gründen der Übersichtlichkeit den Ausschnitt der zwölf letztgebildeten Cluster. Auf der X-Achse sind die Cluster-Größe bzw. die Anzahl der Datenpunkte des jeweiligen Clusters aufgetragen. Auf der Y-Achse wird die Distanz zwischen den Clustern angegeben. Ein Verknüpfungspunkt markiert die Agglomeration zweier Cluster bei einer bestimmten Distanz zwischen den Clustern.

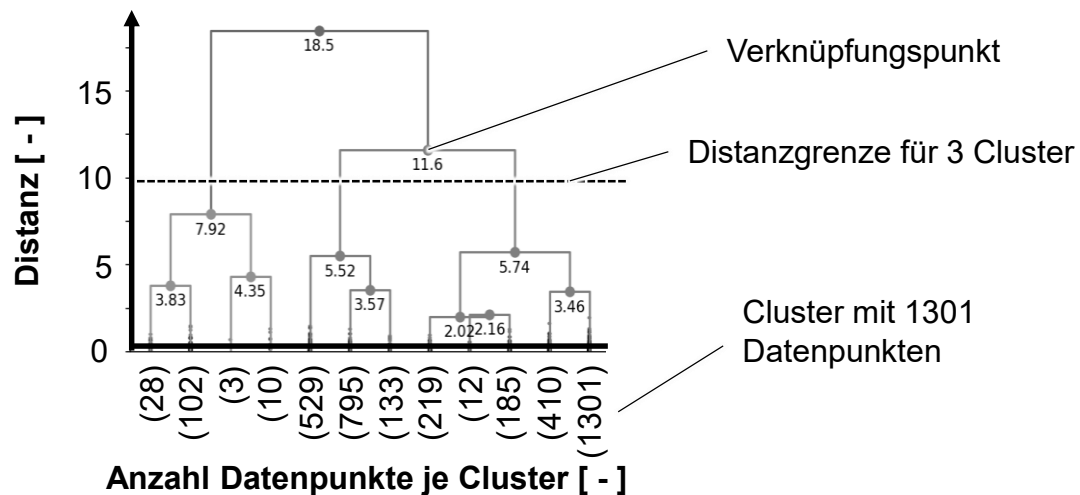


Abb. 8.20: Dendrogramm der Cluster-Analyse nach [May21]

Wird nach Durchlauf des Cluster-Algorithmus als Abbruchkriterium eine Distanzgrenze von 10,0 gewählt, so resultieren drei Cluster, die den drei eingebrachten Schädigungsgraden 0° / 45° / 90° entsprechen. Abb. 8.21 zeigt die Messdaten der berechneten Cluster in den Dimensionen Mag_B und fuzzDist.

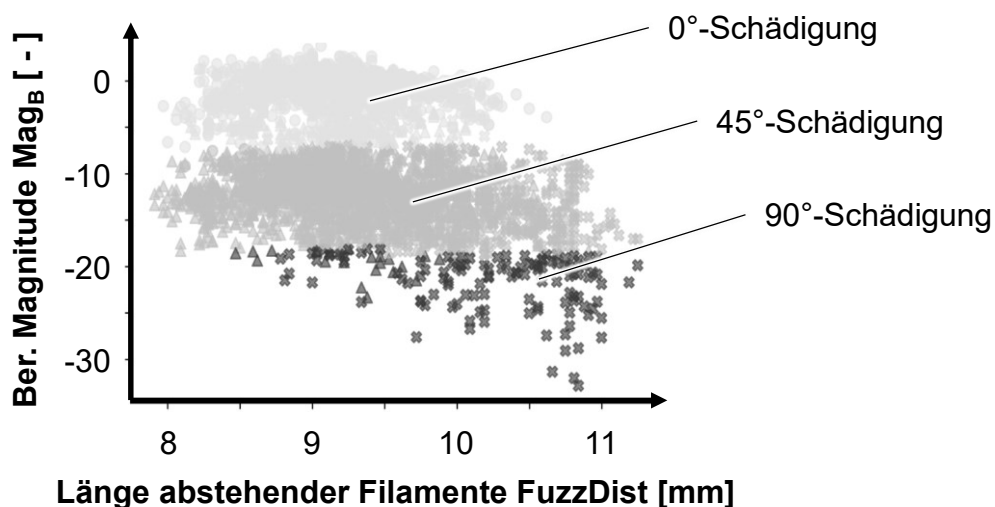


Abb. 8.21: Geclusterte, zweidimensionale Messdaten

Tab. 8.7 stellt die mittels Cluster-Analyse bestimmten Schädigungsgrade den real eingebrachten Schädigungsgraden der Testdatensätze gegenüber und gibt jeweils die Klassifizierungsgenauigkeit über die Anteile der korrekt zugeordneten Datenpunkte an.

Tab. 8.7: Zuordnung der realen Schädigungsgrade zu den mittels Cluster-Analyse vorhergesagten Schädigungsgrade [May21]

		Über Cluster-Analyse bestimmter Schädigungsgrad		
		Kein Schädigungsgrad	Mittlerer Schädigungsgrad	Hoher Schädigungsgrad
Realer Schädigungsgrad	0°	98,8 %	1,2 %	0 %
	45°	14,1 %	84,1 %	1,8 %
	90°	4,4 %	85,9 %	9,7 %
Mittlere Klassifizierungsgenauigkeit 64,2 %				

Die Messwerte ohne Schädigung werden mit einer Genauigkeit von 98,8 % besonders exakt vorhergesagt, während bei mittlerer Schädigung immerhin 84,1 % der Datenpunkte vom Cluster-Algorithmus der korrekten Schädigungs-klasse zugeordnet werden. Bei hohen Schädigungsgraden werden lediglich 9,7 % der Datenpunkte korrekt durch den Algorithmus klassifiziert. Dies resultiert aus dem größeren Abstand zwischen den einzelnen Datenpunkte bei eingebrachter 90°-Schädigung, da diese Messwerte im Vergleich zu den Werten der 0°- und 45°-Schädigung stärker streuen. Der hohe Schädigungsgrad wird damit durch den Cluster-Algorithmus hauptsächlich dem mittleren Schädigungsgrad zugeordnet. Damit kann durch den Cluster-Algorithmus zwar eine gute Unterscheidung zwischen geschädigt/ungeschädigt getroffen werden, jedoch wird die Abstufung zwischen mittlerer und starker Schädigung kaum erkannt. Im Mittel verfügt der Cluster-Algorithmus über eine Klassifizierungsgenauigkeit von 64,2 %.

8.3.5 Hierarchische Cluster-Analyse von realen Schädigungsgraden

Dem entwickelten Cluster-Algorithmus werden nun die Datensätze auffälliger Spulen der realen Produktion vorgelegt (Kap. 8.1.2). Es werden analog der entwickelte Cluster-Algorithmus (Tab. 8.6) und die Messwertkombination aus bereinigter Magnitude Mag_B und maximaler Länge abstehender Filamente fuzz-Dist verwendet.

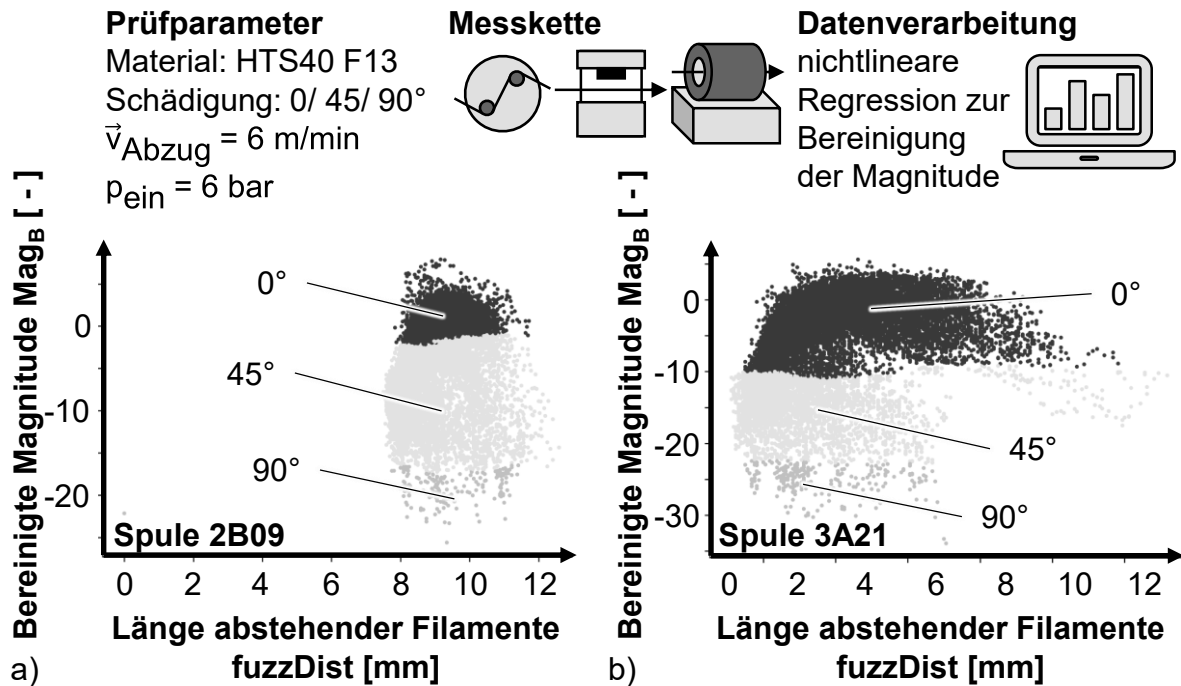


Abb. 8.22: Cluster-Analyse auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mit a) Spule 2B09 und b) Spule 3A21

Der Großteil der beiden Datensätze der Spulen 2B09 und 3A21 wird den Schädigungsklassen 0° und 45° zugeordnet. Dies ist konsistent mit den Beobachtungen der Testdaten (Kap. 8.3.4) und entspricht den Erwartungen, da ein Schädigungsgrad von 90° einem stark geschädigten Roving entspricht und in der realen Produktion kaum auftritt. Bei Betrachtung der Cluster-Größen (Abb. 8.23) entfallen nur jeweils rund 1 % auf den Schädigungsgrad 90°.

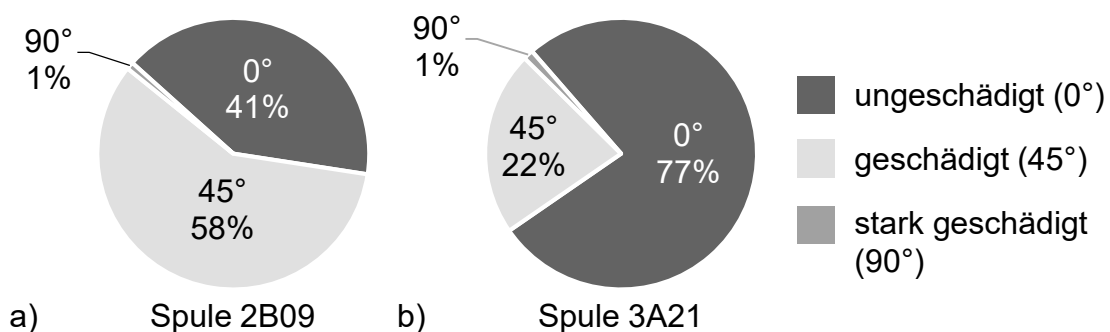


Abb. 8.23: Cluster-Größe der auffälliger Spulen a) 2B09 und b) 3A21

Im direkten Vergleich entfallen für Spule 2B09 41 % auf den Schädigungsgrad 0° und etwa 58 % auf den Schädigungsgrad 45°. Dementgegen werden bei

Spule 3A21 77 % der Messwerte als 0°-Schädigung klassifiziert und nur 22 % als 45°-Schädigung. Damit weist Spule 3A21 gemäß der Cluster-Analyse einen deutlich höheren Anteil an ungeschädigten Bereichen auf als Spule 2B09 und müsste somit in der Qualität höher bewertet werden. Dies entspricht nicht den Erwartungen und ist nicht konsistent mit den bisher gefundenen Ergebnissen.

8.4 Statistische Prozesskontrolle mittels Qualitätsregelkarte

8.4.1 Definition und Motivation

Qualitätsregelkarten (QRK) gehören zu den meistgenutzten Methoden der statistischen Prozesskontrolle (Statistical Process Control, SPC), bei der Produktionsprozesse auf Basis statistischer Verfahren überwacht und angepasst werden. Die zugehörigen Methoden wurden bereits in den 1930er Jahren entwickelt, um die Gleichförmigkeit und damit die Zuverlässigkeit von Produkten in industriellen Produktionsprozessen zu steigern [She30]. Grundlage für die Qualitätsüberwachung mittels SPC ist die messtechnische Erfassung qualitätsrelevanter Messgrößen, die anschließend ausgewertet und aufbereitet werden. Eine Auswertungsmöglichkeit bieten Qualitätsregelkarten, in denen der Verlauf statistischer Lage- oder Streuungsparameter, wie Mittelwert oder Standardabweichung, genutzt wird, um präventiv Abweichungen eines Produktionsprozesses zu identifizieren und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Tab. 8.8 zeigt verschiedene QRK für kontinuierliche Merkmale. [Bos20; Pro22; SP15]

Tab. 8.8 Qualitätsregelkarten kontinuierlicher Merkmale [Bos20; Pro22]

	Merkmal	Berechnung
Prozesslage	Rohwert	x_i
	Arithmetischer Mittelwert	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
	Median	$\tilde{x} = \begin{cases} x_{(n+1)/2} & \text{für } n \text{ ungrade} \\ 1/2 (x_{n/2} + x_{n/2+1}) & \text{für } n \text{ grade} \end{cases}$
Prozessstreuung	Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
	Spannweite	$R = \max(x_i) - \min(x_i)$

Abb. 8.24 zeigt exemplarisch eine $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte ($\bar{x}$ -QRK) mit oberer (OEG) und unterer Eingriffsgrenze (UEG). Liegt eine Stichprobe innerhalb der Eingriffsgrenzen, ist keine Maßnahme erforderlich. Liegt eine Stichprobe außerhalb der Eingriffsgrenzen, so wird damit eine Abweichung vom idealen Prozess identifiziert. In diesem Fall sind Gegenmaßnahmen erforderlich, um den Prozess zurück in den Idealzustand zu bringen. [SP15]

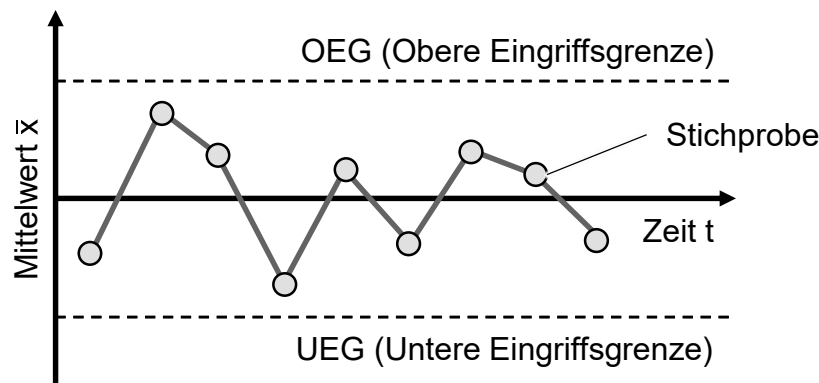


Abb. 8.24: Schema einer $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte nach [SP15]

Um eine Qualitätsregelkarte effizient einsetzen zu können, sind die Definition von Randbedingungen und ein stabiler Produktionsprozess notwendig. Eine in der Praxis übliche Randbedingung ist beispielsweise die Akzeptanz einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,0027$, was drei Standardabweichungen oder einem Konfidenzniveau von 99,73 % entspricht. Ein stabiler Produktionsprozess ist notwendig, um die stabile Lage μ_0 und die Standardabweichung σ_0 zu ermitteln, auf deren Basis die Eingriffsgrenzen der $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte berechnet werden. [Bos20; Pro22]

Vorteil der Verwendung von Qualitätsregelkarten ist, dass sowohl die Bedingungen dokumentiert werden, unter denen die Daten ermittelt wurden, als auch deren Reihenfolge. Insbesondere die zeitliche Dimension der Messwertreihenfolge ist eine grundlegende Information, die bei alternativen Auswertungsmethoden (KNN oder Cluster-Analyse) verloren geht. Die zeitliche Komponente ist ein wesentliches Merkmal, da bei der vorliegenden Messaufgabe über die Abzugsgeschwindigkeit die Zeit in die Lauflänge des Rovings umgerechnet und

eine Auffälligkeit einem Roving-Abschnitt zugeordnet werden kann. [Bos20; She30]

8.4.2 Auslegung einer Qualitätsregelkarte

Zur Auslegung der Qualitätsregelkarte wird zunächst das relevante Merkmal ausgewählt, das in der Qualitätsregelkarte dargestellt wird. Aufgrund der hohen Schwankung der Messwerte wird eine $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte gewählt. Der Mittelwert $\bar{x}$ fungiert hierbei als Tiefpassfilter und glättet den stark schwankenden Verlauf der Messwerte. Um dennoch kontinuierliche Aussagen aus der Qualitätsregelkarte abzuleiten, wird statt eines statischen ein gleitender Mittelwert (GMW) verwendet. Zu diesem Zweck wird der gleitende Mittelwert sukzessive erhöht und die resultierenden Klassifizierungsgenauigkeiten berechnet (Abb. 8.25). Als OEG/UEG für eine Klassifikation als 90°-Schadigungsgrad werden zunächst standardmäßig $\pm 3 \sigma$ gewählt, für eine Klassifikation als 45°-Schadigungsgrad analog zunächst $\pm 1,5 \sigma$. Abb. 8.25 zeigt die damit erzielbaren Genauigkeiten bei Variation des gleitenden Mittelwerts (GMW).

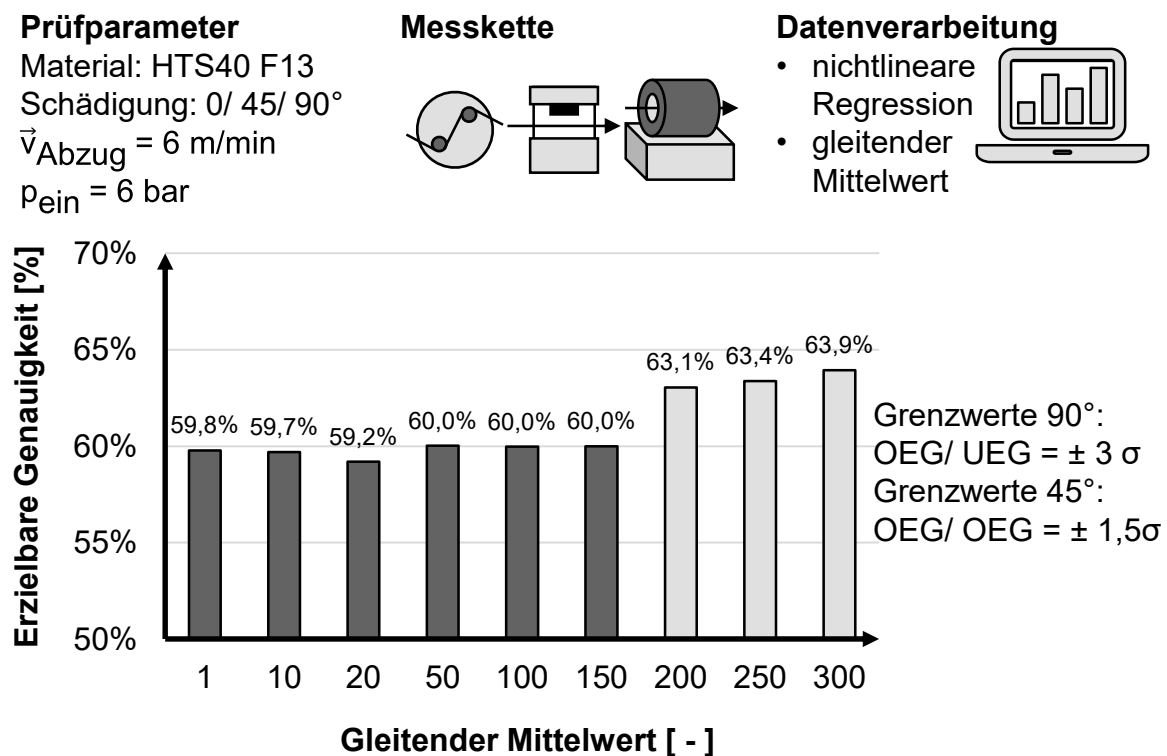


Abb. 8.25: Resultierende Klassifizierungsgenauigkeiten bei sukzessiver Erhöhung des gleitenden Mittelwerts (GMW)

Die höchsten Klassifizierungsgenauigkeiten zwischen 63,1 %, 63,4 % und 63,9 % werden mit einem gleitenden Mittelwert zwischen 200, 250 und 300 erzielt. Dies entspricht bei einer Datenrate des multimodalen Sensorsystems von 1 Hz und einer Abzugsgeschwindigkeit des Rovings von 6 m/min zwischen 20 m, 25 m und 30 m Roving. Aus der Industrie ist bekannt, dass eine Klassifizierung pro 25 m Roving oder weniger ausreichend ist, sodass im weiteren Verlauf ein GMW von 250 verwendet wird.¹⁶

Anschließend erfolgt die Berechnung der oberen (OEG) und unteren Eingriffsgrenzen (UEG). Für $\bar{x}$ -QRKs werden OEG und UEG nach (8.1) berechnet, wenn die zugrunde liegenden Messwerte normalverteilt sind [Bos20; Pro22].

$$\left. \begin{array}{l} \text{OEG} \\ \text{UEG} \end{array} \right\} = \mu_0 \pm 3 \frac{\sigma_0}{\sqrt{n_s}} \quad (8.1)$$

mit:

OEG	Obere Eingriffsgrenze	[-]
UEG	Untere Eingriffsgrenze	[-]
μ_0	Lage des stabilen Prozesses	[-]
σ_0	Standardabweichung des stabilen Prozesses	[-]
n_s	Stichprobenumfang	[-]

Die Lage des stabilen Prozesses liegt bei $\mu_0 = 0$, da die bereinigte Magnitude Mag_B für einen ungeschädigten CF-Roving den Wert Null annimmt. Die Standardabweichung des stabilen Prozesses liegt für die Trainingsdaten bei $\sigma_0 = 8,95$ und der Stichprobenumfang beträgt 250, da ein gleitender Mittelwert von 250 verwendet wird. Damit folgt nach Gleichung (8.1) für $\text{OEG/UEG} \approx \pm 0,19\sigma_0 \approx \pm 1,70$. Um zu überprüfen, ob die Trainingsdaten (Kap. 8.1.1) normalverteilt sind, wird zunächst das Histogramm der bereinigten Magnituden betrachtet (Abb. 8.26).

¹⁶ Virtuelles Projekttreffen zum ZIM EddySCARF (ZF4558940) mit Christine Stamm, Manager Technical Service, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Pawel Latasiewicz, System Development NCF Inspection, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Dr.-Ing. Dirk Feltin, Geschäftsführer, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen und Richard Kupke, Prokurist, SURAGUS GmbH, Dresden, am 04.08.2021

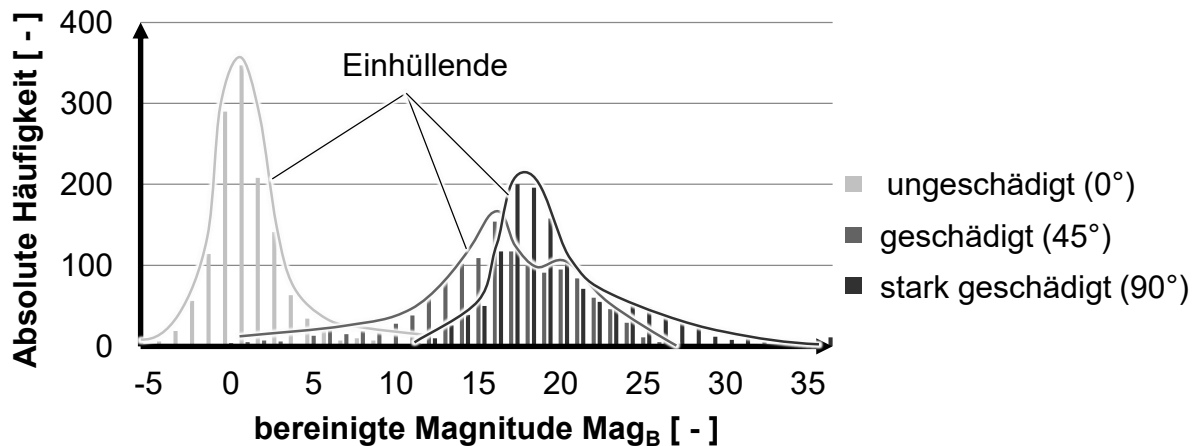


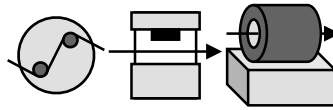
Abb. 8.26: Histogramme der bereinigten Magnituden Mag_B der Trainingsdaten mit eingezeichneten Einhüllenden

Die Histogramme der drei Schädigungsgrade der Trainingsdaten induzieren, dass keiner der Datensätze normalverteilt ist. So ist die Einhüllende des 0° -Datensatzes linksschief, während die Einhüllenden der Schädigungsgrade 45° und 90° mehrere Maxima zeigen. Zur Verifizierung wird der Kolmogoroff-Smirnow-Test verwendet. Mit dem Kolmogoroff-Smirnow-Test wird die Nullhypothese überprüft, ob die Verteilung zweier Stichproben identisch ist, oder ob alternativ eine Verteilung mit einer theoretischen Verteilung, wie der Normalverteilung, identisch ist. Der Kolmogoroff-Smirnow-Test verwirft mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für alle drei Schädigungsgrade die Nullhypothese, sodass für alle drei Schädigungsgrade die Alternativhypothese gilt und die Verteilungen statistisch abgesichert als nicht normalverteilt eingestuft werden. [KJN99; Zha21]

Bei nicht normalverteilten Stichproben können größere Abweichungen von der stabilen Prozesslage auftreten, sodass bei Qualitätsregelkarten für nicht normalverteilte Prozesse größere Eingriffsgrenzen verwendet werden dürfen [Pro22]. Für eine sukzessive Steigerung der Eingriffsgrenzen OEG/OEG zeigt Abb. 8.27 die erzielbaren Klassifizierungsgenauigkeiten als Vielfache der Standardabweichung des stabilen Prozesses σ_0 für die Klassifizierung in die 45° und 90° -Schädigungsklasse.

Prüfparameter

Material: HTS40 F13
 Schädigung: 0/ 45/ 90°
 $\vec{v}_{\text{Abzug}} = 6 \text{ m/min}$
 $p_{\text{ein}} = 6 \text{ bar}$

Messkette**Datenverarbeitung**

- Nichtlineare Regression
- Gleitender Mittelwert
- Variation von OEG und UEG

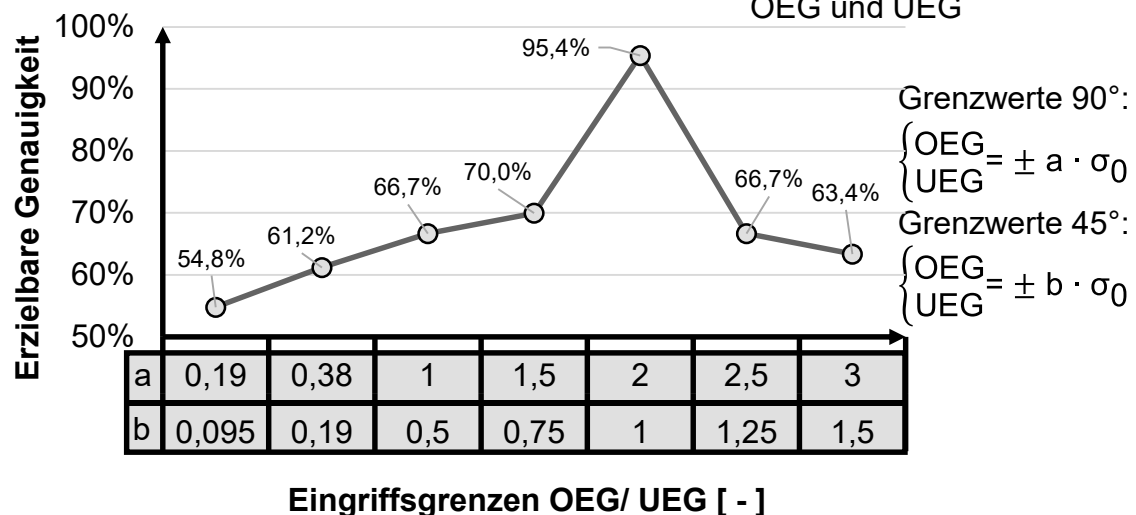


Abb. 8.27: Erzielbare Genauigkeiten bei Variation von OEG und UEG

Die höchste, erzielbare Klassifizierungsgenauigkeit wird mit den Eingriffsgrenzen $\text{OEG/UEG} = \pm 2\sigma_0$ für die 90°-Schädigungsklasse und mit $\text{OEG/UEG} = \pm 1\sigma_0$ für die 45°-Schädigungsklasse erzielt. Diese Eingriffsgrenzen werden im Folgenden verwendet. Tab. 8.9 zeigt die Eigenschaften der final verwendeten Qualitätsregelkarte.

Tab. 8.9: Eigenschaften der final verwendeten Qualitätsregelkarte (QRK)

Eigenschaft	Ausprägung	Beschreibung
Dargestelltes Merkmal	$\bar{x}$ -QRK	Glättung der stark streuenden Messwerte
Gleitender Mittelwert	250	Entspricht einer Klassifizierung von 25 m CF-Roving → von Industrie gefordert
Eingriffsgrenze 45°-Schädigungsklasse	$\text{OEG/UEG} = \pm 1\sigma_0$	Höchste, erzielbare Klassifizierungsgenauigkeit
Eingriffsgrenze 90°-Schädigungsklasse	$\text{OEG/UEG} = \pm 2\sigma_0$	

Im Folgenden wird daher eine Qualitätsregelkarte vom Typ $\bar{x}$ -QRK mit einem gleitenden Mittelwert von 250 und den Eingriffsgrenzen $\pm 1\sigma_0$ bzw. $\pm 2\sigma_0$ für die 45°- bzw. 90°-Schädigungsklasse verwendet.

8.4.3 $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte für im Labor manipulierte Schädigungsgrade

Zunächst erfolgt die Auswertung des Datensatzes mit im Labor eingebrachter, definierter Schädigung (Kap. 8.1.1) anhand der ausgelegten $\bar{x}$ -QRK (Tab. 8.9). Zur Bestimmung der Klassifizierungsgenauigkeiten werden die realen Schädigungsgrade mit der Klassifizierung durch die Qualitätsregelkarte verglichen und die Anteile der korrekt klassifizierten Schädigungsgrade berechnet (Tab. 8.10).

Tab. 8.10: Vergleich der realen Schädigungsgrade mit der Auswertung über eine $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte

		Klassifizierung mittels $\bar{x}$ -QRK		
		0°-Schädigungs- klasse	45°-Schädigungs- klasse	90°-Schädigungs- klasse
Realer Schädigungs- grad	0°	100,0 %	0,0 %	0,0 %
	45°	0,0 %	95,5 %	4,5 %
	90°	0,0 %	9,2 %	90,8 %
Mittlere Klassifizierungsgenauigkeit 95,4 %				

Die Messwerte ohne eingebrachte Schädigung (0°) werden zu 100 % korrekt klassifiziert. Für den eingebrachten 45°-Schädigungsgrad liegt die Klassifizierungsgenauigkeit bei 95,5 % und nimmt für den 90°-Schädigungsgrad auf 90,8 % ab. Dies entspricht den Erwartungen, da mit zunehmendem Schädigungsgrad die Messwerte stärker streuen und schwerer einer Schädigungs-klasse zugeordnet werden können. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Unterscheidung geschädigt/ungeschädigt stets zu 100 % korrekt erfolgt und falsche Zuordnung nur zwischen den Schädigungsklassen 45° und 90° auftreten. Dies ist auf die Verwendung des gleitenden Mittelwerts zurückzuführen, der die hohe Streuung der Messwerte ausgleicht und das Schädigungsniveau über einer Lauflänge von 25 m untersucht, sodass kurzweilige Qualitätsschwankungen kompensiert werden.

8.4.4 $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte für reale Schädigungsgrade

Nun werden der ausgelegten $\bar{x}$ -QRK die Datensätze auffälliger Spulen der realen Produktion (Kap. 8.1.2) vorgelegt. Es wird ein gleitender Mittelwert von 250

verwendet (Tab. 8.9) und die Eingriffsgrenzen in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Grundgesamtheit bestimmt. Es gelten die Eingriffsgrenzen $OEG/UEG = \pm 2\sigma_0$ für die 90° -Schädigungsklasse und mit $OEG/UEG = \pm 1\sigma_0$ für die 45° -Schädigungsklasse mit $\sigma_0 = 4,77$. Abb. 8.25 zeigt die über die $\bar{x}$ -QRK klassifizierten Anteile der Schädigungsklassen.

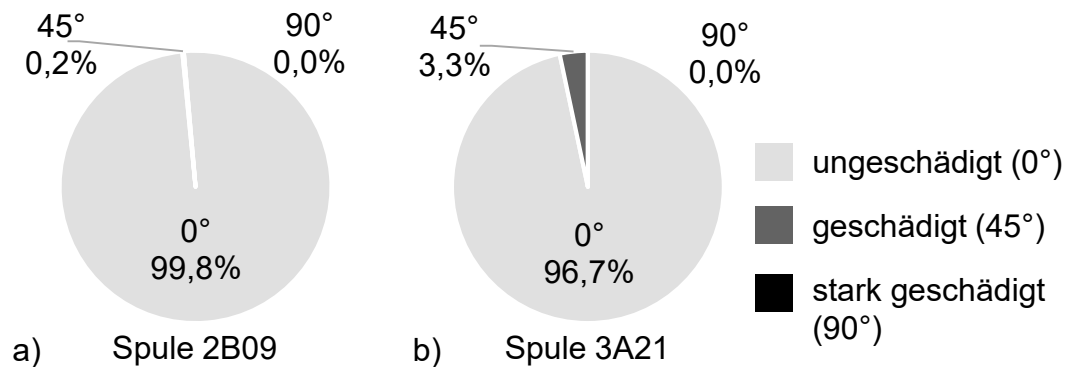


Abb. 8.28: Anteile der klassifizierten Schädigungsklassen auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mittels $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte

Sowohl für Spule 2B09 als auch für Spule 3A21 werden keine Messwerte der 90° -Schädigungsklasse zugeordnet. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die 90° -Schädigungsklasse einem stark geschädigten Roving entspricht und in der realen Produktion in der Regel nicht auftritt. Im direkten Vergleich der beiden Spulen entfallen für Spule 2B09 99,8 % aller Werte auf die Schädigungsklasse 0° und lediglich 0,2 % auf die Schädigungsklasse 45° . Im Gegenzug entfallen für die Spule 3A21 nur 96,7 % auf die Schädigungsklasse 0° und 3,3 % auf die Schädigungsklasse 45° . Gemäß dieser Klassifikation verfügt Spule 2B09 über die höhere Qualität. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen und ist konsistent mit den bisher gefundenen Ergebnissen.

8.5 Nutzwertanalyse der verschiedenen Auswertungsmethoden

Die Bewertung der Auswertungsmethoden vorwärts gerichtetes KNN (Kap. 8.2), hierarchische Cluster-Analyse (Kap. 8.3) und $\bar{x}$ -QRK (Kap. 8.4) erfolgt in einer Nutzwertanalyse. Dazu werden relevante Bewertungskriterien festgelegt, mittels paarweisen Vergleichen priorisiert und die benötigten Gewichtungen G_i gemäß Gleichung (4.6) berechnet (Tab. 8.11) [VDI98].

Tab. 8.11: Paarweiser Vergleich zur Priorisierung der Bewertungskriterien und Berechnung der Gewichte G_i nach [Zho21]

		Kriterien									
		Vorhersagegenauigkeit	Darstellung zeitlicher Verlauf	Interpretationsaufwand	Auswertungsgeschwindigkeit	Mehrdimensionale Datenauswertung	Lernfähigkeit und Aktualisierbarkeit	Programmieraufwand	Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	Summe	Gewichtung G_i
Kriterien	Vorhersagegenauigkeit	■	2	2	2	2	2	2	2	→ 14	→ 8 ■
	Darstellung zeitlicher Verlauf	0	■	2	2	2	2	2	2	→ 12	→ 7 ■
	Interpretationsaufwand	0	0	■	1	1	2	1	2	→ 7	→ 4 ■
	Auswertungsgeschwindigkeit	0	0	1	■	1	1	2	2	→ 7	→ 4 ■
	Mehrdimensionale Datenauswertung	0	0	1	1	■	2	2	1	→ 7	→ 4 ■
	Lernfähigkeit und Aktualisierbarkeit	0	0	0	1	0	■	1	1	→ 3	→ 1 ■
	Programmieraufwand	0	0	1	0	0	1	■	1	→ 3	→ 1 ■
	Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	0	0	0	0	1	1	1	■	→ 3	→ 1 ■

Hierbei beschreibt die Vorhersagegenauigkeit den Anteil korrekt klassifizierter Schädigungsgrade des Testdatensatzes und ist mit einer Gewichtung von acht das zentrale Bewertungskriterium. Die Darstellung als zeitlicher Verlauf wird mit einer Gewichtung von sieben ebenfalls hoch gewichtet, um Schädigung anhand der Abzugsgeschwindigkeit eindeutig einer Laufkoordinate des Rovings zuzuordnen und eine Echtzeitauswertung zu ermöglichen. Der Interpretationsaufwand beschreibt, wie leicht die Ausgabewerte der Auswertungsmethoden genutzt werden können. Die Auswertungsgeschwindigkeit skaliert mit der benötigten Rechenleistung und ist ebenfalls eine Bedingung für eine mögliche Echtzeitauswertung. Die Möglichkeit einer mehrdimensionalen Auswertung ist für die parallele Auswertung mehrerer Messgrößen des multimodalen Sensorsystems relevant, da hierüber Vorteile erzielt werden können. Interpretationsaufwand, Auswertungsgeschwindigkeit und mehrdimensionale Datenauswertung werden daher mit einer Gewichtung von vier mittelstark gewichtet. Die Lernfähigkeit des Systems beschreibt die selbständige Anpassung der Auswertungsmethode und

der Programmieraufwand ist ein Maß für die Komplexität und damit die Umsetzbarkeit der jeweiligen Auswertungsmethode. Die Nachvollziehbarkeit beschreibt, inwieweit die Ergebnisse der Klassifizierung plausibilisiert werden können. Lernfähigkeit, Programmieraufwand und Nachvollziehbarkeit sind ebenfalls relevante Eigenschaften, die im Vergleich zu den übrigen Bewertungskriterien mit einer Gewichtung von eins jedoch weniger stark gewichtet werden, da sie nicht direkt die technische Funktionalität der Auswertung beeinflussen. Bezüglich aller Bewertungskriterien werden die Eigenschaften der verschiedenen Auswertungsmethoden in Tab. 8.12 dargestellt.

Tab. 8.12: Eigenschaften der Auswertungsmethoden bezüglich der Bewertungskriterien nach [Zho21]

	Auswertungsmethode		
	Vorwärts gerichtetes KNN	Hierarchische Cluster-Analyse	$\bar{x}$ -QRK
Vorhersagegenauigkeit	83,4 %	64,2 %	95,4 %
Darstellung zeitlicher Verlauf	Ja	Nein	Ja
Auswertungsgeschw./ Rechnerleistung	Gering/ hoch	Mittel/ mittel	Hoch/ gering
Interpretationsaufwand	Mittel	Mittel	Gering
Mehrdimensionale Datenauswertung	beliebig	zweidimensional	eindimensional
Programmiieraufwand	Hoch	Mittel	Gering
Lernfähigkeit	Gegeben	Möglich	Möglich
Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	Nicht nachvollziehbar	Sehr gut nachvollziehbar	Sehr gut nachvollziehbar

Auf Basis des paarweisen Vergleichs (Tab. 8.11) und der Eigenschaften der Auswertungsmethoden (Tab. 8.12) wird der Nutzwert als Produkt aus Gewichtung und Erfüllungsgrad berechnet und für jede Auswertungsmethode über alle Bewertungskriterien summiert. Die Nutzwertanalyse kann Anhang B VII entnommen werden. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse zeigt Abb. 8.29.

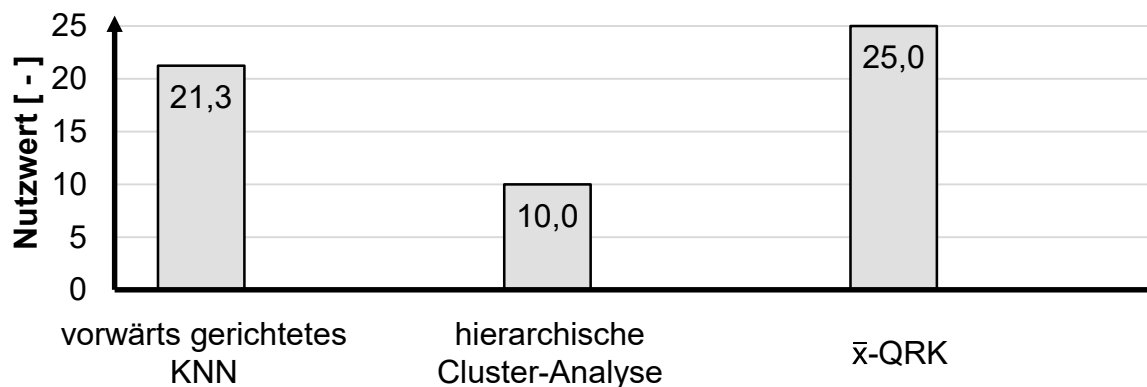


Abb. 8.29: Nutzwerte der verschiedenen Auswertungsmethoden

Die Qualitätsregelkarte verfügt mit einem Wert von 25 über den höchsten Nutzwert. Dies ist insbesondere auf die höchste Klassifizierungsgenauigkeit und die Fähigkeit zur Ergebnisdarstellung im zeitlichen Verlauf zurückzuführen. Auch die hohe Auswertungsgeschwindigkeit, die aus dem simplen Aufbau der Qualitätsregelkarte und der damit verbundenen, niedrigen Rechenleistung resultiert, trägt zusammen mit der einfachen Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu dem hohen Nutzwert bei. Nachteile der Qualitätsregelkarte liegen in der nur eindimensionalen Datenauswertung, die eine geeignete Datenvorverarbeitung notwendig macht, sowie in einer nur bedingt möglichen Lernfähigkeit. Die geeignete Datenvorverarbeitung ist durch das entwickelte, nichtlineare Regressionsmodell zur Berechnung der bereinigten Magnitude Mag_B gegeben. Die bedingte Lernfähigkeit wird in der industriellen Praxis durch die separate Bestimmung der oberen und unteren Eingriffsgrenzen für jeden CF-Typ kompensiert.

KNN verfügen mit einem Wert von 21,3 ebenfalls über einen hohen Nutzwert, der aus der Kombination von hoher Klassifizierungsgenauigkeit, einer Darstellung der Ergebnisse als zeitlicher Verlauf sowie der Möglichkeit zur mehrdimensionalen Datenauswertung resultiert. Neben der Lernfähigkeit der KNN ist insbesondere die Fähigkeit zur mehrdimensionalen Datenauswertung ein Vorteil dieser Auswertungsmethode, da hierdurch bei einer Erweiterung des multimodalen Sensorsystems zusätzlich Messwerte mit wenig Aufwand durch das KNN parallel mit ausgewertet werden können. Nachteile des KNN sind die hohe, zur Auswertung notwendige Rechenleistung sowie eine kaum gegebene Nachvollziehbarkeit der Klassifizierung.

Den niedrigsten Nutzwert mit einem Wert von 10 weist der hierarchische Cluster-Algorithmus auf. Dies resultiert insbesondere aus der niedrigen Klassifizierungsgenauigkeit sowie der nicht vorhandenen Fähigkeit, die Ergebnisse im zeitlichen Verlauf darzustellen.

8.6 Fazit

Die Auswertung der Messdaten des multimodalen Sensorsystems ist über die gewählten Ansätze eines vorwärts gerichteten KNN (Kap. 8.2), einer hierarchischen Cluster-Analyse (Kap. 8.3) sowie einer $\bar{x}$ -QRK (Kap. 8.4) prinzipiell möglich. Abb. 8.30 visualisiert die Vor- und Nachteile der verschiedenen Auswertungsmethoden.

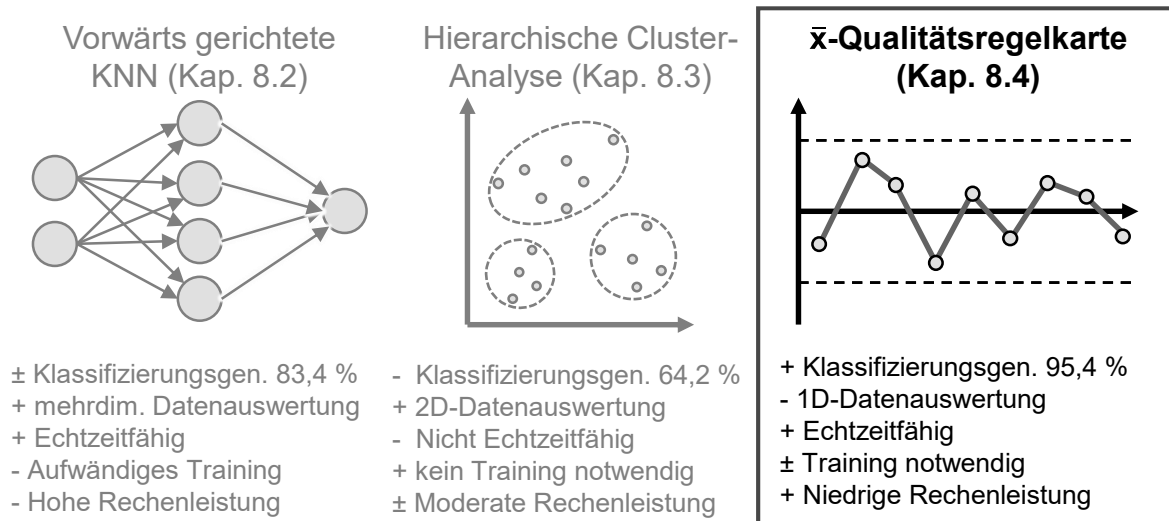


Abb. 8.30: Vor- und Nachteile der verschiedenen Auswertungsmethoden und $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte als geeignetste Methode

Die höchste Klassifizierungsgenauigkeit von 95,4 % zeigt die $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte, die zudem simpel aufgebaut und leicht nachvollziehbar ist. Auch das KNN zeigt mit 83,4 % eine hohe Klassifizierungsgenauigkeit, ist jedoch rechenintensiv und benötigt als Methode des überwachten Lernens ein aufwändiges, vorheriges Training. Die Annahme, bei hierarchischen Cluster-Algorithmen als Methode des unüberwachten Lernens auf aufwändiges, vorheriges Training zu verzichten, kann nicht bestätigt werden. So wird über hierarchische Cluster-Algo-

rithmen eine Klassifizierungsgenauigkeit von lediglich 64,2 % erzielt. Zudem erzeugt der gewählte Cluster-Algorithmus per Definition stets drei Qualitätsklassen, unabhängig davon, ob drei Schädigungsstufen vorliegen oder nicht. Dies wird als Nachteil dieser Auswertungsmethode identifiziert, sodass von einer Auswertung der kombinierten Impedanz- und Kamera-Werte über hierarchische Cluster-Algorithmen abgeraten wird. Für das vorliegende Klassifizierungsproblem wird daher die $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte als geeignetste Auswertungsmethode identifiziert, während die Auswertung über vorwärts gerichtete KNN ein hohes Potenzial für die Auswertung mehrdimensionaler Messwerte liefert.

Die $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte erzielt eine Klassifizierungsgenauigkeit von bis zu 95 % und ist damit eine geeignete Auswertungsmethode für die kombinierten Messwerte des multimodalen Sensorsystems.

9 Ausbreitung von Wirbelströmen in Carbonfaser-Rovings

Aus den bisherigen Ergebnissen der Sensorentwicklung (Kap. 7) und den Auswertungsansätzen der multimodalen Messgröße (Kap. 8) wird in diesem Kapitel eine schematische Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in CF-Rovings abgeleitet (Abb. 9.1).

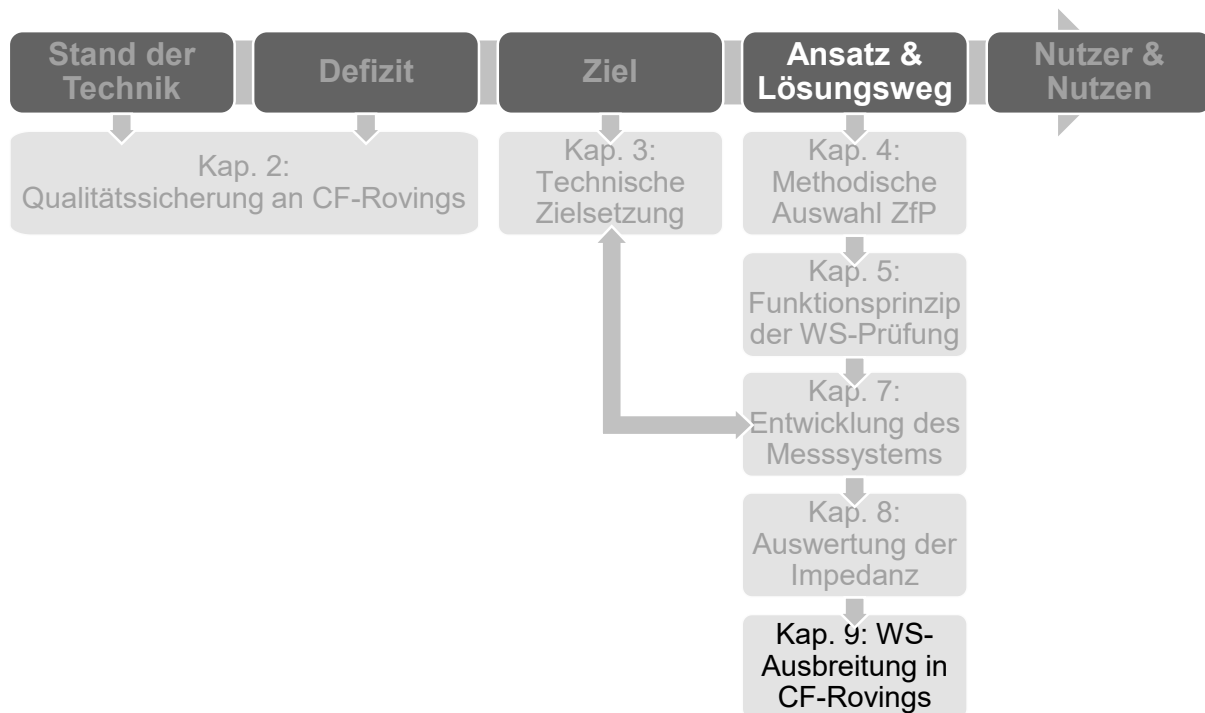


Abb. 9.1: Einordnung von Kap. 9 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Bisher wird mit dem multimodalen Sensorssystem die Impedanzänderung eines CF-Rovings bei induzierter Schädigung gemessen (Kap. 7) und anschließend über eine geeignete Datenverarbeitung ausgewertet (Kap. 8). Von der verarbeiteten Messgröße wird auf die Faserschädigung, bzw. auf die Qualität des vermessenen CF-Rovings geschlossen. Nicht betrachtet wird hierbei die Ursache der Impedanzänderung, die aus der physischen Änderung im CF-Roving durch eingebrachte Schädigung resultiert (Abb. 9.2 a). Dieses Vorgehen ist zielführend, da es die Komplexität der zu lösenden Messaufgabe reduziert und für die Entwicklung des multimodalen Sensorsystems nicht relevant ist. Dennoch verbleibt eine Wissenslücke bezüglich der wirkenden, physischen Effekte, sodass das Messergebnis nicht auf Plausibilität überprüft werden kann.

Diese Lücke wird geschlossen, indem nun der umgekehrte Ansatz verfolgt und der Einfluss der Faserschädigung auf das resultierende Impedanzsignal untersucht wird. Dazu wird eine Hypothese zur Ausbreitung der Wirbelströme innerhalb des CF-Rovings in Abhängigkeit der Faserschädigung aufgestellt und durch Literatur, Versuche und statistische Hypothesentests gestützt und bewertet (Abb. 9.2 b). Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine schematische Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings. Auf Basis dieser schematischen Darstellung wird das Verständnis der zugrundeliegenden, physischen Änderung und der wirkenden physikalischen Effekte innerhalb eines CF-Rovings bei Schädigung vertieft (Abb. 9.2). Damit werden die beobachteten Impedanzänderungen plausibilisiert und nachvollzogen.

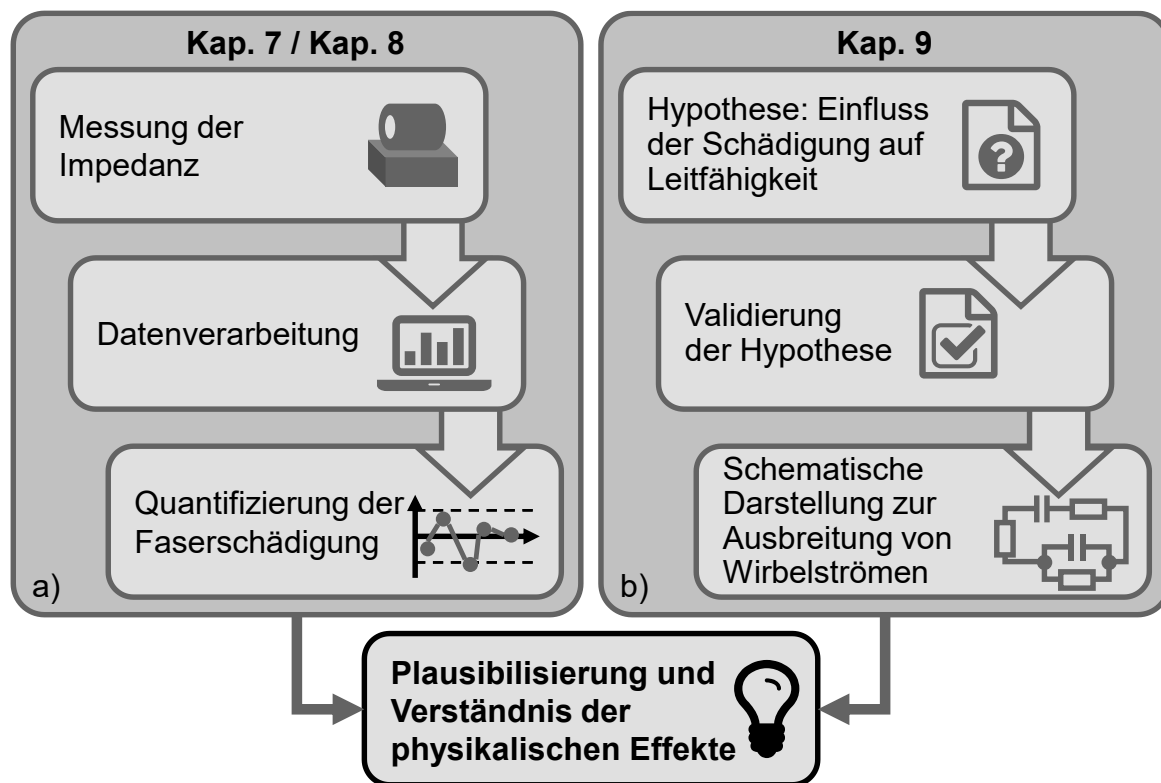


Abb. 9.2: Kombination der a) bisherigen Ergebnisse mit b) dem Einfluss der Faserschädigung auf das Impedanzsignal zum Verständnis der wirkenden, physikalischen Effekte

Zu diesem Zweck wird die in der Literatur beschriebene, klassische Wirbelstromtheorie anhand eigener Untersuchungen für die vorliegende Fragestellung adaptiert (Kap. 9.1). Hieraus wird eine Hypothese zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings abgeleitet (Kap. 9.2), die anschließend

experimentell untersucht und statistisch analysiert wird (Kap. 9.3). Abschließend wird aus den Versuchsergebnissen eine schematische Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in CF-Rovings abgeleitet (Kap. 9.4) und ein Fazit gezogen (Kap. 9.5).

9.1 Adaption der klassischen Wirbelstromtheorie

9.1.1 Klassische Wirbelstromtheorie

Messdaten von Wirbelstromsensoren werden typischerweise als Ortskurve dargestellt. Eine Ortskurve bezeichnet in der Systemtheorie den Verlauf einer Wechselstromgröße (z.B. der Impedanz) in der komplexen Ebene in Abhängigkeit von einer reellen Variablen (z.B. der Kreisfrequenz ω) [MR17]. Abb. 9.3 zeigt die Leitfähigkeitsortskurve, auch Leitfähigkeitskurve, der Impedanz für die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$, normiert auf die Impedanz im freien Raum $|Z_0|$. Die gezeigte Ortskurve gilt für Proben mit isotroper Leitfähigkeit, bei denen die Probendicke im Verhältnis zur Eindringtiefe hoch ist [Ste10].

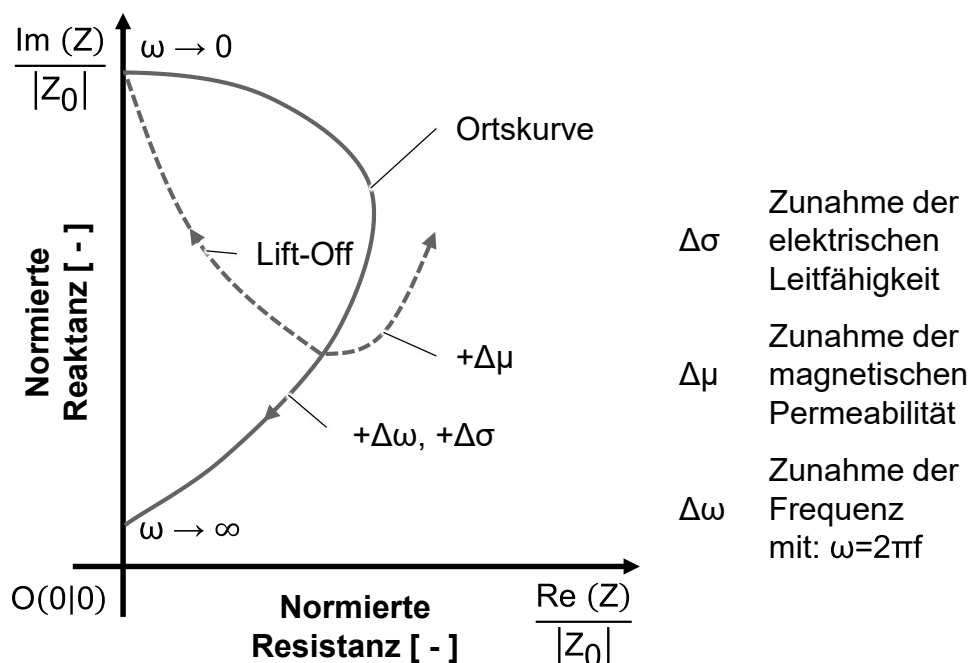


Abb. 9.3: Leitfähigkeitsortskurve der Impedanz in der normierten, komplexen Ebene nach [Gäb17; GGV11; Hel13; Ste10; Yas08]

Mit zunehmender Frequenz ω folgt die Impedanz Z der Ortskurve und liegt für die beiden Grenzwerte $\omega \rightarrow 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ auf der imaginären Achse. Bei konstanter Frequenz ω und zunehmende elektrische Leitfähigkeit σ folgen die resultierenden Impedanzen ebenfalls der Ortskurve, während bei konstanter Frequenz ω und zunehmender magnetischer Permeabilität μ die Ortskurve in Richtung positiver Imaginär- und Realachse verschoben wird. Zusätzlich wird die Änderung der Impedanz bei Zunahme des Lift-Offs, dem Abstand zwischen Spule und Prüfkörper, in Richtung der Impedanz im freien Raum $|Z_0|$ dargestellt. Für eine konstante Frequenz ω zeigt Abb. 9.4 die Impedanzen verschiedener Werkstoffe mit zunehmender Leitfähigkeit in der normierten, komplexen Ebene. Da für die magnetische Permeabilität μ_r der meisten Werkstoffe $\mu_r = 1$ gilt, wird die Orientierung entlang der Ortskurve maßgeblich durch die Leitfähigkeit σ bestimmt. [Gäb17; Yas08]

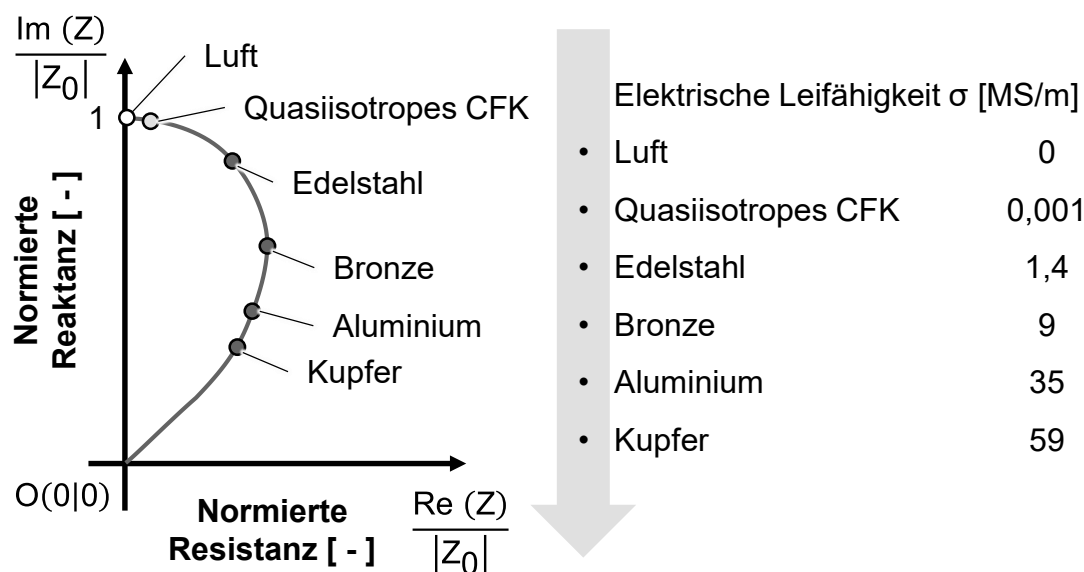


Abb. 9.4: Schematische Anordnung der Impedanzen verschiedener Werkstoffe in der komplexen Ebene für typische Leitfähigkeiten bei konstanter Frequenz nach [Hel13; HUG22; KHK13; Moo15]

9.1.2 Adaption auf Durchlaufsensoren

Die gezeigten Ortskurven (Abb. 9.3 und Abb. 9.4) gelten für Werkstoffe mit isotroper Leitfähigkeit unter Verwendung eines Transmissions- bzw. eines Halbtransmissionssensors (Abb. 5.13). Es wurde gezeigt, dass Sensoren vom Typ Durchlaufsensor für die Messung an CF-Rovings geeignet sind (Kap. 5.7 und

Kap. 7.2.2). Aus der unterschiedlichen Spulenanordnung zwischen Halbtransmissions- und Durchlaufsensoren resultieren unterschiedliche Orientierungen der Wirbelströme im Prüfkörper. Abb. 9.5 zeigt die resultierende, ideale Orientierung der Wirbelströme für Prüfkörper mit isotroper Leitfähigkeit für einen Durchlauf- und einen Halbtransmissionssensor.

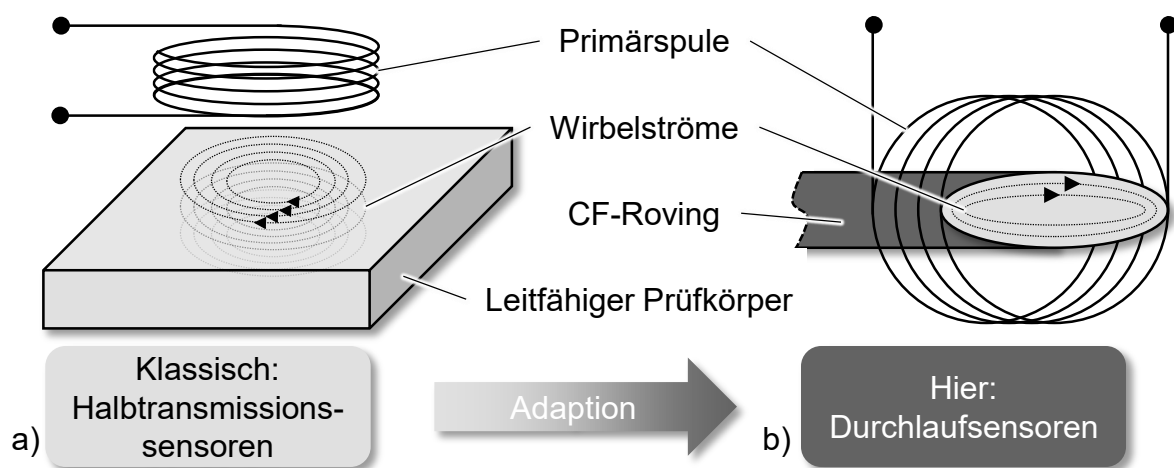


Abb. 9.5: Wirbelstromorientierung in Abhängigkeit von der Spulenanordnung für a) Halbtransmissions- und b) Durchlaufsensoren

Nun wird überprüft, wie die klassische Wirbelstromtheorie auf die Messungen mit dem verwendeten Durchlaufsensor (vgl. Kap. 7) übertragen werden kann. Hierfür werden Proben aus unterschiedlichen Werkstoffen, aber mit gleichen geometrischen Abmessungen gefertigt. Die gefertigten Proben werden passgenau in den Wirbelstromsensor eingesetzt (Abb. 9.6).

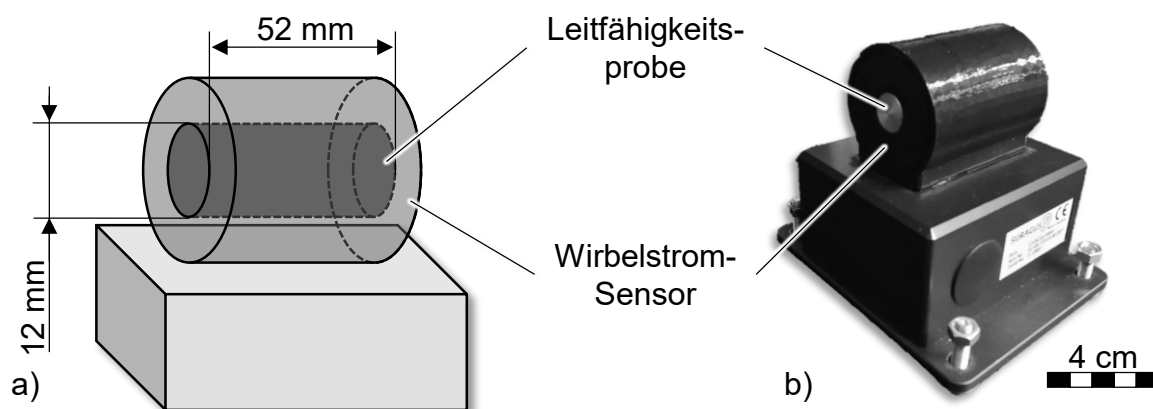


Abb. 9.6: a) Skizze und b) Bild der in den Wirbelstromsensor eingesetzten Leitfähigkeitsproben

Hierdurch wird eine hohe Positioniergenauigkeit erreicht, um die bekannten Einflüsse von Geometrie und Lageversatz auf das Impedanzsignal zu unterdrücken. Eine tabellarische Auflistung der Leitfähigkeiten und Widerstände der verwendeten Werkstoffe ist in Anhang D IV dargestellt. Abb. 9.7 zeigt die resultierende Anordnung der drei metallischen Proben aus Stahl, Messing und Aluminium in der komplexen Ebene. Die gemessenen Impedanzwerte verschieben sich mit zunehmender Leitfähigkeit in Richtung negativer X- und Y-Achse. Die Verschiebung erfolgt scheinbar entlang einer Geraden, ist jedoch Teil der in Abb. 9.4 gezeigten Ortskurve.

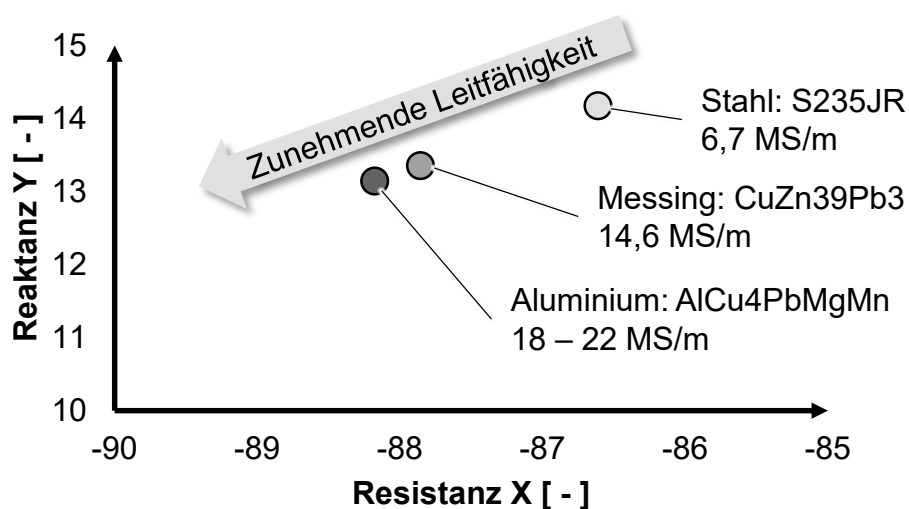


Abb. 9.7: Anordnung realer Leitfähigkeiten in der komplexen Ebene [Gem20; Gem11; Thy22]

9.1.3 Adaption Werkstoffe mit anisotoper Leitfähigkeit

Abb. 9.8 zeigt die gemessenen Impedanzen für die verschiedenen Werkstoffklassen Metall, Graphit, CFK und CF. Von diesen Proben verfügen die Metalle über eine isotope Leitfähigkeit, während die Leitfähigkeit von Graphit, CFK und CF aufgrund der werkstofflichen Struktur anisotrop ist. Für die Messung wird über eine Kompensation der Ursprung der komplexen Ebene in den Impedanzwert Z_0 des leeren Raums verschoben, sodass sich die übrigen Werkstoffklassen relativ dazu anordnen.

Da für die verwendeten Werkstoffe $\mu_r = 1$ gilt und die Messfrequenz ω konstant gehalten wird, sind die gemessenen Impedanzwerte theoretisch nur von der

Leitfähigkeit abhängig. Im Falle einer isotropen Leitfähigkeit müssten beide Graphitproben und die CF-Probe dieselben Impedanzwerte aufweisen, da sie theoretisch über die gleiche elektrische Leitfähigkeit von rund 30 kS/m verfügen [Li12; Sum90]. Dennoch zeigen sich Unterschiede sowohl zwischen der CF-Probe und den Graphitproben als auch innerhalb der Graphitproben 1 und 2. Für die Graphitproben wird das gleiche Schichtgraphit verwendet, jedoch mit unterschiedlichen Orientierungen der Graphitebenen.

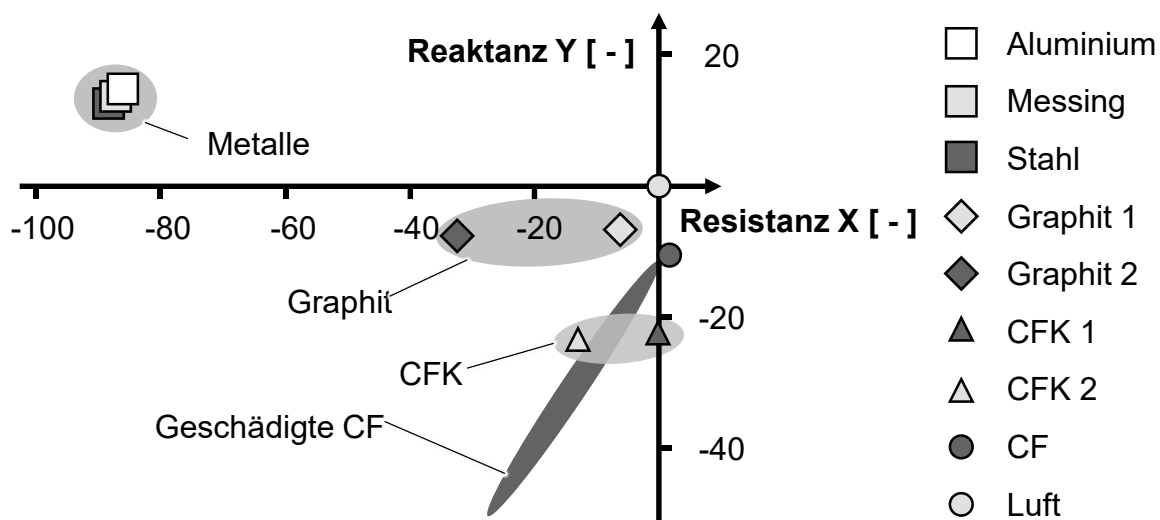


Abb. 9.8: Mittels Wirbelstrom gemessene Impedanzen verschiedener Proben unterschiedlicher Leitfähigkeit und werkstofflicher Struktur

Damit existiert neben der Leitfähigkeit ein weiterer Einfluss auf die Lage in der komplexen Ebene, der auf die werkstoffliche Struktur d.h. die Anisotropie der Leitfähigkeit zurückzuführen ist. So unterscheiden sich die Graphitproben 1 und 2 in der Orientierung der Graphitschichten, während die CF-Probe aus faserförmigem Kohlenstoff besteht. Bei der Wirbelstromprüfung muss daher der Einfluss der werkstofflichen Struktur und damit die Richtungsabhängigkeit der Leitfähigkeit auf die Lage der gemessenen Impedanzen in der komplexen Ebene berücksichtigt werden.

Dies gilt insbesondere für die in dieser Dissertation verwendeten CF-Rovings, die faserförmig sind und aus mehreren tausend Einzelfilamenten bestehen. Die Leitfähigkeit von CF-Rovings ist daher hoch anisotrop und unterscheidet sich

längs und quer zur Faserachse. CF-Rovings unterscheiden sich in ihrer werkstofflichen Struktur damit grundlegend von den isotrop leitfähigen Metallen, für die die klassische Wirbelstromtheorie gilt. Dies muss bei der Analyse der gemessenen Impedanzen berücksichtigt werden.

9.2 Ableitung einer Hypothese zum Einfluss der Schädigung auf die elektrische Leitfähigkeit eines Carbonfaser-Rovings

Der Einfluss der werkstofflichen Struktur und damit der anisotropen Leitfähigkeit bei der Wirbelstromprüfung von CF-basierten Werkstoffen wird durch die Differenzierung in Leitungs- und Verschiebestrome berücksichtigt (vgl. Kap. 5.2 und Kap. 5.4) [KM96]. Leitungsströme beschreiben den Elektronenfluss entlang eines Filaments oder über den Kontaktpunkt einander berührender Filamente und sind im Impedanzsignal als Realteil bzw. als Ohm'scher Wirkwiderstand sichtbar. Verschiebestrome dagegen bezeichnen die Ladungsverschiebung über eine kapazitive Kopplung zwischen zwei benachbarten, einander nicht berührenden CF-Filamenten und sind im Impedanzsignal als Imaginärteil bzw. als kapazitiv/induktiver Blindwiderstand detektierbar. Abb. 9.9 zeigt exemplarisch eine schematische Darstellung der Leitungs- und Verschiebestrome innerhalb eines CF-Rovings sowie das zugehörige Ersatzschaltbild. [Hel13; HSP+15; LM94; Moo01; Moo15; MPM+11]

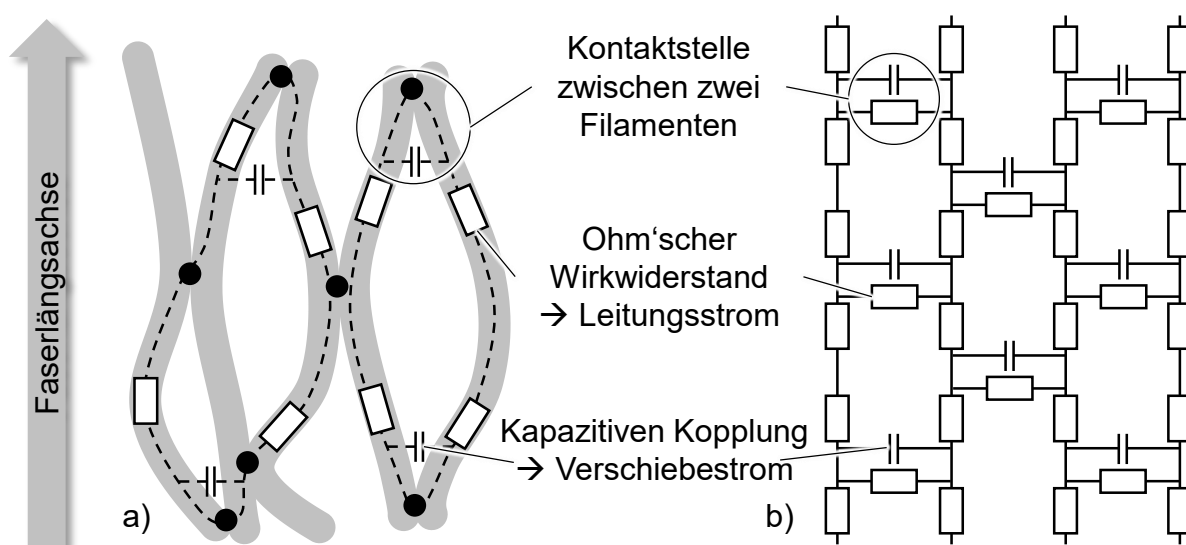


Abb. 9.9: Schematische Darstellung a) der Wirbelströme im Roving und b) des Ersatzschaltbildes nach [CJQ+15; HSM13; LM94; Pra76]

In den Versuchsreihen zur Auswertung der komplexen Impedanz in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad (Kap. 8.1) wurde gezeigt, dass sich eine zunehmende Schädigung in der komplexen Ebene durch eine Verschiebung der gemessenen Impedanzen in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse zeigt. In den Versuchen zur Anordnung der Leitfähigkeiten verschiedener Werkstoffe in der komplexen Ebene bei Verwendung eines Durchlaufsenors (Abb. 9.7) wurde gezeigt, dass sich eine zunehmende Leitfähigkeit in der komplexen Ebene ebenfalls durch eine Verschiebung der gemessenen Impedanzen in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse zeigt. Damit führen sowohl eine Zunahme der Schädigung als auch eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit zu einer Verschiebung in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse (Abb. 9.10).

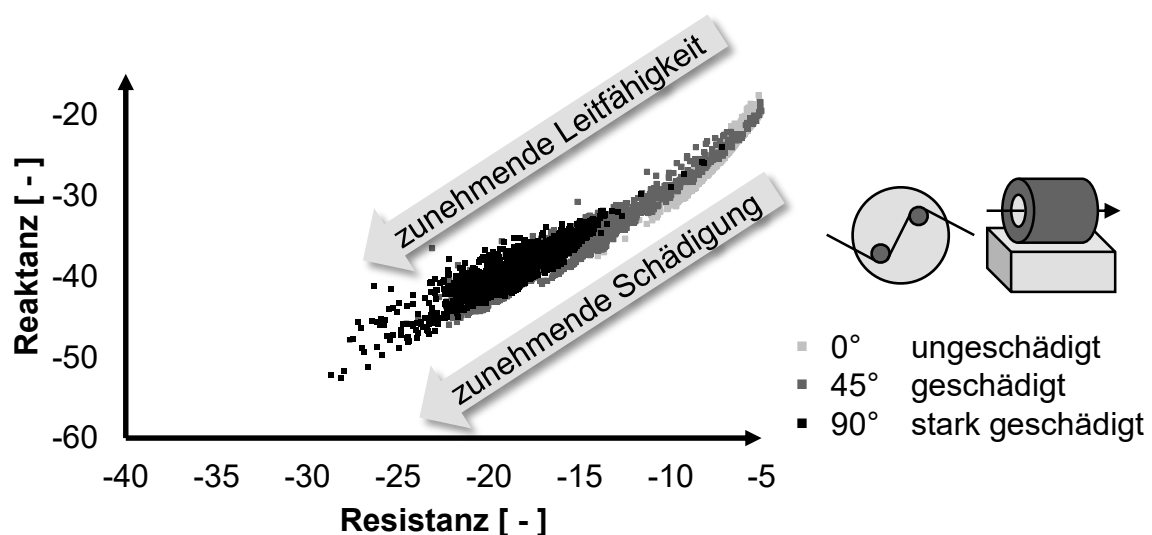


Abb. 9.10: Verschiebung der gemessenen Impedanzen in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse sowohl bei zunehmender Schädigung als auch bei zunehmender Leitfähigkeit

Daraus wird die Hypothese abgeleitet, dass eine zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings zu einer Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit des CF-Rovings bzw. zu einer Abnahme des Widerstandes führt. Hierbei muss beachtet werden, dass bei den Versuchen zur Anordnung der Leitfähigkeit in der komplexen Ebene (Abb. 9.7 und Abb. 9.8) metallische Werkstoffe mit isotroper Leitfähigkeit vermessen wurden, die aufgrund ihrer werkstofflichen Struktur über

keine kapazitiven Kopplungen verfügen. Dementsprechend wird die Impedanzabnahme der metallischen Werkstoffe mit zunehmender Leitfähigkeit auf eine Reduktion der Resistanz (Ohm'sche Anteile) zurückgeführt und nicht auf eine Reduktion der Reaktanz (kapazitive Anteile). Übertragen auf die Impedanzreduktion der CF mit zunehmender Schädigung bedeutet dies eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit bei einer gleichzeitigen Abnahme der Resistanz. Es wird die folgende Hypothese formuliert, die im weiteren Verlauf untersucht wird:

Hypothese: Zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings führt zu einer Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit und zu einer Abnahme der Resistanz bzw. des Ohm'schen Widerstandes.

9.3 Überprüfung der Hypothese

Zur Überprüfung der Hypothese wird zunächst ein zusätzliches Messsystem zur Inline-Resistanzmessung ausgelegt und in den Versuchsaufbau integriert (Kap. 9.3.1). Damit ist eine vom bisherigen Messsystem unabhängige Messung der Resistanz des CF-Rovings in Abhängigkeit der Schädigung möglich. Hierdurch werden die Hypothese und die bisher mittels Wirbelstrom gemessene Abnahme der Resistanz mit zunehmender Schädigung überprüft. Anschließend werden mit diesem Messsystem Versuche zur Resistanzmessung durchgeführt (Kap. 9.3.2) und die Ergebnisse statistisch analysiert (Kap. 9.3.3). Abschließend werden die Ergebnisse in Kontrollversuchen validiert (Kap. 9.3.4) und in einem Zwischenfazit zur Gültigkeit der Hypothese bewertet (Kap. 9.3.5). Abb. 9.11 stellt das Vorgehen schematisch dar.

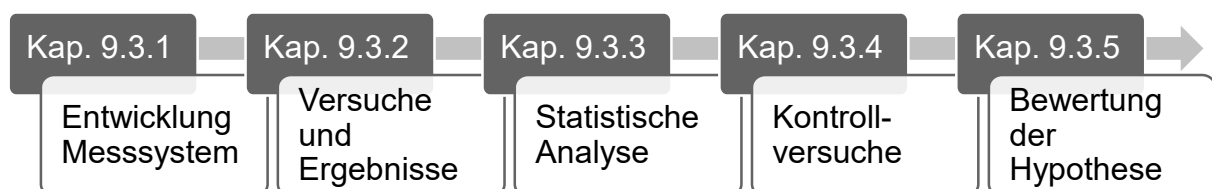


Abb. 9.11: Methodisches Vorgehen zur Überprüfung der Hypothese

9.3.1 Entwicklung einer Inline-Resistanzmessung

Zur Überprüfung dieser Hypothese wird ein zusätzliches Messsystem zur Inline-Resistanz-Messung und in den Versuchsaufbau (Kap. 7.2) integriert, um die Resistanz unabhängig vom bisherigen Messmittel Wirbelstrom zu messen. Hierdurch wird überprüft, ob die Abnahme der Resistanz mit zunehmender Schädigung auch über die Inline-Resistanzmessung detektiert und die Hypothese bestätigt werden kann. Als Messsystem zur Inline-Resistanzmessung wird eine Vierleiter-Widerstandsmessung mit einer angelegten Wechselspannung der Frequenz 1 kHz verwendet. Da kapazitive Effekte für Frequenzen unterhalb von 200 kHz vernachlässigt werden können ($\omega C \ll R$) [CJQ+15], entsprechen die gemessenen Widerstände der Resistanz und damit allein der Ohm'schen Komponente. Über die Trennung von Stromquelle und Spannungsmessung der Vierleiter-Widerstandsmessung werden sowohl der Messfehler durch Anschluss- und Leitungswiderstände reduziert als auch hohe Auflösungen ermöglicht. Statt einer Stromquelle können auch eine Spannungsquelle und ein niedrigohmiger Widerstand R_S verwendet werden, der als Shunt-Widerstand bezeichnet wird. Hierbei wird der Strom I_G nach dem Ohm'schen Gesetz aus dem bekannten Shunt-Widerstand R_S und dem gemessenen Spannungsfall über dem Shunt-Widerstand U_S berechnet. Abb. 9.12 zeigt den Schaltplan der verwendeten Widerstandsmessung. [Par18]

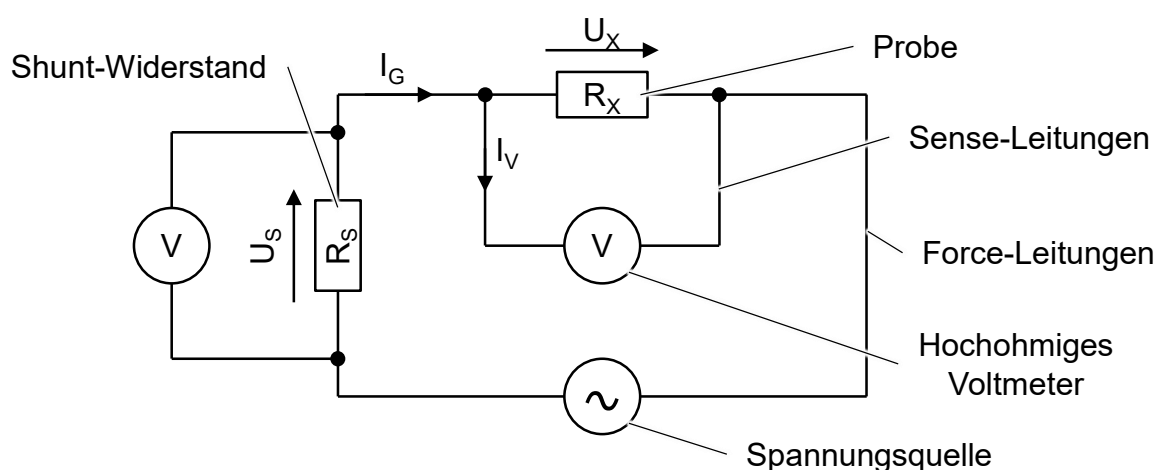


Abb. 9.12: Schaltplan der Vierleiter-Messung für die Widerstandsmessung an CF-Rovings nach [Par18; Zha21]

Die benötigten Komponenten werden gemäß Schaltplan (Abb. 9.12) verschaltet und in den tribologischen Prüfstand integriert. Als Spannungsquelle wird ein Frequenzgenerator vom Typ Wavetek model 81, der Firma Wavetek, San Diego (USA), verwendet, der eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt. Als Voltmeter zum Abgreifen der Spannungsfälle über der Probe und über dem Shunt-Widerstand wird das USB-Datenerfassungssystem DEWE-43 der Dewesoft d.o.o., Trbovlje (Slovenien), mit einem Innenwiderstand von 10 M Ω verwendet. Abb. 9.13 zeigt den Schaltplan des realen Messaufbaus.

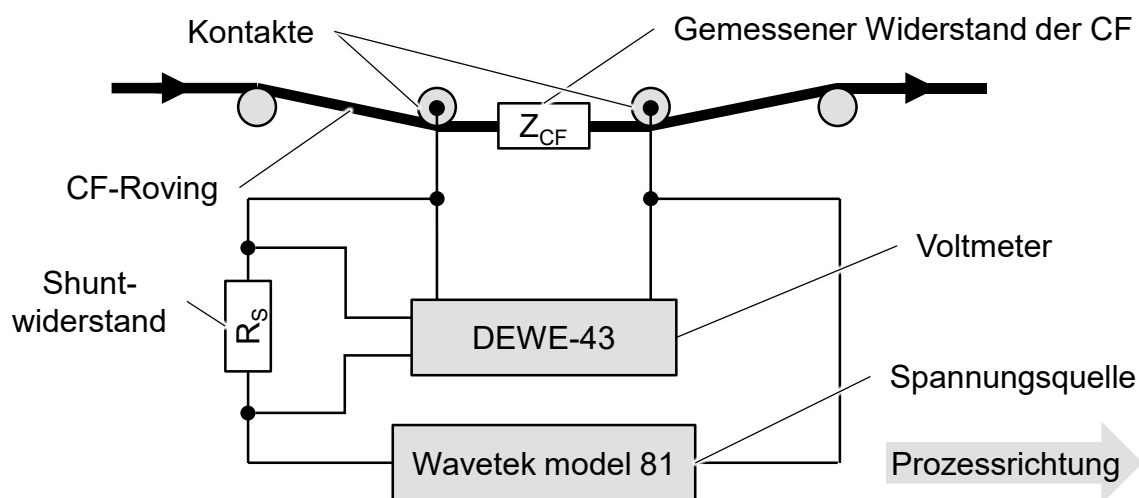


Abb. 9.13: Schaltplan der verwendeten Komponenten zur Vierleiter-Widerstandsmessung als Inline-Resistanzmessung nach [Zha21]

Die Messaufbau wird als Inline-Messung konzipiert, um die Widerstandsmessung simultan zur Wirbelstromprüfung durchzuführen. Hierfür werden Zylinder aus poliertem Messing als Schleifkontakt und zur Fadenführung vorgesehen und in den tribologischen Prüfstand integriert (Abb. 9.14). Zur Synchronisation der beiden separat aufgezeichneten Datensätze des multimodalen Sensorsystems und der Vierleiter-Widerstandsmessung wird ein Trigger-Signal verwendet. Das Trigger-Signal wird über ein Stück handelsüblicher Aluminiumfolie erzeugt, die auf den CF-Roving geklebt wird und über eine starke Abweichung der elektrischen Leitfähigkeit verfügt. Die stark abweichende, elektrische Leitfähigkeit führt zu einem starken Signalausgang sowohl im Wirbelstromsensor als auch in der Vierleiter-Widerstandsmessung. Der Signalausgang wird als Fixpunkt zur zeitlichen Synchronisation beider Datensätze verwendet.

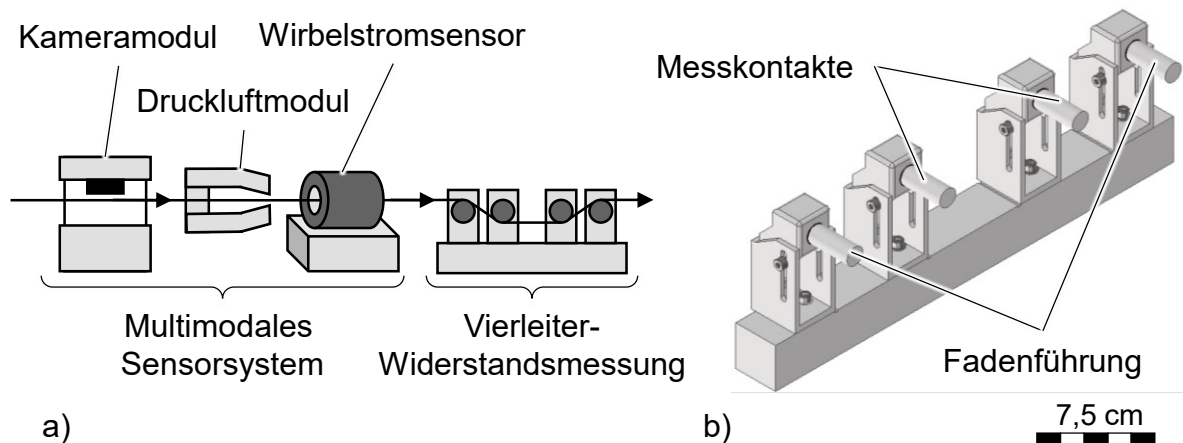


Abb. 9.14: a) Schema der Integration in die Messkette und b) CAD-Modell der Vierleiter-Widerstandsmessung nach [Zha21]

9.3.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden die Versuche unter analogen Bedingungen zu den Versuchsreihen der Sensorentwicklung (Kap. 7) und der Impedanzauswertung (Kap. 8) mit einem CF-Roving vom Typ Tenax HTS40 F13 durchgeführt (Anhang C V). Es werden drei Versuchspunkte mit unterschiedlichen Schädigungsgraden ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) untersucht und mit jeweils fünf Wiederholversuchen abgesichert. Damit werden insgesamt 15 Teilversuche durchgeführt und je Teilversuch eine Roving-Länge von 420 m geprüft (Abb. 9.15).

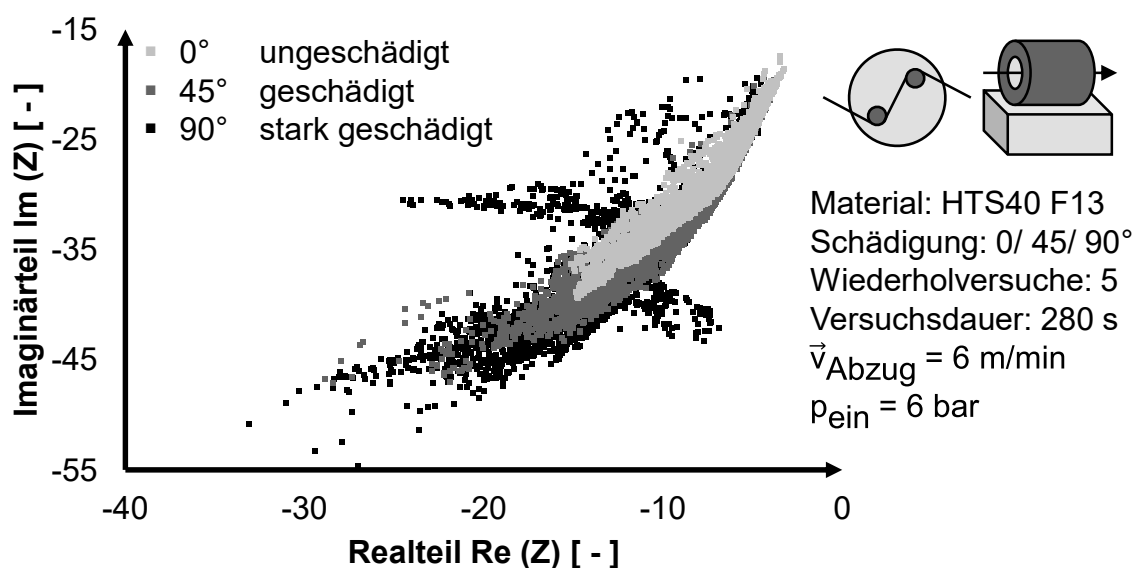


Abb. 9.15: Wirbelstromrohdaten des Versuchs zur Untersuchung der Leitfähigkeitsänderung bei steigender Schädigung

Die gemessenen Impedanzen liegen im erwarteten Wertebereich der komplexen Ebene und zeigen eine Verschiebung in Richtung negativer Real- und Imaginärachse mit zunehmender Schädigung. Die Versuchsdaten entsprechen damit den Erwartungen und sind konsistent mit den vorherigen Versuchsreihen. Abb. 9.16 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Resistanzen der Vierleiter-Widerstandsmessung bei verschiedenen Schädigungsgraden. Pro Schädigungsgrad wird der Mittelwert über fünf Teilversuche gebildet, sodass ein Mittelwert einer geprüften Rovinglänge von 28 m und 2.800 Datenpunkten entspricht.

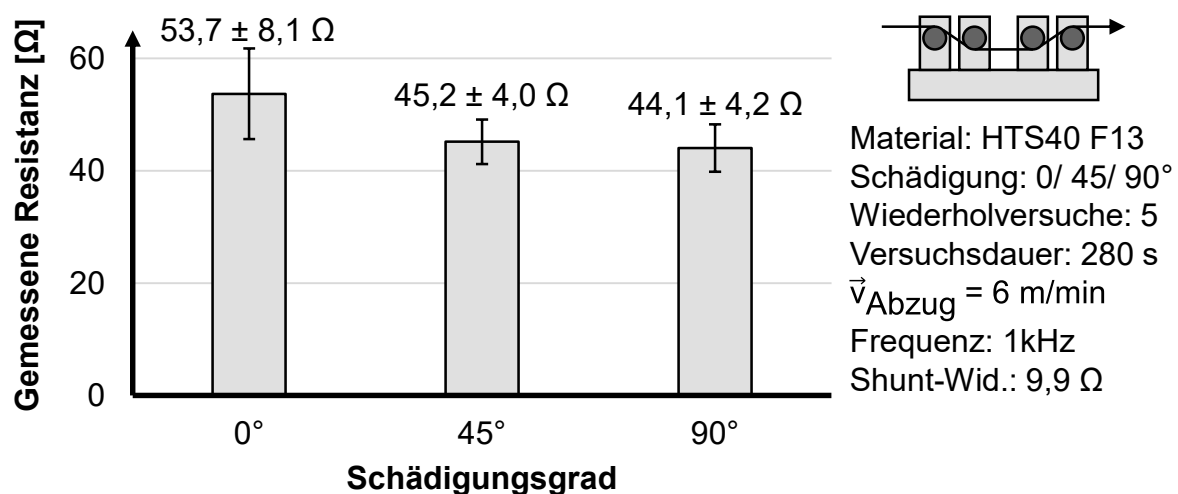


Abb. 9.16: Gemessene Resistanzen in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad für einen CF-Roving vom Typ HTS40 F13 nach [Zha21]

Mit zunehmender Schädigung wird eine Abnahme der Resistanz beobachtet. Diese Beobachtung ist konsistent mit den Ergebnissen der Wirbelstrommessung, die ebenfalls eine Abnahme der Resistanz mit zunehmender Schädigung zeigt, und entspricht damit den Erwartungen.

9.3.3 Statistische Analyse

Nun wird die im Vorfeld aufgestellte und im Rahmen der Versuchsdurchführung beobachtete Hypothese der Abnahme der Resistanz mit zunehmender Schädigung auf Basis der Messwerte statistisch untersucht. Zur Auswahl eines geeigneten Hypothesentests werden die gemessenen Resistanzen zunächst auf das Vorliegen einer Normalverteilung anhand des Kolmogoroff-Smirnow-Tests

überprüft. Der Kolmogoroff-Smirnow-Test lehnt die Nullhypothese, das Vorliegen einer Normalverteilung, für die gemessenen Widerstände aller Schädigungsgrade mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ab. Daher wird zur Signifikanzanalyse der Kruskal-Wallis-Test statt einer Varianzanalyse für normalverteilte Stichproben verwendet [OOK14]. Der Kruskal-Wallis-Test dient der Überprüfung der Nullhypothese, ob zwei Stichproben einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen und ob sie die gleiche zentrale Tendenz aufweisen. In diesem Fall ist die zentrale Tendenz der Mittelwert der Resistenzen in Abhängigkeit des Schädigungsgrads, sodass anhand des Kruskal-Wallis-Test eine Aussage darüber getroffen werden kann, ob sich die Mittelwerte der verschiedenen Schädigungsgrade statistisch signifikant unterscheiden. Der Kruskal-Wallis-Test verwirft die Nullhypothese, sodass mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ die gemessenen Resistenzen keiner gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Dementsprechend weisen die gemessenen Resistenzen nicht die gleiche zentrale Tendenz auf und die Mittelwerte der verschiedenen Schädigungsgrade unterscheiden sich signifikant. Um zu überprüfen, welche Schädigungsgrade sich signifikant unterscheiden, werden in einem zweiten Schritt alle drei Schädigungsgrade paarweise mit einem Post-hoc-Test verglichen. Als Post-hoc-Test wird ein Dunn-Test für den paarweisen Mehrfachvergleich verwendet [Dat22]. Gemäß Dunn-Test unterscheiden sich die gemessenen Resistenzen aller drei verschiedenen Schädigungsgrade signifikant bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Tab. 9.1 fasst die Ergebnisse der statistischen Hypothesentests zusammen. [Dat22; KJN99; OOK14; Zha21]

Tab. 9.1: Zusammenfassung der Hypothesentest

Nullhypothese	Hypothesentest	Ergebnis
Vorliegen einer Normalverteilung	Kolmogoroff-Smirnow-Test	Gemessene Resistenzen sind nicht normalverteilt ($\alpha = 0,05$)
Vorliegen einer gemeinsamen Grundgesamtheit	Kruskal-Wallis-Test	Gemessene Resistenzen entstammen verschiedenen Grundgesamtheiten und zeigen nicht die gleiche zentrale Tendenz ($\alpha = 0,01$)
Vorliegen einer signifikanten Unterscheidung	Dunn-Test (Post-hoc)	Gemessene Resistenzen aller drei Schädigungsgrade unterscheiden sich signifikant ($\alpha = 0,05$)

Zuletzt wird eine Korrelationsanalyse zwischen den Messwerten der multimodalen Sensorsystems und der Vierleiter-Widerstandsmessung durchgeführt. Hierbei zeigen 73,3 % der durchgeführten Versuche eine signifikante Korrelation zwischen der Resistanz der Widerstandsmessung und den Messwerten des multimodalen Sensorsystems bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

Damit wird nachgewiesen, dass die Leitfähigkeit eines CF-Rovings mit zunehmender Schädigung in den gewählten Schädigungsstufen 0° , 45° und 90° des verwendeten Schädigungsmoduls (vgl. Abb. 7.9 und Abb. 9.15) signifikant steigt. Zudem liegt für rund drei Viertel der Messwerte eine statistisch signifikante Korrelation zwischen gemessener Resistanz und dem komplexen Messwert des multimodalen Sensorsystems vor.

9.3.4 Kontrollversuche

Zur Validierung der Ergebnisse werden Kontrollversuche mit einem CF-Roving vom Typ Tenax HTS45 E23 unter analoge Versuchsbedingungen (Anhang C VI) durchgeführt. Abb. 9.17 zeigt die gemessenen Resistanzen der Vierleiter-Widerstandsmessung.

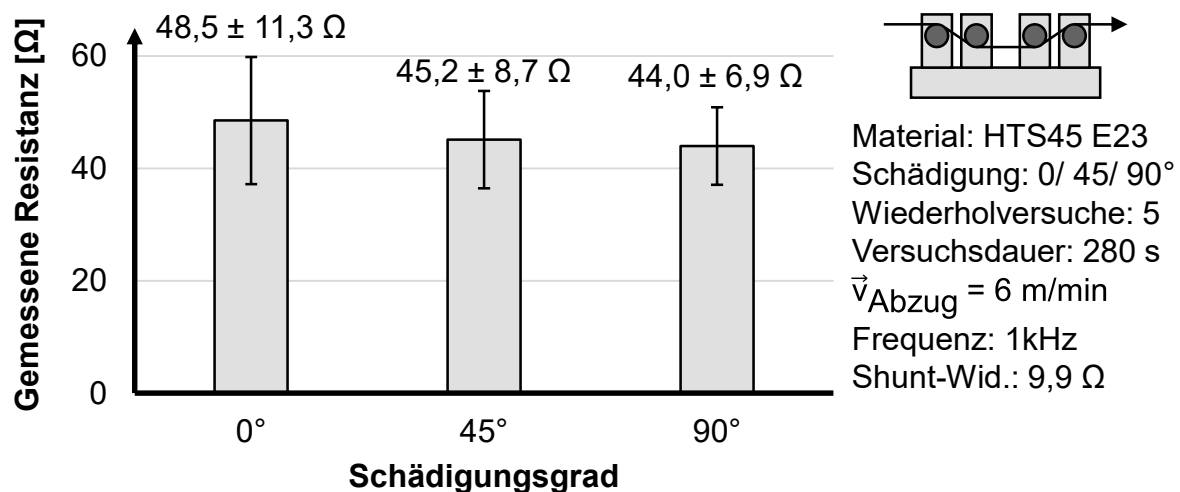


Abb. 9.17: Gemessene Resistanzen in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad für einen CF-Roving vom Typ HTS45 E23 nach [Zha21]

In Konsistenz mit den bereits durchgeführten Resistanzmessungen wird der Trend einer abnehmenden Resistanz mit zunehmender Schädigung beobachtet. Der Trend ist somit unabhängig vom Typ des verwendeten CF-Rovings.

9.3.5 Bewertung der Gültigkeit der Hypothese

Damit wird die im Vorfeld beobachtete und im Rahmen der Versuchsdurchführung untersuchte Hypothese als verifiziert erachtet. Bereits in den Versuchsreihen zur Auswertung der komplexen Impedanz (Kap. 8.1) wird beobachtet, dass sich zunehmende Schädigung durch eine Verschiebung der gemessenen Impedanzen in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse zeigt. Diese Beobachtung wird in den Versuchen zur Anordnung der Leitfähigkeiten verschiedener Werkstoffe in der komplexen Ebene bestätigt (Kap. 9.2). Hieraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings zu einer Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit und zu einer Abnahme der Resistanz bzw. des Ohm'schen Widerstandes führt. Diese Hypothese wurde anhand einer unabhängigen Messung der elektrischen Leitfähigkeit über eine Vierleiter-Widerstandsmessung für einen CF-Roving vom Typ Tenax HTS40 F13 bestätigt (Kap. 9.3.2 und Abb. 9.16) und statistisch abgesichert (Kap. 9.3.3). Kontrollversuche mit einem CF-Roving vom Typ Tenax HTS45 E23 (Kap. 9.3.4 und Abb. 9.17) stützen diese These und zeigen, dass der beobachtete Trend unabhängig vom Typ des verwendeten CF-Roving ist.

Zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings führt zu einer signifikanten Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit.

9.4 Ableitung einer schematischen Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings

Aus der Adaption der klassischen Wirbelstromtheorie (Kap. 9.1) und der bestätigten Hypothese (Kap. 9.2 und Kap. 9.3) wird eine schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen abgeleitet. Hierbei wird sowohl die ungestörte Ausbreitung in ungeschädigten CF-Rovings als auch der Einfluss von Schädigung auf die Ausbreitung der Wirbelströme berücksichtigt.

Die höchste Wirbelstromdichte liegt in Richtung der größten, elektrischen Leitfähigkeit und damit bei CF-Rovings in Faserlängsrichtung vor [Ows76; PW96]. Abb. 9.18 zeigt die Wirbelstromdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Wirbelstromsensor, sodass Wirbelströme aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit in

Faserlängsrichtung über den Sensor hinaus induziert werden. Zusätzlich variiert die Kontaktierung benachbarter Filamente lokal im Roving, sodass auch die elektrische Leitfähigkeit und damit die Ausbreitung der Wirbelströme lokal variieren [HSM13; HSP+15].

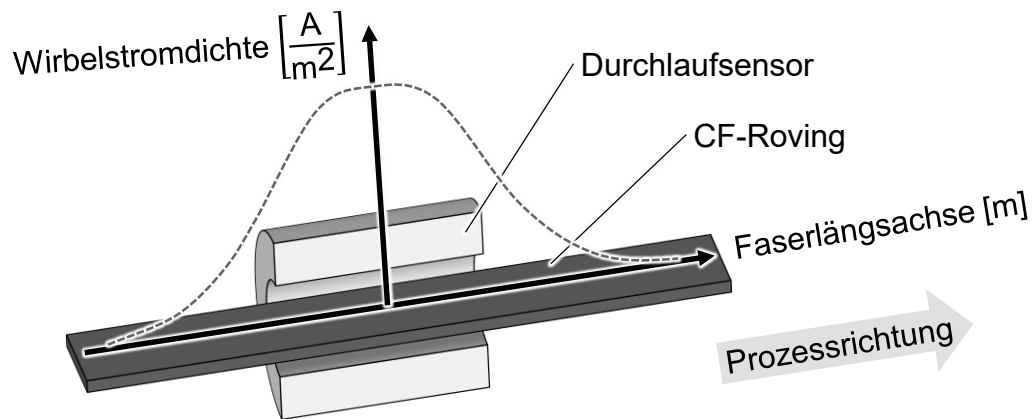


Abb. 9.18: Induzierte Wirbelstromdichte in Faserlängsrichtung, abhängig vom Abstand zum Wirbelstromsensor nach [BG20]

Unter Berücksichtigung der Orientierung der Wirbelströme bei der Verwendung von Durchlaufsensoren (Abb. 9.5 a) breiten sich Wirbelströme damit nicht nur flächig im Roving-Querschnitt, sondern auch in Faserlängsrichtung aus. Die Folge ist ein Wirbelstromfeld, das sich über die Schnittebene hinaus entlang einzelner Filamente in Faserrichtung des CF-Rovings ausbreitet (Abb. 9.19).

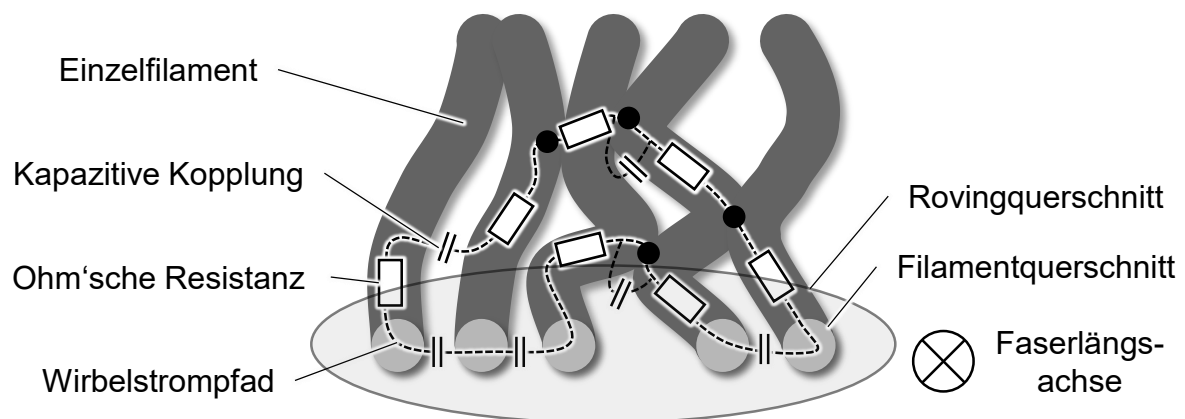


Abb. 9.19: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in ungeschädigten CF-Rovings nach [Zha21]

Entgegen der untersuchten Hypothese einer Resistanzabnahme bei steigender Schädigung wird in der Literatur der Trend einer Zunahme des elektrischen Widerstands bei steigender Zugspannung und Schädigung beobachtet [KHK13; QSG16; WS13]. Der in der Literatur beschriebene Trend wird jedoch unter hohen Zugspannungen im Zugversuch bis zum Versagen beobachtet. Dabei resultiert der Anstieg des elektrischen Widerstands aus dem Reißen der einzelnen Filamente bei Überschreiten der Zugfestigkeit. Hierdurch sinkt die Anzahl intakter, leitfähiger Filamente im Rovingquerschnitt und die Leitfähigkeit wird reduziert, bzw. der Widerstand steigt. Abb. 9.20 zeigt einen typischen Verlauf des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der aufgetragenen Zugspannung bis zum Bruch der Probe. [KHB11; QSG16; WS13]

Im Gegensatz dazu liegen bei den in dieser Arbeit verwendeten Versuchsbedingungen sowie in der CF-Herstellung und Verarbeitung Zugspannungen weit unterhalb der Zugfestigkeit des CF-Rovings vor. Die auftretenden Dehnungen sind klein ($\epsilon < 1\%$), sodass gebrochene Filamente in der Bruchebene verbleiben und sich nicht aus dem Roving-Verbund herauslösen. Dadurch wird der Roving-Querschnitt nicht reduziert und die Leitfähigkeit wird nicht, wie im Zugversuch, reduziert.

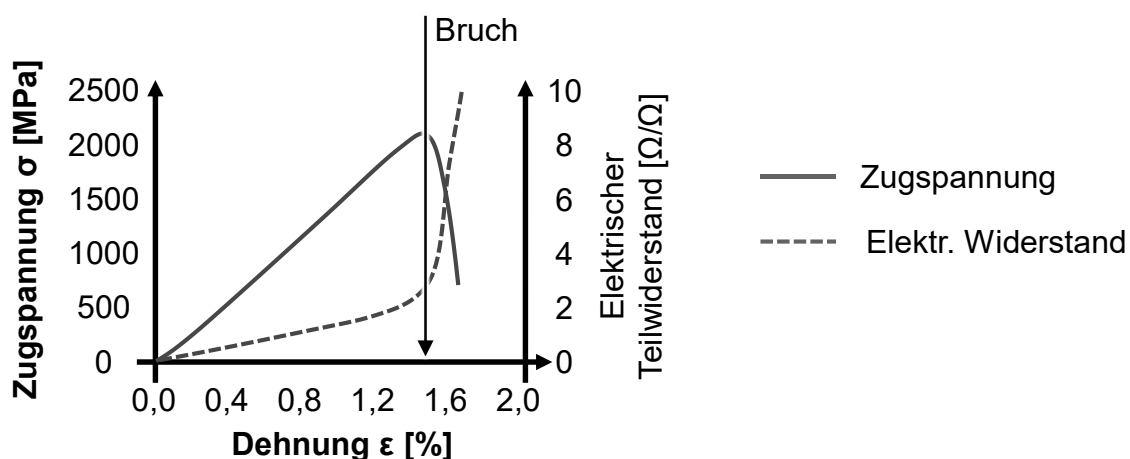


Abb. 9.20: Typischer Verlauf für die relative Widerstandsänderung eines CF-Rovings im Zugversuch bis zum Bruch nach [QSG16]

Stattdessen können sich gebrochene Filamente lokal neu orientieren und zu alternativen Wirbelstrompfaden mit geringeren, elektrischen Widerständen und

damit einer Leitfähigkeitssteigerung führen. Die Resistanz entlang eines neuorientierten Filaments (Abb. 9.21) ist in diesem Fall geringer als der Übergangswiderstand zwischen zwei benachbarten Filamenten, der von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Zu diesen zählen die werkstoffliche Struktur der Filamente in der Kontaktzone, bedingt durch z.B. oxidative Oberflächenbehandlung oder aufgetragenes Sizing, die Packungsdichte der Filamente und die lokale mechanische Belastung [HSK12; HSM13; HSP+15].

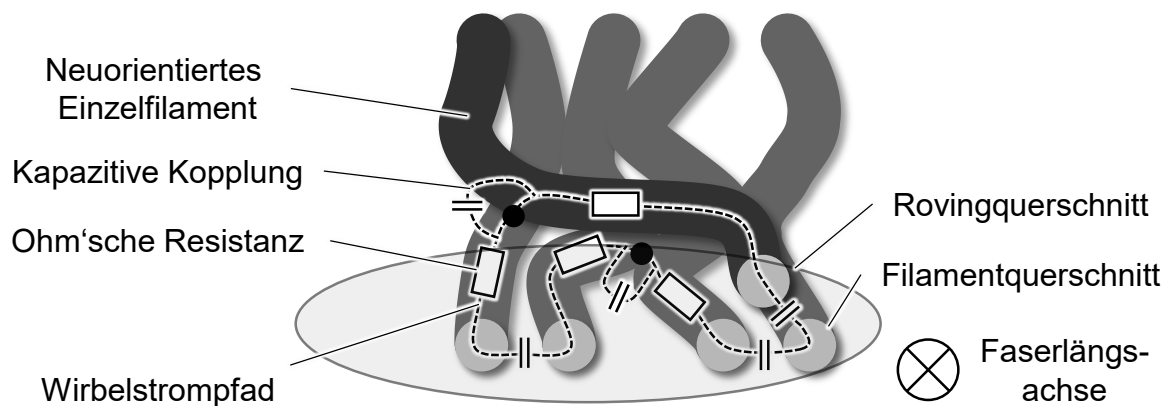


Abb. 9.21: Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings nach [Zha21]

Die Abnahme der Resistanz bei steigender Schädigung wird damit durch die Bildung von alternativen Wirbelstrompfaden aufgrund gebrochener, neuorientierter Filamente erklärt. Die zu den schematischen Darstellungen zugehörigen Ersatzschaltpläne entlang der möglichen Wirbelstrompfade in ungeschädigten (Abb. 9.22 a) und geschädigten (Abb. 9.22 b) CF-Rovings verdeutlicht dies.

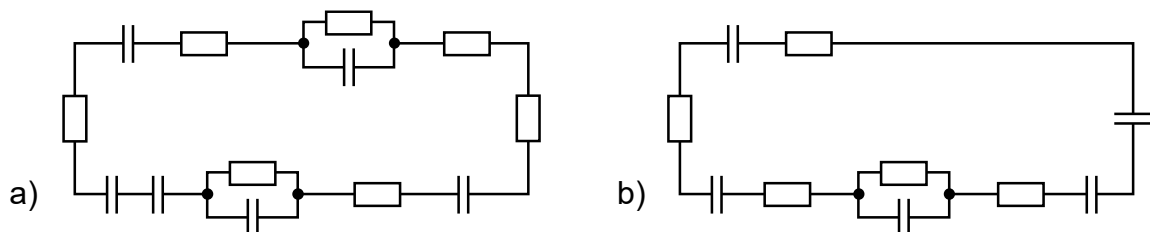


Abb. 9.22: Ersatzschaltpläne für einen a) ungeschädigten (vgl. Abb. 9.19) und b) geschädigten Roving (vgl. Abb. 9.21) nach [Zha21]

Je stärker die Schädigung im CF-Roving ist, desto mehr gebrochene Filamente liegen im Roving vor und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch

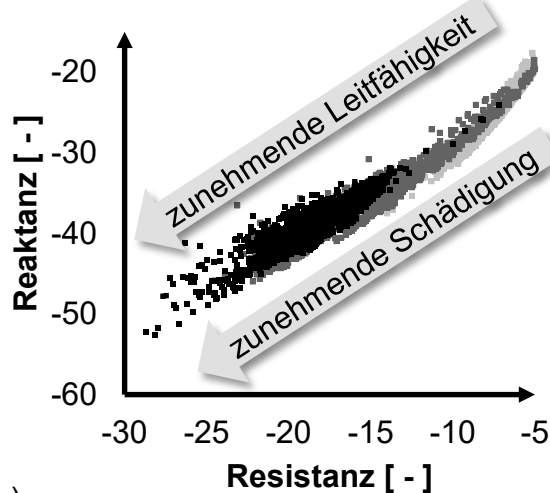
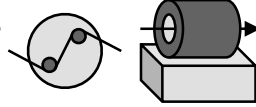
Neuorientierung alternative Wirbelstrompfaden mit geringerer Resistanz entstehen. Auf diesen alternativen Pfaden fließen die Wirbelströme entlang der gebrochenen, neuorientierten Filamente, statt von Filament zu Filament. Da die Resistenzen entlang der Filamente niedriger sein können als die Übergangswiderstände zwischen den Filamenten, hat dies ein stärkeres Wirbelstromfeld (Sekundärfeld) im Roving zur Folge. Das stärkere Sekundärfeld kompensiert im Vergleich zum ungeschädigten CF-Roving einen größeren Anteil des primären Magnetfelds und führt damit letztlich zu niedrigeren, gemessenen Impedanzen im Wirbelstromsensor.

9.5 Fazit

Im Rahmen der Sensorentwicklung (Kap. 7) und der Entwicklung der Auswertungsansätze der multimodalen Messgröße (Kap. 8) wird beobachtet, dass sich die gemessenen Impedanzen bei zunehmender Schädigung in Richtung negativer Real- und Imaginärachse verschieben (Abb. 9.23 a). Auf Basis dieser Beobachtung und theoretischen Überlegungen der klassischen Wirbelstromtheorie (Kap. 9.1) wird eine Hypothese über die Leitfähigkeit bzw. den Ohm'schen Widerstand eines CF-Rovings in Abhängigkeit der eingebrachten Schädigung formuliert. Diese Hypothese postuliert, dass zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings zu einer Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit und zu einer Abnahme der Resistanz bzw. des Ohm'schen Widerstandes führt (Kap. 9.2). Diese Hypothese wird experimentell überprüft und die Messergebnisse statistisch ausgewertet (Kap. 9.3). Es zeigt sich, dass die Leitfähigkeitszunahme bzw. Widerstandsabnahme bei Schädigung eines CF-Rovings signifikant ist und ein Großteil der gemessenen Ohm'schen Widerstände mit den Messwerten des multimodalen Sensorsystems korrelieren. Damit wird die aufgestellte Hypothese bestätigt und statistisch abgesichert. Untersuchungen mit einem weiteren CF-Roving zeigen darüber hinaus, dass der beobachtete Trend unabhängig vom CF-Typ ist. Somit wird die beobachtete Impedanzverschiebung bei steigender Schädigung (Abb. 9.23 a) als physikalisch plausibel bewertet, da zunehmende Schädigung zu einer Reduktion des Ohm'schen Widerstandes bzw. zu einer Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit führt (Abb. 9.23 b).

Prüfparameter

Material: HTS40 F13
 Schädigung: 0/ 45/ 90°
 Wiederholversuche: 5
 Versuchsdauer: 300 s

**Prüfparameter**

Material: HTS40 F13
 Schädigung: 0/ 45/ 90°
 Wiederholversuche: 5
 Versuchsdauer: 280 s

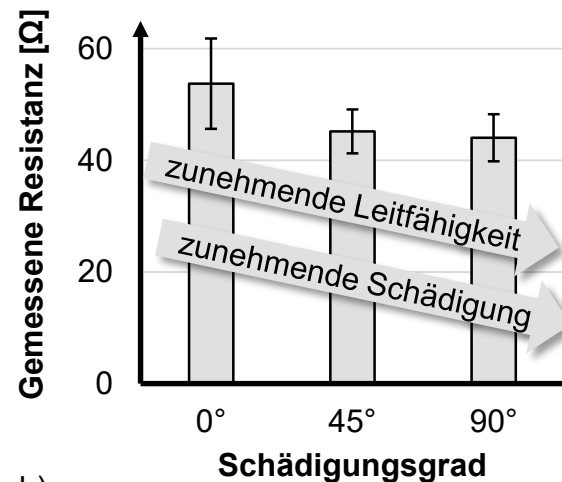
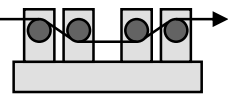


Abb. 9.23: bei zunehmender Schädigung a) beobachtete Impedanzabnahme während der Sensorentwicklung und b) nachgewiesene Abnahme des elektrischen Widerstands

Auf Basis dieser Erkenntnis werden ein Ersatzschaltbild und eine schematische Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings abgeleitet (Kap. 9.4). Gemäß der schematischen Darstellung erscheint die Abnahme der Impedanzen und Widerstände mit steigender Schädigung plausibel und kann auf physische Änderungen im CF-Rovings zurückgeführt werden. Die physischen Änderungen umfassen insbesondere eine Neuorientierung gebrochener Filamente, die zu alternativen Wirbelstrompfaden und damit zu einer Abnahme des elektrischen Widerstands führen. Damit stehen die schematische Darstellung zur Ausbreitung der Wirbelströme und die Neuorientierung der Filamente im Einklang mit den gemessenen Impedanz- und Widerstandsänderungen.

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Abschließend erfolgt gemäß dem definierten Vorgehen zur Zielerreichung die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Sensorsystems (Abb. 10.1). Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgt separat für die beiden potenziellen Nutzergruppen des entwickelten Sensorsystems, CF-Hersteller (Kap. 10.1) und CF-Verarbeiter (Kap. 10.2). Anschließend erfolgt eine gesamtheitliche Betrachtung mit Blick auf den globalen CF-Markt (Kap. 10.3).



Abb. 10.1: Einordnung von Kap. 10 in das Vorgehen zur Zielerreichung

Die Methode der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird gemäß dem Flussdiagramm zur Identifikation einer geeigneten Methode ausgewählt (Abb. 10.2). Die wirtschaftliche Fragestellung der Investitionsbewertung in das Sensorsystem ist monetär bewertbar und die Investitionshöhe ist gering, gemessen am Umsatz der Anwender. Die realisierbaren Einsparungen können verschiedenen Kategorien zugeordnet werden, wie verringertem Ausschuss, gemindertem Prüfaufwand oder dem Wegfall von Prüfausschuss. Diese Einsparungen werden nicht durch eine Maximierung der voraussichtlichen Gewinne, sondern durch eine Minimierung der Amortisationszeit realisiert. Als Methode der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird folglich die statische Amortisationsrechnung gewählt.

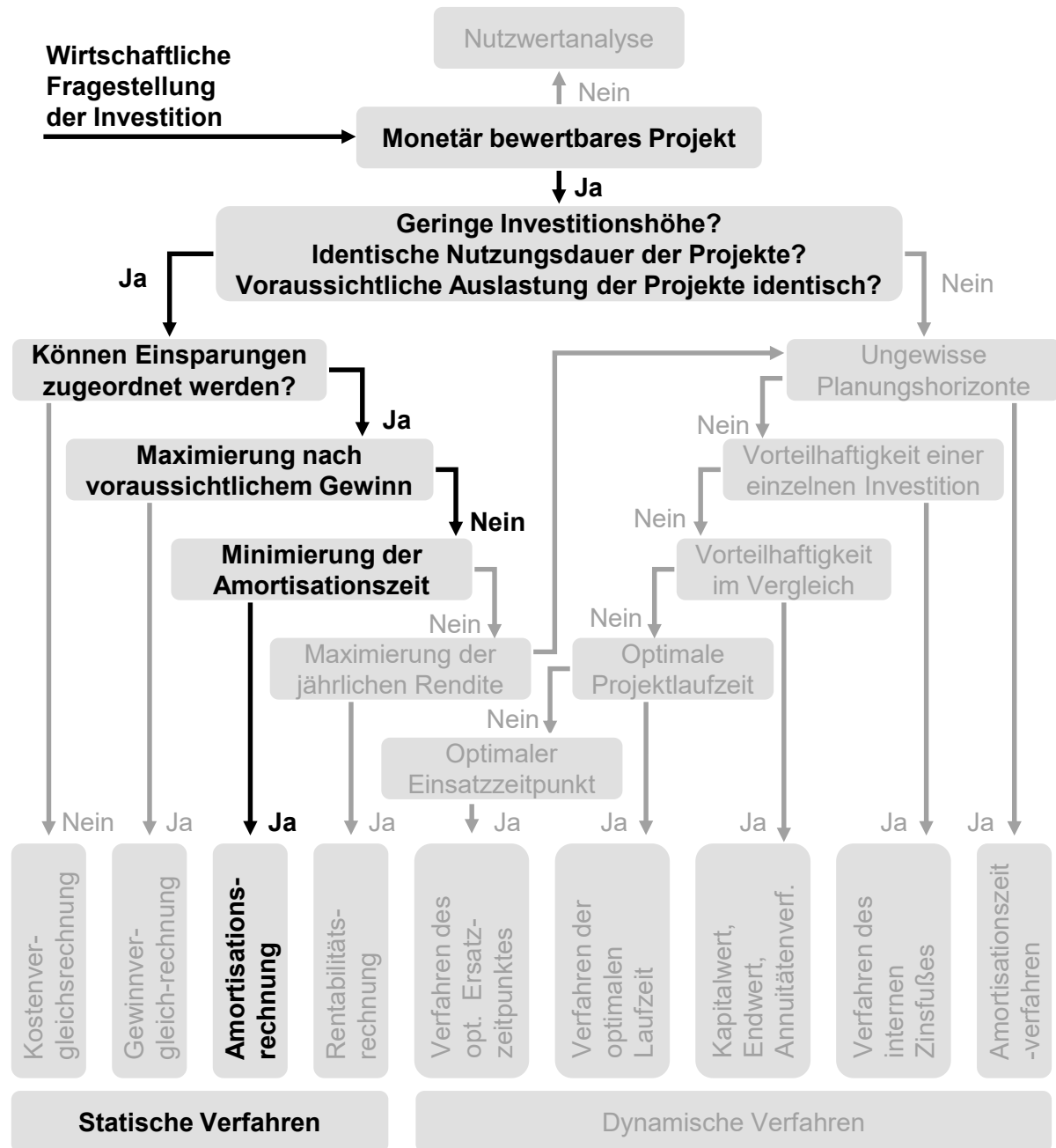


Abb. 10.2: Flussdiagramm zur Auswahl geeigneter Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach [Eve89]

Gemäß Abb. 10.2 wird die statische Amortisationsrechnung als Methode zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gewählt. Bei der statischen Amortisationsrechnung wird die Amortisationszeit T berechnet (10.1), die dem Zeitraum entspricht, in dem eine Investitionsausgabe I_0 durch die damit generierten Cashflows finanziell ausgeglichen wird. In der Industrie werden in der Regel Amortisationszeiten unterhalb der kritischen Amortisationszeit $T_{\text{Krit}} \leq 1 \text{ a}$ angestrebt, sodass sich Investition innerhalb eines Jahres rentieren müssen. [AAW04; SU17]

$$I_0 = \sum_{t=1}^T C_t \quad \text{mit } T_{\text{Krit}} \leq 1 \text{ a} \quad (10.1)$$

mit:

I_0	Investitionsausgabe	[€]
C_t	Cashflows	[€]
T	Amortisationszeit	[a]

10.1 Carbonfaser-Hersteller

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Hersteller erfolgt exemplarisch für Toray Industries, Inc., Tokyo (Japan), den weltweit größten CF-Hersteller mit der höchsten Produktionskapazität [Sau20]. Die der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde liegenden Annahmen basieren zum Teil auf Projektergebnissen des zugehörigen Forschungsvorhabens „EddySCARF“ und auf Experteninterviews (Tab. 10.1).

Tab. 10.1: Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Hersteller nach [Sau20; Lan22]^{17 18}

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
Jährliche Produktionskapazität	K_{Prod}	54,5	kt/a
Mittlere Feinheit der produzierten CF	$\bar{T}_t$	1.400	Tex
Produktionstage	T_{Prod}	292	d/a
Schichten pro Tag	S_a	3	-
Schichtdauer	S_d	7	H
Geschwindigkeit der Produktionslinie	V_{Prod}	10	m/min
Prüfvolumen der Tows durch Sensoren	$V_{\text{Prüf,H}}$	10	%
Investitionskosten je Sensor für den CF-Hersteller	$k_{S,H}$	10.000	€
Durchschnittlicher Verkaufspreis CF	p_C	21	€/kg
Verhinderbare Ausschussrate	C_{Aus}	2	%
Preisabschlag auf Ausschuss	$XP_{\text{,Aus}}$	40	%
Auslastung	y_a	80	%
Verringerung des Bedarfes an Restspulen für Tests	C_{Test}	50	%
Preisabschlag auf Restspulen	$XP_{\text{,Test}}$	5	%
Testvolumen der Spulen in Abhängigkeit von der Produktionskapazität	V_{Test}	1,25	1/t

¹⁷ Forschungsvorhaben „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 9/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

¹⁸ Experteninterviews, die aus Gründen der Geheimhaltung nicht näher spezifiziert werden

Gewicht der Testspulen	m_{Test}	3,5	kg
Anzahl eingesparter Produktionsmitarbeiter nach Produktionskapazität	a_P	0,4	1/kt
Gehalt Produktionsmitarbeiter	G_P	50.000	€/a
Anzahl eingesparter Chemielaboranten nach Produktionskapazität	a_C	0,2	1/kt
Gehalt Chemielaborant	G_C	50.000	€/a
Mehraufwand für Gehalt	X_{Gehalt}	60	%
Kritische Amortisationszeit	T_{krit}	1	a

Zunächst wird die Anzahl benötigter Sensorsysteme zur Berechnung der Gesamtinvestitionsausgabe abgeschätzt. Dazu wird die Nennlänge der jährlich produzierten CF-Menge bei vollständiger Auslastung der Produktionskapazität und der mittleren Feinheit der hergestellten CF-Rovings berechnet (10.2).

$$l_{\text{Nenn, CF}} = \frac{K_{\text{Prod}}}{\bar{T}_t} = 38,9 \cdot 10^6 \text{ km/a} \quad (10.2)$$

mit:

$l_{\text{Nenn, CF}}$	Nennlänge der produzierten CF	[km/a]
K_{Prod}	Jährliche Produktionskapazität	[kt/a]
$\bar{T}_t$	Mittlere Feinheit der produzierten CF-Rovings	[tex]

In Abhängigkeit von der berechneten Nennlänge, den Produktionstage, der Anzahl an Schichten je Arbeitstag sowie der Produktionsgeschwindigkeit folgt die Berechnung der Anzahl an parallel hergestellten CF-Tows Gleichung (10.3).

$$n_T = \frac{l_{\text{Nenn, CF}}}{t_{\text{Prod}} \cdot S_a \cdot S_d \cdot v_{\text{Prod}}} = 10,6 \cdot 10^3 \quad (10.3)$$

mit:

n_T	Anzahl parallel produzierter CF-Tows	[-]
$l_{\text{Nenn, CF}}$	Nennlänge der produzierten CF	[km/a]
t_{Prod}	Produktionstage	[d/a]
S_a	Schichten pro Tag	[-]
S_d	Schichtdauer	[h]
v_{Prod}	Geschwindigkeit der Produktionslinie	[m/min]

Zur Berechnung der benötigten Anzahl an Sensorsystemen wird das notwendige Prüfvolumen als Anteil aller parallel hergestellten Tows abgeschätzt. Das exakte Prüfvolumen richtet sich nach dem Bedarf des CF-Herstellers und der angestrebten Sicherheit der Prüfung, bzw. nach den Anforderungen der qualifizierten Zulieferer, die Kunden des CF-Herstellers sind. Das exakte Prüfvolumen

ergibt sich final im industriellen Einsatz des marktreifen, multimodalen Sensorsystems und wird daher im Vorfeld gemäß Tab. 10.1 abgeschätzt. Damit folgt die Anzahl an notwendigen Sensorsystemen nach Gleichung (10.4).

$$n_{S,H} = V_{\text{Prüf,H}} \cdot n_T = 1,1 \cdot 10^3 \quad (10.4)$$

mit:

$n_{S,H}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Herstellers	[-]
$V_{\text{Prüf,H}}$	Prüfvolumen der Tows durch Sensoren	[%]
n_T	Anzahl parallel produzierter CF-Tows	[-]

Die Die Gesamtinvestitionsausgabe der benötigter Sensorsysteme folgt damit Gleichung (10.5) unter Vernachlässigung der Kosten zur Installation in der Produktionslinie, die gegenüber der Gesamtinvestition gering sind.

$$I_{0,H} = n_{S,H} \cdot k_{S,H} = 10,6 \text{ Mio. €} \quad (10.5)$$

mit:

$I_{0,H}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Herstellers	[€]
$n_{S,H}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Herstellers	[-]
$k_{S,H}$	Investitionskosten je Sensorsystem für den CF-Hersteller	[€]

Nun erfolgt die Berechnung der über die Investitionsausgabe realisierbaren Cashflows. Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt die Qualitätssicherung innerhalb der CF-Produktion stichprobenartig durch die randomisierte Entnahme von Testspulen und die Überwachung von Prozessparametern. Die Testspulen werden offline in Testlaboren auf statistisch signifikante Abweichung vom Sollwert der Qualitätsmessgrößen geprüft, wobei pro Spule lediglich 50 – 100 m Roving vermessen werden. Diese Offline-Prüfungen sind jedoch zeitintensiv, sodass gegebenenfalls CF minderer Qualität hergestellt werden, bis das Ergebnis der Qualitätsüberwachung vorliegt. Chargen minderer Qualität werden in ihrer Produktqualität herabgestuft und zum Teil mit Preisabschlag verkauft oder zu Kurzfasern oder CF-Mehl verarbeitet. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der Qualitätsüberwachung mit dem entwickelten, multimodalen Sensorsystem eine Inline-Überwachung, sodass Qualitätsabweichungen in Echtzeit festgestellt und Produktionsparameter korrigiert werden können. Das Einsparpotenzial für CF-Hersteller durch die Reduktion von Ausschuss oder minderer Qualität durch eine umgehende Anpassung der Produktionsparameter wird über Gleichung (10.6) berechnet.

$$C_{\text{Aus}} = K_{\text{Prod}} \cdot p_{\text{C}} \cdot c_{\text{Aus}} \cdot x_{\text{p,Aus}} \cdot y_{\text{a}} = 7,32 \text{ Mio. €/a} \quad (10.6)$$

mit:

C_{Aus}	Cashflow durch Verminderung von Ausschuss	[€/a]
K_{Prod}	Jährliche Produktionskapazität	[kt/a]
p_{C}	Durchschnittlicher Verkaufspreis CF	[€/kg]
c_{Aus}	Verhinderbare Ausschussrate	[%]
$x_{\text{p,Aus}}$	Preisabschlag auf Ausschuss	[%]
y_{a}	Auslastung	[%]

Zusätzlich wird durch die Verwendung des multimodalen Sensorsystems der Personalaufwand in den Testlaboren zur Offline-Qualitätssicherung reduziert und die Anzahl der benötigten Testspulen gesenkt. Die Einsparung durch die geringere Anzahl an benötigten Testspulen folgt Gleichung (10.7).

$$C_{\text{Test}} = K_{\text{Prod}} \cdot p_{\text{C}} \cdot (1 - c_{\text{Test}}) \cdot (1 - x_{\text{p,Test}}) \cdot y_{\text{a}} \cdot V_{\text{Test}} \cdot m_{\text{Test}} = 1,90 \text{ Mio. €/a} \quad (10.7)$$

mit:

C_{Test}	Cashflow durch Verminderung der Testspulen	[€/a]
K_{Prod}	Jährliche Produktionskapazität	[kt/a]
p_{C}	Durchschnittlicher Verkaufspreis CF	[€/kg]
c_{Test}	Verringerung des Bedarfes an Restspulen für Tests	[%]
$x_{\text{p,Test}}$	Preisabschlag auf Restspulen	[%]
y_{a}	Auslastung	[%]
V_{Test}	Testvolumen der Spulen in Abhängigkeit von der Produktionskapazität	[1/t]
m_{Test}	Gewicht je Restspule	[kg]

Das Einsparpotenzial des reduzierten Personalaufwands in den Testlaboren wird über Gleichung (10.8) berechnet.

$$C_{\text{Pers}} = (a_{\text{P}} \cdot G_{\text{P}} + a_{\text{C}} \cdot G_{\text{C}}) \cdot x_{\text{Gehalt}} \cdot K_{\text{Prod}} = 2,62 \text{ Mio. €/a} \quad (10.8)$$

mit:

C_{Pers}	Cashflow durch reduzierten Personalaufwand	[€/a]
a_{P}	Anzahl eingesparter Produktionsmitarbeiter nach Produktionskapazität	[1/kt]
G_{P}	Gehalt Produktionsmitarbeiter	[€/a]
a_{C}	Anzahl eingesparter Chemielaboranten nach Produktionskapazität	[1/kt]
G_{C}	Gehalt Chemielaborant	[€/a]
x_{Gehalt}	Mehraufwand für Gehalt	[%]
K_{Prod}	Jährliche Produktionskapazität	[kt/a]

Das gesamte Einsparpotenzial summiert sich über die Cashflows durch Verminderung von Ausschuss, durch Verminderung der Testspulen und durch reduzierten Personalaufwand gemäß Gleichung (10.9).

$$C_{\text{ges}} = C_{\text{Aus}} + C_{\text{Test}} + C_{\text{Pers}} \quad (10.9)$$

mit:

$C_{\text{ges,H}}$	Gesamter Cashflow des CF-Herstellers	[€/a]
C_{Aus}	Cashflow durch Verminderung von Ausschuss	[€/a]
C_{Test}	Cashflow durch Verminderung der Testspulen	[€/a]
C_{Pers}	Cashflow durch reduzierten Personalaufwand	[€/a]

Damit wird die Amortisationszeit des CF-Herstellers auf Basis von Gleichung (10.1) final gemäß Gleichung (10.10) berechnet.

$$T_{\text{Her}} = \frac{I_{0,H}}{C_{\text{Ges,H}}} = 0,89 \text{ a} < T_{\text{krit}} = 1 \text{ a} \quad (10.10)$$

mit:

T_{Her}	Amortisationszeit des CF-Herstellers	[a]
$I_{0,H}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Herstellers	[€]
$C_{\text{ges,H}}$	Gesamter Cashflow des CF-Herstellers	[€/a]

Tab. 10.2 fasst die zentralen Ergebnisse der Amortisationsrechnung für den CF-Verarbeiter tabellarisch zusammen. Dem Weltmarktführer Toray bietet sich bei einer weltweiten Implementierung des Sensorsystems ein jährliches Einsparpotenzial von rund 11,84 Mio. €. Damit amortisiert sich die Gesamtinvestitionsausgabe in das multimodale Sensorsystem in weniger als elf Monaten und liegt unterhalb der kritischen Amortisationszeit von einem Jahr, die in der Industrie üblicherweise für Sensorik angestrebt wird. Damit ist die Investition in das multimodale Sensorsystem für den CF-Hersteller wirtschaftlich sinnvoll und sehr attraktiv. Da zudem der Wartungsaufwand gering ist und kein Verschleiß am Sensorsystem auftritt, können die Sensoren dauerhaft eingesetzt werden und langfristig jährliche Einsparungen erzielen.

Tab. 10.2: Amortisationsrechnung für CF-Hersteller nach [Lan22]

Größe		Zahlenwert
Cashflows	durch Verminderung von Ausschuss	7,3 Mio. €/a
	durch Verminderung der Testspulen	1,9 Mio. €/a
	durch reduzierten Personalaufwand	2,6 Mio. €/a
Gesamter Cashflow		11,8 Mio. €/a
Anzahl benötigter Sensorsysteme		1.058
Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Herstellers		10,6 Mio. €
Amortisationszeit		0,89 a

Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit für verschiedene Einflussgrößen unter Einbeziehung der kritischen Amortisationszeit von $T_{\text{krit}} = 1$ a durchgeführt. Abb. 10.3 a) zeigt die Sensitivität der Amortisationszeit für den CF-Preis. Die Investition in das multimodale Sensorsystem lohnt sich insbesondere für hochpreisige CF-Typen ab 18 €/kg. Die Amortisationszeit steigt zudem proportional zu den Kosten je Sensorsystem (Abb. 10.3 b). Mit Blick auf die Investitionsentscheidung des CF-Herstellers sollten die Kosten je Sensor nicht über 12.000 € liegen, um eine Amortisation innerhalb eines Jahres zu gewährleisten. Da die Amortisationszeit mit zunehmender Auslastung der Produktionskapazität sinkt (Abb. 10.3 c), sollte die Auslastung im Jahresmittel bei mehr als 70 % liegen. Auch mit zunehmendem Prüfvolumen (Abb. 10.3 d) steigt die Amortisationszeit. Hierbei sollte das Prüfvolumen bei mehr als 12 % liegen, um gegenüber der Qualitätsüberwachung im Prüflabor eine Wirtschaftlichkeit des Sensorsystems sicherzustellen.

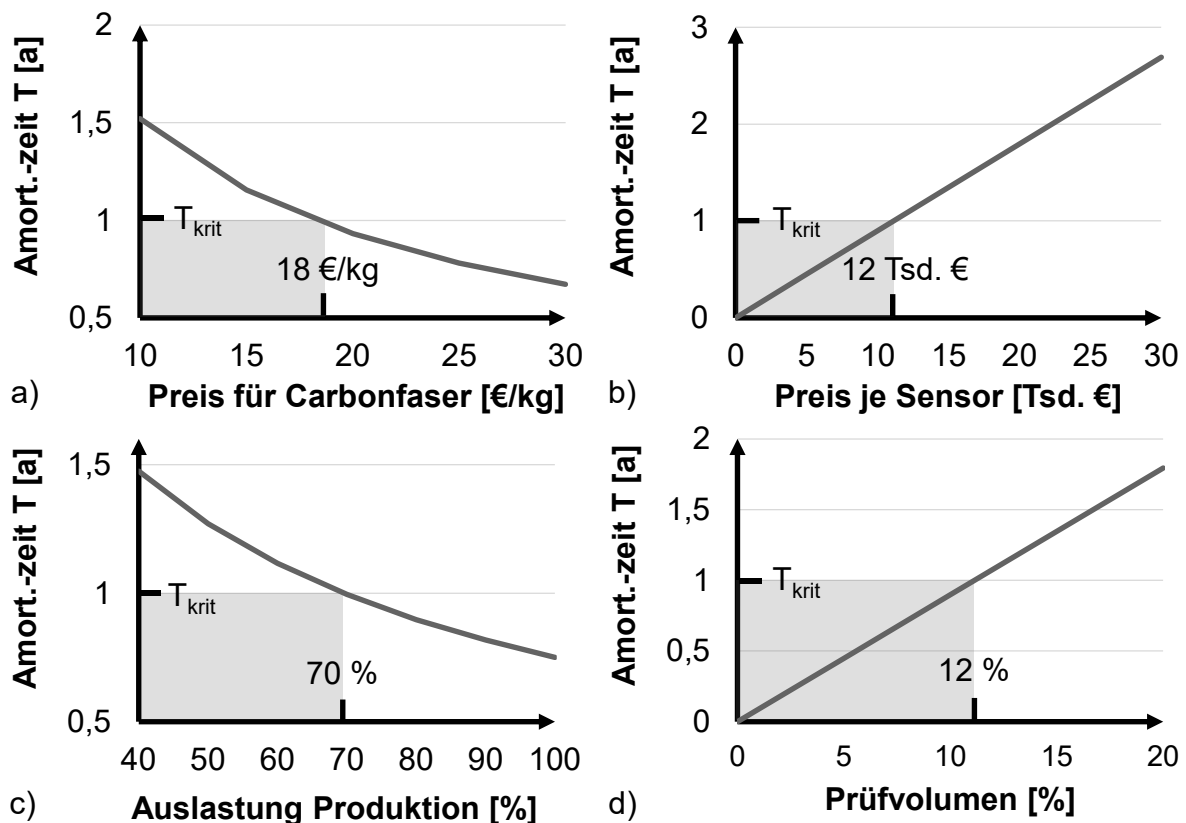


Abb. 10.3: Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit T für a) den CF-Preis, b) den Sensorpreis, c) die Auslastung der Produktion und d) das Prüfvolumen für eine Amortisation $T_{\text{krit}} \leq 1$ a nach [Lan22]

Ein weiteres Potenzial zur wirtschaftlichen Nutzung liegt in der Entwicklung neuer CF-Typen. Im Entwicklungsprozess neuer Serienprodukte treten erfahrungsgemäß hohe Ausschussraten auf. Hierdurch ergibt sich ein besonders hohes, wirtschaftliches Potenzial des Sensorsystems, da auf Qualitätsschwankungen bzw. Ausschussqualitäten schnell und agil reagiert werden kann (Abb. 10.4 a). Die Identifikation geeigneter Produktions- und Prozessparameter erfordert ein hohes Maß an Know-how, während diese Parameter über der Entwicklungszeit mit steigender, kumulierter Produktionsmenge stetig verbessert werden. Durch das Sensorsystem können mit steigender Produktionsmenge Ausschuss und damit auch Produktionskosten schneller reduziert werden. Der wirtschaftliche Vorteil der Economies of Scale durch das Sensorsystem bei hohen, kumulierten Produktionsmengen wird in Abb. 10.4 b) skizziert.

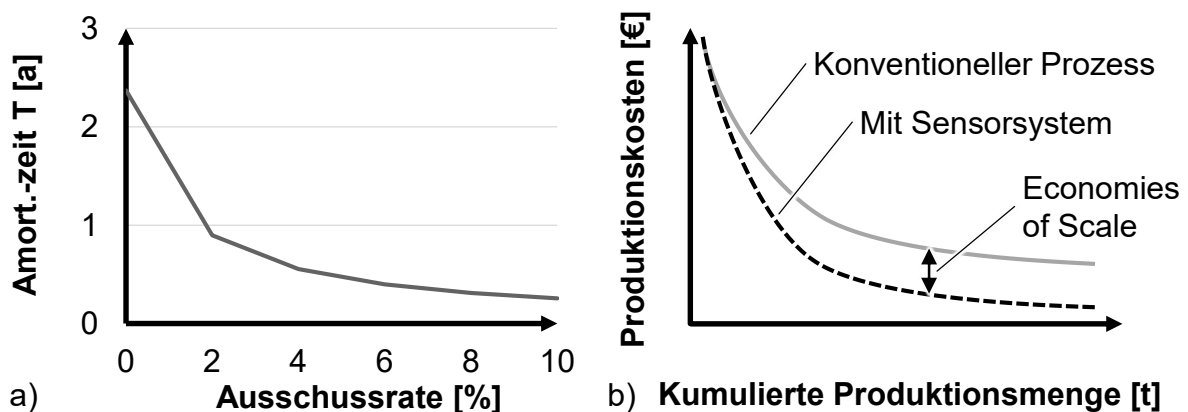


Abb. 10.4: a) Sensitivität der Amortisationszeit T für die Ausschussrate und b) Skaleneffekten durch das Sensorsystem nach [Lan22; SB18]

Damit wird die Investition eines CF-Herstellers in das multimodale Sensorsystem als wirtschaftlich sinnvoll eingestuft und empfohlen. Größte Hebel für eine Verkürzung der Amortisationszeit sind der Preis des überwachten CF-Typs, der Sensorpreis, die Auslastung der Produktionskapazitäten und das angestrebte Prüfvolumen. Als Anwendungsfall mit besonders hohem, wirtschaftlichem Potenzial für den CF-Hersteller wird die Entwicklung neuer CF-Typen identifiziert.

Mit einer Amortisationszeit von unter elf Monaten ist die Investition in das multimodale Sensorsystem für CF-Hersteller wirtschaftlich sinnvoll.

10.2 Carbonfaser-Verarbeiter

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Verarbeiter erfolgt am Beispiel der Saertex GmbH & Co. KG, Saerbeck. Saertex ist ein mittelständischer Hersteller multiaxialer Gelege und Kernmaterialien für die Fertigung von Faserverbundbauteilen aus Carbon-, Glas- und Aramidfasern [SAE22]. Die der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde liegenden Annahmen basieren zum Teil auf Projektergebnissen des zugehörigen Forschungsvorhabens „EddySCARF“ und auf Experteninterviews (Tab. 10.3). Der Preis des Sensorsystems wird aufgrund geringerer Skaleneffekte bei der Bündelung der Messtechnik durch die geringere Abnahmemenge im Vergleich zu CF-Herstellern doppelt so hoch angenommen.

Tab. 10.3: Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Hersteller nach [Sau20; Lan22]^{19 20}

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
CF-Verarbeitungsmenge	M_{CF}	300	t/a
Anteil defekter Spulen	CS_{pul}	4	%
Anteil Luft-/Raumfahrtqualität	x_L	30	%
Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Luftfahrtqualität	p_L	25,5	€/kg
Anteil Automobil-/Industriequalität	x_A	70	%
Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Automobil-/Industriequalität	p_A	15	€/kg
Kosten durch Produktionsstillstand Verarbeitungsmenge	k_{Still}	1.250	€/t
Reduktion des materialbedingten Sicherheitsfaktors	SF	0	%
Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Verarbeiters	$n_{S,H}$	15	-
Investitionskosten je Sensorsystem für den CF-Verarbeiter	$k_{S,H}$	20.000	€
Prüfvolumen des CF-Verarbeiters nach Verarbeitungsmenge	$V_{Prüf,H}$	0,05	1/t
Kritische Amortisationszeit	T_{krit}	1	A

¹⁹ Forschungsvorhaben „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 9/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

²⁰ Experteninterviews, die aus Gründen der Geheimhaltung nicht näher spezifiziert werden

Zunächst wird die Anzahl benötigter Sensorsysteme anhand der Menge an jährlich verarbeiteter CF und dem angestrebten Prüfvolumen abgeschätzt (10.4).

$$n_{S,V} = M_{CF} \cdot V_{Prüf,V} = 15 \quad (10.11)$$

mit:

$n_{S,V}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Verarbeiters	[-]
M_{CF}	CF-Verarbeitungsmenge	[t/a]
$V_{Prüf,V}$	Prüfvolumen des CF-Verarbeiters nach Verarbeitungsmenge	[1/t]

Damit berechnet sich die Gesamtinvestitionsausgabe der benötigter Sensorsysteme nach Gleichung (10.12), unter Vernachlässigung der Kosten zur Installation in der Produktionslinie, die gegenüber der Gesamtinvestition gering sind.

$$I_{0,V} = n_{S,V} \cdot k_{S,V} = 300,0 \text{ Tsd. €} \quad (10.12)$$

mit:

$I_{0,V}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Verarbeiters	[€]
$n_{S,H}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Verarbeiters	[-]
$k_{S,H}$	Investitionskosten je Sensorsystem für den CF-Verarbeiter	[€]

Durch die Investition in das multimodale Sensorsystem bieten sich dem CF-Verarbeiter verschiedene Cashflows [Lan22]:

- Reklamation fehlerhafter, schlecht zu verarbeitender CF-Spulen
- Reduktion von Stillstandzeiten durch fehlerhafte CF-Spulen
- Reduktion von Personal- und Wartungskosten in der Prozesslinie
- Reduktion des Materialbedarfs durch gezieltere Auslegung der CF-Halbzuge bei genauer Materialkenntnis

Der Cashflow durch die Reklamation fehlerhafter, schlecht zu verarbeitender Spulen wird über die gesamte verarbeitete Masse an CF und den Anteil fehlerhafter Spulen gemäß Gleichung (10.13) abgeschätzt. Hierbei wird zwischen geringeren CF-Qualitäten für Anwendungen im Automobilbereich und höheren Qualitäten im Luft- und Raumfahrtbereich unterschieden. Eine Reklamation durch den CF-Verarbeiter ist derzeit nur auf Kulanz des CF-Herstellers möglich. Im Gegensatz dazu wird durch die Qualitätsüberwachung mit dem multimodalen Sensorsystem die CF-Qualität quantitativ bewertet, sodass Qualitätsabweichung vom Normalwert sichtbar werden. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit den Uster-Statistics, bei denen die Qualität von Faserstoffen anhand definierter

Qualitätsparameter quantifiziert wird und die einen allgemein akzeptierten Qualitätsstandard in der Textilindustrie abbilden [Ust18].

$$C_{\text{Rekl}} = M_{\text{CF}} \cdot c_{\text{Spul}} \cdot (x_L \cdot p_L + x_A \cdot p_A) = 217,8 \text{ Tsd. €/a} \quad (10.13)$$

mit:

C_{Rekl}	Cashflow durch Reklamation fehlerhafter Spulen	[€/a]
M_{CF}	CF-Verarbeitungsmenge	[t/a]
c_{Spul}	Anteil defekter Spulen	[%]
x_L	Anteil Luft-/Raumfahrtqualität	[%]
p_L	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Luftfahrtqualität	[€/kg]
x_A	Anteil Automobil-/Industriequalität	[%]
p_A	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Industriequalität	[€/kg]

Durch das multimodale Sensorsystem werden fehlerhafte CF-Spulen inline detektiert. Fehlerhafte CF-Spulen führen zu Fehlern im Produktionsprozess, die manuell behoben werden und die zu Stillstandzeiten an den Anlagen führen. Der Cashflow durch Reduktion der Stillstandzeiten der Produktionsanlagen und die damit verbundenen Reparatur- und Wartungskosten folgt Gleichung (10.14).

$$C_{\text{Still}} = M_{\text{CF}} \cdot k_{\text{Still}} = 375,0 \text{ Tsd. €/a} \quad (10.14)$$

mit:

C_{Still}	Cashflow durch Reduktion der Stillstandzeiten	[€/a]
M_{CF}	CF-Verarbeitungsmenge	[t/a]
k_{Still}	Kosten durch Produktionsstillstand Verarbeitungsmenge	[€/t]

Durch eine kontinuierliche Überwachung der CF im Produktionsprozess mit dem multimodale Sensorsystem wird die Materialkenntnis der CF gegenüber der konventionellen, strichprobenartigen Prüfung verbessert. Durch eine genauere Materialkenntnis könnten diejenigen Sicherheitsfaktoren im späteren Faser-verbundbauteil reduziert werden, die aus der Unsicherheit bezüglich der CF-Qualität resultieren. Damit könnte bei gleichen, mechanischen Eigenschaften die Masse an eingesetzter CF gesenkt und Kosten für den CF-Verarbeiter eingespart werden. Der Cashflow durch eine Reduktion der materialbedingten Sicherheitsfaktoren folgt prinzipiell Gleichung (10.15). Die Reduktion der Sicherheitsfaktoren ist jedoch sicherheitskritisch und muss zunächst in der industriellen Praxis validiert und abgesichert werden. Daher wird die Amortisationszeit konservativ abgeschätzt und der Cashflow durch Reduktion der Sicherheitsfaktoren zunächst vernachlässigt.

$$C_{SF} = M_{CF} \cdot SF \cdot (x_L \cdot p_L + x_A \cdot p_A) = 0 \text{ €/a} \quad (10.15)$$

mit:

C_{RF}	Cashflow durch Reduktion des Sicherheitsfaktors	[€/a]
M_{CF}	CF-Verarbeitungsmenge	[t/a]
SF	Reduktion des materialbedingten Sicherheitsfaktors	[%]
x_L	Anteil Luft-/Raumfahrtqualität	[%]
p_L	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Luftfahrtqualität	[€/kg]
x_A	Anteil Automobil-/Industriequalität	[%]
p_A	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Industriequalität	[€/kg]

Das gesamte Einsparpotenzial summiert sich über die Cashflows durch Reklamation fehlerhafter Spulen, durch Reduktion von Stillstandzeit und gegebenenfalls materialbedingten Sicherheitsfaktoren nach Gleichung (10.16).

$$C_{ges,V} = C_{Rekl} + C_{Still} + C_{SF} = 592,8 \text{ Tsd. €/a} \quad (10.16)$$

mit:

$C_{ges,V}$	Gesamter Cashflow des CF-Verarbeiters	[€/a]
C_{Rekl}	Cashflow durch Reklamation fehlerhafter Spulen	[€/a]
C_{Still}	Cashflow durch Reduktion der Stillstandzeiten	[€/a]
C_{RF}	Cashflow durch Reduktion des Sicherheitsfaktors	[€/a]

Damit wird die Amortisationszeit des CF-Verarbeiters auf Basis von Gleichung (10.1) final gemäß Gleichung (10.17) berechnet.

$$T_{Ver} = \frac{I_{0,V}}{C_{Ges,V}} = 0,51 \text{ a} < T_{krit} = 1 \text{ a} \quad (10.17)$$

mit:

T_{Ver}	Amortisationszeit des CF-Verarbeiters	[a]
$I_{0,V}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Verarbeiters	[€]
$C_{ges,V}$	Gesamter Cashflow des CF-Verarbeiters	[€/a]

Tab. 10.4 zeigt die zentralen Ergebnisse der Amortisationsrechnung für den CF-Verarbeiter. Dem mittelständischen CF-Verarbeiter Saertex wird durch Verwendung des multimodalen Sensorsystems ein jährliches Einsparpotenzial von 592.000 € prognostiziert. Die daraus resultierende Amortisationszeit von 0,51 a liegt weit unter dem in der Industrie üblicherweise angestrebten Grenzwert von einem Jahr. Da sich das Sensorsystem damit in rund sechs Monaten amortisiert, ist die Investition in das multimodale Sensorsystems auch für den CF-Hersteller wirtschaftlich sinnvoll und sehr attraktiv. Auch hier können die Sensoren langfristig mit wenig Aufwand eingesetzt werden, da bei fachgerechter Nutzung kein Verschleiß am multimodalen Sensorsystem auftritt.

Tab. 10.4: Amortisationsrechnung für CF-Verarbeiter nach [Lan22]

Größe		Zahlenwert
Cashflows	durch Reklamation fehlerhafter Spulen	271,8 Tsd. €/a
	durch Reduktion der Stillstandzeiten	375,0 Tsd. €/a
	durch Reduktion des Sicherheitsfaktors	0 €/a
Gesamter Cashflow		592,8 Tsd. €/a
Anzahl benötigter Sensorsysteme		15
Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Herstellers		300,0 Tsd. €
Amortisationszeit		0,51 a

Abschließend erfolgt eine Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit für die verschiedenen Einflussgrößen (Abb. 10.5), sodass die Attraktivität der Investition bei Variation der Einflussgrößen abgeschätzt werden kann. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt unter Betrachtung der kritischen Amortisationszeit von $T_{\text{krit}} = 1$ a.

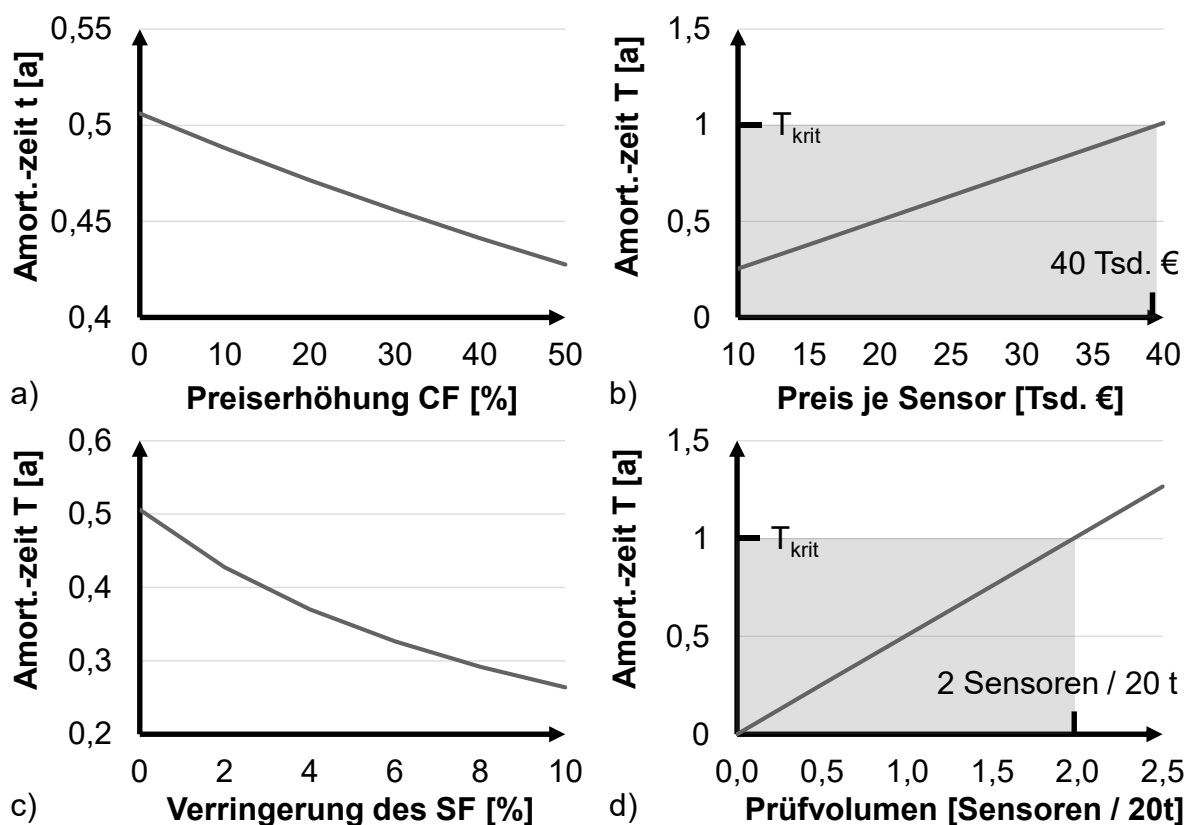


Abb. 10.5: Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit für a) eine Preiserhöhung der CF, b) den Preis je Sensor, c) eine Reduktion des Sicherheitsfaktors und d) das Prüfvolumen nach [Lan22]

Abb. 10.5 a) zeigt die Sensitivität einer Preiserhöhung hinsichtlich der erwarteten Amortisationszeit. Auch hier rentiert sich das Sensorsystem früher, je hochpreisiger der verwendete CF-Typ ist. Die Amortisationszeit ist zudem proportional zum Sensorpreis (Abb. 10.5 b). Bis zu einem Einzelpreis von 40.000 € je Sensorsystem liegt die Amortisationszeit unterhalb der in der Industrie üblichen Grenze von einem Jahr und eine Investition ist wirtschaftlich sinnvoll. Abb. 10.5 c) zeigt die hohe Sensitivität der Amortisationszeit für eine mögliche Reduktion des Sicherheitsfaktors. Hier führt eine Reduktion des Sicherheitsfaktors um nur 2 %, von beispielsweise 3 % auf 2,94 %, zu einer Verkürzung der Amortisationszeit von über einem Monat. Auch zum verwendeten Prüfvolumen ist die Amortisationszeit proportional (Abb. 10.5 d), sodass im industriellen Einsatz final die Anzahl an Sensoren je Produktionsmenge identifiziert werden muss, um eine ausreichende Qualitätsüberwachung zu erzielen. Mit Blick auf eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit sollte nur das notwendige Prüfvolumen bzw. die minimale Anzahl an Sensoren angestrebt werden.

Damit wird die Investition eines CF-Verarbeiters in das multimodale Sensorsystem als wirtschaftlich sinnvoll eingestuft und empfohlen. Größte Hebel für eine kurze Amortisationszeit sind die Prüfung hochpreisiger CF-Typen, der Sensorpreis und das angestrebte Prüfvolumen. Auch eine mögliche Verringerung des Sicherheitsfaktors führt zu einer hohen Steigerung der Wirtschaftlichkeit, muss in der industriellen Praxis jedoch noch überprüft werden.

Da sich das multimodale Sensorsystem bei CF-Verarbeitern in rund sechs Monaten amortisiert, ist die Investition wirtschaftlich sinnvoll.

10.3 Gesamtheitliche Betrachtung

Abschließend erfolgt die gesamtheitliche Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zur Investition in das multimodalen Sensorsystems. Die Inline-Qualitätssicherung von CF-Rovings ist unter den getroffenen Annahmen sowohl für CF-Hersteller als auch für CF-Verarbeiter wirtschaftlich sinnvoll und wird empfohlen, da für beide Nutzergruppen die Amortisationszeit unter einem Jahr liegt. Abb. 10.6 zeigt das gesamte, mögliche Einsparpotenzial in Höhe von rund 220 Mio. €/a

für den globalen CF-Markt im Jahr 2023. Welcher Anteil des gesamten Einsparpotentials realisiert wird, ist dabei von der erzielten Marktdurchdringung des Sensorsystems abhängig.

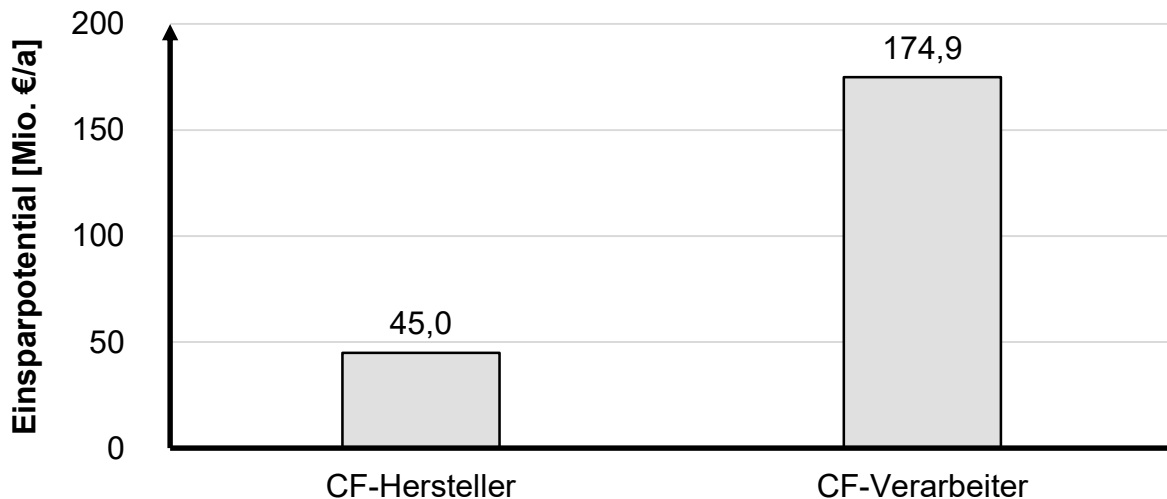


Abb. 10.6: Globales Einsparpotenzial für CF-Verarbeiter und Hersteller für den CF-Markt 2023 [Sau20; Lan22]

Die Prognose basiert auf den in Kap. 10.1 und Kap. 10.2 beschriebenen Modellen für CF-Hersteller und Verarbeiter und den für 2023 prognostizierten Produktionskapazitäten und CF-Bedarfsmengen [Sau20]. Das kumulierte, globale Einsparpotenzial liegt für das Produktionsjahr 2023 bei rund 220 Mio. €, wobei etwa 80 % auf CF-Verarbeiter und 20 % auf CF-Hersteller entfallen. Dem CF-Hersteller und Weltmarktführer Toray mit einem Anteil von 26,34 % an der globalen Produktionskapazität bietet sich ein Einsparpotenzial von 11,8 Mio. € pro Jahr. Skaliert über die für 2023 prognostizierte, weltweite Produktionskapazität ergibt sich ein Einsparpotenzial von rund 45,0 Mio. € für alle CF-Hersteller. Der mittelständische CF-Verarbeiter Saertex hat einen Anteil von etwa 0,34 % am globalen CF-Bedarf, womit ein Einsparpotenzial von 0,59 Mio. € erzielbar ist. Skaliert mit der für 2023 prognostizierten, globalen Bedarfsmenge ergibt sich weltweit ein mögliches Einsparpotenzial von rund 174,9 Mio. € pro Jahr. [Sau20; Lan22]

11 Zusammenfassung

Die Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien wird aus den Vorgaben der Europäischen Kommission und des EU-Parlaments für eine CO₂-neutrale und nachhaltige Zukunft Europas abgeleitet. Für den wirtschaftlichen Einsatz von CFK-Strukturbauteilen müssen Kosten in der CFK-Prozesskette gesenkt werden, indem fehlerhafte Rovings frühzeitig detektiert und von weiterer Wertschöpfung ausgeschlossen werden. Ein geeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren (ZfP) ermöglicht an dieser Stelle die Inline-Qualitätsüberwachung des CF-Rovings entlang der gesamten CF-Prozesskette.

Ein geeignetes ZfP trägt zur Kostenreduktion in der CFK-Prozesskette bei und ermöglicht wirtschaftlichen Leichtbau.

Filamentbrüche sind eine geeignete Qualitätsmessgröße für CF-Rovings, da sie unter anderem die Verarbeitbarkeit mindern und Reklamationen in der Regel aufgrund schlechter Verarbeitbarkeit erfolgen. Die Quantifizierung der Verarbeitbarkeit erfolgt in der industriellen Praxis jedoch lediglich stichprobenartig mithilfe sensortechnischer Insellösungen der CF-Hersteller, die weder standardisiert noch kommerziell verfügbar sind.

Derzeit existiert kein Prüfverfahren, das inline und zerstörungsfrei eine 100 %-Qualitätssicherung von CF-Rovings erlaubt.

Das Ziel dieser Dissertation ist die daher Entwicklung eines ZfP, das inline eine 100 %-Prüfung von CF-Rovings erlaubt und auch verdeckte Fehler detektiert, um die Verarbeitbarkeit eines Rovings über die Anzahl der Filamentbrüche zu quantifizieren. Hierzu werden Kernanforderungen an das ZfP formuliert, die zugleich als Kriterium zur Bewertung der Zielerreichung in der Entwicklung des Sensorsystems dienen (vgl. Abb. 11.1). Zunächst werden ZfP vorausgewählt, die prinzipiell zur Erfüllung der Messaufgabe geeignet sind, wie die Ultraschallprüfung, das Wirbelstromverfahren, radiografische Prüfverfahren sowie die Thermografie. Die getroffene Vorauswahl entspricht den Verfahren, die bereits erfolgreich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie für die Qualitätssicherung an CF-basierten Werkstoffen eingesetzt werden. Unter dieser Vorauswahl wird das

Wirbelstromverfahren als das Prüfverfahren mit dem höchsten Potenzial zur Erfüllung der Messaufgabe identifiziert.

Das Wirbelstromverfahren verfügt über das höchste Potenzial zur Erfüllung des Prüfziels und wird daher in dieser Dissertation favorisiert.

Es werden die elektromagnetischen Grundlagen des Wirbelstromverfahrens untersucht und die Auswertung der Impedanz als Messgröße, physikalische Einflussgrößen und das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren betrachtet. Die theoretischen Grundlagen bilden die Basis für die Adaption der klassischen Wirbelstromtheorie für die Prüfung von CF-Rovings und die Ableitung einer schematischen Darstellung zur Ausbreitung der Wirbelströme in CF-Rovings. Abschließend erfolgt der Funktionsnachweis im Rahmen eines rudimentären Vorversuchs, in dem die prinzipielle Eignung des Messprinzips Wirbelstrom zur Detektion von Filamentbrüchen nachgewiesen wird.

Das Messprinzip Wirbelstrom ist prinzipiell zur Detektion von Filamentbrüchen in CF-Rovings geeignet.

Auf Grundlage des Funktionsnachweises wird ein multimodales Sensorsystem entwickelt, das aus einem Wirbelstromsensor und einem Kameramodul besteht. Mit dem Kameramodul werden geometrische Daten des CF-Rovings erfasst und das Wirbelstromsignal um den Einfluss dieser geometrischen Daten bereinigt. Die resultierende Messgröße wird als bereinigte Magnitude bezeichnet und ist geeignet, die Qualität eines CF-Rovings zu bewerten. Zusätzlich wird ein System zur Inline-Reinigung des Wirbelstromsensors entwickelt. Die Inline-Reinigung kompensiert die Ablagerung von CF-Fragmenten und Stäuben, die aufgrund ihrer Leitfähigkeit das Messsignal beeinflussen und verfälschen können. Zur Inline-Reinigung werden ein Druckluft-Modul sowie ein PTFE-Inlay mit niedrigen Haft- und Gleitreibungseigenschaften vorgesehen.

Über ein multimodales Messsystem, bestehend aus Wirbelstromsensor und Kameramodul, wird eine bereinigte Magnitude erzeugt, die zur Bewertung der Qualität eines CF-Rovings geeignet ist.

Zur Auswertung der bereinigten Magnitude werden verschiedene Ansätze entwickelt und hinsichtlich ihrer Klassifizierungsgenauigkeit bewertet. Die Ansätze

umfassen einerseits Methoden des Machine Learning und andererseits eine klassische Auswertungsmethode. Im Bereich des Machine Learning werden vorwärts gerichtete, neuronale Netze als Methode des überwachten Lernens und verschiedene Cluster-Algorithmen als Methode des unüberwachten Lernens verwendet. Als klassische Auswertungsmethode wird eine Qualitätsregelkarte aus der statistischen Prozesskontrolle verwendet. Die Bewertung der Klassifizierungsgenauigkeit der verschiedenen Ansätze erfolgt anhand des Anteils korrekt klassifizierter Schädigungsgrade bei im Labor eingebrachter Schädigung. Zusätzlich werden Messdaten zweier Spulen der realen Produktion zur Validierung verwendet. Die höchste Klassifizierungsgenauigkeit von 95,4 % wird unter Verwendung einer $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte erzielt.

Die $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte erzielt eine Klassifizierungsgenauigkeit von bis zu 95 % und ist damit eine geeignete Auswertungsmethode für die kombinierten Messwerte des multimodalen Sensorsystems.

Damit wird das gesetzte Ziel dieser Dissertation erreicht, da die gestellten Kernanforderungen durch das entwickelte, multimodale Sensorsystem erfüllt werden. Abb. 11.1 zeigt, in welcher Form die Kernanforderungen an das zu entwickelnde ZfP durch das multimodale Sensorsystem, bestehend aus Wirbelstromsensor und Kameramodul, abgedeckt werden.

Kernanforderungen		Bewertung	
1.	für CF geeignet	Wirbelstrom für CF geeignet	☒
2.	zerstörungsfrei	Wirbelstrom zerstörungsfrei	☒
3.	Inline-Messung	Nachweis für Inline-Messung über Durchlaufsensoren erbracht	☒
4.	100 %-Prüfung	Volumenprüfung über Durchlaufsensoren möglich,	☒
5.	Tiefeninformation (Detektion von innenliegenden Fehlern)	Standardeindringtiefe δ für CF-Rovings ausreichend	☒
6.	Quantifizierung der Verarbeitbarkeit (Filamentbrüche)	Nachweis der Quantifizierung von Filamentbrüchen erbracht	☒

Abb. 11.1: Überprüfung der Zielerreichung der Sensorentwicklung

Zusätzlich erfolgt auf Basis der theoretischen Grundlagen und eigener Untersuchungen die Ableitung einer Hypothese zur Ausbreitung von Wirbelströmen in CF-Rovings. Die Hypothese wird experimentell überprüft und die Ergebnisse statistisch analysiert, sodass die aufgestellte Hypothese verifiziert wird.

Zunehmende Schädigung innerhalb eines CF-Rovings führt zu einer signifikanten Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit.

Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Sensorsystems für die beiden Nutzergruppen der entwickelten Technologie, CF-Hersteller und Verarbeiter betrachtet. Mit einer Amortisationszeit von rund elf Monaten für CF-Hersteller und sechs Monaten für CF-Verarbeiter ist der Einsatz wirtschaftlich sinnvoll. Abb. 11.2 fasst die zentralen Ergebnisse dieser Dissertation anhand Lösungswegs und damit der gewählten Struktur final zusammen.

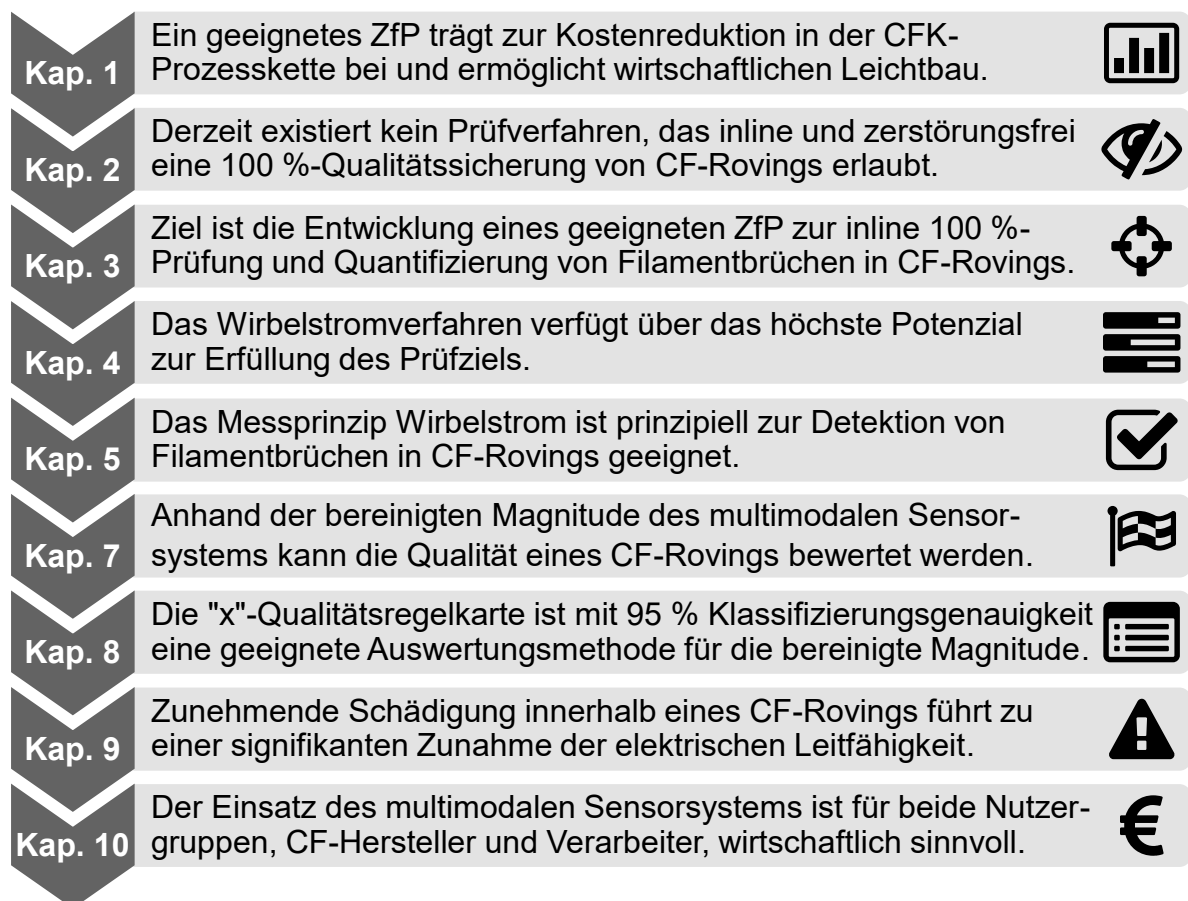


Abb. 11.2: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

12 Ausblick

Abschließend werden in einem Ausblick anhand industrieller Anwendungsbeispiele weitere Forschungs- und Entwicklungspotenziale aufgezeigt. Hierbei wird zunächst die Implementierung des multimodalen Sensorsystems in einen textilen Veredelungsprozess beschrieben und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung aus der Anwendung in der industriellen Praxis abgeleitet (Kap. 12.1).

Mit Blick auf den Einsatz des multimodalen Sensorsystems in vollvernetzten Produktionssystemen in einer Industrie 4.0 Umgebung wird das Sensorsystem anhand des Industrie 4.0-Maturity-Index bewertet. Entwicklungspotenziale bieten sich in diesem Zusammenhang einerseits im Bereich der Prognosefähigkeit des Messsystems für zukünftige Prozessänderung auf der Basis von Echtzeitdaten. Andererseits kann bei einem Eingriff des Sensorsystems über einen Akteur in den laufenden Prozess die Prozesssteuerung zu einem Regelkreis geschlossen werden (Kap. 12.2).

Die Ausweitung des Messprinzips Wirbelstrom als Hauptkomponente des entwickelten, multimodalen Sensorsystems auf weitere Werkstoffklassen ist für ausreichend leitfähige Faserstoffe gegeben. Insbesondere CF-Thermoplast-Hybridgarne bieten ein hohes Potenzial zur Gewichts- und Kostenreduktion in der Luftfahrt, verfügen jedoch noch über keine geeignete Qualitätssicherung. Eine besondere Herausforderung bei der Qualitätsüberwachung von Hybridgarnen mittels Wirbelstrom liegt in der Garnstruktur, die prozessbedingt eine hohe Ungleichmäßigkeit in Form von Wellen und Ondulationen aufweist (Kap. 12.3).

12.1 Integration in einen textilen Veredelungsprozess

Zur Erprobung der praktischen Anwendbarkeit und zur Identifizierung weiterer Entwicklungspotentiale wird das multimodale Sensorsystem unter industriellen Bedingungen im Feldversuch getestet. Dazu wird das Sensorsystem in die Prozesskette des CF-Verarbeiters Saertex GmbH & Co. KG, Saerbeck, integriert. Saertex verarbeitet unter anderem CF-Rovings zu Multiaxialgelegen und bildet damit die textile CF-Prozesskette vom kommerziell erhältlichen CF-Roving über

verschiedene Veredelungsprozesse bis hin in die textile Fläche ab. Innerhalb der Saertex-Prozesskette wird das multimodale Sensorsystem in einen industriellen Veredelungsprozess integriert, um die Faserschädigung durch die Auf- und Abwicklung und die Faserführung zu quantifizieren. Abb. 12.1 skizziert den Veredelungsprozess, der aus Gründen der Geheimhaltung nicht näher spezifiziert werden kann.

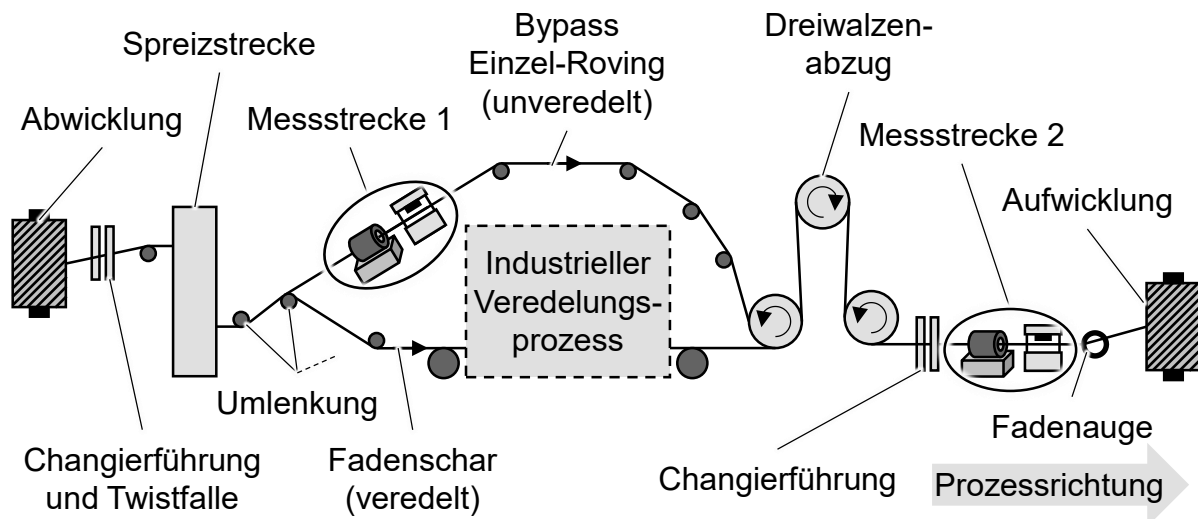


Abb. 12.1: Schematische Darstellung des textilen Veredelungsprozesses nach [Lat23]

Im Veredelungsprozess werden die CF-Rovings mehrerer Spulstellen parallel abgewickelt. Die CF-Rovings passieren zunächst eine Changierführung und eine Twistfalle, um die Changierbewegung auszugleichen und etwaige, im Rohstoff enthaltene Fadendreher (Twists) abzufangen. Anschließend werden die CF-Rovings gespreizt, sodass die Rovings aller Spulstellen parallel als Fadenschar vorliegen und somit bereit für den Veredelungsschritt sind. Die CF-Rovings Während der Veredelung wirken hohe Temperaturen auf den CF-Roving ein, die zu einer Nachcarbonisierung und damit einer Leitfähigkeitsänderung führen können. Damit die Leitfähigkeitsänderung das Messsignal nicht überlagert, wird ein Roving aus der Fadenschar ausgelenkt und über einen Bypass an der Veredelung vorbeigeführt, sodass die gemessenen Impedanzänderung allein aus induzierte Faserschädigung resultiert. Anschließend wird der vermessene Roving mit der veredelten Fadenschar zusammengeführt und über einen Dreiwälzenabzug abgezogen. Abschließend passiert jeder CF-Roving abermals

eine Changierführung, um aus der Aufwickelvorrichtung resultierende, laterale Bewegungen nicht in den Prozess einzukoppeln, und wird separat auf einer Spule aufgewickelt. Hierbei wird der bereits im Bypass vermessene CF-Roving vor dem Aufwickeln abermals vermessen.

Ziel der Prozessüberwachung durch das multimodale Sensorsystem ist die Untersuchung der Faserschädigung durch das Auf- und Abwickeln, das Spreizen um die Umlenkungen der CF-Rovings im Prozess. Dies ist insbesondere für die Kunden der Fa. Saertex relevant, die die veredelten CF-Rovings unter in Wickelprozessen bei hohen Abzugsgeschwindigkeiten beispielsweise zu Druckbehältern weiterverarbeiten. Über das multimodale Sensorsystem werden Qualitätsabweichungen im CF-Roving detektiert und in einem Protokoll über der Lauflänge der jeweiligen Spule zugeordnet. Anhand der Qualitätsprotokolle wird der Weiterverarbeitungsprozess an kritischen Stellen niedrigerer Qualität angepasst und die Verarbeitungsgeschwindigkeit proaktiv reduziert. So werden Fadenabrisse und Stillstandzeiten vermieden, die sonst über ein Anknüpfen der gerissenen Fäden zeitintensiv behoben werden müssen. Auch die Qualität des Endprodukts wird hierdurch gesteigert, da Anknüpfstellen in der Weiterverarbeitung zum FVK-Bauteil zu festigkeitsmindernden Dickstellen und optischen Fehlern führen, deren manuelle Beseitigung kostenintensiv ist. Um in der Messung den Störeinfluss des Veredelungsprozesses zu kompensieren, wird der Bypass als erste Messstrecke ausgewählt. Als zweite Messstrecke wird die Fadenführung direkt vor der Aufwicklung gewählt. Es werden drei Spulen eines CF-Rovings vom Typ Toray T620 SC 1200 mit einer Lauflänge von je rund 1.300 m vermessen. Um die Faserschädigung zu untersuchen, wird jede Spule in einem ersten Messdurchgang vermessen und anschließend wieder aufgewickelt, um in einem zweiten Messdurchgang abermals vermessen zu werden (Abb. 12.2). Die Versuche finden unter realen Produktionsbedingungen bei Prozessgeschwindigkeiten von etwa 8 m/min über eine Versuchsdauer von rund 3 h pro Teilversuch statt. Alle Randbedingungen der durchgeführten Feldversuche können Anhang C VII entnommen werden.

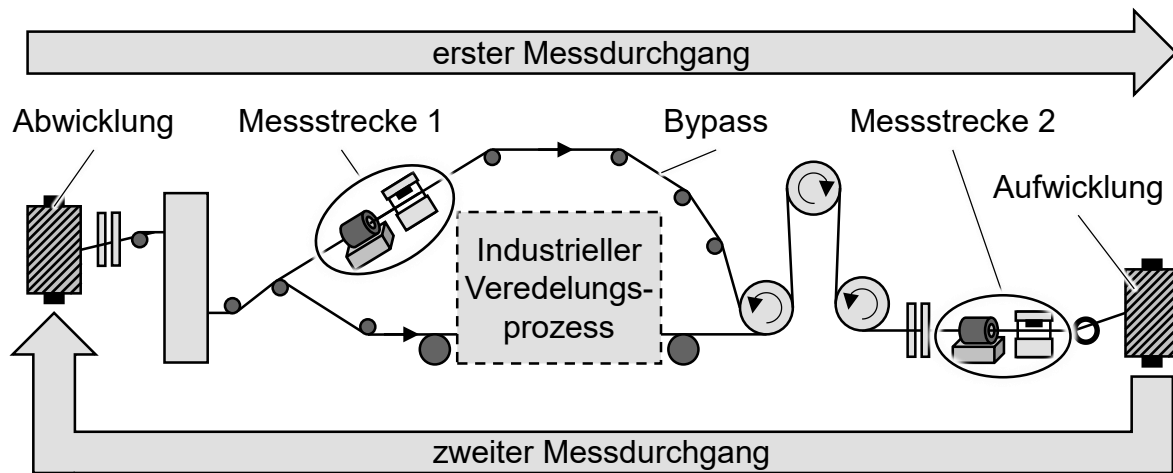


Abb. 12.2: Schematische Darstellung des ersten und zweiten Messdurchgangs sowie der Messstrecken 1 und 2 nach [Lat23]

Abb. 12.3 zeigt exemplarisch einen Auszug des Messschriebs der Messstrecke 1 für die Laufmeter 40 bis 400. Die Magnitudenverläufe der Messdurchgänge 1 und 2 streuen um einen relativ konstanten Mittelwert, der auf eine konstante Qualität des CF-Rovings und damit einen eingefahrenen und gleichbleibenden Prozess hindeutet. Dagegen weist der Magnitudenverlauf des Messdurchgangs 2 im Vergleich zum Messdurchgang 1 eine durchgehend niedrigere Magnitude bei einer geringeren Streuung der Messwerte auf.

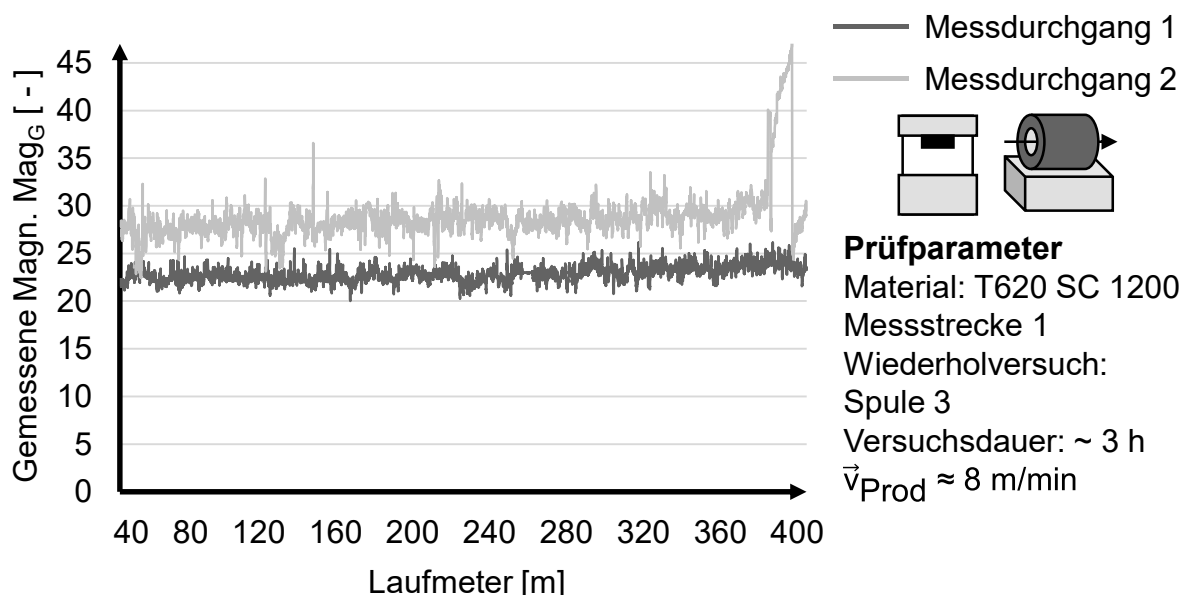


Abb. 12.3: Auszug aus dem Messschrieb der Spule 3 für die Messdurchgänge 1 und 2 der Messstrecke 1 nach [Lat23]

Damit wird Qualität des CF-Rovings während des gesamten Messdurchgangs 2 niedriger bewertet als während des Messdurchgangs 1. Der Trend einer durchgehend höheren Magnitude von Durchgang 2 gegenüber Durchgang 1 indiziert einen höheren Schädigungsgrad bei Messdurchgang 2. Diese Beobachtung ist plausibel, da der CF-Roving durch den Auf- und Abwickelvorgang zwischen den Messdurchgängen geschädigt wird. Die Messwerte entsprechen damit den Erwartungen.

Abb. 12.4 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messstellen 1 und 2 für beide Messdurchgänge der Spule 3. Für beide Messstellen nehmen die Mittelwerte der gemessenen Magnituden von Durchgang 1 gegenüber Durchgang 2 zu. Die Zunahme der Magnitude zwischen Messdurchgang 1 und 2 bestätigt den in Abb. 12.3 identifizierten Trend und wird ebenfalls auf einen höheren Schädigungsgrad zurückgeführt. Damit wird die erwartete Zunahme der Schädigung zwischen den beiden Messdurchgängen bestätigt. Die Schädigung wird auf den Auf- und Abwickelvorgang und prozessseitig auf Schädigung durch die Fadenführung und -spreizung zurückgeführt.

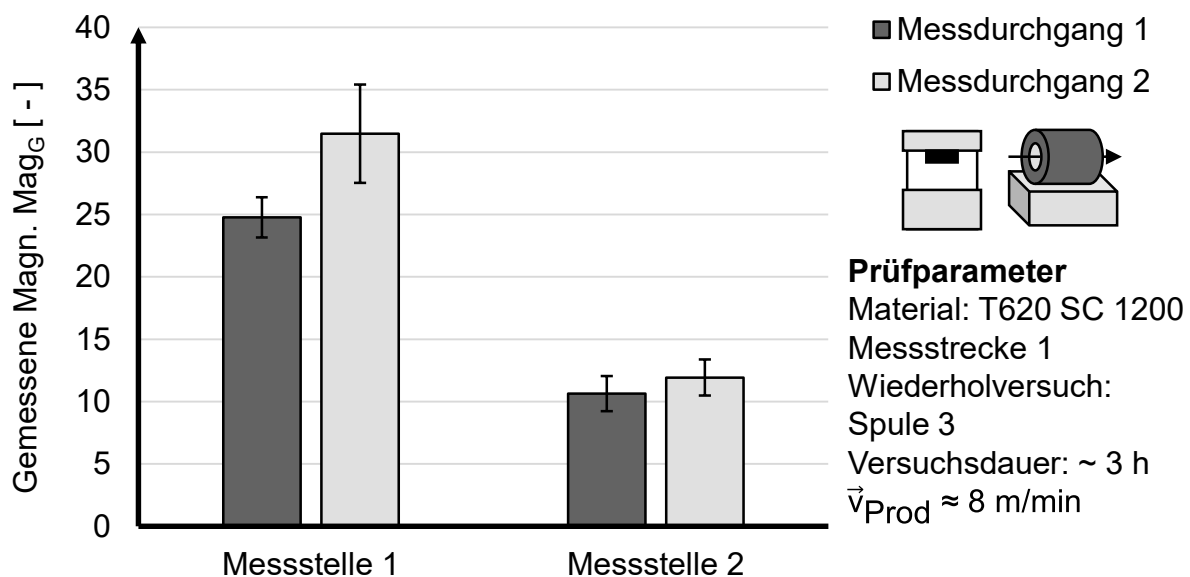


Abb. 12.4: Mittelwerte und Standardabweichung der Messdurchgänge 1 und 2 für den Wiederholversuch der Spule 3 nach [Lat23]

Nachdem eine Zunahme der Faserschädigung über den Prozess und durch den Auf- und Abwickelvorgang gezeigt werden konnte, werden abschließend der

Schulungsaufwand für die Verwendung des Sensorsystems und dessen Akzeptanz durch den Anwender betrachtet. Der Schulungsaufwand zur Verwendung des multimodalen Sensorsystems durch den Saertex-Mitarbeiter ist gering, da es sich beim dem Sensorsystem um ein autarkes, sofort einsatzbereites und ausschließlich protokollierendes System zur Qualitätsüberwachung handelt. Der Hauptaufwand in Höhe von rund einem Arbeitstag entfällt auf die Implementierung des Sensorsystems in den Industrieprozess. Hierbei ist die staubdichte Verkabelung in einer CF-kontaminiertem Umgebung hauptverantwortlich für den Zeitaufwand. Hinzu kommt die Zeit, die für die Auswertung und die Programmierung der zugehörigen Software notwendig ist. Da es sich um einen Prototyp des Sensorsystems handelt, wird die Auswertung derzeit noch teilweise von Saertex-Mitarbeitern übernommen. Mit Blick auf einen späteren Serieneinsatz des Sensorsystems ist hierfür jedoch eine automatisierte Lösung durch den Sensorhersteller geplant.

Die Akzeptanz des Sensorsystems durch den Anwender, Saertex, wird als hoch eingestuft, da Saertex das Sensorsystems auf eigenen Wunsch in seine Produktionslinie implementiert hat. Die Akzeptanz durch die Anlagenbediener ist ebenfalls hoch, da kaum Mehraufwand durch Verwendung des Sensorsystems für den Anlagenbediener entsteht. Hier fällt einzig die Reinigung des Sensors an, die mittels Druckluft erfolgt und in den standardmäßigen Reinigungszyklus der Fadenleitelemente integriert wird. Am Sensorsystem tritt zudem weniger Verschmutzung auf, da das System berührungslos arbeitet und der Reinigungsaufwand im Vergleich zu den Fadenleitelementen gering ist.

Einerseits wird damit die von Saertex angestrebte Untersuchung zur Schädigung von CF-Rovings durch das Auf- und Abwickeln mit dem multimodalen Sensorsystem nachgewiesen. Andererseits bietet der Einsatz der Sensorsystems eine niedrige Hemmschwelle, da es schnell implementiert und verwendet werden kann und für den Bediener kaum Mehraufwand verursacht. Beides stärkt die Akzeptanz des multimodalen Sensorsystems für CF-Verarbeiter und Hersteller als Nutzer der entwickelten Technologie (Abb. 12.5).

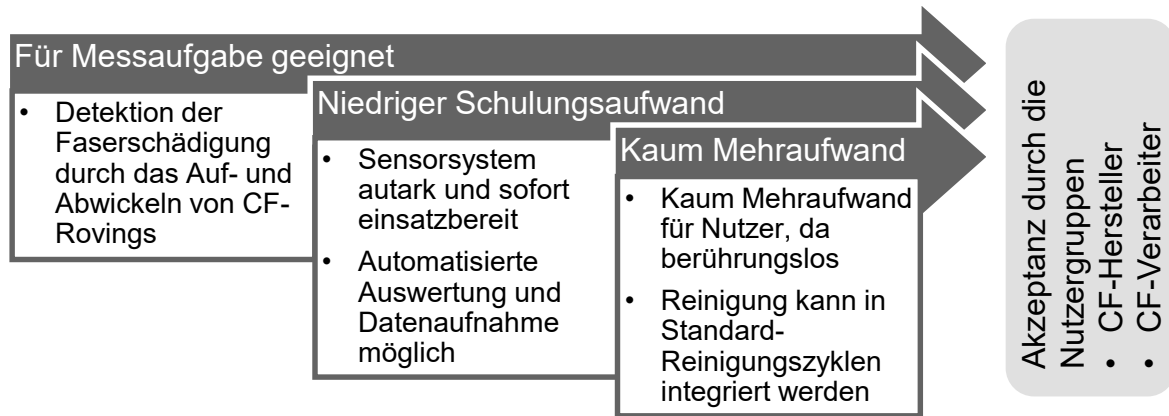


Abb. 12.5: Ansätze zur Stärkung der Akzeptanz der Nutzergruppen

12.2 Bewertung anhand des Industrie 4.0-Maturity-Index

Um zu prüfen, inwieweit das entwickelte, multimodale Sensorsystem dem Industrie 4.0-Gedanken Rechnung trägt, wird der Industrie 4.0 Maturity-Index herangezogen [SAD+20]. Hierfür wird zunächst das multimodale Sensorsystem zur dezentralen Datenaufnahme in eine Prozesskette implementiert. Gleichzeitig werden die Messdaten des multimodalen Sensorsystems über digitale Schnittstellen zentral gespeichert und mit weiteren Produktionsdaten kombiniert. Die kombinierten Produktionsdaten dienen bei Überschreiten definierter Schwellwerte als Auslöser für automatisierten Prozesseingriffe, sodass die Prozessparameter in Abhängigkeit der Messwerte angepasst werden. Damit werden die Maschinen über die verschiedenen Prozessstufen hinweg digital vernetzt und zu einer intelligenten Prozessregelung befähigt, um Entscheidungen zu treffen und auszuführen.

Die Implementierung des Sensorsystems erfolgt exemplarisch in der CF-Prozesskette der Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen. Hightex ist ein mittelständischer Zulieferer der Luft- und Raumfahrtindustrie mit besonderem Fokus auf die Prozesse Tailored Fibre Placement (TFP) und Wickeln. Abb. 12.6 zeigt mögliche Einsatzpositionen des Sensorsystems entlang der Hightex-Prozesskette. [Hig12]

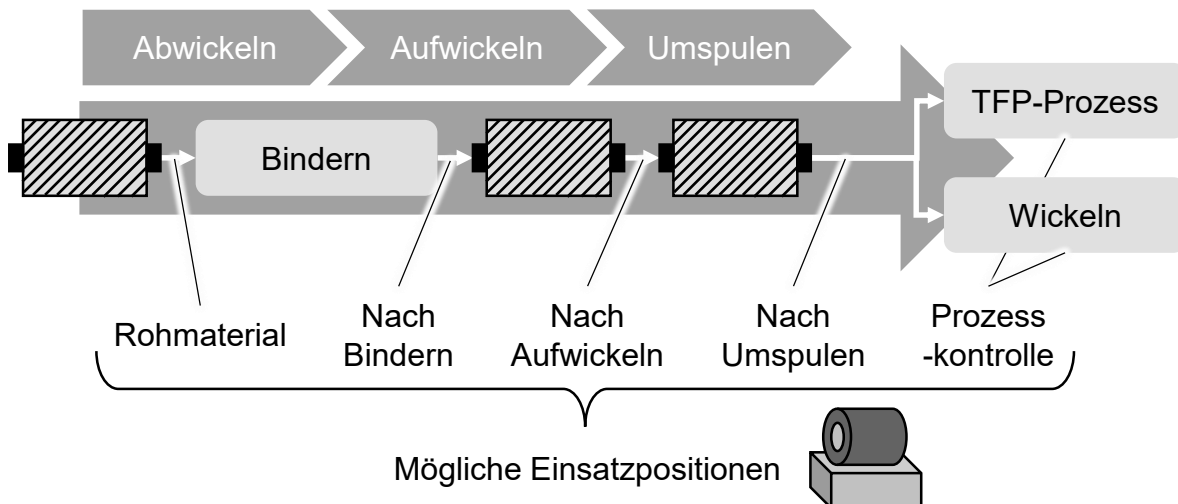


Abb. 12.6: Mögliche Einsatzpositionen in der Hightex Prozesskette²¹

Die Messdaten des multimodalen Sensorsystems und der bereits existierenden, konventionellen Qualitätsüberwachung werden bei Hightex zentral in einer Structured Query Language (SQL)-Datenbank gespeichert und können so in Relation zu einander gebracht werden. Ein exemplarischer Messschrieb realer Produktionsdaten aus der SQL-Datenbank kann Anhang D V entnommen werden. Damit ist das multimodale Sensorsystem grundsätzlich einsatzfähig und für eine inline Qualitätsüberwachung im Sinne einer vollvernetzten Produktion der Industrie 4.0 geeignet.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können somit Abweichungen vom Sollzustand des Prozesses durch das multimodale Sensorsystem erfasst und die Ursachen dieser Abweichungen auf Basis der theoretischen Grundlagen dieser Dissertation nachvollzogen werden. Eine Prognose der zukünftigen Prozessentwicklung aufgrund der aufgenommenen Daten ist derzeit noch nicht möglich. Ebenso ist eine autonome Anpassung des Prozesses noch nicht möglich, da zwar das Überschreiten von Grenzwerten durch das Sensorsystem detektiert wird, jedoch noch kein autonomer Eingriff in die Prozesssteuerung erfolgt. Damit wird das

²¹ Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Wirbelstromsensor zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern – EddySCARF“ (10/2019 – 12/2021, ZF4558940) der AiF Projekt GmbH, ITA, SURAGUS GmbH, Dresden, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH, Klipphausen, SAERTEX GmbH & Co. KG, Saerbeck, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal

multimodale Sensorsystem zum aktuellen Zeitpunkt in Stufe vier des Industrie 4.0 Maturity Index eingeordnet (Abb. 12.7).

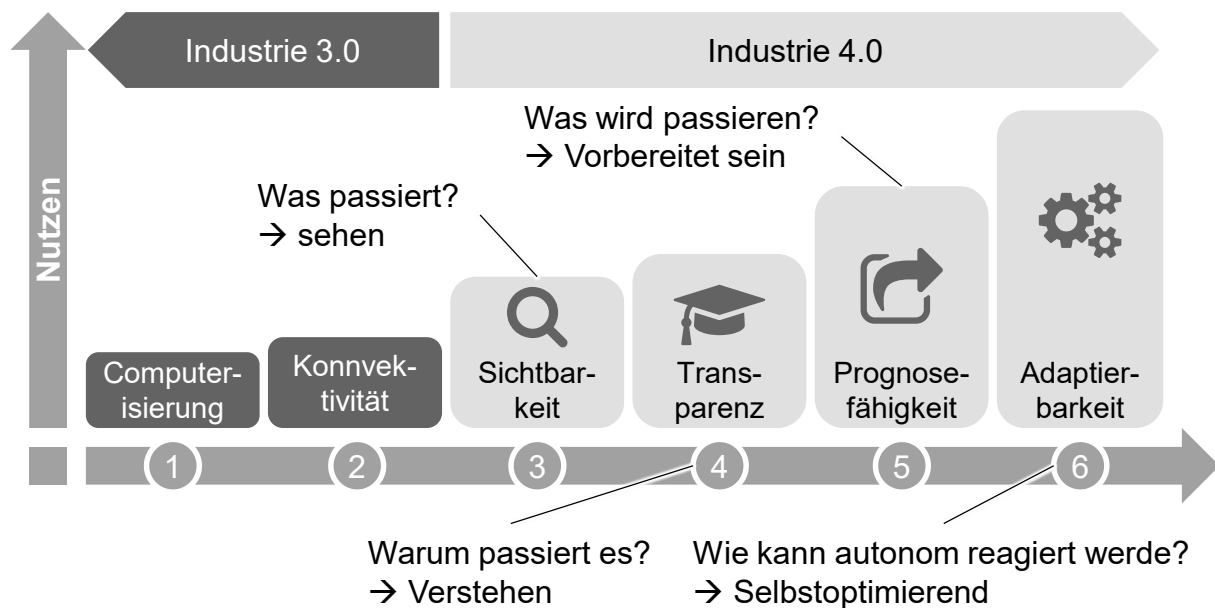


Abb. 12.7: Industrie 4.0 Maturity Index nach [SAD+20]

Potenzial für weitere Forschung bietet sich damit insbesondere in der Prognosefähigkeit des Sensorsystems, sodass Prozessentwicklung auf Basis aktueller Messwerte vorausgesagt werden. Zusätzlich bietet sich die Kombination des Messsystems mit einem Aktor zum Eingriff in den laufenden Prozess als Potenzial, um den Steuerkreis der Prozesskette zukünftig zu einem Regelkreis zu schließen.

12.3 Adaption auf weitere Werkstoffklassen

Das multimodale Messsystems kann für weitere, faserförmige Werkstoffklassen adaptiert werden, falls diese über eine ausreichende, elektrische Leitfähigkeit verfügen. Beispiele sind leitfähige Monofilamente als Antistatikum in verschiedensten Anwendungen, metallbeschichtete Garne für Smarttextiles oder Carbonfaser-Thermoplast (CFTP)-Hybridgarne für CFK-Strukturbauteile [GK07; Per22; SSS+22].

Einen thematischen Anknüpfungspunkt an die Forschungsergebnisse dieser Dissertation bieten insbesondere CFTP-Hybridgarne, die im Automobilbereich

und in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt werden. Hierbei wird ein CF-Roving mit einem thermoplastischen Multifilament gemischt, sodass ein Hybridgarn entsteht, in dem Verstärkungs- und Matrixfasern nebeneinander vorliegen. Je nach Herstellungsverfahren existieren verschiedene Unterarten von Hybridgarnen (Abb. 12.8).

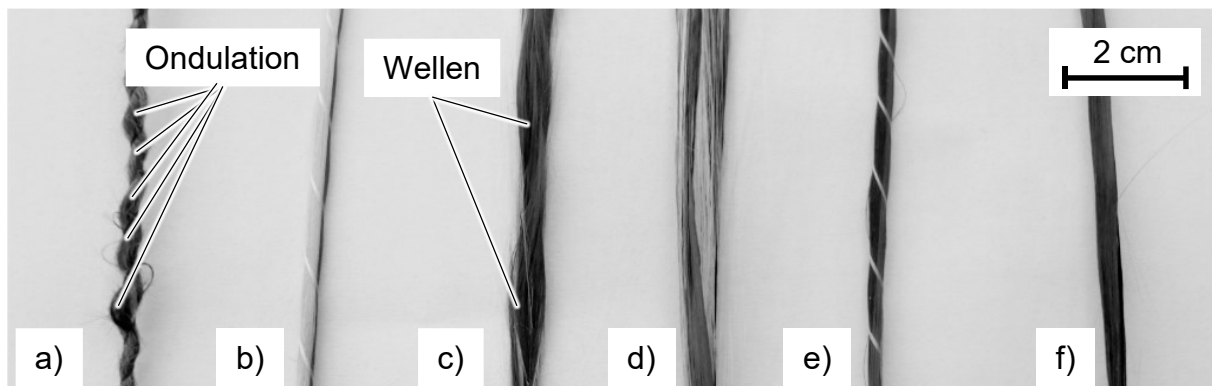


Abb. 12.8: Verschiedene CFTP-Hybridgarne mit a), b), e) Umwindegarn und c), d), f) Commingling-Garn sowie typische Fehler

Da in Hybridgarnen CF und TP-Filamente parallel vorliegen, ergeben bei der Konsolidierung von Bauteilen auf Hybridgarnbasis kurze Fließwege der Thermoplastmatrix, sodass hohe Faservolumengehalte bei gleichzeitig kurzen Zykluszeiten erzielt werden. Dadurch werden die Vorteile thermoplastischer Matrices der gesamten Automobilindustrie sowie der Luft- und Raumfahrtbranche zugänglich gemacht. Zu den Vorteilen von Thermoplast-Matrices gegenüber duroplastischen Matrixsystemen zählen ihre Schlagzähigkeit, eine höhere Recyclingfreundlichkeit sowie die Schweißbarkeit. Insbesondere die Schweißbarkeit führt in der Luftfahrt zu einem erheblichen Entwicklungspotenzial. Hier werden konventionell Niete als Verbindungselement eingesetzt und Strukturbauteile dementsprechend auf Basis der Lochleibung überdimensioniert. Wird stattdessen Schweißen als Fügeverfahren verwendet, können Strukturbauteile lastgerechter ausgelegt und Gewicht und Kosten eingespart werden. Allein im Fensterrahmen des Airbus A350 wird somit eine Gewichtsreduktion mit rund 30 % von 1,5 kg bei konventioneller Bauweise zu 1,1 kg bei Verwendung von Hybridgarnen möglich. Bei 96 Fenstern in der Langversion des A350 ergibt sich eine Gewichtsersparnis von 38,4 kg, die zu einer Kraftstoffeinsparung von rund

76.000 l Kerosin pro Jahr während der gesamten Lebensdauer führt [Sou05; SSS+22].

Für die Anwendung in der Luftfahrt wird vom Original Equipment Manufacturer (OEM) eine lückenlose und nachvollziehbare Qualitätsüberwachung gefordert. Hierfür existiert nach aktuellem Stand der Technik kein geeignetes Sensorsystem. Ein multimodales Sensorsystem auf Basis eines Wirbelstromsensors und eines Kameramoduls schließt diese Lücke. Die im Rahmen dieser Dissertation gesammelten Erfahrungen im Bereich der Qualitätsüberwachung von CF-Rovings mittels Wirbelstrom können auf CFTP-Hybridgarne übertragen werden. Eine besondere Herausforderung liegt hierbei jedoch in den hohen, herstellungsbedingten Geometrieschwankungen der Hybridgarnen, die sich Ondulationen oder Welle äußern (Abb. 12.8). Diese führen voraussichtlich zu stark schwankenden Impedanzsignalen, die über eine geeignete, messtechnische Erfassung kompensiert werden müssen.

13 Summary

The demand for cost-effective lightweight construction strategies is derived from the requirements of the European Commission and the EU Parliament for a CO₂-neutral and sustainable future for Europe. For the economic use of CFRP structural components, costs in the CFRP process chain must be reduced by detecting defective rovings at an early stage and excluding them from further value creation. A suitable non-destructive testing method (NDT) enables inline quality monitoring of the CF roving along the entire CF process chain.

A suitable NDT contributes to cost reduction in the CFRP process chain and enables cost-effective lightweight construction.

Filament breakage is a fundamental quality parameter for CF rovings, as it reduces processability and claims are usually made on the basis of poor processability. In industrial practice, however, the processability is only quantified on a random basis with the help of individual sensor solutions from CF manufacturers, which are neither standardised nor commercially available.

Currently, there is no test method that allows 100% quality assurance of CF rovings inline and non-destructively.

The objective of this dissertation is the development of an NDT that allows inline 100% inspection of CF rovings and also detects hidden defects in order to quantify the processability of a roving via the number of filament breaks. For this purpose, core requirements on the NDT are formulated, which at the same time serve as a benchmark for evaluating the achievement of objectives in the development of the sensor system (see Fig. 13.1). First of all, NDTs are preselected that are suitable in general for fulfilling the measurement task, such as ultrasonic testing, the eddy current method, radiographic testing methods and thermography. The pre-selection made matches the methods that are already successfully used in the automotive and aerospace industries for quality assurance on CF-based materials. Among this preselection, the eddy current method is identified as the test method with the highest potential for fulfilling the measurement task.

The eddy current method holds the highest potential for fulfilling the test objective and is therefore preferred in this dissertation.

The electromagnetic fundamentals of the eddy current method are examined and the evaluation of the impedance as a measurement value, physical influencing parameters and the high-frequency eddy current method are discussed. The theoretical fundamentals provide the basis for the adaptation of the classical eddy current theory for the testing of CF rovings and the derivation of a schematic representation for the propagation of eddy currents in CF-rovings. Finally, the proof of function is carried out within the framework of a rudimentary preliminary test, in which the general suitability of the measuring principle of eddy current for the detection of filament breaks is proven.

The eddy current measuring principle is in general suitable for the detection of filament breaks in CF rovings.

Based on the functional verification, a multimodal sensor system is being developed that consists of an eddy current sensor and a camera module. The camera module detects geometric data of the CF roving and the eddy current signal is corrected for the influence of these geometric data. The resulting measured variable is called rectified magnitude and is suitable for evaluating the quality of a CF roving. In addition, a system for inline cleaning of the eddy current sensor is developed. The inline cleaning compensates for the accumulation of CF fragments and dust, which can influence and corrupt the measurement signal due to their conductivity. A compressed air module and a PTFE inlay with low static and dynamic friction properties are provided for inline cleaning.

A multimodal measuring system consisting of an eddy current sensor and a camera module generates a rectified magnitude that is suitable for evaluating the quality of a CF roving.

For the evaluation of the rectified magnitude, different approaches are developed and evaluated with regard to their classification accuracy. The approaches include machine learning methods on the one hand and a classical analysis method on the other. In the field of machine learning, forward neural networks are used as a method of supervised learning and various cluster algorithms as

a method of unsupervised learning. A quality control chart from statistical process control is used as the classical evaluation method. The evaluation of the classification accuracy of the different approaches is based on the proportion of correctly classified degrees of damage with damage introduced in the laboratory. In addition, measurement data from two bobbins of real production are used for validation. The highest classification accuracy of 95.4 % is achieved using an $\bar{x}$ -quality control chart.

The $\bar{x}$ -quality control chart obtains a classification accuracy of up to 95 % and is thus a suitable evaluation method for the combined measured values of the multimodal sensor system.

Thus, the objective of this dissertation is accomplished, as the core requirements are met by the developed multimodal sensor system. Fig. 13.1 shows how the core requirements for the NDT to be developed are covered by the multimodal sensor system consisting of an eddy current sensor and a camera module.

core requirements		evaluation	
1.	suitable for CF	eddy current suitable for CF	☒
2.	non-destructive	eddy current non-destructive	☒
3.	inline measurement	proof for inline measurement provided via pass through sensor	☒
4.	100 % test	Volume testing via pass through sensors possible,	☒
5.	depth information (detection of internal defects)	standard penetration depth δ sufficient for CF rovings	☒
6.	quantifying the processability (filament breaks)	proof of quantifying the filament breaks provided	☒

Fig. 13.1: Monitoring the achievement of the sensor development objectives

In addition, a hypothesis on the propagation of eddy currents in CF rovings is derived on the theoretical foundations and own investigations. The hypothesis

is tested experimentally and the results are analysed statistically to verify the hypothesis.

Increasing damage within a CF roving leads to a significant increase in electrical conductivity.

Finally, the economic feasibility of the developed sensor system is examined for the two user groups of the developed technology, CF manufacturers and processors. With an amortisation period of around eleven months for CF manufacturers and six months for CF processors, the application is economically viable. Fig. 13.2 summarises the key findings of this dissertation based on the approach and thus the chosen structure.

Ch. 1	A suitable NDT contributes to cost reduction in the CFRP process chain and enables cost-effective lightweight construction.	
Ch. 2	Currently, there is no test method that allows 100% quality assurance of CF rovings inline and non-destructively.	
Ch. 3	The objective is to develop a suitable NDT for inline 100% testing and quantification of filament breakage in CF rovings.	
Ch. 4	The eddy current method holds the highest potential for fulfilling the test objective and is therefore preferred in this dissertation.	
Ch. 5	The eddy current measuring principle is in general suitable for the detection of filament breaks in CF rovings.	
Ch. 7	The rectified magnitude of the multimodal sensor system can be used to determine the quality of a CF roving.	
Ch. 8	The $\bar{x}$ -quality control chart is a suitable evaluation method for the rectified magnitude with 95 % classification accuracy.	
Ch. 9	Increasing damage within a CF roving leads to a significant increase in electrical conductivity.	
Ch. 10	The use of the multimodal sensor system is economically viable for both user groups, CF manufacturers and processors.	

Fig. 13.2: Summary of the key findings

14 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

14.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Forderung nach wirtschaftlichen Leichtbaustrategien durch Vorgaben der EK und des EU-Parlaments [Bun09; Eur11; Wan12].....	2
Abb. 1.2:	Notwendigkeit der Entwicklung eines geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahrens (ZfP) zur Qualitätssicherung an CF [Bun09; JH14; Mor05; Wan12]	3
Abb. 1.3:	Kostentreiber faserverstärkter Kunststoffe [Bei10; SÖG12].....	4
Abb. 1.4:	Empirische Zehner-Regel nach [SP15]	5
Abb. 1.5:	ITA-Fünfklang zur Strukturierung vor Forschungsprojekten.....	7
Abb. 1.6:	ITA-Fünfklang und Zuordnung der Kapitel zur Zielerreichung	8
Abb. 2.1:	Einordnung von Kap. 2 in das Vorgehen zur Zielerreichung.....	9
Abb. 2.2:	Skizze einer Gap-Entstehung nach [BG20]	10
Abb. 2.3:	a) Skizze und b) Foto eines Twists nach [BG20]	10
Abb. 2.4:	Einfluss des Umlenkradius auf Faserschädigung nach [Kun04]	11
Abb. 2.5:	Abrieb a) schematisch und b) als Abbildung am ITA-Tribometer dargestellt, nach [BG20].....	12
Abb. 2.6:	a) Fuzz-Ball und b) Ondulation als Folge einer Faserschädigung nach [GMW+16].....	13
Abb. 2.7:	Integrationsgrad von Prüf- und Messtechnik nach [SD08]	14
Abb. 2.8:	Am ITA entwickelte Filamentbruchsensoren a) Schemazeichnung und b) Querschnitt nach [GBH+13; SCK+97]	17
Abb. 2.9:	Zusammenschaltung mehrerer Laserbrücken mit einstellbaren Abständen nach [EMK16].....	17
Abb. 2.10:	Kameraoptische Qualitätsüberwachung a) im Rücklicht- und b) im Auflichtverfahren	19
Abb. 2.11:	Schnittdarstellung eines 12k-CF-Rovings [LGK+20b].....	20
Abb. 3.1:	Einordnung von Kap. 3 in das Vorgehen zur Zielerreichung.....	22
Abb. 4.1:	Einordnung von Kap. 4 in das Vorgehen zur Zielerreichung.....	24
Abb. 4.2:	Vorgehen zur methodischen Auswahl eines geeigneten ZfP	24
Abb. 4.3:	Differenzierung Prüf- und Messtechnik nach [GF07]	25

Abb. 4.4:	Verwendung des Antwortverhaltens zur Prüfkörpercharakterisierung mittels ZfP nach [GS15]	26
Abb. 4.5:	Klassifizierung der ZfP nach physikalischem Wirkprinzip	26
Abb. 4.6:	Schematische Darstellung der Ultraschallverfahrensvarianten a) Durchschall- und b) Reflexionsverfahren nach [SBD+19]	29
Abb. 4.7:	Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der Ultraschallprüfung	32
Abb. 4.8:	Schematische Darstellung des physikalischen Funktionsprinzips des Wirbelstromverfahrens nach [HHK+10]	34
Abb. 4.9:	Netzdiagramm über Vor- und Nachteile des Wirbelstromverfahrens	37
Abb. 4.10:	Schematische Darstellung der Röntgenprüfung nach [Koc12]	39
Abb. 4.11:	Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der radiografischen Prüfung ...	41
Abb. 4.12:	Schematische Darstellung des elektromagnetischen Spektrums nach [TMW15]	42
Abb. 4.13:	Schematische Darstellung der aktiven Thermografie mit verschiedenen Methoden zur thermischen Anregung	44
Abb. 4.14:	Netzdiagramm über Vor- und Nachteile der Thermografie	46
Abb. 4.15:	Schematische Darstellung der HoQ-Methode nach [Sch15d]	48
Abb. 4.16:	Adaption und Reduktion des HoQ zur Bewertung der ZfP	49
Abb. 5.1:	Einordnung des Kap. 5 in das Vorgehen zur Zielerreichung	52
Abb. 5.2:	Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in einem leitfähigen Prüfkörper nach [Hel13]	53
Abb. 5.3:	Schematische Darstellung der Wirbelströme und der Überlagerung von Primär- und Sekundärfeld [HHK+10; HS12]	55
Abb. 5.4:	Vereinfachter Wirkzusammenhang der Impedanzänderung	56
Abb. 5.5:	Infinitesimalen Impedanzänderung in der komplexen Ebene mit den partiellen Differenzialen ∂Z und $\partial \varphi$ nach [HSM13]	57
Abb. 5.6:	Ohm'sche und kapazitiv/induktive Anteile der Impedanz	58
Abb. 5.7:	Leitungs- und Verschiebestrome beim Wirbelstromverfahren von CF nach [HSP+15; Lan97; LM94; Moo01; PHM+13]	59
Abb. 5.8:	Ersatzschaltbild des Wirbelstromverfahrens nach [Hel13]	60
Abb. 5.9:	Prüffrequenzen der Wirbelstromtechnologie nach [SUR21b]	62

Abb. 5.10:	Qualitative Darstellung des Skin-Effekts und der Standardeindringtiefe nach [GGV11].....	65
Abb. 5.11:	Standardeindringtiefe in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Werkstoffe in Anlehnung an [SUR21b; Yas08]	65
Abb. 5.12:	Lift-Off a) konstant bei planem Prüfkörper und b) variierend bei welligem Prüfkörper	66
Abb. 5.13:	Spulenanordnungen a) Außendurchlauf-, b) Innendurchlauf-, c) Tast- und d) Transmissions-Tastspule nach [DIN89]	67
Abb. 5.14:	Schematische Darstellung einer Durchlaufspule mit eingezeichneter Orientierung der Wirbelströme nach [GGV11; Hel13]	67
Abb. 5.15:	Verschiedene Tastspulentypen a) Absolutsensor und b) Halbtransmissionssensor nach [MM14; MMS08; MS10]	68
Abb. 5.16:	Polardiagramm für a) UD und b) MD-CFK [MLK01; MPM+11]	69
Abb. 5.17:	Ausbreitung von Wirbelströmen im Prüfkörper a) ungestört und b) mit Ablenkung durch Randeffect	70
Abb. 5.18:	Verschiebestrom I_V bei kapazitiver Kopplung zwischen zwei spannungsbeladenen elektrischen Leitern nach [Rod00]	74
Abb. 5.19:	Qualitative Darstellung der Frequenzabhängigkeit der induktiven X_L und kapazitiven Anteile X_C der Reaktanz	75
Abb. 5.20:	Wirbelstrompfade bei a) niedrigen und b) hohen Frequenzen unter Berücksichtigung kapazitiver Effekte nach [Pra76; CJQ+15]	75
Abb. 5.21:	Komponenten einer Messkette nach [Ler16; VDI13]	76
Abb. 5.22:	Mögliche Konfiguration einer WS-Messkette [BG20; SBD+19]	76
Abb. 5.23:	Schematischer Verlauf von Strom I und Gesamtspannung U_T im elektromagnetischen Schwingkreis nach [DIN94]	78
Abb. 5.24:	Übersicht des aktuellen Stands der Forschung „Wirbelstrom“	82
Abb. 5.25:	Schematische Darstellung des Vorversuchs	85
Abb. 5.26:	Mittelwert und Standardabweichung der Impedanz-Magnitude	86
Abb. 6.1:	Einordnung des Kap. 6 in das Vorgehen zur Zielerreichung	87
Abb. 6.2:	Visualisierung der bisher gefundenen Ergebnisse	88
Abb. 7.1:	Einordnung von Kap. 7 in das Vorgehen zur Zielerreichung	89
Abb. 7.2:	Adaptierter Deming-Zyklus nach [DIN18b]	90
Abb. 7.3:	Darstellung des ITA-Tribometers a) schematisch und b) als Bild	92

Abb. 7.4:	Grundlegende Spulentypen vom Typ Durchlaufsensor: a) kurze Spule, b) lange Spule und c) offene Spule	93
Abb. 7.5:	a) Schemazeichnung und b) Bild des verwendeten Wirbelstromsensors	94
Abb. 7.6:	Gefertigte Varianten des Schädigungsmoduls: a) V1 und b) V2	95
Abb. 7.7:	Messschriebe des statischen Schädigungsmoduls V1	96
Abb. 7.8:	Messschriebe des rotatorischen Schädigungsmoduls V2	96
Abb. 7.9:	a) Technische Zeichnung, b) Bild des Schädigungsmoduls V1	97
Abb. 7.10:	Breitenschwankung (Breite) und lateraler Lageversatz (Center) des CF-Rovings relativ zum Wirbelstromsensor bei Schädigung	97
Abb. 7.11:	Simulation des Verlaufs der magnetischen Feldstärke H als Funktion des Radius r	99
Abb. 7.12:	Impedanzänderung zur a) Referenz bei b) abstehendem Filament und c) aus dem Zentrum ausgelenkten Roving	100
Abb. 7.13:	Messschrieb des Nullversuchs	100
Abb. 7.14:	Impedanzverläufe bei Verwendung verschiedener Fadenaugen	101
Abb. 7.15:	Einlaufwinkels bei a) niedriger und b) hoher freier Weglänge	101
Abb. 7.16:	Impedanzen für ursprünglichen und adaptierten Fadenlauf	102
Abb. 7.17:	Drift im Messsignal bei verschiedenen Schädigungsgraden	105
Abb. 7.18:	Druckluftmodule (DLM) zur Inline-Reinigung des Sensors: a) DLM 1, b) DLM 2 und c) Detailansicht der Düse des DLM 2	106
Abb. 7.19:	Vergleich der Druckluftmodule (DLM) zur Drift-Kompensation	107
Abb. 7.20:	Wiederholversuche zur Drift-Kompensation mittels Inlay	108
Abb. 7.21:	Final verwendetes PTFE-Inlay in Kombination mit dem Druckluftmodul 1 a) Bild und b) schematische Darstellung	109
Abb. 7.22:	Schematische Darstellung des verwendeten Messaufbaus	110
Abb. 7.23:	Vorgehen zur kameraoptischen Datenbereinigung	111
Abb. 7.24:	Grafische Darstellung ausgewählter Kameradaten nach [Lan22]	111
Abb. 7.25:	Rohdaten der gemessenen Impedanzen und Grenzwerte zur Regressionsanalyse nach [Lan22]	112
Abb. 7.26:	Gemessene, theoretische und bereinigte Magnitude der 0°-Schädigung nach [Lan22]	118

Abb. 7.27:	Bestimmung des Schädigungsgrades anhand der bereinigten Magnitude Mag_B nach [Lan22]	119
Abb. 7.28:	Schematische Darstellung des finalen Versuchsaufbaus	120
Abb. 7.29:	Detailansicht des multimodalen Sensorsystems.....	121
Abb. 7.30:	Fusion von Kamera- und Wirbelstromdaten zur bereinigten Magnitude und Ansätze zur Auswertung	122
Abb. 8.1:	Einordnung von Kap. 8 in das Vorgehen zur Zielerreichung.....	123
Abb. 8.2:	Motivation zur Verwendung von ML zur Auswertung der mehrdimensionalen Messgrößen des multimodalen Sensorsystems .	124
Abb. 8.3:	Ausgewählte ML-Verfahren [CL16; ML13; Zho21].....	124
Abb. 8.4:	Ablaufdiagramm zur Identifizierung einer geeigneten Auswertungsmethode der komplexen Impedanz.....	125
Abb. 8.5:	Über das Schädigungsmodul einstellbare Schädigungsgrade: a) ungeschädigt, b) geschädigt und c) stark geschädigt	126
Abb. 8.6:	Rohdaten der Trainingsdatensätze	126
Abb. 8.7:	Zunahme der gemessenen Magnituden mit zunehmender Schädigung	127
Abb. 8.8:	Rohdaten der Validierungsdatensätze.....	128
Abb. 8.9:	Darstellung eines Neurons nach [KBB+15; LC12]	129
Abb. 8.10:	Schematische Darstellung eines KNN nach [LC12].....	129
Abb. 8.11:	Gewähltes Vorgehen zur Entwicklung des KNN	131
Abb. 8.12:	Finale 10-8-3-Nertzwerkarchitektur des entwickelten KNN	133
Abb. 8.13:	Auswirkungen a) zu kleiner, b) optimaler und c) zu großer Lernrate nach [SW21]	135
Abb. 8.14:	KNN-Echtzeitklassifizierung auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mit a) Spule 2B09 und b) Spule 3A21 nach [Zho21]	137
Abb. 8.15:	Schematische Clusterbildung für zweidimensionale Datenpunkte nach [CL16].....	138
Abb. 8.16:	Schematische Darstellung der vier gängigsten Cluster-Algorithmen a) partitionierend, b) hierarchisch, c) dichtebasiert und d) gitterbasiert nach [ASG07; HKP12]	139
Abb. 8.17:	Nutzwerte verschiedener Cluster-Algorithmen	142

Abb. 8.18:	Qualitative Darstellung ungeeigneter Messwertekombinationen aus bereinigter Magnitude Mag_B und a) FuzzArea, b) FuzzStrength, c) GapArea und d) GapPos nach [May21].....	144
Abb. 8.19:	Qualitative Darstellung der Kombination von bereinigter Magnitude und FuzzDist mit schematisch eingezeichneter Korrelation nach [LMG+22a; LMG+22b; LMG+23]	145
Abb. 8.20:	Dendrogramm der Cluster-Analyse nach [May21]	147
Abb. 8.21:	Geclusterte, zweidimensionale Messdaten	147
Abb. 8.22:	Cluster-Analyse auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mit a) Spule 2B09 und b) Spule 3A21	149
Abb. 8.23:	Cluster-Größe der auffälliger Spulen a) 2B09 und b) 3A21	149
Abb. 8.24:	Schema einer x-Qualitätsregelkarte nach [SP15]	151
Abb. 8.25:	Resultierende Klassifizierungsgenauigkeiten bei sukzessiver Erhöhung des gleitenden Mittelwerts (GMW)	152
Abb. 8.26:	Histogramme der bereinigten Magnituden Mag_B der Trainingsdaten mit eingezeichneten Einhüllenden	154
Abb. 8.27:	Erzielbare Genauigkeiten bei Variation von OEG und UEG	155
Abb. 8.28:	Anteile der klassifizierten Schädigungsklassen auffälliger Spulen einer realen CF-Produktion mittels x-Qualitätsregelkarte	157
Abb. 8.29:	Nutzwerte der verschiedenen Auswertungsmethoden.....	160
Abb. 8.30:	Vor- und Nachteile der verschiedenen Auswertungsmethoden und x-Qualitätsregelkarte als geeignetste Methode.....	161
Abb. 9.1:	Einordnung von Kap. 9 in das Vorgehen zur Zielerreichung.....	163
Abb. 9.2:	Kombination der a) bisherigen Ergebnisse mit b) dem Einfluss der Faserschädigung auf das Impedanzsignal zum Verständnis der wirkenden, physikalischen Effekte.....	164
Abb. 9.3:	Leitfähigkeitsortskurve der Impedanz in der normierten, komplexen Ebene nach [Gäb17; GGV11; Hel13; Ste10; Yas08]	165
Abb. 9.4:	Schematische Anordnung der Impedanzen verschiedener Werkstoffe in der komplexen Ebene für typische Leitfähigkeiten bei konstanter Frequenz nach [Hel13; HUG22; KHK13; Moo15]	166
Abb. 9.5:	Wirbelstromorientierung in Abhängigkeit von der Spulenordnung für a) Halbtransmissions- und b) Durchlaufsensoren.....	167

Abb. 9.6:	a) Skizze und b) Bild der in den Wirbelstromsensor eingesetzten Leitfähigkeitsproben	167
Abb. 9.7:	Anordnung realer Leitfähigkeiten in der komplexen Ebene [Gem20; Gem11; Thy22]	168
Abb. 9.8:	Mittels Wirbelstrom gemessene Impedanzen verschiedener Proben unterschiedlicher Leitfähigkeit und werkstofflicher Struktur	169
Abb. 9.9:	Schematische Darstellung a) der Wirbelströme im Roving und b) des Ersatzschaltbildes nach [CJQ+15; HSM13; LM94; Pra76]	170
Abb. 9.10:	Verschiebung der gemessenen Impedanzen in Richtung der negativen Real- und Imaginärachse sowohl bei zunehmender Schädigung als auch bei zunehmender Leitfähigkeit	171
Abb. 9.11:	Methodisches Vorgehen zur Überprüfung der Hypothese	172
Abb. 9.12:	Schaltplan der Vierleiter-Messung für die Widerstandsmessung an CF-Rovings nach [Par18; Zha21]	173
Abb. 9.13:	Schaltplan der verwendeten Komponenten zur Vierleiter-Widerstandsmessung als Inline-Resistanzmessung nach [Zha21]	174
Abb. 9.14:	a) Schema der Integration in die Messkette und b) CAD-Modell der Vierleiter-Widerstandsmessung nach [Zha21]	175
Abb. 9.15:	Wirbelstromrohdaten des Versuchs zur Untersuchung der Leitfähigkeitsänderung bei steigender Schädigung	175
Abb. 9.16:	Gemessene Resistenzen in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad für einen CF-Roving vom Typ HTS40 F13 nach [Zha21]	176
Abb. 9.17:	Gemessene Resistenzen in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad für einen CF-Roving vom Typ HTS45 E23 nach [Zha21]	178
Abb. 9.18:	Induzierte Wirbelstromdichte in Faserlängsrichtung, abhängig vom Abstand zum Wirbelstromsensor nach [BG20]	180
Abb. 9.19:	Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in ungeschädigten CF-Rovings nach [Zha21]	180
Abb. 9.20:	Typischer Verlauf für die relative Widerstandsänderung eines CF-Rovings im Zugversuch bis zum Bruch nach [QSG16]	181
Abb. 9.21:	Schematische Darstellung der Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings nach [Zha21]	182
Abb. 9.22:	Ersatzschaltpläne für einen a) ungeschädigten (vgl. Abb. 9.19) und b) geschädigten Roving (vgl. Abb. 9.21) nach [Zha21]	182

Abb. 9.23:	bei zunehmender Schädigung a) beobachtete Impedanzabnahme während der Sensorentwicklung und b) nachgewiesene Abnahme des elektrischen Widerstands	184
Abb. 10.1:	Einordnung von Kap. 10 in das Vorgehen zur Zielerreichung	185
Abb. 10.2:	Flussdiagramm zur Auswahl geeigneter Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach [Eve89]	186
Abb. 10.3:	Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit T für a) den CF-Preis, b) den Sensorpreis, c) die Auslastung der Produktion und c) das Prüfvolumen für eine Amortisation $T_{\text{Krit}} \leq 1$ a nach [Lan22]	192
Abb. 10.4:	a) Sensitivität der Amortisationszeit T für die Ausschussrate und b) Skaleneffekten durch das Sensorsystem nach [Lan22; SB18]	193
Abb. 10.5:	Sensitivitätsanalyse der Amortisationszeit für a) eine Preiserhöhung der CF, b) den Preis je Sensor, c) eine Reduktion des Sicherheitsfaktors und d) das Prüfvolumen nach [Lan22]	198
Abb. 10.6:	Globales Einsparpotenzial für CF-Verarbeiter und Hersteller für den CF-Markt 2023 [Sau20; Lan22]	200
Abb. 11.1:	Überprüfung der Zielerreichung der Sensorentwicklung	203
Abb. 11.2:	Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse	204
Abb. 12.1:	Schematische Darstellung des textilen Veredelungsprozesses nach [Lat23]	206
Abb. 12.2:	Schematische Darstellung des ersten und zweiten Messdurchgangs sowie der Messstrecken 1 und 2 nach [Lat23]	208
Abb. 12.3:	Auszug aus dem Messchrieb der Spule 3 für die Messdurchgänge 1 und 2 der Messstrecke 1 nach [Lat23]	208
Abb. 12.4:	Mittelwerte und Standardabweichung der Messdurchgänge 1 und 2 für den Wiederholversuch der Spule 3 nach [Lat23]	209
Abb. 12.5:	Ansätze zur Stärkung der Akzeptanz der Nutzergruppen	211
Abb. 12.6:	Mögliche Einsatzpositionen in der Hightex Prozesskette	212
Abb. 12.7:	Industrie 4.0 Maturity Index nach [SAD+20]	213
Abb. 12.8:	Verschiedene CFTP-Hybridgarne mit a), b), e) Umwindegarn und c), d), f) Commingling-Garn sowie typische Fehler	214

14.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Übersicht über lokale makroskopische Defekte in Carbonfasern.....	13
Tab. 2.2:	Normenlandschaft der CF-Prüfung [DIN92; DIN99; DIN13].....	15
Tab. 2.3:	Anwendungen laserbasierter Messtechnik (Beispiele)	16
Tab. 2.4:	Übersicht über Vor- und Nachteile von optischen sowie zerstörenden Prüfverfahren	21
Tab. 3.1:	Kernanforderungen an das zu entwickelnde ZfP	23
Tab. 4.1:	Übersicht existierender ZfP mit physikalischem Wirkprinzip [BSC16; Bue17; DIN05; DGZ20; DIN12; Gho16; RBG06; GS15; Hel13; HF15; HS12; HSP+15; IAK+19; Koc12; KFE+16; Per12; MBC+15; Sie10; SBD+19; SBT04; SKS+01; WZL+20; YHZ16]	27
Tab. 4.2:	Vorauswahl geeigneter Prüfverfahren	28
Tab. 4.3:	Leitfähigkeiten ausgewählter Werkstoffe	33
Tab. 4.4:	Übersicht über verschiedene Wirkmechanismen zur thermischen Anregung nach [Sie10].....	43
Tab. 4.5:	Kernanforderungen zur finalen Auswahl eines geeigneten ZfP	47
Tab. 4.6:	Paarweiser Vergleich zur Berechnung der Gewichtungen G_i	50
Tab. 4.7:	Zusammenhang zwischen Kernanforderungen und ZfP	51
Tab. 5.1:	Wechselwirkungen der Einflussgrößen auf das Wirbelstromsignal [GGV11; Hel13; HSK12; HSM13; HSP+15; Yas08].....	71
Tab. 5.2:	Zuordnung der Komponenten des Wirbelstromverfahrens zu den Komponenten einer Messkette [DIN19a; Hel13; SBD+19]	77
Tab. 5.3:	Ausgewählte, kommerziell verfügbare Wirbelstromprüfgeräte für CF und CF-Halbzeuge [IKT21; SUR20]	80
Tab. 7.1:	SNR der Sensortypen für verschiedene Referenzfehler	94
Tab. 7.2:	Berechnung des Korrelationskoeffizienten zur Identifikation von Scheinkorrelationen [Lan22].....	98
Tab. 7.3:	Übersicht der Sensorgenerationen mit relevanten Eigenschaften und abgeleiteten Verbesserungsmaßnahmen	103
Tab. 7.4:	Übersicht über alle Messwerte des multimodalen Sensorsystems und der Sensorik des ITA-Tribometer nach [Lan22; May21].....	112

Tab. 7.5:	Modellparameter der multiplen, linearen Regression zur Berechnung der theoretischen Magnitude Mag_T	113
Tab. 7.6:	Bewertung mittels Bestimmtheitsmaß und F-Wert zur Identifikation relevanter abhängiger Variablen nach [Lan22]	115
Tab. 7.7:	Bewertung nichtlinearer Terme im Regressionsmodell [Lan22]	116
Tab. 8.1:	Aufteilung der Datenbasis [AR10; DMA+16; LC12; SW21].....	131
Tab. 8.2:	Verwendete Python-Bibliotheken [SW21; Zho21]	132
Tab. 8.3:	Übersicht final verwendeter Hyperparameter [RM17; SW21]	136
Tab. 8.4:	Fusionierungsalgorithmen zur agglomerativen Fusion zweier Cluster nach [May21; Mül11; VGO+20; Zho21]	143
Tab. 8.5:	Potentielle Messwerte des multimodalen Sensorsystems zur Auswertung in Kombination mit der bereinigten Magnitude Mag_B	144
Tab. 8.6:	Finale Eigenschaften des entwickelten Cluster-Algorithmus nach [LMG+22a; LMG+22b; LMG+23; May21; Pil20]	146
Tab. 8.7:	Zuordnung der realen Schädigungsgrade zu den mittels Cluster-Analyse vorhergesagten Schädigungsgrade [May21].....	148
Tab. 8.8:	Qualitätsregelkarten kontinuierlicher Merkmale [Bos20; Pro22].....	150
Tab. 8.9:	Eigenschaften der final verwendeten Qualitätsregelkarte (QRK)	155
Tab. 8.10:	Vergleich der realen Schädigungsgrade mit der Auswertung über eine x-Qualitätsregelkarte	156
Tab. 8.11:	Paarweiser Vergleich zur Priorisierung der Bewertungskriterien und Berechnung der Gewichte G_i nach [Zho21]	158
Tab. 8.12:	Eigenschaften der Auswertungsmethoden bezüglich der Bewertungskriterien nach [Zho21]	159
Tab. 9.1:	Zusammenfassung der Hypothesentest	177
Tab. 10.1:	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Hersteller nach [Sau20; Lan22]	187
Tab. 10.2:	Amortisationsrechnung für CF-Hersteller nach [Lan22]	191
Tab. 10.3:	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für CF-Hersteller nach [Sau20; Lan22]	194
Tab. 10.4:	Amortisationsrechnung für CF-Verarbeiter nach [Lan22]	198

15 Literaturverzeichnis

- [AAW04] Alisch, K.; Arentzen, U.; Winter, E.
Gabler Wirtschaftslexikon, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2004
- [Abu08] Abu Amnar, O.
Der Einsatz von Laser in der Textilindustrie, Promotionsvortrag am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen, 18. Dezember 2008
- [AHM93] Atsushi, N.; Hideyuki, O.; Mishihiro, M.
Method for detecting defect of carbon fiber reinforced tubular composite material, Japanische Erfindungsmeldung JPH 05107231 A. Veröffentlichungsdatum 27. April 1993
- [AR10] Abellan-Nebot, J. V.; Romero Subirón, F.
A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47 (2010), H. 1-4, S. 237–257
- [ASG07] Akodjenou-Jeannin, M.-I.; Salamatian, K.; Gallinari, P.
Flexible Grid-Based Clustering

In: Kok, J. N.; Koronacki, J.; Mantaras, R. L. de; Matwin, S.; Mladenič, D.; Skowron, A.: Knowledge discovery in databases: PKDD 2007 - 11th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases, Warsaw (Poland), September 17th -21st 2007, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 350–357
- [AVK14] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (Hrsg.)
Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, 4. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [BBN+10] Beine, C.; Boller, C.; Netzelmann, U.; Porsch, F.; Venkat, R.; Schulze, M.; Bulavinov, A.; Heuer, H.
NDT for CFRP Aeronautical Components - A Comparative Study

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, November 22nd - 24th 2010, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2010
- [BBO+13] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T. A.; Rudolph, N.; Schmachtenberg, E.; Saechtling, H.
Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31. Aufl., München: Hanser, 2013

- [BDP01] Bastianini, F.; Di Tommaso, A.; Pascale, G.
Ultrasonic nondestructive assessment of bonding defects in composite structural strengthenings, *Composite Structures* 53 (2001), H. 4, S. 463–467
- [Bei10] Beier, U.
High-performance fibre-reinforced composites prepared by a novel preform manufacturing routine, Bayreuth, Universität Bayreuth, Dissertation, 2010
- [BEP+18] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.
Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [Ber06] Berner, U.
Greenhouse gas carbon dioxide - a flashback into the past and an outlook into the future

In: ÖVK - Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (Hrsg.): 27. Internationales Wiener Motorensymposium, Düsseldorf, 27. -28. April: VDI-Verl., 2006, S. 42–54
- [Ber19] Berger, D.
Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozessintegrierter Wirbelstromsensor-Arrays, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2019
- [BES+17] Berger, D.; Egloff, A.; Summa, J.; Schwarz, M.; Lanza, G.; Herrmann, H.-G.
Conception of an Eddy Current In-process Quality Control for the Production of Carbon Fibre Reinforced Components in the RTM Process Chain, *Procedia CIRP* 62 (2017), S. 39–44
- [BG20] Bauer, E.; Gisbertz, T.
Theoretische Auslegung und Bewertung einer Messkette für die Inline-Prüfung von Carbonfaser-Rovings mittels der QFD-Methode, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Projektarbeit, 2020
- [BL15] Brabandt, D.; Lanza, G.
Data Processing for an Inline Measurement of Preforms in the CFRP-Production, *Procedia CIRP* 33 (2015), S. 269–274
- [Boh22a] Bohlender GmbH
BOLA Schläuche, PTFE, Waltersberg, 2022a, URL:
<https://www.bola.de/produkte/schlaeuche-folien-platten/schlaeuche/579/bola-schlaeuche-ptfe>, Zugriff am 06.01.2022

- [Boh22a] Bohlender GmbH
BOLA Ex-Schutz Schläuche, antistatisch, PTFE EX, Walterberg, 2022b,
URL: <https://www.bola.de/produkte/verschraubungen-und-bauteile-fuer-ex-schutz/schlaeuche-ex/225/bola-ex-schutz-schlaeuche-antistatisch-ptfe-ex?c=902>, Zugriff am 06.01.2022
- [Bos20] Robert Bosch GmbH, Stuttgart
Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe - Technische Statistik - Heft Nr. 7 - Statistische Prozessregelung (SPC), Stuttgart, 2020, URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwi4vZqGpcr2AhUjwAlHHfvYAt4QFnoE-CAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fassets.bosch.com%2Fmedia%2Fglobal%2Fbosch_group%2Fpurchasing_and_logistics%2Finformation_for_business_partners%2Fdownloads%2Fquality_docs%2Fgeneral_regulations%2Fbosch_publications%2Fbooklet-no07-statistische-prozessregelung-spc_DE.pdf&usg=AOvVaw1kb1v_hOeD0VKv35kaJA_I, Zugriff am 16.03.2022
- [BPF12] Beyerer, J.; Puente Leòn, F.; Frese, C.
Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [Bra10] Brady, S. K.
Method and Apparatus for Detecting Inconsistencies in Fibre Reinforced Resin Parts Using Eddy Current, US-amerikansiches Patent US 7.755.351 B2. Veröffentlichungsdatum 13. Juli 2010
- [Bri79] Brinken, F.
Untersuchungen zur Wärmeübertragung beim Thermoformen von Thermoplasten, Aachen, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1979
- [BSC16] Bossuyt, S.; Schajer, G.; Carpinteri, A. (Hrsg.)
Residual stress, thermomechanics and infrared imaging, hybrid techniques and inverse problems. Volume 9 - Proceedings of the 2015 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Cham, Heidelberg, New York: Springer International Publishing, 2016
- [Bue17] Buerakov, W.
Interferometrische Bauteilprüfung, Schadenserkennung und Ermittlung der modalen Parameter mittels dynamischer Belastung
Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2017

- [Bül14] Bülow, C.
Qualitäts-sicherung von Preforms mit Wirbelstromsensorik, Innovationsbericht 2014 (2014), S. 72–73
- [Bun09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ - Emissionen von Personenkraftwagen, Berlin, 2009, URL: https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf, Zugriff am 17.12.2019
- [BVP+07] Bonavolonta, C.; Valentino, M.; Peluso, G.; Barone, A.
Non Destructive Evaluation of Advanced Composite Materials for Aerospace Application Using HTS SQUIDs, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 17 (2007), H. 2, S. 772–775
- [BWT+17] Berger, D.; Will, T.; Töpfer, H.-C.; Lanza, G.; Koster, D.; Herrmann, H.-G.
Characterisation and Optimization of in-process Eddy Current Sensor Arrays Using Computed Tomography, Procedia CIRP 66 (2017), H. 1, S. 243–248
- [CGF+20] Choo, K.; Greplova, E.; Fischer, M. H.; Neupert, T.
Machine Learning kompakt - Ein Einstieg für Studierende und Naturwissenschaftler, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- [CGM+03a] Carr, C.; Graham, D.; Macfarlane, J. C.; Donaldson, G. B.
SQUID-based nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 13 (2003), H. 2, S. 196–199
- [CGM+03b] Carr, C.; Graham, D.; Macfarlane, J. C.; Donaldson, G. B.
HTS SQUIDs for the nondestructive evaluation of composite structures, Superconductor Science and Technology 16 (2003), H. 12, S. 1387–1390
- [CH04] Christ, M.; Heine, M.
Detektierung von Oxidation kohlenstoffhaltiger Fasern oder Faserbündeln in Verbundwerkstoffen, Deutsches Patent DE 102 34 551 B3. Veröffentlichungsdatum 29. Januar 2004
- [CJ08] Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C.
Conduction of heat in solids, 2. Ed., Oxford: Clarendon Press, 2008

- [CJQ+15] Cheng, J.; Ji, H.; Qiu, J.; Takagi, T.; Uchimoto, T.; Hu, N.
Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals, *Journal of Composite Materials* 49 (2015), H. 5, S. 617–631
- [CL16] Cleve, J.; Lämmel, U.
Data Mining, 2. Aufl., München: De Gruyter Oldenbourg, 2016
- [CQJ+17] Cheng, J.; Qiu, J.; Ji, H.; Wang, E.; Takagi, T.; Uchimoto, T.
Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material, *Composites Part B: Engineering* 110 (2017), H. 3, S. 141–152
- [CT11] Cheng, L.; Tian, G. Y.
Surface Crack Detection for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Materials Using Pulsed Eddy Current Thermography, *IEEE Sensors Journal* 11 (2011), H. 12, S. 3261–3268
- [CXF+17] Cunfu, H.; Xiucheng, L.; Fanlin, M.; Nan, W.; Bin, W.; Jieming, Y.
Omnidirectional eddy-current self-adapting scanning system for cor-rugation defects of carbon fiber reinforced composite material, *Chinesische Erfindungsmeldung* CN 107024534 A. Veröffentlichungsdatum 8. August 2017
- [Dat22] Datatab e.U., Seiersberg (Österreich)
Kruskal-Wallis-Test, Graz (Österreich), 2022, URL: https://datatab.de/tutorial/kruskal-wallis-test#post_hoc_test, Zugriff am 09.06.2022
- [DC22] Dietrich, E.; Conrad, S.
Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, 8. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2022
- [DGZ20] DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.:
Kursusprogramm 2020: Ausbildung und Qualifizierungsprüfungen nach DIN EN ISO 9712, DIN 54161, DIN EN 4179, Fachkunde-Richtlinien Technik im Strahlenschutz, Berlin, 2020, URL: <https://www.dgzfp.de/Portals/24/pdfs/ku-pro-2020.pdf>, Zugriff am 4.6.20
- [DHM+11] Durfy, J.; Horswill, S.; Mays, C.; Osborne, R.; Stokes, J.; Thelen, W.
Computer Simulation of Light-Duty Vehicle Technologies for Greenhouse Gas Emission Reduction in the 2020-2025 Timeframe: EPA Contract No. EP-C-11-007, Work Assignment No. 0-12, Ann Arbor, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2011, URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100D57R.PDF?Dockey=P100D57R.PDF>, Zugriff am 18.07.2022

- [DIN05] DIN CEN/TS 15053 [zurückgezogen]
Zerstörungsfreie Prüfung - Empfehlungen für Arten von Inhomogenitäten in Prüfungsstücken für Prüfungen (Vornorm), Berlin: Beuth, 2005
- [DIN09] DIN 96901-5
Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe, Berlin: Beuth, 2009
- [DIN12] DIN EN ISO 9712
Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung, Berlin: Beuth, 2012
- [DIN13] DIN EN 16245-3
Faserverstärkte Verbundwerkstoffe - Angabe von Werkstoffeigenschaften - Teil 3: Spezifische Anforderungen an Fasern, Berlin: Beuth, 2013
- [DIN15] DIN 54 180-1
Zerstörungsfreie Prüfung - Shaerografie - Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Berlin: Beuth, 2015
- [DIN16] DIN EN 16714-1
Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Berlin: Beuth, 2016
- [DIN18a] ISO/IEC 17025:2017
Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, Berlin: Beuth, 2018
- [DIN18b] DIN EN ISO 50001
Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Berlin: Beuth, 2018
- [DIN19a] DIN EN ISO 15549
Zerstörungsfreie Prüfung – Wirbelstromprüfung – Allgemeine Grundlagen, Berlin: Beuth, 2019
- [DIN19b] DIN EN ISO 12718
Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung – Terminologie, Berlin: Beuth, 2019
- [DIN84] DIN 54140 [zurückgezogen]
Zerstörungsfreie Prüfung - Induktive Verfahren - Teil 2 – Begriffe, Berlin: Beuth, 1984

- [DIN89] DIN 54140 [zurückgezogen]
Zerstörungsfreie Prüfung - Induktive Verfahren- Teil 3 - Darstellung und allgemeine Eigenschaften von Spulensystemen, Berlin: Beuth, 1989
- [DIN92] DIN 29965
Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffasern - Kohlenstofffilamentgarne - Technische Lieferbedingungen, Berlin: Beuth, 1992
- [DIN94] DIN 40110-1
Wechselstromgrößen - Teil 1: Zweileiter Stromkreise, Berlin: Beuth, 1994
- [DIN95] DIN 1319-1
Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Berlin: Beuth, 1995
- [DIN99] DIN EN 13002-2 [zurückgezogen]
Kohlenstofffilamentgarne - Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Festlegungen, Berlin: Beuth, 1999
- [DJM+11] Deutsch, W. A. K.; Joswig, M.; Maxam, K.; Nitsche, S.; Vahe, M.; Noël, A.; Pichard, P.; Deutsch, S.
Ultraschall-Prüfung von Dickwandigen nahtlosen Rohren mit einem Gruppenstrahler-Prüfportal, DGZfP-Jahrestagung 2011 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Bremen, 30. Mai - 1. Juni 2011
- [DM15] Dombrowski, U.; Mielke, T. (Hrsg.)
Ganzheitliche Produktionssysteme -Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015
- [DMA+16] D'Addona, D. M.; Matarazzo, D.; Aguiar, P. R. de; Bianchi, E. C.; Martins, C. H. R.
Neural Networks Tool Condition Monitoring in Single-point Dressing Operations, Procedia CIRP 41 (2016), S. 431–436
- [DRB17] Dabelstein, D. K.; Robb, A. M.; Brown, A. M.
Magnetic Coupling for Electrical Conductivity Assessment, US-amerikanisches Patent US 9 .753 .072 B2. Veröffentlichungsdatum 5. September 2017
- [DXC+17] Du, Y.; Xie, S.; Chen, Z.; Zhu, G.; Li, P.
Detectability evaluation of eddy current testing probes for inspection of defects in carbon fiber reinforced polymer laminates, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 55 (2017), H. 2, S. 185–193

- [Ede12] Edevis GmbH
Prüfung von CFK Komponenten, Stuttgart, 2012, URL: https://www.ede-vis.com/download/AppNote_OTvis_CFRP_DE.pdf, Zugriff am 19.10.2020
- [EEO12] Ernst, C.-S.; Eckstein, L.; Olschewski, i.
CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkw bis 2020, Aachen, 2012, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/co2-reduzierungspotenziale-bei-pkw-bis-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [Ehr06] Ehrenstein, G. W.
Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften, 2. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2006
- [EMK16] Ebel, C.; Mierzwa, A.; Kind, K.
Yarn damage during braiding of reinforced fibres for composites

In: In Kyosev, Y.: Advances in braiding technology - Specialized techniques and applications. - Amsterdam, Cambridge: Woodhead Publishing, 2016
- [Eur11] Europäische Kommission (Hrsg.)
Weissbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, Brüssel, 2011, URL: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/f92333f7-da0d-4fd6-9e62-389b0526e2ac/language-de>
- [Eve89] Eversheim, W.
Wirtschaftlichkeitsfragen der Fertigung, Aachen, Technischen Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Produktionssystematik, Vorlesungsskript, 1989
- [FB06] Freitag, E.; Busam, R.
Funktionentheorie 1, 4. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2006
- [FDK84] Feldkamp, L. A.; Davis, L. C.; Kress, J. W.
Practical cone-beam algorithm, Journal of the Optical Society of America A 1 (1984), H. 6, S. 612–619
- [FF08] Fuente Souviron, A.; Fernandez, J. P.
Method for Determining the Thickness of a Coating on a Composite Material, US-amerikanisches Patent US 7.352.194 B1. Veröffentlichungsdatum 1. April 2008
- [FG03] Fürderer, T.; Gries, T.
Charakterisierung der Oberflächen von fadenkontaktierenden Textilmaschinenbauteilen, DWI Reports (2003), H. 126, S. 294–299

- [FG04] Fürderer, T.; Gries, T.
Tribologie bei Textilien, International Textile Bulletin 50 (2004), S. 42–45
- [FG13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.
Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [FR04] Fava, J.; Ruch, M.
Design, construction and characterisation of ECT sensors with rectangular planar coils, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 46 (2004), H. 5, S. 268–274
- [Fri13] Friedrich, H. E. (Hrsg.)
Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [Gäb17] Gäbler, S.
Untersuchung des Anwendungspotenzials der Hochfrequenzwirbelstrommess-technik zur Charakterisierung dielektrischer Eigenschaften von Epoxidharzen und Faserverbundmaterialien, Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2017
- [GAZ21] GAZ-Prüftechnik GmbH, Alpen
Prüftechnik online, 2021, URL: https://www.gaz-direkt.de/bereiche/177/23/ut_ultraschallpruefung-ultraschallgeraete.html, Zugriff am 04.11.2021
- [GBH+13] Gloy, Y.; Beck, T.; Hehl, A.; Niebel, V.; Wischnowski, M.; Schulte Südhoff, E.; Raina, M.; Gries, T.
L13 - Sensorik in der Textiltechnik

In: AMA Service GmbH (Hrsg.): Tagungsband 11. Dresdner Sensor-Symposium 2013, Dresden, 9. - 11. Dezember 2013, Wunstorf: AMA Service, 2013, S. 445–449
- [Geb21] Gebrüder Loepfe Ltd.
Zero-defect manufacturing : optical yarn defect sensor for carbon ; weavers of carbon fabrics rely on WeftMaster® FAL-CON-I, Wetzikon, 2021, URL: <https://www.loepfe.com/downloads/weaving/wm-falcon-i/wm-falcon-i-carbon---info-sheet.pdf>, Zugriff am 14.10.2021

- [Gem11] Hans-Erich Gemmel & Co. GmbH
Gemmel Metalle -Legierungsbeschreibung CuZn39Pb3, Berlin: Hans Erich Gemmel, 2011, URL:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKE-wit5c3QhNX3AhUT8rsIHxt_AkcQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gemmel-metalle.de%2Fdownloads%2FLegierungsbeschreibung_CuZn39Pb3.pdf&usg=AOvVaw2_U7AYDKC2g-Epw9xDMylJ, Zugriff am 10.05.2022
- [Gem20] Hans-Erich Gemmel & Co. GmbH
Gemmel Metalle - Legierungsbe-schreibung AlCuMgPb F37, Berlin: Hans Erich Gemmel, 2020, URL:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi6ufu-g9X3AhXEhv0HHcCwAXIQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gemmel-metal-le.de%2Fdownloads%2FLegierungsbeschreibung_AlCuMgPb_F37.pdf&usg=AOvVaw2NGoyTTCPIsaWJXQFiwfe0, Zugriff am 10.05.2022
- [GF07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.
Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau: mit Tabellen, 22. Aufl., Berlin (u.a.): Springer, 2007
- [GGV11] García-Martín, J.; Gómez-Gil, J.; Vázquez-Sánchez, E.
Non-destructive techniques based on eddy current testing, *Sensors* 11 (2011), H. 3, S. 2525–2565
- [GHK17] Gäbler, S.; Heuer, H.; Klein, M.
Verfahren und Verwendung einer Vorrichtung zur Messung der lokalen effektiven Permittivität von elektrisch nicht leitenden oder schwach leitenden Materialien, Deutsches Patent DE 10 2014 116 497 B4. Veröffentlichungsdatum 6. Juli 2017
- [Gho16] Gholizadeh, S.
A review of non-destructive testing methods of composite materials, *Procedia Structural Integrity* 1 (2016), H. 2, S. 50–57
- [GK07] Gries, T.; Klopp, K. (Hrsg.)
Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien - Verfahren und Anwendungen, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007

- [GLL+18] Greb, C.; Lenz, C.; Lengersdorf, M.; Gries, T.
Fabrics for reinforcement of engineering composites
In: In Miao, M.; Xin, J. H.: Engineering of high-performance textiles. - Cambridge, MA, Kidlington: Wood-head Publishing, 2018, S. 489–512
- [GMW+16] Geinitz, S.; Margraf, A.; Wedel, A.; Witthus, S.; Drechsler, K.
Detection of Filament Misalignment in Carbon Fibre Production Using a Stereo-vision Line Scan Camera System
In: 19th WCMDT 2016 (Hrsg.): 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munic, June 13th -17th, Red Hook, NY: Curran Associates, 2016, S. 3882–3889
- [GPE+11] Garnier, C.; Pastor, M.-L.; Eyma, F.; Lorrain, B.
The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing, Composite Structures 93 (2011), H. 5, S. 1328–1336
- [Gri95] Gries, T.
Anforderungsgerechte Dünnschichtsysteme für fadenführende Textilmaschinenelemente, Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1995
- [Gro10] Groß, J.
Grundlegende Statistik mit R - eine anwendungsorientierte Einführung in die Verwendung der Statistik Software R, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010
- [GS15] Grellmann, W.; Seidler, S. (Hrsg.)
Kunststoffprüfung, 3. Aufl., München: Hanser, 2015
- [GSS13] Görz, G.; Schneeberger, J.; Schmid, U.
Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 5. Aufl., München: Oldenbourg, 2013
- [Gup08] Gupta, B. S. (Hrsg.)
Friction in textile materials 78, Boca Raton, Cambridge: CRC press; Wood-head Publishing, 2008
- [Hag85] Hagemaiier, D. J.
Eddy Current Standard Depth of Penetration, Materials Evaluation 43 (1985), H. 11, S. 1438 – 1442

- [HAR+04] Hillger, W.; Ahrholdt, M.; Rohling, H.; Heinrich, R.
Non-Contact Ultrasonic Imaging Techniques for Composite Components
In: Canadian Institute for NDE (Hrsg.): 16th World Conference on Nondestructive Testing: Palais des Congrès, Montre-al (Canada), August 30th - September 3rd 2004, Bad Breisig: NDT.net, 2004
- [HDT+16] Hughes, F.; Day, R.; Tung, N.; Dixon, S.
High-frequency eddy current measurements using sensor-mounted electronics, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 58 (2016), H. 11, S. 596–600
- [Hea17] Heaton, J.: Heaton Research
The Number of Hidden Layers, Cesterfield, MO, 2017, URL:
<https://www.heatonresearch.com/2017/06/01/hidden-layers.html>, Zugriff am 10.2.2022
- [Hel13] Hellier, C.
Handbook of nondestructive evaluation, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 2013
- [HF15] Hürter, R.; Flackus, J. (Hrsg.)
Produktivität, Qualität, Effizienz - Innovative Prozesse für die Produktion von morgen, Aachen: Shaker, 2015
- [HH09] Heutling, B.; Hünies, P.
Automatische Klassifizierung von Signalen bei der Wirbelstromprüfung von ferromagnetischen Wärmetauschern
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.) DGZfP-Jahrestagung 2009 Zerstörungsfreie Materialprüfung: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Münster, 18. - 20. Mai, Berlin, Bad Breisig: DGZfP, NDT.net, 2009
- [HHK+10] Heuer, H.; Hillmann, S.; Klein, M.; Meyendorf, N.
Sub Surface Material Characterization using High Frequency Eddy Current Spectroscopy
In: Ueda, O.; Fukuda, M.; Pearton, S. J.; Piner, E. L.; Montangero, P.: Reliability and materials issues of semiconductor optical and electrical devices and materials, Boston, Massachusetts (U.S.A.), November 29th - Dezember 3rd 2009, Warrendale, PA: MRS, 2010, S. 253–558

- [HHR+10] Heuer, H.; Hillmann, S.; Roellig, M.; Schulze, M. H.; Wolter, K.-J.
Thin Film Characterization using High Frequency Eddy Current Spectroscopy
In: IEEE-NANO (Hrsg.): 9th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), Genoa (Italy), July 26th - 30th 2009, Piscataway, NJ, 2010
- [Hig12] Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH: Technologien
Klipphausen, 2012, URL: <https://www.hightex-dresden.de/Technologien/456/>, Zugriff am 19.07.2022
- [HK03] Hoshikawa, H.; Koyama, K.
A new eddy current probe with minimal liftoff noise and phase information on discontinuity depth, Materials Evaluation 61 (2003), H. 6, S. 423–427
- [HKP12] Han, J.; Kamber, M.; Pei, J.
Data mining - Concepts and techniques, 3rd Ed., Waltham, MA: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2012
- [HKT+02] Hatsukade, Y.; Kasai, N.; Takashima, H.; Ishiyama, A.
Non-contact SQUID-NDT method using a ferrite core for carbon-fibre composites, Superconductor Science and Technology 15 (2002), H. 12, S. 1728–1732
- [HM11] Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.)
Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung, München: Hanser, 2011
- [Hof17] Hofacker, A.
Leichtbau mit CFK: Prozesse müssen weiter optimiert werden, Wiesbaden, 2017, URL: <https://www.springerprofessional.de/leichtbau/verbundwerkstoffe/leichtbau-mit-cfk-beliebt-aber-teuer/11939650>, Zugriff am 06.02.2020
- [HS11] Heuer, H.; Schulze, M. H.
Eddy current testing of carbon fiber materials by high resolution directional sensors
In: International Workshop on Smart Materials and Structures (Hrsg.): NDT in Aerospace; NDT in Canada 2011, Montreal, QC (Canada), November 2nd - 4th 2011, Hamilton, Bad Breisig: Canadian Institute for NDE; NDT.net, 2011
- [HS12] Hering, E.; Schönfelder, G. (Hrsg.)
Sensoren in Wissenschaft und Technik - Funktionsweise und Einsatzgebiete, 2. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012

- [HS18] Hesse, S.; Schnell, G.
Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion, Ausführung, Anwendung, 7. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [HSK12] Heuer, H.; Schulze, M.; Klein, M.
Abbildende Wirbelstromsensoren zur hochauflösenden berührungslosen Abbildung von elektrischen Eigenschaften schlecht leitender Objekte
In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.); Informationstechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): Sensoren und Messsysteme 2012: Vorträge der 16. GMA/ITG-Fachtagung vom 22. bis 23. Mai 2012 in Nürnberg, Nürnberg, 22. - 23. Mai 2012, Wunstorf: AMA Service GmbH, 2012, S. 548–554
- [HSL+20] Heuer, H.; Schulze, M.; Lefkaier, I. K.; Naidjate, M.; Helifa, B.; Mou-loud, F.
Eddy Current Sensor for Non-Destructive Testing of a Substrate, US-amerikanisches Patent US 2020.0088685 A1. Veröffentlichungsdatum 19. März 2020
- [HSM10] Heuer, H.; Schulze, M. H.; Meyendorf, N.
High Resolution Inspection of Carbon Fibre Materials by Eddy Current Techniques
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, November 22nd - 24th 2010, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2010
- [HSM13] Heuer, H.; Schulze, M. H.; Meyendorf, N.
Non-destructive evaluation (NDE) of composites: Eddy current techniques
In: In Karbhari, V. M.: Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites. 43. - Oxford [u.a.]: Woodhead Publishing, 2013, S. 33–55
- [HSP+15] Heuer, H.; Schulze, M.; Pooch, M.; Gäbler, S.; Nocke, A.; Bardl, G.; Cherif, Ch.; Klein, M.; Kupke, R.; Vetter, R.; Lenz, F.; Kliem, M.; Bülow, C.; Goyvaerts, J.; Mayer, T.; Petrenz, S.
Review on quality assurance along the CFRP value chain – Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques, Composites Part B: Engineering 77 (2015), S. 494–501
- [HTP+14] He, Y.; Tian, G.; Pan, M.; Chen, D.
Impact evaluation in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates using eddy current pulsed thermography, Composite Structures 109 (2014), H. 1, S. 1–7

- [HUG22] HUG® Technik und Sicherheit GmbH, Ergoldging
Technik Tabellen - Industrietechnik Metallische Werkstoffe Physikalische Eigenschaften, 2022, URL: <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/metall.htm>, Zugriff am 2.5.2022
- [HY04] Hiroaki, K.; Yasushi, K.
System for detecting abnormality in yarn making, Japanische Erfindungsmeldung JP 002004277938 A. Veröffentlichungsdatum 07. Oktober 2004
- [IAK+19] Ishikawa, M.; Ando, M.; Koyama, M.; Nishino, H.
Active thermographic inspection of carbon fiber reinforced plastic laminates using laser scanning heating, *Composite Structures* 209 (2019), S. 515–522
- [ICW+04] Imielińska, K.; Castaings, M.; Wojtyra, R.; Haras, J.; Le Clezio, E.; Hosten, B.
Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fi-bre and hybrid, *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004), S. 513–522
- [IKT21] Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Elektromagnetische Prüfsysteme und -verfahren, Dresden, URL: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/elektromagnetische_pruefsysteme_verfahren/produkte_dienstleistungen.html, Zugriff am 17.06.2021
- [ILS90] Ivaska, A.; Lewenstam, A.; Sara, R. (Hrsg.)
Contemporary Electroanalytical Chemistry, Boston, MA: Springer US, 1990
- [IM19] Ida, N.; Meyendorf, N. (Hrsg.)
Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation, Cham: Springer International Publishing, 2019
- [Ise08] Isermann, R.
Mechatronische Systeme, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [ISO13] BS ISO 20653
Road vehicles — Degrees of protection (IP code) — Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access, London: BSI Group, 2013

- [ISU21] Iowa State University (ISU) - Center for Nondestructive Evaluation (NDE-Ed)
Eddy Current Testing, Ames, Iowa, URL: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/Instrumentation/ecinstruments.xhtml>, Zugriff am 20.05.2021
- [Izu12] Izumi International Inc.
CFA Carbon Fibre Analyzer, Greenville, Sc., 2012, URL: [https://www.izumi-international.com/media/wysiwyg/brochure/CFA-CFAnalyzer-\(BroF\).pdf](https://www.izumi-international.com/media/wysiwyg/brochure/CFA-CFAnalyzer-(BroF).pdf), Zugriff am 20.10.2021
- [JD71] Jones, B. F.; Duncan, R. G.
The effect of fibre diameter on the mechanical properties of graphite fibres manufactured from polyacrylonitrile and rayon. *Journal of Materials Science* 6 (1971), H. 4, S. 289–293
- [JH14] Jäger, H.; Haider, P.
Chancen und Strategien zur Bereitstellung alternativer C-Faser-Precursorren, *Lightweight Design* 7 (2014), H. 3, S. 24–29
- [JK20] Joas, S.; Kreutzbruck, M.
Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung kohlefaserverstärkter Kunststoffe - von der Theorie zur Anwendung
In: In DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP heute - Wissenschaftliche Beiträge zur Zerstörungsfreien Prüfung. - Bad Breisig: NDT.net, 2020, S. 90–94
- [JMD13] Joos, J.; Marschall, M.; Danzer, M.
Verfahren zur Messung des Verschleißes von Carbon-Keramik Reibscheiben und Vorrichtung hierfür, Europäisches Patent EP 2 182 347 B1. Veröffentlichungsdatum 19. Juni 2013
- [KBB+15] Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Steinbrecher, M.
Computational Intelligence - Eine methodische Einführung in Künstliche Neuro-nale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze, 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [KDM04] Karmrodt, J.; David, M.; Markstaller, K.
Elektrische Impedanztomographie (EIT), *Notfall & Rettungsmedizin* 7 (2004), H. 8, S. 572–576

- [Kel16] Kellie, G. (Hrsg.)
Advances in technical nonwovens, Amsterdam, [u.a.]: Woodhead Publishing, 2016
- [KFE+16] Kreutzbruck, M.; Fey, P.; Essig, W.; Rahammer, M.; Joas, S.; Erb, T.; Solodov, I.
Faserkunststoffverbunde – Hochleistungswerkstoffe in Leichtbausystemen als eine neue Herausforderung für die ZfP, ZfP-Zeitung 151 (2016), H. Oktober, S. 31–39
- [KHB11] Kang, B.-G.; Hannawald, J.; Brameshuber, W.
Electrical resistance measurement for damage analysis of carbon yarns, Materials and Structures 44 (2011), H. 6, S. 1113–1122
- [KHK13] Koyama, K.; Hoshikawa, H.; Kojima, G.
Eddy Current Nondestructive Testing for Carbon Fiber- Reinforced Composites, Journal of Pressure Vessel Technology 135 (2013), H. 4, S. 230
- [KJE+17] Kreutzbruck, M.; Joas, S.; Essig, W.; Rahammer, M.; Solodov, I.; Fey, P.
Vergleich unterschiedlicher Ultraschall-prüfmethoden zur Charakterisierung von Faserverbundstrukturen

In: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.) (BAM); DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Charakterisierung von Material- und Fehlereigenschaften mittels Ultraschall - Seminar des FA Ultraschallprüfung, Berlin, 6. bis 7. November, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2017
- [KJN+20] Khayyam, H.; Jazar, R. N.; Nunna, S.; Golkarnarenji, G.; Badii, K.; Fakhrhosseini, S. M.; Kumar, S.; Naebe, M.
PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production, Progress in Materials Science 107 (2020)
- [KJN99] Kesel, A. B.; Junge, M. M.; Nachtigall, W.
Einführung in die angewandte Statistik für Biowissenschaftler, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1999
- [Kle18] Klein, P.
Automatische Erkennung der Aufnahmegeometrie bei der robotergestützten Computertomographie, ZfP-Zeitung 158 (2018), H. Februar, S. 31–35

- [KM96] Köser, O.; Mook, G.
Simulation und Rekonstruktion von Wirbelstrombildern auf der Basis eines Stromschleifenmodells

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.); Fachausschuss Hochschullehrer (Hrsg.): Wissenschaftliches Kolloquium Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung, Dortmund, 13. November, Berlin: DGZfP, 1996, S. 39–50
- [KÖ11] Kohn, W.; Öztürk, R.
Statistik für Ökonomen - Datenanalyse mit R und SPSS, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- [Koc12] Kochan, A.
Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau, Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2012
- [Kon14] Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH
Quality Engineering: Die richtigen berührungslosen Sensoren für die jeweilige Anwendung - Intelligente Integration, 2014, URL: <https://quality-engineering.industrie.de/allgemein/intelligente-integration/>, Zugriff am 15.03.2021
- [Köt20] Kötter, D. E.
Entwicklung und Implementierung eines Neuronalen Netzes zur Qualitätssicherung von Carbonfasern auf Basis des Wirbelstromverfahrens, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bachelorarbeit, 2020
- [Kun04] Kuntz, J.
Einfluss von Fadenführungsparametern auf die Schädigung von Carbonfaserverrovings, Stuttgart, Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2004
- [Lan22] Lanz, A.
Gesamtheitliche Analyse eines Wirbelstromsensors zur Qualitätssicherung an Carbonfaserverrovings unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bachelorarbeit, 2022
- [Lan97] Lange, R.
Zur Wirbelstromprüfung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen, Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 1997

- [Lat23] Latasiewicz, P.
Experimentelle Validierung eines Wirbelstromsensors zur Inline-Qualitätssicherung von Carbonfasern in industrieller Umgebung, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, laufende Bachelorarbeit, 2023
- [LBG+00] Liu, J.-G.; Becker, W.-J.; Gerhold, T.; Ricken, W.
Parameterentrennung in Sensoren und Messsystemen durch Signalverarbeitung, *te Technische Messen* 67 (2000), H. 11, S. 484–490
- [LC12] Lämmel, U.; Cleve, J.
Künstliche Intelligenz, 4. Aufl., München: Hanser Verlag, 2012
- [Len19a] Lenzing Instruments GmbH & Co.KG
FRAY VIEW - Yarn Defects Visualisation, Gampern (Austria), Mönchengladbach, 2019, URL: https://lenzing-instruments.com/wp-content/uploads/2019/06/fray_view-1.pdf, Zugriff am 14.10.2021
- [Len19b] Lenzing Instruments GmbH & Co.KG
PROMPT FFD - Fluff and Fry Detector, Gampern (Austria), Mönchengladbach, 2019, URL: https://lenzing-instruments.com/wp-content/uploads/2019/06/prompt_ffd.pdf, Zugriff am 14.10.2021
- [Leo11] Leohold, J.
Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil, CCEV Automotive Forum, Ingolstandt, 2011
- [Ler16] Lerch, R.
Elektrische Messtechnik - analoge, digital eund computergestützte Verfahren, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- [LGK+20a] Lechthaler, L.; Gries, T.; Kupke, R.; Feltin, D.; Vojcena, P.; Stamm, C.
Developing an eddy current-bases sensor system for quality assurance of car-bon fibres, *JEC Composites Magazine* 57 (2020), H. 136, S. 59–61
- [LGK+20b] Lechthaler, L.; Gries, T.; Kupke, R.; Feltin, D.; Vojcena, P.; Stamm, C.
Entwicklung eines Wirbelstromsensors zur Detektion von Filamentschädigung an Carbonfasern, *Textil Plus* 8 (2020), H. 09/10, S. 10–12
- [Li12] Li, X.
Eddy Current Techniques for Non-destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP), Manchester, University of Manchester, Dissertation, 2012

- [LKD+12] Lieber, D.; Konrad, B.; Deuse, J.; Stolpe, M.; Morik, K.
Sustainable Interlinked Manufacturing Processes through Real-Time Quality Prediction
In: In Dornfeld, D. A.; Linke, B. S.: Leveraging technology for a sustainable world. - Berlin: Springer, 2012, S. 393–398
- [LKE19] Lehman, B.; Köckritz, T.; Eckard, P.
Verfahren und Modul zur Bestimmung der Qualität, insbesondere des Karbonisierungsgrades von Kohlenstofffasern, Deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2018 219 857A1. Veröffentlichungsdatum 13. Juni
- [LM94] Lange, R.; Mook, G.
Structural analysis of CFRP using eddy current methods, NDT & E International 27 (1994), H. 5, S. 241–248
- [LMG+22a] Lechthaler, L.; May, S.; Gries, T.; Kupke, R.; Feltin, D.; Latasiewicz, P.; Stamm, C.;
KI-gestützte Impedanzanalyse von Carbonfaser-Rovings - Teil 1; Textil plus 10 (2022), H. 09/10, S. 16-17
- [LMG+22b] Lechthaler, L.; May, S.; Gries, T.; Kupke, R.; Feltin, D.; Latasiewicz, P.; Stamm, C.
Optical data rectification and ML-aided impedance analysis for quality assurance of carbon fibre, JEC Magazine, 59 (2022), H. 147, S. 25-28
- [LMG+23] Lechthaler, L.; May, S.; Gries, T.; Kupke, R.; Feltin, D.; Latasiewicz, P.; Stamm, C.;
KI-gestützte Impedanzanalyse von Carbonfaser-Rovings - Teil 2; Textil plus 11 (2023), H. 01/02, S. 12-14
- [LS18] Lackes, R.; Siepermann, M.
Gabler Wirtschaftslexikon- maschinelles Lernen, Wiesbaden, 2018, URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/maschinelles-lernen-38193/version-261619>, Zugriff am 27.01.2022
- [LSK+13] Lieber, D.; Stolpe, M.; Konrad, B.; Deuse, J.; Morik, K.
Quality Prediction in Interlinked Manufacturing Processes based on Supervised & Unsupervised Machine Learning, Procedia CIRP 7 (2013), S. 193–198

- [LU17] Lichtenwalter, D.; Ulrich, M.
Zerstörungsfreies Verfahren zur Bestimmung der Faserorientierung von kohlefa-serverstärkten Materialien, Deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2016 208 599 A1. Veröffentlichungsdatum 23. November 2017
- [Mad12] Madhulatha, T. S.
An overview on clustering methods, IOSR Journal of Engineering 2 (2012), H. 4, S. 719–725
- [Mag21] Magnetische Prüfanlagen GmbH
Wirbelstromprüfung für sichere Komponenten, Reutlingen, 2021, URL: https://www.foerstergroup.de/fileadmin/user_upload/downloads/Broschueren/FOERSTER_WIRBELSTROMPRUEFUNG_DE.pdf, Zugriff am 07.01.2021
- [Mal01] Maldague, X. P. V.
Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, New York, NY, [u.a.]: Wiley Interscience, 2001
- [Mal94] Maldague, X. P. (Hrsg.)
Infrared metholodogy and technology 7, New York, [u.a.]: Gordon and Breach, 1994
- [May21] May, S.
Wirbelstromsensordaten-Analyse mittels Machine Learning Algorithmen zur Qualitätssicherung an Carbonfasern, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bachelorarbeit, 2021
- [MBC+15] Meola, C.; Boccardi, S.; Carlomagno, G; Boffa, N. D.; Monaco, E.; Ricci, F.
Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics, Composite Structures 134 (2015), S. 845–853
- [MC06] Meola, C.; Carlomagno, G. M.
Application of infrared thermography to adhesion science, Journal of Adhesion Science and Technology 20 (2006), H. 7, S. 589–632
- [Meo12] Meola, C.
Infrared thermography - recent advances and future trends, Oak Park, Ill.: Bentham Science Publishers, 2012
- [MF09] Menana, H.; Feliachi, M.
3-D Eddy Current Computation in Carbon-Fiber Reinforced Composites, IEEE Transactions on Magnetics 45 (2009), H. 3, S. 1008–1011

- [MF11] Menana, H.; Féliachi, M.
Electromagnetic characterization of the CFRPs anisotropic conductivity, The European Physical Journal Applied Physics 53 (2011), H. 2
- [MG21] Margraf, A.; Geinitz, S.
AirCarbon III - Entwicklung einer luftfahrt-spezifischen Carbonfaser mit zugehörigen Halbzeugen, Augsburg, 2021, URL: https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/referenzprojekte/aircarbon_entwicklung_luftfahrtspezifische_carbonfaser.html, Zugriff am 17.11.2021
- [MHB+20] Margraf, A.; Hähner, J.; Braml, P.; Geinitz, S.
Towards Self-adaptive Defect Classification in Industrial Monitoring
In: Hammoudi, S.; Quix, C.; Bernardino, J.: DATA 2020: proceedings of the 9th International Conference on Data Science, Technology and Applications, Lieusaint - Paris, France, July 7th - 9th, Setubal (Portugal): SCITEPRESS - Science and Technology Publications Lda, 2020, S. 318–327
- [MHM+14] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.
Menges Werkstoffkunde Kunststoffe, 1. Aufl., München: Hanser, 2014
- [Mic10] Michaeli, W.
Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6. Aufl., München: Hanser, 2010
- [MKL97] Mook, G.; Köser, O.; Lange, R.
Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre-Reinforced Structures using High Frequency Eddy Current Methods
In: Shiota, I.; Miyamoto, Y.: Functionally graded materials 1996: proceedings of the 4th International Symposium on Functionally Graded Materials, Tsukuba (Japan), October 21st - 24th 1996, Amsterdam, Oxford, [u.a.]: Elsevier, 1996, S. 433–438
- [MKN13] Miyahara, K.; Kagitani, K.; Nakajima, H.
Running yarn line inspection method and carbon fibre manufacturing method using thereof, Europäisches Patent EP 2 159 182 B1. Veröffentlichungsdatum 17. Juli .2013
- [ML13] Müller, R. M.; Lenz, H.
Business Intelligence, Berlin: Springer Vieweg, 2013
- [MLK01] Mook, G.; Lange, R.; Köser, O.
Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents, Composites Science and Technology 61 (2001), H. 6, S. 865–873

- [MM14] Mook, G.; Michel, F.
Detektion und Interpretation von Wirbelstromsignalen in mehrlagigen Strukturen
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Potsdam, 26. - 28. Mai 2014, Berlin: DGZfP, 2014
- [MMS08] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.
Wirbelstrom-Sensorarrays für den Blick unter die Oberfläche
In: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH (Hrsg.): 10. Kolloquium "Werkstoff- und Bauteilprüfung in der Schweißtechnik", Halle (Saale), 1. Oktober, 2008, S. 63–68
- [MMT+15] Mizukami, K.; Mizutani, Y.; Todoroki, A.; Suzuki, Y.
Analytical solutions to eddy current in carbon fiber-reinforced composites induced by line current, Advanced Composite Materials 25 (2015), H. 4, S. 385–401
- [Moo01] Mook, G.
Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Berlin, 21. - 23. Mai, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2001
- [Moo07] Mook, G.
Die Wirbelstromprüfung "spielend" erlernen!, ZfP-Zeitung 103 (2007), H. 6, S. 35–38
- [Moo15] Mook, G.
Wirbelstromprüfung von CFK
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Seminar des FA Oberflächenrissprüfung: Klassische Anwendungen und neue Techniken; Erfahrungen von Anwendern und Herstellern, Kassel, 14. - 15. Oktober, Berlin: DGZfP, 2015
- [Mor05] Morgan, P.
Carbon fibers and their composites, Boca Raton: Taylor & Francis, 2005

- [MPM+11] Mook, G.; Pohl, J.; Michel, F.; Simonin, J.
Hochauflösende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung, Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukrain "Kyiv Polytechnic Institute" 61 (2011), H. 1, S. 11–17
- [MR17] Mathis, W.; Reibiger, A.
Küpfmüller Theoretische Elektrotechnik - Elektromagnetische Felder, Schaltungen und elektronische Bauelemente, 20. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017
- [MS10] Mook, G.; Simonin, J.
Wirbelstromarrays für hohe Bildschärfe - DGZfP Jahrestagung 2010 - Poster 24

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Erfurt, 10. - 12. Mai, Berlin, Bad Breisig: NDT.net, 2010
- [MSE+17] Margraf, A.; Stein, A.; Engstler, L.; Geinitz, S.; Hahner, J.
An Evolutionary Learning Approach to Self-configuring Image Pipelines in the Context of Carbon Fiber Fault Detection

In: Chen, X.; Luo, B.; Luo, F.; Palade, V.; Wani, M. A.: 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA) 2017, Cancun (Mexico), December 18th - 21st: IEEE, 2017, S. 147–154
- [Mül11] Müllner, D.
Modern hierarchical, agglomerative clustering algorithms, Ithaca, NJ: arXiv, 2011, URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwiH3d3hrL72AhXCOuwKHQQIBjUQFnoE-CAcQAQ&url=https%3A%2F%2Farxiv.org%2Fpdf%2F1109.2378&usg=AOvVaw1zE4_tJ2csOCoxuf0TQD20, Zugriff am 11.03.2022
- [Mur13] Murphy, K. P.
Machine learning - A probabilistic perspective, 4th Ed., Cambridge, Mass.: MIT Press, 2013
- [NK95] Nanjyo, A.; Kojima, A.
Method and apparatus for the nondestructive determination of torsional break-age torque of tubular carbon fiber reinforced composite materials, US-amerikanisches Patent US 5,438,262 A. Veröffentlichungsdatum 1. August 1995

- [NMB14] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.
Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2. Aufl., München: Hanser, 2014
- [NSC+19] Nataliia, M.; Schulze, M.; Chen, L.; Patsora, I.; Heuer, H.
Multi-Sensor High-Frequency Eddy Current Depth Detection in Carbon Fiber Re-inforced Polymers

In: IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineer (Hrsg.): 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw (Poland), Mai 15th - 19th, Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 1–6
- [OOK14] Ostertagová, E.; Ostertag, O.; Kováč, J.
Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test, Applied Mechanics and Materials 611 (2014), S. 115–120
- [Ost13] Oster, R.
Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen - Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis: 1. Fachseminar, München, 6. März, Berlin, Bad Breisig: NDT.net, 2013
- [Ows76] Owston, C. N.
Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced epoxy resins, Materials Evaluation 43 (1976), H. November, S. 237-244, 250
- [OZ96] Oberhofer, W.; Zimmer, T.
Wie künstliche neuronale Netze lernen: Ein Blick in die Black Box der Backpropagation Netzwerke, Regensburg, 1996
- [Par16] Parthier, R.
Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik, 8. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [Par18] Park, S.-J.
Carbon Fibers 210, 2nd Ed., Singapore: Springer Singapore, 2018
- [Per12] Perterer, M.
Schadensidentifikation und -bewertung von CFK-Bauteilen mittels phasenmodulierter Thermographie, München, Technische Universität München, Dissertation, 2012

- [Per22] Perlon GmbH
Protuktinformation / QauliFil Range Antistatisches Monofilament AntiStat, 2022, URL: https://www.perlon.com/wp-content/uploads/2022/07/PER_PB_AntiStat_de_062022.pdf, Zugriff am 20.07.2022
- [PHM+13] Pooch, M.; Heuer, H.; Meyendorf, N.; Schulze, M.
Industrialisierung der bildgebenden Wirbelstrommethode zur Prüfung von koh-lenstofffaserbasierten Werkstoffen

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung - DGZfP-Jahrestagung 2013 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Dresden, 6. - 8. Mai, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2013
- [PHM+18] Pradeep, K.; Haralakere P., C.; Mohan, M.; Ramasubbu, S.; Ammanagi, S.
Integrated system and method for in-situ 3-axis scanning and detecting defects in object under static and cyclic testing, Internationale Erfindungsmeldung WO 2018/002871 A1WO 2018/002871 A1. Veröffentlichungsdatum 4. Januar 2018
- [Pil20] Pilon, J.
Analyse der Messdaten eines Wirbelstromsensors für die Qualitätssicherung an Carbonfaserrovings mittels künstlicher Intelligenz, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bachelorarbeit, 2020
- [PL11] Ponn, J.; Lindemann, U. (Hrsg.)
Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2011
- [Pra76] Prakash, R.
Fibre Volume Fraction Measurement by Eddy-Current Technique

In: ISTAM - Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics (Hrsg.): Proceedings of the 21st Congress of Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics, Bangalore (India), 1976, S. 250–255
- [Pro22] Prorok, Stefan
Statistische Unsicherheit in der industriellen Produktion - Grundlagen und Methoden der modernen Qualitätssicherung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022

- [PW96] Pratap, B.; Weldon, W.
Eddy currents in anisotropic composites applied to pulsed machinery, IEEE Transactions on Magnetics 32 (1996), H. 2, S. 437–444
- [QSG16] Quadflieg, T.; Stolyarov, O.; Gries, T.
Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 51 (2016), H. 7, S. 482–492
- [Rao11] Rao, B. P. C.
Eddy-Current Testing: Basics, Journal of Non Destructive Testing & Evaluation 10 (2011), H. 3, S. 7–16
- [RBB+20] Rawal, P.; Brillinger, C.; Böhlmann, C.; Hintze, W.
Sensor based online quality monitoring system for detection of milling defects on CFRP structures, CEAS Aeronautical Journal 11 (2020), H. 2, S. 565–574
- [RBG06] Ramakers, R.; Besen, A.; Gries, T.
Konstruktionskatalog Sensortechnologie für die Online-Überwachung von Produktionsprozessen, Aachen: Shaker, 2006
- [RM17] Raschka, S.; Mirjalili, V.
Machine Learning mit Python und Scikit-learn und TensorFlow - Das umfassende Praxis-Handbuch für Data Science, Deep Learning und Predictive Analytics, 2. Aufl., Frechen: mitp, 2017
- [Rod00] Rodewald, A.
Elektromagnetische Verträglichkeit: Grundlagen - Praxis, 2. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2000
- [RS21] Rau, K.-H.; Schuster, T.
Agile objektorientierte Software-Entwicklung - Schritt für Schritt vom Geschäftsprozess zum Java-Programm, 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- [Ruo05] Ruosi, A.
Nondestructive detection of damage in carbon fibre composites by SQUID magnetometry, Physica Status Solidi (C) - Current Topics in Solid State Physics 2 (2005), H. 5, S. 1533–1555

- [SAD+20] Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R.; Krüger, A.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Industrie 4.0 Maturity Index - Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten, Update 2020, München, Berlin, Brüssel: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2020
- [SAE22] SAERTEX GmbH & Co. KG
Weltweit führend. Mit Verbundstoffen im Leichtbau: SAERTEX® Gelege aus Glas-, Carbon- & Aramidfasern - Multi-axiale und Kernmaterialien für Composite Bauteile, URL: <https://www.saertex.com/de>, Zugriff am 21.04.2022
- [San10] Sander, J.
Density-Based Clustering,

In: In Sammut, C.; Webb, G. I.: Encyclopedia of Machine Learning. - Boston: Springer US, 2010
- [Sau19a] Saurer Intelligent Technology AG
Monitoring Excellence: Fibrevision Fraycam 2, Arbon, 2019, URL: <https://saurer.com/de/komponenten/fibrevision/online-ueberwachungssysteme/fraycam-2#>, Zugriff am 14.10.2021
- [Sau19b] Saurer Intelligent Technology AG
The standard for broken filament monitoring: Fibrevision Fraytec FV2, Arbon, 2019, URL: <https://saurer.com/de/komponenten/fibrevision/online-ueberwachungssysteme/fraytec-fv2#>, Zugriff am 14.10.2021
- [Sau20] Sauer, M.
Composites-Marktbericht 2020 - Der globale CF-Markt 2020 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, Berlin: Composites Unitec, 2020
- [SB17] Schuth, M.; Buerakov, W.
Handbuch optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung, München: Hanser, 2017
- [SB18] Schawel, C.; Billing, F.
Top 100 Management Tools - Das wichtigste Buch eines Managers Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung, 6. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [SBD+19] Steeb, S.; Basler, G.; Deutsch, V.; Gauss, G.; Griesse, A.; Güttinger, T. W.; Kolb, K.; Schur, F.; Staib, W.; Stein, W.; Vogt, M.; Wezel, H.
Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung: Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick, 5. Aufl., Tübingen: expert, 2019

- [SBT04] Staszewski, W. J.; Boller, C.; Tomlinson, G. R.
Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing, 1st Ed., Chichester: Wiley, 2004
- [Sch07] Schürmann, H.
Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007
- [Sch12] Schulze, M.
Wirbelstromflächensensor, Deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2010 048 917 A1. Veröffentlichungsdatum 12. April 2012
- [Sch15a] Schiebold, K.
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung und Prüfpraxis, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015
- [Sch15b] Schiebold, K.
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Sichtprüfung, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015
- [Sch15c] Schiebold, K.
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015
- [Sch15d] Schmitt, R.
Basiswissen Qualitätsmanagement, Düsseldorf: Symposion Publishing, 2015
- [Sch17] Schrapp, M.
Multimodale Datenfusion in der industriellen Röntgen-Computertomographie, ZfP-Zeitung 157 (2017), H. Dezember, S. 38–42
- [Sch18] Scholz, R.
Grundlagen der Elektrotechnik: Eine Einführung in die Gleich- und Wechselstromtechnik, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018
- [Sch92] Schmiedel, H. (Hrsg.)
Handbuch der Kunststoffprüfung, München, Wien: Hanser, 1992
- [SCK+97] Schneider, M.; Clermont, H.; Kozik, C.; Knein-Linz, R.; Müllen, A.; Wulfhorst, B.
Laseroptischer Filamentbruchdetektor, Band- und Flechtindustrie 34 (1997), H. 4, S. 100, 102, 104, 106

- [SD08] Schmitt, R.; Damm, B. E.
Prüfen und Messen im Takt, QZ Qualität und Zuverlässigkeit 53 (2008), H. 9, S. 57–59
- [SGH+11] Schulze, M.; Goldbach, S.; Heuer, H.; Meyendorf, N.
Ein Methodenvergleich – ZfP an Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels wirbelstrom- und ultraschallbasierender Prüfverfahren

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): DGZfP-Jahrestagung 2011 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Bremen, 30. Mai bis 1. Juni 2011, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2011
- [She30] Shewhart, W. A.
Economic Quality Control of Manufactured Product 1, Bell System Technical Journal 9 (1930), H. 2, S. 364–389
- [SHK+10] Schulze, M. H.; Heuer, H.; Küttner, M.; Meyendorf, N.
High-resolution eddy current sensor system for quality assessment of carbon fi-ber materials, Microsystem Technologies 16 (2010), H. 5, S. 791–797
- [Sie10] Siemer, U.
Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie: Entwicklung einer Ingenieurplattform, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2010
- [SKH+09] Schulze, M.; Küttner, M.; Heuer, H.; Meyendorf, N.
Mehrfrequenz-Wirbelstromprüfverfahren zur Qualitätskontrolle bei der Produktion von Kohlefaser-Multiaxialgelegten

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung - DGZfP-Jahrestagung 2009 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Münster, 18. bis 20 Mai 2009, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2009
- [SKS+01] Schulte, K.; Kupke, M.; Schüler, R.; Joshi, S. B.
Ermittlung der Schädigung in CFK-Platten durch systematische Aufzeichnung der elektrischen Leitfähigkeit

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung - DGZfP-Jahrestagung 2001 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berlin, 21.-23. Mai 2001, Berlin: DGZfP, 2001

- [SL18] Schreiner, M.; Lehmann, F.
Magnetische Streufeldmessung zur Lokalisierung von Spanndrahtbrüche
In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.); BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose 2018, Berlin: DGZfP, 2018
- [SÖG12] Schnabel, A.; Ölscher, M.; Gries, T.
Determination of influences on the spreading results of heavy tows
In: Beckwith, S. W.; Maher, M.; Newaz, G. M.; Reyes-Villanueva, G.: Emerging Opportunities: Materials and Process Solutions, Baltimore, Maryland (USA), May 21st - 24th, Covina: SAMPE, 2012
- [Sou05] Soutis, C.
Fibre reinforced composites in aircraft construction, Progress in Aerospace Sciences 41 (2005), H. 2, S. 143–151
- [SP15] Schmitt, R.; Pfeifer, T.
Qualitätsmanagement: Strategien - Methoden - Techniken, 5. Aufl., München, Wien: Hanser, 2015
- [Spa05] Spaeth, A.
Airbus A380: Der fliegende Gigant aus Europa, Königswinter: Heel, 2005
- [SSP+02] Sauerwein, C.; Simon, M.; Pfeiffer-Schäller, I.; Tomaschko, S.; Klein, F.
Anwendung der 3D-Computertomographie in Entwicklung und Forschung, DGZfP-Jahrestagung 2002 - ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, Weimar, 6. - 8. Mai
- [SSS+22] Schwanemann, P.; Schiebel, P.; Sigolotto, C.; Mechelhoff, M.; Feltin, D.; Staaks, B.; Held, R.
Poster-Vortrag: Implementing a multi-material window frame
In: DGM - Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (Hrsg.): 23. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde - Verbund 2022, Loeben, online, 20. - 22. Juli, 2022
- [Ste10] Stegemann, D. (Hrsg.)
Der Einsatz von Wirbelströmen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, 1. Aufl., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2010
- [Ste95] Stegemann, D.
Zerstörungsfreie Prüfverfahren: Radiografie und Radioskopie, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 1995

- [Str17] Stry, B.
Workshop: How to Design and Build a Carbon Fibre Line, GoCarbonFibre, München, 10. Oktober 2017
- [SU17] Stopka, U.; Urban, T.
Investition und Finanzierung - Lehr- und Übungsbuch für Bachelor-Studierende, Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2017
- [Sum90] Summerscales, J.
Electrical and magnetic testing

In: In Summerscales, J.: Non-destructive testing of fibre reinforced plastics composites. - London: Elsevier Applied Science, 1990, S. 253–299
- [SUR20] SURAGUS GmbH
Produkte Carbonfaser Prüfung, Dresden, 2020, URL: <https://www.suragus.com/de/produkte/karbonfaser-pruefung/>, Zugriff am 17.06.2021
- [SUR21a] SURAGUS GmbH
Conductive Yarn Testing | Carbon Fiber Tow Monitoring | Metal Fiber Resistivity, Dresden, URL: https://www.suragus.com/media/filer_public/8f/ee/8feee2cc-1065-42c2-8247-b43254cf6a42/flyer_cf_roving_monitor_v10.pdf, Zugriff am 17.06.2021
- [SUR21b] SURAGUS GmbH
Wirbelstrom - Qualitätsprüfung mittels Wirbelstromverfahren, Dresden, URL: <https://www.suragus.com/de/technologie/wirbelstrom/>, Zugriff am 29.03.2021
- [SW21] Schultz, D.; Wong, D. H. F.
Optimierung eines Neuronalen Netz zur Klassifizierung von Schädigungsgraden in der Qualitätssicherung von Carbonfaser Rovings, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Projektarbeit, 2021
- [Swi16] Swiderski, W.
Non-destructive testing of composite materials used in military applications by eddy current thermography method

In: Huckridge, D. A.; Ebert, R.; Lee, S. T.: Electro-optical and infrared systems: technology and applications: Technology and Applications XIII, Edinburgh (UK), September 28th - 29th 2016, Edinburgh (UK), Bellingham, Washington (USA): SPIE, 2016, S. 998705

- [SYH+11] Shinyama, Y.; Yamaji, T.; Hatsukade, Y.; Takai, Y.; Aly-Hassan, M. S.; Nakai, A.; Hamada, H.; Tanaka, S.
Nondestructive evaluation of braided carbon fiber composites with artificial de-fect using HTS-SQUID gradiometer, *Physica C: Superconductivity and its Applications* 471 (2011), H. 21-22, S. 1242–1245
- [Tex21] Textechno H. Stein GmbH & Co. KG
ROVINGTEST, Mönchengladbach, 2019, URL:
<https://www.textechno.com/wp-content/uploads/2019/03/ROVINGTEST.pdf>,
Zugriff am 17.06.2021
- [Thy22] thyssenkrupp Schulte GmbH
Thyssenkrupp - Werkstoffdatenblatt - Warmgewalzter unlegierter Baustahl, Essen, 2022, URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEWj_89vshNX3AhUPhv0HHfYLCtUQFnoE-CACQAQ&url=https%3A%2F%2Fde.materi-als4me.com%2Fmedia%2Fpdf%2F7%2F7d%2F30%2FWerkstoffdatenblatt_zum_Werkstoff_S235JR.pdf&usg=AOvVaw0jnnD88REdI747LUW7M2ds
- [Tim13] Timischl, W.
Angewandte Statistik - Eine Einführung für Biologen und Mediziner, 3. Aufl., Wien: Springer, 2013
- [TKY+95] Tsugio, I.; Kenji, K.; Yasuhiro, A.; Tomohiro, N.
Flaw inspection device for tubular member made of carbon fiber-reinforced plastic, Japanische Erfindungsmeldung JPH 07229875 A. Veröffentlichungsdatum 29. August 1995
- [TMW15] Tipler, P. A.; Mosca, G.; Wagner, J.
Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2015
- [Tom95] Tomohisa, Y.
Fluff inspection device for filament yarn, Japanische Erfindungsmeldung JPH 07300280 A. Veröffentlichungsdatum 14. November 1995
- [TOO+14] Tanaka, F.; Okabe, T.; Okuda, H.; Kinloch, I. A.; Young, R. J.
Factors controlling the strength of carbon fibres in tension, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 57 (2014), S. 88–94

- [TT86] Tatsumi, M.; Tomehachi, M.
Nap detecting method, Japanische Erfindungsmeldung JPS 61114115 A.
Veröffentlichungsdatum 31. Mai 1986
- [USH+10] Ullman, T.; Schmidt, T.; Hofmann, S.; Jemmali, R.
In-line Quality Assurance for the Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced
Air-craft Structures

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.):
International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, November 22nd -
24th 2010, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2010
- [Ust18] Uster Technology AG
Uster® News Bulletin No. 51 - USTER® STATISTICS 2018 – The industry's
quality language enters a new dimension, Uster (Schweiz), 2018, URL:
[https://www.uster.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Ser-
vices/Uster_Statistics/en_USTER_NewsBulletin51_final_WEB_LowRes.pdf](https://www.uster.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Services/Uster_Statistics/en_USTER_NewsBulletin51_final_WEB_LowRes.pdf),
Zugriff am 09.05.2022
- [VDI01] VDI 2519 Blatt 1
Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften, Düsseldorf,
2001
- [VDI13] VDI/VDE 2600 Blatt 1
Prüfprozessmanagement Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnach-
weise von Prüfprozessen, Düsseldorf, 2013
- [VDI19a] VDI 2221 - Blatt 1
Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktent-
wicklung, Düsseldorf, 2019
- [VDI19b] VDI 2221 - Blatt 2
Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller
Pro-duktentwicklungsprozesse, Düsseldorf, 2019
- [VDI98] VDI 2225 - Blatt 3
Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Tecii-
niscii-wirtschaftliche Bewertung, Düsseldorf, 1998

- [VGO+20] Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S. J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, K. J.; Mayorov, N.; Nelson, A. R. J.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, İ.; Feng, Y.; Moore, E. W.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C. R.; Archibald, A. M.; Ribeiro, A. H.; Pedregosa, F.; van Mulbregt, P.
SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python, *Nature methods* 17 (2020), H. 3, S. 261–272
- [VM18] Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.
Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications, 2nd Ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2018
- [Wan12] Wansart, J.
Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO₂-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe: Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung, Wiesbaden: Springer Gabler, 2012
- [Weg81] Wegener, W.
Die beim Verziehen von Fasern und Faserverbänden auftretenden Reibungskräfte, *Textil Praxis intern* 36 (1981), S. 349-357, 747-751
- [Wen15] Wendland, B.
Guidline for the Development of 3D-woven Profiles Produced on Conventional Narrow Weaving Machines, Aachen, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2015
- [WFH11] Witten, I. H.; Frank, E.; Hall, M. A.
Data mining - Practical machine learning tools and techniques, 3rd Ed., Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2011
- [WG92] Wulfhorst, B.; Gries, T.
Die Bedeutung von Oberflächen für das Reibungsverhalten von Garnen, Aachen, Rheinisch-Westf. Hochschule Aachen, Institut für Textiltechnik (ITA), Forschungsbericht: AiF-Forschungsvorhaben Nr. 8154, 1992
- [WKK16] Witten, E.; Kraus, T.; Kühnel, M.
Composites-Marktbericht 2016 - Marktentwicklung, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, Frankfurt a. M., Augsburg, 2016, URL: https://www.avk-tv.de/files/20161128_marktbericht_2016deutsch.pdf, Zugriff am 17.12.2019

- [WS13] Wentzel, D.; Sevostianov, I.
Effect of fiber damage on the overall electrical conductivity of bare carbon fiber strand, *International Journal of Fracture* 183 (2013), H. 2, S. 275–282
- [WZL+20] Wang, B.; Zhong, S.; Lee, T.-L.; Fancey, K. S.; Mi, J.
Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review, *Advances in Mechanical Engineering* 12 (2020), H. 4
- [XJH+17] Xinlin, Q.; Jianbo, S.; Hu, S.; Yishou, W.
Eddy current sensor and method for monitoring layering of carbon fiber compo-site material connection structures, *Chinesische Erfindungsmeldung* CN 107271545 A. Veröffentlichungsdatum 20. Oktober 2017
- [Yas08] Yashan, A.
Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2008
- [YHZ16] Yang, R.; He, Y.; Zhang, H.
Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016), S. 1225–1250
- [YKT+97] Ysochichi, I.; Kenji, K.; Tsugio, I.; Yasuhiro, A.
Inspection of peel defect of carbon fiber reinforced plastic, *Japansiche Erfindungsmeldung* JPH 09072884 A. Veröffentlichungsdatum 18. März 1997
- [YLW+10] Yin, W.; Li, X.; Withers, P. J.; Peyton, A. J.
Non-contact characterization of hybrid aluminium/carbon-fibre-reinforced plastic sheets using multi-frequency eddy-current sensors, *Measurement Science and Technology* 21 (2010), H. 10
- [YPD04] Yin, W.; Peyton, A. J.; Dickinsons, S.
Simultaneous Measurement of Distance and Thickness of a Thin Metal Plate With an Electromagnetic Sensor Using a Simplified Method, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 53 (2004), H. 4, S. 1335–1338
- [YWS+09] Yin, W.; Withers, P. J.; Sharma, U.; Peyton, A. J.
Noncontact Characterization of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics Using Mul-tifrequency Eddy Current Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 58 (2009), H. 3, S. 738–743

- [ZDR+09] Zwoch, S.; Diebel, M.; Reimche, W.; Bach, F.-W.
Entwicklung einer Wirbelstromtechnik zur Nullspaltfindung und Prozessführung von Hochleistungs-Strahl-Schweißverfahren

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung - DGZfP-Jahrestagung 2009 Zerstörungsfreie Materialprüfung, Münster, 18. bis 20 Mai 2009, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2009
- [Zha21] Zhang, H. W.
Entwicklung und Validierung eines Modells zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wirbelstromsignal, Leitfähigkeit und Carbonfaserschädigung, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bachelorarbeit, 2021
- [Zho21] Zhou, R.
Anwendung der künstlichen Intelligenz zur Qualitätssicherung von Kohlenstofffasern auf Basis der Messdaten eines Wirbelstromsensors, Aachen, ITA Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Masterarbeit, 2021
- [ZRD+03] Zweschper, T.; Riegert, G.; Dillenz, A.; Busse, G.
Ultraschallangeregte Thermografie mittels frequenzmodulierter elastischer Wellen

In: DGZfP - Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Thermografie-Kolloquium 2003 [Vorträge], Stuttgart, 25. September 2003, Berlin, Bad Breisig: DGZfP; NDT.net, 2003
- [ZTL+11] Zhu, Y.-K.; Tian, G.-Y.; Lu, R.-S.; Zhang, H.
A review of optical NDT technologies, Sensors 11 (2011), H. 8, S. 7773–7798

16 Verzeichnis Studentischer Arbeiten

- [Ahe21] Ahe, J. von der
Simulation der Impedanzänderung eines Carbonfaser-Rovings in Abhängigkeit unterschiedlicher Schädigungsgrade. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Bachelorarbeit
- [BG20] Bauer, E.; Gisbertz, T.
Theoretische Auslegung und Bewertung einer Messkette für die Inline-Prüfung von Carbonfaser-Rovings mittels der QFD-Methode. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Projektarbeit
- [BGK19] Barth, L.; Grünefeld, P.; Krause, K.
Analyse des Wärmedurchgangs dreidimensionaler Textilien mit Latentwärmespeichern zur Anwendung in hitzeexponierten Umgebungen. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit
- [BJZ19] Bazilyanski, M.; Jonas, T.; Zhou, R.
Identifikation eines geeigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Kohlenstofffasern mittels Literaturrecherche und anschließender Bewertung mithilfe der Methoden „House of Quality“ und „EFQM Excellence Modell“. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit
- [Brun20] Brunke, L.
Entwicklung einer Standard-Mikroplastik-Dispersion für die Validierung verschiedener Filtermedien zur Filtration von textilem Mikroplastik. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Masterarbeit
- [BT18] Borchert, M.; Trendafilov, G.
Entwicklung und Konstruktion eines automatisierten Spließverfahrens. – Aachen, RWTH Aachen University, 2018, Projektarbeit
- [DNP21] Deutz, N.; Nguyen, K.-P.; Plavci, A.
Literaturrecherche und Bewertung mittels Paarweisem Vergleich zum aktuellen Stand der Qualitätssicherung an Carbonfaserrovings. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Projektarbeit
- [DP19] Deglas, J.; Pilon, J.
Literaturrecherche zur Marktverfügbarkeit und aktuellen Anwendungen von Biopolymeren sowie deren spezifischen Eigenschaften im Bereich Textiltechnik. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit
- [DRT19] Deng, J.; Rahnama, F.; Tüpker, P.
Konstruktion eines Nadelkraftsensors für eine Großrundstrickmaschine. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit

- [Egb20] Egbers, K.
Entwicklung eines Prüfstands zur Validierung von Filtermedien für textiles Mikroplastik. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Bachelorarbeit
- [Gla19] Glaubke, M.-I.
Theoretische Betrachtung und experimentelle Validierung eines tribologischen Abrasions- und Reibungsmoduls. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Bachelorarbeit
- [Ham21] Hamdy, Y.
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Wirbelstromsensorik zur Qualitätssicherung an Carbonfasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Bachelorarbeit
- [Hu19] Hu, S.
Literaturrecherche und Bewertung der Anwendung von Sensorsystemen zur Qualitätssicherung an Carbonfasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit
- [Hua19] Huang, D.
Literaturrecherche zur Verwendung von Wirbelstrommessungen an Carbonfasern und Carbonfaserhalbzeugen. – Aachen, RWTH Aachen University, 2019, Projektarbeit
- [Jeg21] Jegatheeswaran, S.
Erstellung einer virtuellen Messkette für die online Qualitätssicherung von Carbonfasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Masterarbeit
- [Köt20] Kötter, D. E.
Entwicklung und Implementierung eines Neuronalen Netzes zur Qualitätssicherung von Carbonfasern auf Basis des Wirbelstromverfahrens. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Bachelorarbeit
- [Lan20] Lanfer, P.
Entwicklung und Implementierung einer Steuerung eines automatisierten Spleißsystems für Strickmaschinen. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Bachelorarbeit
- [Lan22] Lanz, A.:
Gesamtheitliche Analyse eines Wirbelstromsensors zur Qualitätssicherung an Carbonfaserrovings unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. – Aachen, RWTH Aachen University, 2022, Bachelorarbeit
- [Lan22b] Lanfer, P.
Entwicklung eines Digitalisierungskonzeptes für die Prozesskette der Garnherstellung und Umsetzung durch Retrofitting für einen konkreten Anwendungsfall auf einer Spinnmaschine. – Aachen, RWTH Aachen University, 2022, Masterarbeit

- [Lat23] Latasiewicz, P.
Experimentelle Validierung eines Wirbelstromsensors zur Inline-Qualitätssicherung von Carbonfasern in industrieller Umgebung. – Aachen, RWTH Aachen University, 2023, laufende Bachelorarbeit
- [May21] May, S.
Wirbelstromsensordaten-Analyse mittels Machine Learning Algorithmen zur Qualitätssicherung an Carbonfasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Bachelorarbeit
- [MMM21] Marth, C.; Martinez, M.; Mielke, M.
Analyse und Weiterentwicklung von Filtermedien zur Filtration von textilem Mikroplastik. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Projektarbeit
- [Pil20] Pilon, J.
Analyse der Messdaten eines Wirbelstromsensors für die Qualitätssicherung an Carbonfaserrovings mittels künstlicher Intelligenz. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Bachelorarbeit
- [PSU21] Pouresmailieh, A.; Schwalen, T.; Uhrig, P.
Recherche zum Stand der Technik integrierbarer Sensortechnologie und Potenzialanalyse für Fadenführungselemente. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Projektarbeit
- [SF21] Schultz, D.; Fook, D. H.
Optimierung eines Neuronalen Netz zur Klassifizierung von Schädigungsgraden in der Qualitätssicherung von Carbonfaser Rovings. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Projektarbeit
- [Sha20] Shams, N.
Erforschung des Wirkzusammenhangs zwischen Wirbelstrommesssignal und Qualitätsmessgrößen von Kohlenstofffasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Masterarbeit
- [SW20] Smyczek, M.; Wosolsobe, H.
Referenzversuche zu einer neuartigen ta-C-Kombinationsschicht für Strickmaschinenschlossteile mit unbeschichteten und DLC-beschichteten Schlossteilen. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Projektarbeit
- [Wen20] Wen, J.
Literaturrecherche und Vergleich mittels "House of Quality" physikalischer Messprinzipien für die Messung an Carbonfasern. – Aachen, RWTH Aachen University, 2020, Projektarbeit

- [Zha21] Zhang, H. W.
Entwicklung und Validierung eines Modells zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wirbelstromsignal, Leitfähigkeit und Carbonfaserschädigung. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Bachelorarbeit
- [Zho21] Zhou, R.
Anwendung der künstlichen Intelligenz zur Qualitätssicherung von Kohlenstofffasern auf Basis der Messdaten eines Wirbelstromsensors. – Aachen, RWTH Aachen University, 2021, Masterarbeit

17 Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen

17.1 Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog/Digital (-Wandler)
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
CFTP	Carbonfaser-Thermoplast (Hybridgarn)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CT	Computertomografie
Cu	Kupfer
DGL	Differentialgleichung
DLM	Druckluftmodul
EK	Europäische Kommission
EU	Europäische Union
FDM	Fused Deposition Modelling
FEM	Finite-Elemente-Methode
HF	Hochfrequenz
HFWS	Hochfrequenz-Wirbelstrom
HM	High Modulus (Carbon Fibre)
HoQ	House of Quality
HST	High Strength and Tenacity (Carbon Fibre)
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
IP	International Protection
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	Künstliches neuronales Netz
KS-Test	Kolmogoroff-Smirnow-Test
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
MD	Multidirektional
ML	Machine Learning
OEG	Obere Eingriffsgrenze
OEM	Original Equipment Manufacturer

PIV	Particle Image Velocimetry
PTFE	Polytetrafluorethylen
QFD	Quality Function Deployment
QRK	Qualitätsregelkarte
RTM	Resin Transfer Moulding
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPC	Statistical Process Control
SQL	Structured Query Language
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
TFP	Tailored Fibre Placement
TP	Thermoplast
UD	Unidirektional
UD	Undirektional
UEG	Untere Eingriffsgrenze
UT	Ultraschallverfahren (Ultrasonic Testing)
WS	Wirbelstrom
ZfP	Zerstörungsfreies Prüfverfahren

17.2 Formelverzeichnis – Latein

A	Querschnittsfläche der Spule	[mm ²]
a _c	Anzahl eingesparter Chemielaboranten nach Produktionskapazität	[1/kt]
a _p	Anzahl eingesparter Produktionsmitarbeiter nach Produktionskapazität	[1/kt]
$\vec{B}$	Magnetische Flussdichte	[T]
Breite	Breite des CF-Rovings	[mm]
C	Kapazität	[F]
C _{Aus}	Verhinderbare Ausschussrate	[%]
C _{Aus}	Cashflow durch Verminderung von Ausschuss	[€/a]
Center	Laterale Position des CF-Rovings	[mm]
C _{ges}	Gesamter Cashflow	[€/a]
C _{ges,H}	Gesamter Cashflow des CF-Herstellers	[€/a]

$C_{\text{ges,V}}$	Gesamter Cashflow des CF-Verarbeiters	[€/a]
C_{Pers}	Cashflow durch reduzierten Personalaufwand	[€/a]
C_{Rekl}	Cashflow durch Reklamation fehlerhafter Spulen	[€/a]
C_{Spul}	Anteil defekter Spulen	[%]
C_{Still}	Cashflow durch Reduktion der Stillstandzeiten	[€/a]
C_t	Cashflows	[€]
C_{Test}	Verringerung des Bedarfes an Restspulen für Tests	[%]
C_{Test}	Cashflow durch Verminderung der Testspulen	[€/a]
c_W	Spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]
d	Tiefe	[mm]
$\vec{D}$	Elektrische Verschiebungsflussdichte	[C/m ²]
E	Energie	[eV]
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke	[V/m]
f	Frequenz der angelegten Wechselspannung	[Hz]
f_r	Resonanzfrequenz	[Hz]
G_C	Gehalt Chemielaborant	[€/a]
G_i	Gewichtung der Anforderung	[-]
G_P	Gehalt Produktionsmitarbeiter	[€/a]
h	Planck'sches Wirkungsquantum	[Js]
$\vec{H}$	Magnetische Feldstärke	[A/m]
I	Stromstärke	[A]
$\hat{I}$	Stromamplitude	[A]
$I(x)$	Intensität in Abhängigkeit von der durchstrahlten Dicke	[mS/h]
I_0	Investitionsausgabe	[€]
$I_{0,H}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Herstellers	[€]
$I_{0,V}$	Gesamtinvestitionsausgabe des CF-Verarbeiters	[€]
j	Sicherheitsfaktor bei der Auslegung von Faserverbundbauteilen	[-]
$\vec{J}$	Zeitlich veränderliche Stromdichte	[A]
J_0	Wirbelstromdichte auf der Oberfläche	[-]
K_{Prod}	Jährliche Produktionskapazität	[kt/a]

$k_{S,H}$	Investitionskosten je Sensorsystem für den CF-Verarbeiter	[€]
$k_{S,H}$	Investitionskosten je Sensorsystem für den CF-Hersteller	[€]
k_{Still}	Kosten durch Produktionsstillstand Verarbeitungsmenge	[€/t]
$l_{Nenn, CF}$	Nennlänge der produzierten CF	[km/a]
Mag_T	Theoretische Magnitude	[Ω]
M_{CF}	CF-Verarbeitungsmenge	[t/a]
m_{Test}	Gewicht je Restspule	[kg]
n	Anzahl der Beobachtungen abhängiger Variablen	[-]
N	Windungszahl der Spule	[-]
n_A	Anzahl der Anforderungen	[-]
n_S	Stichprobenumfang	[-]
$n_{S,H}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Verarbeiters	[-]
$n_{S,H}$	Anzahl benötigter Sensorsysteme des CF-Herstellers	[-]
n_T	Anzahl parallel produzierter CF-Tows	[-]
OEG	Obere Eingriffsgrenze	[-]
p	Anzahl der unabhängigen Variablen	[-]
p_A	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Automobil-/Industriequalität	[€/kg]
p_C	Durchschnittlicher Verkaufspreis CF	[€/kg]
p_L	Durchschnittlicher Einkaufspreis für CF in Luftfahrtqualität	[€/kg]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$\hat{f}$	Einheitsvektor	[-]
R	Resistanz (Ohm'scher Widerstand)	[Ω]
R^2	Einfaches Bestimmtheitsmaß	[-]
$\bar{R}^2$	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß	[-]
S_1	Seilkraft im Leertrum	[N]
S_2	Seilkraft im Lasttrum	[N]
S_a	Schichten pro Tag	[-]
S_d	Schichtdauer	[h]
SF	Reduktion des materialbedingten Sicherheitsfaktors	[%]
S_i	Summierter Wert der Anforderung	[-]
S_{max}	Maximaler summierter Wert der Anforderungen	[-]

$S_{\min}$	Minimaler summierter Wert der Anforderungen	[-]
T	Amortisationszeit	[a]
T	Temperatur	[°K]
t	Zeit	[s]
T_{Her}	Amortisationszeit des CF-Herstellers	[a]
T_{krit}	Kritische Amortisationszeit	[a]
$\bar{T}_t$	Mittlere Feinheit der produzierten CF-Rovings	[tex]
t_{Prod}	Produktionstage	[d/a]
T_{Ver}	Amortisationszeit des CF-Verarbeiters	[a]
UEG	Untere Eingriffsgrenze	[-]
U_{Gegen}	Induzierte Gegenspannung	[V]
U_{ind}	Induzierte Spannung	[V]
$\hat{U}_T$	Spannungsamplitude der Gesamtspannung	[V]
$\vec{v}_{\text{Abzug}}$	Abzugsgeschwindigkeit	[m/min]
V_L	Induktions- oder Gegenspannung im induktiven Schwingkreis	[V]
v_{Prod}	Geschwindigkeit der Produktionslinie	[m/min]
$V_{\text{Prüf,H}}$	Prüfvolumen der Tows durch Sensoren für CF-Hersteller	[%]
V_R	Widerstandsspannung im induktiven Schwingkreis	[V]
V_T	Gesamtspannung im induktiven Schwingkreis	[V]
V_{Test}	Testvolumen der Spulen in Abhängigkeit von der Produktionskapazität	[1/t]
W	Impulsbreite	[m]
X	Reaktanz (kapazitiv/induktiver Widerstand)	[Ω]
x, y, z	Kartesische Koordinaten	[-]
x_A	Anteil Automobil-/Industriequalität	[%]
X_C	Kapazitive Reaktanz	[Ω]
x_{Gehalt}	Mehraufwand für Gehalt	[%]
x_{ip}	Unabhängige Variable	[-]
x_L	Anteil Luft-/Raumfahrtqualität	[%]
X_L	Induktive Reaktanz	[Ω]
$x_{P,\text{Aus}}$	Preisabschlag auf Ausschuss	[%]
$x_{P,\text{Test}}$	Preisabschlag auf Restspulen	[%]

y_a	Auslastung	[%]
Z	Impedanz	[Ω]

17.3 Formelverzeichnis – Griechisch

α	Irrtumswahrscheinlichkeit	[-]
β_B	Regressionskoeffizient der Breite	[-]
β_C	Regressionskoeffizient des Centers	[-]
$\beta_{C,0}$	Interzept des Centers	[-]
β_0	Interzept	[-]
β_i	Regressionskoeffizient	[-]
μ_0	Lage des stabilen Prozesses	[-]
σ_0	Standardabweichung des stabilen Prozesses	[-]
$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator	[-]
δ	Standardeindringtiefe	[mm]
δ_v	Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Verschiebestrome	[mm]
ε	Permittivität	[F/m]
ε	Emissionsgrad	[-]
κ	Wärmeleitfähigkeit	[W/m·K]
λ	Wellenlänge	[m]
μ	Magnetische Permeabilität	[H/m]
μ_0	Magnetische Feldkonstante	[4 π ×10 ⁻⁷ N/A ²]
μ_i	Abhängige Variable	[-]
π	Kreiszahl	[-]
ρ	Korrelationskoeffizient	[-]
σ	Elektrische Leitfähigkeit	[S/m]
φ	Phasenwinkel	[°]
ω	Kreisfrequenz mit $\omega = 2\pi f$	[Hz]
Φ_m	Magnetischer Fluss durch die Spule	[Wb]

18 Anhang B: Basisdaten zur methodischen Bewertung

Anhang B I: Übersicht über die Vor- und Nachteile der Ultraschallprüfung

Vorteile	Erfüllungsgrad
Geringes Sicherheitsrisiko	3
Kurze Prüfzeiten im Bereich 1 s	3
Moderate Kosten von mehreren 10.000 €	2
Vollautomatisierung der Prüfverfahrens möglich	3
Rückwirkungsfreie Prüfung mittels Luftultraschall möglich	3
Fehler in Form und Größe bestimmbar	-
Materialunabhängig einsetzbar	-
Begrenzter Bauraum notwendig	3
Nachteile	Erfüllungsgrad
Filamentbrüche zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht detektierbar → Geringe Auflösung, bedingt durch Struktur der CF	1
Hoher Schulungsaufwand des Prüfers notwendig → keine Vollautomatisierung der Auswertung möglich	1
Schlechte Schallleitfähigkeit der CF	-

Anhang B II: Übersicht über die Vor- und Nachteile der Wirbelstromverfahren

Vorteile	Erfüllungsgrad
Geringes Sicherheitsrisiko	3
Echtzeitmessung möglich	3
Moderate Kosten von 20.000 €	2
Rückwirkungsfreie Prüfung möglich	3
Begrenzter Bauraum notwendig	3
Filamentbrüche detektierbar	3
Vollautomatisierung der Prüfung und Auswertung möglich	3
Tiefeninformation für CF Rovings gegeben	3
Nachteile	Erfüllungsgrad
Komplexes Messsignal und Abhängigkeit verschiedenster Einflüsse erfordert hohes Maß an Know-how	-
Nur für leitfähige Werkstoffe geeignet	-

Anhang B III: Übersicht über die Vor- und Nachteile der radiografischen Prüfverfahren

Vorteile	Erfüllungsgrad
Echtzeit-Messung möglich	3
Filamentbrüche detektierbar	3
Sehr präzise Messungen möglich	-
Für eine Vielzahl von Werkstoffen geeignet (Metall, Kunststoff, Textilien, ...)	-
Gammastrahlung führt zu guten Kontrasten bei FVK	-
Vollautomatisierung des Prüfverfahrens möglich	3
Größe der Defekte prinzipiell bestimmbar	-
Nachteile	Erfüllungsgrad
Hohes Sicherheitsrisiko → radioaktive Strahlung	1
Hohe Verbrauchs- sowie Anschaffungskosten im Bereich von 100.000 €	1
Aufgrund der Strahlenbelastung nicht zu 100 % rückwirkungsfrei	1
Defektgröße bei Überlagerung von Defekten nicht bestimmbar	-
Keine Tiefeninformation über Lage des Defekts	-
Hoher Schulungsaufwand des Prüfers → keine Vollautomatisierung der Auswertung möglich	1
Großer Bauraum notwendig	1

Anhang B IV: Übersicht über die Vor- und Nachteile der Thermografieprüfung

Vorteile	Erfüllungsgrad
Geringes Sicherheitsrisiko	3
Geringe Kosten	3
Begrenzter Bauraum notwendig	3
Fehler in Form und Größe bestimmbar	-
Fehlerdetektion bis zu einer Tiefe von 5 – 8 mm möglich	-
100 % rückwirkungsfrei	3
Vollautomatisierung des Prüfverfahrens möglich	3
Nachteile	Erfüllungsgrad
Prüfdauer im Bereich < 1 s bis wenige Minuten	2
Filamentbrüche zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum detektierbar	1
Hoher Schulungsaufwand des Prüfers notwendig → keine Vollautomatisierung der Auswertung möglich	1
Emissionsgrad von CF-Rovings kann nur angenähert werden	-

Anhang B V: Paarweiser Vergleich zur Berechnung der Gewichtungen G_i

Kriterien	Kriterien					Summe	Gewichtung G_i	
	Anzahl Cluster variabel	Skalierbarkeit	Cluster beliebiger Form	Kompensation Ausreißer	Rechenaufwand			
	Anzahl Cluster variabel	2	2	2	2	8	6,0	
	Skalierbarkeit	0	2	2	2	6	4,6	
	Cluster beliebiger Form	0	0	1	1	2	1,7	
	Kompensation Ausreißer	0	0	1	2	3	2,4	
	Rechenaufwand	0	0	1	0	1	1,0	

Anhang B VI: Nutzwertanalyse zur Auswahl eines Cluster-Algorithmus

	Gewichtung G_i	Cluster-Algorithmen							
		partitio- nierend		hierar- chisch		dichte- basiert		gitter- basiert	
		Erfüllungs- grad	Nutzwert	Erfüllungs- grad	Nutzwert	Erfüllungs- grad	Nutzwert	Erfüllungs- grad	Nutzwert
Anzahl Cluster variabel	6,0	0%	0,0	100%	6,0	100%	6,0	100%	6,0
Skalierbarkeit	4,6	25%	1,1	75%	3,4	25%	1,1	25%	1,1
Cluster beliebiger Form	1,7	75%	1,3	75%	1,3	100%	1,7	75%	1,3
Kompensation Ausreißer	2,4	25%	0,6	25%	0,6	100%	2,4	50%	1,2
geringer Rechenaufwand	1,0	100%	1,0	75%	0,8	25%	0,3	75%	0,8
Summe		4,0		12,1		11,5		10,4	

Anhang B VII: Nutzwertanalyse der verschiedenen Auswertungsmethoden

	Gewichtung Gi	Auswertungsmethode					
		KNN		Cluster-Analyse		Qualitätsregelkarte	
		Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert
Vorhersagegenauigkeit	8	75%	6,0	50%	4,0	100%	8,0
Darstellung zeitlicher Verlauf	7	100%	7,0	0%	0,0	100%	7,0
Interpretationsaufwand	4	50%	2,0	0%	0,0	100%	4,0
Auswertungsgeschwindigkeit	4	25%	1,0	50%	2,0	100%	4,0
Mehrdimensionale Datenauswertung	4	100%	4,0	50%	2,0	0%	0,0
Lernfähigkeit und Aktualisierbarkeit	1	100%	1,0	50%	0,5	0%	0,0
Programmieraufwand	1	25%	0,3	50%	0,5	100%	1,0
Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	1	0%	0,0	100%	1,0	100%	1,0
Summe		21,3		10,0		25,0	

19 Anhang C: Versuchsparameter

Anhang C I: Versuchsparameter der Datensätze der Regressionsanalyse

Versuchsparameter	Ausprägung
CF-Roving	Tenax HTS45 E34
Eingebrachte Schädigungsgrade	0°/45°/90°
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	10 min
Wiederholversuche pro Versuchspunkt	1
Gesamtanzahl der Versuche	3
Insgesamt vermessene Roving-Länge	180 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 Hz
Gesamtanzahl der Messpunkte	3.600
Versuchszeitraum	1 d (14.01.2022)
Raumtemperatur	22,7 °C
Luftfeuchtigkeit	22,1 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar

Anhang C II: Versuchsparameter der Validierungsdatensätze der Regressionsanalyse

Versuchsparameter	Ausprägung
CF-Roving	Tenax HTS45 E34
Eingebrachte Schädigungsgrade	0°/45°/90°
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	30 min
Wiederholversuche pro Versuchspunkt	2
Gesamtanzahl der Versuche	2
Insgesamt vermessene Roving-Länge	360 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 Hz
Gesamtanzahl der Messpunkte	7.200
Versuchszeitraum	1 d (14.01.2022)
Raumtemperatur	22,7 °C
Luftfeuchtigkeit	22,1 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar

Anhang C III: Versuchsparameter der Trainingsdatensätze

Versuchsparameter	Ausprägung
CF-Roving	Tenax HTS40 F13
Eingebrachte Schädigungsgrade	0°/45°/90°
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	300 s
Wiederholversuche pro Versuchspunkt	5
Gesamtanzahl der Versuche	15
Insgesamt vermessene Roving-Länge	450 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	1 fps/1 Hz
Gesamtanzahl der Messpunkte	4500
Versuchszeitraum	1 d (10. Juni 2021)
Raumtemperatur	22,2 °C
Luftfeuchtigkeit	45,5 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar

Anhang C IV: Versuchsparameter der Validierungsdatensätze

Versuchsparameter	Ausprägung
CF-Roving	Tenax HTS40 F13
Eingebrachte Schädigungsgrade	keine
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	10.800 s
Gesamtanzahl der Versuche	2
Insgesamt vermessene Roving-Länge	2160 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 fps/2 Hz
Gesamtanzahl der Messpunkte	43.200
Versuchszeitraum	1 d (14. Juli 2021)
Raumtemperatur	22,9 °C
Luftfeuchtigkeit	46,7 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar

Anhang C V: Versuchsparameter der HTS40 F13-Widerstandsmessung

Versuchsparameter	Ausprägung
Multimodales Messsystem	
CF-Roving	Tenax HTS40 F13
Eingebrachte Schädigungsgrade	0°/45°/90°
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	4 min 40 s
Wiederhohlversuche pro Versuchspunkt	5
Gesamtanzahl der Versuche	15
Insgesamt vermessene Roving-Länge	420 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 Hz
Versuchszeitraum	1 d (12.08.2021)
Raumtemperatur	23,5 °C
Luftfeuchtigkeit	43,4 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar
Vierleiter-Widerstandsmessung	
Frequenz der angelegten Wechselspannung	1 kHz
Amplitude der angelegten Wechselspannung	10 V
Shunt-Widerstand	9,9 Ω
Frequenz der Datenaufnahme / Datenrate	10 kHz

Anhang C VI: Versuchsparameter der HTS45 E23-Widerstandsmessung

Versuchsparameter	Ausprägung
Multimodales Messsystem	
CF-Roving	Tenax HTS45 E23
Eingebrachte Schädigungsgrade	0°/45°/90°
Abzugsgeschwindigkeit	6 m/min = 0,1 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	4 min 40 s
Wiederhohlversuche pro Versuchspunkt	5
Gesamtanzahl der Versuche	15
Insgesamt vermessene Roving-Länge	420 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 Hz
Versuchszeitraum	1 d (09.08.2021)
Raumtemperatur	22,3 °C
Luftfeuchtigkeit	46,2 %
Eingangsdruck des DLM	6 bar
Vierleiter-Widerstandsmessung	
Frequenz der angelegten Wechselspannung	1 kHz
Amplitude der angelegten Wechselspannung	10 V
Shunt-Widerstand	9,9 Ω
Frequenz der Datenaufnahme / Datenrate	5 kHz

Anhang C VII: Versuchsparameter der Feldversuche der Fa. SAERTEX nach [Lat23]

Versuchsparameter	Ausprägung
CF-Roving	Toray T620 SC 1200 – 50C
Abzugsgeschwindigkeit	8 m/min = 0,13 m/s
Versuchsdauer pro Versuchspunkt	ca. 3 h
Geprüfte Spulen	3
Messungen pro Spule	2
Gesamtanzahl der Versuche	6
Insgesamt vermessene Roving-Länge	ca. 7.800 m
Frequenz der Datenaufnahme/Datenrate	2 Hz
Gesamtanzahl der Datensätze	ca. 130.000
Gesamtanzahl der Messwerte	ca. 1.000.000
Versuchszeitraum	ca. 2 Monate (21.6. – 17.8.2022)
Raumtemperatur	21 °C
Luftfeuchtigkeit	50 – 60 %

20 Anhang D: Zusätzliche Informationen

Anhang D I: Anforderungsliste an ein geeignetes ZfP

Anforderung	Forderung	Wunsch
Prüfziel		
Detektion von Faserschädigung (Filamentbrüchen)	X	
Tiefeninformation (Detektion von innenliegenden Fehlern)	X	
Inline-Messung möglich	X	
100 %-Prüfung möglich	X	
Zerstörungsfrei	X	
Rückwirkungsfreiheit der Messung auf die CF muss gewährleistet sein	X	
Auflösung von Fehlern im Bereich < 1 mm		X
Geometrie		
Messbereich ausreichend für CF-Rovingbreite 1 mm – 15 mm, abhängig von Fasertyp und Filamentanzahl (1 k – 50 k)	X	
Minimaler Bauraum für Implementierung CF-Herstellung und -Verarbeitung	X	
Kinematik		
Geschwindigkeit 1 – 50 m/min	X	
Stabile Fadenführung für die Einbaustellen erwartet/vorausgesetzt		X
Kräfte		
Fadenspannung 50 cN - 800cN	X	
Vibrationsfest (bei Fixierung an Maschine)	X	
Energie		
Temperatur: Raumtemperatur		X
Luftfeuchte: bis 75 % rel. Feuchte		X
Stoff		
Faserflug und CF-Staub dürfen keinen Einfluss auf Messung haben	X	
Signal		
Streueinflüsse im Messsignal durch Oberflächenanomalien (Fluff, Breiten- oder Dickenschwankung) dürfen nicht zu Fehlinterpretation führen	X	
Messsignal unabhängig von CF-Typ		X
Echtzeitmessung möglich	X	
Längenkoordinate/Laufmeter im Produkt/auf der Spule aufnehmbar		X

Anforderung	Forderung	Wunsch
Robuste Funktionsweise (keine Fehlmessungen)		X
Meldung von Fehlfunktion/unüblichen Messwerten	X	
Keine sensorinterne Datenspeicherung notwendig		X
Sicherheit		
Geschlossenes Sensorsystem	X	
Kein Sicherheitsrisiko für Bediener	X	
100 %ige Rückwirkungsfreiheit auf CF		X
Eindringen von CF-Staub oder Filamenten zu verhindern (Kurzschlussrisiko durch leitfähige CF) → IP65-Schutzklasse oder höher	X	
Möglichst geringes Sicherheitsrisiko für Mitarbeiter (durch radioaktive Strahlung, Streulicht von Lasern etc.)		X
Ergonomie		
Leichtes und kompaktes Sensorsystem → verschiedene Einsatzpunkte entlang der Prozesskette leicht zu realisieren		X
Fertigung		
Möglichst geringe Beeinflussung des Fasermaterials durch Sensor (Umlenkungen etc.)	X	
Leicht zu reinigen (entsprechende Oberflächen oder automatisierte Reinigung vorsehen)		X
Montage		
Leicht zu montieren/demontieren		X
Sensorsystem einfach in verschiedenen Prozessstufen implementierbar (Aufsicht, Durchlaufsensor, klappbar, ...)		X
Gebrauch		
Vollautomatisierte Prüfung und Auswertung möglich	X	
Einfach zu interpretierender Wert je Zeiteinheit (z.B. alle 5 s) → resultierende Datenrate 0,1 - 10 Hz		X
Rückkopplung mit Prozess (Steuerung/Regelung)		X
Anbindung an Datenbank		X
Steuerung und Regelmöglichkeiten über digitale Input-/Output-Signale möglich	X	
Instandhaltung		
Ablagerung von CF-Staub/abgebrochenen Filamenten verhindern/entfernen, um das Messsignal nicht zu verfälschen → keine externe Instandhaltung notwendig	X	
Kosten		
Kosten so gering wie möglich, um Markteintrittsbarriere zu senken und die Marktakzeptanz zu erhöhen	X	
Zielkostenbereich ~ 1.000 EUR		X

Anhang D II: Erzielbare Klassifizierungsgenauigkeiten bei Variation der Hyperparameter [SW21]

Hyperparameter			Genauigkeit im Test Set	
Fehlerfunktion	Optimizer	Aktivierungsfkt.	MW	Max
MSE	SGD	Sigmoid	78 %	88 %
		ReLU	72 %	85 %
		Tanh	81 %	85 %
	Adam	Sigmoid	85 %	92 %
		ReLU	76 %	81 %
		Tanh	82 %	85 %
Crossentropie	SGD	Sigmoid	83 %	85 %
		ReLU	68 %	73 %
		Tanh	79 %	85 %
	Adam	Sigmoid	88 %	92 %
		ReLU	68 %	81 %
		Tanh	83 %	88 %

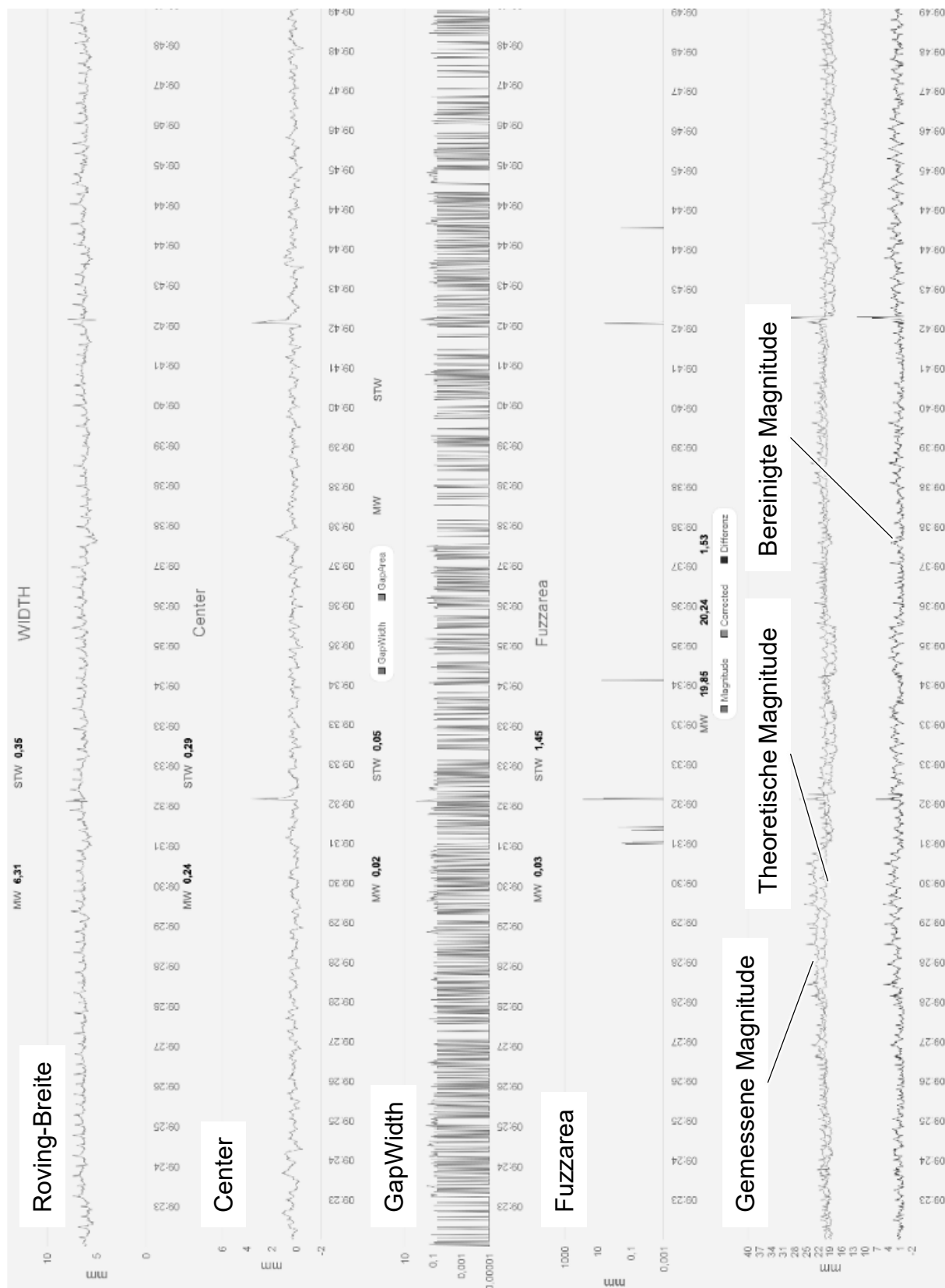
Anhang D III: Erzielbare Klassifizierungsgenauigkeiten bei Variation der Eingabewerte [Zho21]

Eingabewerte	Genauigkeit	
	Min	Max.
Re / Im / Mag _G	75,9 %	85,2 %
Re / Im / Mag _G / Breite	77,5 %	85,2 %
Re / Im / Mag _G / Center	91,7 %	91,7 %
Re / Im / Mag _G / fuzzDist / fuzzArea	79,6 %	90,7 %
Re / Im / Mag _G / gapPos / fuzzArea	81,5 %	88,9 %
Re, / Im / Mag _G / gapPos / fuzzDist	68,5 %	81,5 %
Mag _B	60,0 %	66,7 %
Mag_B / fuzzDist / fuzzArea	67,9 %	83,4 %
Re / Im / Mag _B / fuzzDist / fuzzArea	81,7 %	96,2 %

Anhang D IV: Leitfähigkeiten und Widerstände der verwendeten Werkstoffklassen

Werkstoff- klasse	Werkstoff	Bezeichnung	Leitfähigkeit	Widerstand
Metall	Aluminium	AlCu4PbMgMn	18 – 22 MS/m	-
	Messing	CuZn39Pb3	14,6 MS/m	0,068 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
	Stahl	S235JR	6,7 MS/m	0,15 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
CFK	CFK Rundstab	DPP	-	-
		Noname	-	-
Graphit	Graphit- folie	SIGRAFLEX TH, parallel zur Schicht	-	11 $\mu\Omega\text{m}$
		SIGRAFLEX TH, senkrecht zur Schicht	-	700 $\mu\Omega\text{m}$
CF	CF	Tenax HTS40 F13		31,4 Ω/m

Anhang D V: Auszug aus der SQL-Datenbank der Fa. Hightex mit exemplarischen Messschrieb des multimodalen Sensorsystems für reale Produktionsdaten vom 4. Januar 2022



Anhang D VI: Lebenslauf des Autors

A Berufserfahrung

- 1/2012 – heute **Institut für Textiltechnik** (ITA) der RWTH Aachen University:
Bereichsleiter Staple Fibre Technologies
Bereichsleitung | strategische Ausrichtung | Projektkoordination | Spinnerei | Digitalisierung | Nachhaltigkeit | endemische Naturfasern
- 12/2017 – 12/2021 **Institut für Textiltechnik** (ITA) der RWTH Aachen University:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Staple Fibre Technologies:
Promotion | Akquise, Management und Leitung öffentlicher und privatwirtschaftlicher Forschungsprojekte | Lehre | Tribologie
- 10/2016 – 12/2016 **AIIESEC SYSU**, Guangzhou (China):
Sozialpraktikum Green Power Now | Vorträge an High- und Middle-schools | Englischunterricht | Umweltaktivitäten
- 1/2016 – 11/2017 **Institut für Textiltechnik** (ITA) der RWTH Aachen University:
Studentische Hilfskraft in der Abteilung Textilmaschinenenelemente
- 4/2015 – 10/2015 **BMW Group**, Landshut:
Praktikant | Bachelorarbeit | Nasspressen und Textiltechnik | Prüf- und Messtechnik | Prozess- und Prüfprozessfähigkeitsanalyse
- 3/2014 – 3/2015 **Institut für Kunststoffverarbeitung** in Industrie und Handwerk (IKV) der RWTH Aachen University:
Studentische Hilfskraft in der Abteilung Faserverstärkte Werkstoffe

B Ausbildung

- 12/2017 – 2/2023 Promotion an der **RWTH Aachen University**
Dissertation am **Institut für Textiltechnik** (ITA) der RWTH Aachen:
Sensorentwicklung zur Inline-Qualitätsüberwachung von Carbonfaser-Rovings (**magna cum laude**)
- 10/2015 – 8/2017 Masterstudium an der **RWTH Aachen University**
Kunststofftechnik, M.Sc. (**1,5**)

Master Thesis am **Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)**:
Analyse der theoretischen Grundlagen zur Modellbildung des physikalischen Thermoplast-Schaumspritzgießens (**1,0**)
- 10/2011 – 9/2015 Bachelorstudium an der **RWTH Aachen University**, Aachen
Maschinenbau, Berufsfeld Kunststofftechnik, B.Sc. (**2,4**)

Bachelor Thesis bei **BWM Group**, Landshut:
Experimentelle Untersuchung des bildgebenden Wirbelstromverfahrens für 2D Carbonfaserhalbzeuge (**1,0**)
- 1/2011 – 7/2011 **Wehrdienst** im Zentrum für Operative Information, Mayen
Allgemeine Grundausbildung | Militärkraftfahrer | Obergefreiter
- 2001 – 2010 **Gymnasium Korschenbroich**
Allgemeine Hochschulreife (**1,7**)
Leistungskurse: Mathematik, Physik