

Entwicklung eines Verfahrens zur zerstörungsfreien Messung der Faserorientierung in mehrlagigen 3D-Carbonfaserpreforms und CFK mit robotergeführter Hochfrequenz-Wirbelstromprüftechnik

DISSERTATION

Entwicklung eines Verfahrens zur zerstörungsfreien Messung der Faserorientierung in mehrlagigen 3D-Carbonfaserpreforms und CFK mit robotergeführter Hochfrequenz-Wirbelstromprüftechnik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt an der

Fakultät Maschinenwesen der
Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Georg Bardl

geboren am 16. August 1985 in Halle (Saale)

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

Tag der Einreichung: 22. Januar 2018

Tag der Verteidigung: 27. März 2018

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) an der TU Dresden.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Chokri Cherif, Direktor des ITM, für die Betreuung meiner Arbeit und die vielfache wissenschaftliche und persönliche Unterstützung während meiner Tätigkeit am ITM. Von ihm konnte ich lernen, dass es geistige Offenheit, fokussierte Zielstrebigkeit und unerschütterliches Durchhaltevermögen sind, die über den wissenschaftlichen Erfolg entscheiden. Für die anregende und zugleich fordernde wissenschaftliche Atmosphäre am ITM bin ich Prof. Cherif sehr dankbar, ebenso für die vielfache konstruktive Kritik im Verlauf meiner Dissertation.

Auf gleiche Weise bedanke ich mich bei Prof. Niels Modler vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) an der TU Dresden für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Hinweise und Diskussionen zur Arbeit.

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Andreas Nocke, dem Leiter der Forschungsgruppe Mess- und Sensortechnik am ITM, ebenso wie bei meinen Kollegen Reimar Unger, Johannes Wendler, Eric Häntzsche, Moniruddozza Ashir, Hans Winger und Johannes Mersch. Das freundliche, stets unterstützende und tolerante Arbeitsklima hat wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere danke ich für die Unterstützung in den letzten Monaten meiner Promotion, in denen mir meine Kollegen die ein- oder andere Aufgabe abnahmen. Ihnen allen wünsche ich den besten Erfolg mit ihren anstehenden Promotionsvorhaben.

Bei den ersten Schritten in der Roboterprogrammierung wurde ich freundlich unterstützt von Martin Bonkowski, der sein Wissen bereitwillig mit mir teilte. Die gelungenen photographischen Aufnahmen von Proben und Messaufbauten verdanke ich Mirko Krzywon, und Nils Bolk unterstützte und beriet mich vielfach bei der CFK-Herstellung. Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank.

Ebenso danke ich Prof. Henning Heuer, Martin Schulze und Matthias Pooch (Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden) sowie Richard Kupke und Dietmar Kammel (Suragus GmbH, Dresden). Die hier dargelegten Ergebnisse entstanden in einer über mehrere Jahre etablierten Zusammenarbeit zwischen ITM, IKTS und Suragus in der Weiterentwicklung und Anwendung der Hochfrequenz-Wirbelstromprüftechnik. Die Denkanstöße, aber auch die fachlichen Hinweise, die ich in der gemeinsamen Projektarbeit erhalten konnte, haben sehr zu dieser Arbeit beigetragen.

Im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am ITM hatte ich das Glück, die Unterstützung einer Vielzahl von herausragenden Studentinnen und Studenten zu erhalten, die mit ihren Ideen und ihrer Anstrengung, aber auch ihren unermüdlichen wiederholten Anläufen an herausfordernde Aufgaben die hier vorgestellten Ergebnisse wesentlich mitgeprägt haben. Bedanken möchte ich mich insbesondere bei Johannes Mersch (auch für das Korrekturlesen der Arbeit, inzwischen Mitarbeiter am ITM), Gao Daqian, Adnan Maroof Khan, Jan Schubert, Martha Monse, Paula Helming und Erik Schmidt.

Unendlich dankbar bin ich für die Unterstützung meiner langjährigen Partnerin Dr.-Ing. Monireh Fazeli, meiner Familie und meiner Freunde.

Kurzfassung

Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erzielen ihre herausragende Festigkeit und Steifigkeit durch exakte Anpassung der Faserverläufe im Bauteil an die im Einsatz wirkenden Belastungen. Für eine Qualitätskontrolle und eine Optimierung der Fertigungsverfahren ist daher ein Verfahren notwendig, das in der Lage ist, die Faserorientierung in 3D-Preforms (mehrlagigen, drapierten Vorformlingen aus trockenen Carbonfasern) und 3D-CFK zerstörungsfrei zu messen und mit der Soll-Faserorientierung zu vergleichen. Die derzeit für die Faserorientierungsmessung eingesetzten optischen bzw. Röntgen-CT-Verfahren sind hierfür nur beschränkt geeignet, da optische Verfahren auf die oberste Lage und Röntgen-CT-Verfahren auf Kleinproben beschränkt sind.

In dieser Arbeit wird daher ein Verfahren entwickelt, das die Faserorientierung in mehrlagigen 3D-Carbonfaserpreforms und -CFK zerstörungsfrei messen kann. Grundlage hierfür ist die Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung, die eine Darstellung der Verläufe der leitfähigen Carbonfäden in den einzelnen, übereinander gestapelten Lagen des CFK erlaubt. Um hierauf aufbauend eine vollautomatische Faserorientierungsmessung zu schaffen, wird in einem ersten Schritt ein Roboter-Bahnplanungsverfahren zur vollständigen Erfassung komplex geformter 3D-Oberflächen entwickelt. Aus dem erhaltenen 3D-Wirbelstrombild der Oberfläche wird anschließend über einen auf lokaler Abwicklung und Fouriertransformation beruhenden Algorithmus die lokale Faserorientierung in den einzelnen Lagen gemessen und die 3D-Verläufe einzelner Fäden werden rekonstruiert.

Die Messunsicherheit des Verfahrens wird anhand systematischer experimenteller Untersuchungen an 2-, 4-, 6- und 8-lagigen 2D-Gelegetapeln quantifiziert. Untersucht wird hierbei auch der Einfluss der Materialparameter (Gelegetyp) sowie der Messparameter (Spulenanordnung, Spulendurchmesser, Sensororientierung, Messfrequenz) auf die sich ergebende Messunsicherheit, woraus Empfehlungen für die Wahl von Sensor und Messfrequenz abgeleitet werden.

Das entwickelte Messverfahren wird anschließend an zwei 3D-Anwendungsfällen validiert. Als erster Anwendungsfall wird ein vierlagiges, komplex geformtes CFK-Bauteil betrachtet. Es wird gezeigt, wie mithilfe des entwickelten Messverfahrens die Faserorientierung aller vier Lagen zerstörungsfrei erfasst werden kann. Verschiedene Exemplare desselben Bauteils werden hinsichtlich der Faserorientierung verglichen. Anschließend wird im zweiten Anwendungsfall ein automatischer Drapierprozess zu einer Halbkugel betrachtet, bei dem verschiedene, ein-, zwei und vierlagige textile Halbzeuge hinsichtlich der sich ausbildenden Faserorientierung nach der Drapierung verglichen werden, mit dem Ziel, das Verformungsverhalten mehrlagiger Strukturen besser zu verstehen und Empfehlungen für die Halbzeugauswahl abzuleiten.

In einem abschließenden Schritt werden Schnittstellen geschaffen, um die Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess zu integrieren. Zum einen wird durch eine Schnittstelle zur Drapiersimulation ein quantitativer Vergleich zwischen vorausgesagter und Ist-Faserorientierung möglich, zum anderen wird gezeigt, wie die gemessenen Faserorientierungen der Einzellagen direkt zur Parametrierung von Struktursimulationen verwendet werden können. Das entwickelte Verfahren ermöglicht damit eine fundierte Festigkeits- und Steifigkeitsanalyse mit den zerstörungsfrei gemessenen Faserorientierungen nach dem Umformprozess.

Abstract

The superior strength and stiffness of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) results from an exact adaptation of the component's fiber orientation to the external loads during service. Quality control, as well as development and optimization of the production processes, thus require a method to non-destructively measure the fiber orientation in 3D preforms (draped multilayer stacks made of dry carbon fibers) and CFRP. Currently, this fiber orientation measurement is done by optical or X-ray computer tomography methods, which are limited, however to the uppermost, optical visible fabric layer (optical methods) or to small sample sizes (X-ray computer tomography).

Therefore, this thesis develops a method to non-destructively measure the 3D fiber orientation in multi-layer 3D preforms and CFRP. The starting point for this development is the technique of high-frequency eddy current testing, which allows an imaging of the individual carbon yarn courses in multiple stacked textile layers. In order to develop a fully-automated fiber orientation measurement process with this technique, in a first step a robot path planning is developed that allows the complete scanning of a complexly-shaped 3D surface with an eddy current sensor. From the resulting 3D eddy current image of the surface, the local fiber orientation of the individual layers is measured by local development (flattening) of the surface and a Fourier transformation.

The uncertainty of measurement for this method is quantified from experiments with 2-, 4-, 6- and 8-layer 2D non-crimp fabric stacks. The influence of the material parameters (type of fabric) as well as of the measurement parameters (sensor type, coil diameter, sensor orientation, measurement frequency) is evaluated. Recommendations for the choice of sensor and measurement frequency are derived.

The developed measurement method is subsequently validated with two different 3D application cases. As a first application case, a four-layer, complexly-shaped CFRP component is analyzed. It is shown how the developed measurement method can be used to non-destructively measure the fiber orientation of all four layers. Different specimen of the same CFRP component are compared regarding fiber orientation. The second application case is an automated draping process to a hemispherical shape, for which one-, two- and four-layer textile fabrics are compared regarding the fiber orientation after draping, in order to better understand the forming properties of multi-layer structures and derive recommendations for the choice of textile.

In the final step, software interfaces are developed to integrate the fiber orientation measurement into the CFRP design and development process. It is integrated with a draping simulation, to allow a quantitative comparison of the predicted and the measured fiber orientations. Furthermore, it is shown how the measured fiber orientation of the individual fabric layers can be used for the parametrization of finite element structural simulations. The developed measurement method thus lays the base for a substantiated strength and stiffness analysis based on the component's actual as-is fiber orientation after the draping process.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Grenzen bestehender Verfahren zur Faserorientierungsmessung bei der CFK-Herstellung	3
2.1 Entwicklungsstand zur Einstellung der Faserorientierung beim Preforming.....	3
2.2 Anforderungen an die Faserorientierungsmessung	6
2.3 Grenzen bestehender Verfahren für die Faserorientierungsmessung an 3D- Preforms und -CFK	9
3 Stand der Technik zur Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien	17
3.1 Grundlagen der Wirbelstromprüfung	17
3.2 Eindringtiefe	21
3.3 Elektrische Leitfähigkeit von Carbonfasermaterialien	24
3.4 Ausbreitung von Wirbelströmen in Carbonfasermaterialien	28
3.5 Forschungsstand zur Faserorientierungsmessung in Carbonfasermaterialien mit Wirbelstromprüfung	30
3.5.1 Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung	30
3.5.2 Faserorientierungsmessung mit Rotationswirbelstromprüfung	34
3.5.3 Faserwelligkeitsdetektion durch Messung der Sekundärfeldsymmetrie	36
3.6 Forschungsstand zur 3D-Wirbelstromprüfung.....	37
3.7 Forschungsbedarf, Verfahrensauswahl und Zielsetzung.....	38
3.8 Aufbau der Arbeit	39
4 Entwicklung einer Roboter-Bahnplanung zur vollständigen Erfassung einer 3D-Oberfläche 41	
4.1 Abgeleitete Anforderungen aus dem Messprozess	41
4.2 Definition der 3D-Oberfläche als Dreiecksnetz.....	42
4.3 Vollständige Erfassung der Oberfläche	42
4.3.1 Berechnung der Stützpunkte und Startpunkte	42
4.3.2 Bahnplanung für gekrümmte Bauteile	46

4.3.3	Berechnung der Sensororientierung an den Stützpunkten.....	47
4.3.4	Anpassung der Verläufe der Eulerwinkel	47
4.4	Bauteilpositionierung und Robotersimulation	49
4.5	Roboterprogramm für den Wirbelstrom-Prüfvorgang	49
5	Entwicklung einer Faserorientierungsmessung aus 3D-Wirbelstromdaten.....	51
5.1	Methodisches Vorgehen	51
5.2	Vorverarbeitung der 3D-Wirbelstromdaten	51
5.2.1	Verfahren für automatische Phasendrehung	51
5.2.2	Lokale Projektion der Oberfläche	55
5.2.3	Platzierung der Auswertepunkte	56
5.2.4	Hochpassfilter und Glättung	57
5.3	Bildverarbeitungsverfahren zur Orientierungsmessung	58
5.3.1	Auswahl geeigneter Algorithmen	58
5.3.2	Berechnung der Faserorientierungsverteilung mit Fouriertransformation	59
5.3.3	Berechnung der Faserorientierungsverteilung mit Radontransformation	61
5.3.4	Bestimmung der Hauptfaserrichtungen und robuste Zuordnung zu den Fadensystemen	63
5.3.5	Algorithmenvergleich an Referenzbildern	64
5.3.6	Algorithmenvergleich an realen Wirbelstrombildern	68
5.3.7	Algorithmenauswahl und Fazit	69
5.4	Verfahren zur Rekonstruktion der 3D-Fadenverläufe	70
5.5	Berechnung der 3D-Scher- und Faserwinkel.....	72
5.6	Zusammenfassung zur Algorithmenentwicklung.....	73
6	Experimentelle Untersuchung der Messunsicherheit an 2D-Gelegestapeln	75
6.1	Versuchsplanung	75
6.1.1	Einflussfaktoren auf die Abbildung der Carbonfäden im Wirbelstrombild	75
6.1.2	Versuchsplan.....	76
6.2	2D-Wirbelstrommessplatz und untersuchte Sensoren	77
6.3	Untersuchte Gelege	79
6.4	Voruntersuchungen zu Abbildungsverhalten und Wirbelstromausbreitung.....	80
6.4.1	Auflösung der Sensoren	80
6.4.2	Wirbelstromausbreitung in den Gelegen	83
6.5	Untersuchungen zur Messgenauigkeit.....	85
6.5.1	Methodisches Vorgehen.....	85
6.5.2	Einfluss der Spulenanordnung und des Spulendurchmesser	86
6.5.3	Einfluss der Sensororientierung	90
6.5.4	Einfluss der Messfrequenz.....	93
6.5.5	Zusammenfassung und Diskussion der Messunsicherheit.....	94
6.6	Experimentelle Untersuchungen zur Winkelauflösung	97
6.7	Schlussfolgerungen aus den 2D-Untersuchungen	99

7	Verfahrenserprobung an mehrlagigen 3D-Preforms und CFK.....	101
7.1	Versuchsauswahl.....	101
7.2	Faserorientierungsmessung an einem komplexen CFK-Bauteil.....	101
7.2.1	Versuchsbeschreibung.....	101
7.2.2	Wirbelstrombilder	104
7.2.3	Faserorientierungsmessung	106
7.2.4	Standardabweichung bei Variation der Sensororientierung.....	108
7.2.5	Faserorientierungsvergleich für die vier Bauteile	111
7.3	Faserorientierungsmessung beim Drapierprozesses	112
7.3.1	Versuchsbeschreibung.....	112
7.3.2	Verformungsverhalten zweilagiger Halbzeuge	114
7.3.3	Verformungsverhalten vierlagiger Halbzeuge	119
7.3.4	Verformungsverhalten einlagiger Halbzeuge bei ein- und zweilagiger Drapierung.....	121
7.3.5	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen des Drapierprozesses	124
7.4	Zusammenfassung der 3D-Verfahrenserprobung.....	124
8	Integration der Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess	127
8.1	Integration mit Drapiersimulationen	127
8.2	Integration mit FE-Struktursimulationen	131
8.3	Perspektive: Validierung des virtuellen CFK-Entwicklungsprozesses	133
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
	Literaturverzeichnis.....	137

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V.
Biax	Biaxial
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
E-Modul	Elastizitätsmodul
FE	Finite Elemente
FFT	Fast Fourier Transform (schnelle Fouriertransformation)
IKTS	Institut für Keramische Technologien und Systeme Dresden (Fraunhofer Gruppe)
ILK	Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (TU Dresden)
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (TU Dresden)
RTM	Resin-Transfer-Moulding (Harzinjektionsverfahren)
UD	Unidirektional

Symbole

Vektorgrößen sind fett gedruckt.

A	Euler-Drehung um z-Achse	°
a	Kantenlänge Auswertequadrat	mm
B	Euler-Drehung um y-Achse	°
C	Euler-Drehung um x-Achse	°
d_F	Fadenabstand	mm
f	Frequenz	Hz
$F(u,v)$	Bild im Frequenzraum	
$f(x,y)$	Bild im Ortsraum	
f_x	Ortsfrequenz x-Komponente	1/mm
f_y	Ortsfrequenz y-Komponente	1/mm
h	Liftoff-Höhe (Kapitel 3)	m
h	Drapierhöhe (Kapitel 6)	m
Im	Imaginärteil	digits (Skalenteile)

J	Wirbelstromdichte	A/m ²
R	Ohmscher Widerstand	Ω
$R(t; \theta)$	Radontransformation	
Re	Realteil	digits (Skalenteile)
t	Zeit	s
U	Spannung	V
X	Punkt im dreidimensionalen Raum	m
X	Reaktanz	Ω
Z	Komplexe Impedanz	Ω
α	Fadenwinkel	°
γ	Scherwinkel	°
δ	Standardeindringtiefe	mm
$\delta(x)$	Dirac-Funktion	
δ_t	Wahre Standardeindringtiefe	mm
ε	Permittivität	As/Vm
θ	Winkel	rad
μ	Magnetische Permeabilität	Vs/Am
ρ	Ladungsdichte	As/m ³ = C/m ³
σ	Leitfähigkeit	S/m = 1/ Ω /m
Φ	Magnetischer Fluss	Wb = Vs
ω	Kreisfrequenz	rad

1 Einleitung

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind Hochleistungswerkstoffe, die aus Carbonfasern und einer Kunststoffmatrix bestehen. Die Carbonfasern nehmen die auf das Bauteil wirkenden äußeren Lasten auf, während die Matrix die Kräfte zwischen den Fasern überträgt und dem Bauteil die äußere Form gibt. Da Carbonfasern in Faserrichtung eine wesentlich höhere massespezifische Steifigkeit und Festigkeit besitzen als Metalle, kann durch exakte Einstellung der Faserorientierung entlang der Hauptspannungsrichtungen im Bauteil ein hoher Leichtbaugrad erzielt werden. Wird auf diese Weise das Eigenschaftspotenzial der Fasern voll ausgenutzt, sind mit CFK tragende Strukturen realisierbar, die bei gleicher Lastaufnahme bis zu 70 % leichter sind als Stahl und bis zu 30 % leichter als Aluminium [1]. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe mit belastungsgerechter Faserorientierung lassen Flugzeuge weiter fliegen [2–5], Elektroautos weiter fahren [6, 7] und sie geben Windenergieanlagen mehr Leistung [8, 9]. Sie lassen Textilmaschinen schneller produzieren [10], geben Skateboards mehr „pop“ [11], machen Fahrräder sportlicher [12], Segelyachten schneller [13] und Sportwagen schnittiger [14].



Abb. 1-1: Beispielanwendungen für CFK [15–17]

Jede Abweichung der Faserorientierung von der Belastungsrichtung muss andererseits durch zusätzliches Material kompensiert werden. Eine Abweichung der Faserorientierung um 5° reduziert die Steifigkeit um bis zu 5 %, die Festigkeit um bis zu 20 % [18]. Jede Faserwinkelabweichung erhöht somit das Gewicht, treibt die Material- und Fertigungskosten in die Höhe und macht in vielen Fällen eine Fertigung mit traditionellen Leichtmetallen ökonomischer. Als Entscheidungsgrundlage existieren in der Flugzeug- und Automobilindustrie Kennzahlen, welche Mehrkosten je eingespartem Kilogramm akzeptabel sind. Während diese in der Flugzeugindustrie bei ca. 100-400 Euro/kg liegen [19], liegen sie im Automobilbereich deutlich niedriger bei 3,50 Euro/kg bis 10 Euro/kg für PKWs mit Verbrennungsmotoren, und bei ca. 20 Euro/kg für PKWs mit Elektroantrieb, wo die Gewichtseinsparung für eine Reichweitenerhöhung genutzt werden kann [20–22]. *Angesichts des derzeitigen Mehrpreises von ca. 10-15 kg je eingespartem Kilogramm scheitert CFK in vielen Fällen knapp an diesen ökonomischen Kennzahlen* [22, 23]. Da die Kosten für die Carbonfasern und die textilen Halbzeuge mit fast 50 % einen sehr hohen Anteil an den Herstellungskosten besitzen [23, 24], ist einer der wichtigsten Ansätze für die weitere Verbreitung von CFK die effektivere Materialausnutzung, denn jede eingesparte Carbonfaserlage reduziert nicht nur das Bauteilgewicht, sondern ebenso die Material- und Herstellungskosten.

Voraussetzung für diese verbesserte Materialausnutzung ist die präzise Einstellung und Kenntnis der Faserorientierung im hergestellten Bauteil. Nur wenn die lokale Faserorientierung nach dem Herstellungsprozess bekannt ist, kann dieser Herstellungsprozess systematisch auf die Soll-Faserorientierung hin optimiert werden. Gleiches gilt für die korrekte Abschätzung der Bauteilbelastbarkeit, die nur auf Grundlage der Ist-Faserorientierung im Bauteil sicher erfolgen kann. Aktuell wird weltweit an einer Vielzahl von Forschungseinrichtungen daran gearbeitet, den gesamten CFK-Entwicklungsprozess in einer virtuellen Prozesskette abzubilden und ausgehend von den gewünschten Faserorientierungen im Bauteil die Halbzeuge und Herstellungsprozesse maßgeschneidert auszulegen. Ohne ein Verfahren, das die Gültigkeit der dabei getroffenen Aussagen über die Faserverläufe nach dem Herstellungsprozess validieren kann, müssen in diesen virtuellen Prozessketten stets enorme Unsicherheiten in Kauf genommen werden.

Ein Verfahren, das die Faserorientierung in mehrlagigen, dreidimensional umgeformten CFK-Bauteilen zerstörungsfrei messen kann, existiert derzeit nicht. Optische Verfahren für die 2D- und 3D-Faserorientierungsmessung sind zwar kostengünstig und präzise, allerdings stets auf die oberste Lage beschränkt. Die inneren, optisch nicht sichtbaren Lagen können hiermit nicht untersucht werden. Mikro-Röntgen-CT-Verfahren andererseits sind zwar in der Lage, die Faserorientierung auch in den inneren Lagen eines CFK-Bauteils zu messen, bleiben aber derzeit aufwändig und auf Kleinproben begrenzt. Als drittes Verfahren ist daher in den vergangenen Jahren die *Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung* in den Fokus des Interesses gerückt. Anders als bei der traditionellen Wirbelstromprüfung werden hierbei Messfrequenzen im Megahertz-Bereich eingesetzt, um mithilfe von Wirbelströmen den Verlauf der schwach leitfähigen Carbonfaserbündel im Bauteil sichtbar zu machen. Dabei sind nicht nur die Fadenverläufe der obersten, sondern auch der tieferliegenden Lagen erkennbar, wie Abb. 1-2 beispielhaft zeigt. Da das Verfahren allein auf der Leitfähigkeit der Carbonfasern beruht, sind sowohl trockene Halbzeuge, dreidimensional umgeformte und fixierte, trockene Halbzeugstapel (Preforms), als auch infiltrierte und ausgehärtete CFK analysierbar.

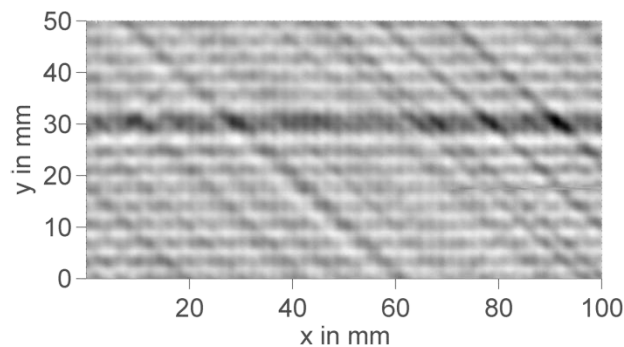


Abb. 1-2: Wirbelstrombild eines vierlagigen Geleges mit einem fehlenden Faden (dunkler Streifen)

Stand der Technik bei der Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung ist derzeit die Messung der Faserorientierung in zweidimensionalen textilen Halbzeugen und Halbzeugstapeln. Hingegen existiert derzeit kein Verfahren zur vollständigen Messung der Faserorientierung in mehrfach gekrümmten Bauteilen, wie sie für die Prozessentwicklung und Qualitätssicherung in der CFK-Fertigung benötigt wird. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines auf der Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung beruhenden Verfahrens zur Messung der Faserorientierung in dreidimensionalen, mehrlagigen Carbonfaser-Preforms und CFK. Auf diese Weise soll ein Beitrag für ein verbessertes Prozessverständnis und eine systematische Prozessoptimierung bei der CFK-Herstellung geleistet werden, um das durch diesen Werkstoff gegebene Leichtbaupotenzial zu realisieren.

2 Grenzen bestehender Verfahren zur Faserorientierungsmessung bei der CFK-Herstellung

2.1 Entwicklungsstand zur Einstellung der Faserorientierung beim Preforming

Bevor auf den Stand der Verfahren zur Faserorientierungsmessung eingegangen wird, soll kurz der Forschungsstand und die Notwendigkeit einer gezielten Einstellung der Faserorientierung bei der CFK-Herstellung erläutert werden.

Die Faserorientierung des CFK-Bauteils wird durch Analyse der auf das Bauteil wirkenden Lasten festgelegt, wobei ein typisches Verfahren die Einstellung der Faserorientierung entlang der lokalen Hauptspannungsrichtungen ist. Der Fertigungsprozesses hat die Aufgabe, das Bauteil mit der so definierten Faserorientierung fehlerfrei herzustellen.

Von den verschiedenen Verfahren zur Herstellung von CFK mit Endlosfaserverstärkung steht derzeit das Resin Transfer Moulding-(RTM-)Verfahren im Fokus des industriellen und wissenschaftlichen Interesses. Dieses bietet die Möglichkeit, komplexe 3D-Strukturen in kurzen Taktzeiten und bei vollständiger Prozessautomatisierung herzustellen [23, 25]. Hierbei wird aus trockenen Fasern ein dreidimensionaler Vorformling (Preform) erzeugt, der anschließend unter Hochdruck mit einem flüssigen Harzsystem injiziert wird, wobei die bei der Preformherstellung (Preforming) erzeugten Faserorientierungen erhalten bleiben [26]. Abb. 2-1 zeigt eine Darstellung der Prozessstufen der CFK-Herstellung, vom Faden über das textile Halbzeug und die Preform bis zum CFK.



Abb. 2-1: RTM-Prozesskette, von links nach rechts: Carbonfaserbündel auf Spule, Carbonfasergewebe, trockene 3D-Preform, CFK-Bauteil und CFK-Bauteil nach Endbearbeitung (Bildquelle: [27])

Die Einstellung der Faserorientierung beim Preforming ist abhängig vom gewählten Preformingverfahren, wobei grundlegend zwei Verfahrensgruppen zu unterscheiden sind:

- *Direktes Preforming*: die Fasern werden direkt auf einem dreidimensionalen Kern abgelegt (Umflechten [28, 29]) oder mit Hilfe von textilen 3D-Flächenbildungsverfahren (3D-Weben, 3D-Stricken, 3D-Nähwirken [30–35]) zu einer biegeschlaffen 3D-Geometrie verbunden, die auf eine Form aufgelegt wird.
- *Sequentielles Preforming* [25, 36]: flächige textile Halbzeuge (hauptsächlich Gelege, Gewe-

be, Faserbänder) werden zugeschnitten, in definierter Orientierung zu einem Halbzeugstapel (Stack) gestapelt, dreidimensional umgeformt und anschließend fixiert. Die Fixierung erfolgt durch Aktivierung thermoplastischer Binder zwischen den Einzellagen oder Vernähen des gesamten Stapels.

Während mit direktem Preforming eine hohe Prozessautomatisierung für eine Vielzahl spezieller Geometrien möglich ist, erlaubt das sequentielle Preforming eine hohe Freiheit in der Geometriegestaltung und wird daher für eine Vielzahl von komplex geformten Bauteilen eingesetzt. Abb. 2-2 zeigt typische sequenziell gefertigte Preforms für das RTM-Verfahren.

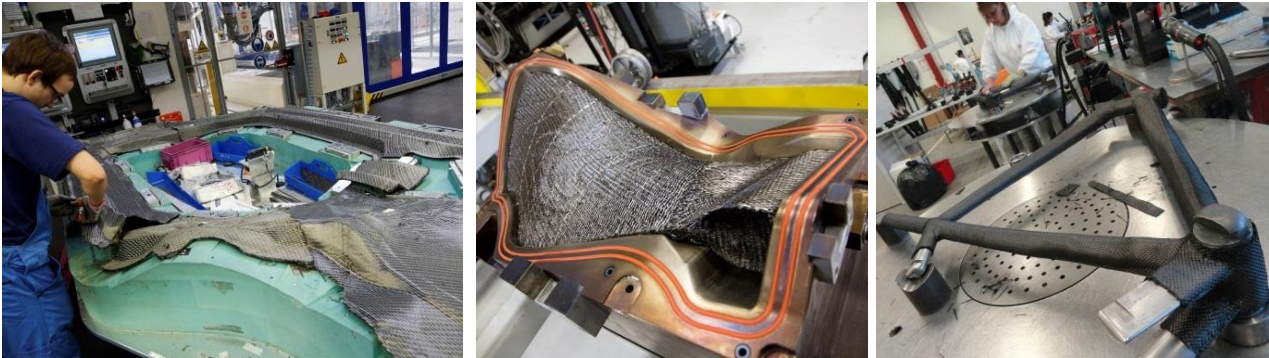


Abb. 2-2: Sequenzielle Preformfertigung für den RTM-Prozess: PKW-Seitenrahmen, Flugzeug-Turbinenschaufel, Fahrradrahmen (Bildquellen: [37–39])

Die Einstellung der Faserorientierung ist für beide Preformingverfahren nicht nur abhängig von der 3D-Geometrie, sondern von einer größeren Zahl Prozessparameter, die bei der Entwicklung eines geeigneten Fertigungsprozesses einen großen Spielraum für die Optimierung erzeugen.

Beim *direkten Preforming* definiert das Verhältnis von Ablegegeschwindigkeit der Fasern zur Abzugsgeschwindigkeit des Kerns bzw. der textilen Flächengebilde die Faserorientierung. Im Falle der 3D-Flächenbildungsverfahren werden meist Differentialabzüge eingesetzt, um die 3D-Geometrie auszuformen. Für die Einstellung sowohl der vorgegebenen 3D-Geometrie und der vorgegebenen Faserorientierungen erweist sich in der Regel eine iterative Anpassung der Anpresskräfte und Abzugsgeschwindigkeiten der einzelnen Differentialabzüge als notwendig [35, 40]. In jedem Fall ist eine Prüfung der Faserorientierungen im Halbzeug unerlässlich, um die Konformität mit den Anforderungen nachzuweisen und gegebenenfalls in Form einer Regelung auf den Herstellungsprozess einwirken zu können.

Beim *sequentiellen Preforming* wird die Faserorientierung in der 3D-Preform zum einen durch die Faserorientierung in den gestapelten Halbzeugen (z.B. $0^\circ/90^\circ$ bei Geweben) und die Orientierung der Halbzeuge im Stapel definiert, zum anderen durch die Veränderung der Faserorientierung beim Drapierprozess. Beim Drapieren erfolgt die Anpassung der flächigen Halbzeuge an die 3D-Geometrie durch verschiedene Verformungsmechanismen (Abb. 2-3), von denen die Scherung der Hauptmechanismus ist [41]. Während Fadengleiten, Ondulation und Faltenbildung i.d.R. als Fehler klassifiziert werden und durch geeignete Prozessführung ausgeschlossen werden müssen, ist die Scherung des Halbzeugs unvermeidlich für die Anpassung einer zweidimensionalen Fläche an eine dreidimensionale Geometrie. Da die Scherung in textilen Halbzeugen zu einer Verdrehung der Fadensysteme zueinander führt, verändert sie die Faserorientierung in der Preform und hat somit direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

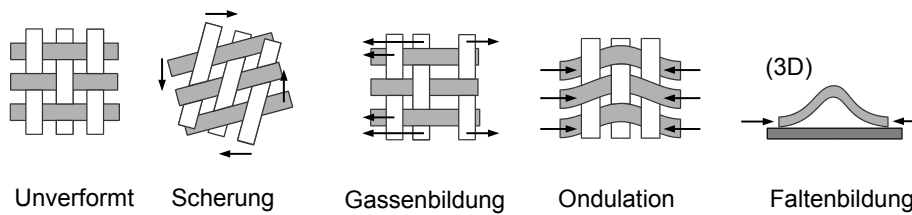


Abb. 2-3: Verformungsmechanismen textiler Halbzeuge

Diese Scherung, die beim sequentiellen Preforming zur Anpassung einer 2D-Fläche an eine 3D-Geometrie unvermeidbar ist, kann allerdings durch eine Reihe von Material- und Prozessparametern lokal und global variiert werden. Dies ist vor allem durch auf das Textil ausgeübte *Niederhalter- und Federkräfte* [41–43] möglich, die die Nachführung zusätzlichen Materials lokal behindern und die Scherwinkelverteilung in hohem Maße beeinflussen. Ebenso wurde in jüngeren Forschungsarbeiten festgestellt, dass die *Relativorientierung der Lagen im Stapel* und damit die Stapelreihenfolge einen hohen Einfluss auf die sich ausbildenden Scherwinkel besitzt [44–46]. Der Grund hierfür ist die Reibung bzw. das Verhaken der textilen Fäden zwischen benachbarten Lagen bei der Umformung, die beide umso größer sind, je geringer die Winkeldifferenz zwischen den Lagen ist [46–48]. Es ist daher in der Regel nicht möglich, aus den Faser- und Scherwinkeln, die bei der Umformung ein- und zweilagiger textiler Halbzeuge ermittelt wurden, auf die Faser- und Scherwinkel von mehrlagigen Halbzeugstapeln im selben Umformprozess zu schlussfolgern. Typische in der Automobilindustrie gemeinsam umgeformte Lagenstapel haben 6 bis 11 Lagen mit einem Gesamtflächengewicht von bis zu 2800 g/m² [49] und müssen daher notwendig als mehrlagiger Umformprozess erforscht werden.

Tabelle 2-1 fasst die bekannten Einflussfaktoren für beide Preformingverfahren zusammen. Angesichts der großen Zahl von Einflussfaktoren ist festzuhalten, dass sowohl beim direkten Preforming wie beim sequentiellen Preforming eine Messung der sich im Resultat ergebenden Faserorientierung ein unerlässliches Werkzeug ist, um die Konformität der hergestellten Preform bzw. des CFK zu gewährleisten. Deutlich wird ebenso, dass es insbesondere für das sequentielle Preforming ein großes Feld von Prozessgrößen gibt, die bisher kaum oder gar nicht zur gezielten Einstellung der Faserorientierung genutzt werden.

Tabelle 2-1: Einflüsse auf die Faserorientierung beim Preforming

Direktes Preforming	Sequentielles Preforming
<ul style="list-style-type: none"> - Verhältnis von Ablege- zu Abzugsgeschwindigkeit - Reibverhältnisse auf dem Kern (beim Umflechten) - Kräfte und Reibverhältnisse der Differentialabzüge (3D-Flächenbildungsverfahren) 	<ul style="list-style-type: none"> - Verformungsverhalten des textilen Halbzeugs (Kraft-Scherwinkel-Verlauf, Biegesteifigkeit, symmetrisches oder asymmetrisches Verformungsverhalten) - Faserorientierung im Halbzeug - Orientierung der Halbzeuge im Stapel - Lagenzahl und Relativorientierung benachbarter Lagen im Stapel - Reibung zwischen Textil und Umformwerkzeug und zwischen benachbarten Textillagen - Temperatur - Geschwindigkeit

Der gegenwärtige Stand des Prozessverständnisses zeigt sich auch im Entwicklungsstand von Drapiersimulationen, die die Scherung der textilen Halbzeuge bzw. Halbzeugstapel bei der dreidi-

mensionalen Umformung berechnen. Die meisten Veröffentlichungen enthalten Validierungsergebnisse nur für die Faserorientierung bzw. den Scherwinkel an ausgewählten Punkten der Oberfläche. In den wenigen Veröffentlichungen, in denen vollständige Validierungsergebnisse für großflächige Preforms mit Simulationsergebnissen verglichen werden, werden üblicherweise Abweichungen von 10° und mehr festgestellt (Tabelle 2-2). Die Messung erfolgte hierbei in allen dargestellten Arbeiten mit optischen Methoden und daher auf die oberste Lage beschränkt. Die Entwicklung eines Verfahrens für die Messung der Faserorientierung an mehrlagigen Carbonfasermaterialien ist damit auch für die Weiterentwicklung des Prozessverständnisses von höchster Wichtigkeit.

Tabelle 2-2: Arbeiten zur Drapiersimulation mit flächiger Scherwinkelvalidierung

Quelle	Geometrie	Lagenaufbau	Simulationsmethode	Maximale gemessene Abweichung (°)
Lomov 2008 [54]	Zylindrisch	[0/90]	Kinematisch	5-10
Margossian 2014 [55]	Helikopter-Seitenrahmen	[0/90/+45/-45]	Finite Elemente	> 10
Leutz 2016 [56]	Doppelte Sinuswelle	[0/+45/-45/0] ₉	Finite Elemente	> 10
Chen 2016[57]	Halbkugel	[0/90] ₂	Finite Elemente	5

Die Diskussion der Einflussfaktoren auf die Faserorientierung erfolgte bis hierher in Bezug auf das RTM-Verfahren, in dem erst eine trockene Preform hergestellt und anschließend infiltriert wird, sie sind jedoch ebenso auf andere Herstellungsverfahren übertragbar. So wird beim Fasernasswickeln, bei dem die Fasern bei der Ablage auf dem Kern bereits vorimprägniert sind, ebenso die Faserorientierung durch die Relativgeschwindigkeit von Fadenführer und Wickelkern definiert. Beim Vakuuminfusions- und Prepreg-Autoklavverfahren, bei denen analog zum sequentiellen Preforming flächige Halbzeuge umgeformt werden, kommt es ebenso zu einer Scherung der Halbzeuge. Der für das sequentielle Preforming dargestellte Einfluss der Relativorientierung der gestapelten Lagen auf die Scherwinkel bei der mehrlagigen Umformung wurde auch für das Prepreg-Autoklavverfahren mehrfach festgestellt [50–53].

2.2 Anforderungen an die Faserorientierungsmessung

DIN EN ISO 9000 definiert *Messen* als „Prozess zum Bestimmen eines Wertes“, wobei „der bestimmte Wert üblicherweise ein Größenwert“ ist [58]. Im Unterschied dazu ist *Prüfen* die „Bestimmung der Konformität mit festgelegten Anforderungen“ und *Validieren* die „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“ [58]. Der von der Messung abzugrenzende Begriff der Detektion ist definiert in der VDI/VDE/VDMA-Richtlinie 2632-3 als das Finden von „relevante(n) Stellen“ [59]. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines *Messverfahrens*.

Für ein Verfahren zur Messung der Faserorientierung ergeben sich aus den Darstellungen der beiden vorausgehenden Abschnitte mehrere Anforderungen:

1. Messgenauigkeit.

Die Messgenauigkeit ist durch die zulässige *Toleranz* der Faserorientierung definiert. Eine Faserwinkelabweichung von $\pm 5^\circ$ in einer Einzellage verringert die Festigkeit und Steifigkeit bereits beträchtlich, wobei die Auswirkung in mehrlagigen Verbunden mit unterschiedlichen Lagenorientierungen geringer ausfällt. Eine Winkelabweichung von $\pm 5^\circ$ ist daher eine technologisch geeignete Toleranz. Dies entspricht auch den angestrebten Prozesstoleranzen der Preformhersteller, die im Bereich von $\pm 3^\circ$ bis $\pm 5^\circ$ liegen [60].

Aus der Toleranz des abzusichernden Prozesses kann die zulässige Messunsicherheit des Messverfahrens bestimmt werden. Hierbei wird im Anschluss an VDI/VDE 2600-1 die „goldene Regel der Messtechnik“ angesetzt:

„Ein durch praktische Erfahrung bestätigter und seit Langem bewährter Richtwert wird durch die „Goldene Regel der Messtechnik“ beschrieben, nach der das Verhältnis der Messunsicherheit zur Toleranz U/T nicht größer als ein Zehntel bis ein Fünftel (bei kleinen Toleranzen) sein soll“. [61]

Somit ist auszugehen von einem Verhältnis zwischen Messunsicherheit U und Toleranz T nach:

$$\frac{U}{T} \leq (0,1 \dots 0,2) \quad (2-1)$$

Für die zulässige Messunsicherheit U der Faserorientierungsmessung ergibt sich somit

$$U \leq (0,5 \dots 1^\circ) \quad (2-2)$$

U ist hierbei nach VDI/VDE 2600-1 üblicherweise als erweiterte Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ zu wählen und ergibt sich aus der Standardmessunsicherheit des Messprozesses, u_{MP} :

$$U = k * u_{MP} \quad (2-3)$$

Wird der Messprozess als normalverteilt angenommen, so beschreibt die erweiterte Messunsicherheit U mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ das Intervall, in dem ca. 95 % aller Messwerte liegen. Für die Faserorientierungsmessung ist somit eine Standardmessunsicherheit des Messprozesses von

$$u_{MP} \leq (0,25 \dots 0,5^\circ) \quad (2-4)$$

zu fordern, die im Folgenden als Richtlinie für die Bewertung der Faserorientierungsmessung gilt.¹

2. Mehrlagigkeit.

Die Zahl und Relativorientierung der Lagen hat wie gezeigt einen signifikanten Einfluss auf die sich ausbildenden Faserorientierungen. Eine nachträgliche Zerlegung der Preform bzw. des CFK in die einzelnen Lagen ist i.d.R. nicht möglich, so dass die Messung an der mehrlagigen umgeformten Preform bzw. am mehrlagigen CFK zu durchzuführen ist. Zur Untersuchung der grundsätzlichen Verformungsverhältnisse und zur Prozessentwicklung wird eine Untersuchung von mindestens 4 Lagen als notwendig angesehen, da hierdurch die wesentlichen Mechanismen der mehrlagigen

¹ Dieses Vorgehen entspricht dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [62].

Umformung abgebildet werden können. Für den Einsatz in der Qualitätssicherung ist eine Untersuchung von mindestens 8 Lagen notwendig. CFK-Strukturen mit höherer Lagenzahl, wie sie z.B. im Flugzeugbau oder bei Windkraftanlagen eingesetzt werden, besitzen hingegen i.d.R. keine Drapierung, sondern werden über nicht oder nur einfach gekrümmte Formen abgelegt. Es findet hier keine Veränderung der Faserrichtungen durch Scherung statt, so dass die Prozesskontrolle beim schrittweisen Lagenaufbau für die jeweils oberste Lage erfolgen kann.

3. Kleine Radien.

Das Prüfverfahren muss in der Lage sein, die typische Formkomplexität eines endlosfaserverstärkten CFK-Bauteils abzubilden. Typische Radien von CFK-Bauteilen betragen $R \leq 50$ mm [63].

4. Großflächige Prüfbauteile.

Schalenförmige, im sequentiellen Preforming hergestellte RTM-Bauteile besitzen typische Oberflächen von 0,5-1 m² [63]. Das Verfahren muss in der Lage sein, die Faserorientierung auf der gesamten Bauteiloberfläche in einer oder mehreren Messungen zerstörungsfrei zu erfassen.

5. Beschaffenheit der Prüfkörper.

Für den Einsatz des Verfahrens bei der Prozessentwicklung des Preformings ist es wünschenswert, die Faserorientierung direkt an den angefertigten trockenen Preforms zu prüfen, da hierdurch zusätzliche Verarbeitungsschritte vermieden werden können. Für einen Einsatz in der Qualitätssicherung kann auf diese Weise erreicht werden, dass Preforms mit nicht-tolerierbaren Faserorientierungsabweichungen nicht an den Injektionsprozess weitergegeben werden, was wirtschaftlich von hoher Relevanz ist, da die Belegungszeit des Injektionswerkzeugs maßgebend für die Zykluszeit des RTM-Prozesses ist. Dieses letzte Kriterium ist ein Wunsch, da eine Prüfung am ausgehärteten Bauteil zwar aufwändiger, aber grundsätzlich akzeptabel.

Tabelle 2-3 fasst die diskutierten Anforderungen zusammen.

Tabelle 2-3: Anforderungen an das Messverfahren

Anforderung*	Wert
1 (F) Erweiterte Messunsicherheit	$\leq 1^\circ$
2 (F) Lagenzahl	≥ 4
3 (F) Komplexe Prüfbauteile	Radien ≤ 50 mm
4 (F) Großflächige Prüfbauteile	$\geq 0,5$ m ² zerstörungsfrei prüfbar
5 (W) Beschaffenheit der Prüfkörper	Preform oder CFK

*F = Forderung, W = Wunsch

2.3 Grenzen bestehender Verfahren für die Faserorientierungsmessung an 3D-Preforms und -CFK

Abb. 2-4 stellt eine Übersicht über die für Carbonfaser-Halbzeuge bzw. CFK angewandten zerstörungsfreien Prüfverfahren dar. Alle Prüfverfahren, für die Untersuchungen zur Faserorientierungsmessung bekannt sind, sind mit einem Stern markiert und werden im Folgenden diskutiert. Ausgenommen ist die Wirbelstromprüfung, die in Kapitel 3 gesondert dargestellt wird.

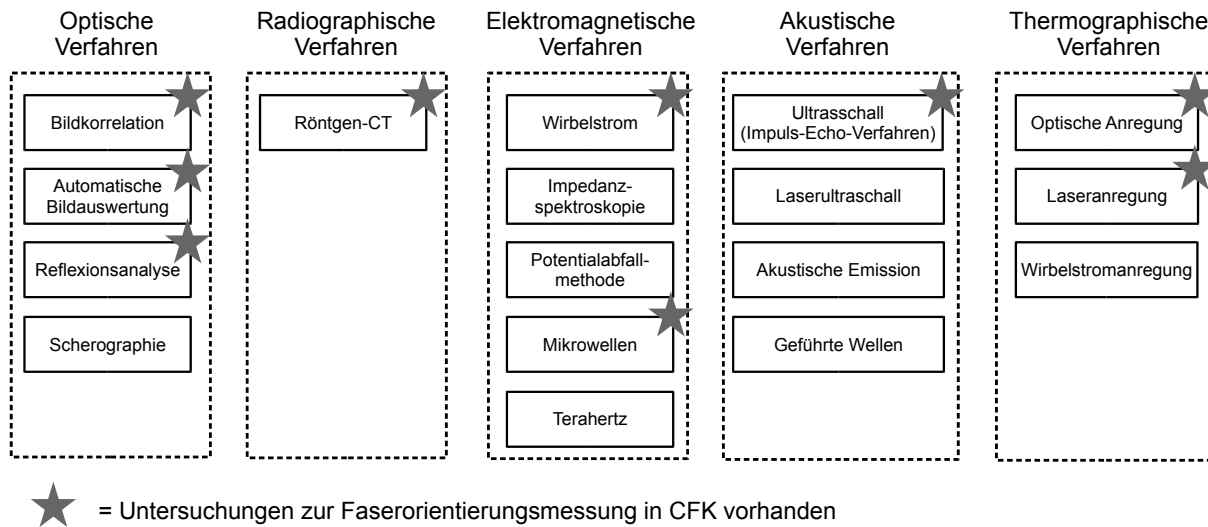


Abb. 2-4: Zerstörungsfreie Prüfverfahren für CFK (Systematik in Anlehnung an Yang 2016 [64])

Optische Verfahren

Optische Verfahren sind der derzeitige industrielle Standard zur Faserorientierungsmessung an 3D-Preforms und -CFK. Es existieren mehrere Verfahrensvarianten.

Bildkorrelation

Die am einfachsten realisierbare Messung der Faserorientierungen erfolgt durch Bildkorrelation (digital image correlation, DIC). Auf das textile Halbzeug oder einen Prepreg wird vor der Umformung ein Gitter von Messpunkten aufgezeichnet oder aufgeklebt. Die Position der einzelnen Messpunkte vor und nach der Umformung wird mit einer Kamera (2D-Bildkorrelation) oder mit zwei Kameras (3D-Bildkorrelation) aufgenommen. Durch Vergleich der Positionen der Punkte vor und nach der Umformung kann auf die lokale Scherverformung und damit auf die Faserorientierungen zurückgeschlossen werden [54, 65–73]. Abb. 2-5 zeigt den Prüfvorgang und die ermittelten Scherwinkel exemplarisch.

Anstelle der Messpunkte kann auch ein Zufallsmuster (speckle pattern) aufgebracht werden, das dann allerdings über den gesamten Verformungsverlauf verfolgt werden muss [74–77]. In diesem Fall ist ein durchsichtiges Oberwerkzeug erforderlich, was die Anwendbarkeit stark einschränkt. Kommerzielle Systeme für die 3D-Bildkorrelation sind z.B. von der Firma GOM (Gesellschaft für optische Messtechnik mbH) [78] erhältlich.

Das Bildkorrelationsverfahren erfüllt die Anforderung einer hohen Messgenauigkeit, ist für große Prüfkörper geeignet und kann potentiell auch kleine Innenradien erfassen. Es ist sehr schnell (< 1 min) und auf trockene Preforms und CFK gleichermaßen anwendbar. Grundsätzliche Ein-

schränkungen sind die Beschränkung des Verfahrens auf die *oberste Lage*, die nur *indirekte Messung* der Scherwinkel, die auf der Annahme beruht, dass die Verformung des Punktegitters die Scherung des mehrlagigen textilen Halbzeuges wiedergibt, und die Beschränkung auf *präparierte Proben* mit vor der Umformung aufgetragenen Messmarken.

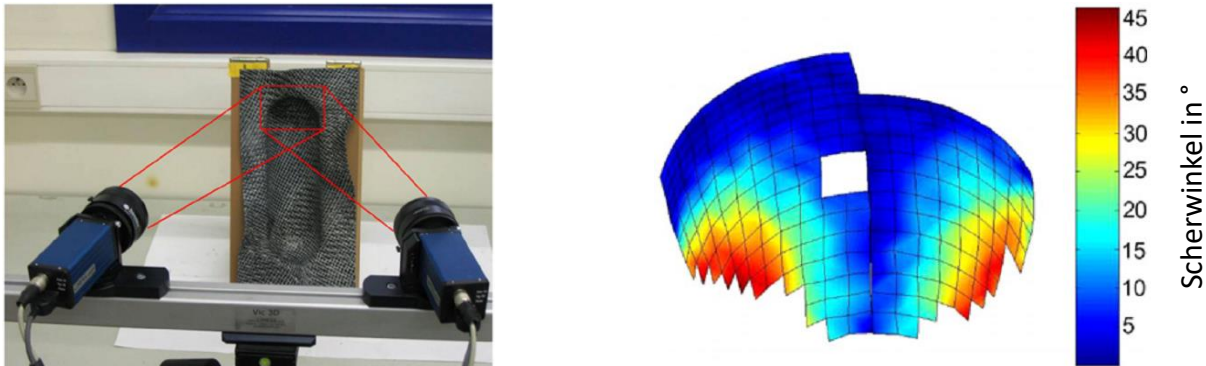


Abb. 2-5: Messung der Scherwinkelverteilung durch Bildkorrelation (Bildquelle: Lomov 2008 [54])

Bildanalyse der Faserstruktur

Eine zweite Untergruppe von optischen Verfahren beruht auf der hochauflösenden Digitalfotographie der an der Oberfläche erkennbaren Faserstruktur und ihrer Auswertung mit Bildverarbeitungsverfahren, wozu verschiedene Systeme existieren.

Am Faserinstitut Bremen (FIBRE) wurde ein System entwickelt, das die Orientierung der Carbonfaserbündel in 3D-Preforms mithilfe der Gradientenmethode ermittelt [79–81]. Eine Streulichtquelle („Lichtdom“) ist notwendig, um konstante Beleuchtungsbedingungen sicherzustellen. Das System findet Einsatz in einer Reihe von jüngeren Forschungsarbeiten [82–84] und wird auch in dem von der Firma Textechno GmbH entwickelten Drapierbarkeitsprüfgerät „Drapetester“ zur Messung der Faserorientierung angewandt [85–87].

Ein ähnliches, allerdings auf dem Bildanalyseverfahren der Kantendetektion beruhendes Messsystem ist bei Airbus Helicopters im Einsatz [55, 88].

Ein drittes, ebenfalls auf Bildanalyse beruhendes Messsystem wurde am Werkzeuglabor (WZL) der RWTH Aachen entwickelt. Als Bildanalysemethode wird hier das Strukturtensoverfahren verwendet [89–91]. Mit der Dissertation von Mersmann 2012 [60] liegt zu diesem System eine ausführliche Verfahrensdarstellung und Untersuchung zur erreichbaren Messgenauigkeit vor, die bei $< 0,4^\circ$ liegt². Ein auf diesen Arbeiten beruhendes industrielles System wird von der Firma Apodius GmbH [92] (Ausgründung aus dem WZL 2012) bzw. der Firma Hexagon Manufacturing Intelligence [93] (Übernahme von Apodius 2017) angeboten (Abb. 2-6). Durch gezielte Überbelichtung (Lichtblitze) wird eine Unterscheidung des weißen Maschenfadens von der Carbonfaser-Struktur erzeugt, so dass die Faserorientierungsmessung durch den Maschenfaden nicht gestört wird.

Die auf Bildverarbeitung beruhenden Verfahren besitzen gegenüber Bildkorrelationsverfahren (Messung der Verschiebung eines aufgetragenen Punktegitters) den Vorteil der Anwendbarkeit auf beliebige, nicht notwendigerweise präparierte Proben. Ansonsten teilen sie mit den anderen

² Erweiterte Messunsicherheit mit Erweiterungsfaktor $k = 2$. D.h., bei Wiederholungsmessung liegen 95 % der Messwerte im Intervall $\pm 0,4^\circ$. Vgl. Kapitel 2.2.

optischen Verfahren die grundsätzliche Einschränkung auf die Messung der Faserorientierung allein in der *obersten Lage*.

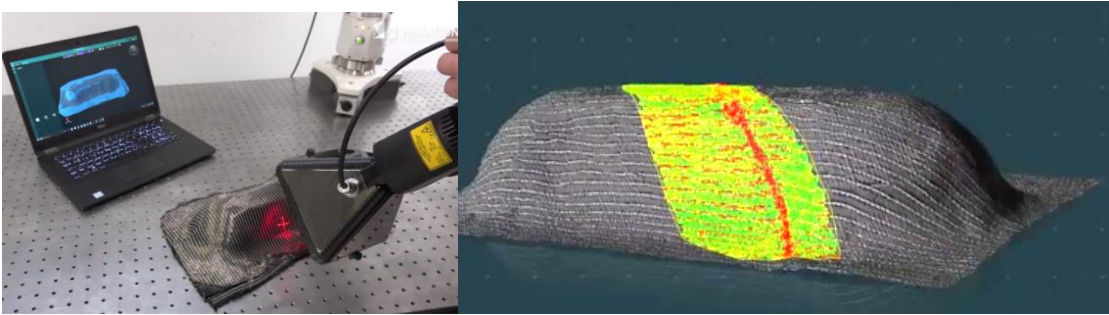


Abb. 2-6: Messung der Faserorientierung mit dem Apodius/Hexagon-System (Bildquelle: Hexagon Manufacturing Intelligence [93])

Faserreflexionsmessung

Ein drittes optisches Unterverfahren ist die Messung der Faserorientierung mit einem Reflexions-sensor: da die einzelnen Carbonfasern einfallendes Licht abhängig vom Relativwinkel zwischen Lichteinfall und Faserverlauf unterschiedlich reflektieren, kann die Faserorientierung anhand mehrerer Reflexionsmessungen aus unterschiedlichen Einfallswinkeln berechnet werden [94–97, 56, 98, 99]. Ein kommerzielles System wird von der Firma Profactor GmbH [100] vertrieben (Abb. 2-7). Eine Einschränkung ist die Größe des Sensors, die die Zugänglichkeit zu kleinen Innenradien erschwert [101]. In einer von Thumfart et al 2013 [95] durchgeführten Studie wurde eine Messunsicherheit $< 0,8^\circ$ für trockene Preforms und $< 1,5^\circ$ für Prepregs ermittelt.

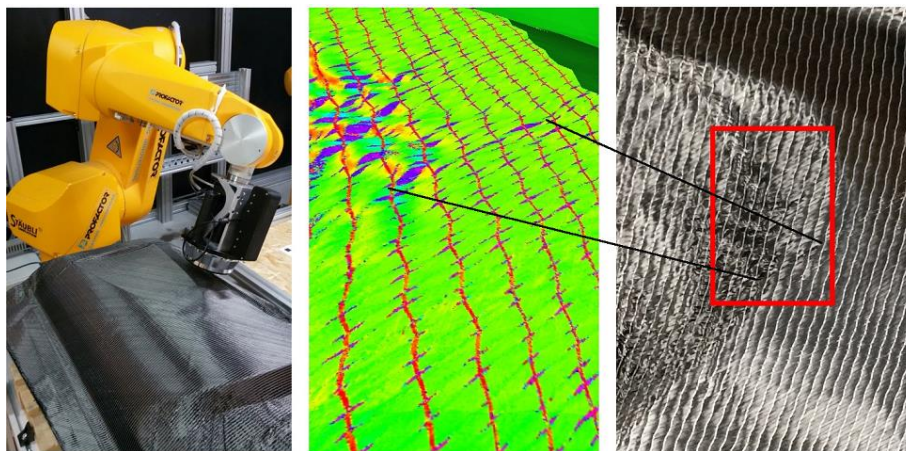


Abb. 2-7: Messung der Faserorientierung mit dem Profactor-Reflexionssensor (Bildquelle: Zambal 2016 [99])

Röntgenverfahren

Die Beschränkung der optischen Verfahren auf die oberste Lage hat in den letzten Jahren zur vermehrten Nutzung von Röntgenverfahren zur Faserorientierungsmessung geführt. Aufgrund der ähnlichen Röntgenabsorptionskoeffizienten von Carbonfasern und der umgebenden, ebenfalls kohlenstoffbasierten Matrix besitzen Röntgen-Durchstrahlverfahren einen zu geringen Kontrast für die Abbildung der Carbonfasern im CFK. Diese Einschränkung kann überwunden werden, indem Röntgen-Computertomographie- (CT-) Verfahren genutzt werden, bei denen die Probe zwischen Strahlenquelle und Detektor rotiert. Durch die mehrfache Abbildung jedes Raumelements (Voxels)

von verschiedenen Richtungen wird der Kontrast erhöht, so dass einzelne Carbonfasern in ihrem räumlichen Verlauf abgebildet werden [102]. Übliche Messausschnitte betragen allerdings weniger als $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, wobei jedoch eine sehr hohe Ortsauflösung ($< 5 \mu\text{m}$) erzielt werden kann, die die Verläufe einzelner Fasern im Faserbündel sichtbar macht. Bisherige Anwendungen bei der Faserorientierungsanalyse von CFK beschränkten sich daher meist auf Untersuchungen auf der Mikroebene. Beispiele sind die Untersuchung des Verlaufs der Einzelfilamente im Faserbündel [103–108] oder der Veränderung der Geometrie eines Einzelgarns bei Scherung des Halbzeugs [109–115]. Zwei jüngere Publikationen wenden das Röntgen-CT-Verfahren allerdings auch zur Untersuchung des Drapierprozesses an: Kärger 2015 [116] vergleicht die im CT-Scan ermittelten Fadenverläufe qualitativ mit einer Drapiersimulation (Abb. 2-8), Lightfoot 2013 [117] benutzt CT-Scans um durch das Preforming hervorgerufene Faserwelligkeiten in inneren Lagen darzustellen (Abb. 2-9). Eine automatische Messung der Faserorientierung erfolgt in beiden Fällen nicht.

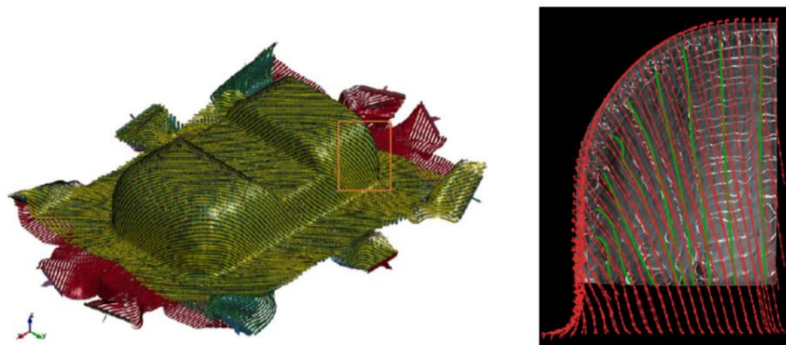


Abb. 2-8: Links: Drapiersimulation, rechts: Vergleich mit CT-Scan an einem CFK-Bauteil (Faserverläufe aus dem CT-Scan sind als grüne Linien, Simulationsergebnisse als rote Linien eingetragen) (Bildquelle: Kärger 2015 [116])

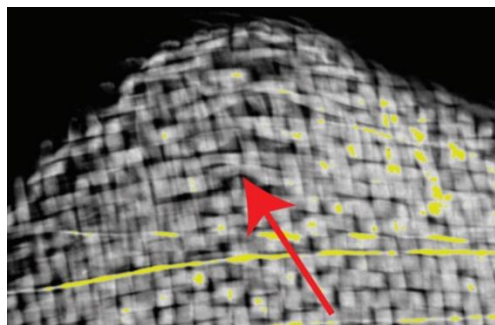


Abb. 2-9: Röntgen-CT-Darstellung des Fadenverlaufs in einer 3D-Preform. Dargestellt ist die zweite von vier Gewebelagen, der rote Pfeil zeigt eine Faserwelle, gelb sind Glasfaser-Markerfäden (Bildquelle: Lightfoot 2013 [117])

Zusammenfassend ist daher für das Röntgen-CT-Verfahren festzustellen, dass es die geforderte Messgenauigkeit, die Mehrlagigkeit und die Prüfung kleiner Radien erfüllen kann und sowohl an trockenen Preforms wie an CFK einsetzbar ist. Entscheidende Einschränkungen sind die derzeit begrenzte Prüfkörpergröße sowie die hohen Prüf- und Auswertezeiten von üblicherweise 1-2 Stunden. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die bisher für Untersuchungen auf der Mikroebene entwickelten Verfahren zur Faserorientierungsmessung durch Zerlegung des 3D-CT-Bildes in parallele Schichten operieren, was für planare Proben möglich ist, für 3D-drapierte Halbzeugstapel bzw. CFK jedoch schwierig umsetzbar ist, da die einzelnen Faserlagen nicht in parallelen Ebenen verlaufen, ferner aufgrund der Scherung lokal unterschiedliche Dicke besitzen. Bisher ist dementsprechend kein systematischer Einsatz von Röntgenverfahren zur Prozessanalyse des textilen

Preformings bekannt. Angesichts der Grenzen der optischen Verfahren ist aber davon auszugehen, dass hierzu in den nächsten Jahren verstärkte Forschungsaktivitäten stattfinden werden, auch weil die dafür notwendigen CT-Geräte zur Prüfung von Proben bis zu $400 \times 400 \times 500 \text{ mm}^3$ [118] oder zur robotergeführten lokalen Computertomographie großer Baugruppen [119] inzwischen am Markt erhältlich sind. Die hohen Kosten und langen Auswertzeiten werden die Anwendung dieser Verfahren aber auch in Zukunft einschränken.

Ultraschallverfahren

Neben optischen und Röntgen-CT-Verfahren existieren weitere Verfahren im Labormaßstab, die jedoch erhebliche Einschränkungen aufweisen.

Ultraschallverfahren sind das Standardverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK, und erlauben die Detektion von Poren, Delaminationen und schwankenden Faservolumengehalten. Faserorientierungen sind mit herkömmlichen Ultraschallverfahren allerdings nicht messbar, da die Veränderung der Faserorientierung *innerhalb* einer Carbonfaserlage die Wellenlaufzeit senkrecht zur Faserlage nicht beeinflusst. Bei Messungen mit Pitch-Catch-Anordnung konnte jedoch eine Abbildung der Faserorientierung erzeugt werden [120–123]: hierfür wird die Ultraschallwelle schräg eingekoppelt und von einem um einige Zentimeter versetzten, ebenfalls schräg stehenden Empfänger aufgezeichnet. Die Ultraschallwelle bewegt sich im schrägen Winkel durch das Bauteil, wird an der Rückwand reflektiert, und bewegt sich ebenfalls schräg zur Oberfläche zurück. Je nach Winkel der Anordnung von Sender/Empfänger relativ zur Faserorientierung verändert sich die gemessene Amplitude. Die Auflösung (Trennung von Lagen mit kleiner Winkeldifferenz) ist allerdings sehr gering (geschätzt $> 30^\circ$) und ein industrieller Einsatz nicht bekannt.

Ein weiteres Verfahren zur Rekonstruktion der Faserorientierung mit Ultraschall wurde in den Arbeiten von Smith und Nelson [124–127] vorgestellt: durch Auswertung eines sehr kleinen Zeitfensters gelang es, das Ultraschallbild auf die Zwischenschichten zwischen den einzelnen Laminatlagen zu fokussieren. In diesen Zwischenlagenbildern ist die Faserorientierung der beiden Nachbarlagen erkennbar und kann mit geeigneten Bildauswertungsverfahren automatisch bestimmt werden (Abb. 2-10). *Eine Übertragung auf Strukturen mit mehrfach gekrümmter Oberfläche ist allerdings nicht bekannt.* Die hierfür notwendige präzise Fokussierung auf die Faserzwischenlagen erscheint für 3D-Strukturen mit variierender Lagendicke, schrägen Rückwänden oder Krümmungen schwer realisierbar. Da hochauflösende Ultraschallverfahren ein festes Medium zur Wellenausbreitung benötigen, sind sie auf trockene Preforms nicht anwendbar.

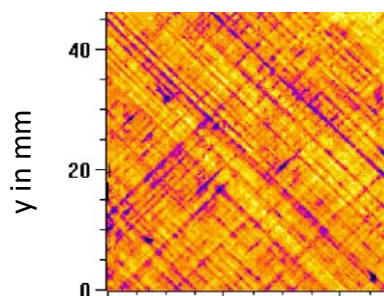


Abb. 2-10: Ultraschall-C-Scan der Zwischenlagenreflexion. Die Faserorientierungen der beiden Nachbarlagen sind deutlich erkennbar (Bildquelle: Smith 2010 [127])

Thermographieverfahren

Ebenfalls im Labormaßstab wurde die *aktive Thermographie* für die Faserorientierungsmessung untersucht. Da die Carbonfasern eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die umgebende Matrix besitzen, erscheint die Faserorientierung im Phasen- bzw. Amplitudenbild der Thermographieaufnahme und kann durch Bildauswertungsverfahren (z.B. Kantendetektion) automatisch ausgewertet werden (Abb. 2-11) [128]. Allerdings ist die Messung auf die oberste Lage beschränkt: in tieferen Lagen sind mit Thermographie zwar Faserfehler wie einzelne falsch liegende Rovings detektierbar, die Fasertextur ist hingegen nicht mehr erkennbar [129].

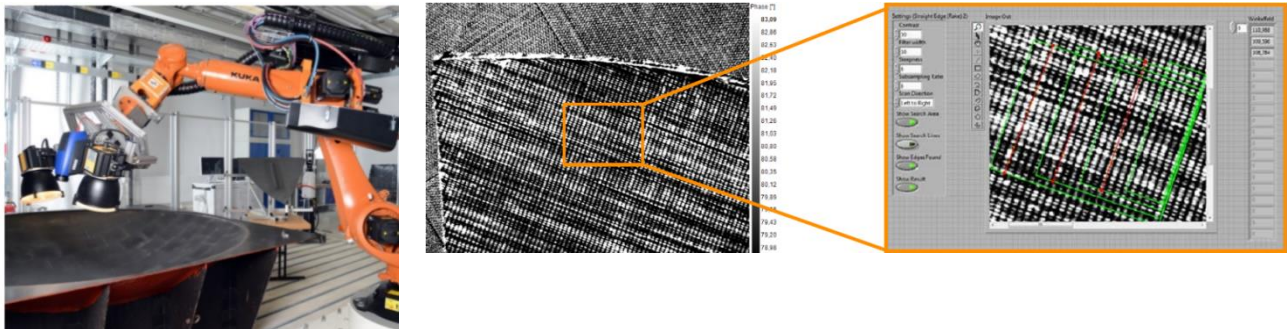


Abb. 2-11: Faserorientierungsmessung mit aktiver Thermographie (Bildquelle: Schmidt 2014 [128])

Ein alternatives Thermographieverfahren zur Faserorientierungsmessung ist die *thermische Ellipsometrie* (thermal ellipsometry), bei der die Wärmeanregung punktförmig durch einen Laserstrahl erfolgt. Aufgrund der Wärmeleitung vorzugsweise in Faserrichtung entsteht eine ellipsenförmige Temperaturverteilung, in der die Hauptachse der Ellipse die Faserorientierung anzeigt (Abb. 2-12) [130–133]. Grundsätzliche Einschränkung ist auch hier die Beschränkung auf die oberste Lage, deren Faserorientierung dominierend in die Ellipsenform eingeht. Zwar gelang es Wang 2016 [134], den Einfluss tiefer liegender Lagen auf die Ellipsenform zu modellieren und durch inverse Analyse den Lagenaufbau eines siebenlagigen Laminats zu rekonstruieren. Über die Robustheit dieses Verfahrens sowie seine Messgenauigkeit ist allerdings nichts bekannt.

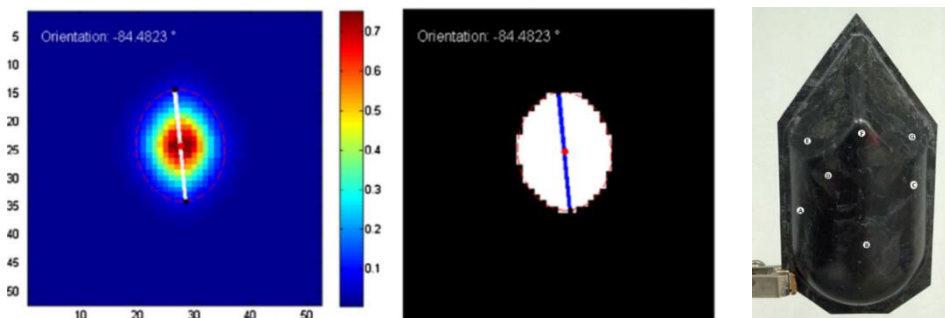


Abb. 2-12: Links und Mitte: Prinzip Faserorientierungsmessung mit thermischer Ellipsometrie (Bildquelle: Fernandes 2015 [133]). Rechts: Anwendung an einem 3D-CFK-Bauteil (Bildquelle: Fernandes 2015 [135])

Elektromagnetische Verfahren

Die *Mikrowellen-Orientierungsmessung* wird zur Messung der Faserorientierung in glasfaserverstärkten Kunststoffen vielfach eingesetzt [136] und wurde auch für CFK untersucht. Aufgrund der Leitfähigkeit von CFK sind die Eindringtiefen allerdings sehr gering. Messbar ist hier allein die winkelabhängige Veränderung der elektromagnetischen Schirmung, die bei Ausrichtung der Fasern

parallel zu einer Antenne am größten ist [137, 138]. Versuche von Urabe 1992 [139] zeigten zwar einen Einfluss auch der Orientierung der inneren Lagen eines 8-lagigen CFKs auf die elektromagnetische Schirmung, die Winkelauflösung (Trennung von Faserlagen mit ähnlicher Winkeldifferenz) ist aber sehr gering.

Wirbelstromverfahren, die ebenfalls zu den elektromagnetischen Verfahren zählen, werden in Kapitel 3 erläutert.

Zusammenfassung

Tabelle 2-4 fasst die Erfüllung der Anforderungen durch die dargestellten Verfahren zusammen. Deutlich ist, dass *derzeit kein Verfahren existiert*, das sowohl die Anforderungen der Prüfung *mehrlagiger Halbzeuge* als auch *großer Proben* ($\geq 0,5 \text{ m}^2$) erfüllen kann: während optische Verfahren auf die oberste Lage beschränkt sind, sind Röntgen-CT-Verfahren derzeit nur auf Kleinproben anwendbar, darüber hinaus langsam und aufwändig in der Auswertung. Noch größere Einschränkungen zeigen sich bei allen übrigen Verfahren (Ultraschall, Thermographie, Mikrowellen), die bisher auf Laborversuche beschränkt blieben. Einem Einsatz in der Untersuchung mehrlagiger, großer, mehrfach gekrümmter CFK-Bauteile oder Preforms stehen hier starke verfahrensbedingte Einschränkungen im Wege.

Tabelle 2-4: Bewertung der Verfahren zur Faserorientierungsmessung

	Optisch			Radio- gra- phisch	Akustisch		Thermogra- phisch		Elektro- magnetisch	
	Bildkorrelation	Bilddauswertung	Reflexionssensor	Röntgen-CT	Pitch-Catch- Ultraschall	Zwischenlagen- fokus	Flächig	Laserellipsometrie	Mikrowellen/ Terahertz	Wirbelstrom
Messunsicherheit $\leq 1^\circ$	+	+	+	+	-	+	+	+	-	Fragestellung dieser Arbeit
Mehrlagigkeit (≥ 4 Lagen)	-	-	-	+	+	+	-	-	-	
Große Bauteile ($\geq 0,5 \text{ m}^2$)	+	+	+	-	+	+	+	+	-	
Komplexe Bauteile (Radien $\leq 50 \text{ mm}$)	+	+	-	+	-	-	-	+	-	
Prüfung von CFK	+	o	o	+	+	+	+	+	+	+
Prüfung von trockenen Preforms	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+

Tabellenlegende: + erfüllbar, o bedingt erfüllbar, - nicht erfüllbar

Im Gegensatz zu den hier vorgestellten Verfahren ist für die Wirbelstromprüfung bekannt, dass sie in der Lage ist, die Fadenverläufe in mehrlagigen Carbonfasermaterialien abzubilden, wodurch eine Messung der Faserorientierung auch von mehreren Lagen erfolgen kann. Hieraus kann die Forschungsfrage abgeleitet werden:

„Kann die Wirbelstromprüfung die Faserorientierung in großen, dreidimensionalen, mehrlagigen und komplex gekrümmten Bauteilen mit der geforderten Messgenauigkeit bestimmen?“

Für die Präzisierung dieser Forschungsfrage wird im folgenden Kapitel der Stand der Technik zur Wirbelstromprüfung und zur Faserorientierungsmessung mit Wirbelstromprüfung dargestellt.

3 Stand der Technik zur Wirbelstromprüfung von Carbonfaser-materialien

3.1 Grundlagen der Wirbelstromprüfung

Aufgrund des bisher geringen Einsatzes der Wirbelstromprüfung in der CFK-Fertigung soll an dieser Stelle eine ausführlichere Einführung in die Grundlagen der Wirbelstromprüfung gegeben werden. Ziel der Darstellung ist es, aus den physikalischen Zusammenhängen Randparameter für die spezielle Prüfaufgabe der Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien abzuleiten.

Die Wirbelstromprüfung geht auf die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion durch Michael Faraday im Jahre 1831 zurück und wird seit den 1930er Jahren industriell zur Qualitätssicherung in der Metallverarbeitung eingesetzt [140]. Die grundlegenden Unterschiede bei der Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien gegenüber der Prüfung von Metallen sind zum einen die höheren Prüffrequenzen aufgrund der geringeren Leitfähigkeit des Werkstoffs, zum anderen die anisotrope, richtungsabhängige Leitfähigkeit in Faserrichtung.

Das Grundprinzip der Wirbelstromprüfung ist die *elektromagnetische Induktion*. Hierfür wird ein elektrisch leitfähiger Prüfkörper in das zeitlich veränderliche Magnetfeld einer Spule (Sendespule, inductor coil) gebracht, so dass magnetische Kräfte auf die im leitfähigen Körper befindlichen freien Ladungsträger wirken (Abb. 3-1). Die dadurch hervorgerufenen Ladungsverschiebungen bilden Ringe um die Magnetfeldlinien der Spule und werden als Wirbelströme (eddy currents) bezeichnet (grundlegend hierzu: [140–142]). Die Wirbelströme im Prüfkörper rufen wiederum ein zweites, sekundäres Magnetfeld hervor, das nach der Lenzschen Regel dem anregenden Magnetfeld entgegenwirkt und durch eine Spule oder einen anderen Magnetfeldsensor gemessen wird.³

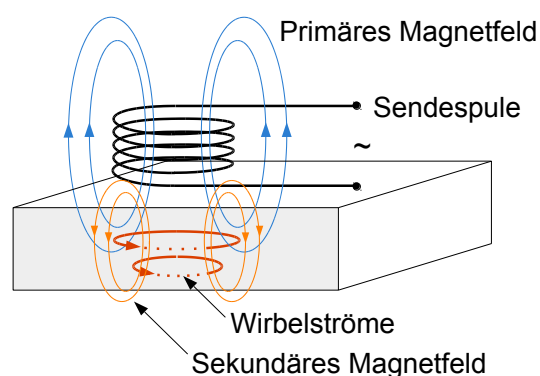


Abb. 3-1: Prinzip der Wirbelstromprüfung

Die Messspule kann mit der Erregerspule identisch sein (Absolutsensor, absolute probe) oder es

³ Als Magnetfeldsensoren können neben Spulen auch magnetoresistive Sensoren, Hallsensoren und SQUID-Sensoren eingesetzt werden (siehe García-Martín 2011 [142] für einen Überblick). Für die Wirbelstromprüfung an Carbonfasermaterialien wurden bislang ausschließlich Spulen eingesetzt.

können getrennte Mess- und Sendespulen verwendet werden (transformatorischer Sensor, send-receive probe)⁴. Die Messung eines Magnetfelds durch eine Spule beruht auf der Veränderung ihres Wechselstromwiderstands, der Impedanz Z . Die Impedanz ist eine komplexe Größe, die sich aus dem Ohmschen Widerstand R und einem um $+90^\circ$ verschobenen Blindwiderstand, der Reaktanz X , zusammensetzt:

$$Z = R + jX, \quad (3-1)$$

worin j die imaginäre Einheit ist. Der Ohmsche Widerstand R beschreibt den Energieverlust durch Umwandlung elektrischer in thermische Energie, die Reaktanz X die Energiespeicherung in der Spule durch Ausbildung des Magnetfelds. Letztere ist bestimmt durch die Induktivität der Spule und die Kreisfrequenz der Wechselspannung, die an die Spule angelegt ist:

$$X = \omega L \quad (3-2)$$

worin

ω	Kreisfrequenz (in s^{-1}) ($= 2\pi f$)
L	Induktivität der Spule (in $H = Vs/A$)

Die hierin enthaltene Induktivität L ist der Proportionalitätsfaktor zwischen dem magnetischen Fluss Φ durch eine Spulenwicklung und der angelegten Stromstärke I , so dass sich für eine Spule aus N Leiterschleifen die Impedanz ergibt zu:

$$X = \omega L = \omega \frac{N \cdot \Phi}{I} \quad (3-3)$$

Hierin sind

N	Windungszahl der Spule
Φ	magnetischer Fluss durch die Spule (in $Wb = Vs$)
I	Stromfluss durch die Spule (in A).

Aus diesen Grundgleichungen kann das Prinzip der Wirbelstromprüfung entwickelt werden. Befindet sich die Spule in der Luft, so besitzt sie aufgrund des elektrischen Widerstands der Spulenwicklungen den ohmschen Widerstand R_0 und die Reaktanz X_0 . In der komplexen Impedanzebene aufgetragen erhält man den Luftpunkt (air point) $Z_0 = R_0 + jX_0$ der Spule (siehe Abb. 3-2). Wird die Spule nun an einen leitfähigen Körper herangeführt, so verändert sich ihre Impedanz. Die Induktion von Wirbelströmen im Körper erhöht den Ohmschen Widerstand R der Spule, da ein zusätzlicher Energieverlust durch die Wirbelströme auftritt.⁵ Zugleich reduziert sich die Reaktanz X , da das von den Wirbelströmen hervorgerufene sekundäre Magnetfeld dem Erregerfeld entgegengesetzt ist, und somit den magnetischen Fluss durch die Spule reduziert (Formel (3-3)).⁶ Bei der Annäherungsbewegung von der Ursprungsposition in der Luft an einen gegebenen

⁴ Zur Terminologie der Wirbelstromprüfung siehe DIN EN ISO 12718 (2008) [143], wo auch die deutschen, englischen und französischen Begriffe gegenübergestellt sind.

⁵ Der Energieverlust kommt zustande durch Erwärmung des Prüfkörpers. Aufgrund der bei der Wirbelstromprüfung verwendeten geringen Stromstärken von < 1 A ist diese Erwärmung jedoch vernachlässigbar. Zum Vergleich: bei der Wirbelstromthermographie, die auf einer gezielten Erwärmung des Prüfkörpers beruht, kommen Stromstärken von 400 A zur Anwendung [206].

⁶ Bei ferromagnetischen Materialien mit magnetischer Permeabilität $\mu_r > 1$ (Eisen, Ferrite) erhöht sich die Reaktanz bei Annäherung an den Prüfkörper, da dieser die Magnetfeldlinien bündelt. Neben der Leitfähigkeit geht hier die magnetische Permeabilität in das Messergebnis ein (grundlegend hierzu: [142]). Carbon ist paramagnetisch ($\mu_r \approx 1$), so dass dieser Fall hier nicht betrachtet wird.

Prüfkörper mit der Leitfähigkeit σ_1 verschiebt sich die komplexe Spulenimpedanz daher entlang der in Abb. 3-2 gestrichelt eingezeichneten Linie Z_0 - Z_1 . Da sich die Impedanz beim Abheben auf derselben gestrichelten Linie zurück zu Z_0 bewegt, wird die gestrichelte Kurve Z_0 - Z_1 als Abhebekurve oder Liftoff-Linie bezeichnet.

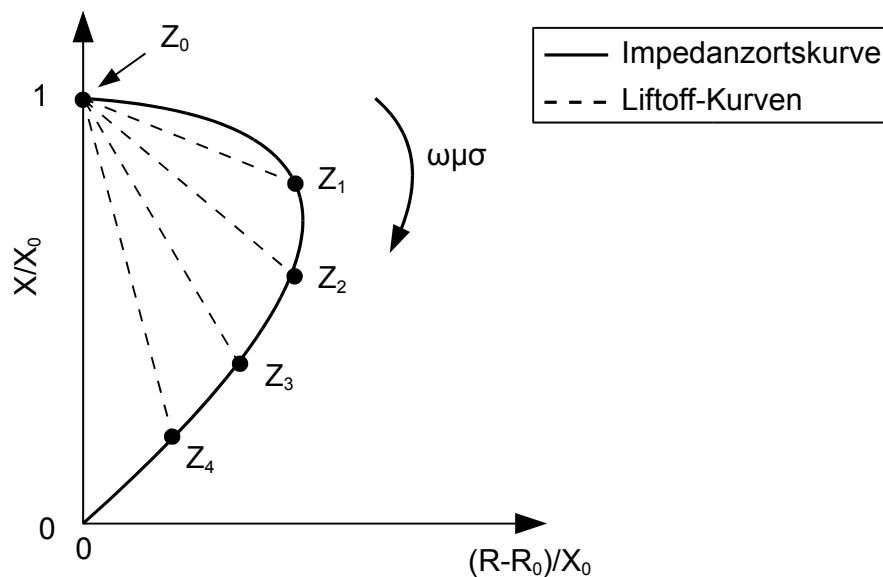


Abb. 3-2: Einfluss von Prüffrequenz, Permeabilität und Leitfähigkeit auf komplexe Impedanz

Die Wirbelstromprüfung beruht darauf, dass sich die Impedanz der Spule in Abhängigkeit der elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Prüfkörpers und der Messfrequenz, des Abstands zwischen Spule und Prüfkörper (Liftoff) und dem Vorhandensein von Fehlern im Prüfkörper verändert. Im Folgenden soll der Einfluss dieser drei Effekte diskutiert werden.

1. Einfluss von Prüffrequenz, Permittivität und Leitfähigkeit

Ist der Liftoff konstant, so ist die gemessene Impedanz abhängig von der Kreisfrequenz des Erregerstroms ω , der Permittivität μ und der Leitfähigkeit σ des Prüfkörpers. Verändert man einen oder mehrere dieser Parameter, so bewegt sich die Impedanz auf einer gebogenen Kurve in der komplexen Ebene, die als *Impedanzortskurve* bezeichnet wird (durchgezogene Linie Z_0 - Z_1 - Z_2 - Z_3 - Z_4 in Abb. 3-2).

Der Verlauf der Impedanzortskurve in der komplexen Ebene kann wie folgt erklärt werden. Wird die Kreisfrequenz des Erregerstroms ω sukzessive erhöht, oder wird die Spule sukzessive auf Prüfkörper mit steigender Permittivität μ oder steigender Leitfähigkeit σ aufgesetzt, so erhöht sich die Wirbelstromdichte im Prüfkörper. Das stärkere sekundäre Magnetfeld der Wirbelströme, das dem Erregerfeld der Spule entgegenwirkt, führt dabei zu einer *Verringerung* der Reaktanz X/X_0 (y-Achse). Die normierte Reaktanz sinkt also, beginnend beim Maximalwert 1, mit Erhöhung des Produkts $\omega\mu\sigma$ bis auf Null.

Die Ohmschen Verluste $(R-R_0)/X_0$ (x-Achse) *steigen* hingegen bei Erhöhung von ω , μ und σ , allerdings nur bis zu einem Maximalwert, bevor sie mit weiterer Erhöhung des Produkts $\omega\mu\sigma$ sinken. Der Grund für diesen Verlauf besteht darin, dass die stärksten Wirbelströme immer an der Oberfläche des Prüfkörpers (in unmittelbarer Nähe zur Erregerspule) ausgebildet werden. Das von den Wirbelströmen an der Oberfläche erzeugte Magnetfeld wirkt dabei dem primären Feld der Erregerspule entgegen und verringert sein Eindringen in den Prüfkörper, so dass die steigende

Wirbelstromdichte an der Oberfläche mit einer Verringerung des durchdrungenen Volumens einhergeht [144]. Dieser Effekt wird als *Stromverdrängung* (Skin-Effekt) bezeichnet und bewirkt, dass sich die Ohmschen Verluste nach Erreichen eines Maximalwerts mit zunehmender Leitfähigkeit, Permittivität und Prüffrequenz reduzieren, so dass die für die Wirbelstromprüfung charakteristische gebogene Impedanzortskurve in Abb. 3-2 entsteht. Für den Grenzfall einer unendlichen Prüffrequenz oder eines Prüfkörpers mit unendlich hoher Leitfähigkeit oder Permittivität würden die Ohmschen Verluste zu Null werden, da das durchdrungene Volumen zu Null wird, ebenso würde die Reaktanz zu Null werden, da das gesamte Erregerfeld durch das sekundäre Magnetfeld vollständig kompensiert würde.

2. Einfluss des Abstands zwischen Spule und Prüfkörper (Liftoff)

Wird die Spule auf den Prüfkörper nicht vollständig aufgesetzt ($h = 0$), sondern erfolgt die Messung mit einem Abstand (lift off, $h = h'$) zwischen Spule und Prüfkörper, verringert sich der Anteil des Erregerfelds, der in den Prüfkörper eindringt. Anstelle der Impedanz Z_1 erhält man die Impedanz Z_1' (vgl. die folgende Abb. 3-3), die auf der Abhebelinie von Z_0 nach Z_1 liegt. Bei Erhöhung von $\omega\mu\sigma$ bewegt sich die gemessene Impedanz auf einer verkleinerten, mit $h = h'$ bezeichneten Impedanzortskurve. Derselbe Effekt tritt bei einer Verkipfung (tilt) der Spule auf.

3. Einfluss von Fehlern (Risse, Durchmesseränderungen etc.)

Lokale Fehler wie z.B. Risse oder Durchmesseränderungen in einem homogen leitfähigen Körper verändern die Wirbelstromausbreitung und bewirken eine Verschiebung der Impedanz in der komplexen Ebene. Die Richtung und der Betrag der Verschiebung sind im Falle eines Risses abhängig z.B. von der Tiefe, Breite und Überdeckung des Risses, wozu in der Literatur umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen vorliegen. Richtung und Betrag sind darüber hinaus abhängig von der Lage des Messpunktes auf der Impedanzortskurve. Schematisch sind in Abb. 3-3 die Signale ein- und desselben Fehlers bei verschiedenem $\omega\mu\sigma$ als Pfeile eingezeichnet (nach [146]).

Die Aufgabe in jeder Prüfung ist die Unterscheidung der durch Fehler bewirkten Impedanzveränderung (Fehlersignal) von Impedanzveränderungen, die durch Veränderung des Liftoffs oder der Leitfähigkeit/Permittivität zustande kommen. Dies ist möglich, insofern die verschiedenen Effekte verschiedene Wirkrichtungen in der Impedanzebene besitzen. Indem nur derjenige Anteil der komplexen Impedanzveränderung dargestellt wird, der in Richtung der erwarteten Fehlerwirkung liegt, kann die Anzeige auf einzelne Effekte beschränkt werden, während z.B. Oberflächenunebenheiten, die zu Liftoff-Variationen führen, nicht dargestellt werden.⁷

Zu beachten ist, dass der Winkel zwischen Fehler- und Liftoff-Signal und daher ihre Unterscheidbarkeit für einen gegebenen Prüfkörper (μ und σ fix) durch die Wahl der Prüffrequenz ω beeinflusst werden kann, wie in Abb. 3-3 dargestellt. Je nach Material und Fehlerart (z.B. Risse, Durchmesseränderungen) lässt sich eine optimale Prüffrequenz bestimmen [140]. Aus der Impedanzortskurve lässt sich unmittelbar ableiten, dass je geringer die Leitfähigkeit des Prüfkörpers ist, umso höher die Prüffrequenz gewählt werden muss, um eine messbare Impedanzänderung und eine gute Unterscheidbarkeit von Fehler- und Liftoffsignal zu erzeugen. Während für

⁷ Für die in dieser Arbeit durchgeführte 3D-Wirbelstrommessung ist dies von hoher Relevanz, da Effekte durch Verkippen oder lokales Abheben des Sensors von der Oberfläche unterdrückt werden müssen. Vgl. die Ausführungen zur Phasendrehung in Kapitel 5.2.1.

Aluminium ($\sigma = 38 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) typische Prüffrequenzen bei $f = 200 \text{ kHz}$ liegen, werden daher für CFK ($\sigma = 20 \cdot 10^3 \text{ S/m}$, d.h., 1000x kleiner) Prüffrequenzen im Bereich 1-20 MHz verwendet (vgl. Abschnitt 3.5). Eine Limitation bei der Erhöhung der Prüffrequenz ist, dass sich Abhebeeffekte mit zunehmender Frequenz vergrößern: die Kurven für $h = 0$ und $h = h'$ liegen bei höheren Frequenzen weiter auseinander.

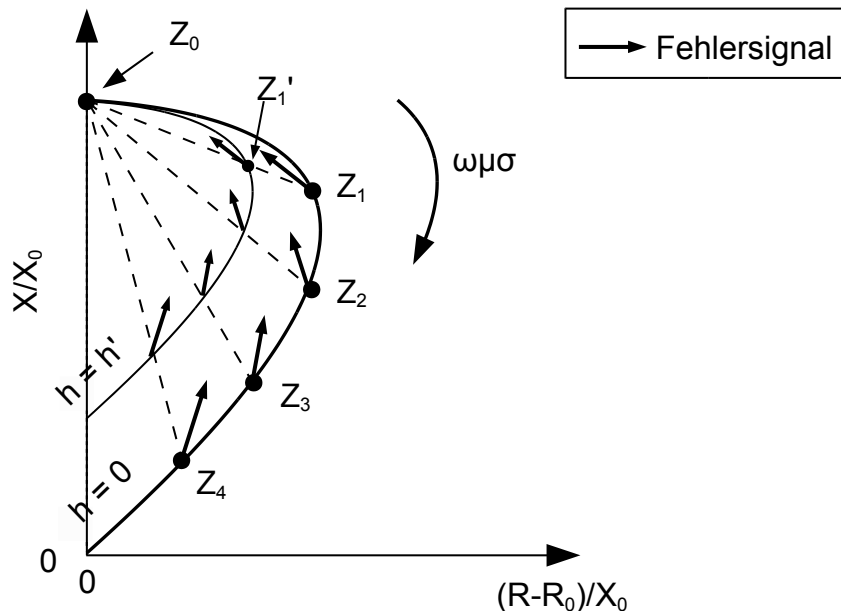


Abb. 3-3: Einfluss von Fehlern und Lift-off auf die komplexe Impedanz (nach [146])

In industriellen Messsystemen wird als Messsignals üblicherweise nicht die komplexe Impedanz, sondern die induzierte Spannung in der Messspule zur Anzeige gebracht [145], die proportional zur zeitlichen Veränderung des magnetischen Flusses ist:

$$U = N \cdot \frac{d\Phi_w}{dt} \quad (3-4)$$

Worin

N	Windungszahl der Spule
Φ_w	magnetischer Fluss durch eine Leiterschleife (in Wb = Vs)
$d\Phi_w/dt$	zeitliche Veränderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife (in V).

Die Messdaten werden dann in der komplexen Ebene in Volt oder auch nur in Skalenteilen (digits) dargestellt, da Eigenschaftsveränderungen und Fehler sich als relative Veränderung des Wirbelstromsignals äußern. Die Darstellung erfolgt weiterhin in der komplexen Ebene und die dargelegten Zusammenhänge sind weiter gültig. Sind die Innenwiderstände des Messsystems sowie die Eigenschaften der verwendeten Analog-Digital-Wandler und eventueller Verstärker bekannt, kann das in Skalenteilen oder Volt angezeigte komplexe Messsignal in die Impedanz (in Ohm) zurückgerechnet werden [145]. Praktisch ist dies von untergeordneter Bedeutung.

3.2 Eindringtiefe

Als Maß für die Eindringtiefe wird in der Wirbelstromprüfung die Standard-Eindringtiefe δ (standard depth of penetration) verwendet, die definiert ist als die Tiefe im Prüfkörper, an der die Wirbelstromdichte auf den Wert $1/e \approx 37\%$ der Wirbelstromdichte an der Oberfläche reduziert ist.

Unter Annahme, dass die Wellen des elektromagnetischen Feldes planar in den Prüfkörper einfallen (d.h. die Sendespule sehr groß ist) und das Material isotrop leitfähig ist, kann die Standardeindringtiefe aus den Maxwell'schen Gleichungen des elektromagnetischen Feldes hergeleitet werden (siehe z.B. [141]). Man erhält unter diesen Annahmen die Gleichung für die Standardeindringtiefe:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma\mu\omega}} \quad (3-5)$$

Hierin sind

σ	elektrische Leitfähigkeit (in S/m)
μ	magnetische Permeabilität (in Vs/Am)
ω	Kreisfrequenz (in rad)

Die Standardeindringtiefe sinkt somit mit steigender Leitfähigkeit und steigender Prüffrequenz. Die zunehmende Konzentration der Wirbelströme an der Oberfläche schirmt tiefere Bereiche des Prüfkörpers ab, so dass das Fehlersignal tiefer liegender Fehler stark verringert wird.

Abb. 3-4 zeigt diese theoretische Standardeindringtiefen für CFK, Stahl und Aluminium in Abhängigkeit von der Prüffrequenz. Für CFK wurde eine isotrope Leitfähigkeit von 20.000 S/m angesetzt (vgl. Kapitel 3.3). Für die Prüfung metallischer Werkstoffe wird typischerweise davon ausgegangen, dass Fehler bis zur dreifachen Standardeindringtiefe 3δ detektierbar sind [146]. Für CFK ergibt sich bei einer für CFK typischen Prüffrequenz von 1 MHz eine Standardeindringtiefe von $\delta = 2,5$ mm und eine theoretische Detektionsgrenze von $3\delta = 7,5$ mm, bei einer Prüffrequenz von 10 MHz betragen $\delta = 0,8$ mm und $3\delta = 2,4$ mm.

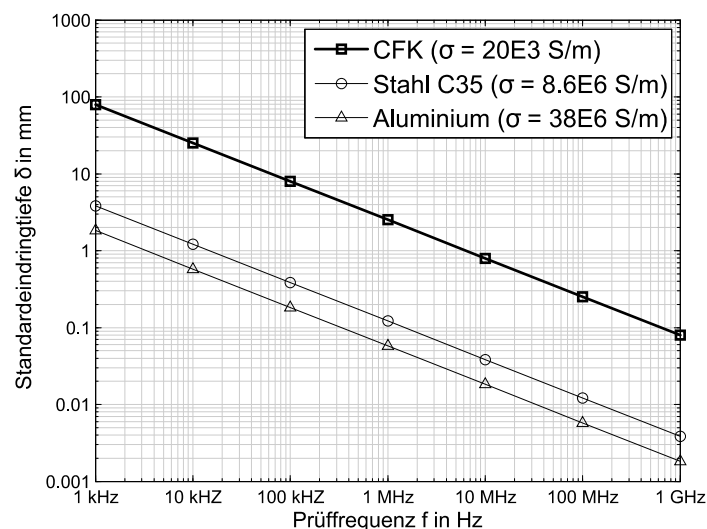


Abb. 3-4: Standardeindringtiefe für CFK, Stahl und Aluminium (Achsen logarithmisch)

Die Formel für die Standardeindringtiefe führt jedoch zur *Überschätzung* der tatsächlichen Eindringtiefe schon bei isotropen Materialien, da sie davon ausgeht, dass die elektromagnetische Welle planar einfällt, was nur für sehr große Spulen gegeben ist. Analytische Herleitungen für den Faktor, um den die wahre Eindringtiefe überschätzt wird, finden sich bei Mottl 1990 [147]. Abb. 3-5 zeigt die von Mottl für eine luftgefüllte Spule berechnete wahre Eindringtiefe δ_t (true depth of

penetration), bei der die Wirbelstromdichte tatsächlich auf 37 % der Wirbelstromdichte an der Oberfläche gesunken ist, normiert auf die Standardeindringtiefe δ nach Formel (3-5).

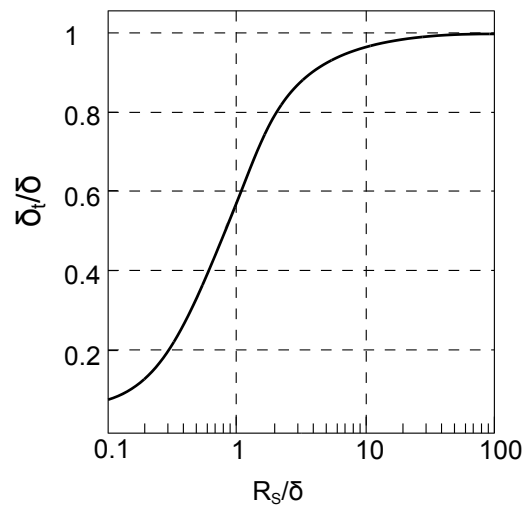


Abb. 3-5: Verhältnis von wahrer Eindringtiefe δ_t zur (theoretischen) Standardeindringtiefe δ in Abhängigkeit des normierten Spulenradius R_s/δ (nach Mottl 1990 [147])

Die Darstellung ist wie folgt zu lesen. Auf der x-Achse ist der auf die Standardeindringtiefe δ normierte Spulenradius R_s/δ_t aufgetragen, auf der y-Achse das Verhältnis von wahrer Eindringtiefe und Standardeindringtiefe δ_t/δ , d.h. der Faktor, um den Gleichung (3-5) die wahre Eindringtiefe überschätzt. Es ist ablesbar, dass erst ab einem Verhältnis von R_s/δ von > 10 sich das Verhältnis δ_t/δ dem Wert 1 annähert, d.h. die Formel für die Standardeindringtiefe Gültigkeit erhält.

Versucht man, mithilfe des obigen Diagramms die wahre Eindringtiefe für CFK abzuschätzen, so kann von $R_s = 2,5$ mm ausgegangen werden (typische Spulendurchmesser in der CFK-Prüfung liegen bei ca. 5 mm). Bei einer Prüffrequenz von $f = 1$ MHz wurde bereits $\delta = 2,5$ mm berechnet, woraus sich ein Verhältnis von $R_s/\delta = 1$ ergibt. Aus Abb. 3-5 liest man ab, dass die wahre Eindringtiefe dann das ca. 0,6-fache der Standardeindringtiefe beträgt, d.h. 1,5 mm. Bei einer typischen Dicke einer Carbonfaser-Einzellage von 0,15 mm beträgt die wahre Standardeindringtiefe daher bis zu 10 Lagen. Für eine Prüffrequenz von $f = 10$ MHz erhält man nach dem gleichen Verfahren eine wahre Eindringtiefe von 0,7 mm.

Die dargelegten Zusammenhänge haben hohe praktische Bedeutung für die in dieser Arbeit verwendeten relativ kleinen Spulendurchmesser. Eine wichtige praktische Schlussfolgerung ist, dass die Eindringtiefe weniger durch die Messfrequenz, als durch den Spulendurchmesser definiert wird, d.h., die durch Gleichung (3-5) nahe gelegte Erhöhung der Eindringtiefe durch Verringerung der Prüffrequenz stark beschränkt ist. Eine Verringerung der Prüffrequenz erhöht δ und verringert daher das Verhältnis R_s/δ , so dass man sich auf der Kurve in Abb. 3-5 weiter nach *links* bewegt. Zwar wird die Standardeindringtiefe erhöht, zugleich aber die wahre Eindringtiefe stärker überschätzt. Mottl berechnet, dass die wahre Eindringtiefe ab einem Verhältnis von ca. $R_s/\delta < 0,4$ annähernd konstant bleibt. Für einen Spulenradius 2,5 mm ergibt sich damit, dass eine Verringerung der Prüffrequenz unter 150 kHz zu keiner Erhöhung von δ_t mehr führt. Eine Erhöhung von δ_t kann dann nur noch durch die Wahl größerer Spulenradien R_s erfolgen. Experimentelle Untersuchungen kommen zu ähnlichen Ergebnissen (van Drunen 1984 [148]).

Eine umgekehrte Verringerung der Eindringtiefe durch Erhöhung der Prüffrequenz ist jedoch möglich, und in einigen Fällen wünschenswert, wenn z.B. oberflächennahe Risse geprüft werden

sollen, da sich die Wirbelströme bei tieferen Frequenzen unter dem Riss hindurch ausbreiten [149].

Die Nutzung größerer Spulenradien vergrößert hingegen in jedem Fall die Eindringtiefe, verringert zugleich die Detektier- und Unterscheidbarkeit kleiner Fehler. Vernon 1989 [150] empfiehlt, den Spulenradius so zu wählen, dass das Verhältnis von Spulenradius R_s und Standardeindringtiefe δ 1,4...5 beträgt. Mottl 1990 [147] zeigt, dass die höchste Sensitivität der Spulen im Bereich von $R_s/\delta = 1...10$ vorliegt.

In praktischen Anwendungen werden meist Spulen mit Ferritkern und Schirmung eingesetzt, die die Magnetfeldlinien bündeln. Dadurch wird eine erhöhte und fokussierte Feldeinkopplung in den Prüfkörper erreicht, was die Auflösung erhöht und Randeffekte („Stauchung“ der Wirbelströme an den Rändern des Prüfkörpers) verringert [141]. Ein Vergleich verschiedener Spulengeometrien für Transformatoren hat gezeigt, dass kreisförmige Spulen gegenüber quadratischen und rechteckigen Spulenquerschnitten die höchste Feldkopplung liefern und daher auch für die Wirbelstromprüfung am geeignetsten sind [151].

Tabelle 3-1 fasst die in diesem Abschnitt dargestellten Zusammenhänge zwischen Prüfparametern und Eindringtiefe zusammen.

Tabelle 3-1: Wirkung der Prüfparameter auf die Eindringtiefe

Parameter	Veränderung der Eindringtiefe
Spulendurchmesser	Größerer Spulendurchmesser erhöht Eindringtiefe
Leitfähigkeit	Niedrigere Leitfähigkeit erhöht Eindringtiefe, aber nur bis $R_s/\delta < 0,4$
Permittivität	Niedrigere Permittivität erhöht Eindringtiefe, aber nur bis $R_s/\delta < 0,4$
Prüffrequenz	Niedrigere Prüffrequenz erhöht Eindringtiefe, aber nur bis $R_s/\delta < 0,4$

3.3 Elektrische Leitfähigkeit von Carbonfasermaterialien

Für die korrekte Interpretation der Ergebnisse der Wirbelstromprüfung an Carbonfasermaterialien ist ein Verständnis der Phänomene, die zur Ausbildung der Leitfähigkeit der Carbonfasermaterialien beitragen, notwendig. Der Stand der Forschung zur Leitfähigkeit von Carbonfasermaterialien wird daher im Folgenden zusammengefasst.

Molekül- und Kristallstruktur

Auf der Molekülebene bestehen Carbonfasern aus hexagonalen Kohlenstoffringen, die ähnlich wie beim Graphit zu parallelen Schichten, sogenannten Basalschichten, verknüpft sind (Abb. 3-6 links). Jedes Kohlenstoffatom besitzt vier Valenzelektronen, von denen nur drei durch die Kovalenzbindung zu den Nachbaratomen gebunden sind. Die freien Elektronen jedes Rings liegen als delokalisierte Elektronenwolke vor. Carbonfasern sind daher ebenso wie Graphit in den Basalebenelementen elektrisch leitfähig, senkrecht dazu nicht [152].

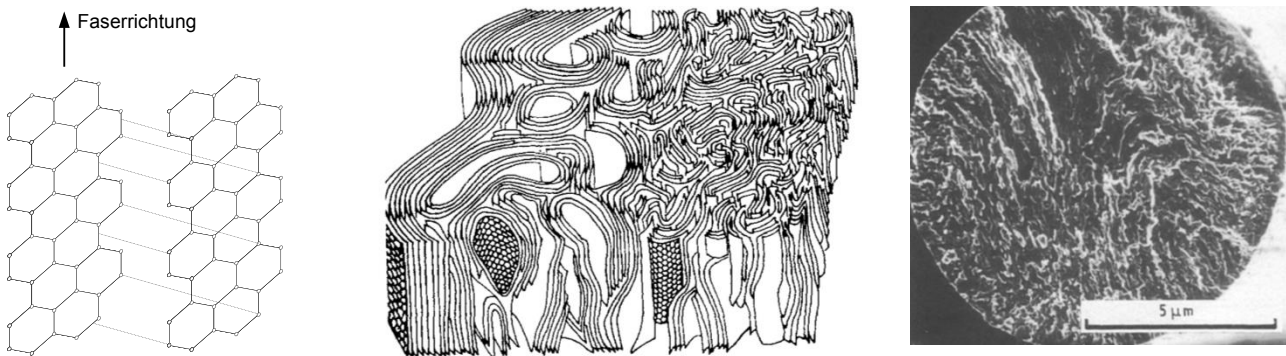


Abb. 3-6: Struktur der Carbonfaser, von links nach rechts: idealer Schichtaufbau, 3D-Kristallitmodell (Bildquelle: Johnson 1978 [153], Wiedergabe nach [154]), SEM-Aufnahme (Bildquelle: Kumar 1993 [155])

Fasern

Aufgrund von Korngrenzen und Faltungen weicht die Kristallstruktur von realen Carbonfasern erheblich vom idealen Schichtaufbau ab (Abb. 3-6 Mitte und rechts). Je größer die Anzahl der Fehlstellen ist, d.h. desto stärker die reale Mikrostruktur vom idealen Schichtaufbau abweicht, desto stärker wird die Leitfähigkeit verringert.

Die Einstellung des Orientierungsgrads und der Fehlstellenfreiheit erfolgt während des Herstellungsprozesses der Carbonfaser. Die Fehlstellenzahl wird hierbei maßgeblich durch die Graphitisierungstemperatur beeinflusst: höhere Graphitisierungstemperaturen ($> 2400\text{ °C}$) führen zu stärkerer Orientierung der Schichten und reduzieren die Fehlstellen, was sowohl zu einer höheren elektrischen Leitfähigkeit als auch einer höheren mechanischen Steifigkeit führt. Es besteht daher ein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der mechanischen Steifigkeit der Carbonfasern: die Leitfähigkeit von High-Modulus-(HM-)Fasern liegt deutlich über der von Intermediate-Modulus (IM)-Fasern oder High-Strength-(HT-)Fasern, bei denen keine Graphitisierung stattfindet. Typische Leitfähigkeiten für die verschiedenen Faserarten liegen im Bereich von 50-150 kS/m [156–159], für Ultra High Modulus (UHM-) Fasern können sie bis zu 500 kS/m betragen (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Zugfestigkeit/E-Modul für verschiedene Carbonfasertypen (Quelle: Jäger 2016 [158])

Fasertyp	Leitfähigkeit (S/m)	Zugfestigkeit (GPa)	E-Modul (GPa)
HT	$62 \cdot 10^3$	4,0...5,0	240
IM	$71 \cdot 10^3$	5,0...7,0	290
HM	$90 \cdot 10^3$	4,0...4,7	350
UHM	$500 \cdot 10^3$	3,0...4,0	> 500

Carbonfaserbündel (Carbonfaden, Roving)

Bei der Erspinnung und Verarbeitung werden mehrere tausend Carbonfasern zu einem Carbonfaserbündel (Carbonfaden, Roving) zusammengefasst. Die Leitfähigkeit des Rovings *in Faserrichtung* ist bestimmt durch die Leitfähigkeit und Packungsdichte der Einzelfasern. *Quer zur Faserrichtung* besteht eine Leitfähigkeit nur aufgrund der Berührungen zwischen den einzelnen Fasern, die im Roving leicht wellig verlaufen. Diese *transversale* Leitfähigkeit quer zur Faserrichtung ist aufgrund der Übergangswiderstände und der höheren Leitungswege etwa 100-fach geringer als die Leitfähigkeit

higkeit in Faserrichtung [160–162]. Da die parallelen Fasern als Kondensator wirken, können sich bei Anregung mit einem Wechselfeld auch Wechselstromflüsse über nicht berührende Fasern hinweg ausbilden (Abb. 3-7). Die einzelnen Carbonfaserrovings besitzen somit einen Wechselstromwiderstand (Impedanz) $Z = R + jX_C$, dessen Blindwiderstand X_C mit zunehmender Frequenz ω sinkt:

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (3-6)$$

Die hierin enthaltene Kapazität C des Kondensators *steigt* mit sinkendem Abstand der Carbonfäden, so dass sich der Blindwiderstand X_C *verringert*, wenn die Faserbündel stärker kompaktiert werden. Höhere Frequenzen ebenso wie höhere Kompaktierung führen somit zu einer Verringerung des Blindwiderstands und zu höheren Stromflüssen. Abb. 3-7 zeigt die Gleichstrom- und Wechselstrompfade in einem Carbonfaserbündel und das daraus resultierende Ersatzschaltbild.

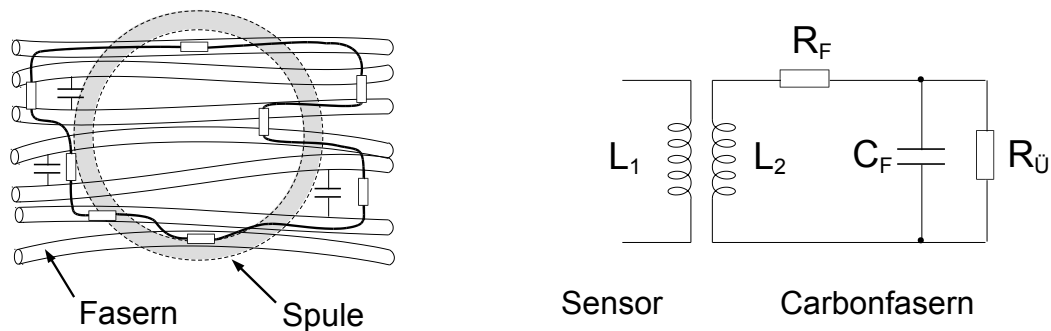


Abb. 3-7: Gleich- und Wechselstrompfad in einem Carbonfaserbündel und Ersatzschaltbild (nach: Lange 1994 [162])

Obwohl hierzu keine Untersuchungen bekannt sind, ist davon auszugehen, dass die elektrischen Übergangswiderstände und die Kapazität entscheidend durch die bei der Herstellung aufgetragene *Schlichte* der Carbonfasern sowie (im Faserverbund) durch die Matrix zwischen den Fasern bestimmt werden. Eine Untersuchung der Leitfähigkeit *in Faserrichtung* nach chemischer Entschlichtung zeigte höhere Leitfähigkeiten, was auf geringere Übergangswiderstände zwischen den sich berührenden Carbonfasern hinweist [163].

Unidirektionale Lage und Lagenstapel

In einer unidirektionalen (UD-) Lage sind die einzelnen Rovings parallel abgelegt und durch ein textiles Flächenbildungsverfahren, i.d.R. Multiaxial-Kettenwirken, verbunden (UD-Gelege). Leitfähigkeitsmessungen an trockenen UD-Gelegen ergaben Leitfähigkeiten (Gleichstrom) von 32 kS/m in Faserrichtung und 38 S/m (d.h., ca. 1000x geringer) in Querrichtung [164].⁸ Diese Werte wurden bei einem Kompressionsdruck von 1 bar gemessen; eine Erhöhung des Kompressionsdrucks auf 8 bar führte zur Verdopplung der gemessenen Leitfähigkeit sowohl in Faser- wie in transversaler Richtung [165]. Der Grund für die Erhöhung beider Leitfähigkeitswerte ist in der höheren Zahl der Berührungspunkte zu sehen.

Das Stapeln mehrerer UD-Lagen erhöht die Leitfähigkeit leicht, da die Filamente der Einzellagen in die Lücken der Nachbarlagen dringen (nesting), wodurch die Zahl der Kontaktpunkte steigt, ebenso wie der Faservolumengehalt [165]. Abb. 3-8 zeigt mikroskopische Aufnahmen der Faserberührungen in einer UD-Lage.

⁸ Eigene Berechnung aus den in der Literaturstelle angegebenen Messwerten.

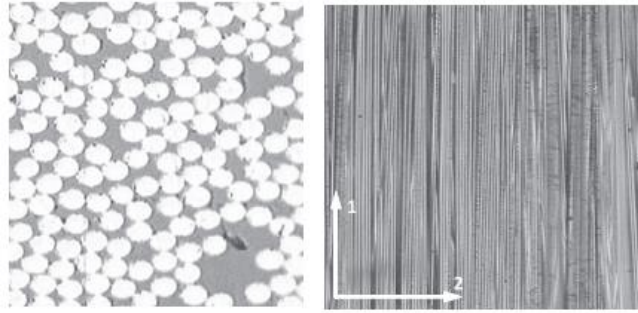


Abb. 3-8: Faserberührungen in einer UD-Lage (Bildquelle: Athanasopoulos 2011 [164])

Multidirektionaler Lagenstapel

Anders als bei der einzelnen UD-Lage bzw. bei parallel gestapelten UD-Lagen werden in einem multidirektionalen Stapel (Schichtung mehrerer UD-Lagen mit Winkelversatz) die Fasern jeder Lage durch die leitfähigen Fasern der Nachbarlage verbunden, so dass sich Stromflüsse über die einzelnen Lagen hinweg ausbreiten können. Diese *interlaminaren Strompfade* führen dazu, dass die Leitfähigkeit, in Faserrichtung der einzelnen Lagen gemessen, größer ist als die Leitfähigkeit der UD-Einzellage in Faserrichtung [161, 162, 166, 167]. Mit steigendem Winkelversatz zwischen den Lagen steigt hierbei die Leitfähigkeit in jede Faserrichtung und wird für eine Schichtung [0/90] maximal [168]. Diese Verkreuzung ist als Ursache dafür anzugeben, dass in Gewebelagen die Leitfähigkeit in Faserrichtung höher ist als in einer UD-Schicht [166].

Preform

Bei der Umformung ein- oder mehrlagiger textiler Halbzeuge oder Halbzeugstapel zu 3D-Geometrien verändert sich die Orientierung der einzelnen Rovings im Halbzeug durch Scherung, ebenso kommt es zur Kompaktierung der einzelnen Rovings. Untersuchungen zur Wirkung auf die elektrische Leitfähigkeit sind nicht bekannt, jedoch ist davon auszugehen, dass für orthogonale Schichtungen [0/90] mit steigender Scherung die Leitfähigkeit sinkt, insofern der Relativwinkel der Einzelschichten geringer wird. Die Kompaktierung hat hingegen die umgekehrte Wirkung und führt zur Erhöhung der Leitfähigkeit, wodurch der Effekt der Winkelveränderung ganz oder teilweise kompensiert wird.

Eine Kompaktierung der Preform mit thermoplastischem Binder führt zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit [49].

CFK

Bei der Herstellung von CFK wird in der Regel eine nichtleitfähige Matrix verwendet, so dass von einer *Erhöhung* der Kontaktwiderstände zwischen den Fasern und einer Erhöhung des Wechselstromwiderstands auszugehen ist. Zugleich kommt es allerdings zu einer Kompaktierung der Preform im Injektionswerkzeug, wodurch die Zahl der Kontaktstellen zwischen den Fasern stark erhöht wird.⁹ Für CFK werden daher durchgehend *höhere* Leitfähigkeiten gemessen als für Carbonfaser-Halbzeuge und -Halbzeugstapel. Typische Literaturwerte für die Leitfähigkeit von CFK sind in Tabelle 3-3 angegeben. Für UD-CFK liegen sie je nach Faservolumengehalt im Bereich von

⁹ Eine trockene und unkompaktierte UD-Lage von 300 g/m² hat eine Dicke von ca. 0,5-0,6 mm, im CFK beträgt die Dicke je nach Faservolumengehalt 0,1-0,15 mm.

10.000-30.000 S/m in Faserrichtung, bei ca. 10 S/m senkrecht zur Faserrichtung (d.h., ca. 1000x kleiner) und ca. 0,5 S/m (nochmals 20x kleiner) in z-Richtung. Zu bemerken ist, dass sich die Literaturwerte z.T. stark unterscheiden, was neben der Materialwahl auf unterschiedliche Proben-
vorbereitung (Freilegen der Fasern aus dem Verbund und Kontaktierung) zurückzuführen ist.

Auch auf den CFK wirkende äußere Kräfte führen zu einer Veränderung der Leitfähigkeit: eine Druckkraft in Dickenrichtung erhöht die Leitfähigkeit (Erhöhung des Faservolumengehalts) [169], während eine Zugkraft in Faserrichtung die Leitfähigkeit verringert [170], weshalb Carbonfasern auch als Dehnungssensoren eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Druck- bzw. Zugspannungen, die hierfür notwendig sind (> 50 MPa für Leitfähigkeitsänderung < 5 %) ist dies für die Wirbelstromprüfung nicht relevant.

Tabelle 3-3: Exemplarische Literaturwerte für Leitfähigkeit von CFK

	Faservolumen- gehalt	σ_L (S/m)	σ_T (S/m)	σ_z (S/m)	Material
Abry 1999 [171]	0,4	$21 \cdot 10^3$	2,1	0,06	CFK, UD Prepreg
	0,5	$27 \cdot 10^3$	8,8	0,35	
	0,6	$34 \cdot 10^3$	24	20,7	
Schueler 2001 [172]	k.A.	$33 \cdot 10^3$	16	k.A.	CFK, UD Prepreg
Cheng 2014 [173]	k.A.	$15 \cdot 10^3$	3,8	0,63	CFK, UD Prepreg
Salski 2014 [174]	Ca. 0,5-0,65	$20 \cdot 10^3$ (Isotrope Summenleitfähigkeit)			CFK, Köpergewebe

3.4 Ausbreitung von Wirbelströmen in Carbonfasermaterialien

Aufgrund der anisotropen Leitfähigkeit breiten sich Wirbelströme in Carbonfasermaterialien nicht kreisförmig aus wie in isotrop leitfähigen Metallen, sondern sternförmig in Richtung der Faserorientierungen. Mook et al 2001 [175] visualisierten die Wirbelstromdichte in verschiedenen Laminataufbauten, indem sie die Erregerspule unter einer CFK-Platte fixierten und mit der Messspule die Feldverteilung an der Oberfläche aufzeichneten (Abb. 3-9). Nach Herausrechnen des Primärfelds der Erregerspule kann das durch die Wirbelströme hervorgerufene Sekundärfeld bestimmt werden, das mit der Wirbelstromdichte am jeweiligen Messpunkt korreliert. In UD-CFK zeigt sich eine elliptische Ausbreitung in Faserrichtung (Abb. 3-9 links), in multiaxialen Aufbauten eine Ausbreitung in die Faserrichtungen der einzelnen Lagen, wobei das Signal für tiefere Lagen geringer wird (Abb. 3-9 rechts).

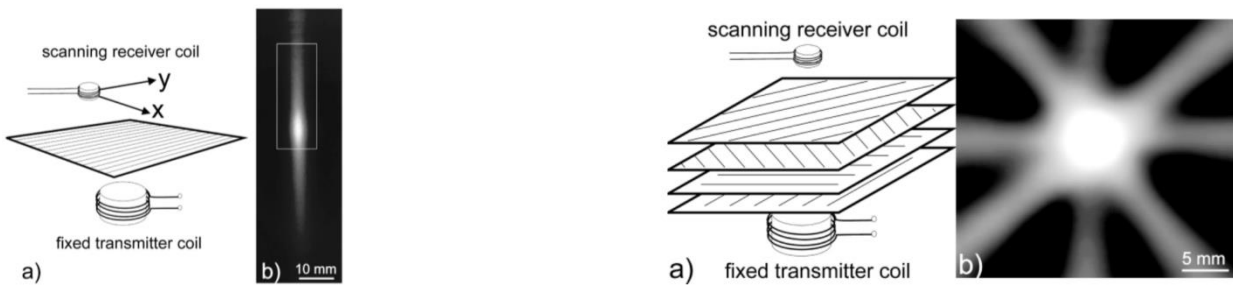


Abb. 3-9: Visualisierung der Wirbelstromdichte für ein UD-CFK (links) und ein Quadraxial-CFK (rechts) (Bildquelle: Mook 2001 [175])

Die Anisotropie der Leitfähigkeit verändert auch die Eindringtiefe der Wirbelströme. Die elliptische Form der Wirbelstromausbreitung *vergrößert den Wirbelstrompfad* bei gleicher umschlossener Fläche, so dass die Wirbelströme an der Oberfläche des Prüfkörpers ein *stärkeres sekundäres Magnetfeld* hervorrufen. Tiefer liegende Lagen werden daher stärker abgeschirmt und die Wirbelstromdichte sinkt schneller als in isotropen Materialien. Cheng 2017 [176] zeigte mit Simulationsrechnungen, dass die wahre Eindringtiefe für UD-Laminat um den Faktor 5 geringer ist als die wahre Eindringtiefe in einem quasi-isotropen Material.

Ebenfalls von Cheng (Cheng 2014 [167]) durchgeführte Simulationen zeigen, dass die Wirbelstromdichte in den Grenzschichten zwischen Lagen mit verschiedener Faserorientierung stark erhöht ist. Der Grund sind die interlaminaren Strompfade in multidirektionalen Aufbauten. Dies kann sogar dazu führen, dass die Wirbelstromdichte in tieferen Lagen größer ist als an der Oberfläche, etwa bei einem $[0_4/90_4]$ -Laminat, für das die höchsten Wirbelstromdichten in der mittleren Schicht, an der sich die Stapelrichtung ändert, berechnet wurden (Abb. 3-10 links), während die Wirbelstromdichte in einem unidirektionalen Verbund $[0]_8$ mit steigender Tiefenlage kontinuierlich sinkt (Abb. 3-10 rechts). Lokale Fehler, die sich in dieser Grenzschicht befinden, können daher zu einem höheren Messsignal führen als oberflächennahe Fehler.

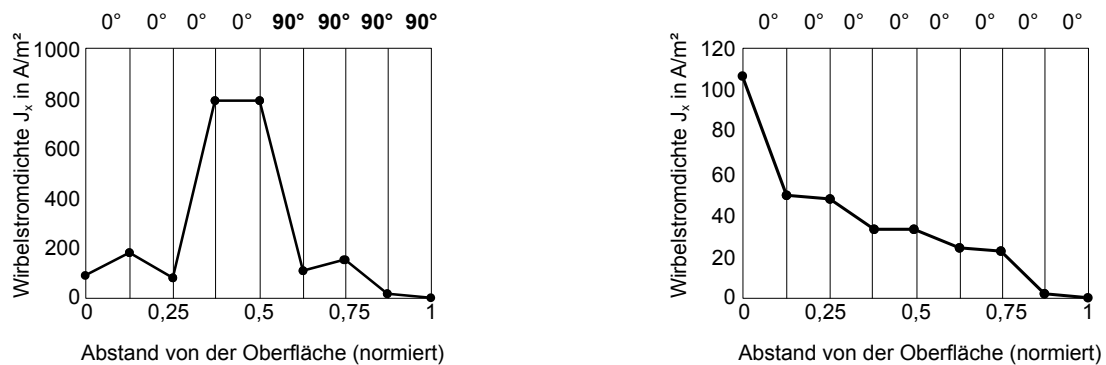


Abb. 3-10: Verlauf der Wirbelstromdichte in einem $[0_4/90_4]$ - und einem $[0]_8$ -Laminat nach Cheng 2014 [167]

Die dargestellten Phänomene bei der Wirbelstromausbreitung in anisotrop leitfähigen Carbonfasermaterialien sind sowohl bei der Wahl der Prüfparameter als auch bei der Ergebnisinterpretation zu beachten. Tabelle 3-4 fasst die in diesem Abschnitt dargestellten Unterschiede zwischen der Wirbelstromausbreitung in Metallen und Carbonfasermaterialien zusammen.

Tabelle 3-4: Unterschiede in der Wirbelstromausbreitung von Metallen und Carbonfasermaterialien

Leitfähigkeitsphänomen	Metalle	Carbonfasermaterialien	Schlussfolgerung für die Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien
Betrag der Leitfähigkeit	Hoch ($20 \cdot 10^6$ S/m)	Niedrig ($20 \cdot 10^3$ S/m)	- Geringere Wirbelstromdichten, höhere Prüffrequenzen notwendig
Richtung der Leitfähigkeit	Isotrop	Anisotrop	- Elliptische Ausbreitung der Wirbelströme in Faserrichtung der einzelnen Lagen - Verringerte Eindringtiefe in UD-Laminaten
Verteilung der Leitfähigkeit	Volumenleitfähigkeit	Leitfähigkeit nur entlang der Fasern und an Faser-Faser-Kontakten, umgebendes Medium (Luft oder Matrix) nicht leitfähig	- Kompaktierung erhöht Leitfähigkeit stark - Erhöhte Wirbelstromdichte zwischen Lagen mit nicht-parallelen Faserorientierungen (interlaminare Wirbelströme)

3.5 Forschungsstand zur Faserorientierungsmessung in Carbonfasermaterialien mit Wirbelstromprüfung

3.5.1 Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung

Bei der Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien kommen als Messprinzipien die *bildgebende Wirbelstromprüfung* und die *Rotationswirbelstromprüfung* zum Einsatz. Bei der bildgebenden Wirbelstromprüfung wird die Oberfläche mit dem Sensor abgefahren. Hierfür wird der Sensor i.d.R. in parallelen Bahnen über die Oberfläche bewegt und die Impedanzänderung der Spule an einem Raster von Messpunkten aufgezeichnet. Aus der gemessenen Impedanz an den einzelnen Messpunkten wird ein Intensitätsbild der Oberfläche (Wirbelstrombild) erzeugt, vergleichbar mit einem C-Scan aus der Ultraschallprüfung. Die Fadenverläufe der Carbonfaserbündel erscheinen im Wirbelstrombild als überlagertes Streifenmuster: da die Leitfähigkeit jedes Faserbündels in der Mitte höher ist als an den Rändern werden die höchsten Wirbelstromdichten erzeugt, wenn sich die Sendespule mittig über einem Faserbündel befindet. Beim Abscannen der Oberfläche entsteht so ein überlagertes Streifenmuster, das die Fadenverläufe der einzelnen Lagen anzeigt, aus denen die Faserorientierung ermittelt werden kann.¹⁰ Abb. 3-11 zeigt das Wirbelstrombild eines vierlagigen CFK mit Lagenaufbau [0/90/90/0]. Neben den Fadenverläufen der Einzellagen sind auch lokale Fehler aufgrund der abweichenden Leitfähigkeit im Wirbelstrombild erkennbar. Kommerzielle 2D-

¹⁰ Zu beachten ist, dass die bildgebende Wirbelstromprüfung nicht die Einzelfasern, sondern die Faserbündel (Fäden) abbildet. Da die technologische Aufgabe die Messung der Faserorientierung ist, wird im Folgenden weiterhin von Faserorientierungsmessung gesprochen. Die Messung der Faserorientierung erfolgt hier durch Messung der Fadenorientierung.

Prüfsysteme für die bildgebende Wirbelstromprüfung an Carbonfasermaterialien werden von der Firma Suragus GmbH und dem Fraunhofer IKTS, Dresden vertrieben.

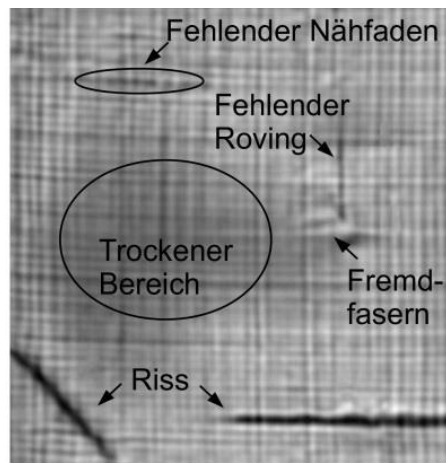


Abb. 3-11: Wirbelstrombild eines vierlagigen [0/90/90/0]-CFK mit Fehlern (Bardl et al 2014 [177])

Voraussetzung für die Abbildung und anschließende Orientierungsmessung der Carbonfäden ist eine hohe Auflösung der Sensoren. Hierfür ist neben der Wahl des Spulendurchmessers die Wahl der Spulenanordnung entscheidend. Abb. 3-12 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Spulenanordnungen bei der bildgebenden Wirbelstromprüfung.

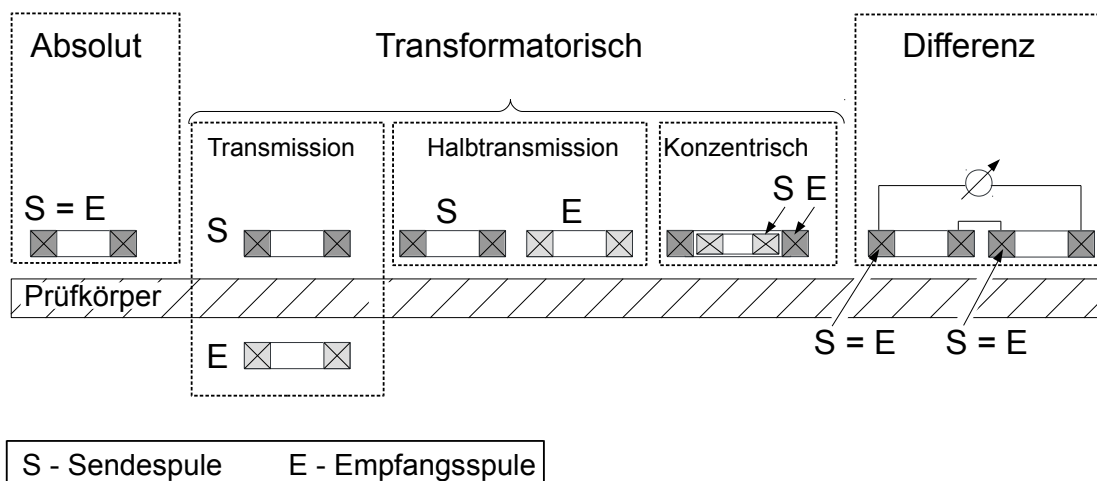


Abb. 3-12: Spulenanordnungen für die Wirbelstromprüfung

Die Eigenschaften der Spulenanordnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei *Absolutsensoren* sind Sende- und Empfangsspule identisch. Absolutsensoren besitzen den einfachsten Aufbau, die Empfindlichkeit ist aber geringer als bei transformatorischen Sensoren.
- Bei *Transmissionssensoren* befinden sich Sende- und Empfangsspule auf gegenüberliegenden Seiten des Prüfkörpers, so dass die Verringerung der Wirbelstromdichte mit zunehmender Tiefe durch Messung von der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers kompensiert wird. Messungen in Transmissionsanordnung erfordern allerdings eine beidseitige Zugänglichkeit zum Prüfkörper, was für die meisten Anwendungen nicht gegeben ist.

- Bei *transformatorischen Sensoren* sind Sende- und Empfangsspule getrennt. Je nach Lage relativ zum Prüfkörper unterscheidet man *Transmissionsanordnung*, *Halbtransmissionsanordnung* und *konzentrische Anordnung*¹¹. Während sich ein transformatorischer Sensor mit konzentrischer Spulenanordnung im Abbildungsverhalten von einem Absolutsensor nicht unterscheidet, besitzen Halbtransmissionssensoren ein richtungsabhängiges Abbildungsverhalten und heben Merkmale, die senkrecht zur Sensorrichtung (Achse zwischen Sende- und Empfangsspule) liegen hervor. Laut Mook 2011 [179] zeigen Halbtransmissionssensoren ein deutlich höhere Auflösung für kleine Merkmale, während ein Absolutsensor mit gleichem Spulendurchmesser kleine Merkmale stärker „verschmiert“ abbildet. Vergleichende Untersuchungen von Schmidt 2014 [180] an Prepregs und CFK-Platten bestätigten diese höhere Auflösung von Halbtransmissionssensoren.
- Weiterhin existieren *Differenzsensoren*, bei denen die Impedanzdifferenz zwischen zwei Absolutsensoren gemessen wird. Differenzsensoren sind auf kleine lokale Veränderungen wie Risse sehr sensibel. Langwellige, kontinuierliche Veränderungen wie Dicken- oder Temperaturschwankungen werden hingegen durch die Differenzmessung an benachbarten Messpunkten unterdrückt, was in der Prüfung von homogenen metallischen Werkstücken oft vorteilhaft ist. Von Schmidt 2014 [180] wird berichtet, dass Differenzsensoren für CFK-Messungen nicht geeignet sind, da sie kleine Inhomogenitäten verstärken, so dass die Fadenstruktur nicht mehr erkennbar ist.

Die Bestimmung der Faserorientierung aus den Wirbelstrombildern der bildgebenden Wirbelstrombildern erfolgte in allen bisherigen Arbeiten durch Auswertung der Fouriertransformation, die die Richtungen mehrerer überlagerter Streifenmuster als Frequenzspektrum abbildet.¹² Abb. 3-13 zeigt die Auswertesoftware „EddyEva“ der Firma *Suragus GmbH* für die Faserorientierungsmessung an 2D-Wirbelstrombildern. Zusätzlich zu den Faserrichtungen erlaubt die Software die automatische Detektion und Quantifizierung von Gassen, Ondulationen (Faserwelligkeiten) und lokalen Fehlstellen.

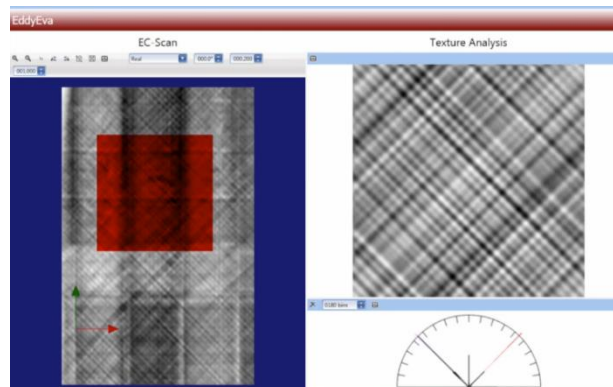


Abb. 3-13: Auswertesoftware EddyEva der Firma Suragus [181]

¹¹ In der Wirbelstromprüfung von Carbonfastermaterialien hat sich auch für transformatorische Sensoren mit konzentrischer Spulenanordnung der Begriff Absolutsensoren eingebürgert ([175, 178]), da die eigentlichen Absolutsensoren mit identischer Sende- und Empfangsspule kaum noch verwendet werden. Im Folgenden wird die Bezeichnung Absolutsensor für einen transformatorischen Sensor mit konzentrischer Spulenanordnung übernommen.

¹² Für eine Erklärung der Fouriertransformation siehe Kapitel 5.

Für die Nutzung der bildgebenden Wirbelstromprüfung zur Faserorientierungsmessung existiert eine Anzahl von Forschungsarbeiten, die in Tabelle 3-5 zusammengefasst sind. Alle bekannten Arbeiten sind hierin enthalten.¹³ Betrachtet man den damit vorliegenden Stand der Forschung, so ergeben sich mehrere Einschränkungen im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit:

1. Alle Arbeiten wurden an *2D-Prüfkörpern* durchgeführt. Eine bildgebende 3D-Wirbelstromprüfung mit Faserorientierungsmessung ist nicht Stand der Technik.
2. Die Faserorientierungsmessung erfolgte mit einer einzigen Ausnahme immer an *großflächigen Auswerteausschnitten* ($\geq 100 \times 100 \text{ mm}^2$). Für eine Messung der Faserorientierung an komplexen, mehrfach gekrümmten Bauteilen sind wesentlich kleinere Auswerteausschnitte notwendig, um eine übermäßige Glättung der Faserorientierungen zu vermeiden. Über die Eignung des verwendeten Auswertalgorithmus (in allen Fällen: Fouriertransformation) für kleine Auswerteausschnitte liegen keine Kenntnisse vor.
3. Alle dargestellten Arbeiten sind *exemplarisch*. Eine systematische Evaluierung der freien Messparameter – Spulenordnung, Spulendurchmesser, Prüffrequenz – im Hinblick auf die Zielwerte der Faserorientierungsmessung (Messgenauigkeit und bestimmbare Lagenanzahl) ist nicht bekannt.
4. Keine der bekannten Arbeiten liefert eine Aussage über die *Messunsicherheit* der jeweils durchgeführten Faserorientierungsmessung.
5. Alle Arbeiten beschäftigen sich mit der Messung von *maximal vier verschiedenen Orientierungen*.

Der durch diese Arbeiten gebildete Stand der Forschung zur Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung kann somit erste Orientierungen für eine 3D-Faserorientierungsmessung geben, für die allerdings ein deutlicher Entwicklungsbedarf zu verzeichnen ist.

Tabelle 3-5: Stand der Forschung zur Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung

Quelle	Sensor	Prüffrequenz (MHz)	Lagenaufbau	Auswerteausschnitt (mm ²)
Mook 2001 [175]	Differenz*	10	[+45/-45] _n	13x13
Grimberg 2001 [182]	Absolut D=3,5 mm	2,2	[-45 ₂ , 45 ₂] _s [-45 ₂ , 0 ₂ , +45 ₂] _s	120x120
Schulze 2012 [183]	Halbtransmission	k.A.	[0/45/-45]	Ca. 200x200
Heuer 2015 [184]	k.A.	k.A.	5 Lagen	300x300
Kosekugawa 2016 [185]	Halbtransmission D = 0,7 mm**	2	[+45/0/-45/90] ₃] _s	20x20
Cheng 2017 [176]	Halbtransmission, D = 1 mm	0,250	[90] ₈ [45/0/-45/89] _{2s}	Ca. 100x100

* Wahrscheinlich Halbtransmission

** Zwei Empfangsspulen in Differenz innerhalb der Sendespule (D = 4 mm) positioniert

¹³ Über die dargestellten Arbeiten hinaus existiert eine größere Zahl von Arbeiten, die sich ausschließlich mit der Detektion und Identifikation *lokaler Fehler* beschäftigen, und auf die an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll.

3.5.2 Faserorientierungsmessung mit Rotationswirbelstromprüfung

Während die bildgebende Wirbelstromprüfung darauf beruht, die Verläufe der Carbonfäden durch Messung der lokal variierenden Leitfähigkeit sichtbar zu machen, beruht die *Rotationswirbelstromprüfung* auf der *Anisotropie der Wirbelstromausbreitung*. Die von der Sendespule induzierten Wirbelströme breiten sich in jeder Einzellage des Carbonfasermaterials elliptisch in Faserrichtung aus (vgl. Kapitel 0). Wird die Sendespule an einem Messpunkt aufgesetzt, und eine zweite Spule als Empfangsspule um die Sendespule rotiert, so wird die Empfangsspule genau dann die höchste Impedanzänderung registrieren, wenn sich die Achse zwischen Sende- und Empfangsspule genau in Faserrichtung befindet (Abb. 3-14 links).

Anstelle eines Sensors mit getrennten Sende- und Empfangsspulen (Halbtransmissionssensor) kann für die Messung auch eine lange Rechteckspule verwendet werden, die ebenfalls die höchste Impedanz misst, wenn sie in Faserrichtung orientiert ist. Der Anteil der induzierten Wirbelströme, der sich unter der Rechteckspule selbst befindet, ist dann am größten (Abb. 3-14 rechts). Die Rechteckspule fungiert hierbei als Absolutsensor (kombinierter Sender und Empfänger).

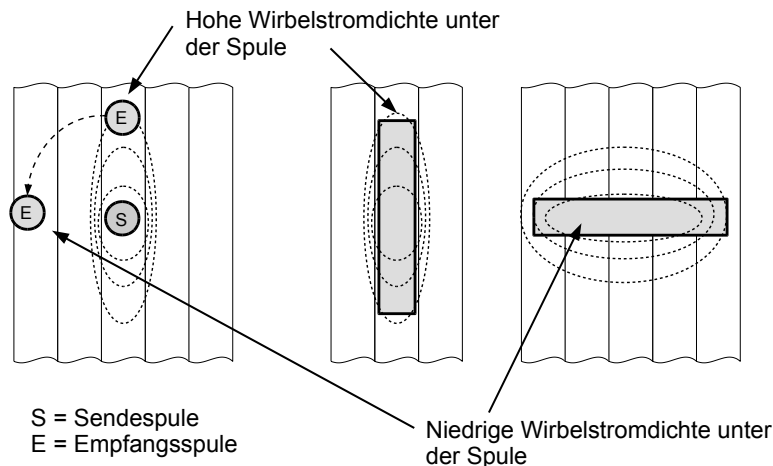


Abb. 3-14: Prinzip Rotationswirbelstromprüfung mit Halbtrennungssensor und mit Rechteckspule

Abb. 3-15 zeigt das Ergebnis der Rotationsprüfung für ein UD-Laminat (links) und einen quadraxialen Laminataufbau (rechts). Die Faserorientierungen der einzelnen Lagen sind hierbei als lokale Maxima der gemessenen Impedanz erkennbar.¹⁴

Da sich die Wirbelströme der einzelnen Lagen von der Sendespule aus sternförmig ausbreiten, steigt die Richtungsauflösung bei der Rotationsmessung mit steigendem Abstand zwischen Sende- und Empfangsspule. Wird er zu klein gewählt, überlappen sich die sternförmigen Wirbelstromausbreitungen der Lagen unter der Empfangsspule und ihre Maxima sind im Polardiagramm nicht trennbar. Eine Vergrößerung des Abstands zwischen Sende- und Empfängerspule verbessert zwar die Unterscheidbarkeit der Maxima (Winkelauflösung) verringert allerdings auch die von der Empfängerspule gemessene Signalamplitude, was dazu führt, dass tiefere Lagen nicht mehr

¹⁴ Rotationsprüfungen von UD-Gelegen, wie auch das dargestellte, zeigen senkrecht zur Faserorientierung Nebenmaxima (in Abb. 3-15 links in horizontaler Richtung), die laut Lange 1994 [162] durch den kapazitiven Strompfad senkrecht zu den Fasern zustande kommen, da sie bei höheren Messfrequenzen stärker werden und bei Vergleichsmessungen an isolierten parallelen Kupferdrähten nicht auftreten. Wenn neben den UD-Lagen weitere Lagenorientierungen auftreten, verschwinden diese Nebenmaxima.

abgebildet werden. Cheng 2014 [167] gibt als Minimum für die Rotationsprüfung einen Spulenabstand von 10 mm an, Lange 1993 [162] empfiehlt als Optimum einen Spulenabstand von 12 mm. Analoge Verhältnisse gelten auch bei der Rotationswirbelstromprüfung mit Rechteckspulen als Absolutensoren: je größer das Verhältnis von Spulenlänge zu Spulenbreite L/W ist, desto richtungsempfindlicher sind sie, zugleich sinkt die absolute Empfindlichkeit, so dass tiefer liegende Lagen nicht mehr abgebildet werden [186].

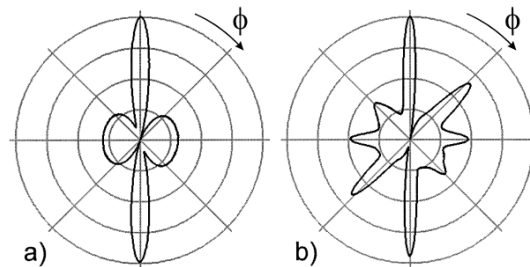


Abb. 3-15: Ergebnis der Rotationsprüfung für ein UD-Laminat (links) und ein [0/45/90/-45]-Laminat (rechts)
(Bildquelle: Mook 2001 [185])

Tabelle 3-6 listet alle bekannten Arbeiten zur Faserorientierungsmessung mit Rotationswirbelstromprüfung auf.

Tabelle 3-6: Stand der Forschung zur Faserorientierungsmessung mit Rotationswirbelstromprüfung

Quelle	Sensor	Spulenabstand* (mm)	Prüffrequenz (MHz)	Ergebnisse
Owston 1976 [160]	Rechteckspule 60 mm x 10 mm	-	28	Starke Abhängigkeit der Kurvenform von Aufsetzpunkt
Prakash 1976 [161]	Rechteckspule 14 x 1 mm	-	Ca. 15	Wirbelstromdichte steigt mit Zahl der Lagenkreuzungen
de Goeje 1992 [166]	Halbtransmission und Transmission	k.A.	50	
Lange 1994 [162]	Halbtransmission	12	10	Winkeldifferenz < 15° nicht aufgelöst
Mook 2001 [175]	Halbtransmission	12	10	
Yin 2009 [187]	Halbtransmission	20	0,8	Ähnlich Yin 2010
Yin 2010 [188]	Halbtransmission	20	5	
Dingwall 1976 [189]	Rechteckspule	-	10	Maxima asymmetrisch
Cheng 2014 [167]	Halbtransmission	10	0,25	
Kosekugawa 2016 [185]	Halbtransmission **	2	2	Winkeldifferenz < 45° nicht aufgelöst
Nonn 2016 [49]	Halbtransmission	7	10	Winkeldifferenz < 45° nicht aufgelöst

* Bei Halbtransmissionssensoren

** Zwei Empfangsspulen in Differenz innerhalb der Sendespule ($D = 4$ mm) positioniert

Überblickt man den durch diese Arbeiten gebildeten gegenwärtigen Forschungsstand, so sind dieselben Einschränkungen wie bei der bildgebenden Wirbelstromprüfung zu konstatieren:

1. Alle Arbeiten wurden an *2D-Prüfkörpern* durchgeführt. Eine Rotationswirbelstromprüfung

- an 3D-Prüfkörpern ist nicht Stand der Technik.
2. Alle dargestellten Arbeiten sind *exemplarisch*. Eine systematische Evaluierung der freien Messparameter – hier: Spulenabstand, Spulendurchmesser – im Hinblick auf die Zielwerte der Faserorientierungsmessung (Messgenauigkeit und bestimmbare Lagenanzahl) ist nicht bekannt.
 3. Keine der bekannten Arbeiten liefert eine Aussage über die *Messunsicherheit* der jeweils durchgeführten Faserorientierungsmessung.

Auch der Stand der Forschung bei der Rotationswirbelstromprüfung kann daher aktuell lediglich das Potenzial für eine Messung der 3D-Faserorientierung aufzeigen, aber keine Lösung geben.

3.5.3 Faserwelligkeitsdetektion durch Messung der Sekundärfeldsymmetrie

Neben den beiden Messprinzipien der bildgebenden und der Rotationswirbelstromprüfung ist an dieser Stelle das von Mizukami [190–192] entwickelte Verfahren zur *Detektion lokaler Welligkeiten* zu erwähnen. Eine lange, vertikal stehende Sendespule wird exakt in Richtung der Fasern ausgerichtet (Abb. 3-16 links). Wenn keine Faserwelligkeit vorliegt, verlaufen die Wirbelströme in einem linearen Band unter der Sendespule. Der magnetische Fluss durch eine unter der Sendespule befindliche, horizontal liegende Empfangsspule ist dann Null, da sich die eintretenden und austretenden Magnetfeldlinien aufheben. Werden Sende- und Empfangsspule über eine Faserwelligkeit bewegt, so wird der Verlauf der Wirbelströme verzerrt (Abb. 3-16 links) und der magnetische Fluss durch die Empfangsspule wird ungleich Null. Mizukami konnte zeigen, dass mit diesem Sensorprinzip Faserwelligkeiten von weniger als 3 mm Amplitude bis zur 18. Lage eines CFK-Laminats detektiert werden können (Abb. 3-16 rechts), während sie mit einem Halbransmissionssensor (Spulendurchmesser 7 mm) nicht detektierbar waren [192]. Bei der Prüfung von multidirektionalen Laminaten kann die zu prüfende Faserlage durch Orientierung der Sendespule parallel zu dieser Lage ausgewählt werden.

Diese Entwicklung zeigt beispielhaft, dass durch die Entwicklung angepasster, auf die Anisotropie der Carbonfasermaterialien zugeschnittene Sensoren ein großes Entwicklungspotenzial besteht. Für die hier anvisierte *Faserorientierungsmessung* ist dieses Verfahren jedoch nicht geeignet, da zwar eine Welligkeit in einer parallel zur Sendespule orientierten Lage detektiert wird, aber keine Messung der Faserorientierung erfolgt. Darüber hinaus ist eine Übertragung auf die Messung an komplexen, mehrfach gekrümmten 3D-Prüfkörpern schwer realisierbar, da der Sensor parallel zur Orientierung der jeweils auf Welligkeiten zu untersuchenden Lage ausgerichtet werden muss. Diese Orientierung ist aber in drapierten 3D-Geometrien unbekannt und lokal veränderlich, so dass eine Analyse schwer möglich ist.

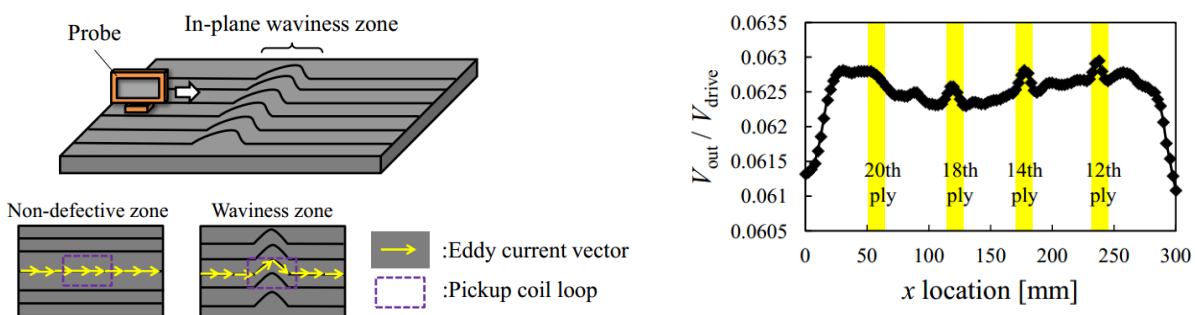


Abb. 3-16: Mizukami-Sensor: Veränderung des magnetischen Flusses durch die Empfangsspule durch Faserwelligkeiten (links), Signal für Faserwelligkeiten in verschiedenen Tiefenlagen (rechts) (Bildquelle: Mizukami 2016 [192])

3.6 Forschungsstand zur 3D-Wirbelstromprüfung

Für die Prüfung *einfach gekrümmter*, sogenannter *2,5-dimensionaler* Prüfkörper wurden verschiedene Prüfsysteme entwickelt.¹⁵ Salski 2016 [193] stellt einen Array-Scanner vor, der mit einem flexiblen Sensorarm ausgestattet ist und somit einfach gekrümmte Oberflächen erfassen kann (Abb. 3-17 links). Als Sensoren werden gedruckte Planarspulen verwendet. Da die einzelnen Spulen bei doppelt gekrümmten Oberflächen einen unterschiedlichen Kippwinkel zur Oberfläche besitzen, ist eine nachträgliche Angleichung der Messsignale durch Mittelwertbildung notwendig.

Ein von der Firma Suragus vertriebener 2,5D-Scanner (Abb. 3-17 rechts) verfügt über einen Kippmechanismus der z-Achse, so dass ebenfalls die Prüfung leicht gekrümmter Bauteile möglich ist. Beide Systeme erweitern die Prüfbarkeit für 2,5-dimensionale Prüfkörper, erlauben aber keine Prüfung komplexer, mehrfach gekrümmter Oberflächen. Da bei der Drapierung von textilen Halbzeugen zu 2,5-dimensionalen, vollständig abwickelbaren Prüfkörpern keine Scherung auftritt, somit die ursprüngliche Faserorientierung des Halbzeugs erhalten bleibt, sind diese für die Faserorientierungsmessung nicht relevant.

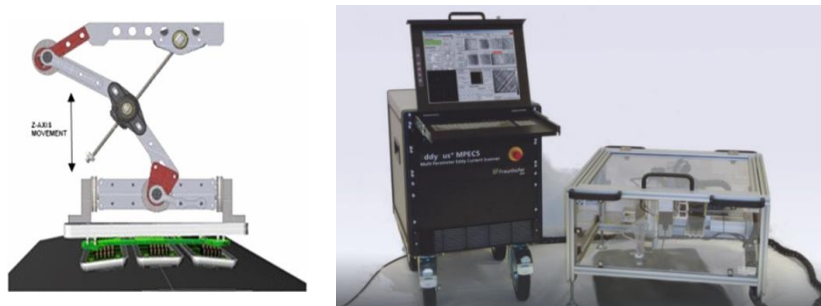


Abb. 3-17: 2,5D-Scanner: Salski 2016 [193], Fraunhofer IKTS [194]

Über diese 2,5-dimensionalen Systeme hinaus wurde am *Fraunhofer IKTS, Dresden* ein System entwickelt, das die Wirbelstromprüfung dreidimensionaler, mehrfach gekrümmter Oberflächen ermöglicht (Abb. 3-18). Hierzu wurde ein Wirbelstromsensor in einen Industrieroboter integriert. Mithilfe einer Streifenlichtprojektion wird die Oberfläche des Prüfkörpers erfasst, anschließend erfolgt mithilfe einer integrierten Software eine Bahnplanung, bei der parallele Prüfbahnen auf die Oberfläche projiziert werden. Nach einer Kollisionsprüfung in einer Robotersimulation kann der Prüfvorgang durchgeführt werden. Die Darstellung der Messergebnisse erfolgt über eine Software.

Diese Arbeiten sind von Bedeutung, da hiermit erstmals der Nachweis erbracht wurde, dass eine Darstellung der Fadenverläufe auch in mehrfach gekrümmten 3D-Preforms und CFK mit bildgebender Wirbelstromprüfung möglich ist. Wesentliche Einschränkungen gegenüber der Zielstellung einer automatischen Faserorientierungsmessung sind jedoch zum einen, dass die Bahnplanung analog zum 2D-Fall durch Parallelprojektion der Bahnen auf die Oberfläche erfolgt. Komplexe Bauteile mit schrägen oder senkrechten Seitenflächen sind damit nicht erfassbar. Zum anderen wird keine Faserorientierungsmessung durchgeführt. Ein Verfahren zur automatischen Messung der Faserorientierung aus den im 3D-Wirbelstrombild erkennbaren Fadenverläufen ist nicht vorhanden.

¹⁵ Eine einfach gekrümmte Fläche zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Oberfläche in die Ebene abwickelbar ist, ein typisches Beispiel ist ein Zylindermantel. Eine doppelt gekrümmte Fläche, z.B. eine Halbkugel, ist hingegen nicht abwickelbar.

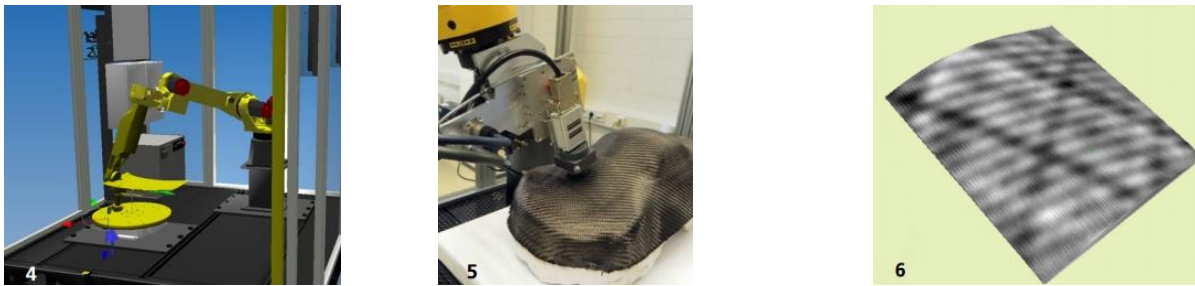


Abb. 3-18: Bahnplanung, Messung und Ergebnisdarstellung mit dem Fraunhofer 3D-Wirbelstromsystem (Quelle: Fraunhofer IKTS [195])

Auch bezüglich des derzeitigen Stands der Technik bei der 2,5D- und 3D-Wirbelstrommessung ist daher festzuhalten, dass für das Ziel einer automatisierten Faserorientierungsmessung mehrlagiger, komplex geformter Prüfkörper ein deutlicher Forschungsbedarf besteht.

3.7 Forschungsbedarf, Verfahrensauswahl und Zielsetzung

Die vorgestellten Arbeiten zur bildgebenden und Rotationswirbelstromprüfung zeigen deutlich das *große Potenzial* der Wirbelstromprüfung zur zerstörungsfreien Faserorientierungsmessung in mehrlagigen Prüfkörpern. Eine 3D-Faserorientierungsmessung ist jedoch für keines der beiden Verfahren Stand der Technik. Ebenso besteht zwischen den vorhandenen 2,5D- und 3D-Messsystemen und der für eine Faserorientierungsmessung notwendigen Abbildung komplexer, mehrfach gekrümmter 3D-Prüfkörper ein deutlicher Forschungsbedarf.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit: „*kann die Wirbelstromprüfung die Faserorientierung in großen, dreidimensionalen, mehrlagigen und komplex gekrümmten CFK-Strukturen mit der geforderten Messgenauigkeit bestimmen?*“, wird somit durch den Stand der Technik *nicht* beantwortet. Weder ist es bisher gelungen, die Faserorientierungsmessung an dreidimensionalen Prüfkörpern durchzuführen, noch sind systematische Untersuchungen zur erreichbaren Messgenauigkeit bekannt. Für die Entwicklung eines Verfahrens zur zerstörungsfreien Messung der Faserorientierung an 3D-Prüfkörpern ist daher über den Forschungsstand deutlich hinauszugehen.

In einem ersten Schritt ist hierfür eines der beiden Verfahren für die Entwicklung eines 3D-Messprozesses auszuwählen. Tabelle 3-7 vergleicht die beiden Verfahren der Rotations- und der bildgebenden Wirbelstromprüfung hinsichtlich der Verfahrensparameter.

Tabelle 3-7: *Verfahrensvergleich bildgebende und Rotationswirbelstromprüfung*

Verfahren	Bildgebende Wirbelstromprüfung		Rotationswirbelstromprüfung	
Messverfahren	o	Bildauswertung aus Wirbelstrombild	+	Direkt
Darstellung	+	3D-Bild der Fadenverläufe	-	Keine Visualisierung
Messung an Radien	+	Möglich	-	Nicht möglich
Robustheit	+	Hoch	-	Messergebnis abhängig vom Aufsetzpunkt (Tabelle 3-6)
Zeitbedarf	-	Hoch	+	Gering

Für die *bildgebende Wirbelstromprüfung* liegen die Vorteile in der Erzeugung eines 3D-Bilds der Fadenverläufe, der erwarteten Messbarkeit der Faserorientierung auch an gekrümmten Bauteilbereichen (Radien) sowie der erwarteten hohen Robustheit. Hervorzuheben ist insbesondere die Erzeugung eines 3D-Bilds der Fadenverläufe, das eine intuitive Visualisierung der Ergebnisse der Faserorientierungsmessung gestattet: die gemessenen Faserorientierungen können direkt mit dem im Wirbelstrombild erkennbaren Faserverläufen verglichen werden. Die *Rotationswirbelstromprüfung* bietet eine solche Visualisierung nicht, Informationen über den tatsächlichen Faserverlauf können nur durch ein Referenzmessverfahren beschafft werden, was eine deutliche Schwierigkeit darstellt, da mit optischen Verfahren nur die oberste Lage analysiert werden kann. Darüber hinaus besitzt die Rotationswirbelstromprüfung die Einschränkung, dass für eine ausreichende Auflösung der verschiedenen orientierten Lagen Spulenabstände zwischen Sende- und Empfängerspule von > 10 mm als notwendig angesehen werden (vgl. Kapitel 3.5.2), woraus ein relativ großer Sensor resultiert. Wird dieser Sensor an einem gekrümmten Bauteilbereich aufgesetzt und rotiert, so verändern sich Abstand und Winkel der Empfangsspule zur Oberfläche bei der Drehung (Liftoff/Verkipfung), und dieser Liftoff-Effekt überlagert das eigentliche Messsignal im Polardiagramm. Es ist daher zu erwarten, dass die Messung auf gering gekrümmte Bereiche beschränkt werden muss, was eine erhebliche Einschränkung darstellt. Nichtsdestotrotz besitzt die Rotationswirbelstromprüfung den Vorteil einer deutlich geringeren Messzeit, da die lokale Messung der Faserorientierung eine einzige Sensordrehung erfordert, während die bildgebende Wirbelstromprüfung die Erfassung eines ganzen Oberflächenausschnitts benötigt. Angesichts der erwarteten deutlichen Einschränkungen bei der Rotationswirbelstromprüfung wird die verringerte Messzeit als von untergeordneter Bedeutung angesehen. *Daher wird für die folgende Entwicklung eines 3D-Messverfahrens das Verfahrensprinzip der bildgebenden Wirbelstromprüfung ausgewählt.*

3.8 Aufbau der Arbeit

Ausgangspunkt für die 3D-Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung ist die Entwicklung einer Roboter-Bahnplanung zur vollständigen Erfassung einer 3D-Oberfläche mit einem Wirbelstromsensor (*Kapitel 4*). Anders als bei 2D- und 2,5D-Messungen ist es nicht ausreichend, ein Gitter von Bahnen auf die Oberfläche zu projizieren, vielmehr muss ein Verfahren entwickelt werden, das einen gleichmäßigen Bahn- und Messpunktabstand auch für mehrfach gekrümmte Oberflächen gewährleistet. Die umgesetzte Bahnplanung ermöglicht einen robotergeführten Messprozess, in dessen Ergebnis ein 3D-Wirbelstrombild der Oberfläche vorliegt.

Für die Messung der Faserorientierung aus den 3D-Wirbelstromdaten wird in *Kapitel 5* ein automatisches Bildverarbeitungsverfahren entwickelt. Dieses muss aus den 3D-Daten die lokale Faserorientierung ermitteln, was eine deutliche Erweiterung gegenüber dem Stand der Technik darstellt. Teil dieses Verfahrens ist eine automatische Aufbereitung der Wirbelstromdaten zur Maximierung des Kontrasts, da die Messung gegenüber bisherigen 2D-Messungen an deutlich kleineren Auswerteausschnitten erfolgt.

Anschließend erfolgt in *Kapitel 6* die experimentelle Untersuchung der Messunsicherheit, wofür 2D-Gelegestapel verwendet werden, die eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gestatten.

Kapitel 7 stellt die Verfahrenserprobung an mehrlagigen Preforms und CFK dar, bevor in *Kapitel 8* die Integration der Wirbelstrom-Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess erfolgt.

Abb. 3-19 fasst den Aufbau dieser Arbeit zusammen.

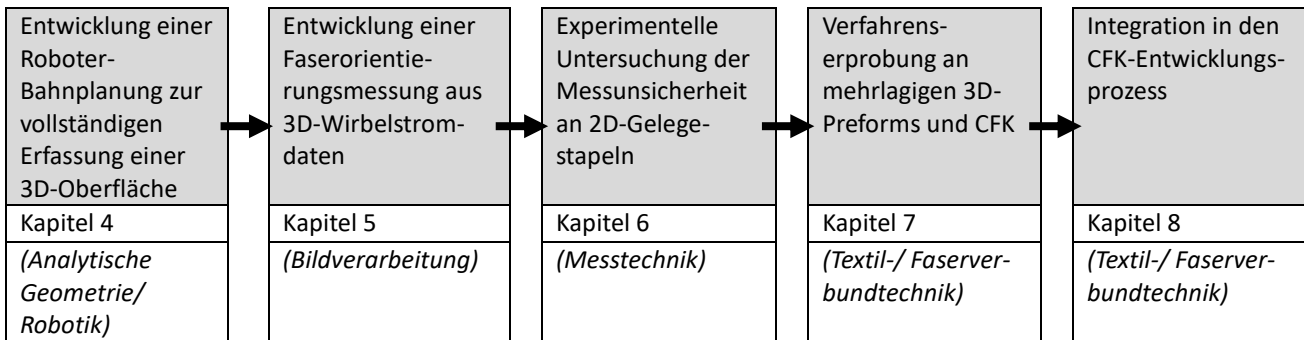


Abb. 3-19: Aufbau der Arbeit

4 Entwicklung einer Roboter-Bahnplanung zur vollständigen Erfassung einer 3D-Oberfläche

4.1 Abgeleitete Anforderungen aus dem Messprozess

Die Faserorientierungsmessung durch bildgebende Wirbelstromprüfung beruht auf der Abbildung der Verläufe der einzelnen Carbonfäden im 3D-Wirbelstrombild. Für die Erzeugung eines 3D-Wirbelstrombildes der Oberfläche muss der Wirbelstromsensor durch einen Industrieroboter in mehreren Bahnen über die dreidimensionale Oberfläche bewegt werden, wobei diese Bahnen die Oberfläche vollständig abdecken müssen. Zwei grundlegende Anforderungen ergeben sich dabei aus dem Messprozess:

1. Die gesamte Oberfläche muss mit einem Netz von Messpunkten gleicher Dichte (gleichem Oberflächenabstand zu benachbarten Messpunkten) erfasst werden. Da der verwendete Industrieroboter die Messpunkte in einzelnen Bahnen abfährt, ergibt sich, dass der Abstand benachbarter Bahnen auf der Oberfläche ein Maximum (Messauflösung) nicht überschreiten darf.
2. Da jedes Abheben des Sensors von der Oberfläche ebenso wie jedes Verkippen des Sensors in das Messsignal eingeht (vgl. Abschnitt 3.1), muss der Sensor so geführt werden, dass er an allen Messpunkten einen *konstanten Abstand* und eine *senkrechte Orientierung* zur Oberfläche besitzt.

Da die Geometrie des Prüfkörpers i.d.R. nicht analytisch darstellbar ist, müssen die einzelnen Bahnen als räumliche Kurven (Splines) vorgegeben werden. Da alle gängigen Industrieroboter während der Fahrt eine Interpolation zwischen einer Folge von abzufahrenden Stützpunkten selbst vornehmen können, ist es für die Bahnplanung ausreichend, die einzelnen Messbahnen als Folge von *Stützpunkten* auf der Oberfläche vorzugeben. Während der *Abstand der Bahnen* den geforderten maximalen Abstand der Messpunkte nicht überschreiten darf, ist der *Abstand der Stützpunkte* hingegen durch die Forderung definiert, die Krümmung der 3D-Oberfläche hinreichend genau abzubilden. Der Stützpunktabstand kann daher i.d.R. größer als der Bahnabstand (Messauflösung) gewählt werden. Tabelle 4-1 quantifiziert diese Anforderungen.

Tabelle 4-1: Bahnplanungsparameter, Anforderungen und Werte

Bahnplanungsparameter	Anforderung	Wert in mm
Bahnabstand (Messauflösung)	Abbildung eines Carbonfaserbündels (ca. 2-5 mm Breite) durch mindestens 4 Messpunkte	0,5
Stützpunktabstand	Abbildung eines CFK-typischen Radius von 20 mm mit einer maximalen Winkelabweichung von 5°	3,5

4.2 Definition der 3D-Oberfläche als Dreiecksnetz

Die Repräsentation der 3D-Oberfläche erfolgt als approximiertes Dreiecksnetz (Triangulation). Dieses ermöglicht zum einen die Repräsentation von nicht-eindeutigen (d.h., nicht als Funktion $z = f(x,y)$ darstellbaren) Oberflächen mit senkrechten Kanten und Hinterschnitten, zum anderen eine schnelle Berechnung grundlegender Oberflächenoperationen (Schnittpunkt Gerade/Oberfläche, Normalenvektor, Voranschreiten um definierte Bogenlänge auf der Oberfläche). Durch Vorgabe einer ausreichend kleinen Dreiecksgröße können auch stark gekrümmte 3D-Oberflächen hinreichend genau abgebildet werden.

Als Datenformat für den Import aus CAD-Programmen ist das Stereolithographie-Format (Dateiendung .stl) geeignet, das die Oberfläche eines Volumenkörpers durch ein Netz von Dreiecken definiert. Schnittstellen zum Export ins .stl-Format sind in allen verbreiteten CAD-Programmen enthalten. Abb. 4-1 zeigt beispielhaft das CAD-Modell für ein komplexes CFK-Bauteil („Federdom“) und ein Detail des Dreiecksnetzes der .stl-Datei. Das Bauteil ist mehrfach gekrümmt und besitzt mehrere fast senkrecht stehende Flanken, so dass eine entsprechende 3D-Bahnplanung erforderlich ist.

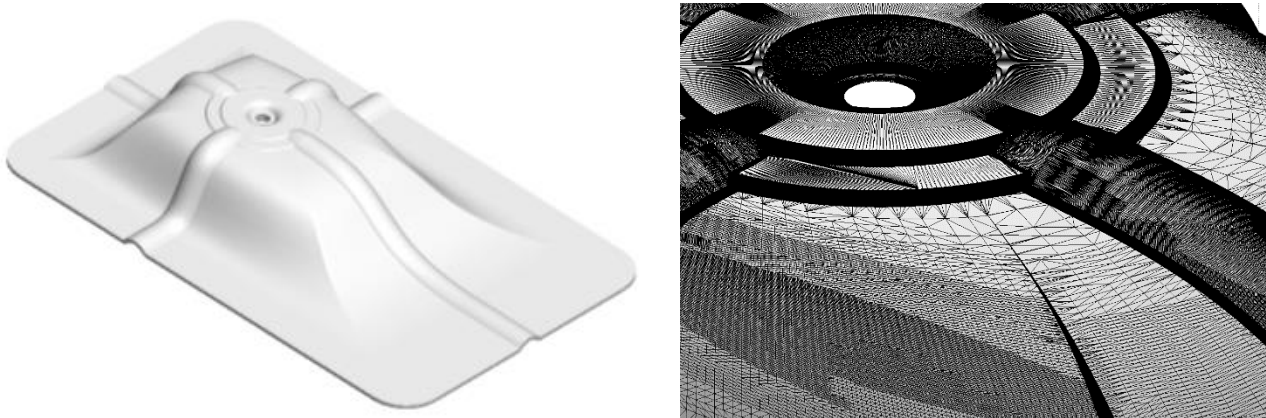


Abb. 4-1: CAD-Modell und Dreiecksnetz des Bauteils „Federdom“

4.3 Vollständige Erfassung der Oberfläche

4.3.1 Berechnung der Stützpunkte und Startpunkte

Für die vollständige Erfassung einer 3D-Oberfläche mit Bahnen existiert eine prinzipiell unendliche Vielfalt. Je nach Prüfkörpergeometrie können z.B. gerade, kreis- oder spiralförmige oder beliebig anders geformte Bahnen vorteilhaft sein. Da die zu entwickelnde Bahnplanung allerdings auf jede unbekannte Oberflächengeometrie übertragbar sein muss, wird ein Verfahren angestrebt, bei dem die Oberfläche durch eine Anzahl möglichst geradlinig verlaufender Bahnen abgedeckt wird. Hierzu sind zwei Strategien möglich:

Die *erste Strategie* beruht auf der Vorgabe der Startpunkte der einzelnen Bahnen und des ersten Bahnvektors. Die Bahnen werden dann so berechnet, dass sie einer vorgegebenen Richtung auf der Oberfläche folgen (Verfahren 1, Abb. 4-2 links). Auf der gekrümmten 3D-Oberfläche besitzen die Bahnen, abhängig von der Oberflächenkrümmung, jedoch einen vom vorgegebenen Bahnabstand verschiedenen Oberflächenabstand, so dass zusätzliche *Füllbahnen* (rote Linien in Abb. 4-2)

eingefügt werden müssen, um den vorgegebenen Bahnabstand nicht zu überschreiten.¹⁶

Bei der *zweiten Strategie* wird anstelle des Bahnvektors der Verlauf *der ersten Bahn* auf der Oberfläche vorgegeben. Die Stützpunkte der folgenden Bahn werden so berechnet, dass sie einen konstanten Abstand zu den Stützpunkten der ersten Bahn besitzen (Verfahren 2, Abb. 4-2 rechts). Eine Oberflächenkrümmung macht auch hier zusätzliche Bahnen erforderlich, da lokal eine größere Fläche abgedeckt werden muss. Im Gegensatz zu Verfahren 1 werden die Füllbahnen allerdings *am Ende* der berechneten Bahnen platziert sind.

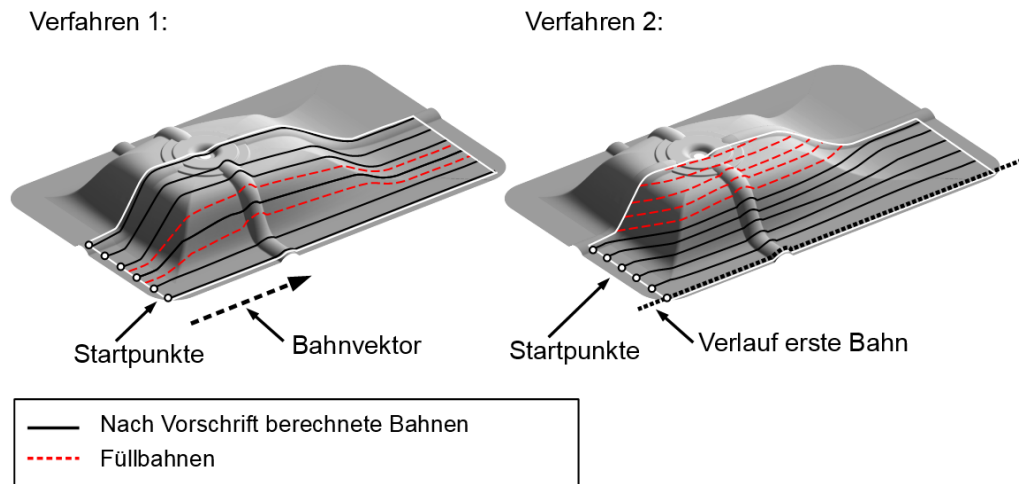


Abb. 4-2: Zwei Strategien zur Bahnplanung: Vorgabe Startpunkte + Bahnvektor (links), Vorgabe Startpunkte + Verlauf erste Bahn (rechts)

Beide Verfahren sind mathematisch ähnlich aufwändig, das erste Verfahren besitzt jedoch den Vorteil, dass die Start- und Endpunkte aller Bahnen auf einer Linie liegen und alle Bahnen ähnlich verlaufen, was die Kollisions- und Erreichbarkeitsprüfung vereinfacht, so dass die Entwicklung eines Verfahrens zur Oberflächenerfassung auf Grundlage der ersten Strategie erfolgt, d.h. durch Vorgabe von Startpunkten und Bahnvektor.¹⁷

Ausgangspunkt für die Berechnung jeder Bahn ist die Vorgabe eines Startpunktes und des für alle Bahnen gleichen Bahnvektors. Ausgehend von Startpunkt und Richtungsvektor, müssen für jede Bahn Stützpunkte im vorgegebenen Abstand auf der Oberfläche bestimmt werden, d.h. es muss um konstante Abstände auf der gekrümmten Oberfläche vorangeschritten werden. Für die Berechnung dieses Voranschreitens von Stützpunkt zu Stützpunkt wird die Definition der Oberfläche als Dreiecksnetz ausgenutzt. Abb. 4-3 illustriert den folgenden Algorithmus:

1. Finde das zugehörige Dreieck für den Startpunkt (weißer Punkt in Abb. 4-3). Projiziere den Bahnvektor in dieses Dreieck und füge ihn an den ersten Startpunkt an. Bestimme den Schnittpunkt des Bahnvektors mit der Dreieckskante („x“ in Abb. 4-3), auf die der Bahnvektor zeigt.
2. Finde das nächste Dreieck, das diese Schnittkante enthält. Projiziere den Bahnvektor in dieses Dreieck und füge ihn an den berechneten Schnittpunkt an. Finde den Schnittpunkt

¹⁶ Anstelle der Startpunkte werden in der späteren Umsetzung der erste Stützpunkt und ein Richtungsvektor, der die Richtung der weiteren Startpunkte angibt, vorgegeben. Die weiteren Startpunkte werden damit berechnet.

¹⁷ Eine Ausdetaillierung und Implementierung der zweiten Strategie für ein mathematisch ähnliches Problem, der Berechnung von Steuerungsdaten für ein textiles 3D-Flächenbildungsverfahren, ist in Bardl 2012 [32] dargestellt.

mit der nächsten Dreieckskante.

3. Prüfe, ob der zurückgelegte Weg den vorgegebenen Bahnabstand überschritten hat. Falls ja, liegt der nächste Stützpunkt zwischen dem letzten und dem aktuellen Schnittpunkt in diesem Dreieck und wird durch Teilung der Strecke berechnet (schwarzer Kreis in Abb. 4-3).
4. Wiederhole Schritte 1 bis 4, bis die Grenze des definierten Messbereichs oder der Oberfläche oder die vorgegebene Zahl an Bahnen erreicht ist. Die Grenze der Oberfläche ist erreicht, wenn in Schritt 2 kein zweites Dreieck gefunden wird, das dieselbe Dreieckskante enthält. Das aktuelle Dreieck liegt dann am Rand der Oberfläche.

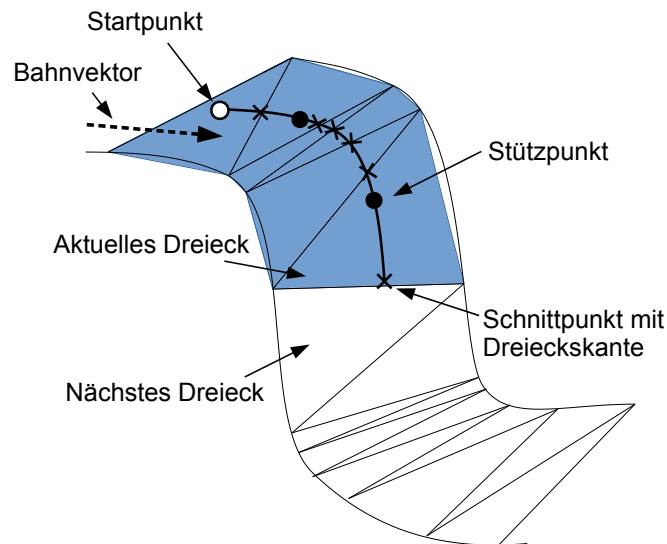


Abb. 4-3: Berechnung der Bahn durch Voranschreiten auf der Dreiecksfläche

Nach Berechnung aller Punkte einer Bahn erfolgt die Berechnung des nächsten Startpunkts. Hierfür wird derselbe Algorithmus wie zur Berechnung der Stützpunkte verwendet, allerdings wird anstelle des Bahnvektors der Richtungsvektor der Startpunkte, und anstelle des Stützpunktabstands auf der Bahn der Bahnabstand (Messpunktabstand) verwendet.

Anschließend ist für alle benachbarten Bahnen zu prüfen, ob sie an einer Stelle den vorgegebenen Abstand überschreiten und daher gemäß der ersten Bahnplanungsstrategie Füllbahnen eingefügt werden müssen. Hierfür wird für jeden Stützpunkt X_i einer Bahn dasjenige Segment der folgenden Bahn ermittelt, das diesem Stützpunkt am nächsten liegt (hier bezeichnet als Segment $X_{i1}X_{i2}$). Der senkrechte Abstand zur Nachbarbahn Δt ergibt sich dann aus dem Kreuzprodukt:

$$\Delta t = \left| \frac{X_{i2} - X_{i1}}{|X_{i2} - X_{i1}|} \times (X_i - X_{i1}) \right| \quad (4-1)$$

Abb. 4-4 illustriert dieses Vorgehen.

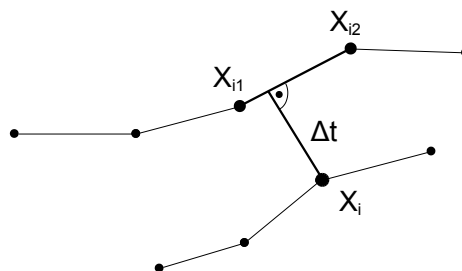


Abb. 4-4: Berechnung des Abstands zur Nachbarbahn

Ist der vorgegebene maximale Bahnabstand für mindestens einen der Stützpunkte überschritten, so wird eine Anzahl von Füllbahnen zwischen den beiden Bahnen eingefügt, so dass der maximale Bahnabstand für alle Stützpunkte gewährleistet ist. Die vollständige Erfassung der 3D-Oberfläche ist damit abgeschlossen.

Die Ergebnisse für die Bahnplanung sind in Abb. 4-5 für zwei relativ einfache und zwei komplexe 3D-Geometrien dargestellt: eine Halbkugel, eine Treppenstufe, den Federdom und eine Frontverkleidung eines Personenzugs.¹⁸ Mit dem entwickelten Verfahren ist eine vollständige Erfassung aller dargestellten Oberflächen möglich. Zu bemerken ist, dass die vollständige Erfassung der dargestellten Geometrien nur mit einem tatsächlich auf der 3D-Oberfläche voranschreitenden Bahnplanungsalgorithmus möglich ist, wie er hier entwickelt wurde. Eine Parallelprojektion von Bahnen auf die Oberfläche würde in den schrägen Flächen eine geringere Zahl von Stützpunkten oder Bahnen ergeben, an senkrechten Flächen würden keine Stützpunkte bzw. Bahnen platziert.

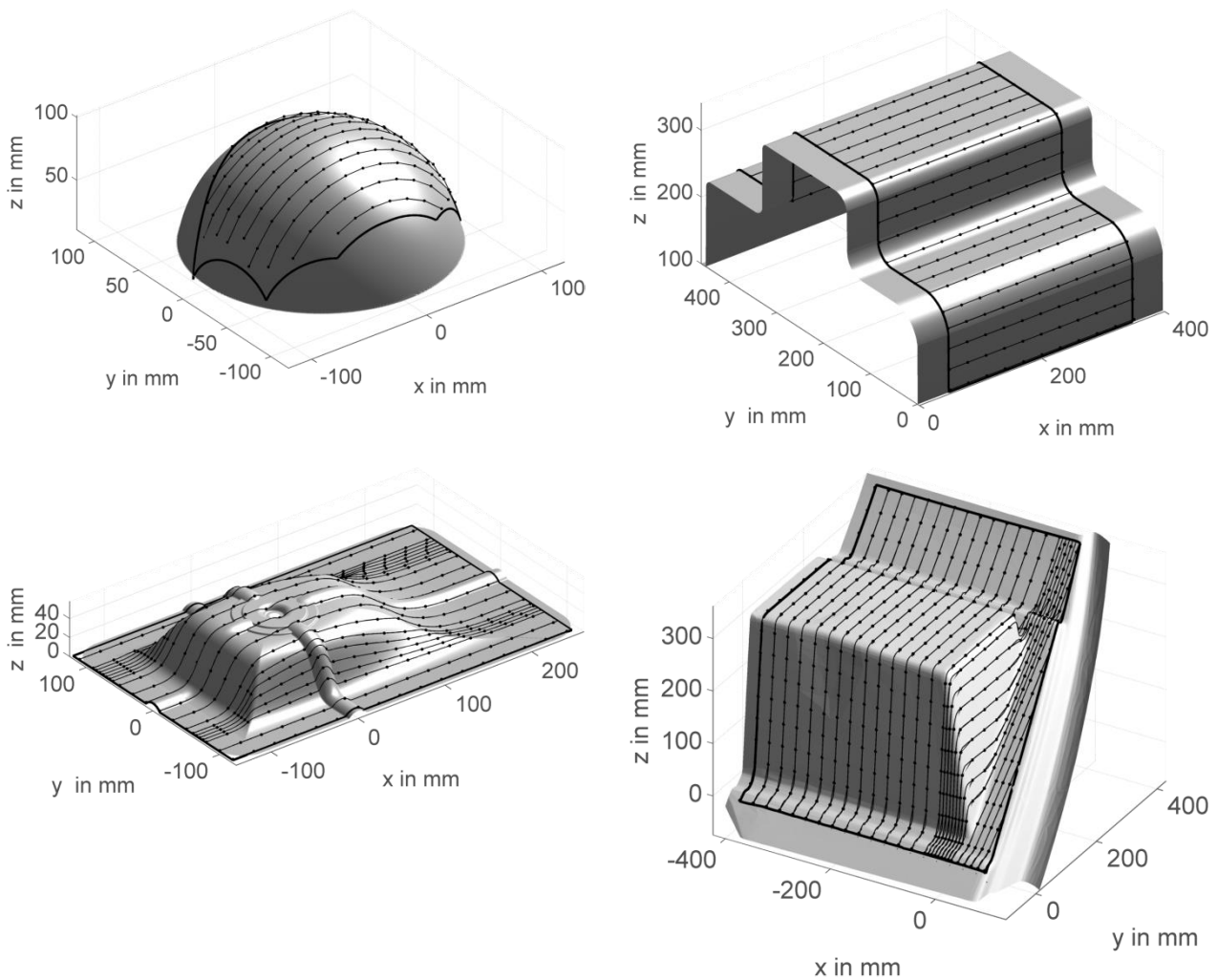


Abb. 4-5: Bahnplanung für einfache und komplexe Geometrien: Halbkugel, Treppe, Federdom, Frontverkleidung

¹⁸ Die dargestellte Halbkugel ist die Stempelgeometrie des in Kapitel 7 verwendeten Drapierprüfstands, der Federdom wird als CFK-Bauteil ebenfalls dort untersucht. Die Treppenstufe wurde im Projekt „Prozessintegrierte Wirbelstrom-Qualitätssicherung“ (IGF 18428 BG) untersucht, die Frontverkleidung im Projekt „Effiziente Preformfertigung“ (IGF 18809 BR). Auf die Treppe und die Frontverkleidung wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

4.3.2 Bahnplanung für gekrümmte Bauteile

Die Bahnplanung ist für beliebig geformte Prüfkörper einsetzbar. Für besondere Klassen von Oberflächen sind jedoch Erweiterungen sinnvoll, um nicht nur die Oberfläche vollständig zu erfassen, sondern auch den Verlauf der einzelnen Bahnen so zu gestalten, dass eine möglichst gleichförmige Sensorbewegung ermöglicht wird.

Eine besondere Klasse solcher Oberflächen sind gekrümmte Winkel, wie sie z.B. in Luftfahrtanwendungen häufig sind. Hier führt eine Bahnplanung mit geradlinigen Bahnen zu ungünstigen Bahnverläufen, wie in Abb. 4-6 dargestellt: wird der Bahnvektor senkrecht zur Kante definiert (Abb. 4-6 links), entsteht eine große Zahl sehr kurzer Bahnen, im Verlauf derer sich der Sensorwinkel jeweils um 90° ändert, was zu Liftoffproblemen führt und die Roboterfahrgeschwindigkeit reduziert. Wird der Bahnvektor in Richtung der Kante definiert (Abb. 4-6 rechts), so ergibt sich ebenfalls eine große Zahl sehr kurzer Bahnen mit starker Sensorrotation.

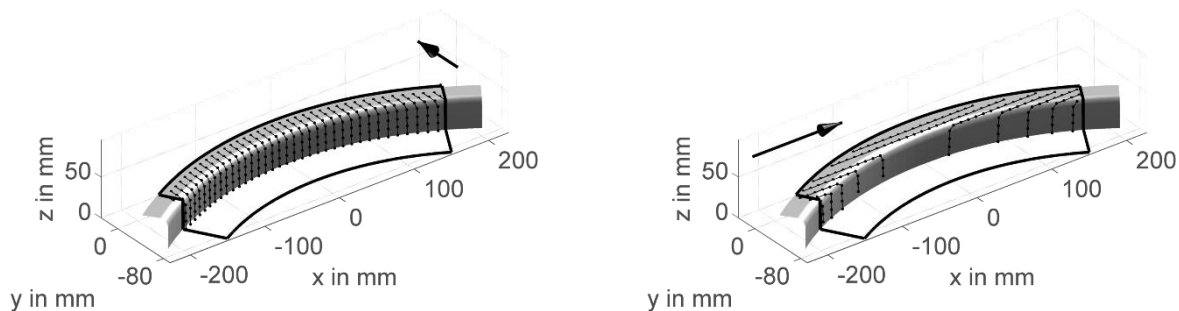


Abb. 4-6: Ungünstiger Bahnverlauf bei langen gekrümmten Bauteilen

Für die Berücksichtigung einer gleichmäßigen Roboterbewegung wurde daher eine Erweiterung der Bahnplanung von geradlinigen auf gekrümmte Bahnen eingeführt. Die Berechnung erfolgt in Zylinderkoordinaten (ρ , θ , z), die definiert sind als

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \theta \\ y &= \rho \sin \theta \\ z &= z \end{aligned} \tag{4-2}$$

Im Unterschied zur geradlinigen Bahnplanung in kartesischen Koordinaten wird der Bahnabstand nun als Radius bzw. z-Wert ($\Delta\rho$ bzw. Δz), der Stützpunktabstand als Winkel ($\Delta\theta$) vorgegeben. Das Resultat ist eine optimierte gekrümmte Bahngeometrie, bei der die Bahnen parallel zur Kante gefahren werden (Abb. 4-7). Der Kippwinkel des Sensors zur Bauteiloberfläche ist für jede Bahn konstant, wodurch Liftoffeffekte stark reduziert werden können und die Prüfdauer ebenso reduziert wird.

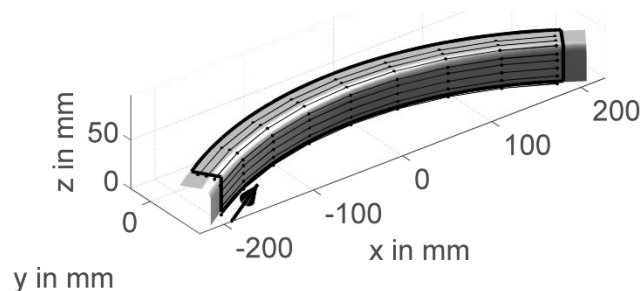


Abb. 4-7: Optimierter Bahnverlauf

4.3.3 Berechnung der Sensororientierung an den Stützpunkten

Da der Wirbelstromsensor bei der Bahnfahrt stets senkrecht zur Oberfläche geführt werden soll, muss neben den Koordinaten der Stützpunkte auch die lokale Normalenrichtung ermittelt werden. Diese Richtung ist vorgegeben durch den lokalen Normalenvektor X_n an jedem Stützpunkt, der sich aus dem Kreuzprodukt zweier Kanten des Dreiecks, in dem der jeweilige Stützpunkt X_n liegt, ergibt:

$$X_n = (X_2 - X_1) \times (X_3 - X_1) \quad (4-3)$$

X_1 , X_2 und X_3 sind hierbei die Eckpunkte des Dreiecks.

Für die Steuerung des in dieser Arbeit verwendeten Industrieroboters der Firma Kuka ist der Normalenvektor X_n in die Orientierungsdefinition durch die drei Eulerwinkel A , B , C zu überführen. Die drei Eulerwinkel A , B und C sind die mathematisch positiven Drehungen um die Z -, Y - bzw. X -Achse (Abb. 4-8) und geben die Orientierung des Werkzeuges (d.h., des Wirbelstromsensors) an einem Punkt eindeutig an. Die Drehung A um die z -Achse entspricht dabei der Drehung des Sensors um sich selbst und wird für die Wirbelstromprüfung

$$A = 0 \quad (4-4)$$

gesetzt, d.h., die Sensororientierung wird während der Fahrt nicht verändert. Die verbleibenden Drehungen B und C ergeben sich dann aus den Komponenten des Normalenvektors $X_n = (x_n, y_n, z_n)$ zu

$$B = \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{z_n} \right) \quad (4-5)$$

$$C = -\tan^{-1} \left(\frac{y_n}{\sqrt{x_n^2 + z_n^2}} \right). \quad (4-6)$$

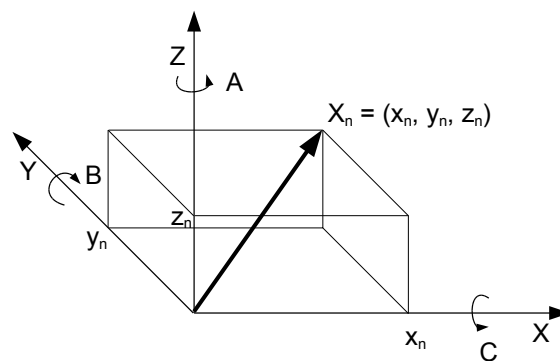


Abb. 4-8: Zusammenhang zwischen Eulerwinkeln und Normalenvektor

4.3.4 Anpassung der Verläufe der Eulerwinkel

Die im vorherigen Abschnitt dargestellte Bahnplanung berechnet die Eulerwinkel an allen Stützpunkten so, dass der Sensor senkrecht auf der Oberfläche steht. An Rippen mit kleinen Radien ($R < 20$ mm) führt diese senkrechte Sensorführung zu starken Oszillationen der Drehwinkel (Abb. 4-9). Für den Roboter wird eine sehr starke Achsrotation notwendig, die nur erreicht werden kann, wenn die Geschwindigkeit abgesenkt wird. Darüber hinaus besteht bei solchen engen Radien die Gefahr der Kollision (z.B. die blau eingezeichnete Bahn 3 an der Vertiefung in der Mitte).

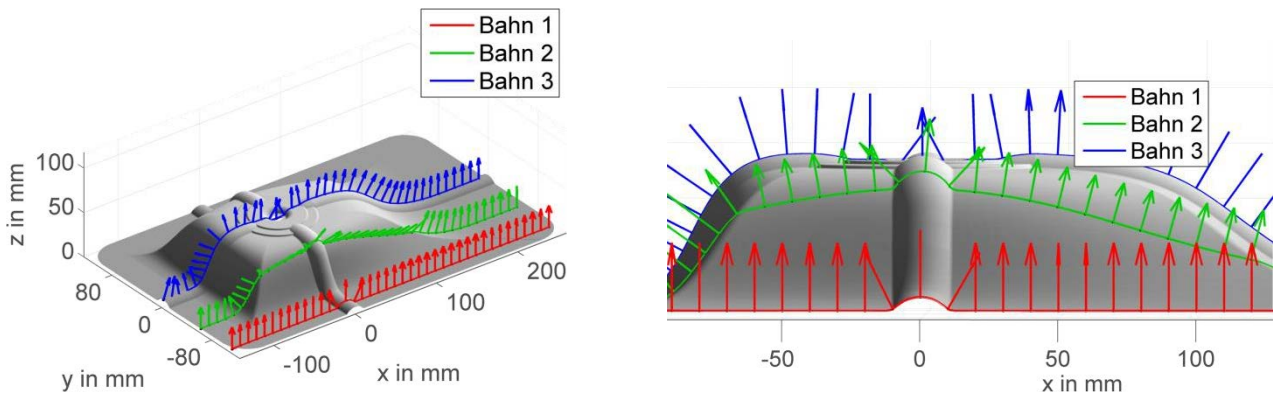


Abb. 4-9: Drei Beispielbahnen beim CFK-Bauteil „Federdom“

In Abb. 4-10 sind für die drei Beispielbahnen die Verläufe der A-, B- und C-Drehung dargestellt. Die starken Winkeloszillationen im Bereich der Querrippe (Bahnen 1 und 2, Bereich $x = 0 \pm 10$ mm), ebenso der mittleren Vertiefung (Bahn 3, Bereich $x = 0 \pm 20$ mm) sind deutlich erkennbar.

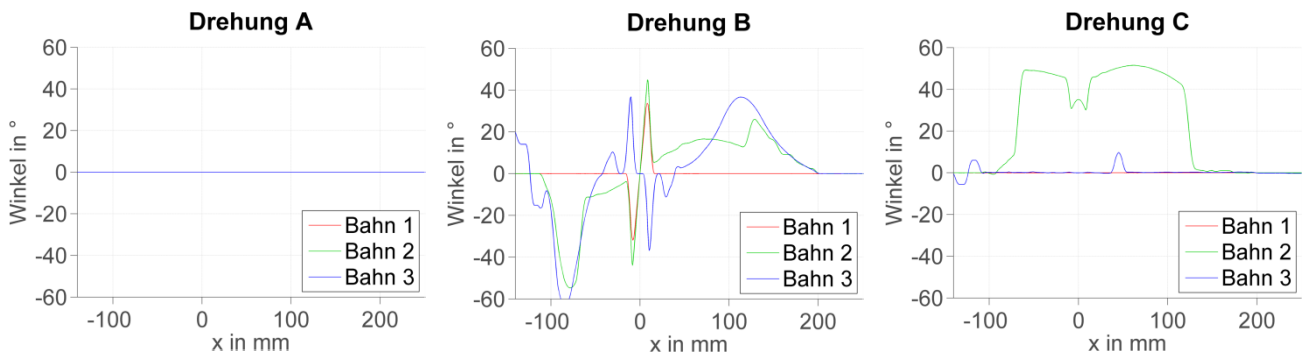


Abb. 4-10: Zum Teil ungünstige Eulerwinkel für die drei Beispielbahnen

Es wurde daher eine zusätzliche Option in die Bahnplanung eingeführt, die die Beschränkung der Eulerwinkel in ausgewählten Bereichen der Oberfläche erlaubt. Für den hier vorgestellten Prüfkörper „Federdom“ wurden die B-Drehungen an den Querrippen, die C-Drehungen an der Längsrippe, sowie die B- und die C-Drehungen im Bereich der zentralen Vertiefung auf Null gesetzt. Der Prüfvorgang ist dadurch kollisionsfrei möglich. Abb. 4-11 zeigt das Ergebnis der Winkelbeschränkung.¹⁹

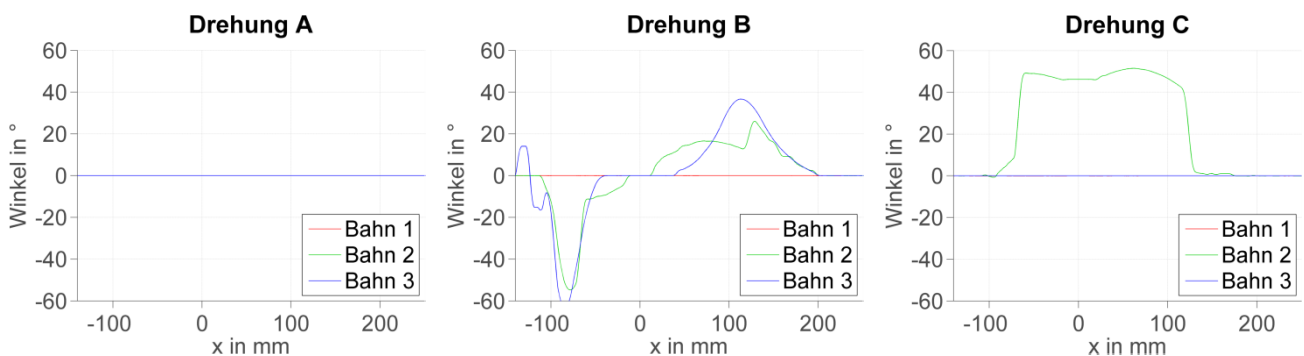


Abb. 4-11: Optimierte Eulerwinkel nach Winkelbeschränkung

¹⁹ Eine Verkippung des Sensors gegenüber der Oberfläche wird hierbei an den Rippen in Kauf genommen. Da ein teilweises Abheben des Sensors an diesen sehr kleinen Radien ($R < 15$ mm) sich in der Prüfpraxis als unvermeidbar erwiesen hat, ist die Beeinträchtigung der Ergebnisse gering.

4.4 Bauteilpositionierung und Robotersimulation

Die Koordinaten und Eulerwinkel an den Stützpunkten wurden in Bezug auf das Koordinatensystem des Prüfkörpers (Basiskoordinatensystem „base“) berechnet. Für die Durchführung der Prüfung ist der Prüfkörper, d.h. das Basiskoordinatensystem, relativ zum Roboter und dessen Roboterkoordinatensystem („robot“) zu positionieren. Erst danach kann die kollisionsfreie Erreichbarkeit aller Punkte überprüft werden. Diese Erreichbarkeit ist abhängig von der Geometrie des Sensors und des Roboters, insbesondere seiner Achslängen.

Um die Erreichbarkeit zu prüfen, wurde ein Matlab-Skript entwickelt, das aus den berechneten Stützpunkten sowie der gewählten Relativpositionierung des Basiskoordinatensystems ein ausführbares Roboterprogramm erzeugt, das an das Robotersimulationsprogramm *Kuka SimPro* übertragen wird. Treten bei der Roboterfahrt Winkelüberschreitungen der Roboterachsen (nicht erreichbare Punkte) oder Kollisionen auf, werden diese als Fehler angezeigt. In diesem Fall ist zu prüfen, ob eine Erreichbarkeit durch Veränderung der Bauteilposition möglich ist, andernfalls ist das Bauteil zu groß, um mit dem gegebenen Roboter in einem Schritt geprüft zu werden. Die Prüffläche muss dann in mehrere Teilflächen zerlegt werden, zwischen deren Prüfung das Bauteil neu positioniert wird. Abb. 4-12 zeigt die Robotersimulation für die zwei Beispielgeometrien aus Kapitel 7.

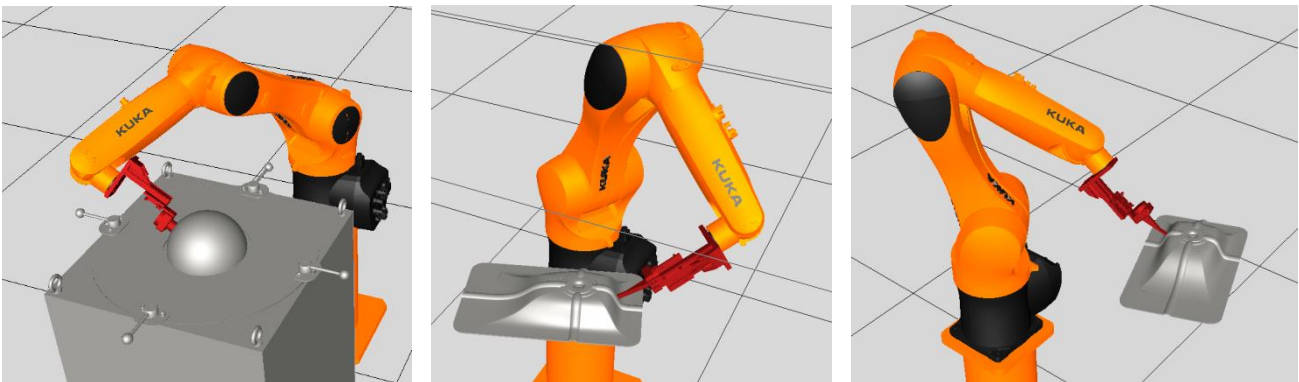


Abb. 4-12: Robotersimulationen mit „Kuka SimPro“

4.5 Roboterprogramm für den Wirbelstrom-Prüfvorgang

Das an die Robotersimulation übertragene Roboterfahrprogramm ist prinzipiell auch an den Industrieroboter selbst übertragbar, muss für die Durchführung der Messung allerdings um die Kommunikation mit dem Wirbelstrommesssystem erweitert werden.

Für die Wirbelstromprüfung wird in dieser Arbeit ein Wirbelstrommesssystem *EddyCus Integration Kit* (Hersteller Fraunhofer IKTS, Dresden) verwendet. Dieses arbeitet *zeitgetriggert*, d.h. nach Setzen eines Triggereingangs erfolgt die Messdatenaufnahme mit konstanter Messrate, bis der Triggersignal auf AUS gesetzt wird. Die Messpunkte entlang jeder Bahn müssen daher nicht durch die Bahnplanung platziert werden, sondern es ist lediglich sicherzustellen, dass die Messrate hoch genug ist, um bei der verwendeten Robotergeschwindigkeit den vorgegebenen maximalen Messpunktabstand zu gewährleisten. Bei einer typischen Roboterverfahrgeschwindigkeit von 100 mm/s und einem geforderten Messpunktabstand von 0,5 mm (siehe Kapitel 4.1) ergibt sich eine Messrate von 200 Messungen/s (200 Hz).

Die Integration zwischen Roboter und Messsystem wird durch das Wirbelstrommesssystem wie

folgt definiert: Zu Beginn jeder Bahn erhält das Messsystem ein Triggersignal = EIN. Am Ende jeder Bahn (Triggersignal = AUS) speichert die Steuerungssoftware alle aufgenommenen Messwerte zusammen mit einem *Zeitstempel* ab. Um für die kontinuierlich aufgenommenen Messwerte die *x,y,z-Koordinaten* zu ermitteln, erwartet die Wirbelstromsoftware für jede Messbahn eine Datei, die den Ist-Bewegungsverlauf des Roboters (Zuordnung von Zeitstempel + x,y,z-Koordinate) enthält. Wirbelstromsignal und Raumkoordinaten liegen somit als zwei gesonderte, jeweils mit Zeitstempeln versehene Datensätze vor und durch Interpolation wird jedem Wirbelstrommesspunkt eine Koordinate zugeordnet. Diese Interpolation erfolgt durch die Steuerungssoftware des Wirbelstrommesssystems. Die notwendige Tabelle über den Ist-Bewegungsverlauf des Roboters wird durch ein Skript auf dem Leitrechner des Roboters erzeugt, das die Ist-Position des Roboters im Intervall von 150 ms ausliest und abspeichert.

Durch Erweiterung der Bahnplanung um die Kommunikation mit dem Wirbelstromsystem ist die Entwicklung einer Bahnplanung für die vollständige Erfassung einer 3D-Oberfläche abgeschlossen.

Das in diesem Kapitel dargestellte Verfahren zur vollständigen Erfassung einer dreidimensionalen Oberfläche und zur Berechnung der Sensororientierungen für die Wirbelstromprüfung wurde in ein Matlab-Skript implementiert. Abb. 4-13 fasst die durchgeführten Schritte zusammen.

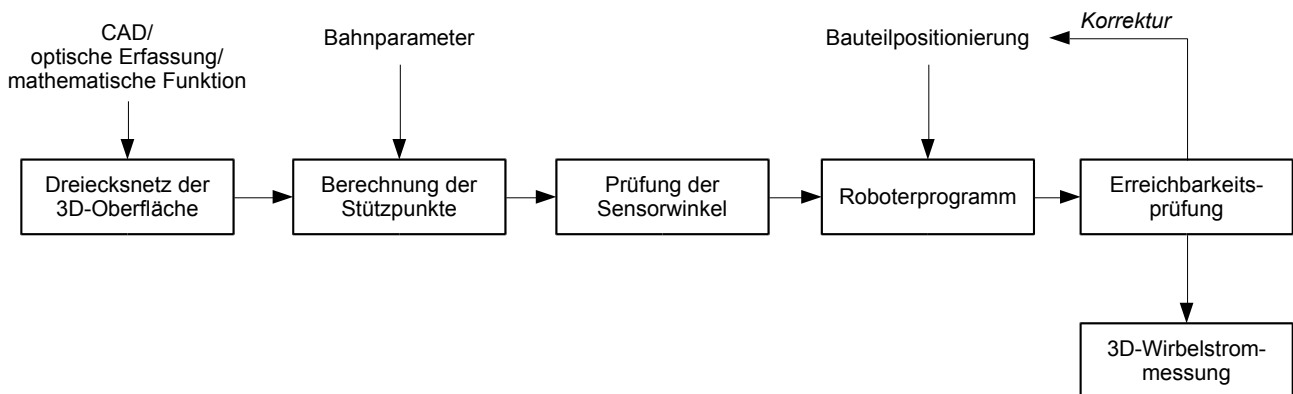


Abb. 4-13: Zusammenfassung der Berechnungsschritte zur Bahnplanung

5 Entwicklung einer Faserorientierungsmessung aus 3D-Wirbelstromdaten

5.1 Methodisches Vorgehen

Grundlage der Faserorientierungsmessung mit der bildgebenden Wirbelstromprüfung ist die überlagerte Abbildung der Fadenverläufe im Wirbelstrombild: da die Leitfähigkeit in der Mitte eines Carbonfaserbündels höher ist als an seinen Rändern, wird die höchste Wirbelstromdichte erzeugt, wenn sich die Sendespule mittig über einem Faserbündel befindet. Die Empfangsspule misst in diesem Fall die höchste Impedanzänderung (veränderte Impedanz gegenüber der Messung ohne Probekörper, d.h. in der Luft). Befindet sich die Sendespule hingegen am Rand eines Faserbündels, so ist die induzierte Wirbelstromstärke geringer, ebenso die gemessene Impedanzänderung. Besteht das textile Halbzeug aus parallelen Carbonfäden, so erscheinen diese als Streifenmuster. Mehrere Lagen mit verschiedener Orientierung erscheinen als überlagertes Streifenmuster. Die Orientierung der Fäden und daher der Fasern der einzelnen Lagen kann aus der Orientierung des Musters abgeleitet werden, wofür ein geeignetes Bildverarbeitungsverfahren zu entwickeln ist.

5.2 Vorverarbeitung der 3D-Wirbelstromdaten

5.2.1 Verfahren für automatische Phasendrehung

Das Ergebnis der 3D-Wirbelstromprüfung ist ein Messdatensatz, in dem jedem x,y,z -Messpunkt die gemessene Impedanz bzw. Impedanzänderung zugeordnet ist, wobei die Impedanz im vorliegenden Fall als Real- und Imaginärteil, angegeben in Skalenteilen (vgl. Kapitel 3.1), gemessen wird.

Werden alle Real- und Imaginärwerte einer Messung in der komplexen Ebene dargestellt, ergibt sich für Messungen an Carbonfaser-Prüfkörpern eine charakteristische *Punktewolke* in der komplexen Ebene (Abb. 5-1 links). Die gemessenen Impedanzen können als *Intensitätsverteilung* der Oberfläche dargestellt werden, indem der Real- oder Imaginärteil der Impedanz, oder eine beliebig gewichtete Summe der beiden Komponenten, als Grauwert interpretiert wird. Wird z.B. allein der verwendete *Realteil* herangezogen, was einer Projektion der Punktewolke auf die Re-Achse entspricht (hoher Re-Wert = weiß, niedriger Re-Wert = schwarz), so ergibt sich die in Abb. 5-1 rechts gezeigte Intensitätsverteilung über die 3D-Oberfläche. Bei den hier dargestellten Messdaten handelt es sich um ein zu einer Halbkugel drapiertes Quadraxialgelege mit den Lagenorientierungen $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ (vgl. Kapitel 7). Bei genauer Betrachtung sind die Orientierungen der obersten drei, stellenweise auch aller vier Lagen als überlagertes Streifenmuster erkennbar. Für die Darstellung der folgenden Algorithmenentwicklung wird diese Messung zur Illustration verwendet.

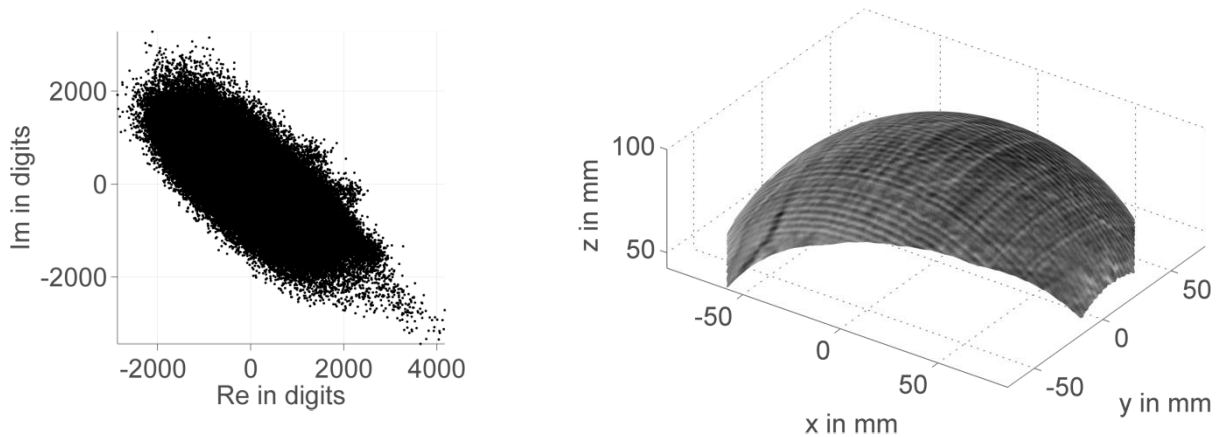


Abb. 5-1: Punktwolke der komplexen Messdaten und Darstellung des Realteils auf der 3D-Oberfläche

Aus den in Kapitel 3.1 dargestellten Grundlagen der Wirbelstromprüfung ist bekannt, dass Leitfähigkeit und Lifthoff- sowie weitere Störeffekte (Dickenänderung etc.) verschiedene Wirkrichtungen auf die Impedanz in der komplexen Ebene besitzen. Durch Darstellung einer bestimmten Richtungskomponente kann die gesuchte Leitfähigkeit, die die Fadenstruktur anzeigt, von den Störeffekten getrennt werden. Die Auswahl der Anzeigerichtung erfolgt, indem vor der Projektion der Messdaten auf die Re-Achse eine *Phasendrehung* um einen Winkel α , d.h. eine Rotation der gesamten Punktwolke nach

$$\begin{aligned} Re' &= Re \cdot \sin(\alpha) + Im \cdot \cos(\alpha) \\ Im' &= Re \cdot \cos(\alpha) + Im \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (5-1)$$

durchgeführt wird. Anschließend wird allein der gedrehte Realteil (Re') als Grauwert angezeigt.

Abb. 5-2 zeigt, wie die Phasendrehung den Kontrast des Streifenmusters verändert: von den dargestellten Phasendrehungen zeigt die Abbildung bei $\alpha = 45^\circ$ den höchsten Kontrast der Fäden, bei $\alpha = 135^\circ$ hingegen ist der Kontrast der Fäden am geringsten. Ungewünschte Messartefakte (ungleiche Helligkeit der Bildbereiche sowie Streifenmuster entlang der Sensorbahnen) werden bei $\alpha = 135^\circ$ hingegen deutlich stärker dargestellt. Auffallend ist hierbei, dass $\alpha = 45^\circ$ die Richtung ist, bei der die Hauptachse der annähernd elliptisch geformten Punktwolke parallel zur Re-Achse steht. D.h., es ist anzunehmen, dass die gesuchte Leitfähigkeitsveränderung entlang der Hauptachse der Punktwolke vorliegt, was im Folgenden näher untersucht wird, mit dem Ziel, eine automatische Bestimmung der optimalen Phasendrehung abzuleiten.²⁰

²⁰ Da die ursprüngliche Drehung der Punktwolke im Raum abhängig vom Wirbelstrommesssystem ist, welches u.a. eine frequenzabhängige Verstärkung und Phasenverschiebung besitzt (vgl. Kapitel 3.1), kann die optimale Phasendrehung nicht physikalisch berechnet werden, sondern muss aus einer physikalisch fundierten Analyse der Punktwolke hergeleitet werden.

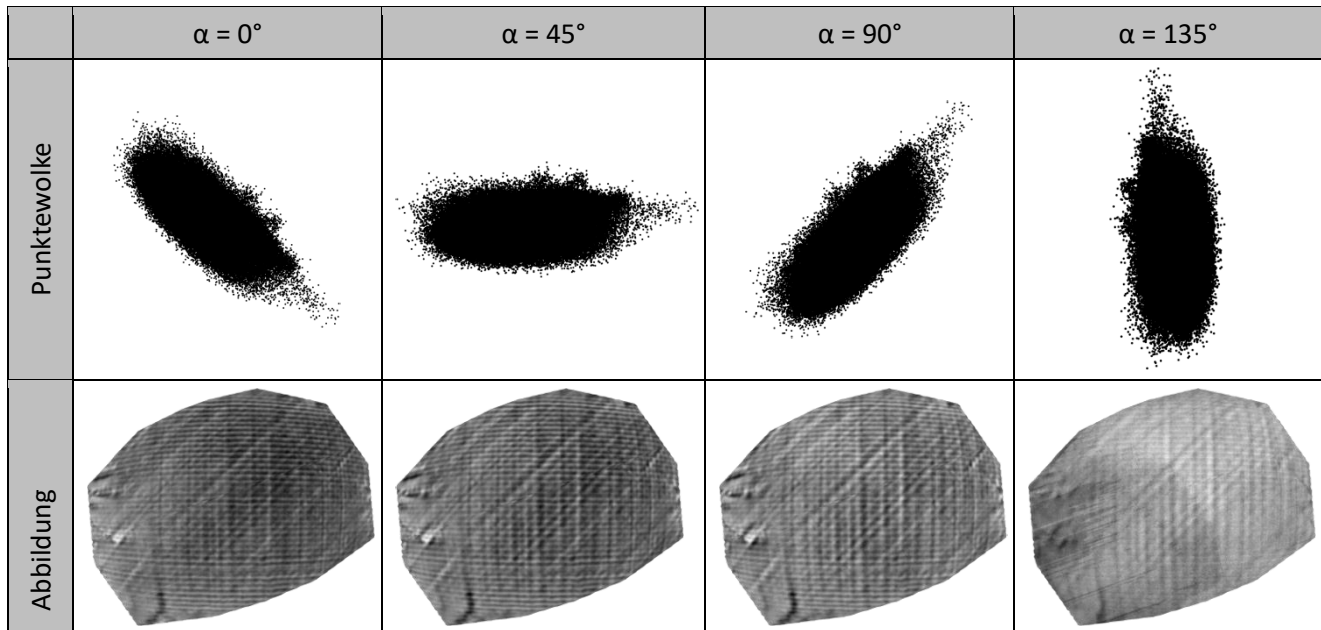


Abb. 5-2: Einfluss der Phasendrehung auf die Abbildung der Fadenstruktur

Die Hypothese, dass die Längsachse der Ellipse die Richtung der gesuchten Leitfähigkeit angibt, kann anhand des Verlaufs des Messsignals für einzelne Bahnen geprüft werden. Zu erwarten ist, dass das Messsignal bei der Bewegung über die Carbonfaserbündel eine regelmäßige Oszillation ausführt, die von kurz- und längerwelligen Störeinflüssen überlagert ist.

Abb. 5-3 zeigt zwei Messbahnen auf der Oberfläche und die zugehörigen Verläufe in der Punktewolke. Für eine bessere Erkennbarkeit sind die Messbahnen in Abb. 5-4 nochmals einzeln dargestellt. Im Signalverlauf von *Track 104* (rote Kurve, Abb. 5-4 links) ist erkennbar, dass das Messsignal während der Bahnfahrt mehrfach von unten rechts nach oben links und zurück oszilliert, was der Veränderung der Leitfähigkeit bei der Fahrt über die Carbonfäden zugeordnet werden kann, bei der die gemessene Impedanz zwischen einem Minimum (Gasse zwischen zwei Carbonfäden) und einem Maximum (Fadenmitte) hin- und herpendelt. Überlagert wird diese oszillierende Bewegung von einer dazu senkrechten und zufälligen Bewegung, die somit als Veränderung des Liftoffs identifiziert werden kann: während der Messfahrt entstehen auf jeder Bahn Unterschiede durch leichtes Abheben oder Verkippen des Sensors sowie durch lokal unterschiedliche Kompaktierung der Carbonfaserbündel, die im Gegensatz zur ersten Bewegung nicht als periodische Oszillation erscheinen.

Noch deutlicher werden diese Schlussfolgerungen bei Betrachtung des Signalverlaufs von *Track 130* (blaue Kurve, Abb. 5-4 rechts), wo die oszillierende Bewegung in Richtung der Leitfähigkeitsveränderung von einem einmaligen Versatz *senkrecht* dazu überlagert ist: während der Bahnfahrt hat sich der Liftoff leicht verändert, so dass sich das Messsignal im zweiten Teil der Messung auf einer zweiten, parallelen Achse bewegt. Liftoff und Leitfähigkeitsänderung können damit eindeutigen Wirkrichtungen zugeordnet werden, die annähernd senkrecht aufeinander stehen. Die Analyse der Signalverläufe bestätigt somit, dass die Hauptachse der elliptischen Punktewolke die Richtung der Leitfähigkeitsveränderung abbildet.

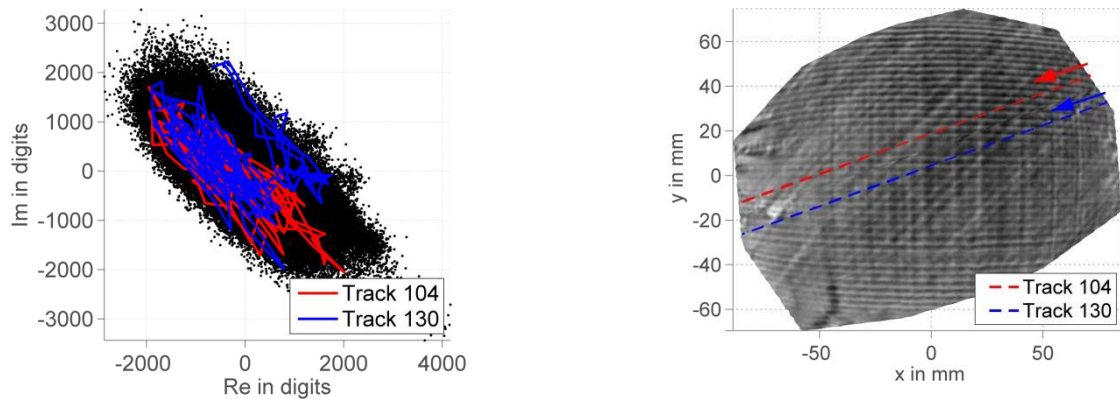


Abb. 5-3: Zwei ausgewählte Tracks in der Punktwolke und auf der Oberfläche

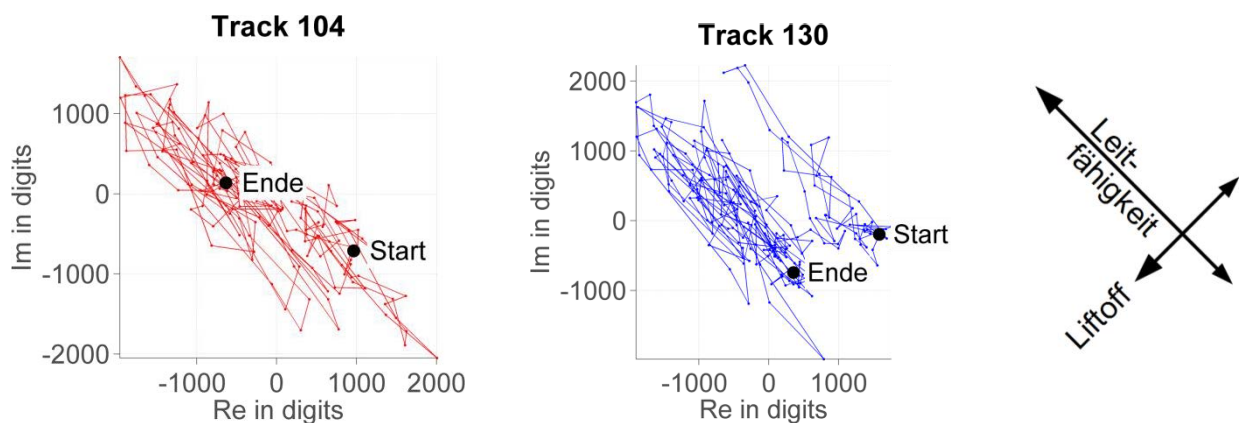


Abb. 5-4: Einzeldarstellung zur Analyse der beiden Tracks aus Abb. 5-3 (jeder zehnte Messpunkt gezeigt)

Um die optimale Phasendrehung zur Darstellung allein der Leitfähigkeitsänderung automatisch zu bestimmen, wird ausgenutzt, dass die *Varianz* der Messdaten in Richtung der Leitfähigkeitsänderung größer ist als in Richtung der Liftoffveränderung, d.h. dass die *Hauptkomponente* der Punktwolke die Richtung der darzustellenden Leitfähigkeitsänderung anzeigt. Diese Hauptkomponente kann durch das Verfahren der Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis) berechnet werden (Abb. 5-5 links). Im Beispieldatensatz wird der Winkel der Hauptkomponente zu $-38,1^\circ$ berechnet. Durch Drehung der Punktwolke um den negativen Wert dieses Winkels (Phasendrehung $+38^\circ$) und Darstellung allein des projizierten Realteils nach der Drehung wird lediglich die Impedanzänderung in Richtung der Hauptkomponente zur Anzeige gebracht. Wie in Abb. 5-5 rechts erkennbar, zeigt diese einen verbesserten Kontrast zwischen Fäden und Gassen und eine ausgeglichene Bildhelligkeit. Damit ist ein Verfahren zur automatischen Phasendrehung entwickelt und die so aufbereiteten Messdaten bilden die Grundlage für die weitere Bildverarbeitung.

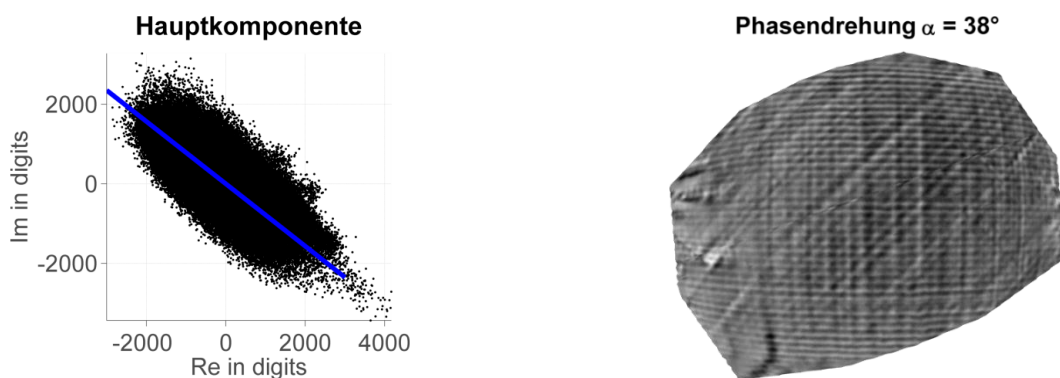


Abb. 5-5: Hauptkomponente und 3D-Wirbelstrombild nach Phasendrehung in Hauptkomponentenrichtung

5.2.2 Lokale Projektion der Oberfläche

Für die Messung der lokalen Faserorientierung an einem Auswertepunkt muss das Streifenmuster der Carbonfäden in der Umgebung dieses Punktes betrachtet werden. Alle bekannten Bildanalyseverfahren (vgl. z.B. [196]) erfordern ein 2D-Bild mit konstantem x- und y-Punktgitter (Pixelraster/Bitmap), so dass die 3D-Oberfläche in der Umgebung des Punktes lokal geglättet, d.h. in die Tangentialebene projiziert werden muss.

Für diese Projektion der Umgebung eines Auswertepunktes X_0 wird der Normalenvektor der Tangentialebene an die Oberfläche, X_n , an diesem Punkt bestimmt. Anschließend wird für alle Punkte X in der Umgebung von X_0 die Projektion in die Tangentialebene, X_{proj} , berechnet:

$$X_{proj} = X - ((X - X_0) \cdot X_n)X_n \quad (5-2)$$

worin

X_{proj}	Projizierter Punkt in der Tangentialebene
X	Ursprünglicher Punkt
X_0	Stützvektor der Tangentialebene
X_n	Normalenvektor der Tangentialebene ($ X_n = 1$)
\cdot	Vektorprodukt

Abb. 5-6 links illustriert dieses Vorgehen, das jedoch um eine Längenkorrektur ergänzt werden muss: in der Nähe von starken Krümmungen würde die Projektion zu Verzerrungen führen, da gleiche Bogenlängen auf der Oberfläche bei der Projektion nicht getreu abgebildet werden. Indem angenommen wird, dass die Bogenlänge gleich dem Abstand XX_0 ist, kann diese Verzerrung korrigiert werden. Hierfür wird der Vektor X_0X_{proj} so verlängert, dass seine Länge gleich dem ursprünglichen Abstand XX_0 wird:

$$X_{proj}^* = X_0 + \frac{X_{proj} - X_0}{|X_{proj} - X_0|} |X - X_0| \quad (5-3)$$

Dieses Verfahren entspricht einem Abrollen der Oberfläche auf die Tangentialebene (Abb. 5-6 rechts). Zur Vereinfachung wird dieses Vorgehen im Folgenden weiter als „Projektion in die Tangentialebene“ bezeichnet.

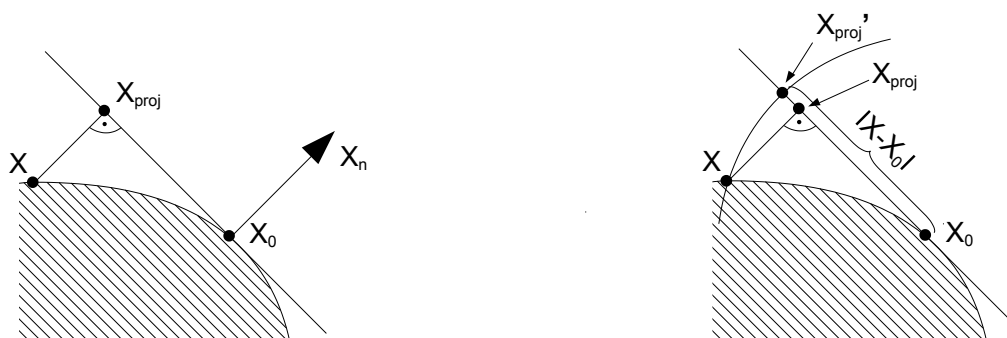


Abb. 5-6: Projektion (links) und Drehung (rechts) des Punktes X in die Tangentialebene

Abb. 5-7 zeigt die Anwendung des Verfahrens auf den Datensatz des drapierten Multiaxialgeleges. Dargestellt sind der Auswertepunkt (weißer Kreis), der Normalenvektor (schwarzer Pfeil) und die Tangentialebene mit der in sie projizierten Oberfläche (dunkler dargestellt). Für die nachfolgende Bildverarbeitung wird ein quadratischer Ausschnitt der in die Tangentialebene projizierten

Oberfläche ausgewählt, und durch Interpolation mit einem gleichförmigem xy-Raster ein Bitmap dieses Ausschnitts erzeugt.

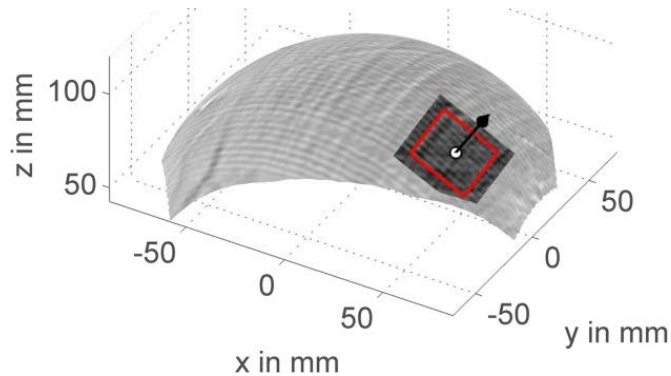


Abb. 5-7: Lokale Projektion der Punktumgebung in die Tangentialebene

5.2.3 Platzierung der Auswertepunkte

Für die Messung der Faserorientierung auf der gesamten Oberfläche wird ein Netz von Auswertepunkten auf die Oberfläche projiziert und der Vorgang der lokalen Glättung der Punktumgebung für jeden Auswertepunkt durchgeführt. Abb. 5-8 zeigt das für die Auswertung gewählte Gitter, in dem drei Auswertepunkte mit den jeweiligen Punktumgebungen hervorgehoben sind. Bei einem gewählten Abstand der Auswertepunkte von 15 mm entstehen für die Halbkugelkappe 82 Auswertepunkte.

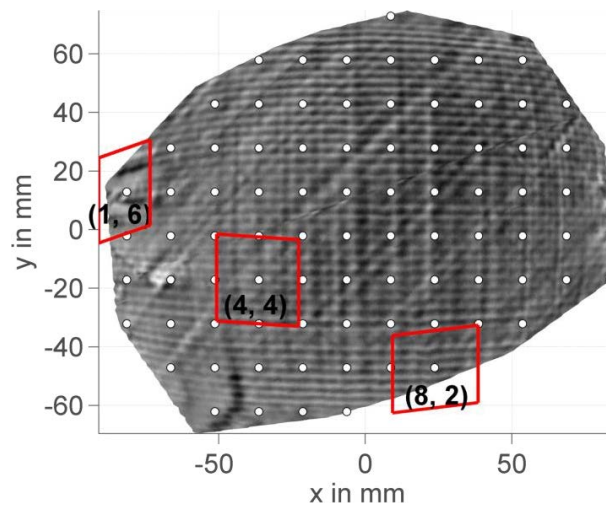


Abb. 5-8: Automatische Platzierung der Auswertepunkte und exemplarische Auswerteausschnitte

Abb. 5-9 zeigt die projizierten Umgebungen der drei in der vorherigen Abbildung hervorgehobenen Punkte, in denen die Carbonfäden als Streifenmuster erkennbar sind. Neben dem gesuchten Fadenmuster können in den Bildern von Ausschnitt 1,6 (Mitte) und Ausschnitt 8,2 (rechts) weitere Störmuster bemerkt werden: die Falten am Rand des Geleges (Ausschnitt 1,6) und die Kante am Rand des Messbereichs (Ausschnitt 1,6 und Ausschnitt 8,2) stellen ebenfalls gerichtete Muster dar, die vom zu entwickelnden Algorithmus nicht als Fadenmuster interpretiert werden dürfen (vgl. zur Lösung Abschnitt 5.3.4 weiter unten).

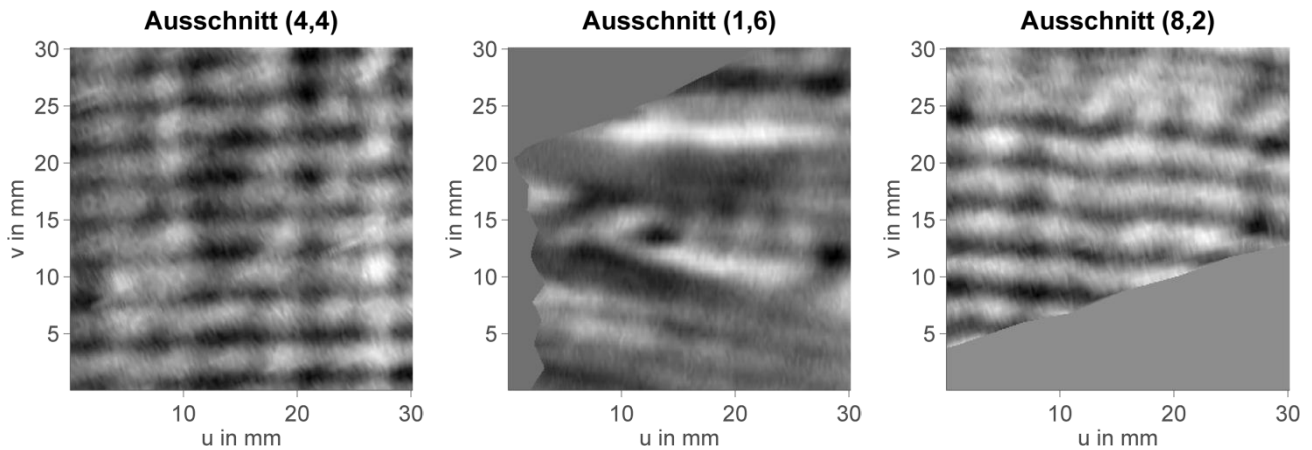


Abb. 5-9: Von links nach rechts: Bildausschnitt ohne Störmuster; mit Falte; mit Kante

5.2.4 Hochpassfilter und Glättung

Für die Vorbereitung der Bildauswertung muss in einem ersten Schritt die Verstärkung des Kontrasts der Carbonfäden erfolgen. Betrachtet man den Ausschnitt 4-4 in der soeben dargestellten Abb. 5-9, so ist die periodische Struktur der Carbonfäden erkennbar, allerdings überlagert durch eine ungleiche Helligkeit der Bildbereiche („Bildschatten“). Während die Carbonfäden des untersuchten Geleges einen Fadenabstand von ca. 3,6 mm besitzen, zeigen die als Fäden erkennbaren senkrechten Strukturen eine Periode von ca. 10 mm. Um die Fäden stärker hervortreten zu lassen, wird ein Hochpassfilter angewandt, der Bildstrukturen mit niedriger Ortsfrequenz („langwellige“ Bildstörungen) entfernt. Für die Definition des Filters kann ausgenutzt werden, dass typische Fadenabstände der Carbonfäden im Bereich von 2 bis 5 mm liegen, ihre Ortsfrequenzen also im Bereich $0,5$ bis $0,2 \text{ mm}^{-1}$. Ein Hochpassfilter mit einer Sperrfrequenz von $0,15 \text{ mm}^{-1}$ entfernt den Bildschatten und lässt die Carbonfäden deutlicher hervortreten (Abb. 5-10 Mitte). Ferner ist erkennbar, dass das Bild durch ein hochfrequentes Rauschen gestört wird. Dieses wird durch die Anwendung eines Gaußfilters mit Standardabweichung $\sigma = 3$ geglättet. Abb. 5-10 rechts zeigt das Ergebnis, in dem die Fadenstruktur deutlich besser erkennbar ist. Auf dieser verbesserten Grundlage wird im Folgenden eine automatische Bildverarbeitung entwickelt.

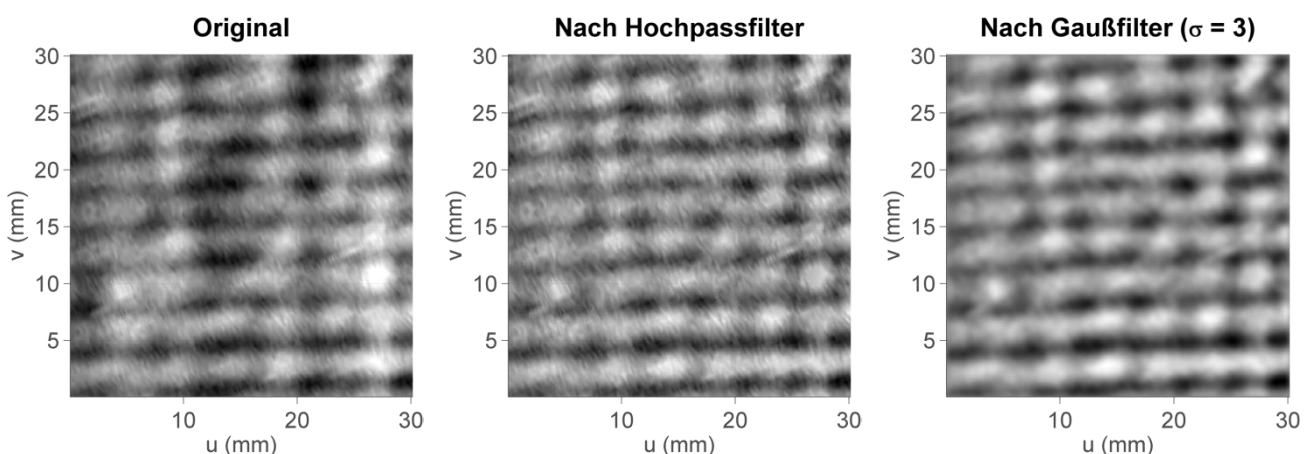


Abb. 5-10: Bildaufbereitung durch Hochpassfilter und Gaußfilter

5.3 Bildverarbeitungsverfahren zur Orientierungsmessung

5.3.1 Auswahl geeigneter Algorithmen

Aus der digitalen Bildverarbeitung sind verschiedene Algorithmen bekannt, die die Orientierungsmessung von Linien und gerichteten Texturen erlauben. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die in der Textil-, Faserverbund- und Medizintechnik für die Orientierungsmessung eingesetzten Algorithmen. Grundsätzlich zu unterscheiden sind hierbei

- Methoden zur Liniendetektion (Hough-Transformation)
- Methoden zur Bestimmung einer lokalen Vorzugsorientierung (Gradient/Strukturtenor, anisotrope Filter) sowie
- Methoden, die die Periodizität des Gesamtbilds auswerten (Fourier- und Radontransformation).

Für die angestrebte Faserorientierungsmessung in Wirbelstrombildern besteht die Besonderheit darin, dass sich die Streifenmuster der Einzellagen über den gesamten Bildbereich überlagern, so dass weder die Liniendetektion, noch die für die optische Verfahren gebräuchlichen Gradienten- und Strukturtenorverfahren oder anisotrope Filter geeignet sind. Als geeignet angesehen werden hingegen die Verfahren der *Fouriertransformation* und der *Radontransformation*. Die Fouriertransformation wurde in vorausgehenden Arbeiten bereits erfolgreich für die Faserorientierungsmessung angewendet, allerdings ausschließlich an großflächigen Auswertebereichen ($> 100 \times 100 \text{ mm}^2$) und für 2D-Messbilder (vgl. Abschnitt 3.5.1). Da für die Messung der lokalen Faserorientierung an 3D-Wirbelstrombildern wesentlich kleinere Auswerteausschnitte herangezogen werden müssen, die i.d.R. eine deutlich schlechtere Bildqualität besitzen, wird eine wesentlich höhere Robustheit benötigt, als für die Auswertung von 2D-Wirbelstrombildern notwendig ist. Für die Radontransformation ist keine Anwendung zur Faserorientierungsmessung in Wirbelstrombildern bekannt. Für beide Transformationen werden daher im Folgenden Methoden zur Orientierungsmessung entwickelt und anschließend quantitativ hinsichtlich ihrer Eignung zur Messung mehrerer überlagerter Faserorientierungen in möglichst kleinen Bildausschnitten verglichen.

Tabelle 5-1: Bekannte Bildverarbeitungsverfahren zur Orientierungsmessung

Prinzip	Algorithmus	Anwendungen	Eignung für Wirbelstrombilder
Liniendetektion	Hough-Transformation	Kurzfasern [197, 198] Muskelfasern [199]	Nein, nur dominante Linien
Lokale Vorzugsorientierung	Gradient/Strukturtenor	Gelege [80, 90] Kurzfasern [200]	Nein, nur lokale Vorzugsorientierung
	Anisotrope Filter	Kurzfasern [201–203] Gewebe [204]	Nein, nur lokale Vorzugsorientierung
Richtungen hoher Periodizität	Fouriertransformation	Gewebe [205–209] Kurzfasern [210]	Ja
	Radontransformation	Gewebe [211, 212] Nanofasern [213, 214]	Ja

Die beiden Methoden und die darauf aufbauende Entwicklung von Auswertelgorithmen werden kurz erläutert, bevor eine vergleichende Untersuchung an Referenzmustern und realen Wirbelstromdaten vorgenommen wird.

5.3.2 Berechnung der Faserorientierungsverteilung mit Fouriertransformation

Die *Fouriertransformation* ist die Darstellung eines 1D- oder 2D-Signals als Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen, die jeweils eine Amplitude und Phasenverschiebung besitzen. Wird ein aus $M \times N$ Pixeln bestehendes Bild als diskrete zweiwertige Funktion $f(x,y)$ aufgefasst, so ist seine diskrete Fouriertransformation $F(u,v)$ die Lösung der Gleichung [196]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-\frac{2\pi jxu}{M}} e^{-\frac{2\pi jyv}{N}} \quad (5-4)$$

worin M, N Zeilen- und Spaltenzahl des Bildes
 x, y Koordinaten im Ortsraum (in m)
 u, v Koordinaten im Frequenzraum (in 1/m)

Die Berechnung von $F(u,v)$ erfolgt mit dem Fast-Fourier-Transform-(FFT)-Algorithmus (vgl. grundlegend [215]).

Abb. 5-11 zeigt ein Referenzmuster von zwei überlagerten Streifen, die in einem Winkel von $+20^\circ$ bzw. -40° verlaufen.²¹ Die Streifen in -40° -Richtung besitzen die 0,6-fache Intensität der Streifen in $+20^\circ$ -Richtung und sind dementsprechend schwächer dargestellt. Mit Hilfe einer Fouriertransformation wird dieses Bild in diskrete Frequenzen zerlegt, deren Amplitude bzw. Phasenverschiebung als Amplituden- und Phasenbild dargestellt werden kann. Da die Orientierungsinformationen allein im Amplitudenbild enthalten sind, wird das Phasenbild nicht weiter betrachtet.

Das zum Streifenmuster zugehörige Amplitudenbild (Abb. 5-11 rechts) zeigt zwei Maxima mit hoher Amplitude (im I. und III. Quadranten) und zwei Maxima mit geringerer Amplitude (im II. und IV. Quadranten). Jedes Paar ist symmetrisch zum Ursprung und zeigt eine der Hauptfrequenzen des Streifenmusters an. Als Abstand der Maxima zum Ursprung liest man $0,13 \text{ mm}^{-1}$ ab, was dem Kehrwert der Periode des Streifenmusters im Originalbild (7,5 mm) entspricht. Zu beachten ist, dass die Richtung der Maxima gegenüber der Vertikalen -70° bzw. $+50^\circ$ beträgt, da die Maxima die Richtung der *Periodizität* im Originalbild anzeigen, die senkrecht zur Orientierung des Fadenmusters liegt.

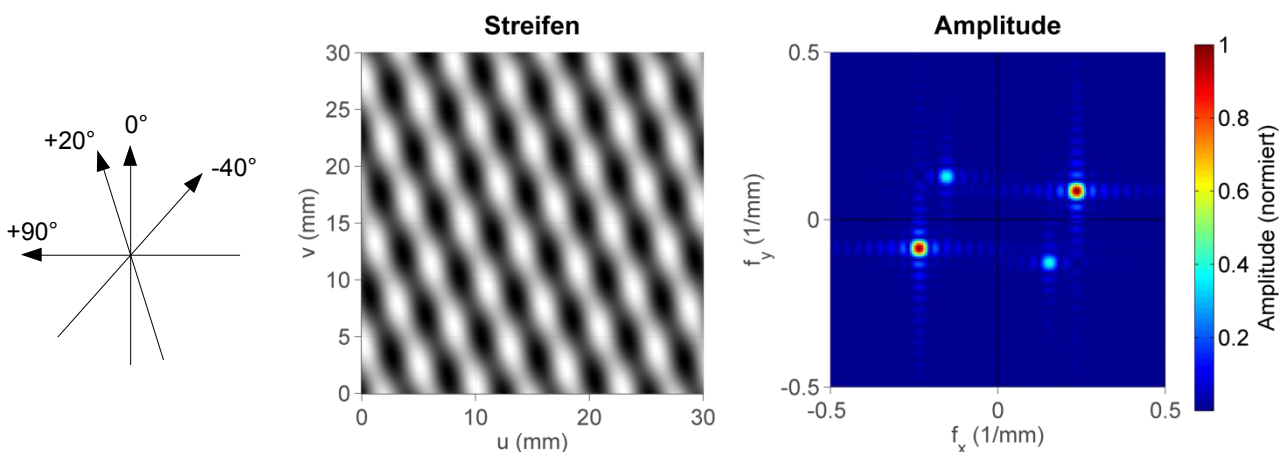


Abb. 5-11: Prinzip der Orientierungsmessung mit Fouriertransformation

²¹ In allen Darstellungen in dieser Arbeit, soweit nicht explizit anders vermerkt, ist die 0° -Richtung als die Vertikale (+y-Richtung) definiert. Positive Winkel entsprechen einer Drehung im Uhrzeigersinn (mathematisch positive Drehrichtung).

Für die korrekte Auswertung der Faserorientierungen aus der Fouriertransformation ist ein weiterer Schritt notwendig. Das Amplitudenbild in Abb. 5-11 rechts zeigt neben den Maxima der Hauptfrequenzen ein Muster weiterer Frequenzen, die horizontal bzw. vertikal verschoben sind. Diese zusätzlichen Frequenzen entstehen durch *Kanteneffekte*, da die Berechnung der Fouriertransformation von einem periodischen Signal ausgeht und das Originalbild in alle Richtungen periodisch fortsetzt. Die dadurch entstehenden Brüche an den Kanten erscheinen als zusätzliche Frequenzen.

Um diesen Kanteneffekt zu vermeiden, wird das Originalbild *gefenstert*, d.h., mit einer Fensterfunktion multipliziert. Die Fensterfunktion ist nach den Seiten hin abfallend, so dass die Bildamplitude zu den Bildkanten hin auf Null reduziert wird und die periodische Fortsetzung des Bildes zu keiner Entstehung von Kanteneffekten führt. Als Fensterfunktionen stehen verschiedene Funktionen zur Verfügung, die sich im Anstieg der Seitenflanken unterscheiden. Der Empfehlung von Press et al [215] folgend, wird das *von Hann*-Fenster verwendet, das in Abb. 5-12 als 1D- und 2D-Funktion dargestellt ist.

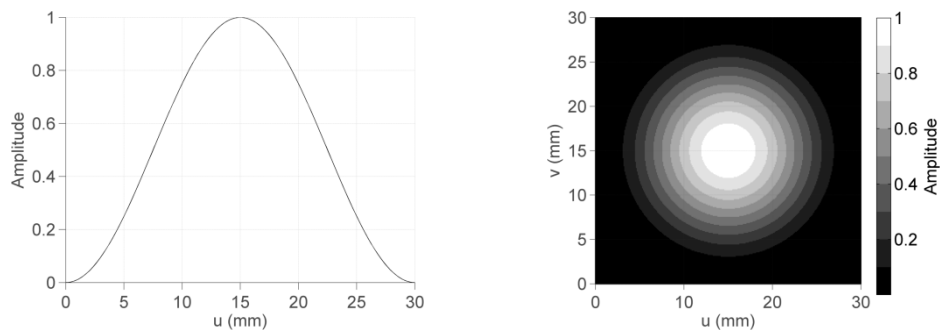


Abb. 5-12: Zur Vermeidung von Kanteneffekten genutztes Von Hann-Fenster, 1D und 2D

Abb. 5-13 zeigt das gefensterte Originalbild mit dem zugehörigen Amplitudenbild der Fouriertransformation. Die Kanteneffekte sind durch die Fensterung unterdrückt. Die Maxima im Amplitudenbild sind gegenüber Abb. 5-11 verbreitert, was darin begründet ist, dass die Fensterung die effektiv ausgewertete Bildinformation beschränkt. Durch Integration der Fensterfunktion lässt sich nachweisen, dass 81,5 % der gesamten ausgewerteten Bildintensität aus einem kreisförmigen Ausschnitt entstammen, dessen Radius gleich dem halben Radius des von Hann-Fensters, d.h. einem Viertel der Kantenlänge des Auswertequadrats ist. Der Rest des Auswertequadrats geht mit weniger als 20 % in die ausgewerteten Bildinformationen ein. Der Radius des inneren Kreises wird daher im Folgenden als *effektiver Auswerteradius* bezeichnet. Für den dargestellten Auswerteausschnitt mit 30 mm Kantenlänge beträgt der effektive Auswerteradius somit 7,5 mm.

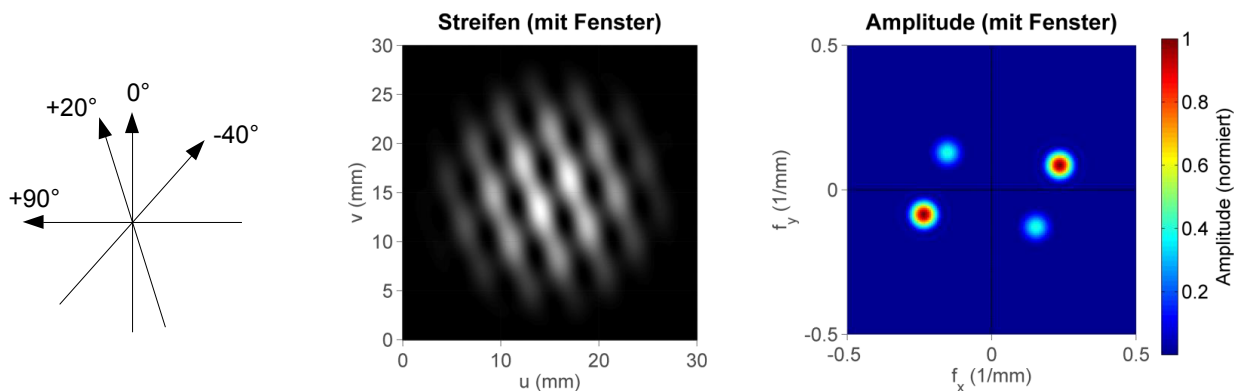


Abb. 5-13: Fouriertransformation mit Von Hann-Fensterung

Nach der Fensterung erfolgt die Bestimmung der Richtung der Maxima im Amplitudenbild, wofür folgender Algorithmus entwickelt wurde: Für die Winkel $0...180^\circ$ wird in $0,1^\circ$ -Schritten eine Gerade durch das Amplitudenbild gelegt und die Amplitude entlang aller berührten Pixel aufsummiert.²² Nach Umrechnung der Orientierungen des Amplitudenbilds zu den senkrecht dazu stehenden Faserorientierungen (vgl. oben) ergibt sich die *Faserorientierungsverteilung*, die die relative Amplitude der einzelnen Faserrichtungen im untersuchten Streifenbild wiedergibt. Abb. 5-14 zeigt die Faserorientierungsverteilung für die Fouriertransformation mit und ohne Fensterung. Die zwei Hauptrichtungen $+20^\circ$ und -40° erscheinen als Maxima.

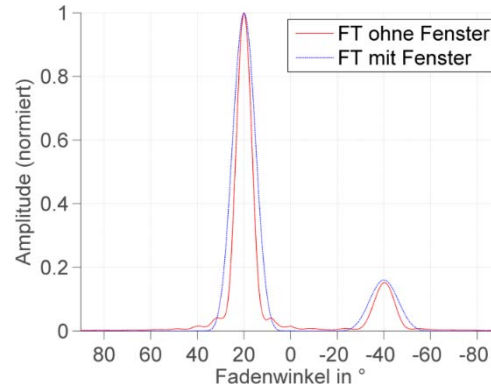


Abb. 5-14: Faserorientierungsverteilung aus Fouriertransformation

5.3.3 Berechnung der Faserorientierungsverteilung mit Radontransformation

Als zweites Verfahren zur Bestimmung der Faserorientierungsverteilung wird die *Radontransformation* untersucht. Die Radontransformation ist definiert als Integration des Bildes $f(x,y)$ entlang einer Geradenscharen $y = px + \tau$ [216]:

$$R(\rho, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, \rho x + \tau) dx \quad (5-5)$$

worin

ρ	Anstieg der Geraden
τ	y-Achsenabschnitt der Geraden

Dies kann mithilfe der Dirac-Funktion δ umgewandelt werden in die Form

$$R(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos\theta - y \sin\theta - r) dx dy \quad (5-6)$$

worin

r	Senkrechter Abstand der Geraden zum Koordinatenursprung
θ	Winkel der Geraden
δ	Dirac-Funktion

Da für die Dirac-Funktion gilt

²² Diese Aufsummierung der Amplitude entlang der Gerade hat sich als robuster erwiesen als die Bestimmung lediglich der maximalen Amplitude entlang der Geraden, da die Summierung auch Faserorientierungen mit sehr geringer Intensität abbilden kann.

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

und

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) = 1 \quad (5-8)$$

ist die Radontransformation $R(r, \theta)$ die Summation des Bildes $f(x,y)$ entlang einer Gerade mit Abstand r zum Koordinatenursprung und Winkel θ . Abb. 5-15 links veranschaulicht dies. Das Bild wird entlang einer Schar gedrehter Geraden aufsummiert, so dass eine Abbildung ähnlich wie bei der Computertomographie entsteht. Die *inverse* Radontransformation ist daher auch eines der für die Bildrekonstruktion in der Computertomographie verwendeten Verfahren [216].

Abb. 5-15 rechts zeigt das Ergebnis der Radontransformation für das Streifenmuster aus dem vorhergehenden Abschnitt. Bei Winkeln, an denen die Projektionsgerade annähernd *senkrecht* zum Streifenmuster steht ($\theta = 20^\circ$ und $\theta = -40^\circ$), oszilliert die Intensität in x' -Richtung stark, woraus die Richtung der Streifen ableitbar ist.

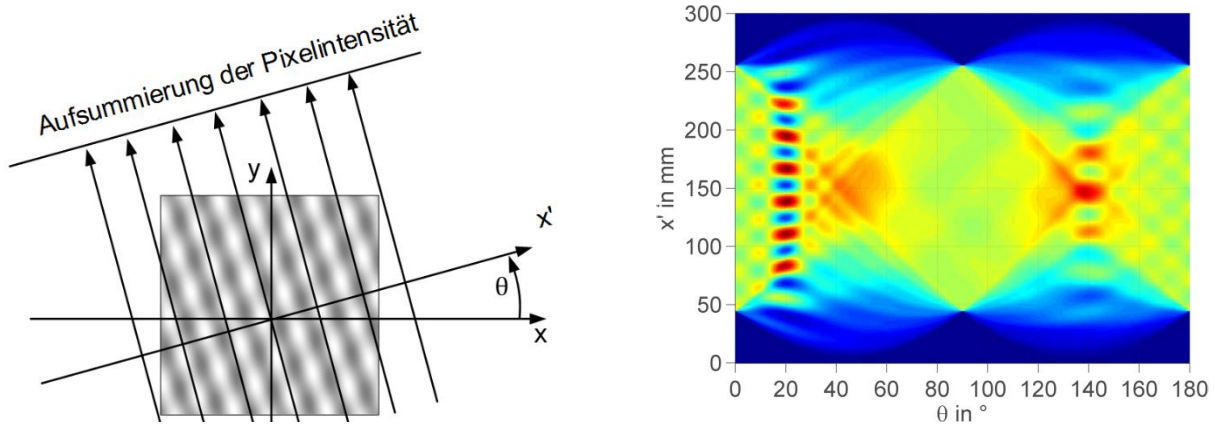


Abb. 5-15: Prinzip der Orientierungsmessung mit Radontransformation

Die Berechnung der Faserorientierungsverteilung aus der Radontransformation erfolgt in Anlehnung an Schaub et al [214], indem für jeden Winkel θ die *Varianz* der summierten Pixelintensität entlang x' berechnet wird. Erneut ist eine Fensterung des Originalbildes notwendig, um Kanteneffekte (die kreisförmigen Muster an Bildober- und -unterkante in Abb. 5-15 rechts) zu unterdrücken. Abb. 5-16 stellt die mit Hilfe der Radontransformation berechnete Faserorientierungsverteilung dar. Auch hier erscheinen zwei deutliche Maxima für die beiden Faserorientierungen.

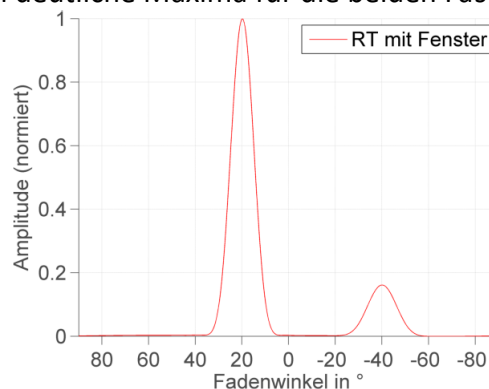


Abb. 5-16: Faserorientierungsverteilung aus Radontransformation

5.3.4 Bestimmung der Hauptfaserrichtungen und robuste Zuordnung zu den Fadensystemen

Aus der berechneten Faserorientierungsverteilung können die Hauptfaserrichtungen unmittelbar als lokale Maxima ausgelesen werden. Für ein Wirbelstrombild eines mehrlagigen Aufbaus mit verschiedenen Faserorientierungen müssen die detektierten Maxima anschließend den einzelnen Lagen bzw. Fadensystemen zugeordnet werden. Diese Aufgabe wird dadurch erschwert, dass sich zum einen die Faserrichtung der einzelnen Lagen über die 3D-Oberfläche verändert, zum anderen die Höhe der Maxima in der Faserorientierungsverteilung nicht notwendigerweise die Reihenfolge der Lagen wiedergibt, sondern auch durch die Schichtung, die Sensororientierung und die textile Struktur der Fadenlage beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 3.4). Ferner können durch Störungen (z.B. Falten, Bildkanten, Variation des Liftoffs der einzelnen Messbahnen) zusätzliche Maxima auftreten, die höher als die Maxima tiefer liegender oder schwach abgebildeter Lagen sein können und nicht als Faserorientierungen interpretiert werden dürfen.

Für eine robuste Zuordnung der Maxima zu den einzelnen Faserrichtungen wird daher das Vorwissen über die Struktur ausgenutzt, dass die ungefähre Richtung der einzelnen Fadensysteme entweder bekannt ist, oder aus einer globalen Analyse der Faserorientierungsverteilung (Berechnung der Faserorientierungsverteilung für einen sehr großen Auswerteausschnitt) mit einem der beiden Bildauswerteverfahren bestimmt werden kann. Für jedes der Fadensysteme kann daher ein Richtungsintervall vorgegeben werden, wobei sich die Richtungsintervalle der Faserrichtungen auch teilweise überlappen können. Die Zuordnung der Faserorientierungen zu den Richtungsintervallen ist dann automatisch möglich, wobei für jedes lokale Maximum der Faserorientierungsverteilung zu prüfen ist, ob es eindeutig einem einzigen Faserorientierungsintervall zugeordnet werden kann:

1. Finde das höchste lokale Maximum der Faserorientierungsverteilung.
2. Prüfe, ob dieses Maximum in das Intervall *eines* Fadensystems fällt, dem noch keine Faserrichtung zugeordnet wurde. Falls ja, ordne diesem Fadensystem den Winkel des Maximums zu. Falls nein, gehe zu Schritt 3.
3. Prüfe, ob dieses Maximum in das Intervall *mehrerer* Fadensysteme fällt, von denen *genau einem* noch keine Faserrichtung zugeordnet wurde. Falls ja, ordne diesem Fadensystem den Winkel des Maximums zu. Falls nein, gehe zu Schritt 4.
4. Ignoriere dieses Maximum. (Es fällt entweder in das Intervall keiner Faserrichtung, oder in die Intervalle mehrerer Fadensysteme, für die noch kein (höheres) Maximum gefunden wurde. In letzterem Fall ist keine sichere Entscheidung über die Zuordnung möglich. Alle unbesetzten Fadensysteme, in deren Richtungsintervall es fällt, werden für diesen Auswerteausschnitt gesperrt.)
5. Wiederhole Schritte 1 bis 4 so lange, bis entweder allen Fadensystemen eine Richtung zugewiesen wurde, oder alle Maxima geprüft wurden.

Abb. 5-17 zeigt die automatische Zuordnung der lokalen Maxima zu den Fadensystemen für das +20°/-40°-Streifenbild. Die für die Zuordnung vorgegebenen Winkelintervalle sind als gestrichelte Linien eingezeichnet, die durch Querbalken verbunden sind.

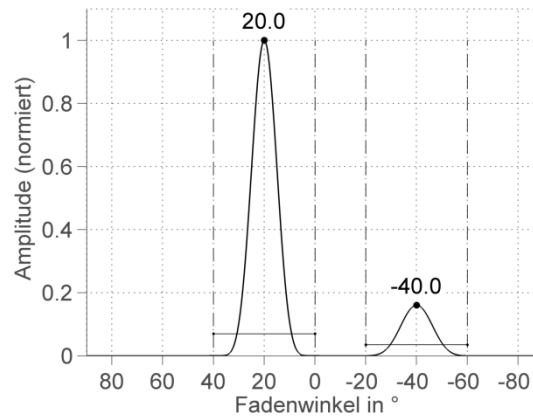


Abb. 5-17: Automatische Zuordnung der Hauptfaserrichtungen zu den Fadensystemen

Da Störmuster sowohl in die Fourier- als auch in die Radontransformation und daher in die Faserorientierungsverteilung eingehen, werden die detektierten Faserrichtungen anschließend gegen eine Reihe von Fehldetektionskriterien geprüft. Ist eines dieser Kriterien erfüllt, wird die Faserrichtung des zugehörigen Fadensystems an diesem Punkt zurückgewiesen und durch Interpolation aus den benachbarten Auswertepunkten ermittelt. Dieses Vorgehen hat sich in der Praxis als robust erwiesen, um Artefakte automatisch zu erkennen und auszuschließen. Tabelle 5-2 enthält die Fehldetektionskriterien und aus der Praxis abgeleitete Standardwerte für die einzelnen Kriterien.

Tabelle 5-2: Fehldetektionskriterien, bei denen eine detektierte Faserorientierung abgelehnt wird

Kriterium	Standardwert (in °)	Ablehnungsgrund	Begründung
α_{edgedist}	10	Differenz zum Winkel einer Kante oder Falte im gleichen Bildausschnitt $< \alpha_{\text{edgedist}}$	Kanten und Falten erscheinen ebenfalls in der Fourier- bzw. Radontransformation und führen zu Fehldetektionen für Fadensysteme, die in ähnlichem Winkel verlaufen
α_{peakdist}	10	Differenz zum Winkel einer Faserorientierung mit höherem Maximum im gleichen Bildausschnitt $< \alpha_{\text{peakdist}}$	Die maximale Winkelauflösung (Trennbarkeit von Fadensystemen mit ähnlichen Orientierungen) ist beschränkt, kleinere Winkeldifferenzen sind nicht plausibel (vgl. Abschnitt 5.3.5 weiter unten)
α_{outlier}	20	Differenz zur mittleren Faserorientierung der benachbarten Bildausschnitte $> \alpha_{\text{outlier}}$	Die Fadenkrümmung ist physikalisch beschränkt, größere Abweichungen sind nicht plausibel

5.3.5 Algorithmenvergleich an Referenzbildern

Wie in der Bildverarbeitung üblich, erfolgt eine grundlegende Validierung der Algorithmen zuerst an Referenzbildern, bei denen alle Bildparameter definiert einstellbar sind. Anschließend erfolgt die Validierung an realen Messbildern. Ziel dieser grundlegenden Validierung ist der Vergleich und die Auswahl zwischen den beiden geeigneten Algorithmen sowie die Untersuchung der erzielbaren Genauigkeit in Abhängigkeit von der Größe des Messausschnittes.

Für die Erzeugung eines Referenzbilds wurden vier Streifenmuster überlagert (Abb. 5-18). Die Orientierung der Streifen ist an einen quadraxialen Aufbau mit Faserorientierungen

$[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ]$ angelehnt, der zusätzlich um -10° gedreht wurde, um Fehlinterpretationen durch Bildsymmetrie zu vermeiden. Die Intensität der Lagen wurde in 20 %-Schritten von oben nach unten reduziert, als Fadenprofil wurde eine \sin^2 -Funktion verwendet. Fadenabstand und Bildauflösung wurden an typische Wirbelstrombilder angelehnt (Tabelle 5-3).

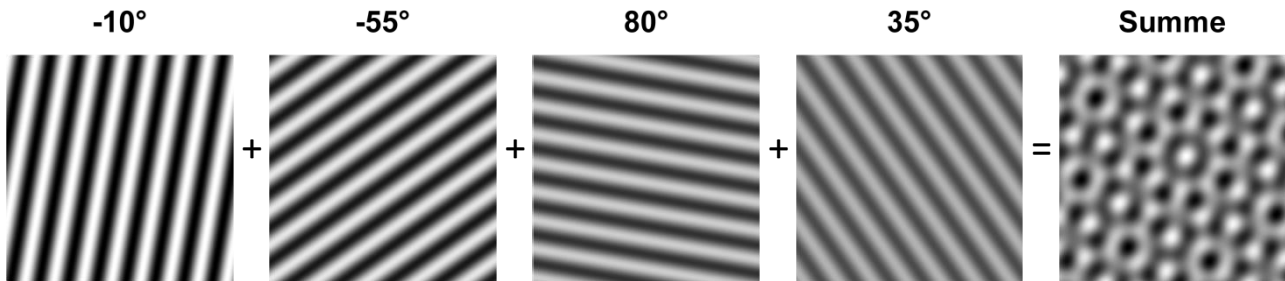


Abb. 5-18: Erzeugung des Referenzbildes „Quadraxialgelege“

Tabelle 5-3: Parameter des Referenzbildes „Quadraxialgelege“

Parameter	Wert
Faserrichtungen	$[-55^\circ/-10^\circ/35^\circ/80^\circ]$
Intensitäten	1/0,8/0,6/0,4
Fadenabstand	3,6 mm
Bildauflösung	10 pixel/mm
Ausschnittsgröße	10, 20, 30, ...100 mm Kantenlänge ²³

Als erster Vergleich wird die Messung bei variiertem *Ausschnittsgröße* untersucht. Je kleiner der Ausschnitt gewählt werden kann, ohne den Messfehler zu erhöhen, desto besser kann die lokale Faserorientierung festgestellt werden, während größere Ausschnitte zu einer stärkeren Mittelung der Faserorientierung führen.

Abb. 5-19 zeigt beispielhaft die Auswertebilder für Ausschnittsgrößen 10×10 , 15×15 und 40×40 mm² zusammen mit den berechneten Faserorientierungsverteilungen für die beide Auswerteverfahren. Lediglich bei der kleinsten Ausschnittsgröße, 10×10 mm², ist für das Fadensystem mit der geringsten Intensität (35°) kein lokales Maximum detektierbar. Beim gewählten Fadenabstand von 3,6 mm enthält der Bildausschnitt weniger als drei Fäden jeder Orientierung, was nicht ausreicht, um nach der Fensterung noch alle Richtungen detektieren zu können. Deutlich ist, dass Fourier- und Radontransformation für die anderen beiden Ausschnitte fast identische Ergebnisse liefern, und die Maxima mit zunehmender Größe des Bildausschnitts schmaler werden, d.h., schärfer abgegrenzt werden können.

²³ Der Radius des effektiven Auswerteausschnitts (vgl. Kapitel 5.3.2) ist jeweils halb so groß.

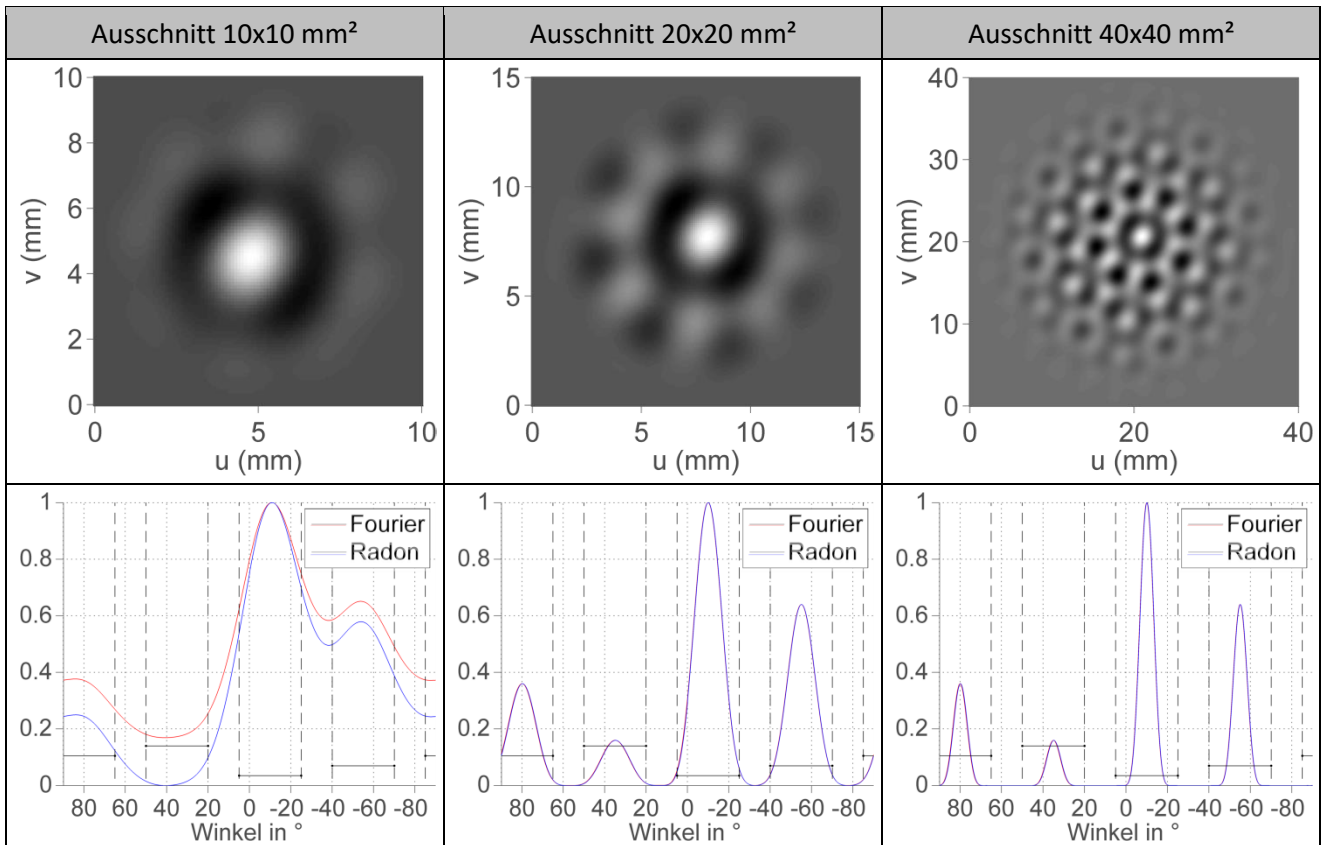


Abb. 5-19: Einfluss der Ausschnittgröße auf die Faserorientierungsverteilung am Referenzbild

Abb. 5-20 zeigt die Beträge der Abweichungen bei der Orientierungsmessung der einzelnen Lagen für Ausschnittsgrößen von 10x10 bis 60x60 mm². Die Fouriertransformation liefert für Ausschnittsgrößen $\geq 20 \times 20$ mm² das exakte Ergebnis (Abweichung $< 0,1^\circ$), unter 20 mm² steigt die Abweichung stark an. Für Ausschnittsgrößen $\leq 15 \times 15$ mm² werden für die unterste Lage keine Maxima mehr gefunden (fehlender weißer Balken für die vierte Lage). Die Radontransformation besitzt für Ausschnittsgrößen $\geq 15 \times 15$ mm² einen Winkelfehler von $\pm 0,2^\circ$, der auf die Diskretisierung des Bildes bei der Berechnung zurückzuführen ist. Für den kleinsten Ausschnitt entsteht auch hier eine starke Abweichung.

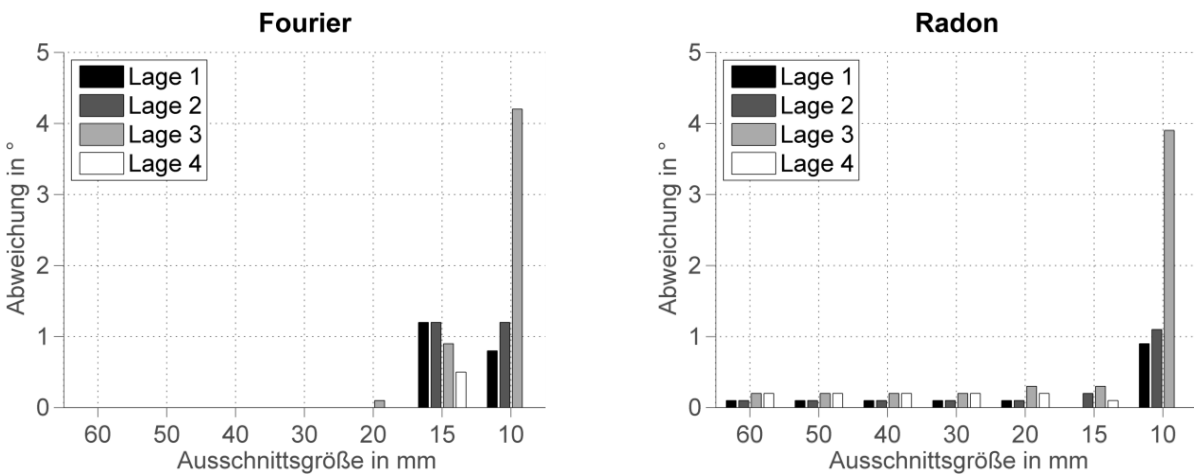


Abb. 5-20: Einfluss der Ausschnittsgröße auf Winkelabweichungen am Referenzbild

Von Interesse ist neben der Genauigkeit die Winkelauflösung, d.h. die Fähigkeit zur Trennung von Faserorientierungen mit geringem Winkelunterschied. In den Referenzbildern in der folgenden Abb. 5-21 sind zwei Streifenmuster Winkeldifferenzen von 7, 8 und 9° überlagert. Bei der dargestellten Ausschnittsgröße von 50x50 mm² ist eine Trennung von Winkeln bis 9° möglich, bei kleineren Winkelunterschieden verschmelzen die Maxima. Beide Verfahren liefern praktisch identische Ergebnisse.

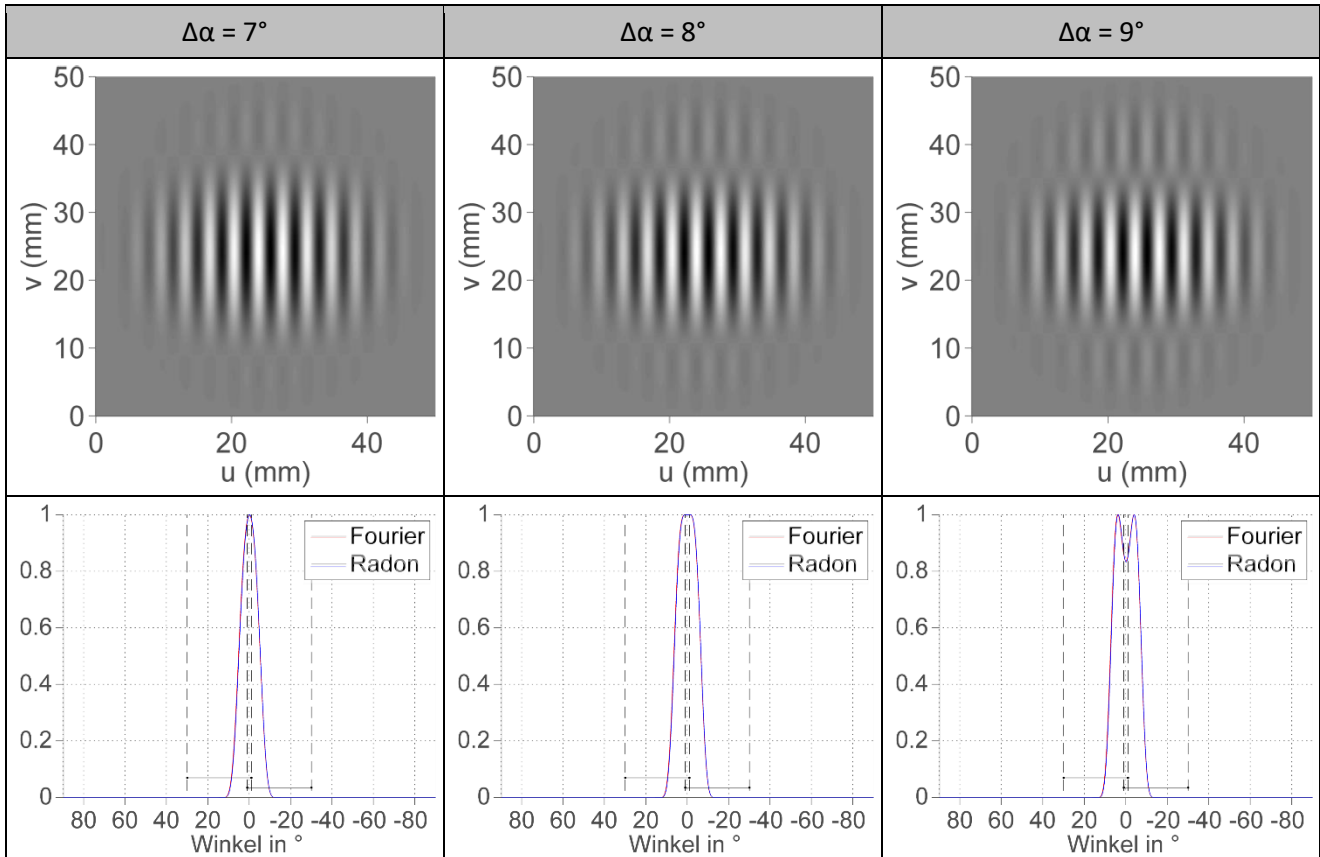


Abb. 5-21: Auflösbare Winkeldifferenz bei Ausschnittsgröße 50x50 mm²

Abb. 5-22 zeigt die ermittelte Winkelauflösung in Abhängigkeit von der Ausschnittsgröße, wobei der Kurvenverlauf für beide Auswerteverfahren vollständig identisch ist.

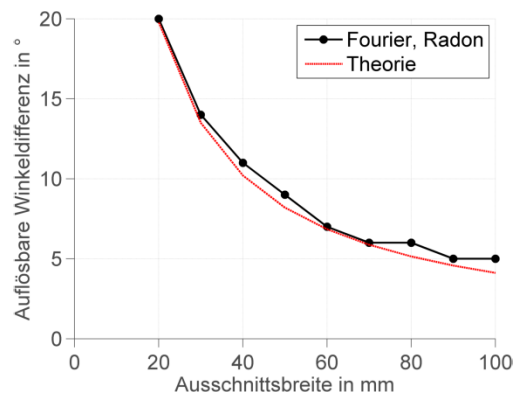


Abb. 5-22: Auflösbare Winkeldifferenz in Abhängigkeit von der Ausschnittsgröße

Deutlich wird daran, dass die auflösbare Winkeldifferenz durch die Ausschnittsgröße und nicht durch das verwendete Bildauswerteverfahren definiert wird. Die Winkelauflösung, d.h., der

minimale Winkelversatz, mit dem zwei ähnlich orientierte Fadensysteme auflösbar sind, ist wesentlich größer (d.h., schlechter) als die Auswertegenauigkeit, mit der die Orientierung eines einzelnen Fadensystems bestimmt werden kann. Der Grund hierfür ist die vollständige Überdeckung der Streifen im analysierten Bild, die durch kein Bildauswerteverfahren aufgelöst werden kann, und die nach Abb. 5-23 hergeleitet werden kann zu:

$$\Delta\alpha_{min} = \arctan\left(\frac{2d}{a}\right), \quad (5-9)$$

worin

$\Delta\alpha_{min}$	Kleinsten auflösbaren Winkel in °
d	Fadenabstand in mm
a	Kantenlänge Auswerteausschnitt in mm.

Bei einer Größe des Auswerteausschnitts von 50x50 mm², einem Fadenabstand von 3,6 mm und einer Winkeldifferenz von 8,2° überlagern sich die Fäden im Auswerteausschnitt komplett. Die hierfür in Abb. 5-22 eingetragene Kurve entspricht den mit beiden Algorithmen erzielten Ergebnissen exakt.

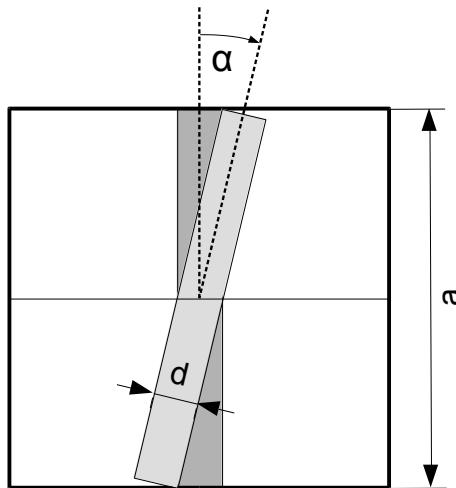


Abb. 5-23: Zur Herleitung der kleinsten auflösbaren Winkeldifferenz

5.3.6 Algorithmenvergleich an realen Wirbelstrombildern

Für den Vergleich der entwickelten Algorithmen an einem realen Wirbelstrombild wird der Ausschnitt 4-4 des drapierten Quadralgeleges verwendet (vgl. Abb. 5-9 aus dem Abschnitt zur Aufbereitung der Wirbelstromdaten). Die Faserorientierung im Zentrum des Bildausschnitts wurde durch manuelles Ausmessen zu $[-87^\circ/-44^\circ/2^\circ/49^\circ]$ bestimmt. Abb. 5-24 zeigt die Detektionsergebnisse für die drei Ausschnittsgrößen 20x20, 40x40 und 60x60 mm². Auch bei einer Ausschnittsgröße von 20x20 mm² können mit beiden Verfahren für alle vier Faserrichtungen lokale Maxima detektiert werden.

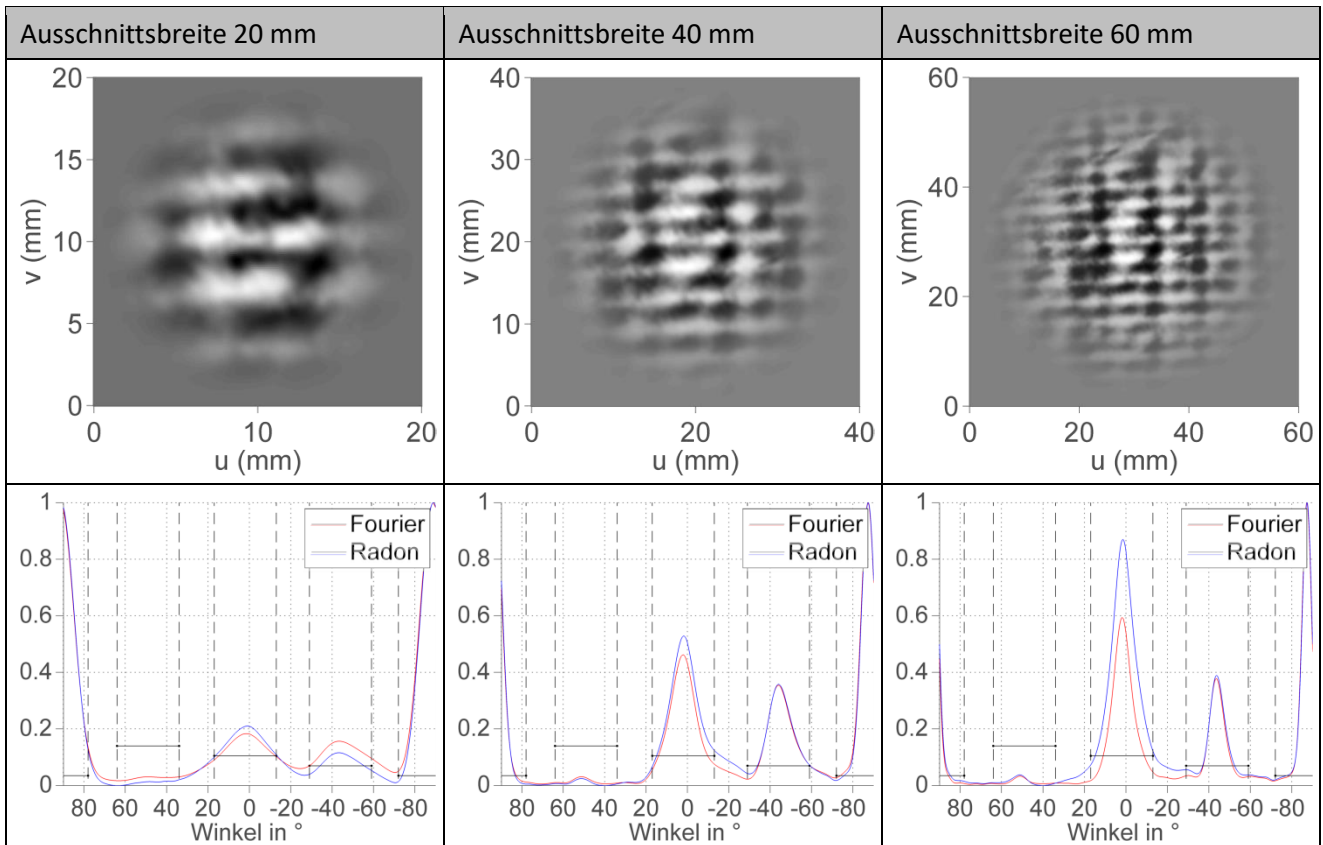


Abb. 5-24: Einfluss der Ausschnittsgröße auf Faserorientierungsverteilung an Realdaten

Abb. 5-25 vergleicht die Abweichungen mit den manuell bestimmten Faserrichtungen für die vier Fadensysteme. Wie schon bei den Referenzbildern liefert die Fouriertransformation leicht geringere Abweichungen.

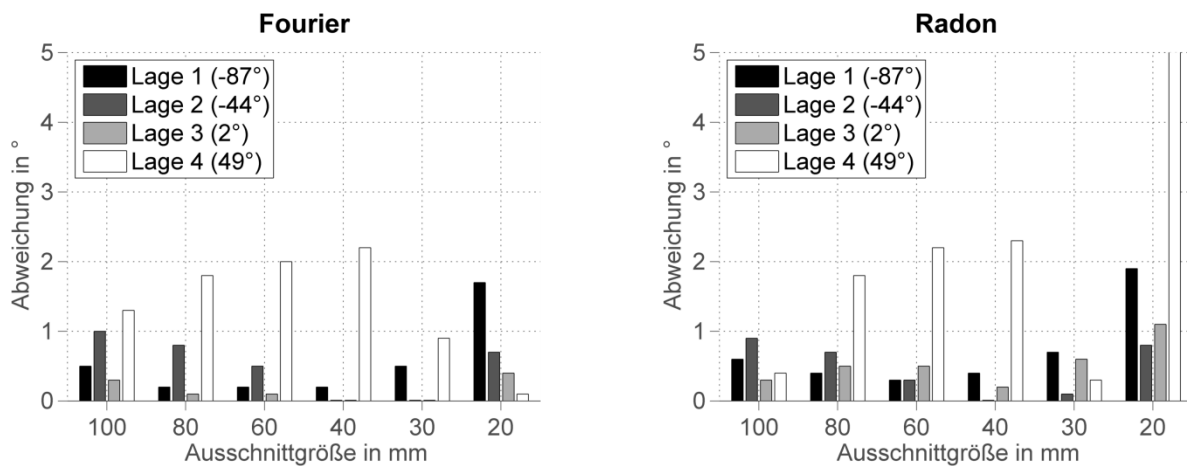


Abb. 5-25: Einfluss der Ausschnittsgröße auf Winkelabweichungen an Realdaten

5.3.7 Algorithmenauswahl und Fazit

Aus dem dargestellten Vergleich der beiden Algorithmen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

1. Die Fouriertransformation liefert sowohl für die Referenzbilder als auch für die realen Wirbelstrombilder leicht bessere Ergebnisse bei der Bestimmung der Faserorientierung.

- Die Winkelauflösung (kleinste unterscheidbare Winkeldifferenz zweier Lagen) ist für beide Verfahren identisch und wird nicht durch das Detektionsverfahren, sondern durch die Überlagerung der („breiten“) Fäden bei kleinen Bildausschnitten definiert.
- Zusätzlich zu den gezeigten Vorteilen ist die Rechenzeit für das auf Fouriertransformation beruhende Bildauswerteverfahren ca. 40 % geringer.

Aus diesen Gründen wird die Fouriertransformation als Bildauswerteverfahren ausgewählt und als Algorithmus zur Faserorientierungsmessung implementiert.

5.4 Verfahren zur Rekonstruktion der 3D-Fadenverläufe

Mit der entwickelten Faserorientierungsmessung steht nun ein Verfahren zur Verfügung, mit dem die lokalen Faserorientierungen der Einzellagen in der Umgebung jedes Auswertepunktes bestimmt werden können. Abb. 5-26 zeigt für das zur Halbkugel drapierte Quadraxialgelege die gemessenen Faserorientierungen an den 82 Auswertepunkten. Die Größe der Auswerteausschnitte wurde mit $60 \times 60 \text{ mm}^2$ gewählt, der effektive Auswerteradius beträgt somit 30 mm.

Die Faserorientierung konnte mit dem entwickelten Verfahren für alle vier Lagen an allen Punkten bestimmt werden, mit Ausnahme von drei Punkten, an denen keine Orientierung für die unterste Lage ermittelt werden konnte (blaue Kreise). Alle drei Punkte liegen am Rand des Messbereichs, wo für einen Teil der Punktumgebung keine Bildinformationen vorliegen. Die Orientierung der vierten Lage an diesen Punkten wird daher durch Interpolation aus den Orientierungen der benachbarten Auswertepunkte bestimmt.

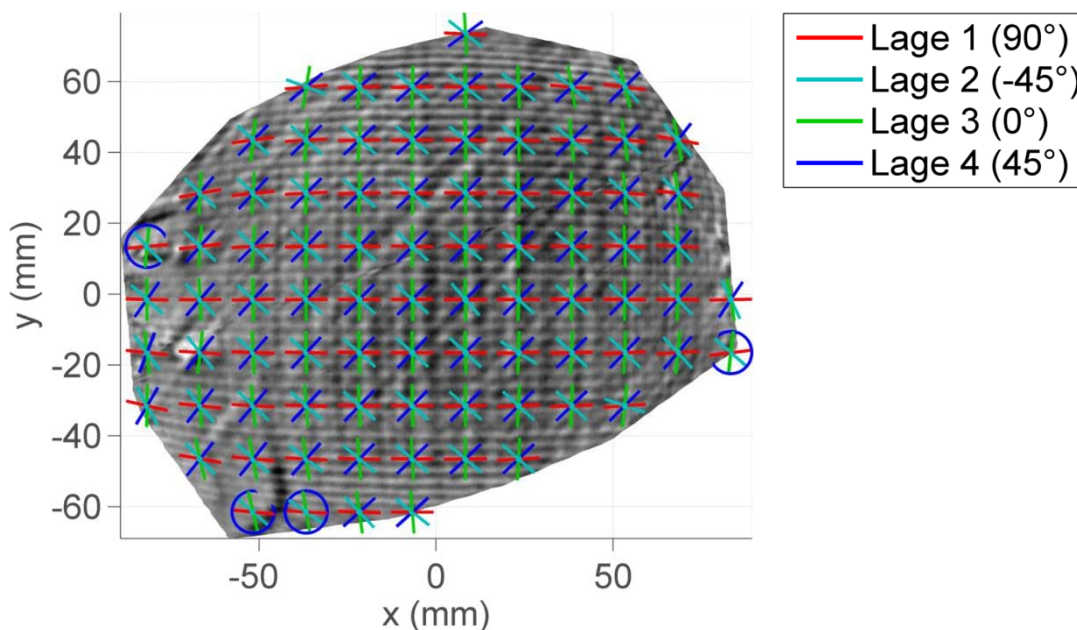


Abb. 5-26: Gemessene lokale Faserorientierungen für das Quadraxialgelege

Um die Ergebnisse der Faserorientierungsmessung zu visualisieren und verschiedene Messungen intuitiv vergleichen zu können, werden die ermittelten Faserorientierungen genutzt, um den Verlauf exemplarischer Fäden („Referenzfäden“) über die Oberfläche zu rekonstruieren. Dies wird algorithmisch wie folgt umgesetzt:

- Für jeden Referenzfaden wird ein Startpunkt auf der Oberfläche gesetzt.

2. Die Fadenrichtung an diesem Startpunkt wird durch Interpolation aus den Faserrichtungen der benachbarten Auswertepunkten bestimmt.
3. Vom aktuellen Punkt wird um eine kleine Schrittweite (0,5 mm) in Richtung der lokalen Fadenrichtung vorangeschritten. Der erreichte Punkt wird als neuer Startpunkt gesetzt.
4. Schritte 2 und 3 werden so lange wiederholt, bis der Referenzfaden den Rand der Oberfläche erreicht hat.

Die Platzierung der Startpunkte für alle Referenzfäden im ersten Schritt erfolgt so, dass die Startpunkte mit gleichmäßigem Abstand auf einer Linie über die gesamte Oberfläche liegen. Der Abstand der Referenzfäden muss hierbei nicht identisch mit dem Fadenabstand des textilen Halbzeugs sein, sondern kann für die jeweilige Visualisierung frei gewählt werden. Abb. 5-27 zeigt die rekonstruierten Fadenverläufe für die vier Lagen des Quadraxialgeleges. Die korrekte Messung der 3D-Faserrichtungen kann durch Vergleich der rekonstruierten Fadenverläufe mit den im Wirbelstrombild erkennbaren Streifenmuster qualitativ geprüft werden: wenn die lokale Orientierung korrekt bestimmt wurde, verlaufen die rekonstruierten Referenzfäden parallel zum Streifenmuster des Wirbelstrombilds, bei Winkelabweichungen kreuzen sie das Streifenmuster. Die rekonstruierten Fadenverläufe in Abb. 5-27 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

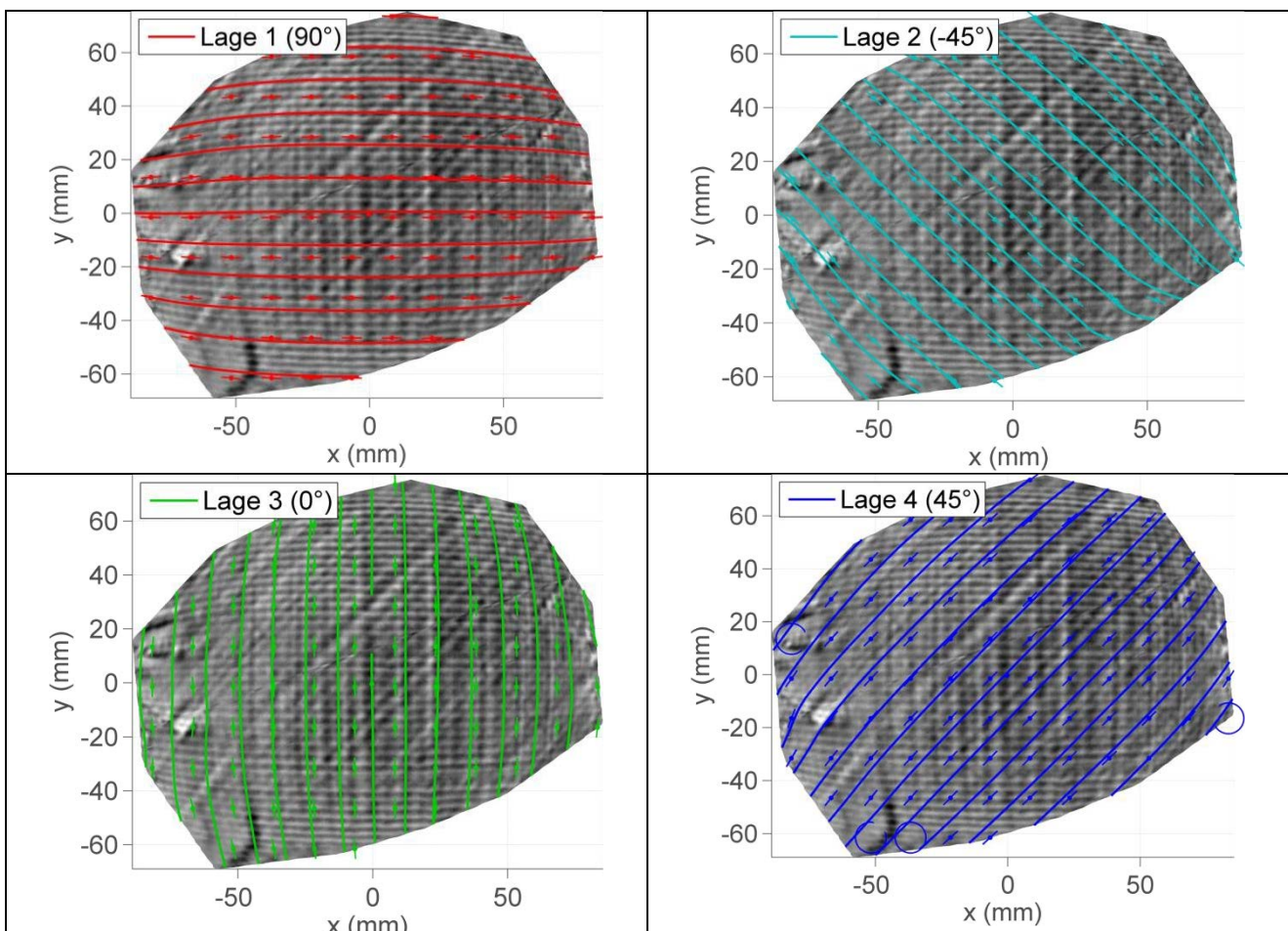


Abb. 5-27: Rekonstruierte 3D-Fadenverläufe im Quadraxialgelege

5.5 Berechnung der 3D-Scher- und Faserwinkel

Für die Analyse des Verformungsverhaltens textiler Halbzeuge wird i.d.R. der Scherwinkel betrachtet, der die Veränderung des Relativwinkels zweier ursprünglich rechtwinklig verkreuzter Fadensysteme angibt:

$$\gamma = 90^\circ - |\Delta\alpha_1| \quad (5-10)$$

worin

γ	Scherwinkel (in °)
$\Delta\alpha$	Winkel zwischen den Faserrichtungen zweier Fadensysteme nach Drapierung

Ein Scherwinkel von 35° bedeutet, dass die Fäden anstelle der ursprünglich 90°-Verkreuzung nun im Winkel von 55° zueinander verlaufen.

Abb. 5-28 zeigt die berechneten Scherwinkel zwischen Lagen 1 und 3 (0°/90°) des Quadraxialgeleges.

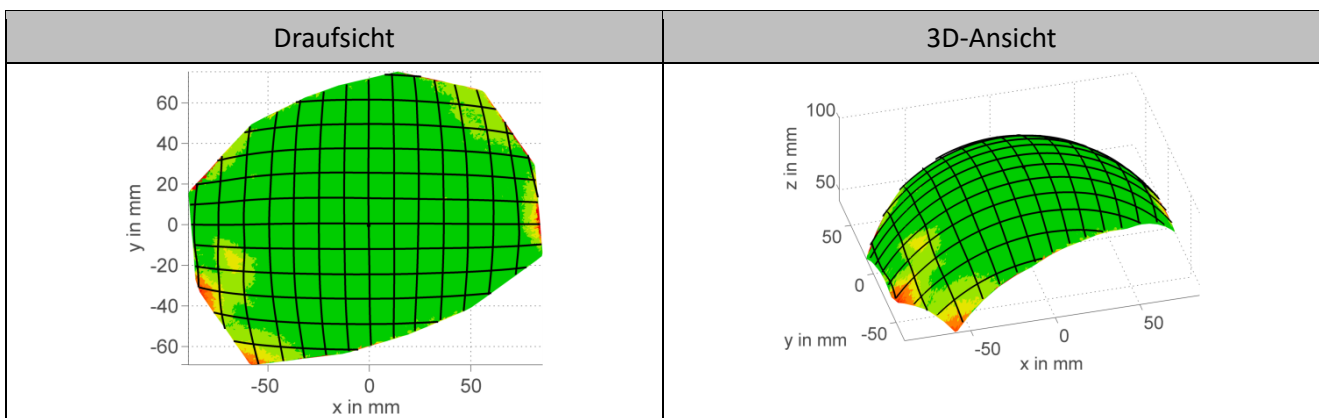


Abb. 5-28: Scherwinkel Lage 1/Lage 3 des Quadraxialgeleges

Im Gegensatz zum Scherwinkel ist der *Faserwinkel* für eine dreidimensionale Oberfläche nicht eindeutig definiert. Die gemessenen Faserorientierungen liegen lediglich als Vektor vor, für die Bestimmung eines Winkels wird allerdings ein Bezugsvektor benötigt. Da für den quantitativen Vergleich zwischen zwei Messungen nichtsdestotrotz der 3D-Faserwinkel sinnvoll ist, wird er analog zur Definition in der Ebene in dieser Arbeit als der Winkel definiert, den der Faserorientierungsvektor v_F an einem Punkt mit der an diesen Punkt auf die Oberfläche projizierten y -Achse, y_{proj} , einschließt (Abb. 5-29). Die auf die Oberfläche projizierte y -Achse liefert somit den notwendigen Bezugsvektor. Für den Spezialfall, dass der Faserorientierungsvektor v_F in der x - y -Ebene liegt, ergibt sich die bereits eingeführte 2D-Definition (vgl. Fußnote 21, S. 59).

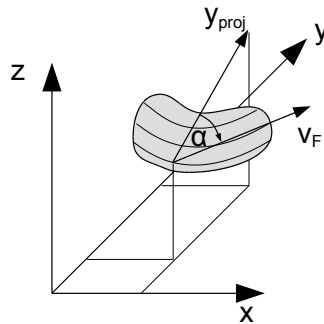


Abb. 5-29: Definition des Fadenwinkels auf einer 3D-Oberfläche

Abb. 5-30 zeigt für die obersten beiden Lagen des Quadraxialgeleges die berechneten Faserwinkel.

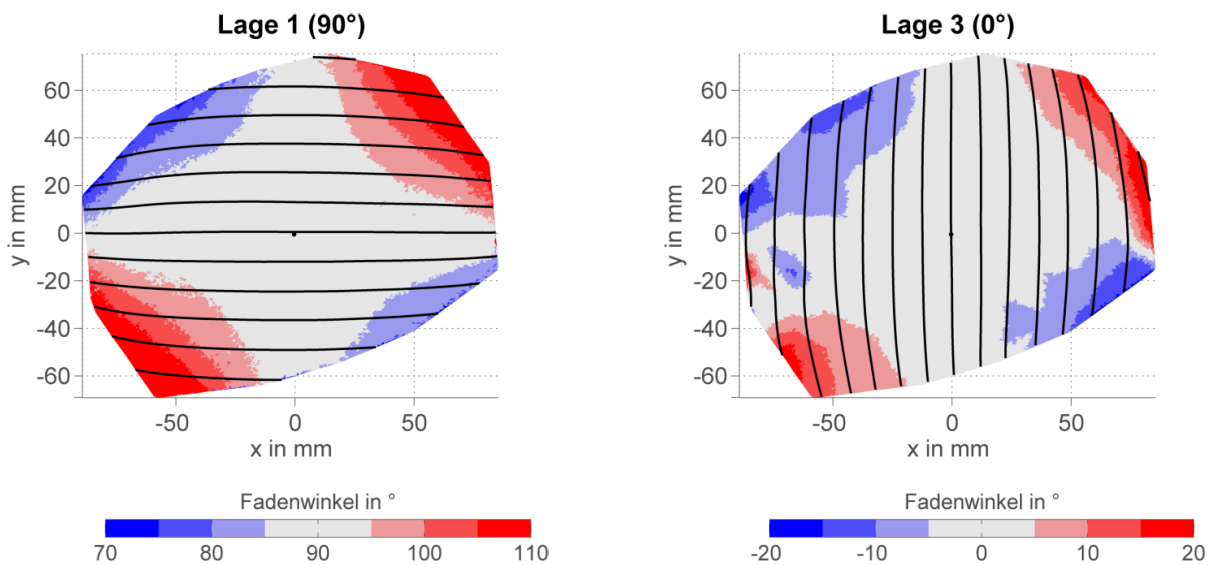


Abb. 5-30: Berechnete 3D-Fadenwinkel für das Quadraxialgelege

5.6 Zusammenfassung zur Algorithmenentwicklung

Das in diesem Kapitel entwickelte Verfahren zur automatischen Orientierungsmessung ermöglicht es erstmals, die in den 3D-Wirbelstromdaten abgebildeten Fadenverläufe quantitativ auszuwerten und zu vergleichen. Hierfür wurde eine automatische Vorbereitung der Wirbelstromdaten, eine robuste Messung der im Wirbelstrombild überlagerten lokalen Faserorientierungen und eine Zuordnung der detektierten Orientierungen zu den einzelnen Fadensystemen umgesetzt. Als Bildauswertungsalgorithmus wurde hierbei die Fouriertransformation genutzt, für die beim Vergleich an Referenzbildern und realen Wirbelstromdaten eine bessere Genauigkeit erzielt wurde als für die ebenfalls geeignete Radontransformation.

Mit dem Verfahren zur vollständigen Erfassung dreidimensionaler Oberflächen aus dem vorhergehenden vierten Kapitel und der in diesem Kapitel entwickelten automatischen Faserorientierungsmessung stehen die Werkzeuge für die Durchführung und Auswertung von 3D-Wirbelstrommessungen zur Verfügung. Im folgenden Kapitel 6 werden Untersuchungen zum Einfluss der Material- und Prüfparameter auf die erzielbare Messgenauigkeit durchgeführt, um für die jeweiligen Materialien geeignete Messparameter ableiten zu können. Anschließend erfolgt in Kapitel 7 die Validierung an 3D-Strukturen.

6 Experimentelle Untersuchung der Messunsicherheit an 2D-Gelegestapeln

6.1 Versuchsplanung

6.1.1 Einflussfaktoren auf die Abbildung der Carbonfäden im Wirbelstrombild

Ziel dieses Kapitels ist die Untersuchung der Messgenauigkeit der entwickelten Faserorientierungsmessung in Abhängigkeit der Prozess- und Materialparameter. Als Prüfobjekt dienen hierbei mehrlagige 2D-Gelegestapel (Stacks), bei denen die Faserorientierung der einzelnen Lagen definiert einstellbar und über die gesamte Messfläche konstant ist. Dadurch können Aussagen über die Messgenauigkeit unabhängig von der jeweiligen 3D-Geometrie abgeleitet werden.

Da das entwickelte Verfahren auf der Auswertung der in den Wirbelstrombildern vorhandenen periodischen Strukturen beruht, wirken sich alle Parameter auf die Messgenauigkeit aus, die die Abbildung der Carbonfäden als periodische Struktur beeinflussen (vgl. Abb. 6-1). Dies sind zum einen die *Prozessparameter* der Wirbelstromprüfung selbst, für die ein Optimum zu bestimmen ist, zum anderen die *Materialparameter* des Prüfkörpers, die i.d.R. nicht verändert werden können, deren Einfluss auf die Messgenauigkeit aber abzuschätzen ist.

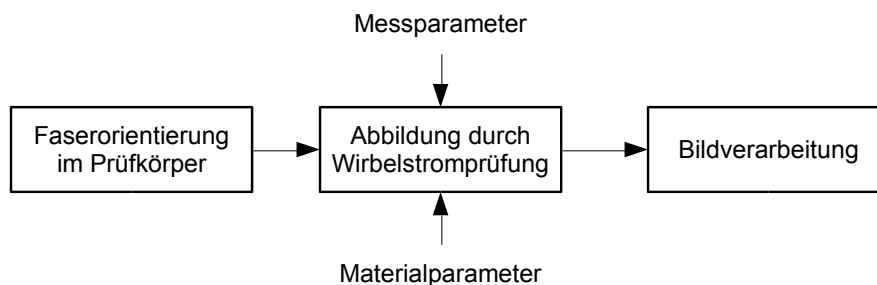


Abb. 6-1: Ablaufschema für die Faserorientierungsmessung

Aus den Grundlagen der Wirbelstromprüfung von Carbonfasermaterialien (Kapitel 3) lassen sich die folgenden Parameter identifizieren, für die ein Einfluss auf die Abbildung der Carbonfäden als periodische Struktur zu erwarten ist (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Prozess- und Materialparameter mit erwartetem Einfluss auf die Messunsicherheit

	Parameter	Erwartete Wirkung
Prozess- parameter	Spulenanordnung	Abbildungsfunktion der Sensoren
	Spulendurchmesser	Auflösung, Eindringtiefe
	Spulenabstand *	Auflösung, Eindringtiefe
	Sensororientierung *	Richtungsabhängige Abbildungsfunktion
	Messfrequenz	Signal-Rausch-Verhältnis, Eindringtiefe
Material- parameter	Gelegetyp	Kontrast zwischen benachbarten Carbonfaserbündeln (Signal-Rausch-Verhältnis)
	Lagenanzahl im Stapel	Signal-Rausch-Verhältnis für Abbildung der einzelnen Lage
	Position der Lage im Stapel	Intensität der Abbildung dieser Lage (Signal-Rausch-Verhältnis)

* nur bei Halbtransmissionssensoren (versetzte Sende- und Empfangsspule)

Für die Spulenanordnung (Absolut oder Halbtransmission) sowie die Sensororientierung bei Halbtransmissionssensoren wird ein Einfluss auf die Abbildungsfunktion erwartet, d.h., wie stark der Unterschied zwischen Carbonfäden (hohe Leitfähigkeit) und den dazwischen bestehenden Gassen bzw. Randbereichen der Fäden (niedrige Leitfähigkeit) abgebildet wird.

Von Spulendurchmesser, Spulenabstand und Messfrequenz wird vor allem ein Einfluss auf die Auflösung (Abbildung kurzweiliger periodischer Strukturen) und die Eindringtiefe erwartet (vgl. Kapitel 3.2).

Bei den Materialparametern definiert der Gelegetyp die Kompaktierung der Carbonfasern zu diskreten Faserbündeln, und daher die Abbildung der Carbonfaserorientierung als periodisches Streifenmuster der Fäden.

Die Anzahl der Lagen im Stapel und die Position der Lage im Stapel beeinflussen das Signal-Rausch-Verhältnis für die Abbildung der jeweiligen Lage: je weniger weitere Lagen im Stapel vorhanden sind, und je weiter oben die Lage im Stapel liegt, desto stärker wird ihre Fadenstruktur im Wirbelstrombild abgebildet und eine desto geringere Messunsicherheit wird erwartet.

6.1.2 Versuchsplan

Für die Untersuchung der Wirkung der Material- und Prozessparameter auf die Messunsicherheit wurden Faktorstufen festgelegt und ein Versuchsplan aufgestellt. Hierbei wurden folgende Entscheidungen getroffen:

1. Als *Gelege* wurden zwei sich in ihrer Fadenstruktur stark unterscheidende Gelegetypen ausgewählt, ein Biaxialgelege, in dem die Fasern zu deutlichen Faserbündeln kompaktiert sind, und die einzelnen Faserbündel durch deutliche Gassen getrennt sind. Damit verglichen wird ein UD-Gelege, in dem die Fasern als parallele Bänder vorliegen und die Fadenstruktur optisch kaum erkennbar ist. (Für die Darstellung und Charakterisierung der Gelege siehe Kapitel 6.3 weiter unten).
2. Die Faktoren *Spulendurchmesser* und *Spulenabstand* (bei Halbtransmissionssensoren) werden kombiniert untersucht. Die zur Verfügung stehenden Halbtransmissionssensoren besit-

zen einen Spulenabstand, der mit dem Spulendurchmesser identisch ist. Die Kombination dieser beiden Faktoren ist rechtfertigbar, da sie die gleiche Wirkung und gleiche Wirkrichtung besitzen (größere Spulendurchmesser und größere Spulenabstände vergrößern die Eindringtiefe und verringern die Auflösung).

Abb. 6-2 zeigt die Faktoren und Faktorstufen des Versuchsplans für die Ermittlung der Messgenauigkeit. Insgesamt werden 80 Versuche für das Biaxialgelege und 48 Versuche für das UD-Gelege durchgeführt.²⁴

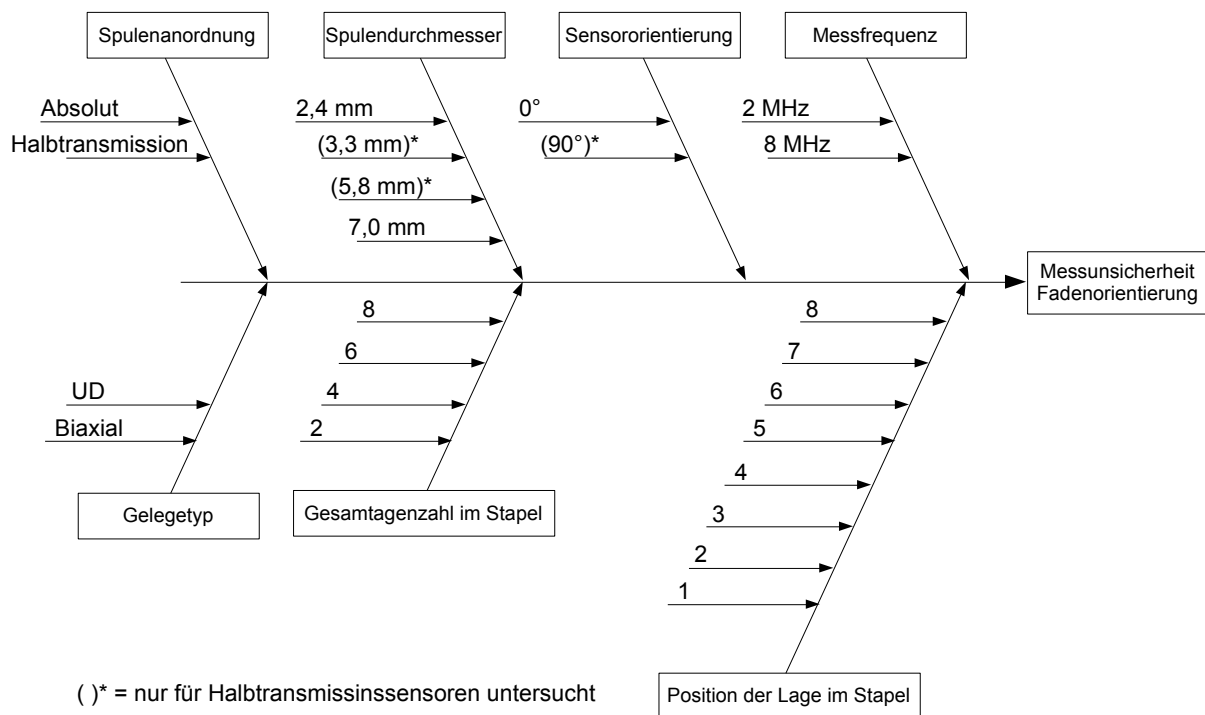


Abb. 6-2: Faktoren und Faktorstufen zur Untersuchung der Messunsicherheit

6.2 2D-Wirbelstrommessplatz und untersuchte Sensoren

Für die folgenden 2D-Untersuchungen wurde das auch für die späteren 3D-Messungen verwendete Wirbelstrommesssystem „EddyCus Integration Kit“ (Hersteller Fraunhofer IKTS, Dresden) in einen kartesischen Roboter „TT-C3-I-4040-10B-P“ (Hersteller IAI Industrieroboter GmbH) integriert (Abb. 6-3). Die Steuerung erfolgt über ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Matlab-Skript, das bei Vorgabe von Messbereich, Bahnabstand und Prüfgeschwindigkeit ein Roboter-Fahrprogramm generiert, das per USB-Kabel an den Tischroboter übertragen wird. Alle dargestellten 2D-Messungen erfolgten mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/s und einem Bahnabstand von 0,5 mm. Der Sensor ist in z-Richtung federnd gelagert, und die z-Höhe des Wirbelstromsensors gegenüber dem Gelege wurde so eingestellt, dass der Sensor das Gelege mit einem leichten Anpressdruck berührt. Da die Messspulen im Sensor von einem sehr dünnen Kunststofffilm

²⁴ Für das Biaxialgelege: 4 Stapel x (2 Absolutsensoren + [4 Halbtransmissionssensoren x 2 Orientierungen für die Halbtransmissionssensoren]) x 2 Messfrequenzen = 80 Versuche. Für das UD-Gelege wurden nur die Halbtransmissionssensoren mit dem größten und kleinsten Spulendurchmesser untersucht, so dass sich die Versuchszahl auf 4 x (2 + [2x2]) x 2 = 48 Versuche reduziert.

überdeckt sind (Dicke $< 0,5$ mm), ergibt sich hieraus ein vernachlässigbar kleiner Liftoff. Um eine Beschädigung oder Verschiebung der nicht fixierten Carbonfäden der Gelege während der Sensorbewegung zu vermeiden, wurde vor jeder Messung eine nichtleitfähige Kunststoffolie (Dicke $0,08$ mm) auf den Gelegestapel aufgelegt.

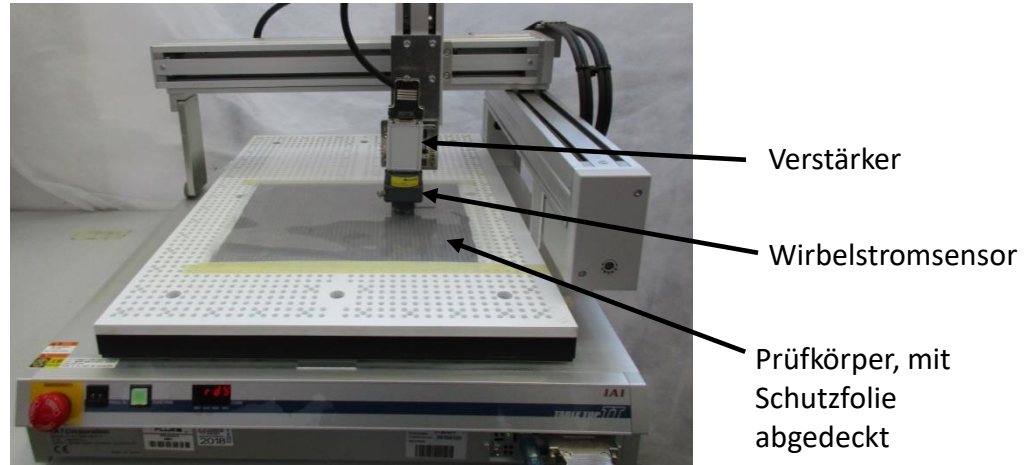


Abb. 6-3: 2D-Wirbelstrommessplatz

Als Sensoren werden zwei Absolutsensoren und vier Halbtransmissionssensoren untersucht, die im Folgenden mit den Abkürzungen *AT* bzw. *HT* (Absolut- bzw. Halbtransmissionssensor), gefolgt vom Spulendurchmesser in mm, bezeichnet werden. *AT 3,3* bezeichnet somit einen Absolutsensor mit Spulendurchmesser $3,3$ mm. Tabelle 6-2 enthält die relevanten Parameter der verwendeten Sensoren. Bei den untersuchten Halbtransmissionssensoren sind die Durchmesser der Sende- und Empfangsspulen identisch, ferner ist der Spulenabstand (Abstand zwischen den Mittelpunkten der Sende- und Empfangsspule) jeweils um wenige Millimeter größer als der Spulendurchmesser, d.h., Sende- und Empfangsspule liegen nebeneinander. Wie bereits beschrieben, werden auf diese Weise die Parameter Spulenabstand und Spulendurchmesser kombiniert betrachtet.

Alle dargestellten Sensoren wurden am Fraunhofer IKTS entwickelt und sind speziell für die Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung ausgelegt, d.h. sie besitzen hohe Resonanzfrequenzen zwischen 6 und 24 MHz.

Tabelle 6-2: Untersuchte Wirbelstromsensoren

Bezeichnung	Spulenanordnung	Spulendurchmesser (mm)	Spulenabstand (mm)	Resonanzfrequenz (MHz)	Seriennummer
AT 3,3	Absolut	3,3	-	7,3	S13131
AT 5,8	Absolut	5,8	-	6,1	S13132
HT 2,4	Halbtransmission	2,4	2,4	8,5	S15172
HT 3,3	Halbtransmission	3,3	3,5	24,3	S14152
HT 5,8	Halbtransmission	5,8	6	9,2	S14150
HT 7,0	Halbtransmission	7,0	7,8	17,0	S17257

6.3 Untersuchte Gelege

Das erste Gelege ist ein zweilagiges *Carbonfaser-Biaxialgelege* mit Faserorientierungen $0^\circ/90^\circ$, in dem die Fasern in beiden Lagen als kompaktierte Fäden vorliegen (Abb. 6-4). Die einzelnen, ca. 2,6 mm breiten Fäden der oberliegenden 0° -Lage sind zusätzlich durch ca. 0,9 mm breite Gassen getrennt. Ein solches Gelege zeichnet sich durch eine sehr gute Drapier- und Infiltrierbarkeit aus, da die kompakten Faserbündel gegeneinander verschiebbar sind und die Gassen bei der Harzinfiltration als Fließkanäle dienen. Es ist zu erwarten, dass die Faserorientierungsmessung durch das ausgeprägte Faden- und Gassenmuster eine hohe Messgenauigkeit liefert.

Als zweites Gelege wurde ein *einlagiges Unidirektional-(UD-) Gelege* mit Faserorientierung 0° ausgewählt, in dem die Fäden eine fast homogene Fläche bilden. Der Fadenabstand beträgt 5 mm und die Fäden grenzen unmittelbar aneinander. Mit solchen homogenen Gelegen können sehr hohe Faservolumenanteile und sehr hohe gewichtsbezogene Festigkeiten und Steifigkeiten erzielt werden, die Drapier- und Infiltrierbarkeit ist hingegen eingeschränkt. Es wird erwartet, dass die Faserorientierungsmessung des UD-Geleges aufgrund der homogenen Struktur mit höherer Messunsicherheit behaftet ist. Wie im Foto des UD-Geleges in Abb. 6-4 erkennbar, besitzt dieses auf der Rückseite einen geringen Anteil an relativ lose eingebundenen Glasfaserfäden in 90° -Richtung, die der Querstabilisierung bei der Handhabung dienen. Da die Glasfasern nicht elektrisch leitfähig sind, haben sie für die Wirbelstromprüfung keine Auswirkung. Tabelle 6-3 enthält für beide Gelege die textiltechnischen Parameter.

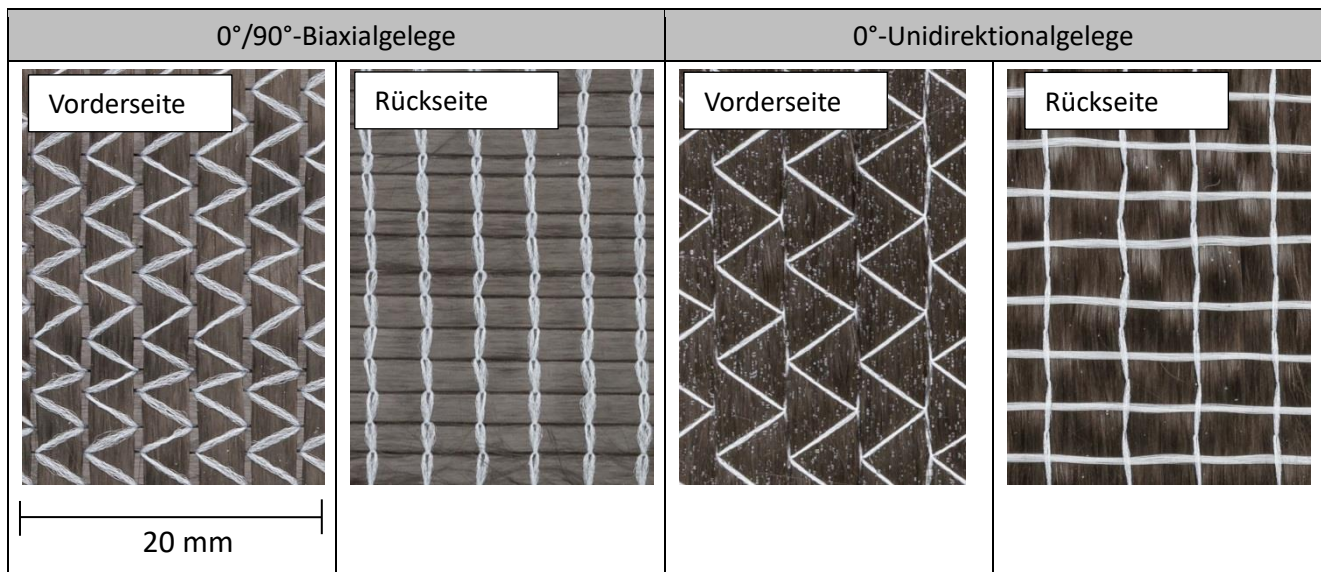


Abb. 6-4: Untersuchte Gelege

Tabelle 6-3: Textiltechnische Parameter der untersuchten Gelege

Bezeichnung	Faser- richtungen ($^\circ$)	Flächengewicht (g/m^2)	Faden- feinheit (tex)	Fadenabstand (mm)	Dicke (mm)	Hersteller
Biaxialgelege	0	224	800	3,5	0,6	ITM (TU Dresden)
	90	330	800	2,5		
	Summe	524				
UD-Gelege	0	300	800	4,8	0,3	Saertex

6.4 Voruntersuchungen zu Abbildungsverhalten und Wirbelstromausbreitung

6.4.1 Auflösung der Sensoren

Zum besseren Verständnis des Abbildungsverhaltens der Sensoren und für die spätere korrekte Interpretation der Ergebnisse werden die Sensoren zunächst bezüglich ihrer Ortsauflösung charakterisiert. Für die Abbildung der Fadenstruktur ist es erforderlich, dass die Auflösung kleiner ist als die abzubildende Fadenbreite, damit die periodische Fadenstruktur mit ausreichender Amplitude abgebildet wird. Die Auflösung eines abbildenden Messsystems kann dabei durch seine *Punktspreizfunktion* (point spread function) charakterisiert werden, die die Antwort des Messsystems auf einen infinitesimal kurzen Zeit- oder Ortsimpuls darstellt und mit der *Impulsantwort* des Messsystems identisch ist. Je *breiter* die Antwort des Messsystems auf den Impuls ist, desto stärker wird der Impuls „verschmiert“ und eng beieinanderliegende Impulse (z.B. räumlich benachbarte Fäden) können schlechter unterschieden werden. Als Maß für die Breite der Punktspreizfunktion kann die aus der Mikroskopie bekannte *Halbwertsbreite* (full width at half maximum, FWHM) verwendet werden, die als die Breite der Punktspreizfunktion bei halbem Maximalwert definiert ist. Je geringer die Halbwertsbreite, desto höher ist die Auflösung.

Da die Wirbelstrommessung an infinitesimal kleinen Objekten praktisch schwer möglich ist, wird für die Untersuchung der Auflösung der Zusammenhang ausgenutzt, dass die Impulsantwort eines Systems die Ableitung seiner Sprungantwort ist. Damit kann eine einfache Messung realisiert werden, indem der Sensor von einer Position in der Luft langsam über die Kante eines leitfähigen Objekts bewegt und das Messsignal (induzierte Spannung in der Empfängerspule) aufgezeichnet wird. Die erste Ableitung des aufgezeichneten Messsignals nach dem Weg ergibt die gesuchte Impulsantwort bzw. Punktspreizfunktion.

Abb. 6-5 zeigt für den Sensor HT 3,3 (Halbtransmission, Spulendurchmesser 3,3 mm) die Sprungantwort und die daraus abgeleitete Impulsantwort (Punktspreizfunktion). Hierbei wurden zwei Messungen mit Sensororientierung 0° und 90° durchgeführt. Als Prüfkörper wurde eine 5 mm dicke Graphitplatte verwendet, die in 90° -Richtung orientiert war (Abb. 6-5 links). Bei Sensororientierung 0° ist die Achse zwischen den beiden Spulen somit senkrecht zur Kante der Graphitplatte orientiert, bei Sensororientierung 90° parallel dazu.

Der Vergleich zeigt, dass die Sprungantwort *steiler* ist, wenn der Sensor in 90° -Richtung orientiert ist. Da in diesem Fall Sende- und Empfängerspule gleichzeitig von der Luft auf das leitfähige Material übergehen, wird ohne zeitlichen Versatz eine höhere Wirbelstromdichte registriert. Gelangen Sende- und Empfängerspule hingegen mit zeitlichem Versatz über die Kante zum leitfähigen Material (Sensororientierung 0°), wird der Leitfähigkeitssprung der Kante „verschmiert“, die Sprungantwort wird dementsprechend weniger steil, die Impulsantwort breiter.

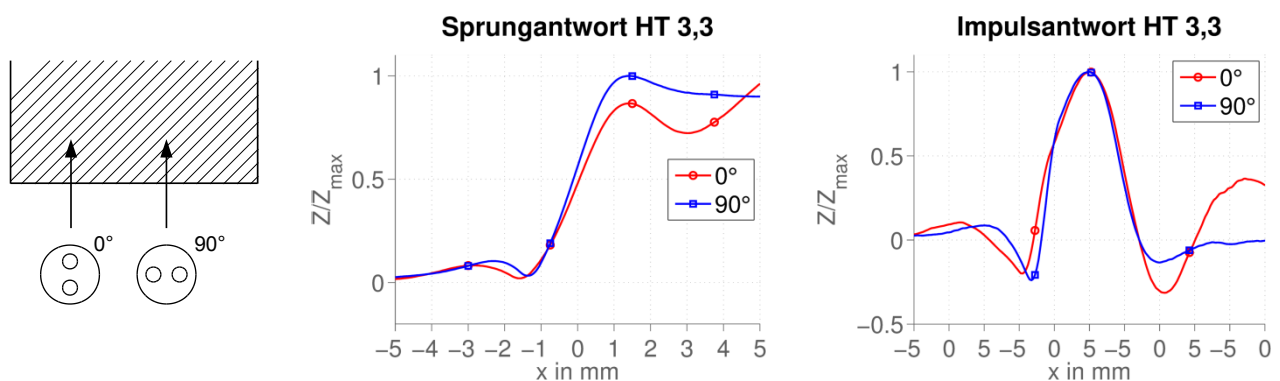


Abb. 6-5: Sprungantwort und Impulsantwort für Sensor HT 3,3 ($f = 6 \text{ MHz}$)

Abb. 6-6 zeigt die Punktspreizfunktion für alle sechs untersuchten Sensoren, in der deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Sensoren erkennbar sind.

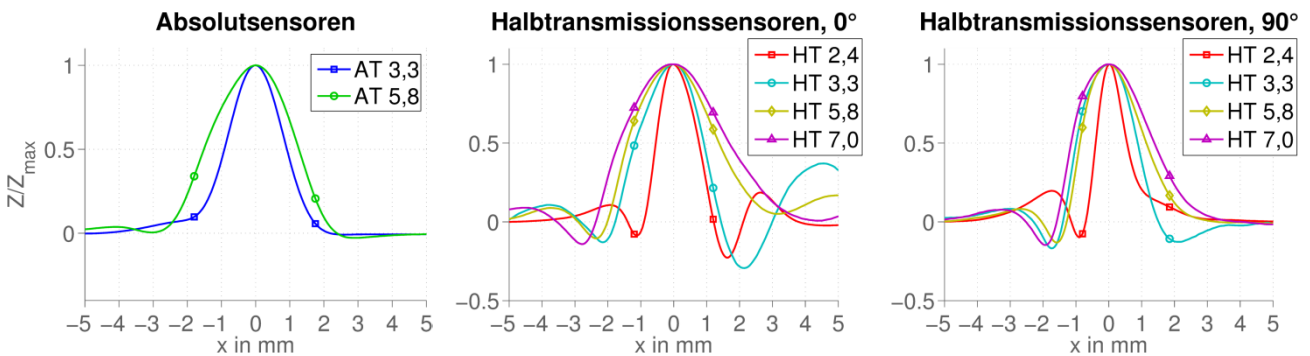


Abb. 6-6: Punktspreizfunktionen für alle Sensoren

Aus allen ermittelten Punktspreizfunktionen wurden anschließend die Halbwertsbreiten berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-7 dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bei gleichem Spulendurchmesser besitzen Absolut- und Halbtransmissionssensoren ähnliche Auflösungen.
2. Die Auflösung der Sensoren ist etwa *halb so groß* wie der Spulendurchmesser.
3. Die Auflösung von Halbtransmissionssensoren ist höher, wenn die Achse zwischen beiden Spulen *parallel* zum abzubildenden Merkmal liegt.

Wird daher gefordert, dass der Sensor eine periodische Fadenstruktur mit der Hälfte der maximalen Amplitude abbildet (= Definition der Halbwertsbreite), so ergibt sich der Richtwert, *dass der Spulendurchmesser höchstens doppelt so groß wie der Fadenabstand sein sollte*.

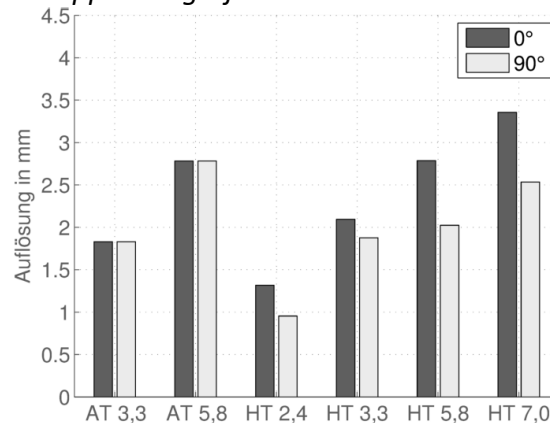


Abb. 6-7: Gemessene Auflösung (Halbwertsbreite) der Sensoren

Die durchgeführten Betrachtungen zur Sensorauflösung wurden an den untersuchten Carbonfasergelegen validiert. Abb. 6-8 zeigt Messergebnisse für die sechs Sensoren an einem vierlagigen Biaxialgelegestapel. Die Faserorientierung der Lagen beträgt $[-45^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ]$, wobei die obersten beiden Lagen (-45° und $+45^\circ$) in den Wirbelstrombildern deutlich erkennbar sind. Der Fadenabstand der oberliegenden -45° -Lage beträgt 2,6 mm, der Fadenabstand der an zweiter Position liegenden $+45^\circ$ -Lage 3,6 mm (vgl. Tabelle 6-3 oben). Die Fadenstruktur der -45° -Lage (von unten links nach oben rechts verlaufend) ist ab einem Spulendurchmesser von 5,8 mm (Sensoren AT 5,8 und HT 5,8) nur noch verschwommen erkennbar. Bei einem Spulendurchmesser von 7,0 mm (Sensor HT 7,0) ist auch die Fadenstruktur der $+45^\circ$ -Lage nicht mehr erkennbar. Die zu geringe Auflösung der Sensoren führt dann zu einem „Verschmieren“ der lokalen Leitfähigkeitsunterschiede und für eine Faserorientierungsmessung ist mit großen Messunsicherheiten zu rechnen.

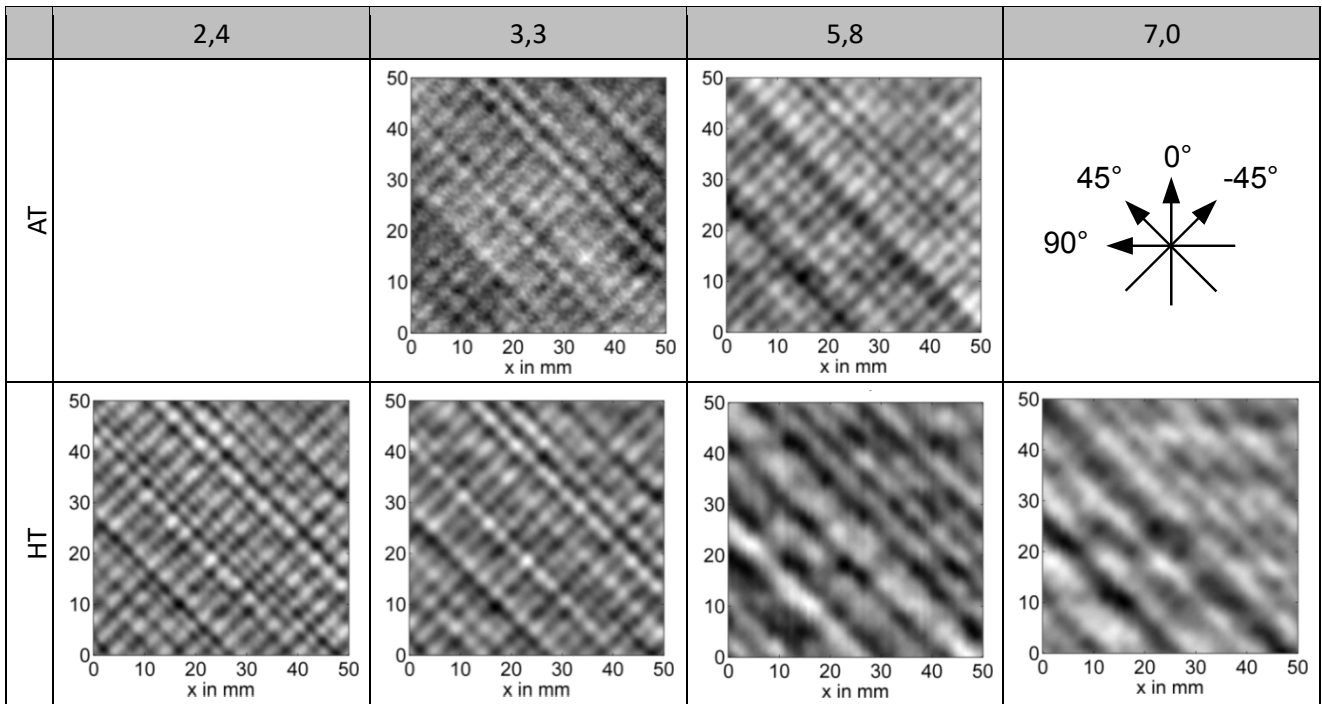


Abb. 6-8: Abbildung der Fadenstruktur in Abhängigkeit vom Sensor, vierlagiger Biaxialgelegestapel

Abb. 6-9 zeigt Messungen an einem UD-Gelegestapel mit identischem Lagenaufbau. Im Vergleich zum Biaxialgelege besitzt das untersuchte UD-Gelege einen größeren Fadenabstand von 5 mm, und auch die Sensoren mit 5,8 und 7,0 mm Spulendurchmesser (AT 5,8 und HT 7,0) können die Fadenstruktur hinreichend gut abbilden. Der aus der Sensorcharakterisierung gewonnene Richtwert, dass der Spulendurchmesser *höchstens doppelt so groß* sein sollte wie der Fadenabstand, kann somit bestätigt werden.

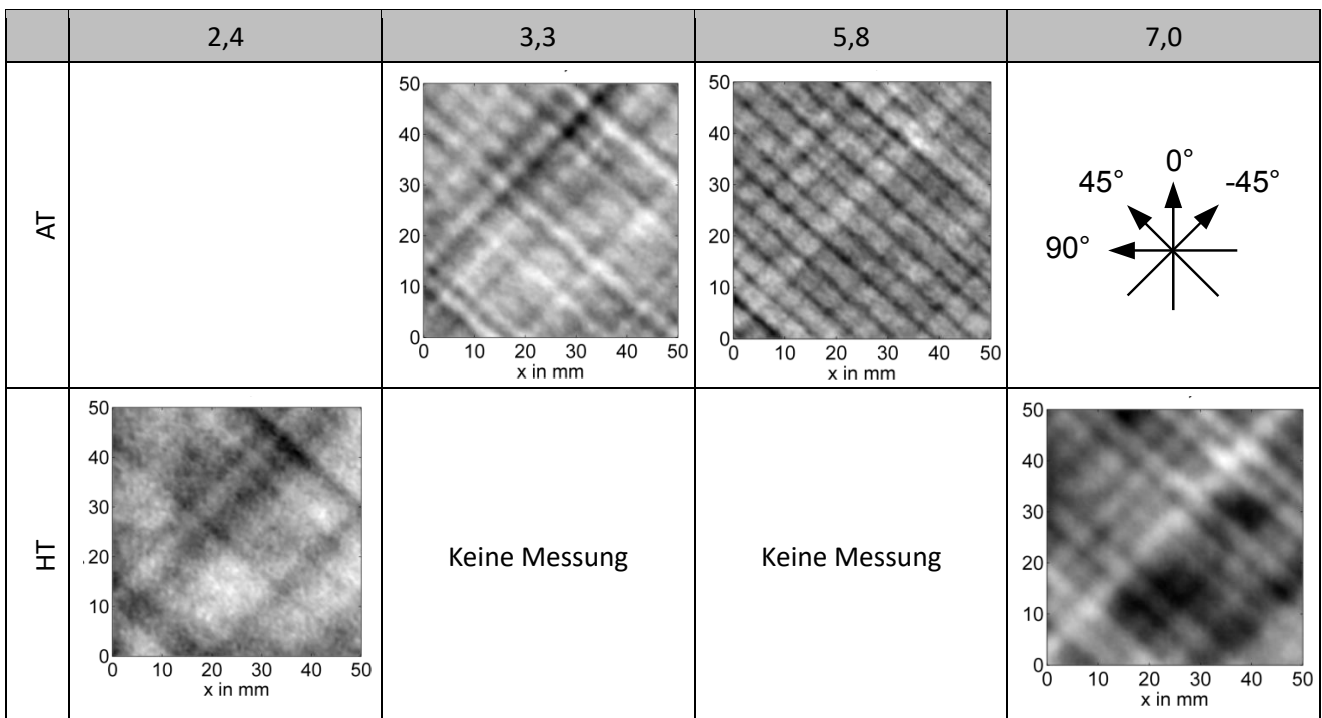


Abb. 6-9: Abbildung der Fadenstruktur in Abhängigkeit vom Sensor, vierlagiger UD-Gelegestapel

6.4.2 Wirbelstromausbreitung in den Gelegen

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, breiten sich die unter der Sendespule induzierten Wirbelströme in Carbonfasermaterialien nicht kreisförmig aus, sondern in Form von Ellipsen, die in Richtung der größten Leitfähigkeit, d.h. in Faserrichtung orientiert sind. Die Empfangsspule registriert daher immer eine höhere Wirbelstromdichte, wenn Sende- und Empfangsspule in Richtung einer Lage orientiert sind, was das Prinzip der Rotationswirbelstromprüfung ist (Kapitel 3.5.2). Für die *bildgebende* Wirbelstromprüfung eines mehrlagigen Gelegestapels mit verschiedenen Lagenorientierungen bedeutet dies, dass bei Halbtransmissionssensoren die parallel zur Sensororientierung verlaufenden Lagen verstärkt abgebildet werden.

Zur Untersuchung, inwieweit mit einer verstärkten Abbildung von parallel zur Sensororientierung verlaufenden Faserlagen zu rechnen ist, wurden Messungen in *Transmissionsanordnung* durchgeführt. Hierzu wurde die Sendespule unter dem Gelegestapel fixiert und die Empfangsspule in parallelen Bahnen über die Oberseite bewegt. Die Empfangsspule misst hierbei die Summe aus dem Magnetfeld der Sendespule (primäres Magnetfeld) und dem durch die Wirbelströme hervorgerufenen sekundären Magnetfeld. Da beide Felder jedoch phasenversetzt sind, existiert eine Phasendrehung, bei der der Anteil des Primärfelds verschwindet und nur das von den Wirbelströmen hervorgerufene sekundäre Magnetfeld abgebildet wird.

Als Gelegestapel wurden 2-, 4- und 8-lagige Stapel beider Gelegetypen untersucht. Tabelle 6-4 enthält die Messparameter. Die Darstellungen der Wirbelstromdichte sind in Abb. 6-10 gezeigt. Zur Ermittlung der Phasendrehung, bei der das Primärfeld verschwindet, wurde die Phasendrehung in 2°-Schritten verändert und dasjenige Bild gewählt, bei dem die sternförmige Ausbreitung der Wirbelströme am deutlichsten erkennbar war. Zur Größenvisualisierung sind in die Bilder Kreise mit Radien von 5, 10, 15 und 20 mm um den Mittelpunkt der Sendespule eingezeichnet. Für eine bessere Darstellung des Farbkontrasts wurden die innerhalb eines Radius von 2,5 mm um den Mittelpunkt der Sendespule gemessenen Amplitudenwerte auf den Maximalwert des restlichen Bildes reduziert, was als homogen dunkelrote Fläche in der Mitte der Ergebnisbilder erscheint.

Tabelle 6-4: Messparameter Transmissionsmessung

Messparameter	Wert
Sendespule	Sensor HT 5,8, nur Sendespule betrieben
Empfangsspule	Sensor HT 2,4, nur Empfangsspule betrieben
Messfrequenz	8 MHz
Lagenaufbau	[90/0] [-45/45/90/0] [-60/30/-45/45/90/0] [-30/60/-60/30/-45/45/90/0]

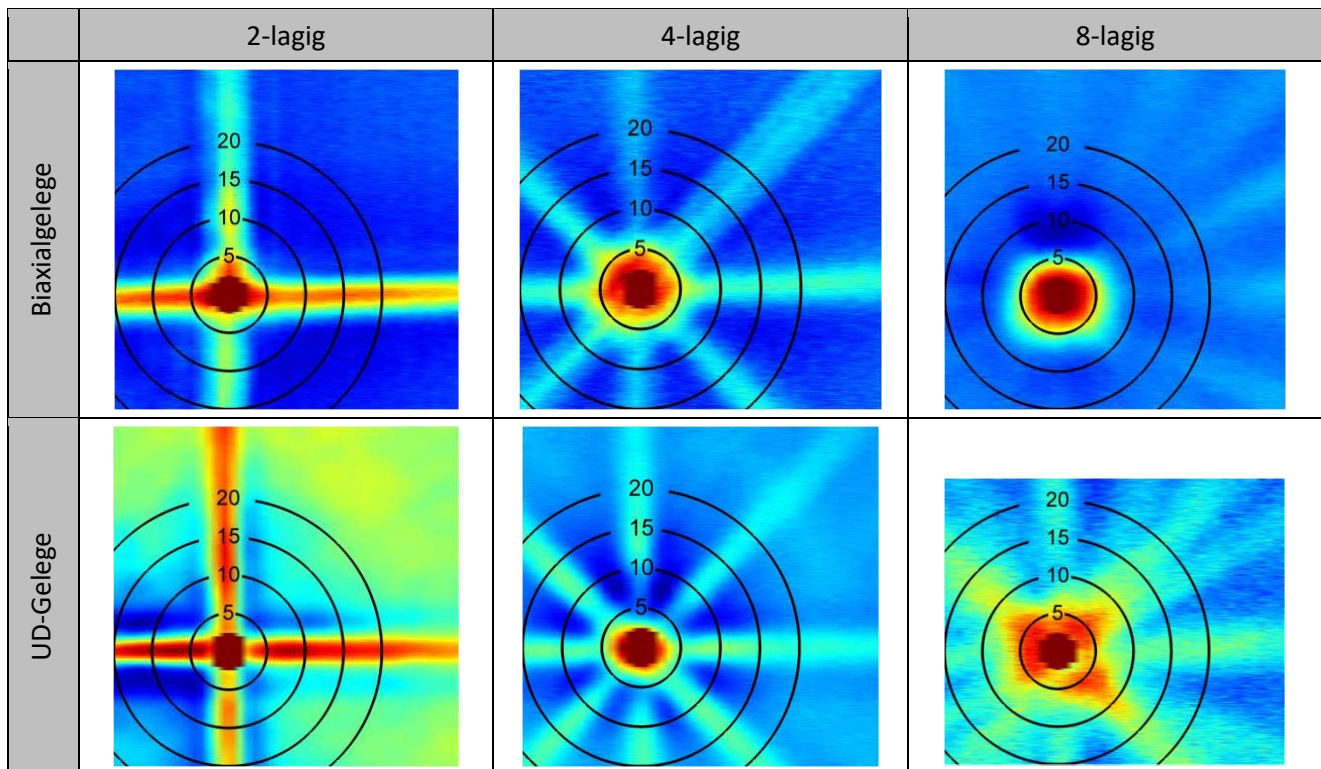


Abb. 6-10: In Transmissionsanordnung gemessene Wirbelstromausbreitung in den untersuchten Gelegen

Die Wirbelstrombilder der Transmissionsmessung zeigen deutlich die sternförmige Ausbreitung der Wirbelströme in Richtung der einzelnen Lagen. Von Bedeutung für das Abbildungsverhalten bei der bildgebenden Wirbelstromprüfung ist jedoch, dass es um den Mittelpunkt der Sendespule herum einen Bereich gibt, in dem sich die sternförmige Wirbelstromausbreitung der Einzellagen überlappt und für den die Wirbelstromdichte in alle Richtungen gleich ist. Dieser Bereich hat beim Biaxialgelege einen Radius von ca. 2 mm für den 2-lagigen Stapel, 6 mm für den 4- und 8-lagigen Stapel. Im 8-lagigen Stapel nähert sich die Wirbelstromausbreitung der in isotrop leitfähigem Material beobachteten Kreisform an, eine Anisotropie ist nur in großer Entfernung zur Sendespule feststellbar.

Das UD-Gelege zeigt eine stärkere Anisotropie, hier beträgt der Radius, innerhalb dessen in alle Richtungen gleiche Wirbelstromdichten gemessen werden, 1,5 mm für den 2-lagigen, 3 mm für den 4-lagigen und 6 mm für den 8-lagigen Aufbau.

Die folgenden Messungen werden mit sehr kleinen Spulenabständen von 2,4 bis 7,0 mm durchgeführt (vgl. Tabelle 6-2 weiter oben). Die Empfangsspule befindet sich daher innerhalb des Radius, in dem eine annähernd isotrope Verteilung der Wirbelstromdichte vorliegt. Ein Einfluss der sternförmigen Wirbelstromausbreitung der Gelege kann daher für die folgenden bildgebenden Wirbelstrommessungen als vernachlässigbar betrachtet werden; dies stimmt überein mit Vorarbeiten zur Rotationswirbelstromprüfung, in denen ein Mindestspulenabstand von 10-12 mm zur Abbildung der sternförmigen Wirbelstromausbreitung gefordert wird (vgl. Kapitel 3.5.2).

6.5 Untersuchungen zur Messgenauigkeit

6.5.1 Methodisches Vorgehen

Die Untersuchungen zur Messgenauigkeit mit den verschiedenen Sensoren und Messparametern erfolgten an zwei-, vier-, sechs- und achtlagigen Stapeln der beiden untersuchten Gelege. Das Prüfprogramm wurde so gewählt, dass für jeden Stapel Messungen mit allen Messparameterkombinationen durchgeführt wurden, anschließend zwei zusätzliche Faserlagen aufgelegt wurden, und Messungen mit allen Messparametern wiederholt wurden. Die Orientierung der unteren Lagen blieb beim Auflegen zusätzlicher Lagen erhalten, so dass ein direkter Vergleich der gemessenen Faserorientierungen bzw. ihrer Streuung für die verschiedenen Lagenzahlen möglich ist. Die Lagen wurden so geschichtet, dass ein Winkelunterschied von mindestens 15° zwischen jeweils zwei Lagen des Stapels besteht. Die Faserorientierung des 8-lagigen Stacks ist an einen Lagenaufbau $[-30^\circ/60^\circ/-60^\circ/30^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ]$ angelehnt, die des zweilagigen Stacks entspricht den untersten beiden Lagen ($[90^\circ/0^\circ]$), die des vierlagigen den untersten vier Lagen usw.

Das Gesamtflächengewicht des achtlagigen Stapels beträgt 2096 g/m^2 für das Biaxialgelege, 2400 g/m^2 für das UD-Gelege, was typischen Werten für industriell verarbeitete Preforms entspricht.

Für die statistische Auswertung wurde eine Messfläche von $120 \times 120 \text{ mm}^2$ erfasst. Für die Messung der Faserorientierung wurde ein Gitter von 3×3 Auswertepunkten mit einem Gitterabstand von 30 mm auf der Messfläche platziert (Abb. 6-11). An jedem der Auswertepunkte wurde ein Auswertequadrat mit einer Kantenlänge von 60 mm für die Faserorientierungsmessung herangezogen. Benachbarte Auswertequadrate überlappen sich somit, allerdings ist zu beachten, dass die Auswertequadrate mit einer zu den Rändern hin abfallenden Fensterfunktion multipliziert werden (Abschnitt 5.3.2), so dass sich mehr als 80% der ausgewerteten Bildamplitude innerhalb eines Radius von 15 mm um jeden Auswertepunkt befinden, was als effektiver Auswerteradius bezeichnet wurde. Die effektive Auswerteradien für die einzelnen Messpunkte sind in Abb. 6-11 als gestrichelte Kreise eingezeichnet.

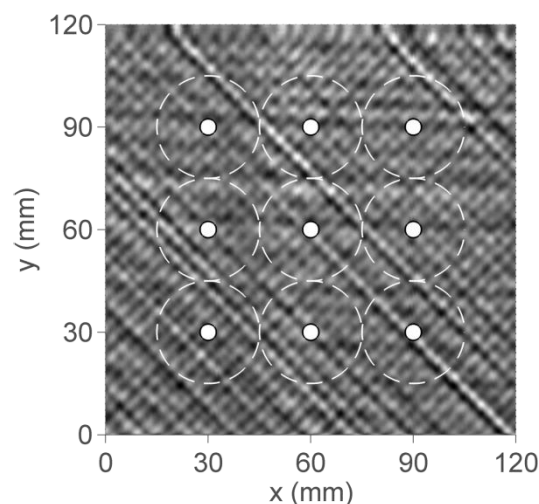


Abb. 6-11: Platzierung von 3×3 Auswertepunkten für die Faserorientierungsmessung. Die Kreise zeigen den effektiven Auswerteradius am jeweiligen Messpunkt an (Sensor HT 3,3, $f = 8 \text{ MHz}$, Sensororientierung 0°)

An jedem der Auswertepunkte wurde die Faserorientierung aller Lagen mit dem auf der Fouriertransformation beruhenden Verfahren gemessen. Für die automatische Zuordnung der Messergebnisse zu den Lagen wurde für jede Lage ein Richtungsintervall der angenommenen

Faserrichtung $\pm 5^\circ$ vorgegeben und das höchste Maximum in diesem Intervall der jeweiligen Faserrichtung zugeordnet (Abschnitt 5.3.4). Für jede einzelne Lage wurde aus den Faserorientierungsmessungen an den neun Messpunkten gemäß DIN EN 2600 [61] bzw. der GUM [62] die empirische Standardabweichung s nach

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6-1)$$

berechnet, worin

n	Anzahl Messwerte
x_i	Messwerte
\bar{x}	Arithmetisches Mittel der Messwerte

Zu beachten ist, dass dieses Vorgehen *die statistische Messunsicherheit aufgrund der zufälligen Abbildung der Fadenstruktur im Wirbelstrombild* untersucht. Ziel ist die Messung der Faserorientierung, die aber auf der Abbildung der Faserorientierung als Faserbündel im Wirbelstrombild beruht. Wie aus Abb. 6-12 erkennbar, unterscheiden sich die in den einzelnen Auswerteausschnitten erkennbaren Fadenstrukturen stark, obwohl die Faserorientierung über den gesamten Ausschnitt konstant ist. So zeigt z.B. der untere rechte Auswerteausschnitt einen dominanten schwarzen Roving, der im unteren linken Auswerteausschnitt fehlt. Der Grund hierfür liegt in zufälligen Abweichungen der Leitfähigkeit einzelner Rovings, sowie zufälligen Abweichungen in der Verteilung der Leitfähigkeit zwischen dem Zentrum und den Rändern eines Rovings. Diesem Effekt kommt für die Messunsicherheit bei der Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung die wichtigste Bedeutung zu. Weitere Einflüsse auf die Messunsicherheit, z.B. etwaige Winkelungenauigkeiten des Tischroboters, können dagegen vernachlässigt werden.

6.5.2 Einfluss der Spulenordnung und des Spulendurchmesser

Für die Untersuchung des Einflusses von *Spulenordnung* und *Spulendurchmesser* auf die erreichbare Messgenauigkeit wurden die Halbtransmissionssensoren in 0° -Richtung (parallel zur untersten Lage des Stapels) orientiert, die verwendete Messfrequenz beträgt 8 MHz.

Abb. 6-12 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Faserorientierungsmessung für eine der Wiederholungsmessungen (unterer linker Auswerteausschnitt aus Abb. 6-11) für zwei Absolut- und zwei Halbtransmissionssensoren, deren Spulendurchmesser jeweils paarweise identisch ist (3,3 bzw. 5,8 mm). Die vier Faserrichtungen werden von allen Sensoren als Richtungen mit hoher Amplitude in der Fouriertransformation abgebildet und können als lokale Maxima in der Faserorientierungsverteilung eindeutig identifiziert werden. Die untenliegenden 0° - und 90° -Lagen werden von allen Sensoren deutlich schwächer abgebildet, jedoch ist für die Detektion nicht die absolute Höhe des Maximums, sondern das Vorhandensein eines *lokalen Maximums* im jeweiligen Auswertintervall entscheidend. Die Absolutensensoren bilden die 0° - und 90° -Lagen dabei *stärker* ab als die Halbtransmissionssensoren, so dass hier geringere Messunsicherheiten zu erwarten sind. Tatsächlich zeigen die einzelnen Sensoren auch eine verschiedene *Reihenfolge der Höhen der einzelnen Maxima* in der Faserorientierungsverteilung: beim Sensor AT 3,3 wird die obenliegende -45° -Richtung am stärksten abgebildet, bei allen anderen Sensoren dagegen die an zweiter Position im Stapel liegende $+45^\circ$ -Richtung. Ebenso erscheint beim Sensor HT 5,8 die -45° - und die -90° -Lage mit deutlich geringerer Amplitude als bei den anderen Sensoren. Der Grund für diese Abweichun-

gen im Abbildungsverhalten ist die verschiedene *Auflösung* der Sensoren: bei den Biaxialgelegen besitzen die beiden Fadensysteme unterschiedliche Fadenabstände (vgl. Tabelle 6-3) und werden daher je nach Auflösung des Sensors stärker oder schwächer abgebildet.

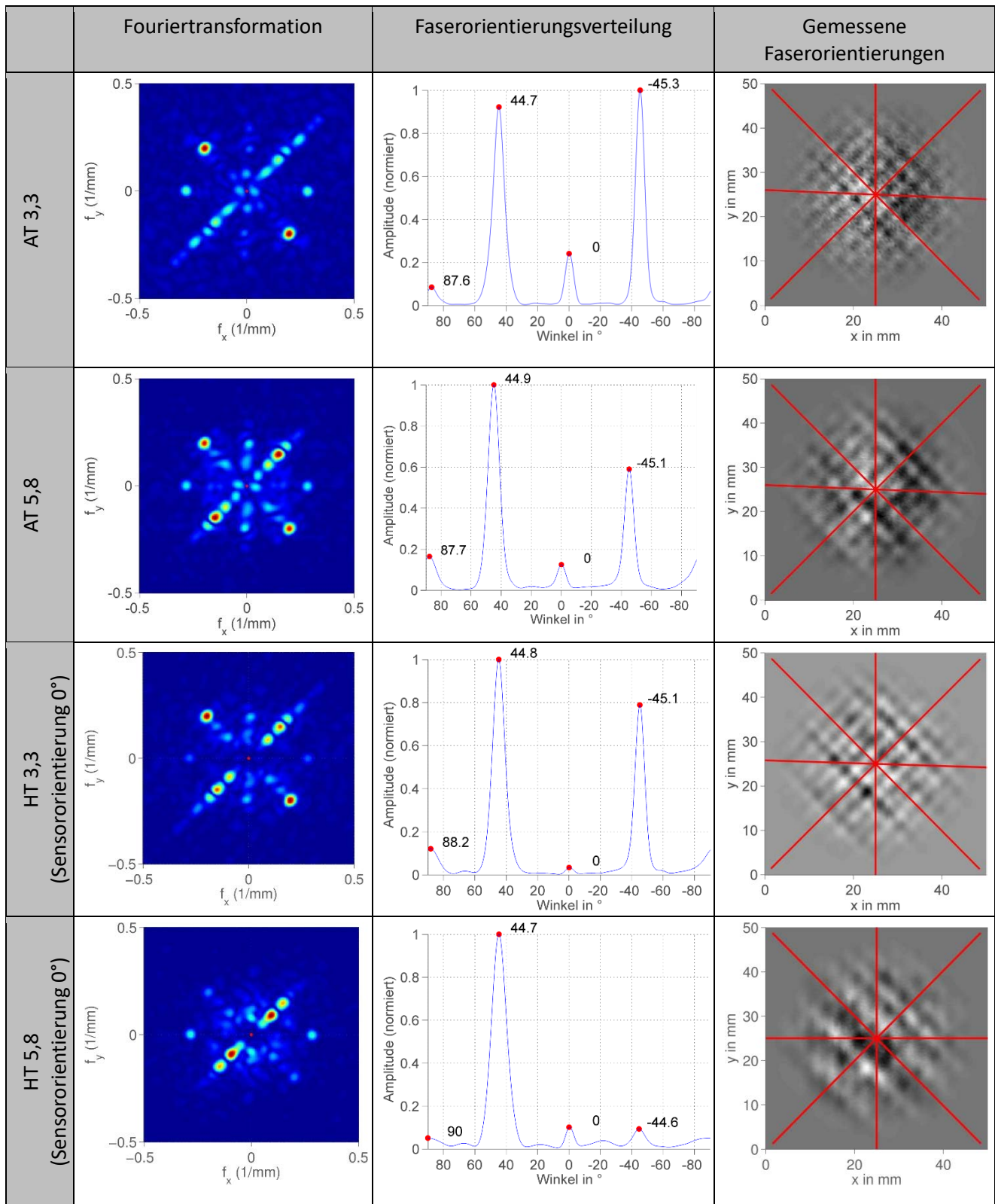


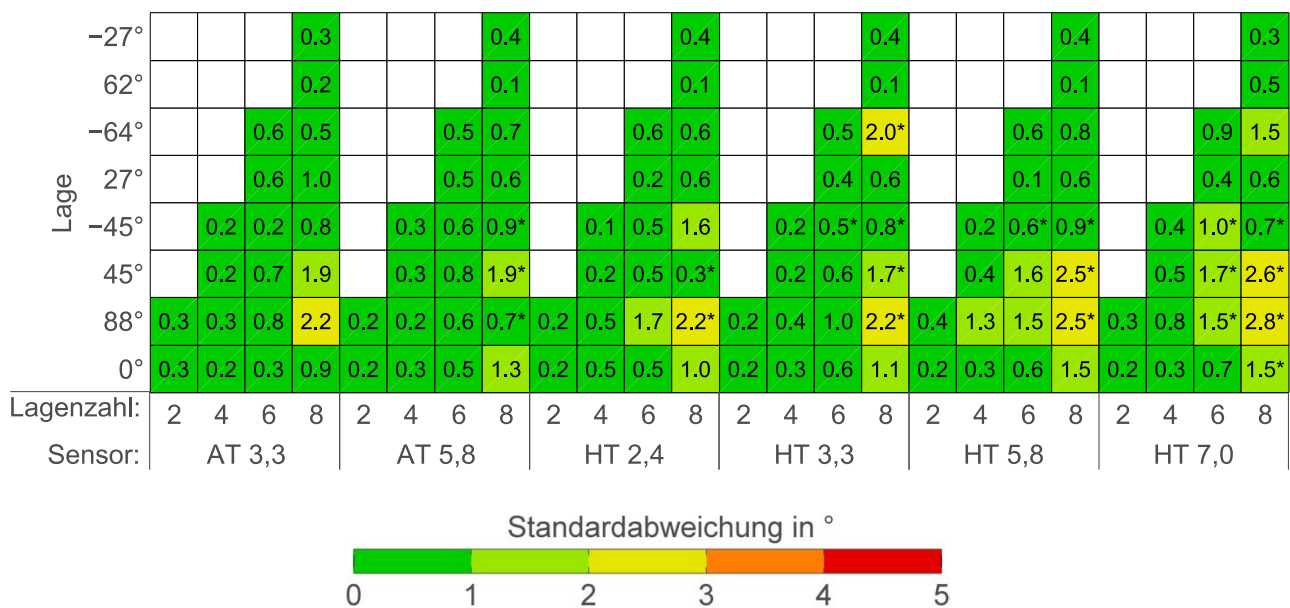
Abb. 6-12: Einfluss von Spulenanordnung und -durchmesser auf die Faserorientierungsmessung (Biaxialgelege, $f=8$ MHz, Sensororientierung 0°)

Abb. 6-13 stellt die Standardabweichung für die Faserorientierungsmessung am Biaxialgelege dar. Entlang der x-Achse sind unten die zwei untersuchten Absolutsensoren und die vier untersuchten Halbtransmissionssensoren aufgetragen, gekennzeichnet als AT bzw. HT gefolgt vom Spulendurchmesser in mm. Darüber sind für jeden Sensor sind die einzelnen Lagen der 2-, 4- 6- und 8-lagigen Stapel als Kästchen dargestellt, worin jeweils die Standardabweichung aus den 9 Wiederholungsmessungen (an verschiedenen Bildausschnitten) für die jeweilige Lage eingetragen ist.

Auf der vertikalen Achse sind von unten nach oben die Mittelwerte aller Faserorientierungsmessungen für die jeweiligen Lagen als Referenz angegeben. Dieser Mittelwert ist nur informativ, da ein absoluter Messfehler gemäß GUM (Formel (6-1)) nicht betrachtet wird.

So ist z.B. abzulesen, dass für den Sensor AT 3,3 bei einem zweilagigen Aufbau (erste Spalte ganz links) die Standardabweichung für die oberliegende Lage (88°) $0,3^\circ$ beträgt, für die untenliegende (0°) ebenfalls $0,3^\circ$. Bei einem achtlagigen Aufbau beträgt die Standardabweichung für die dann oberliegende -27° -Lage $0,3^\circ$, für die an zweitoberster Stelle liegende 62° -Lage $0,2^\circ$.

Ein * hinter einer Abweichung bedeutet, dass für diese Lage in mindestens einer der 9 Wiederholungsmessungen keine Orientierung im Bereich der Ist-Orientierung $\pm 5^\circ$ ermittelt werden konnte, d.h. im Intervall dieser Faserorientierung kein lokales Maximum vorhanden war.



* = Bei mindestens einer der 9 Messungen konnte keine Faserorientierung detektiert werden

Abb. 6-13: Standardabweichung der Faserorientierungsmessung für das Biaxialgelege ($f=8$ MHz, Sensororientierung 0°)

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Standardabweichung erhöht sich, wie erwartet, sowohl mit steigender Tiefenlage einer Lage (tiefere Position im Stapel) als auch mit zunehmender Zahl der Lagen im Gesamtstapel. Je tiefer eine Lage liegt, und je mehr andere Lagen im Stapel vorhanden sind, desto schwächer wird eine Lage abgebildet, wodurch die Standardabweichung steigt.
2. Für den Vergleich der einzelnen Sensoren sind in Abb. 6-14 die Standardabweichungen nach der Position der Lage im Stapel zusammengefasst. So wurde für die Lagen 1 und 2 der

Mittelwert aller Standardabweichungen der jeweils obersten beiden Lagen, d.h. der Lagen 0° und 88° im 2-lagigen Stapel, der Lagen -45° und 45° im 4-lagigen Stapel usw. gebildet. An der Darstellung ist ersichtlich, dass *Absolutsensoren* bis zur 6. Lage geringere Messabweichungen liefern als Halbtransmissionssensoren mit gleichem Spulendurchmesser. Ferner steigt die Messunsicherheit bis zur 6. Lage mit steigendem Spulendurchmesser, so dass für die betrachteten Spulendurchmesser die Empfehlung abgeleitet werden kann, *Sensoren mit kleinem Spulendurchmesser und Absolutsensoren* zu verwenden.

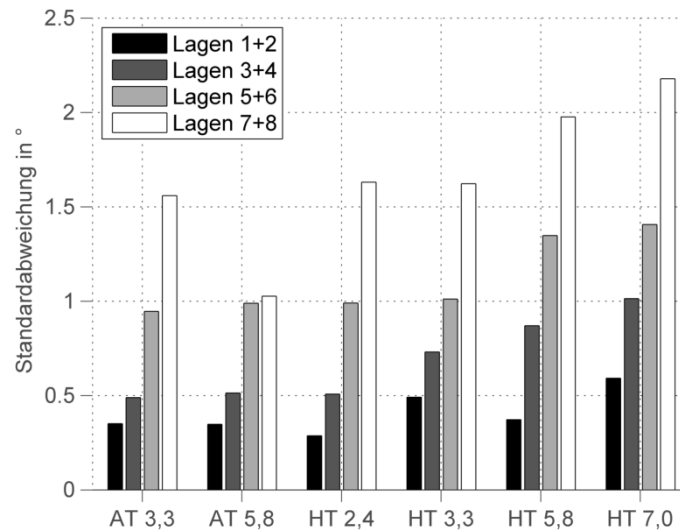
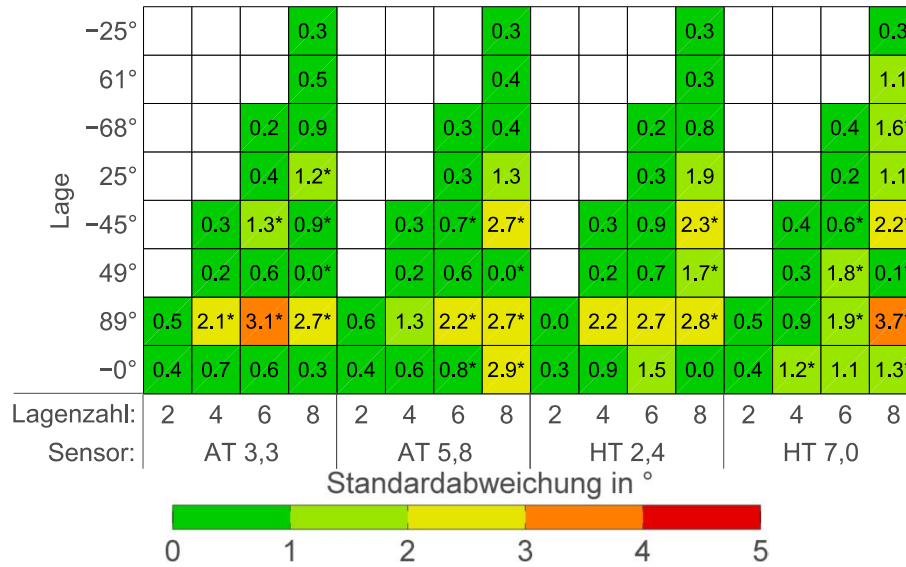


Abb. 6-14: Mittlere Standardabweichung, nach Position der Lage im Stapel, für das Biaxialgelege ($f=8$ MHz, Sensororientierung 0°)

Als nächstes erfolgt der Vergleich für die Stapel aus UD-Gelegen. Abb. 6-15 zeigt die Ergebnisse, wobei für die UD-Gelege von den Halbtransmissionssensoren nur die beiden Sensoren mit kleinstem bzw. größtem Spulendurchmesser untersucht wurden. Es werden daher lediglich vier verschiedene Sensoren betrachtet. Erneut sind mehrere Schlussfolgerungen festzuhalten:

1. Die für die Biaxialgelege ermittelten Einflüsse der *Position der Lage im Stapel* und der *Lagenzahl im Stapel* bestätigen sich: mit steigender Tiefe im Stapel und steigender Lagenzahl steigt die Messunsicherheit.
2. Die Messunsicherheiten sind für das UD-Gelege im Mittel deutlich größer als für das Biaxialgelege. Abb. 6-16 zeigt erneut die Standardabweichung nach Lagen. Im Gegensatz zum Biaxialgelege ist für die *Absolutsensoren* eine *Verringerung* der Messunsicherheit mit *steigendem Spulendurchmesser* zu erkennen. Für die *Halbtransmissionssensoren* ist die für das Biaxialgelege beobachtete Vergrößerung der Messunsicherheit bei steigendem Spulendurchmesser *geringer*. Der Grund ist die größere Faserbündelbreite des UD-Geleges, wodurch auch Sensoren mit niedrigerer Auflösung eine ausreichend gute Darstellung der Fadenstruktur erzielen. Für das UD-Gelege ist daher anzunehmen, dass ein Optimum des Spulendurchmessers existiert. Da die untersuchten Halbtransmissions- und Absolutensoren verschiedene Durchmesser besitzen, ist ein direkter Vergleich zwischen den Sensortypen nicht möglich, allerdings zeigen der Absolutensensor AT 3,3 und der Halbtransmissionsensor HT 2,4 ähnliche Messunsicherheiten für alle Lagen, was den Ergebnissen beim Biaxialgelege entspricht.



* = Bei mindestens einer der 9 Messungen konnte keine Faserorientierung detektiert werden

Abb. 6-15: Standardabweichung der Faserorientierungsmessung für das UD-Gelege (f=8 MHz, Sensororientierung 0°)

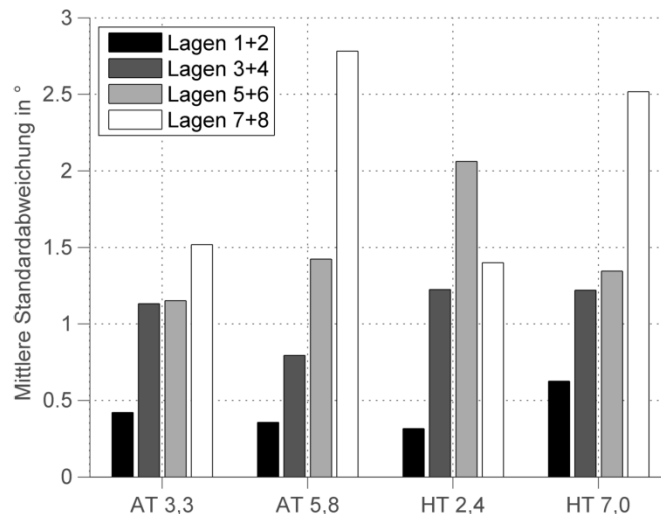


Abb. 6-16: Mittlere Standardabweichung nach Position der Lage für das UD-Gelege (f=8 MHz, Sensororientierung 0°)

6.5.3 Einfluss der Sensororientierung

Die Ergebnisse der Halbtransmissionsensoren bei Sensororientierung 0° werden nun mit der Sensororientierung 90° verglichen. Die verwendete Messfrequenz von 8 MHz wird beibehalten. Abb. 6-17 zeigt die Fouriertransformation, die Faserorientierungsverteilung und die detektierten Faserrichtungen für die Sensororientierungen 0° und 90°. Deutlich erkennbar ist die *verstärkte Abbildung der Fadenstruktur der jeweils senkrecht zur Sensororientierung verlaufenden Lage*: die Sensororientierung 0° bildet die 90°-Lage wesentlich stärker ab, die Sensororientierung 90° dagegen die 0°-Lage.

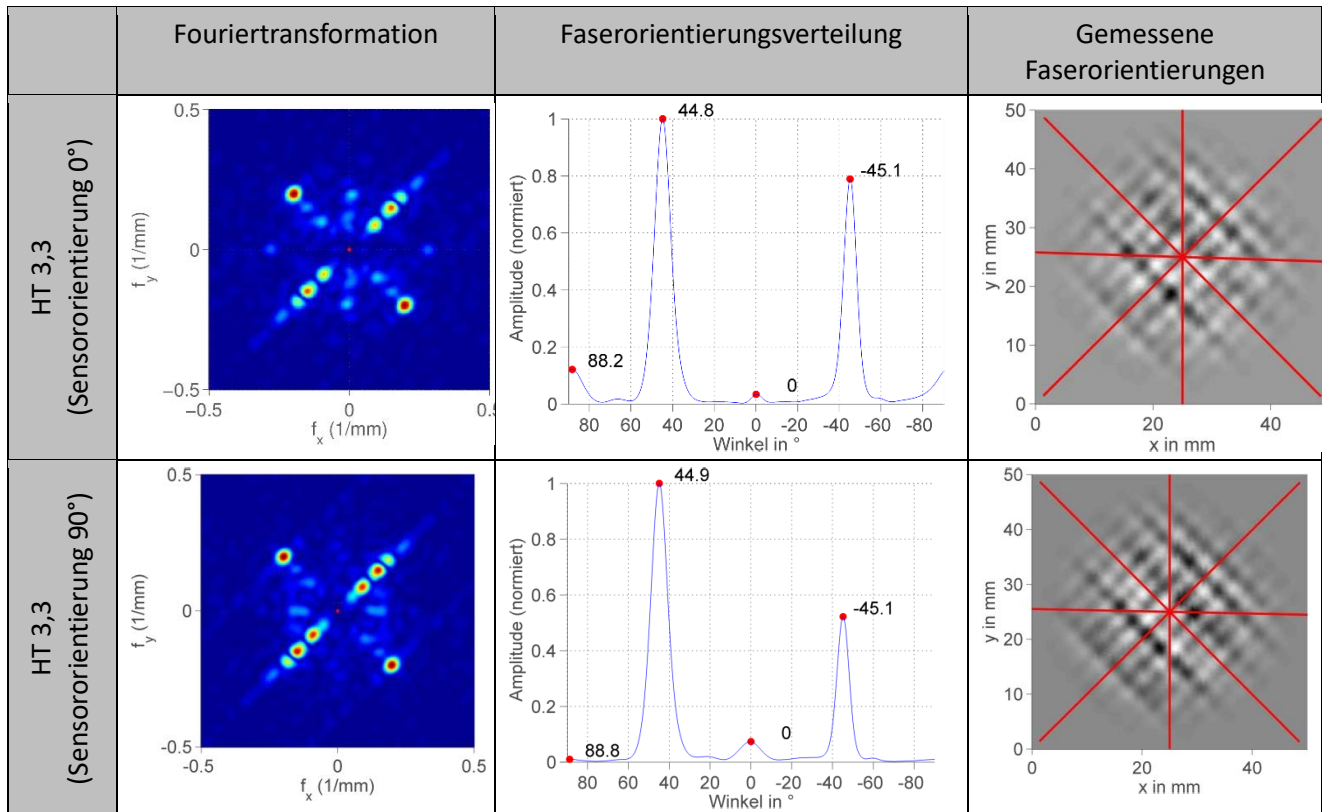


Abb. 6-17: Einfluss der Sensororientierung auf die Faserorientierungsmessung (Biaxialgelege, $f=8$ MHz)

In Abb. 6-18 und Abb. 6-19 sind die *Veränderungen* der Standardabweichung gegenüber den Ergebnissen bei einer Sensororientierung von 0° dargestellt. Negative Werte (grün hinterlegt) bedeuten eine *Verringerung* der Standardabweichung, somit eine *Verbesserung* der Messgenauigkeit. Analog zeigen positive Werte (rot) eine Vergrößerung der Standardabweichung an (Verschlechterung der Messgenauigkeit). Veränderungen $< 0,1^\circ$ sind grau hinterlegt. Mit den Absolutensoren wurden keine erneuten Messungen durchgeführt, da ein Einfluss der Sensororientierung nicht vorhanden ist.

Sowohl beim Biaxialgelege als auch beim UD-Gelege zeigt sich im Durchschnitt eine *Verringerung* der Messunsicherheit für die in Richtung 62°, -64° und 88° orientierten Lagen, d.h. aller Lagen, deren Orientierung annähernd *parallel* zur veränderten Sensororientierung 90° liegt. Zugleich zeigt sich eine *Erhöhung* der Messunsicherheit der nun annähernd senkrecht zur Sensorrichtung 90° orientierten Lagen -27°, +27° und 0°. Die in Abb. 6-17 dargestellte verstärkte Abbildung von Fadenmustern senkrecht zur Sensororientierung besitzt damit *nicht* den erwarteten Einfluss einer Verringerung der Messunsicherheit, sondern verstärkt die Streuung.

Warum sich die Messunsicherheit der -45°-Lage bei Drehung des Sensors von 0° auf 90° verbessert, die der +45°-Lage verschlechtert, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Zu vermuten sind hierfür Einflüsse aus den Nachbarlagen aufgrund interlaminarer Wirbelströme.

6.5.4 Einfluss der Messfrequenz

Im dritten Schritt erfolgt der Vergleich der Ergebnisse bei verschiedener Messfrequenz. Die Sensororientierung beträgt hier wieder 0° , als Messfrequenzen werden 8 MHz und 2 MHz verglichen. Aus dem Skin-Effekt (vgl. Kapitel 3.2) ist zu erwarten, dass eine niedrigere Messfrequenz eine verbesserte Abbildung der tieferen Lagen erlaubt.

Abb. 6-20 vergleicht die Wirbelstrombilder und die Fouriertransformationen bei 2 und 8 MHz. Eine bemerkenswerte Differenz der Messergebnisse ist nicht erkennbar, lediglich verschiebt sich das detektierte Maximum der untersten Lagen (88°) um $0,5^\circ$ bei Verringerung der Messfrequenz.

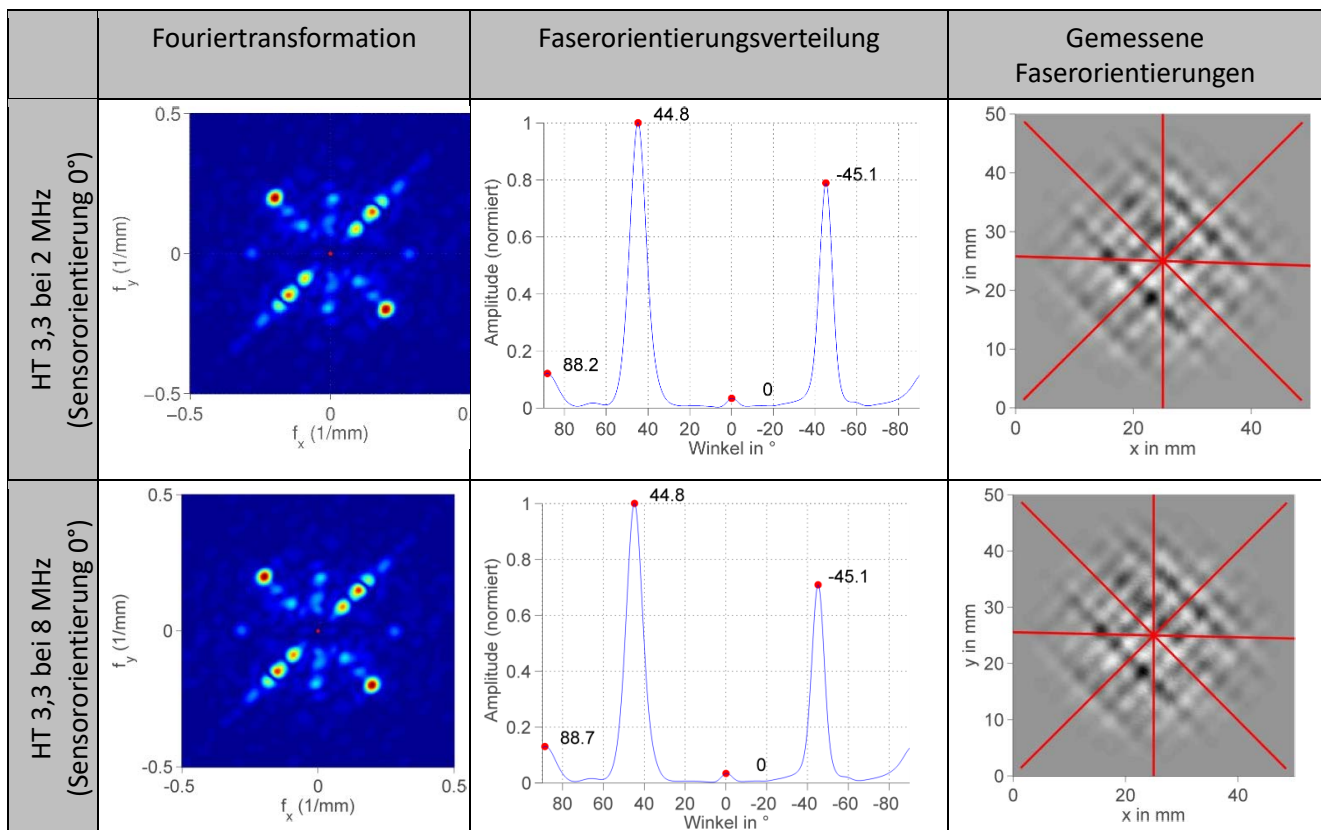


Abb. 6-20: Einfluss der Messfrequenz auf die Faserorientierungsmessung (Biaxialgelege, Sensororientierung 0°)

Abb. 6-21 und Abb. 6-22 zeigen erneut die Veränderungen für alle Messungen, diesmal für die Verringerung der Messfrequenz von 8 MHz auf 2 MHz. Negative Werte (grün hinterlegt) bedeuten eine Verringerung der Standardabweichung bei 2 MHz, also eine Verbesserung der Messgenauigkeit, positive Werte eine Verschlechterung.

Im Vergleich zum Einfluss der Sensororientierung ist der Einfluss der Messfrequenz deutlich geringer. Für die *Absolutsensoren* führt die Verringerung der Messfrequenz mit wenigen Ausnahmen zu einer *Erhöhung* der Standardabweichung. Als Grund ist das verbesserte Signal-Rausch-Verhältnis zu sehen: höhere Frequenzen führen zu stärkeren Wirbelströmen, so dass sich die Abbildung aller Lagen verbessert. Eine Verschlechterung der Standardabweichung für die tieferen Lagen, wie sie aus der Formel für den Skin-Effekt folgen würde (Konzentration der Wirbelströme in den oberen Lagen, Abschirmung der tieferen) kann hingegen nicht beobachtet werden.

Für die *Halbtransmissionssensoren* führt die Verringerung der Messfrequenz zu einer Erhöhung der Standardabweichung in den mittleren Lagen, jedoch ebenso zu einer leichten Verringerung der

Standardabweichung in *den jeweils untersten beiden* Lagen, was der Formel für den Skin-Effekt entspricht. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Standardabweichung für die unteren Lagen deutlich größer ist als für die höheren, so dass die leichte Verbesserung der unteren Lagen i.d.R. nicht ausreichend ist, um eine Erhöhung der Messabweichung in den höheren Lagen in Kauf zu nehmen.

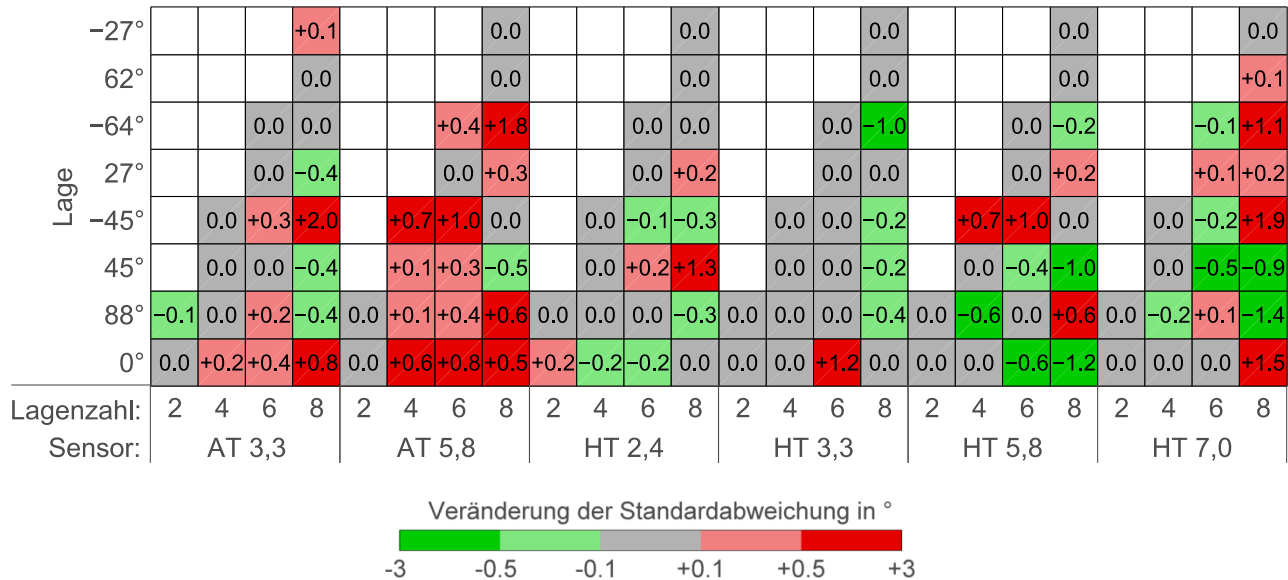


Abb. 6-21: Veränderung der Standardabweichung bei Messfrequenz 2 MHz statt 8 MHz für das Biaxialgelege (Sensororientierung 0°)

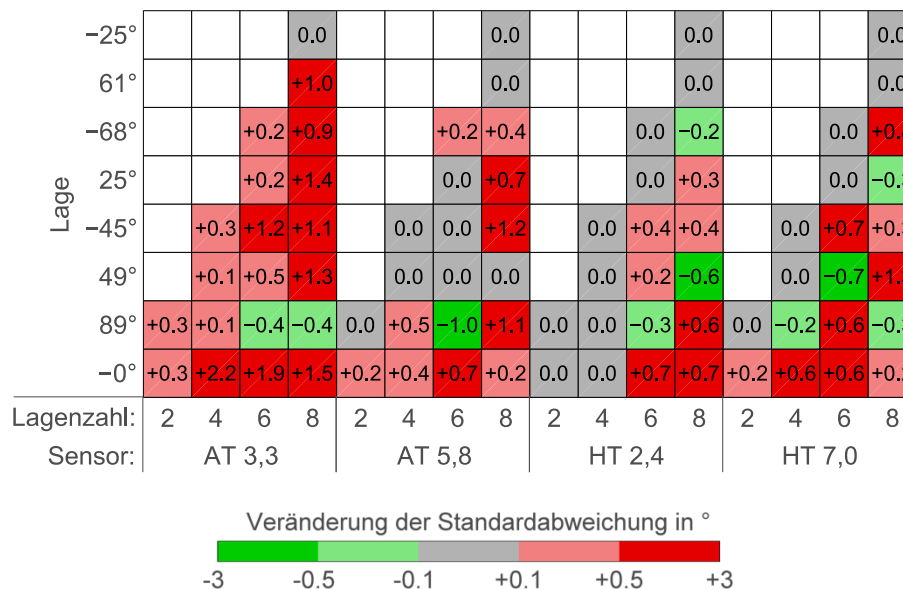


Abb. 6-22: Veränderung der Standardabweichung bei Messfrequenz 2 MHz statt 8 MHz für das UD-Gelege (Sensororientierung 0°)

6.5.5 Zusammenfassung und Diskussion der Messunsicherheit

In diesem Abschnitt wurde die Messunsicherheit in Abhängigkeit der Faktoren *Spulenanordnung*, *Spulendurchmesser*, *Sensororientierung*, *Position der Lage im Stapel*, *Lagenzahl des Stapels* und *Gelegetyp (Fadenstruktur des textilen Halbzeugs)* untersucht. Da in praktischen Anwendungen i.d.R. die erreichbare Genauigkeit für die obersten „n“ Lagen von Interesse ist, wurden in Abb. 6-23

die mittlere Messunsicherheit der jeweils obersten vier Lagen der 4-, 6- und 8-lagigen Stapel berechnet. Die in den vorausgegangenen Abschnitten dargestellten Zusammenhänge werden in dieser Zusammenfassung bestätigt:

1. Die Messunsicherheit ist geringer für *kleinere Spulendurchmesser* und *Absolutsensoren*. Der Grund für die allgemein geringere Messunsicherheit bei geringerem Spulendurchmesser und bei Wahl von Absolutsensoren ist die höhere Auflösung (vgl. Abschnitt 6.4.1).
2. Die Messunsicherheit ist geringer bei der *höheren Messfrequenz* (8 MHz) als bei der niedrigeren Messfrequenz (2 MHz). Der Grund hierfür liegt in der höheren Wirbelstromdichte bei höherer Messfrequenz, die zu einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis führt.
3. Die Messunsicherheiten sind geringer beim *Biaxialgelege* als beim UD-Gelege. Der Grund ist die deutlicher ausgeprägte Fadenstruktur beim Biaxialgelege. Die breiteren Carbonfäden beim UD-Gelege führen allerdings dazu, dass auch Sensoren mit größerem Spulendurchmesser nur gering höhere Messunsicherheiten liefern, da die breiteren Carbonfäden auch mit niedriger auflösenden Sensoren gut abgebildet werden.
- 4.

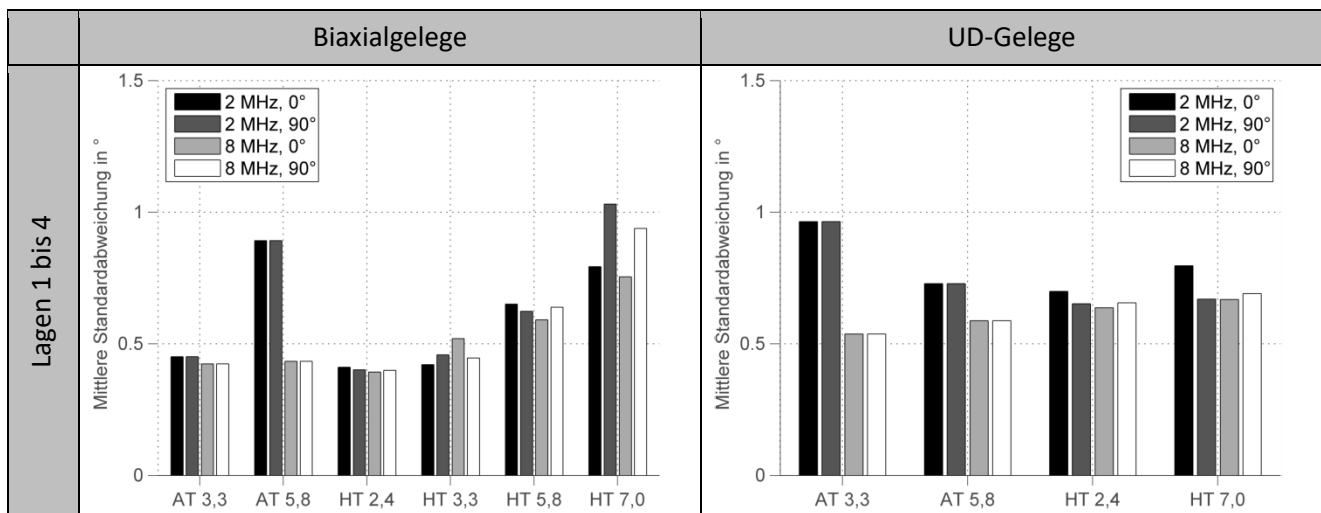


Abb. 6-23: Mittlere Standardabweichung für die Lagen 1-4 bei beiden Gelegen

Abb. 6-24 vergleicht die Mittelwerte der Messunsicherheiten für die 5. und 6. Lage (aus dem 6- bzw. 8-lagigen Stapel). Hierbei zeigt sich, dass die für die obersten vier Lagen festgestellte Vergrößerung der Messunsicherheit mit steigendem Spulendurchmesser geringer ausgeprägt ist (beim Biaxialgelege) bzw. sich sogar umkehrt (beim UD-Gelege). Für die tieferen Lagen kompensiert die durch größere Spulendurchmesser bewirkte erhöhte Eindringtiefe die verringerte Auflösung teilweise oder ganz. Ebenso ist die Erhöhung der Messunsicherheit bei verringerter Messfrequenz weniger ausgeprägt, so dass für höhere Lagenzahlen ein positiver Einfluss von größeren Spulendurchmessern und geringeren Messfrequenzen zu erwarten ist, d.h., eine Wechselwirkung der Faktoren beobachtet werden kann. Da die erzielbaren Messunsicherheiten für die 5. und 6. Lage im Durchschnitt bereits bei ca. $1,5^\circ$ liegen, sind diese Effekt praktisch jedoch kaum relevant.

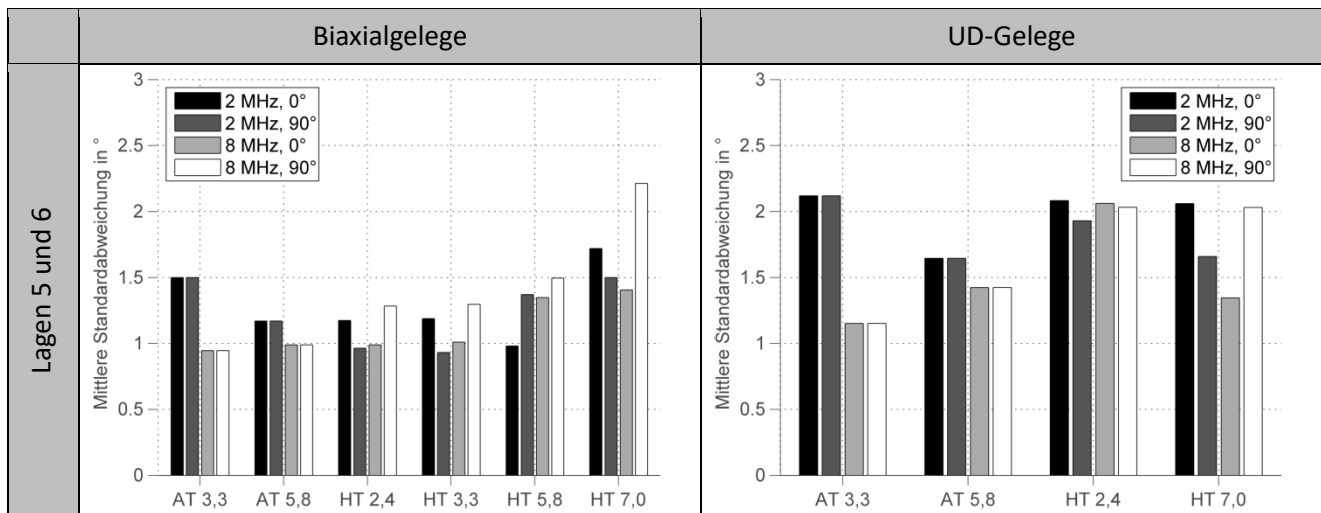


Abb. 6-24: Mittlere Standardabweichung für die Lagen 5 und 6 bei beiden Gelegen

Die Standardabweichung entspricht der Messunsicherheit des Messprozesses u_{MP} („Standardunsicherheit Typ A“ [62]):

$$u_{MP} = s \quad (6-2)$$

Anschließend wird aus der Messunsicherheit des Messprozesses die erweiterte Messunsicherheit U mit dem Erweiterungsfaktor k gebildet, so dass gilt

$$U = k * u_{MP} \quad (6-3)$$

Bei Annahme eines normalverteilten Prozesses entspricht $k = 2$ einem Vertrauensniveau von 95 %, d.h., es ist zu erwarten, dass sich mindestens 95 % der Messwerte im Intervall $\bar{x} \pm U$ befinden.

Die erweiterten Messunsicherheiten können somit durch Verdopplung der in Abb. 6-23 und Abb. 6-24 dargestellten Werte bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit geeigneter Wahl von Sensor und Prüffrequenz eine erweiterte Messunsicherheit $< 1^\circ$ für die obersten vier Lagen eines Biaxialgelegestapels erreicht werden kann. Für die obersten vier Lagen eines UD-Gelegestapels beträgt die erreichbare erweiterte Messunsicherheit $< 1,2^\circ$. Für die 5. und 6. Lage (ohne Berücksichtigung der obersten vier Lagen) erhöht sich die erweiterte Messunsicherheit auf $< 2^\circ$ (Biaxialgelege) und $< 2,5^\circ$ (UD-Gelege).

Optische Verfahren stellen zum aktuellen Zeitpunkt den Benchmark für die Faserorientierungsmessung dar, wenn auch beschränkt auf die oberste Lage. Mersmann 2012 [60] ermittelt eine erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) von $0,1-0,4^\circ$ für ein optisches Machine Vision-System, wobei die Breite des Messunsicherheitsintervalls von $0,1$ bis $0,4^\circ$ wesentlich von den optischen Eigenschaften des textilen Halbzeugs abhängig ist.²⁵

Die mit dem bildgebenden Wirbelstromverfahren erreichbaren Messunsicherheiten sind dagegen größer und liegen im Bereich von $1-1,2^\circ$. Der Grund für die höhere Messunsicherheit der Wirbels-

²⁵ Der hier durchgeführte Vergleich kann und soll nur als grobe Orientierung dienen. Im Vergleich zu Mersmann ist bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen die Wiederholungszahl für jede Faktorenkombination geringer (9 Wiederholungen, bei Mersmann 64). Darüber hinaus wurde in dieser Arbeit als wichtigste Quelle der Messunsicherheit die zufällige Leitfähigkeitsverteilung der Carbonfasern und -fäden identifiziert, weshalb die 9 Wiederholungsmessungen an verschiedenen Messpunkten desselben Halbzeugstapels durchgeführt wurden. Bei Mersmann erfolgen die Wiederholungsmessungen am selben Messpunkt, allerdings aus verschiedenen Winkelrichtungen. Durch Wahl verschiedener Messpunkte erhält man i.d.R. eine höhere Messunsicherheit.

tromprüfung ist verfahrensbedingt: ausgewertet werden bei der optischen Faserorientierungsmessung die lokalen *Gradienten*, d.h. die Vorzugsorientierungen im Bild (Abb. 6-25). Da in der optischen Aufnahme nicht nur die Fäden, sondern auch die Faserstrukturen der einzelnen Rovings erkennbar sind, arbeitet das optische Verfahren *auf Faserebene*. Die Faserorientierungsmessung mit bildgebender Wirbelstromprüfung operiert dagegen *auf Fadenebene*. Die Wirbelströme breiten sich nicht in den einzelnen Fasern, sondern in den Fäden aus, abgebildet werden daher Leitfähigkeitsunterschiede zwischen den Fäden, aber nicht zwischen den einzelnen Fasern. Darüber hinaus erfolgt die bildanalytische Bestimmung der Faserorientierungen an Summenbildern der Wirbelstromdichten in den einzelnen Lagen („C-Scan“), so dass die Informationen jeder Lage von Informationen der anderen Lagen überlagert werden.

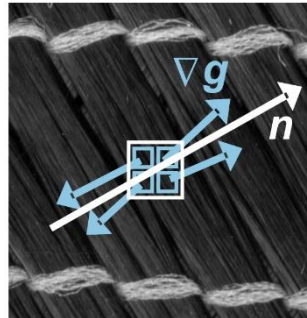


Abb. 6-25: Messung der Faserorientierung mit dem Strukturtenzorverfahren (∇g zeigt die lokale, n die globale Orientierung an) (Bildquelle: [90])

Diese Betrachtungen sind wichtig, um das entwickelte Verfahren korrekt einschätzen zu können. Die höhere Messunsicherheit von $1-1,2^\circ$ geht allerdings einher mit der grundlegenden Möglichkeit, die Faserrichtungen in tieferen Lagen überhaupt messen zu können, was mit optischen Methoden nicht möglich ist. Von daher muss eine Abwägung erfolgen, inwieweit die Beschränkung der optischen Verfahren auf die oberste Lage tolerierbar ist, um eine höhere Messgenauigkeit zu erzielen.

Darüber hinaus können die Messunsicherheiten für reine 2D-Untersuchungen verbessert werden, indem größere Auswerteausschnitte betrachtet werden. Die hier betrachteten Auswertefenster enthalten effektiv 8 Fäden (Biaxialgelege) bzw. 6 Fäden (UD-Gelege), da die effektiven Auswerterradien von 15 mm im Hinblick auf die spätere 3D-Anwendung möglichst klein gewählt wurden, um eine Mittelung über einen großen Ausschnitt zu vermeiden. Bei Untersuchungen an 2D-Proben kann von einer konstanten Faserorientierung über eine größere Fläche ausgegangen werden, so dass i.d.R. größere Ausschnitte verwendet werden können.

6.6 Experimentelle Untersuchungen zur Winkelauflösung

Von der Messunsicherheit grundlegend zu unterscheiden ist die Winkelauflösung. Während die Messunsicherheit die zufällige Streuung der Messung angibt, ist die Winkelauflösung die Fähigkeit zur Trennung zweier Lagen mit sehr kleiner Winkeldifferenz. Wie in Abschnitt 5.3.5 dargestellt, ist die Winkelauflösung durch die Größe des Auswerteausschnitts und die Fadenbreite definiert: erst ab dem Winkel, bei dem sich die Fäden im Bildausschnitt nicht mehr vollständig überlagern, ist eine Trennung möglich. Für das UD-Gelege wurden hierzu Untersuchungen durchgeführt, bei denen zwei Lagen mit verschiedenen Winkelunterschieden gestapelt wurden. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, wurde eine zusätzliche Lage mit der Orientierung 90° untergelegt: da sich in parallel orientierten Lagen keine interlaminaeren Wirbelströme ausbilden können

(Abschnitt 3.4), ist die Wirbelstromdichte und daher das Signal-Rausch-Verhältnis der Sensoren andernfalls sehr gering. Durch die zusätzlich untergelegte Lage ist auch für alle Winkeldifferenzen eine gleiche Wirbelstromdichte anzunehmen, da die Ausbildung interlaminarer Wirbelströme nicht von der Winkeldifferenz der Lagen abhängt.

Abb. 6-26 zeigt die Ergebnisse für das UD-Gelege. Bei einer Winkeldifferenz von 15° und 10° sind die einzelnen Lagen sowohl im Wirbelstrombild, als auch in der Fouriertransformation und in der Faserorientierungsmessung unterscheidbar. Bei einer Winkeldifferenz von 5° fließen die Maxima in der Faserorientierungsverteilung zusammen.

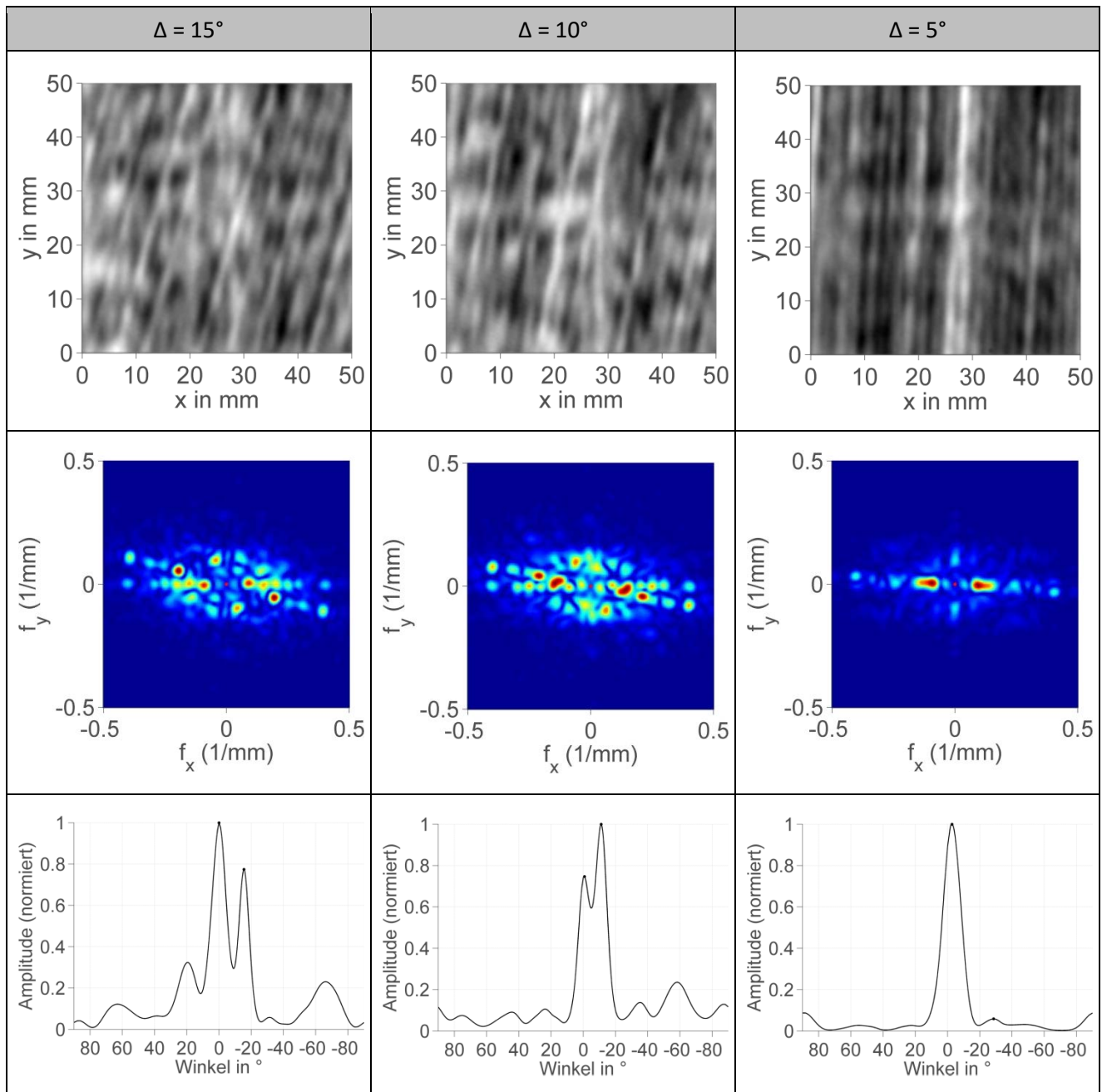


Abb. 6-26: Unterscheidung zweier Lagen mit kleiner Winkeldifferenz
(Auswerteausschnitt $50 \times 50 \text{ mm}^2$, Sensor HT 3,3, Sensororientierung 0° , $f=8 \text{ MHz}$)

Dieses Ergebnis stimmt mit der theoretischen Analyse überein, wo mit Hilfe von Formel (5-9) (S. 68) für einen Fadenabstand von 5 mm und eine Auswerteausschnittsgröße von 50x50 mm² eine maximal auflösbare Winkeldifferenz von 11,3° ermittelt wird. Die experimentell ermittelte Winkelauflösung ist also leicht besser als theoretisch vorhergesagt. Die Fouriertransformation zeigt den Grund dafür: neben der Hauptfrequenz des Fadenmusters von 0,2 mm⁻¹ werden auch höhere Frequenzanteile abgebildet, d.h., neben dem Fadenmuster existieren weitere periodische Strukturen auf den einzelnen Fäden, die abgebildet werden und eine höhere Winkelauflösung ermöglichen.

6.7 Schlussfolgerungen aus den 2D-Untersuchungen

In diesem Kapitel wurde das Abbildungsverhalten der Sensoren und die Wirbelstromausbreitung in den Gelegestapeln experimentell untersucht und darauf aufbauend wurden Untersuchungen zur erzielbaren Messunsicherheit durchgeführt.

Bei den Grundlagenversuchen zum Abbildungsverhalten und zur Wirbelstromausbreitung konnte gezeigt werden, dass die *Auflösung* der Sensoren wesentlich durch den Spulendurchmesser definiert wird, woraus die Empfehlung abgeleitet wurde, dass der Spulendurchmesser höchstens doppelt so groß sein sollte wie der aufzulösende Fadenabstand. Für die Anisotropie der Wirbelstromausbreitung im Gelegestapel wurde hingegen nachgewiesen, dass sie aufgrund der geringen Spulenabstände der verwendeten Sensoren nur einen geringen Einfluss auf das Abbildungsverhalten besitzt.

In den anschließenden Untersuchungen zur Messgenauigkeit konnten die gewonnenen Erkenntnisse bestätigt werden. Eine Zusammenfassung und kritische Betrachtung der Untersuchungen zur Messgenauigkeit wurden in Abschnitt 6.5.5 vorgenommen. Ziel der Untersuchungen war neben der Abschätzung der Messgenauigkeit die Ableitung von Empfehlungen für die Auswahl der Messparameter.

Tabelle 6-5 fasst die ermittelten Einflüsse der einzelnen Faktoren sowie daraus abgeleitete Empfehlung zusammen.

Tabelle 6-5: Wirkungen der Faktoren des Prüfprozesses und abgeleitete Empfehlungen

Faktor	Wirkung	Abgeleitete Empfehlung
Spulenanordnung	<i>Absolutsensoren</i> erzielen eine höhere Messgenauigkeit als Halbtransmissionsensoren	Absolutsensoren verwenden
Spulendurchmesser	<i>Kleine Spulendurchmesser</i> erzielen eine höhere Messgenauigkeit bis zur 4. Lage	Möglichst kleine Spulendurchmesser wählen
Sensororientierung	Bei Halbtransmissionssensoren: <i>Sensororientierung parallel zu einer Lage</i> erhöht Messgenauigkeit für diese Lage, während sie zugleich schwächer abgebildet wird	Für nicht detektierte Lagen Sensororientierung senkrecht zu dieser Lage wählen für stärkere Abbildung

Tabelle 6-5 (Fortsetzung): Wirkungen der Faktoren des Prüfprozesses und abgeleitete Empfehlungen

Faktor	Wirkung	Abgeleitete Empfehlung
Messfrequenz	<i>Hohe Frequenzen</i> erhöhen die Messgenauigkeit für oben liegende Lagen, verringern sie leicht für tiefer liegende	Höhere Frequenzen (8 MHz) wählen
Fadenstruktur	<i>Ausgeprägte Fadenstruktur</i> der Halbzeuge erhöht Messgenauigkeit	I.d.R. nicht beeinflussbar
Lagenzahl des Stapels	<i>Geringere Lagenzahl</i> erhöht Messgenauigkeit	I.d.R. nicht beeinflussbar
Position der Lage im Stapel	<i>Oben liegende Lagen</i> erzielen eine höhere Messgenauigkeit	I.d.R. nicht beeinflussbar
Auswerteausschnittsgröße	<i>Größere Auswerteausschnitte</i> erhöhen Winkelauflösung (Trennung von Lagen mit kleiner Winkeldifferenz)	Zur Auflösung kleinerer Winkeldifferenzen Auswerteausschnitt vergrößern

7 Verfahrenserprobung an mehrlagigen 3D-Preforms und CFK

7.1 Versuchsauswahl

Ziel dieses Kapitels ist die Validierung der entwickelten Faserorientierungsmessung an mehrlagigen 3D-Strukturen. Hierfür werden zwei Anwendungsfälle ausgewählt:

- Als erster Anwendungsfall wird ein *komplex geformtes CFK-Bauteil* („Federdom“) mit vier Carbonfaserlagen untersucht. Zielsetzung ist der Nachweis der Faserorientierungsmessung an einem komplexen, mehrfach gekrümmten und mehrlagigen CFK-Bauteil. Die gemessenen Faserorientierungen werden verwendet, um die Reproduzierbarkeit der Bauteilherstellung zu bewerten, wofür vier verschiedene Bauteile mit paarweise variiertes Lagenorientierung hergestellt wurden.
- Der zweite Anwendungsfall ist ein *automatischer 3D-Drapiertprozess* zu einer Halbkugel. Zielsetzung ist der Nachweis der Faserorientierungsmessung an trockenen Preforms. Die gemessenen Faserorientierungen werden verwendet, um das Verformungsverhalten der textilen Halbzeuge zu bewerten. Neben der Untersuchung des Drapierergebnisses werden hierbei Faserorientierungsmessungen nach einzelnen Teilschritten des Drapierprozesses durchgeführt, mit denen der zeitliche Verlauf der Reorientierung der Fäden auf den einzelnen Stufen untersucht wird. Ferner wird die Streuung der Faserorientierung bei mehrmaliger Wiederholung desselben Umformprozesses untersucht.

Tabelle 7-1 fasst die beiden Anwendungsfälle und die Auswahlkriterien zusammen.

Tabelle 7-1: Ausgewählte 3D-Anwendungsfälle

Anwendungsfall	Auswahlkriterium	Zielsetzung der Faserorientierungsmessung
CFK-Bauteil Federdom	Infiltriertes CFK-Bauteil	Bewertung Prozess- und Bauteilqualität
Automatischer Drapierprozess zur Halbkugel	Trockenes textiles Halbzeug	Bewertung Scherverhalten der Halbzeuge

7.2 Faserorientierungsmessung an einem komplexen CFK-Bauteil

7.2.1 Versuchsbeschreibung

Für die Verfahrenserprobung an einer realistischen und komplexen 3D-CFK-Geometrie wurde die Geometrie eines *PKW-Federdoms* (suspension strut dome) ausgewählt, die bereits bei den Arbeiten zur automatischen Bahnplanung in Kapitel 4 vorgestellt wurde.²⁶ Abb. 7-1 zeigt eines der

²⁶ Die Formgeometrie entstammt dem Forschungsprojekt „EFFEKT – Effiziente Fertigungsprozesse für endkonturnahe Thermoplastverbundbauteile“ an der TU Dresden (vgl. Großmann 2010 [217]).

geprüften CFK-Bauteile und eine exemplarische Einbaulage im Motorraum. Der Federdom nimmt die auf das Federbein der Radaufhängung wirkenden Kräfte auf und leitet sie an die Karosserie weiter. In Sportwagen werden die Federbeindome zur zusätzlichen Versteifung oftmals mit einer Domstrebe verbunden (vgl. Abb. 7-1 rechts).

Für die Validierung der 3D-Faserorientierungsmessung wurde die Federdomgeometrie mit vier unterschiedlich orientierten Carbonfaserlagen abgeformt. Die Lagenreihenfolge wurde dabei in zwei Stufen variiert: Bauteile A-1 und A-2 besitzen eine Lagenanordnung von $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$, Bauteile B-1 und B-2 eine Lagenanordnung von $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$. Die Lagenorientierung ist somit quasi-isotrop, was in [217] als beanspruchungsgerechte Lagenorientierung ermittelt wurde. Für die $0^\circ/90^\circ$ -Lagen wurde ein $0^\circ/90^\circ$ -Biaxialgelege verwendet, für die $+45^\circ/-45^\circ$ -Lagen ein $\pm 45^\circ$ -Bidiagonalgelege. Die textiltechnischen Parameter beider Gelege sind in Tabelle 7-2 angegeben. Das verwendete Biaxialgelege ist nicht mit dem in Kapitel 6 untersuchten identisch, besitzt aber ähnliche Parameter.

Die CFK-Herstellung erfolgte durch manuelles und sequentielles Drapieren der beiden zweilagigen Gelege mit anschließender Infusion im Vakuuminfusionsprozess. Für die Herstellung wurde eine Negativ-Form verwendet, so dass die bei der Prüfung oben liegende Bauteilseite glatt ist.

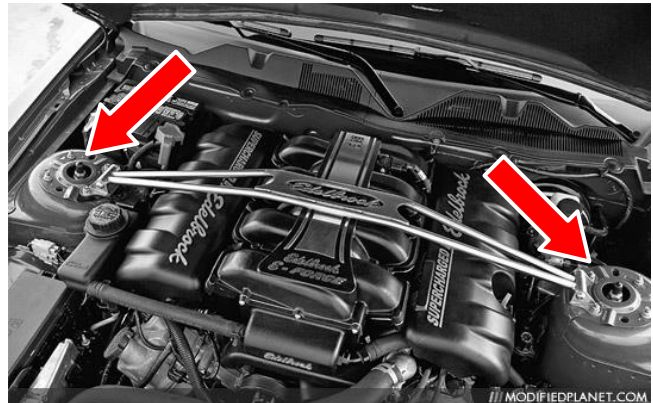


Abb. 7-1: CFK-Bauteil Federdom (links) und Position der Federdome im Motorraum, exemplarisch für einen Ford Mustang GT (rechts, Bildquelle [218], die Federdome besitzen hier eine andere Geometrie)

Tabelle 7-2: Textile Parameter der Halbzeuge für den Federdom

Bezeichnung	Faserrichtungen ($^\circ$)	Flächengewicht (g/m^2)	Fadenfeinheit (tex)	Fadenabstand (mm)	Dicke (mm)	Hersteller
$0^\circ/90^\circ$ - Biaxialgelege	0	315	1600	5,6	0,6	Saertex
	90	315	1600	2,7		
	Summe	630				
$\pm 45^\circ$ - Bidiagonalgelege	+45	290	800	2,76	0,55	ITM (TU Dresden)
	-45	290	800	2,76		
	Summe	580				

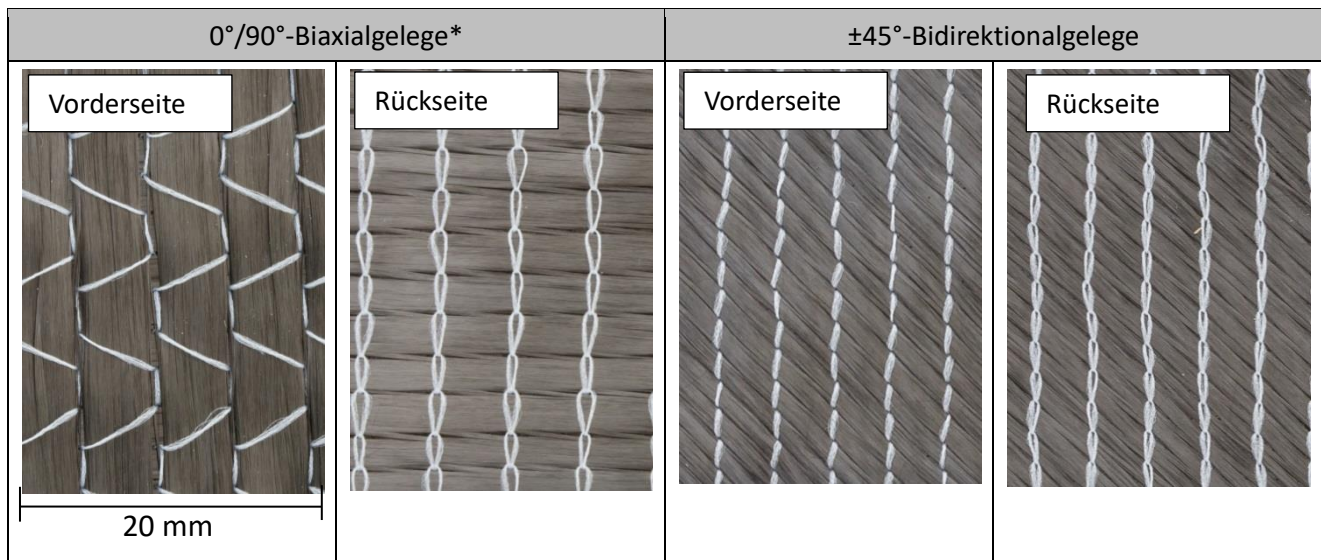


Abb. 7-2: Für den Federdom verwendete Gelege

Als Sensor wurde ein am Fraunhofer IKTS entwickelter, 3D-gedruckter Sensor mit dünner Spitze verwendet, der auch eine Erreichbarkeit der konkav gekrümmten Radien erlaubt. Der Sensor ist ein Halbtransmissionsensor mit Sende- und Empfangsspulendurchmesser von jeweils 3,3 mm und einem Spulenabstand von 3,5 mm, was dem im vorherigen Kapitel untersuchten Sensor HT 3,3 (vgl. Tabelle 6-2, S. 78) entspricht, für den bei der 2D-Faserorientierungsmessungen sehr hohe Messgenauigkeiten erzielt werden konnten. Die Bahnplanung erfolgte mit dem in Kapitel 4 entwickelten Verfahren. Tabelle 7-3 enthält die Bahnplanungs- und Prüfparameter. Da der verwendete Roboter (Kuka KR6 R900 sixx, Agilus) einen Arbeitsradius von 900 mm besitzt, waren nicht alle Punkte des Bauteils im geforderten senkrechten Winkel erreichbar. Linke und rechte Bauteilhälfte, geteilt an der Längsrippe, wurden daher separat gemessen, anschließend wurden die 3D-Wirbelstromdaten zum Gesamtbauteil zusammengesetzt. Für jedes Bauteil wurden vier Messungen mit Sensororientierungen 0° , 90° , $+45^\circ$ und -45° durchgeführt. Abb. 7-3 zeigt den Prüfvorgang mit Sensororientierung 0° (parallel zur Bauteillängsachse).

Tabelle 7-3: Prüfparameter für die 3D-Wirbelstromprüfung am Federdom

Sensor	Sensororientierung (°)	Prüffrequenz (MHz)	Bahnplanung	Bahnabstand (mm)	Anzahl Bahnen	Prüfzeit (min)
HT 3,3S	0, 90, 45 und -45	6	Von CAD-Daten	0,5	2x215	2x55

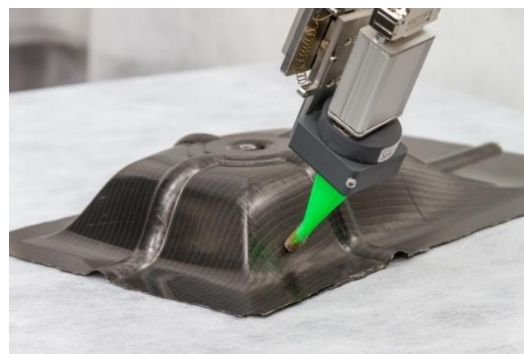


Abb. 7-3: 3D-Wirbelstromprüfung am CFK-Bauteil Federdom

7.2.2 Wirbelstrombilder

Abb. 7-4 zeigt beispielhaft für Bauteil A-1 und Sensororientierung 0° das 3D-Wirbelstrombild. A-1 besitzt einen Lagenaufbau von $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ und sowohl die oberen $+/-45^\circ$ -Lagen wie die unteren $0^\circ/90^\circ$ -Lagen sind als Streifenmuster im Wirbelstrombild deutlich erkennbar. An der Längs- und Querrippe sowie an den Kanten (helle Bereiche) sind Abhebeeffekte unvermeidbar: aufgrund des engen Geometrieradius verliert entweder die Empfänger- oder die Sendespule des Sensors den Kontakt zur Oberfläche. Durch die automatische Phasendrehung können diese Störeinflüsse reduziert, aber nicht vollständig beseitigt werden, so dass die Rippen von der Faserorientierungsmessung ausgeschlossen wurden, um Fehldetektionen zu vermeiden. Für die Kanten ist dies nicht notwendig, da die Faserorientierungsmessung Kanten im Bildausschnitt automatisch erkennt und eine Fehldetektion der Kante als Faserrichtung verhindert (vgl. Abschnitt 5.3.4).

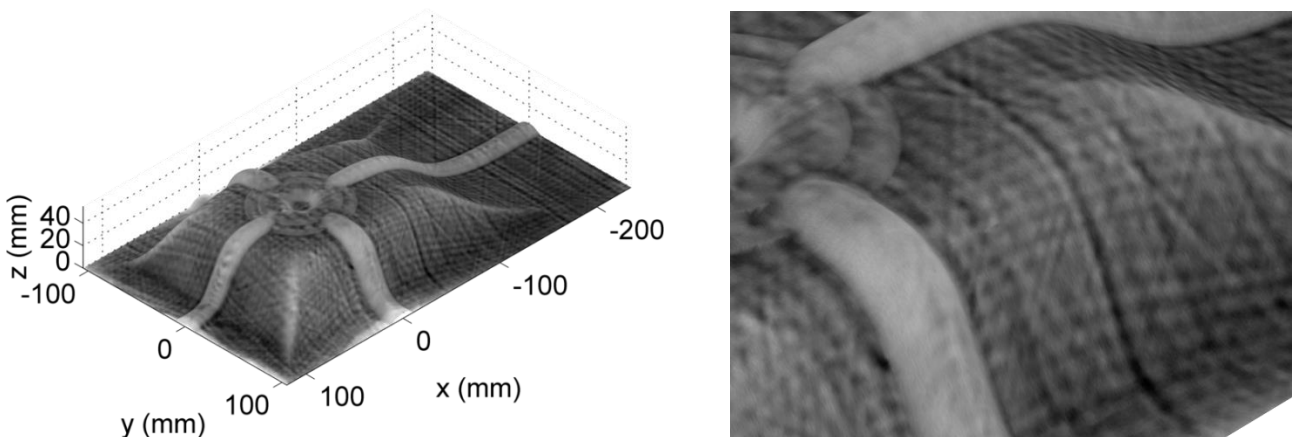


Abb. 7-4: Wirbelstrombild Probe A-1, Sensororientierung 0°

Abb. 7-5 vergleicht die mit verschiedenen Sensororientierungen aufgenommenen Wirbelstrombilder beispielhaft für die Proben A-1 und B-1. Mehrere Ergebnisse lassen sich hieraus ableiten:

1. Der in Kapitel 6 ermittelte Einfluss der Sensororientierung, dass eine Sensororientierung senkrecht zu einer Lage diese hervorhebt, eine Sensororientierung parallel zu einer Lage diese schwächer abbildet, ist auch an den 3D-Ergebnissen deutlich sichtbar: Bei Sensororientierung 0° (Wirbelstrombilder in oberster Zeile) sind die in den Bildern vertikal verlaufenden 90° -Fäden hervorgehoben, die horizontal verlaufenden 0° -Fäden hingegen sehr schwach abgebildet. Eine Sensororientierung -45° oder $+45^\circ$ resultiert in der Hervorhebung der jeweils senkrecht dazu stehenden $+45^\circ$ - oder -45° -Faserorientierung.
2. Die $+/-45^\circ$ -Lagen sind immer schwächer abgebildet als die $0^\circ/90^\circ$ -Lagen, und zwar sowohl im Bauteil B-1, wo die $+/-45^\circ$ -Lagen unten liegen, als auch im Bauteil A-1, wo die $+/-45^\circ$ -Lagen obenauf liegen. Als Grund für die schwächere Abbildung kann die bei den $+/-45^\circ$ -Lagen deutlich geringer ausgeprägte Faserbündelstruktur angesehen werden (vgl. Abb. 7-2). Die deutlichste Erkennbarkeit der $+45^\circ/-45^\circ$ -Lagen wird bei Sensororientierung 0° erzielt. Für die folgenden Faserorientierungsmessungen werden daher die Wirbelstrombilder der 0° -Sensororientierung verwendet.

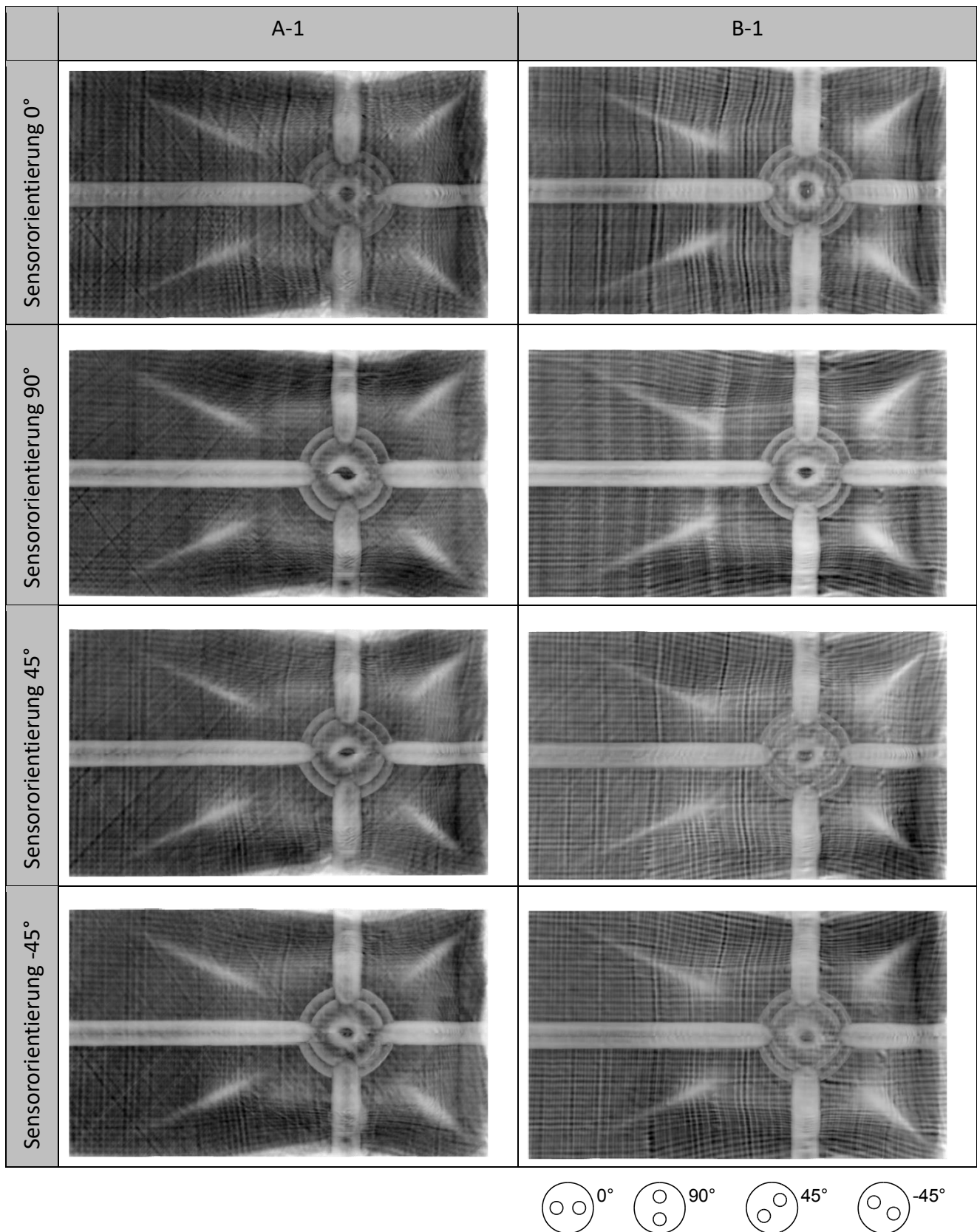


Abb. 7-5: Wirbelstrombilder Proben A-1 und B-1 für vier verschiedene Sensororientierungen

7.2.3 Faserorientierungsmessung

Für die Faserorientierungsmessung wurde ebenso wie in Kapitel 6 ein Abstand der Auswertepunkte von 15 mm und eine Größe der Auswertequadrate von 60x60 mm² gewählt, so dass der effektive Auswerterradius 15 mm beträgt. Abb. 7-6 zeigt die aus den Faserorientierungsmessungen rekonstruierten Fadenverläufe für die vier Lagen von A-1 und B-1 bei Sensororientierung 0°.

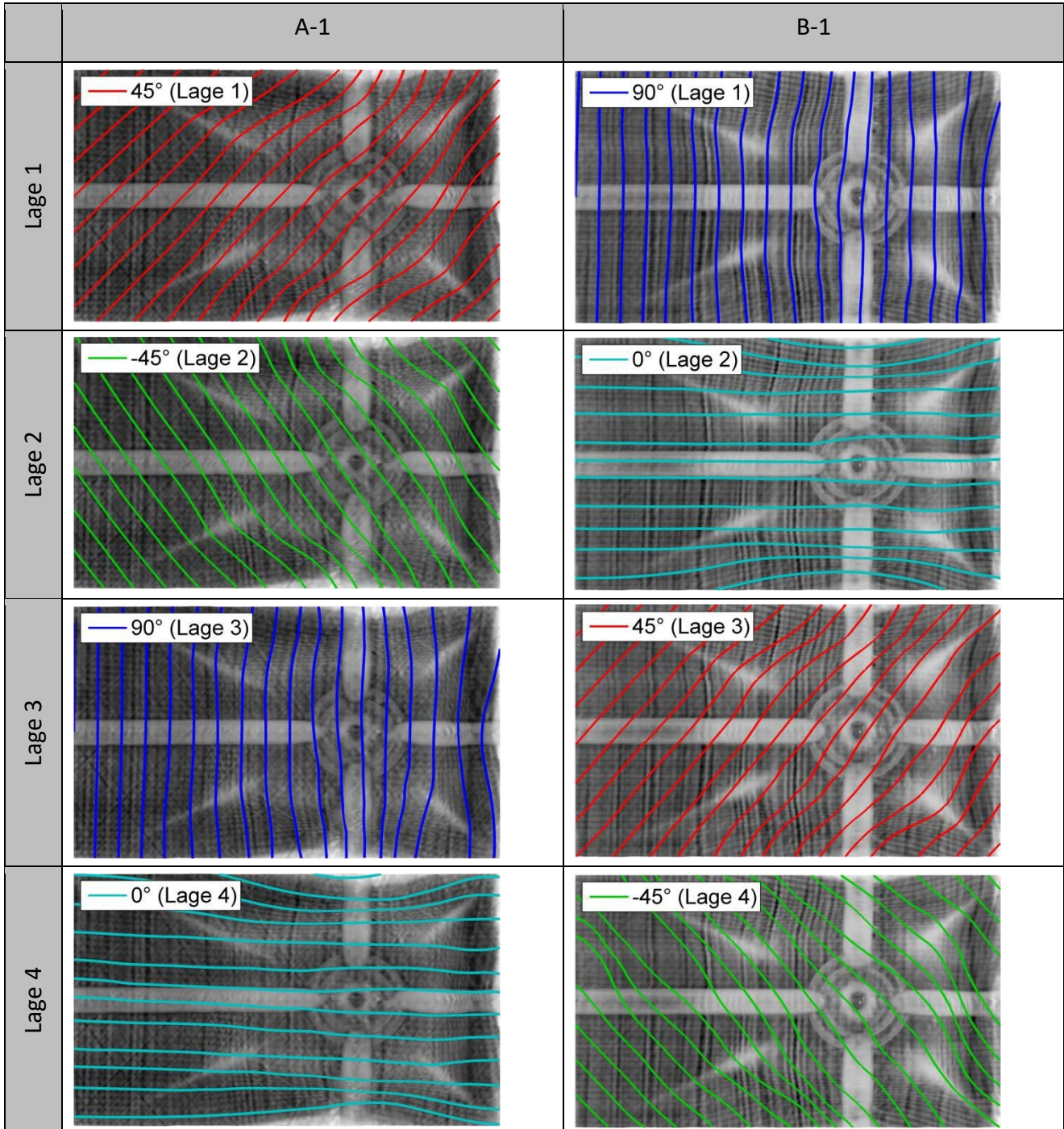


Abb. 7-6: Rekonstruierte Fadenverläufe für die Bauteile A-1 und B-1

Für eine *qualitative Validierung* können die aus der Messung rekonstruierten Fadenverläufe mit den im Wirbelstrombild als hell-dunkle Streifenmuster erkennbaren Fadenverläufen verglichen werden. Verfolgt man die einzelnen rekonstruierten Fadenverläufe in der gezeigten Draufsicht von Abb. 7-6, so stimmen sie sowohl in den flachen als auch in den gekrümmten Bereichen sehr gut mit den im Wirbelstrombild erkennbaren Streifenmustern überein. Eine Ausnahme ist lediglich die vierte Lage von Bauteil B-1 (-45° , rechte Spalte ganz unten, grüne Linien). Hier ist die unterste Lage nur sehr schwach abgebildet, was bei der Faserorientierungsmessung zu starken Abweichungen führt. Obwohl die Verläufe der -45° -Fäden im Wirbelstrombild nicht erkennbar sind, sind die starken Krümmungen der rekonstruierten Fadenverläufe im oberen linken Bauteilbereich nicht plausibel. Da in diesem Bereich keine Drapierung vorliegt, ist von einem geradlinigen Fadenverlauf auszugehen, wie ihn auch die $+45^\circ$ -Lage (rot, Zeile darüber) zeigt.

Abb. 7-7 zeigt die rekonstruierten Fadenverläufe an einem Detail der Seitenfläche. Die rekonstruierten Fadenverläufe folgen den im Wirbelstrombild erkennbaren Fadenverläufen exakt. Nur die -45° -Lage in B-1 (rechte Spalte unten, hellblaue Linien) ist zu schwach abgebildet, um eine Bewertung zu ermöglichen.

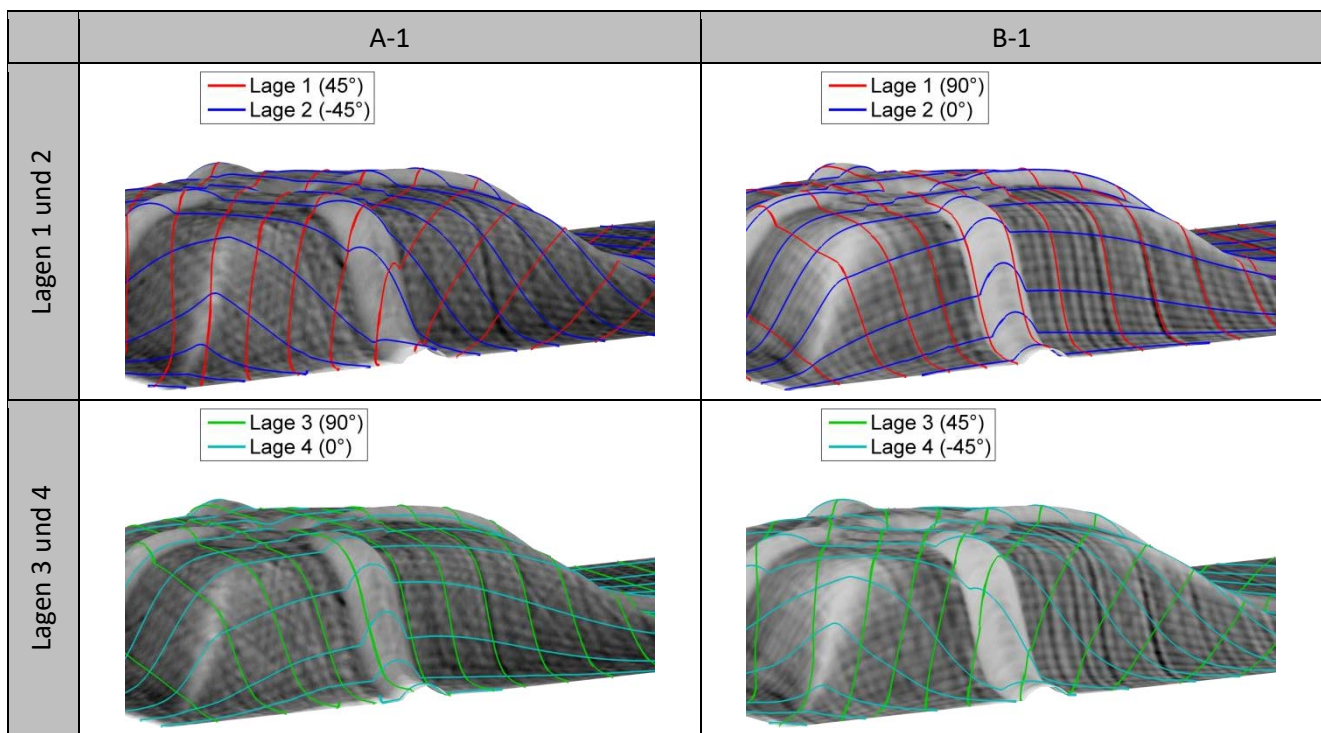


Abb. 7-7: Vergleich der rekonstruierten Fadenverläufe mit den Wirbelstrombildern für Bauteile A-1 und B-1

Für eine optische Validierung der gemessenen Faserorientierungen in der oberen Lage wurde das Bauteil A-1 in senkrechter Perspektive fotografiert, und das 2D-Foto auf die 3D-Oberfläche der Messdaten „gemappt“. Abb. 7-8 zeigt den Vergleich für das Gesamtbauteil und drei Details, an denen erkennbar ist, dass die mit der Wirbelstromprüfung ermittelten Fadenverläufe den optisch erkennbaren Fadenverläufen exakt folgen.

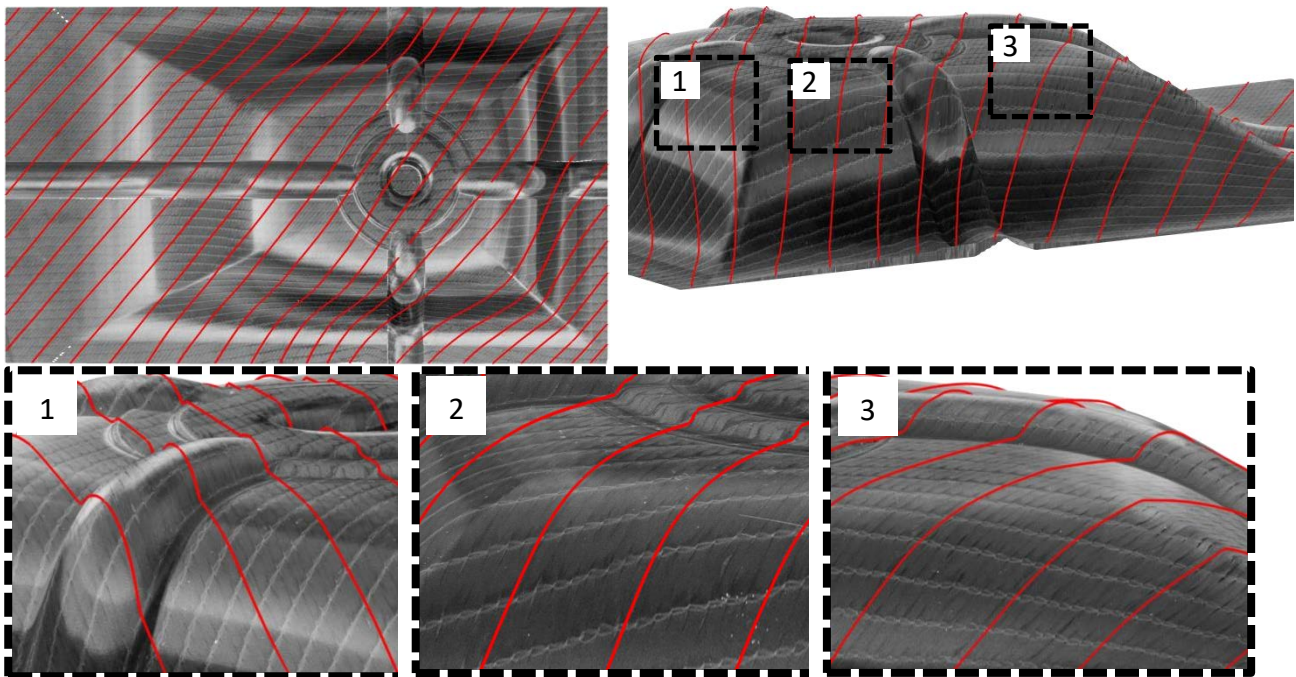


Abb. 7-8: Vergleich der rekonstruierten Fadenverläufe mit optischer Aufnahme (Bauteil A-1)

7.2.4 Standardabweichung bei Variation der Sensororientierung

Da aus Kapitel 6 bekannt ist, dass beim verwendeten Halbtransmissionssensor die Sensororientierung relativ zu einer Lage die Messunsicherheit für diese Lage beeinflusst, wurde die Streuung der lokalen Faserrichtung bei Variation der Sensororientierung ausgewertet. Hierfür wurde an allen Messpunkten die Standardabweichung zwischen den vier Wiederholungsmessungen (Sensororientierung 0° , 90° , $+45^\circ$, -45°) bestimmt. Diese Standardabweichung zeigt die Abhängigkeit der Ergebnisse der Faserrichtungsmessung von der Wahl der Sensororientierung.²⁷

Abb. 7-9 zeigt die Ergebnisse. Die Standardabweichung ist als Farbkarte eingezeichnet, zusätzlich sind für jede der Sensororientierungen Referenzfäden eingezeichnet.

In den blau eingefärbten Bereichen unterscheiden sich die mit den vier Sensororientierungen gemessenen Faserrichtungen kaum (Standardabweichung $< 2^\circ$), die Referenzfäden der vier Messungen verlaufen dementsprechend identisch oder parallel. In den gelb und rot eingefärbten Bereichen unterscheiden sich die gemessenen Faserrichtungen hingegen stark. Die Winkelabweichung ist erkennbar als nicht-paralleler Verlauf bzw. Verkreuzung der Referenzfäden.

Für das Bauteil A-1 resultiert die Veränderung der Sensororientierung in einer Standardabweichung $< 2^\circ$ für die meisten Bereiche. Deutlich ist, dass die Messung der dritten und vierten Lage ($0^\circ/90^\circ$) unempfindlicher gegen eine Veränderung der Sensororientierung ist als die der ersten und die zweite ($\pm 45^\circ$), was in der bereits besprochenen schwächeren Abbildung der $\pm 45^\circ$ -Lagen begründet liegt. Auffällig ist hierbei die höhere Standardabweichung für die rechte, in den Bildern vorn liegende Seitenfläche bei der -45° -Lage (Lage 2). Die Messung mit Sensororientierung -45° (grüne Fäden) zeigt hier starke Abweichungen gegenüber den restlichen Messungen, was auf die

²⁷ Diese Standardabweichung ist nicht zu verwechseln mit der Messunsicherheit des Messverfahrens aus Kapitel 6. Die hier dargestellte Standardabweichung drückt die Abweichung zwischen den Ergebnissen mit günstigster und mit ungünstigster Sensororientierung aus, die i.d.R. größer ist als die bei günstigster Sensororientierung erzielbare Messunsicherheit.

ungünstige parallele Orientierung von -45° -Sensor und -45° -Fäden verweist. Es kann daher unmittelbar geschlussfolgert werden, dass die Sensororientierung so zu wählen ist, dass sie möglichst senkrecht, in jedem Fall aber nicht parallel zu der Lage liegt, für die aufgrund ihrer Position oder Fadenstruktur die schwächste Abbildung im Wirbelstrombild erwartet wird.

Weitere Bereiche mit höheren Abweichungen sind beim Bauteil A-1 an den Rändern und den Übergängen zu den Rippen erkennbar. Diese verweisen auf Ungenauigkeiten bei der Bauteilpositionierung: da das Bauteil für die Messungen manuell positioniert wurde, sind leichte Abweichungen der in der Bahnplanung zugrundegelegten Position gegenüber der Ist-Position nicht vermeidbar. Diese resultieren insbesondere an Kantenbereichen, wo sich die Faserorientierung lokal stark ändert, in Ungenauigkeiten.²⁸

Für das Bauteil B-1 ist die Standardabweichung für die 0° - und 90° -Lage bei Veränderung der Sensororientierung gering ($< 2^\circ$). Da die 0° - und 90° -Lagen im Bauteil B-1 oben liegen, werden sie mit allen Sensororientierungen sehr gut abgebildet, so dass die Streuung sogar kleiner ist als beim Bauteil A-1, wo die $0^\circ/90^\circ$ -Lage unten liegen. Die im Bauteil B-1 unten liegenden $\pm 45^\circ$ -Lagen zeigen hingegen eine sehr hohe Streuung bei Variation der Sensororientierung, und zwar selbst in den flachen, nicht drapierten Bereichen ($> 8^\circ$). Ein Vergleich der Referenzfäden der einzelnen Messungen zeigt wie erwartet, dass für die Messung der $+45^\circ$ -Lage insbesondere die Messung mit einer Sensororientierung $+45^\circ$ (grüne Fäden) deutlich von den anderen Referenzfäden abweicht, während für die -45° -Lage die Sensororientierung -45° (magentafarbene Fäden) starke Abweichungen von den anderen Messungen aufweist. Allerdings ist hier auch für die anderen, zur jeweiligen Lage nicht-parallelen Sensororientierungen eine starke Streuung erkennbar. Wichtigste Empfehlung ist damit auch hier, die Sensororientierung gezielt so zu wählen, dass sie nicht parallel zu den am schwächsten abgebildeten Lagen verläuft, was in diesem Fall die $\pm 45^\circ$ -Lagen mit schwächer ausgebildeter Fadenstruktur sind. Aus den Textilparametern in Tabelle 7-2 (S. 102) ergibt sich auch, dass der Fadenabstand der $\pm 45^\circ$ -Lage mit 2,76 mm nur wenig größer ist als die Auflösung eines HT 3,3-Sensors (ca. 2 mm). Es wäre daher zu empfehlen, für weitere Messungen an diesem Gelegetyp hochauflösendere Sensoren mit geringerem Spulendurchmesser sowie Absolutsensoren zu untersuchen.

²⁸ Der zur Reduzierung dieser Abweichung notwendige Abgleich zwischen Bahnplanung und Ist-Position des Bauteils ist Gegenstand eines aktuellen Forschungsprojekts am ITM.

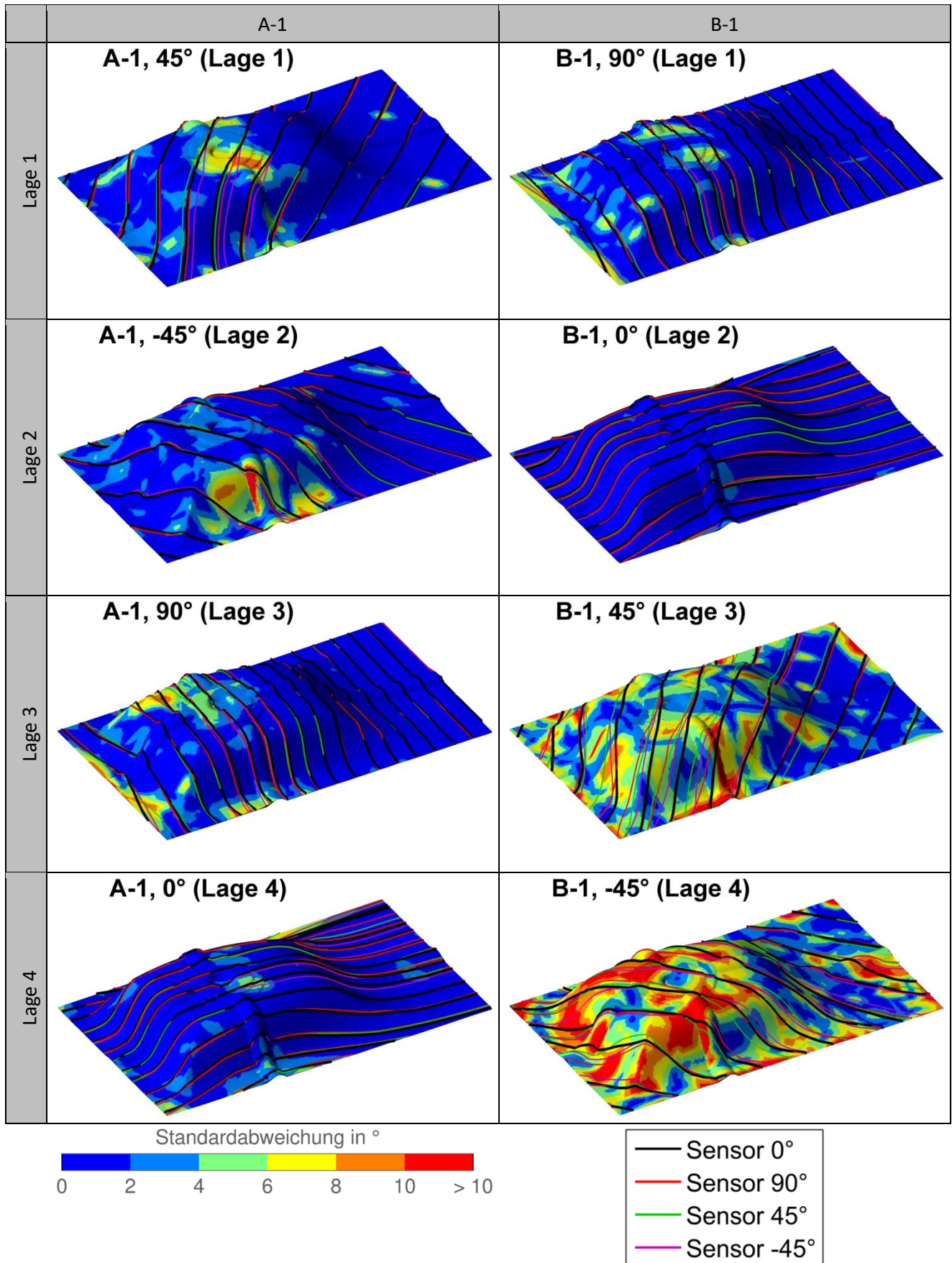


Abb. 7-9: Standardabweichung der Faserorientierung bei Messung mit verschiedener Sensororientierung

7.2.5 Faserorientierungsvergleich für die vier Bauteile

Wie die vorhergehenden Untersuchungen zeigten, ist bei geeigneter Wahl der Sensororientierung eine Bestimmung der Faserorientierung für alle vier Lagen möglich. Dies wird nun genutzt, um alle vier hergestellten Bauteile hinsichtlich der Faserorientierung der Einzellagen zu vergleichen. Da die textilen Halbzeuge nacheinander und einzeln aufgelegt und drapiert wurden, ist davon auszugehen, dass die unterschiedliche Stapelreihenfolge bei den Bauteiltypen A und B vernachlässigbar ist.

Abb. 7-10 zeigt für alle vier Bauteile jeweils die Faserorientierungen der gleich orientierten Lagen. Für die $\pm 45^\circ$ -Lagen wurden nur die als hinreichend genau angenommenen Messergebnisse für A-1 und A-2 mit Sensororientierung 0° verglichen. Die rekonstruierten Fadenverläufe in der oberen Zeile von Abb. 7-10 zeigen einen Winkelversatz von ca. 5° für die beiden Bauteile: die blauen und roten Fäden kreuzen sich und laufen in annähernd konstantem Winkel auseinander. Da die $\pm 45^\circ$ -Lagen bei A-1 und A-2 oben liegen, kann dieses Ergebnis optisch verifiziert werden: Abb. 7-11 zeigt, dass der Nähfaden, der die 0° -Orientierung des $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgeleges anzeigt, bei A-1 schräg gegenüber der Längsrippe verläuft. Diese Abweichung ist in den Messergebnissen als abweichende Faserorientierung auch für die zweite Lage identifizierbar. Auch in den anderen Bereichen existieren Abweichungen, die auf den manuellen Herstellungsprozess zurückzuführen sind.

Die in der zweiten Zeile dargestellten Fadenverläufe der $0^\circ/90^\circ$ -Lage sind dagegen wesentlich ähnlicher, aber auch hier sind Abweichungen insbesondere an den Seitenflächen im Bereich der Querrippen festzustellen. Da die $0^\circ/90^\circ$ -Lagen entlang der Längsachse des Bauteils aufgelegt, anschließend über die Seitenflächen glattgestrichen wurden, entstehen an den Seitenflächen größere Abweichungen, da die entstehende Scherung abhängig vom Druck und der Glattstreichrichtung beim Drapierprozess ist. Für eine Verringerung der Abweichungen im Herstellungsprozess können aus diesen Ergebnissen unmittelbar Maßnahmen abgeleitet werden: erstens empfiehlt sich eine Kontrolle der Lagenorientierung beim Auflegen (z.B. anhand des deutlich sichtbaren Nähfadenverlaufs), zweitens empfiehlt sich eine genauere Vorgabe der Richtung, Reihenfolge und aufzuwendenden Kraft beim Glattstreichen der Lagen über die einzelnen Seitenflächen.

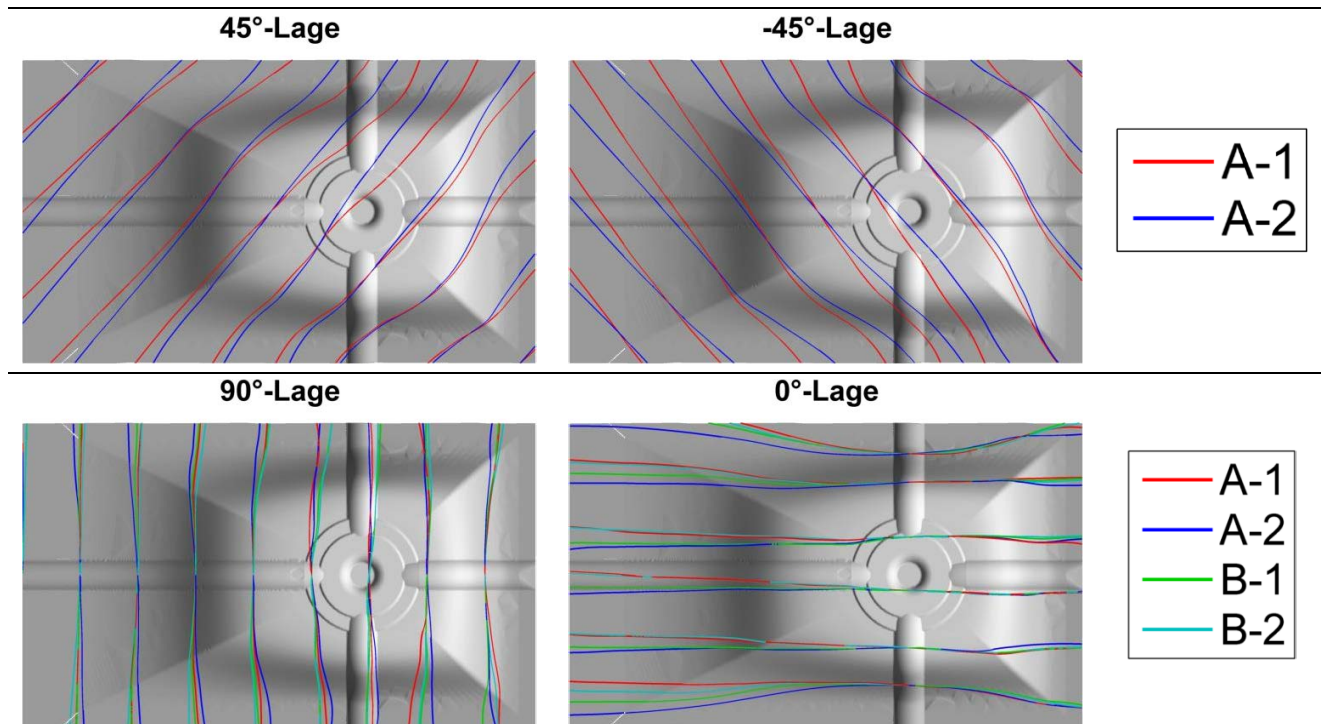


Abb. 7-10: Vergleich der Faserorientierungen der Einzellagen der vier Bauteile

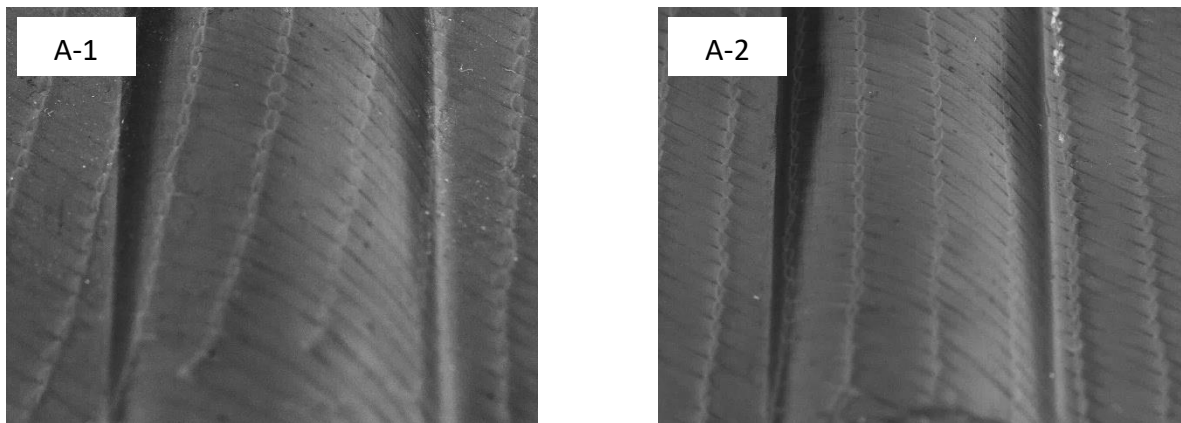


Abb. 7-11: Nähfadenverlauf auf der Längsrippe bei A-1 und A-2

7.3 Faserorientierungsmessung beim Drapierprozesses

7.3.1 Versuchsbeschreibung

Beim Drapieren textiler Halbzeuge erfolgt die Anpassung des zweidimensionalen Halbzeugs an die 3D-Geometrie durch Scherung. Der wesentliche Materialparameter des textilen Halbzeugs ist daher sein symmetrisches oder asymmetrisches Scherverhalten, das experimentell als Scherwinkel-Scherkraft-Kurve aufgenommen werden kann (vgl. das folgende Kapitel 8). Die sich einstellenden lokalen Faserorientierungen können als Resultat des Scherverhaltens des textilen Halbzeugs, in Kombination mit eingebrachten Prozesskräften (Niederhalter- und Reibkräfte), betrachtet werden. Hohe Scherwinkel führen dabei zur Aufdickung der Preform, eine Überschreitung des kritischen Scherwinkels kann zur Faltenbildung führen.

Für eine methodische Struktur- und Prozessanalyse und -optimierung sind daher nicht nur die Faserorientierungen, sondern auch die sich einstellenden Scherwinkel heranzuziehen. Ziel der folgenden Untersuchungen ist die Analyse des Einflusses der Textilstruktur des Halbzeugs auf die sich ausbildenden Scherwinkel und Fadenverläufe, wofür ein Satz von 1-, 2- und 4-lagigen Halbzeugen untersucht wird (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Parameter der textilen Halbzeuge für die Drapierversuche

Bezeichnung	Faserrichtungen (°)	Flächengewicht (g/m ²)	Fadenfeinheit (tex)	Fadenabstand (mm)	Dicke (mm)	Hersteller
UD-Gelege ¹	0	300	800	5	0,6	Saertex
Biaxialgelege ¹	0/90	630	800	3,5/2,5	0,6	ITM
Bidiagonalgelege	+45/-45	444	800	3,6/3,6	0,55	ITM
Köpergewebe	0/90	280	200	3,4/3,4	0,34	Saertex
Quadraxialgelege	0/+45/90/-45	998	800	3,6/3,6/3,6/2,4	1,2	ITM

¹ Identisch mit Kapitel 6 (Tabelle 6-3, S. 79)

Abb. 7-12 zeigt den für die folgenden Untersuchungen verwendeten, von der Firma *HTS Hoch Technologie Systeme GmbH* entwickelten automatischen Drapierprüfstand.²⁹ Das Textil ist zwischen der obenaufliegenden, kreisförmigen Matrize (hellblau in Abb. 7-12) und einem darunterliegenden segmentierten Ring aus acht Niederhaltern fixiert. Die Niederhalter drücken von unten gegen das Textil, so dass die entstehende Reibkraft der Nachföhrbewegung des Textils entgegenwirkt. Die Niederhalter bilden somit ein passives Nachföhrsystem. Die Druckkraft jedes der acht Niederhaltersegmente ist zwischen 0 und 96 N einstellbar.³⁰

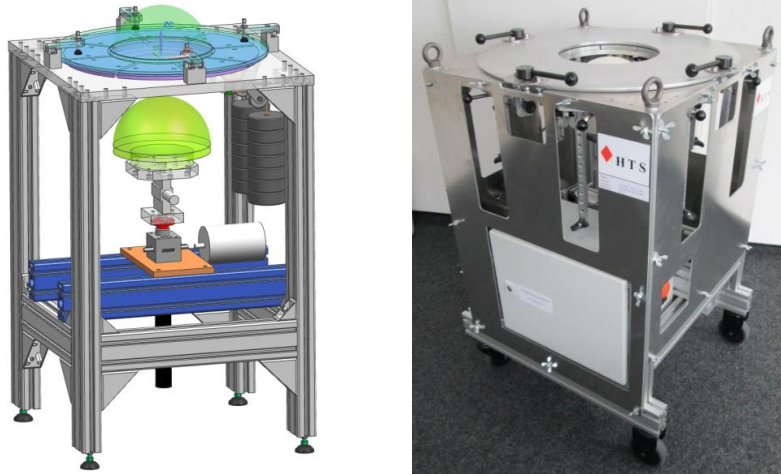


Abb. 7-12: Drapierprüfstand (HTS Hoch Technologie Systeme GmbH)

Für den Drapiervorgang wird der halbkugelförmige Stempel mit einem Radius von 100 mm von unten gegen das Textil gedrückt. Während des Verformungsverlaufs werden Verformungskraft und -weg aufgezeichnet, was für die hier durchgeführten Untersuchungen allerdings nicht ausgewertet wird. Verformungsgeschwindigkeit und Stempelaustriebshöhe können über eine Steuersoftware eingestellt werden, was im Folgenden benutzt wird, um den Drapierprozess stufenweise zu analysieren. Tabelle 7-5 enthält die für alle Drapierversuche verwendeten Einstellungen.

Tabelle 7-5: Parameter des Drapierprozesses

Geschwindigkeit (mm/s)	Niederhalterkräfte (N)	Drapierhöhe (mm)
13	8x96	0, 25, 50, 75 und 100

Die für die Bahnplanung erforderliche Vorgabe der 3D-Oberfläche konnte in diesem Fall als mathematische Funktion erfolgen. Bei einer Stempelaustriebshöhe von $h = 0$ mm ist die zu prüfende Oberfläche eine Ebene, bei einer Stempelaustriebshöhe von $h = 100$ mm eine Halbkugel. Auf den Zwischenstufen ist das Textil zwischen Niederhaltern und Matrize geklemmt und berührt die Stempeloberfläche tangential (Abb. 7-13), so dass sich die Oberfläche des Textils aus einer

²⁹ Ich danke für die freundliche Bereitstellung für die hier dargestellten Untersuchungen.

³⁰ Eine mit diesem Drapierprüfstand und der Wirbelstromprüfung durchgeführte Untersuchung des Einflusses symmetrischer oder asymmetrischer Niederhalterkräfte, der Verformungsgeschwindigkeit, sowie der textilen Parameter (Fadenfeinheit, Bindungsart, Vernäh-Stichlänge) auf die Fadenverläufe nach der Drapierung wurde in Bardl et al 2017 [219] publiziert.

Kugelkappe und einem Kegelstumpf zusammensetzt. Für komplexere Geometrien kann die Oberfläche wie beim vorhergehenden Anwendungsbeispiel als CAD-Modell vorgegeben werden.

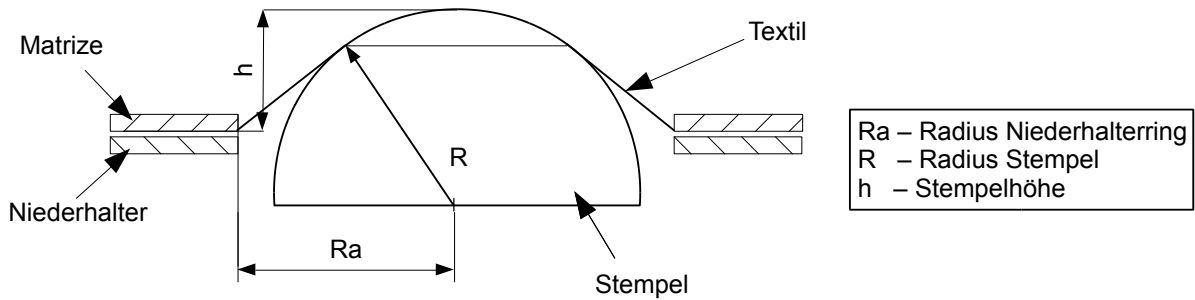


Abb. 7-13: Zur Herleitung der 3D-Oberfläche beim Drapierprozess

Tabelle 7-6 enthält die Prüfparameter, Abb. 7-14 zeigt den robotergeführten 3D-Prüfprozess. Insgesamt wurden für die in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen 67 Drapierprüfungen mit verschiedenen Halbzeugen und Stempelhöhen durchgeführt. Für die Faserorientierungsmessungen wurde erneut ein Auswertegitter mit einem Punkteabstand von 15 mm und eine Seitenlänge der Auswertequadrate von 60 mm (effektiver Auswerterradius = 15 mm) verwendet. Hieraus ergeben sich 120 Auswertepunkte auf der Oberfläche.

Tabelle 7-6: Prüfparameter für die 3D-Wirbelstromprüfung am Drapierprüfstand

Sensor	Sensororientierung (°)	Prüffrequenz (MHz)	Bahnplanung	Bahnabstand (mm)	Bahnen	Prüfzeit (min)
HT 3,3	20°	6	Von math. Funktion für Oberfläche	0,5	255	25

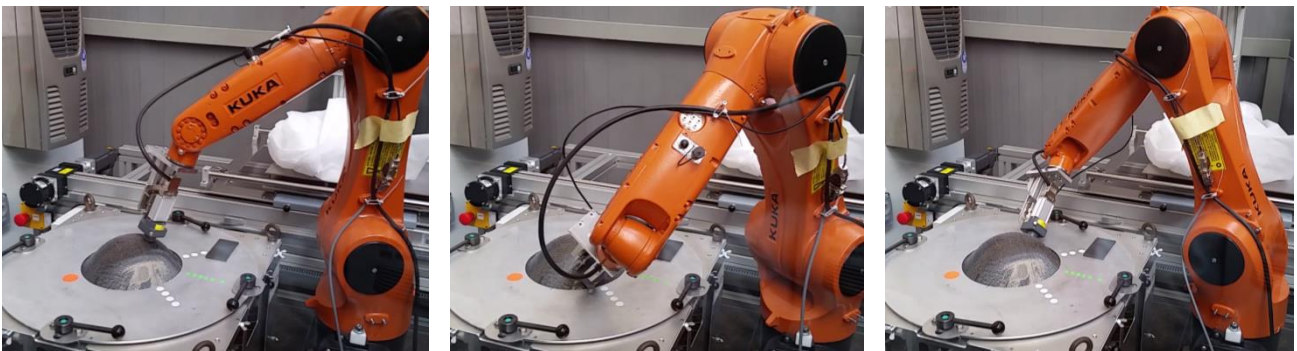


Abb. 7-14: 3D-Wirbelstromprüfung am Drapierprüfstand (Austriebshöhe $h = 75$ mm)

7.3.2 Verformungsverhalten zweilagiger Halbzeuge

Es werden zuerst die Ergebnisse an zwei-, dann an vier- und abschließend an einlagigen Halbzeugen vorgestellt.

Als zweilagige Halbzeuge wurden ein $0^\circ/90^\circ$ -Biaxialgelege, ein $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege und ein Köpergewebe ausgewählt. Abb. 7-15 zeigt die drapierten Oberflächen und die rekonstruierten Fadenverläufe. Das unterschiedliche Scherverhalten der drei Halbzeuge ist im Fadenverlauf der

beiden Lagen deutlich erkennbar: während sich im Biaxialgelege und im Gewebe annähernd symmetrische Fadenverläufe ausbilden, zeigt das $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege ein asymmetrisches Scherverhalten mit einer charakteristischen „S“-Form der Fadenverläufe über die Halbkugel. Aufgrund der guten Verschiebbarkeit der Fäden zeigt das Köpergewebe die stärkste Verscherung. Da es das einzige der drei Halbzeuge ist, für das aufgrund der Fadenverkreuzung die Orientierung beider Fadensysteme an der Oberfläche optisch bestimmbar ist, wird das Gewebe hier nicht weiter untersucht.

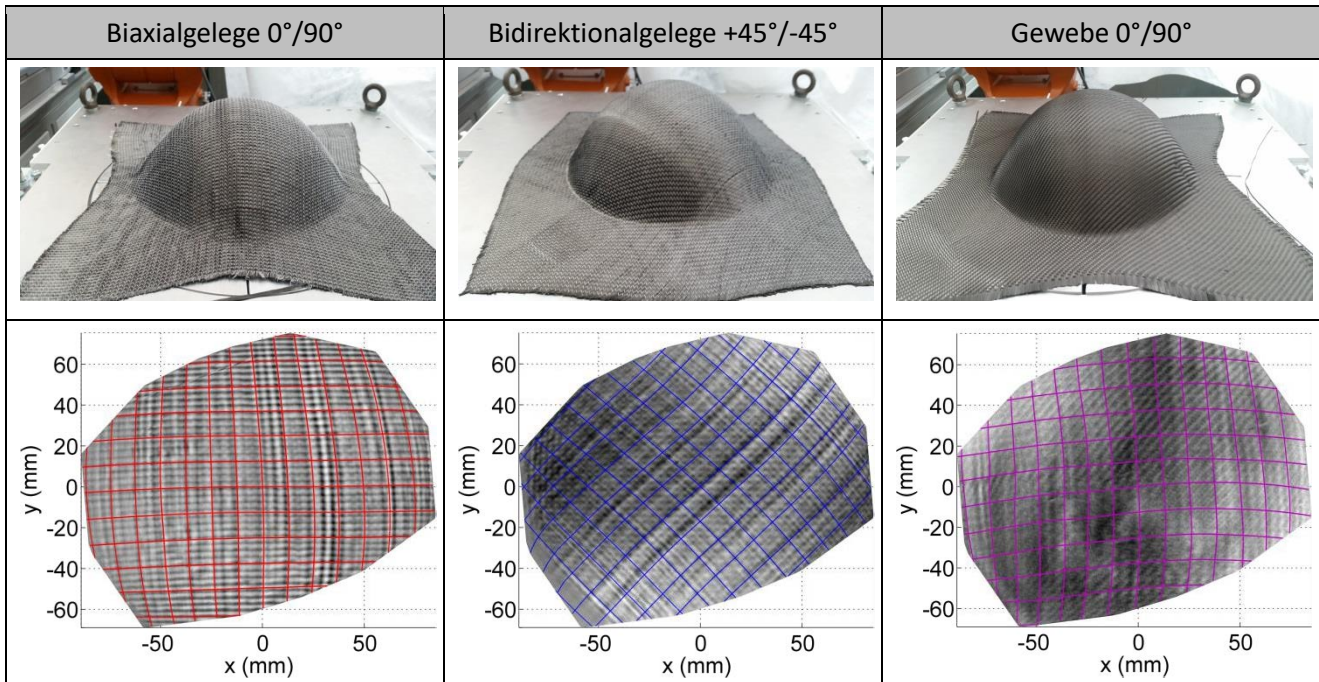


Abb. 7-15: Drapiererergebnis und rekonstruierte Fadenverläufe für die zweilagigen Halbzeuge

Die korrekte Messung der Fadenverläufe kann für die Halbzeuge durch Vergleich mit dem im Wirbelstrombild erkennbaren Streifenmuster der Fäden überprüft werden: Winkelabweichungen führen dazu, dass die rekonstruierten Fäden schräg zu den im Wirbelstrombild erkennbaren Fäden verlaufen würden. Abb. 7-16 zeigt einen rekonstruierten Fadenverlauf und drei im Winkel von 2° , 5° und 10° verlaufende Fäden. Eine Messabweichung $\geq 2^\circ$ ist auf diese Weise deutlich erkennbar.

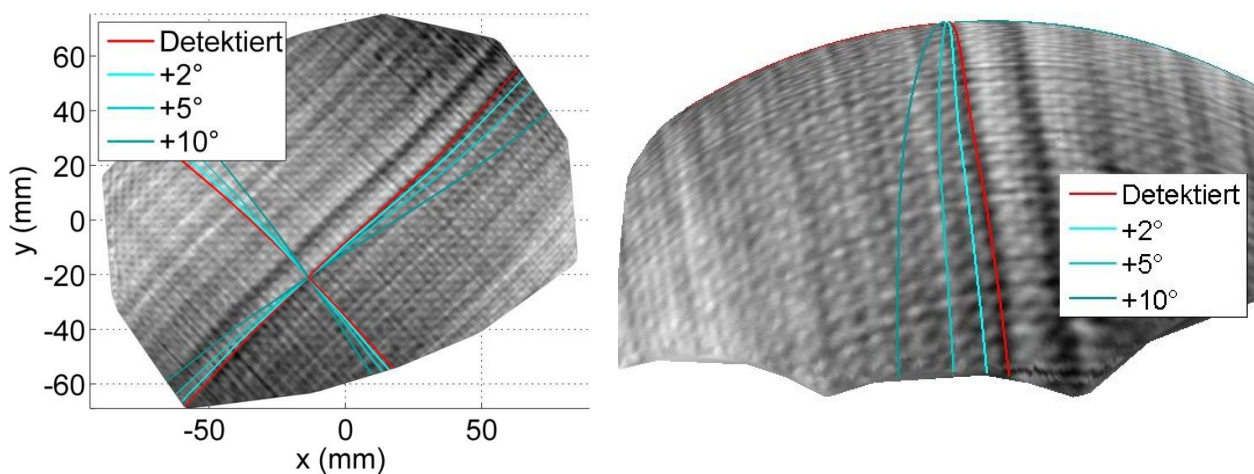


Abb. 7-16: Erkennbarkeit von Winkelabweichungen im rekonstruierten Fadenverlauf

Abb. 7-17 zeigt beispielhaft für das $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege die rekonstruierten Fadenverläufe auf den fünf Drapierstufen $h = 0; 25; 50; 75$ und 100 mm. In den Bildern für $h = 25$ und $h = 50$ mm zeigen die Wirbelstrombilder einen ringförmigen, unscharfen Bereich, der darauf zurückzuführen ist, dass das Textil in diesem Bereich zwischen Stempel und Niederhaltern gespannt ist, aber an keinen Körper anliegt. Die Fäden sind dadurch weniger kompaktiert und die lokale Leitfähigkeit stark verringert, was die Faserorientierungsmessung aber nicht einschränkte.

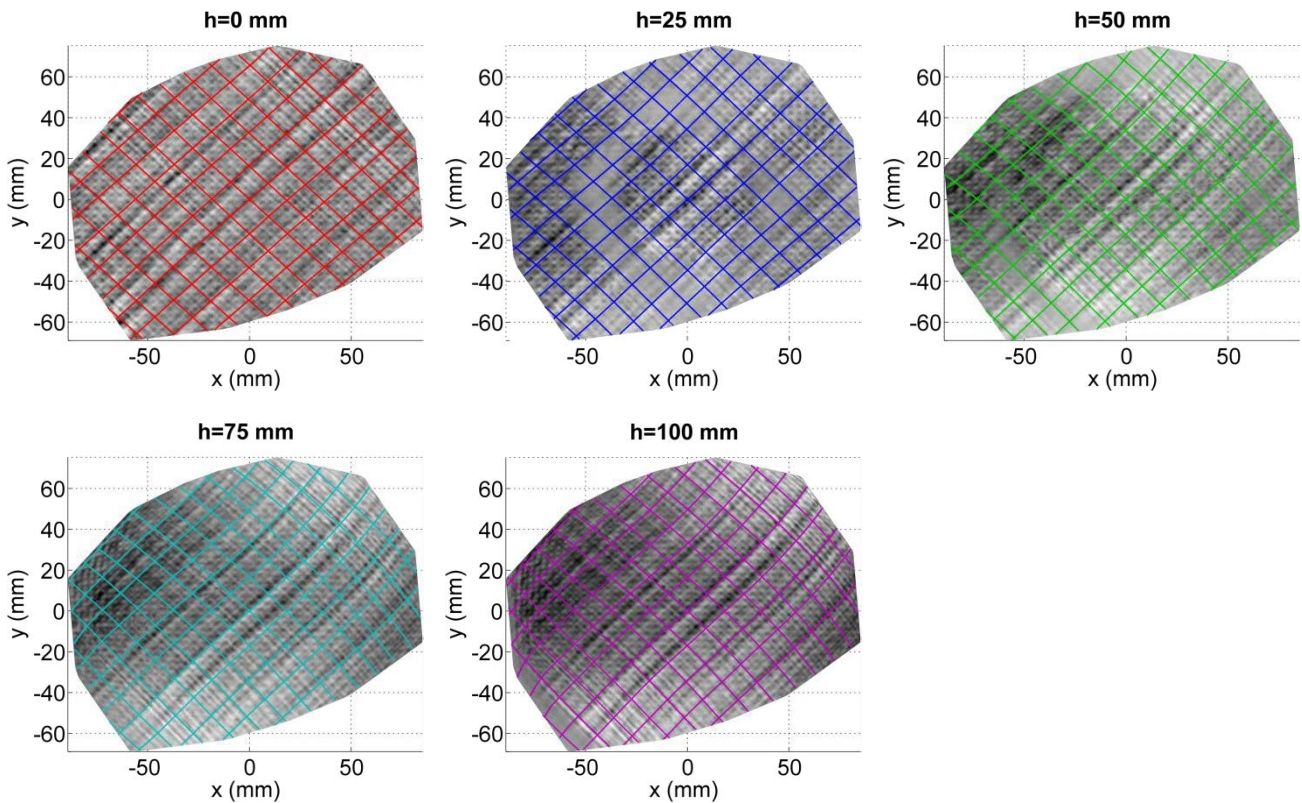


Abb. 7-17: Fadenverläufe auf den verschiedenen Drapierstufen ($\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege)

Deutlich ist, dass sich die für die $\pm 45^\circ$ -Gelege charakteristische „S“-Form der Fäden zwischen den Drapierstufen 50 und 75 mm ausbildet. Vergleicht man die Fadenverläufe für die einzelnen Stufen in einer Draufsicht (Abb. 7-18), so ist erkennbar, dass sich die einzelnen Fäden bis zur Drapierstufe $h = 50$ mm annähernd gestreckt verlaufen, bevor sich anschließend die Krümmung ausbildet. Die Faserorientierung stellt sich somit vorrangig im letzten Viertel des Drapierprozesses ein. Maßnahmen zur robusteren Prozessführung (z.B. verringerte Prozessgeschwindigkeit, thermische Aktivierung, zusätzliche Niederhalterkräfte) sollten entsprechend auf dieses letzte Viertel konzentriert werden.

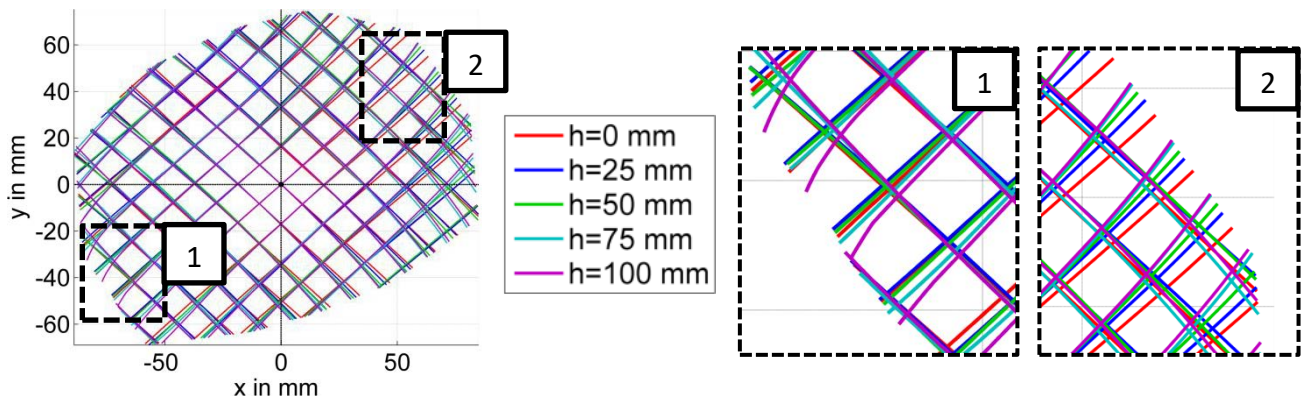


Abb. 7-18: Überlagerung der Fadenverläufe der fünf Drapierstufen (+/-45°-Bidirektionalgelege)

Im nächsten Schritt wurden aus den gemessenen Faserorientierungen die Scherwinkel berechnet. Hierzu wurden für das 0°/90°- und das +/-45°-Gelege vier Wiederholungen des Drapierprozesses durchgeführt. Für jeden Versuch wurde ein neuer Textilschnitt verwendet. Abb. 7-19 stellt die gemessenen Scherwinkel für das 0°/90°-Biaxialgelege bei verschiedenen Drapierstufen dar. Mehrere Ergebnisse sind hieraus festzuhalten:

1. Bei $h = 0$ mm besitzen die Gelege keine oder nur sehr geringe und lokale Abweichungen von der 0°/90°-Faserorientierung, erkennbar an den großflächigen blauen Bereichen (Scherwinkel $< 5^\circ$). Es ist somit keine signifikante Vorscherung durch das manuelle Zuschneiden und Auflegen vorhanden.
2. Bei allen vier Wiederholungen bildet sich zwar die gleiche *qualitative* Verteilung der Scherwinkel aus (annähernd symmetrische Verteilung der stark verscherten Bereiche entlang der $\pm 45^\circ$ -Achsen), die aber z.T. erhebliche *quantitative* Abweichungen besitzt: so zeigen z.B. Wiederholungen 1 und 3 einen Scherwinkel $> 5^\circ$ im Zentrum der Halbkugel, der bei den anderen beiden Wiederholungen nicht erscheint.

Es zeigt sich somit eine signifikante Varianz des Scherwinkels nach der Verformung, die nur auf eine Varianz des Scherverhaltens des Textils zurückgeführt werden kann.

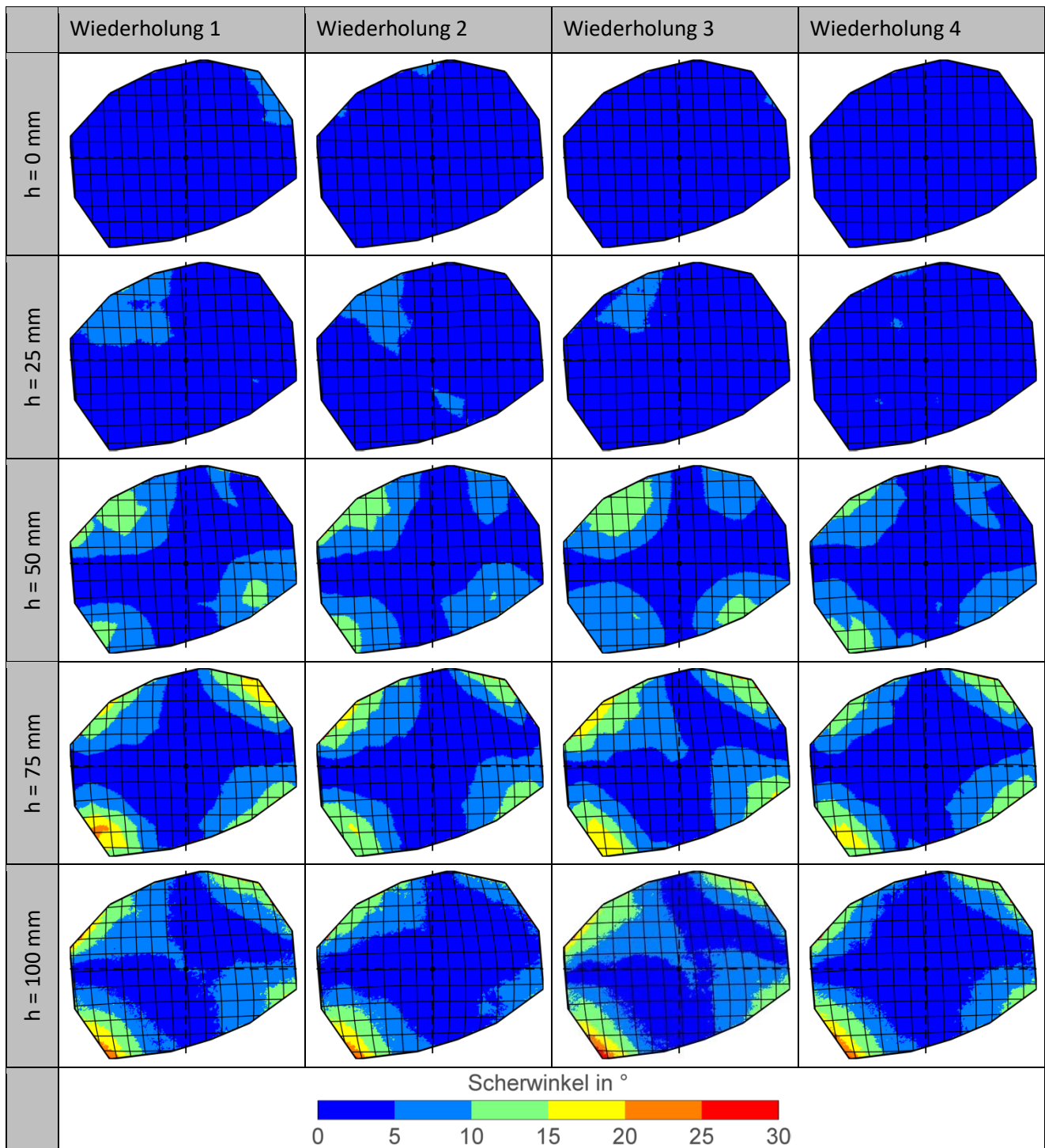


Abb. 7-19: Gemessene Scherwinkel auf den verschiedenen Drapierstufen, Biaxialgelege $0^\circ/90^\circ$, vier Wiederholungen

Abb. 7-20 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der finalen Scherwinkelverteilung ($h = 100$ mm). Zur Orientierung sind die rekonstruierten Fadenverläufe von der jeweils ersten Wiederholung eingezeichnet. Von Interesse ist neben den Mittelwerten der Scherwinkel die in der zweiten Zeile dargestellte Standardabweichung.

Während die Standardabweichung für das $0^\circ/90^\circ$ -Biaxialgelege gering ist ($< 3^\circ$), zeigt das Bidirektionalgelege Standardabweichung von stellenweise 3 - 5° . Diese liegen deutlich über der in Kapitel 6 ermittelten Messunsicherheit für 2-lagige Halbzeuge ($U < 1^\circ$ für 95 %-Vertrauensniveau, Abb. 6-14,

S. 89). Bemerkenswert ist hierbei, dass die Standardabweichung nicht wie erwartet stetig von der Mitte zu den Randbereichen hin zunimmt, sondern lokale Bereiche niedriger und hoher Standardabweichung an verschiedenen Orten der Oberfläche entstehen. Die Bereiche hoher Standardabweichung sind dabei nicht identisch mit den Bereichen hoher Scherung, sondern es bilden sich für die beiden Gelegetypen charakteristische Muster aus. Für das $0^\circ/90^\circ$ -Gelege verläuft die Achse der höchsten Standardabweichung von oben links nach unten rechts, für das $\pm 45^\circ$ -Gelege horizontal. Dieses Verhalten ist aus der bisherigen Literatur nicht bekannt und bietet Raum für weitere Untersuchungen.

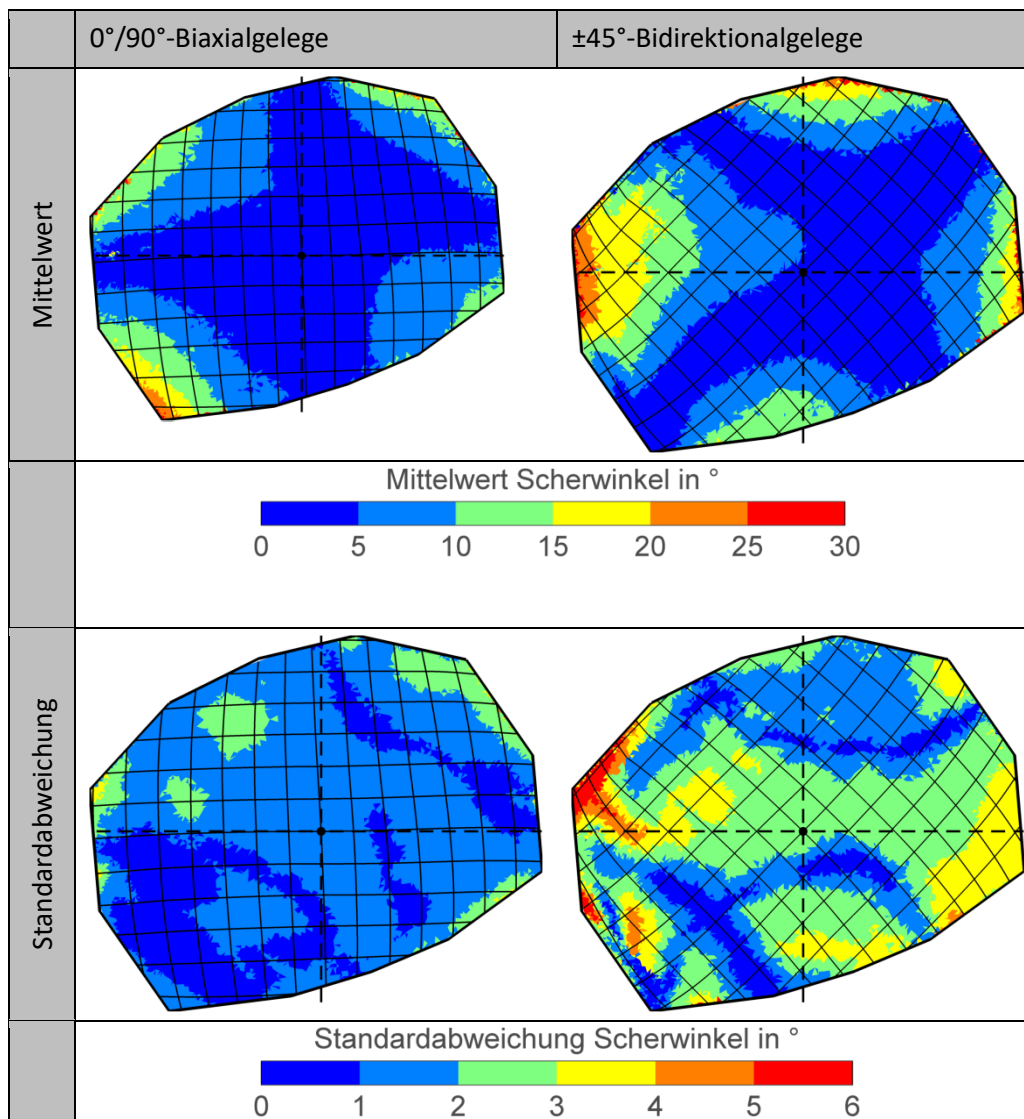


Abb. 7-20: Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Scherwinkel bei $h = 100$ mm

7.3.3 Verformungsverhalten vierlagiger Halbzeuge

Abb. 7-21 zeigt das Drapierergebnis und die aus der Messung rekonstruierten Fadenverläufe für das $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ -Quadraxialgelege. Aufgrund der Verbindung der vier Lagen durch den Nähfaden ist die Verschiebung der Fäden gegeneinander stark eingeschränkt, so dass es schon bei

geringen Verscherungen zur Faltenbildung kommt (linke und rechte Seite der Halbkugel). Im Wirbelstrombild erscheinen die Falten aufgrund der lokal erhöhten Kompaktierung als helle Bereiche hoher Leitfähigkeit, umgeben von dunkleren Bereichen, in denen der Sensor aufgrund der Falten von der Oberfläche abhebt.

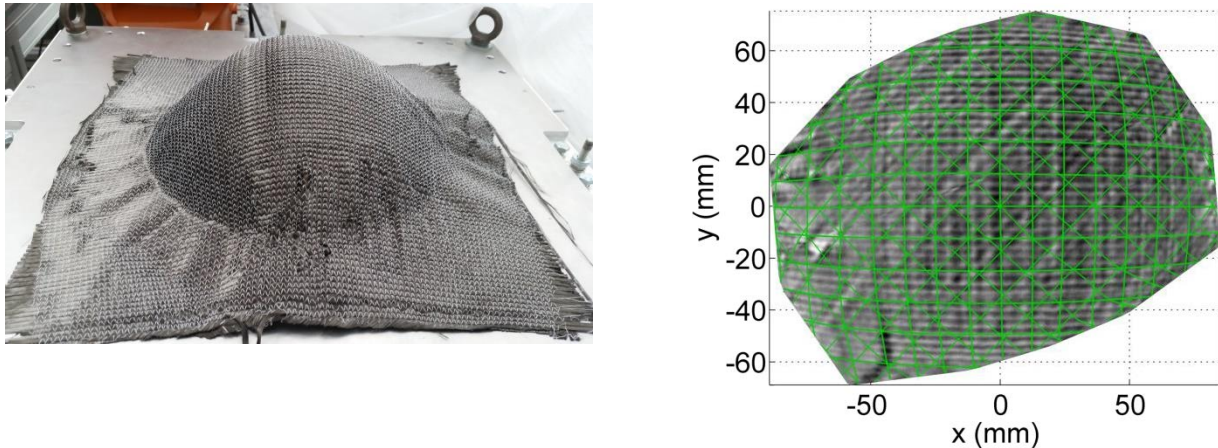


Abb. 7-21: Drapierergebnis und rekonstruierte Fadenverläufe beim Quadraxialgelege

Abb. 7-22 zeigt die finalen Scherwinkel bei $h = 100$ mm für die beiden Lagenpaare $0^\circ/90^\circ$ (1./3. Lage des Quadraxialgeleges) und $+45^\circ/-45^\circ$ (2./4. Lage). Erkennbar ist, dass sich die Scherung vor allem in den $\pm 45^\circ$ -Lagen konzentriert, wozu zum einen die bereits bemerkte Faltenbildung an der linken und rechten Seite des Halbzeugs beiträgt: durch die Ausbildung einer Falte wird stark gestauchtes Fadenmaterial in den Raum gebogen, so dass sich die Scherung lokal *reduzieren* kann. Dies gilt jedoch nur für die Lagen, die parallel bzw. senkrecht zur ausgebildeten Falte verlaufen (90° und 0°) und diese überspannen. Die diagonal zur Falte verlaufenden Fäden werden lokal *stärker* verschert, da die Fäden in Richtung der Falte gebogen werden. Zum anderen besitzen die Fäden im Gelege eine unterschiedliche Verschiebbarkeit: da die 0° - und 90° -Fäden zwischen den Maschenstäbchen bzw. Maschenreihen des Nähfadens verlaufen, sind sie leichter verschiebbar als die $\pm 45^\circ$ -Fäden, so dass für erstere ein weiterer Verformungsmechanismus zur Verfügung steht, der die Scherung limitiert.

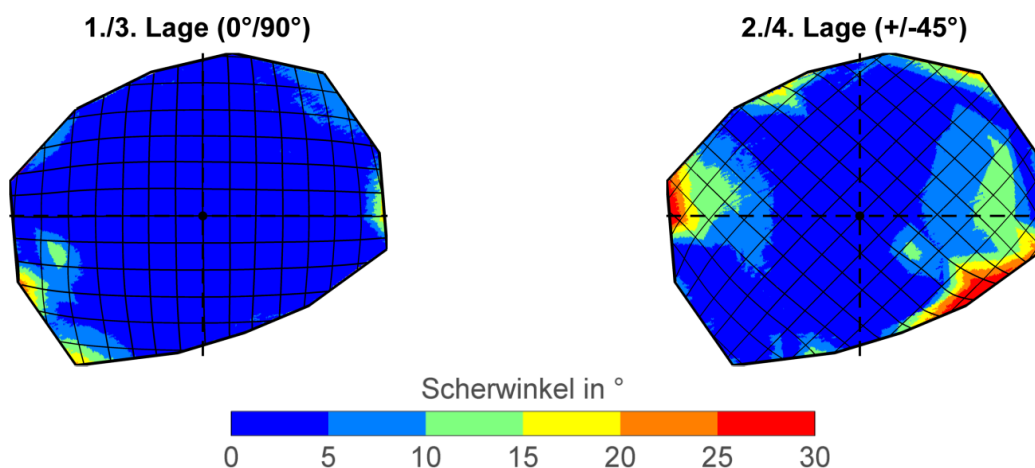


Abb. 7-22: Gemessene Scherwinkel beim Quadraxialgelege

Ein Vergleich zwischen den Scherwinkeln im vier- und zweilagigen Halbzeug ist möglich, indem die $0^\circ/90^\circ$ -Lagen des Quadraxialgeleges mit dem Biaxialgelege des vorherigen Abschnitts, und die

$\pm 45^\circ$ -Lagen mit dem Bidirektionalgelege verglichen werden. Hierfür wurde jeweils die erste Wiederholung des Biaxial- bzw. Bidirektionalgeleges aus dem vorherigen Abschnitt herangezogen. Der Vergleich mit den Scherwinkeln im Quadraxialgelege ist in Abb. 7-23 dargestellt. Die Farbkarte gibt die Differenz des Scherwinkels als *Scherwinkel des Quadraxialgeleges minus Scherwinkel des zweilagigen Geleges* an. Rote Bereiche bedeuten somit *höhere* Scherwinkel im Quadraxialgelege, blaue Bereiche niedrigere. Die Fadenverläufe der Quadraxialgelegelagen sind schwarz, die des Biaxialgeleges bzw. des Bidirektionalgeleges grau eingetragen.

Die Ergebnisse bestätigen, dass das Quadraxialgelege bei der Anpassung an die 3D-Geometrie deutlich geringere Scherwinkel ausbildet als ein vergleichbares zweilagiges Halbzeug, was geometrisch nur durch die beschriebene Faltenbildung möglich ist. Zu bemerken ist, dass die $\pm 45^\circ$ -Lage des Quadraxialgeleges lokal auch höhere Scherwinkel aufweist als das $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege: hierbei handelt es sich um die Bereiche, aus denen zusätzliches Material für die Faltenbildung herangezogen wird.

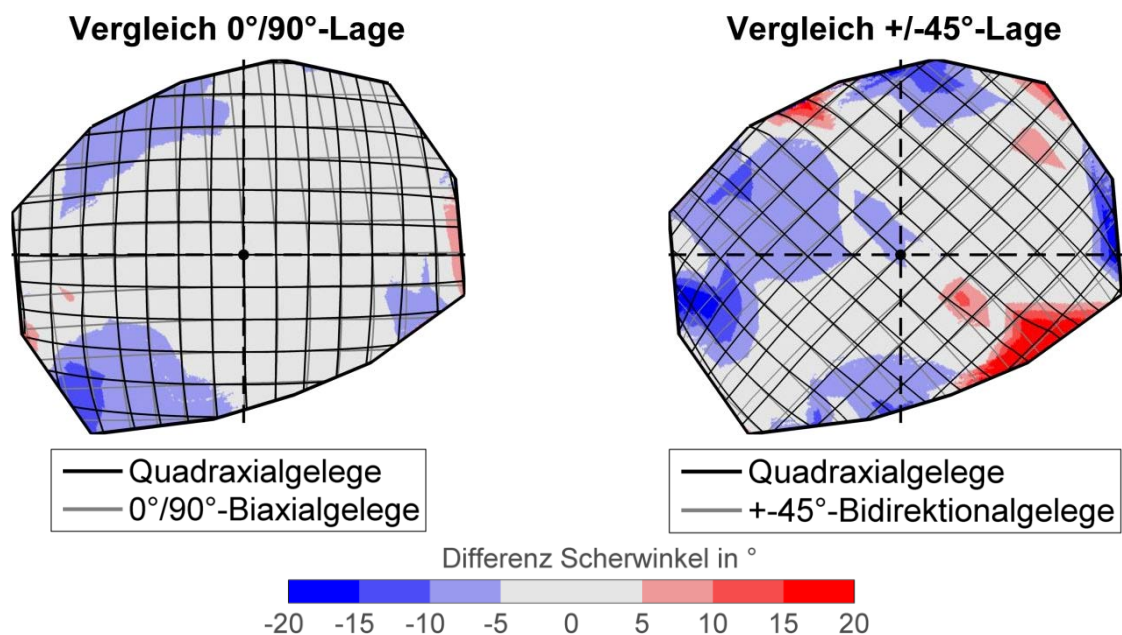


Abb. 7-23: Differenz Scherwinkel Quadraxial- minus Biaxial- bzw. Bidirektionalgelege

7.3.4 Verformungsverhalten einlagiger Halbzeuge bei ein- und zweilagiger Drapierung

Abschließend werden Untersuchungen bei der ein- und zweilagigen Drapierung des UD-Geleges vorgestellt. Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der gemeinsamen Drapierung mehrerer Lagen festzustellen. Anders als bei den vorausgehenden Versuchen wird hierzu nicht der Scher-, sondern der Fadenwinkel ausgewertet.

Zwei Versuche werden verglichen. Beim ersten Versuch wird eine einzelne UD-Gelegelage in 90° -Richtung aufgelegt und umgeformt (Abb. 7-24 links). Beim zweiten Versuch wurden eine Gelegelage in 0° -Richtung und eine Gelegelage in 90° -Richtung zu einem Stapel $[90/0]$ gestapelt (Abb. 7-24 rechts). Die 90° -Lage liegt somit wieder obenauf.

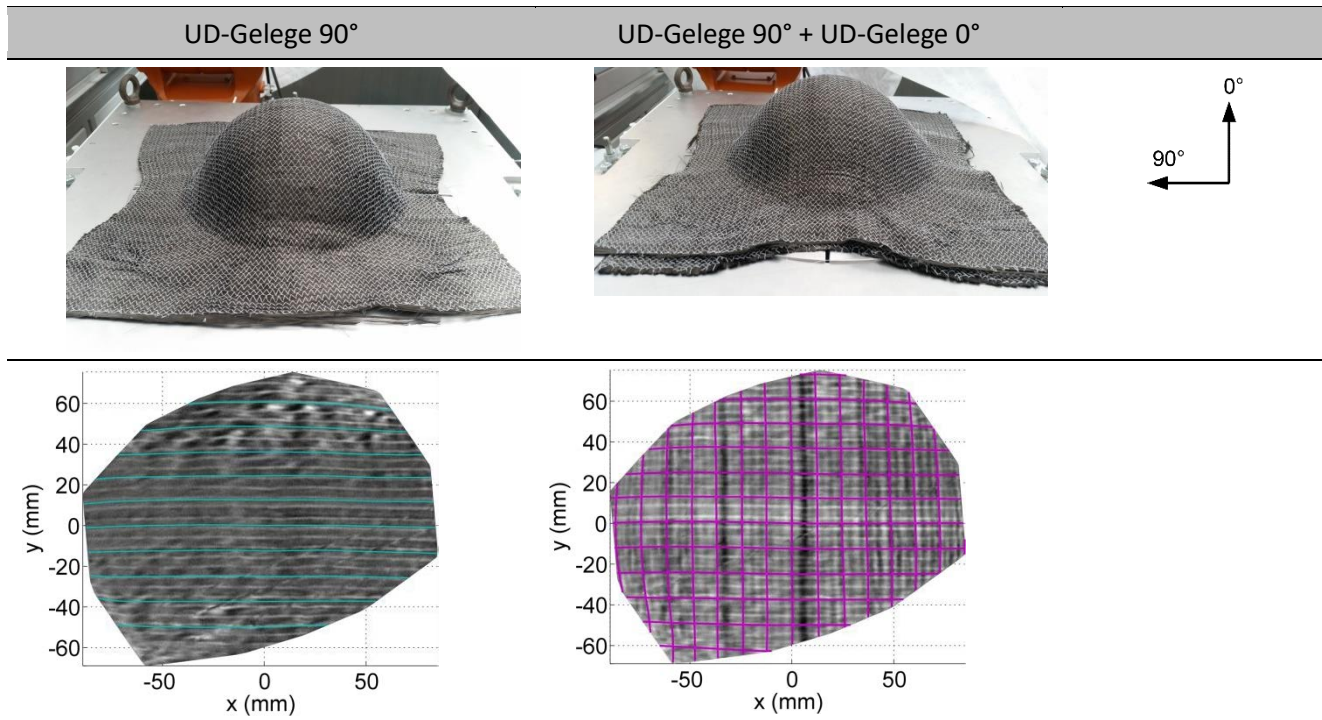


Abb. 7-24: Gemessene Fadenverläufe für ein- und zweilagig umgeformte UD-Gelege

Der Drapierprozess wurde bei den Stempelaustriebshöhen $h = 0$ mm (vor Beginn der Verformung), sowie $h = 25$; 50 ; 75 und 100 mm angehalten und eine Wirbelstrommessung durchgeführt. Abb. 7-25 zeigt die Fadenverläufe beider Versuche auf den Höhen $h = 0$, 50 und 100 mm. Die einzeln umgeformte 90° -Lage ist rot dargestellt, der gemeinsam umgeformte $0^\circ/90^\circ$ -Lagenstapel blau.

Während die Unterschiede im Fadenverlauf bei einer Drapierhöhe von $h = 0$ mm vernachlässigbar sind, sind ab $h = 50$ mm in den Randbereichen Differenzen im Fadenwinkel erkennbar. Für den Versuch mit gemeinsamer Umformung zweier Lagen zeigt sich eine *geringere Krümmung* der Fäden in den Randbereichen. Als Erklärung kann angesehen werden, dass bei der zweilagigen Umformung die untergelegte 0° -Lage die Reibung für die oberliegende 90° -Lage erhöht, was die Verformung gegenüber einer einlagigen Umformung behindert.

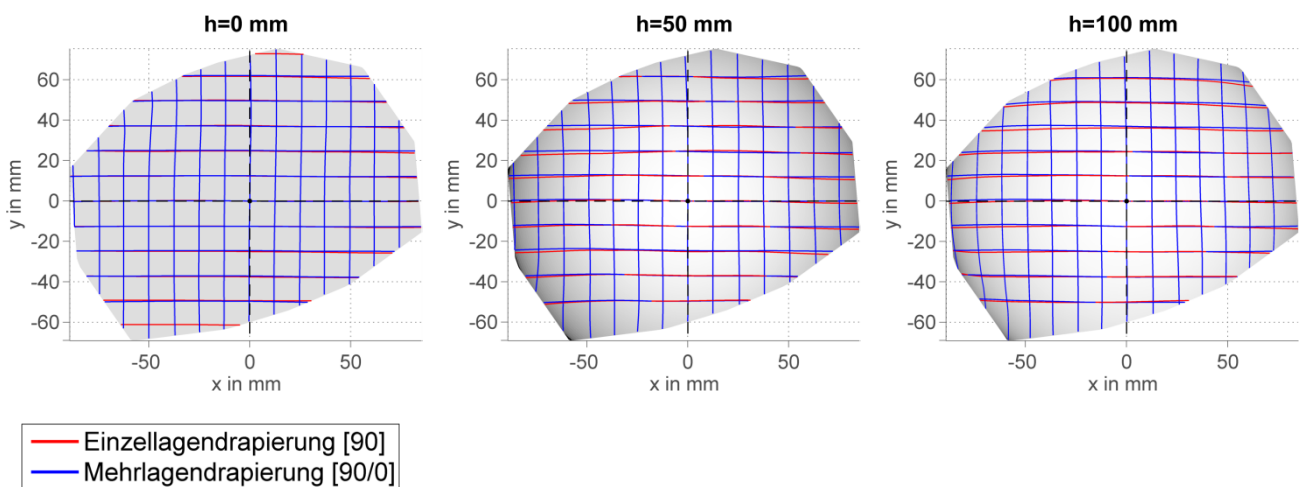


Abb. 7-25: Vergleich Fadenverläufe der UD-Gelege bei ein- und zweilagige Drapierung

Für die *Quantifizierung* der Winkelabweichungen werden zwei Fälle betrachtet. Da die einzeln drapierte UD-Lage in 90° -Richtung orientiert war, entsprach sie der oberen der beiden UD-Lagen im zweilagigen Aufbau. Zuerst werden daher die Faserrichtungen der einzelnen UD-Lage mit den Faserrichtungen der *oberen* Lage verglichen (Abb. 7-26 links). Anschließend werden die Messergebnisse der Einzellagendrapierung um 90° gedreht, so dass sie mit der unteren Lage des zweilagigen Aufbaus (0° -Richtung) vergleichbar sind (Abb. 7-26 Mitte).

Die Farbkarte der folgenden Abbildung gibt die Differenz der Fadenwinkel in der Form *Fadenwinkel bei Mehrlagendrapierung minus Fadenwinkel bei Einzellagendrapierung* an. Eine *positive* Differenz (rote Färbung) zeigt Bereiche an, in denen der Fadenwinkel bei der Mehrlagendrapierung *größer* ist, eine negative Differenz (blaue Färbung) Bereiche, in denen bei Mehrlagendrapierung ein kleiner Fadenwinkel gemessen wurde. Ein größerer Fadenwinkel bedeutet gemäß der verwendeten Winkeldefinition, dass die Fäden gegen den Uhrzeigersinn gedreht sind (Abb. 7-26 rechts).

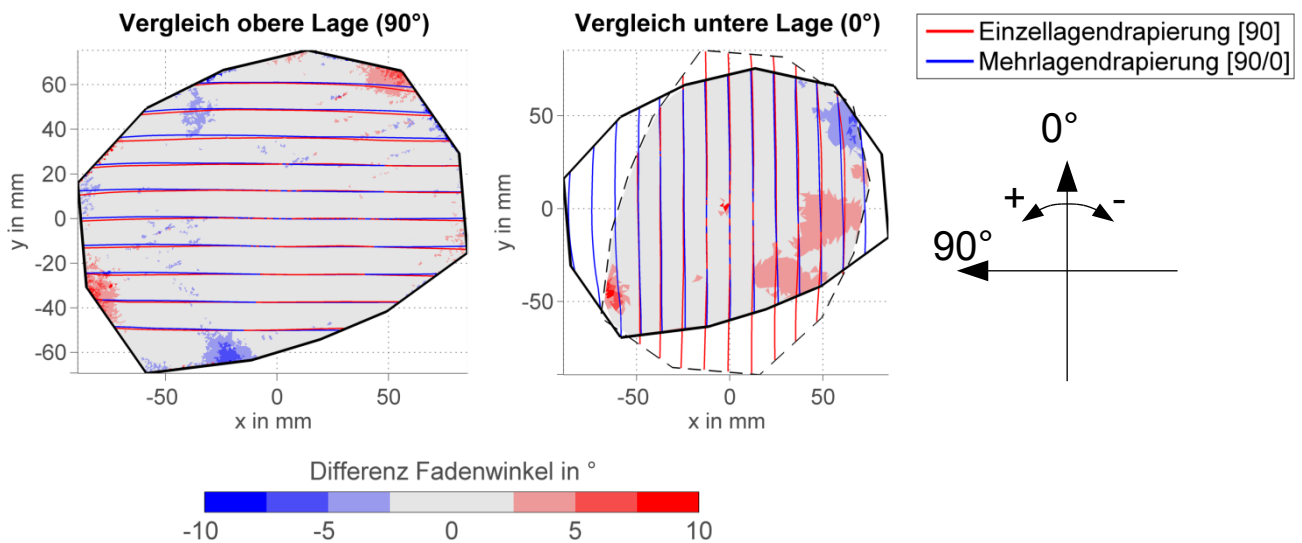


Abb. 7-26: Fadenwinkel bei mehrlagiger minus Fadenwinkel bei einlagiger Drapierung

Der Vergleich anhand der Farbkarte zeigt, dass lokale Abweichungen von $> 2,5^\circ$ in den höher drapierten Bereichen am Rand des Messauschnitts vorliegen. In kleineren Bereichen wurden auch Abweichungen von $> 7,5^\circ$ ermittelt. Ein Vergleich der Differenzen zwischen Einzellage und oberer bzw. unterer Lage zeigt hierbei, dass die Winkelabweichung gegenüber der Einzellagendrapierung für die *untenliegende Lage* des zweilagigen Aufbaus (Abb. 7-26 Mitte) größer ist.

Es konnte somit ein signifikanter Einfluss der Mehrlagigkeit auf die sich ausbildenden Fadenverläufe festgestellt werden. Hierbei ist zu bemerken, dass ein deutlicher Einfluss der Mehrlagendrapierung auf die Fadenverläufe schon bei einer Geometrie mit geringen Krümmungen und für einlagige, im Relativwinkel 90° positionierte Halbzeuge beobachtet werden kann. Für stärker gekrümmte Geometrien, höhere Lagenzahlen und geringere Relativwinkel (die zu einem Verhaken der Lagen führen) ist somit ein noch stärkerer Einfluss der Mehrlagigkeit auf den Umformprozess zu erwarten.

7.3.5 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen des Drapierprozesses

Ziel dieser Untersuchung war die Validierung der 3D-Faserorientierungsmessung an drapierten Halbzeugen (Preforms). Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass durch die Wirbelstromprüfung mit Faserorientierungsmessung grundlegend neue Erkenntnisse zum Verständnis des Verformungsverhaltens textiler Halbzeuge gewonnen werden können. Für folgende Arbeiten stellt sich die Aufgabe, dieses Prozessverständnis in eine gezielte Prozesssteuerung zur Einstellung definierter Fadenwinkel umzusetzen. Tabelle 7-7 fasst die in diesem Abschnitt festgestellten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 7-7: Erkenntnisse aus der Analyse des mehrlagigen Drapierprozesses

Halbzeug	Erkenntnis	Abgeleitete Empfehlung
Einlagige Halbzeuge	Zusätzliche Lage führt zu geringerer Scherverformung	Sequentielle Umformung, Lagenentkopplung (z.B. durch aktive Zwischenbleche [25])
	Stärkere Wirkung der Mehrlagigkeit auf untere Lage	Bei Aufbau des Lagenstapels berücksichtigen, sofern möglich
Zweilagige Halbzeuge	Größte Reorientierung der Fäden auf letzten 25 % des Verformungsweges	Für erhöhte Prozessrobustheit und verringerte Fehlstellenbildung Prozessgeschwindigkeit zum Ende hin verringern
	Asymmetrisches Scherverhalten der Bidirektionalgelege, deutlich größere Streuung der resultierenden Fadenwinkel	Sofern möglich, für einfachere Prozesssteuerung 0°/90°-Biaxialgelege verwenden
	Ungleichmäßige Verteilung der Streuung	Durch zusätzliche Maßnahmen (Anpassung der Stempelreibung, asymmetrische Niederhaltekräfte) gegensteuern, sofern notwendig
Vierlagige Halbzeuge	Einzellagen zeigen paarweise deutlich geringere Scherverformung, frühe Faltenbildung	Aufgrund der eingeschränkten Verformbarkeit für komplexe Geometrien nicht geeignet

7.4 Zusammenfassung der 3D-Verfahrenserprobung

In diesem Kapitel konnte anhand von zwei Anwendungsfällen nachgewiesen werden, dass das entwickelte Verfahren in der Lage ist, die Faserorientierung in mehrlagigen, dreidimensionalen CFK und Preforms zerstörungsfrei zu messen. Verschiedene Bauteile und Preforms können hinsichtlich der erzeugten Faserorientierung in den einzelnen Lagen verglichen werden, woraus Rückschlüsse auf die Konformität und Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses abgeleitet werden können. Der Einfluss des textilen Halbzeugs, der Stapelung mehrerer Halbzeuge sowie der Prozessparameter des Umformprozesses hinsichtlich der sich einstellenden Faserorientierungen kann für jede Lage zerstörungsfrei geprüft werden. Durch Rekonstruktion der Fadenverläufe und Farbdarstellungen können Differenzen im Fadenverlauf intuitiv visualisiert werden.

Die Forschungsfrage dieser Arbeit: „*kann die Wirbelstromprüfung die Faserorientierung in großen, dreidimensionalen, mehrlagigen und komplex gekrümmten Bauteilen mit der geforderten Messgenauigkeit bestimmen?*“, ist somit mit „Ja“ zu beantworten:

- Wie in Kapitel 6 gezeigt, liegen die erweiterten Messunsicherheiten (Erweiterungsfaktor $k = 2$, d.h., 95 %-Vertrauensintervall) für vierlagige Stapel, abhängig vom Gelegetyp, bei $< 1^\circ$ (Biaxialgelege) bzw. $< 1,2^\circ$ (UD-Gelege). Die an die Faserorientierungsmessung gestellten Anforderung einer erweiterten Messunsicherheit $< 1^\circ$ kann somit für Biaxialgelege erfüllt werden, für UD-Gelege empfiehlt sich nach VDI/VDE 2600-1 [61] eine geringe Anpassung des Eignungsgrenzwerts um 20 %.
- Wie in diesem Kapitel dargestellt sind sowohl kleine Radien ($R \leq 50$ mm) prüfbar (Federdom), als auch große Bauteile. Je nach Prüfkörpergeometrie und Arbeitsradius des verwendeten Industrieroboters muss die Messung hierbei in mehreren Teilschritten erfolgen, was aber keine Einschränkung des Messverfahrens selbst darstellt.

Auf dieser Grundlage erfolgt im abschließenden nächsten Kapitel die Integration der Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess, indem die gemessenen Faserorientierungen für die Validierung von Drapiersimulationen und für die Parametrierung von FE-Struktursimulationen bereitgestellt werden.

8 Integration der Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess

8.1 Integration mit Drapiersimulationen

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung der Faserorientierungsmessung als Untersuchungs-, Validierungs- und Parametrisierungswerkzeug für den CFK-Entwicklungsprozess.

Im Folgenden wird exemplarisch für eine Drapiersimulation mit ANSYS LS-DYNA (Ansys Inc.) gezeigt, wie die entwickelte Faserorientierungsmessung eine direkte Validierung der simulierten Faserrichtungen und Scherwinkel für ein mehrlagiges CFK-Bauteil erlaubt.

Als Beispielbauteil wird das in Abschnitt 7.2 untersuchte vierlagige CFK-Bauteil „Federdom“ mit einem Lagenaufbau $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ (Variante A) betrachtet. Die Herstellung erfolgte mit zwei Gelegehalbzügen, einem $0^\circ/90^\circ$ -Biaxialgelege für die unteren beiden Lagen, und einem $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege für die oberen beiden.

Als Materialmodell für die Drapiersimulation wird ein am ITM entwickeltes Kontinuumsmodell (Makro-Modell) mit entkoppeltem Scher-, Zug- und Biegeverhalten verwendet (siehe hierzu Döbrich 2013 [220] und Hübner 2014 [221]). Das spezifische Verformungsverhalten des Textils wird hierbei durch seine Scherwinkel-Scherkraft-Kurve definiert, die als Modellparameter experimentell zu bestimmen ist. Ebenso werden die Biegesteifigkeit und äußere Reib- und Niederhalterkräfte berücksichtigt.

Für die Parametrierung des Materialmodells werden die Scherwinkel-Scherkraft-Kurven für die beiden zur Herstellung verwendeten Gelege durch einen Scherrahmenversuch ermittelt. Zu beachten ist, dass das $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege zwei verschiedene Scherrichtungen besitzt, da der Maschenfaden hier diagonal zu den Fadensystemen verläuft. Bei einer Scherung in 0° -Richtung (Abb. 8-1 rechts) wird der Maschenfaden gedehnt, wozu zusätzliche Verformungskräfte aufgebracht werden müssen, die in einer höheren Scherkraft resultieren. Das Resultat ist ein asymmetrisches Scherverhalten mit einer Vorzugsscherrichtung (90°), die bei gleichem Scherwinkel deutlich geringere Scherkräfte erfordert (Abb. 8-1 links).

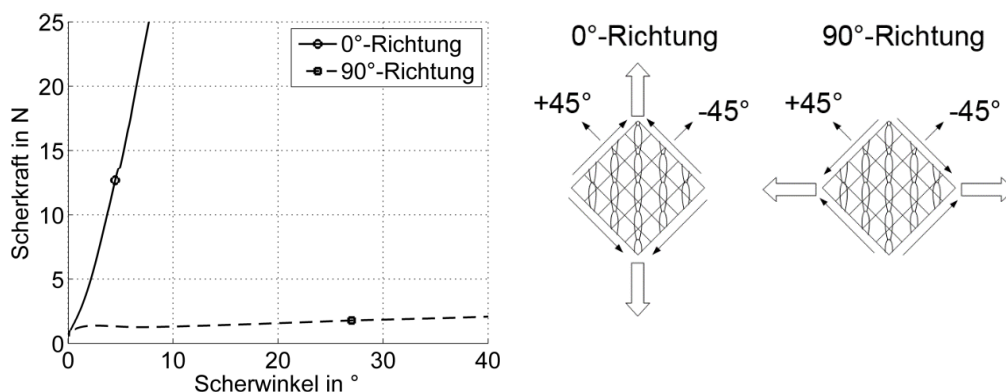


Abb. 8-1: Scherkurven $\pm 45^\circ$ -Bidirektionalgelege

Für das $0^\circ/90^\circ$ -Gelege (Abb. 8-2) sind beide Scherrichtungen ($+45^\circ$ und -45°) identisch, da der Maschenfaden in Richtung der 0° -Verstärkungsfäden verläuft.

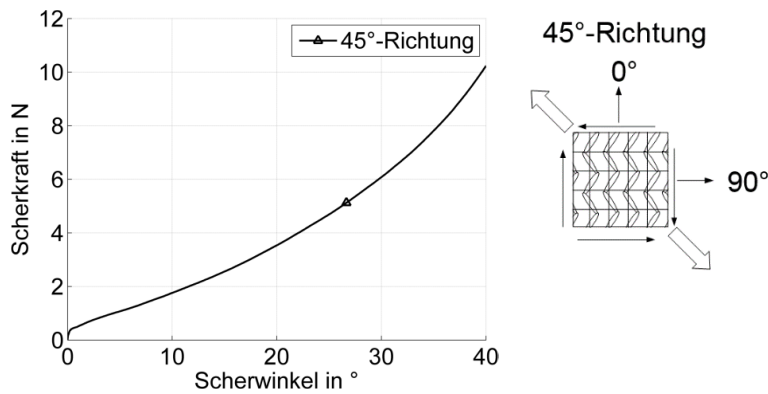


Abb. 8-2: Schercurve $0^\circ/90^\circ$ -Biaxialgelege

Das Materialmodell wird mit den experimentell ermittelten Scherwinkel-Scherkraft-Kurven parametrisiert und für beide Halbzeuge werden Drapiersimulationen. Da die Lagen bei der Bauteilherstellung einzeln aufgelegt und drapiert wurden, wird die Verformung der beiden Halbzeuge einzeln simuliert. Abb. 8-3 zeigt die simulierten Scherwinkel für die beiden Lagen.³¹

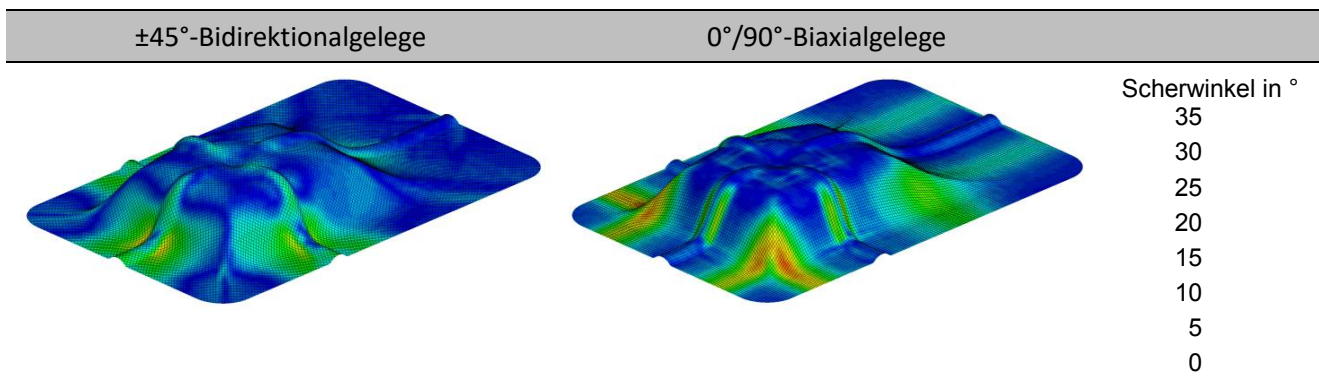


Abb. 8-3: Simulierte Scherwinkel (ANSYS LS-DYNA)

Für die Validierung der simulierten Fadenverläufe und Scherwinkel anhand der gemessenen Ist-Fadenwinkel wurde eine Matlab-Schnittstelle programmiert, die aus der Ergebnisdatei der FE-Simulation die lokale Orientierung der einzelnen Lagen ausliest. Hierfür wird ausgenutzt, dass die Kanten des verformten FE-Netzes die Faserorientierung der beiden Fadensysteme anzeigen. Die ausgelesenen lokalen Faserorientierungen werden anschließend im selben Format wie die Ergebnisse der Faserorientierungsmessung gespeichert, so dass alle in Kapitel 5 entwickelten Darstellungs- und Vergleichsskripte auf die Simulationsdaten anwendbar sind.

Abb. 8-4 zeigt das Einlesen für die -45° -Lage. Schwarz unterlegt ist das verformte FE-Netz, wobei die Rechteckelemente für die 3D-Darstellung in Dreiecksflächen geteilt wurden. Die daraus berechneten Fadenwinkel sind als Farbkarte unterlegt. Zur Prüfung der korrekten Abbildung der Simulationsdaten wurden aus den simulierten Faserrichtungen der Oberfläche die Fadenverläufe einzelner Referenzfäden rekonstruiert und als rote Linien eingezeichnet sind. Diese folgen den Netzkanten exakt.

³¹ Die im folgenden dargestellten Drapiersimulationen wurden von meinem Kollegen Matthias Hübner durchgeführt, ebenso die Struktursimulation im nächsten Abschnitt. Ich danke für die freundliche Unterstützung.

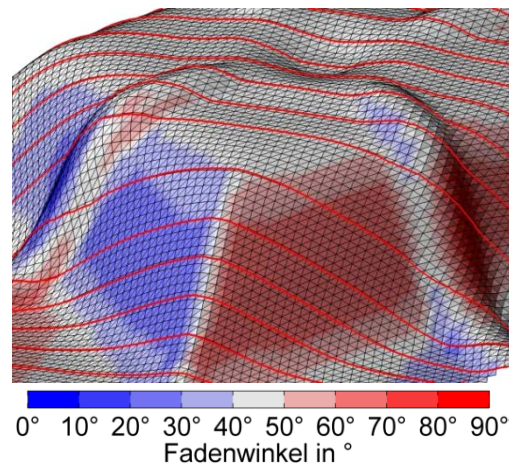


Abb. 8-4: Aus FE-Netz rekonstruierte Fadenverläufe

Abb. 8-5 vergleicht die mit der FE-Drapiersimulation berechneten Fadenverläufe beider Halbzeuge mit den gemessenen Fadenverläufen für das Bauteil A-2.³² Der Vergleich zeigt Abweichungen in mehreren Bereichen:

- Die $\pm 45^\circ$ -Lage ist über die gesamte Oberfläche *stärker geschert* als von der Simulation berechnet, erkennbar daran, dass die blauen Rauten (Messung) in vertikaler Richtung überall spitzer ausgeformt sind als die roten (Simulation). Dies kann entweder darauf hindeuten, dass das Gelege eine Vorscherung besitzt, die bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde, oder dass die Scherverformung von der Simulation unterschätzt wird. Betrachtet man die Fadenverläufe auf den Seitenflächen, so zeigt sich tatsächlich nicht nur ein konstanter Öffnungswinkel zwischen den roten und blauen Referenzfäden, der auf eine konstante Scherwinkelabweichung hindeuten würde, sondern eine Vergrößerung des Öffnungswinkels zu den Rändern der Oberfläche hin, was eine Unterschätzung der Scherverformung anzeigt. Ein möglicher Grund hierfür ist das manuelle Glattstreichen der Lagen beim Handdrapieren, wodurch zusätzliche Kräfte eingetragen wurden, die durch die Simulation nicht abgebildet werden.
- Bei der $0^\circ/90^\circ$ -Lage zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung von Modell und Simulation. Die erkennbaren Abweichungen im unteren linken Bereich der Draufsicht können auf den manuellen Herstellungsprozess zurückgeführt werden, erkennbar am asymmetrischen Verlauf der gemessenen Fadenverläufe, die in der unteren Hälfte der Draufsicht deutlich weniger gekrümmt sind als in der oberen. Die simulierten roten Fadenverläufe verlaufen hingegen in der oberen und unteren Hälfte symmetrisch. Als Grund für diese Abweichung ist daher auch hier die zusätzliche Krafteinbringung und Scherverformung beim manuellen Glattstreichen zu sehen.

³² Für das Bauteil A-1 wurde in Abschnitt 7.2.5 ein Winkelversatz für eine der Lagen festgestellt, so dass für den Vergleich das Bauteil A-2 verwendet wird.

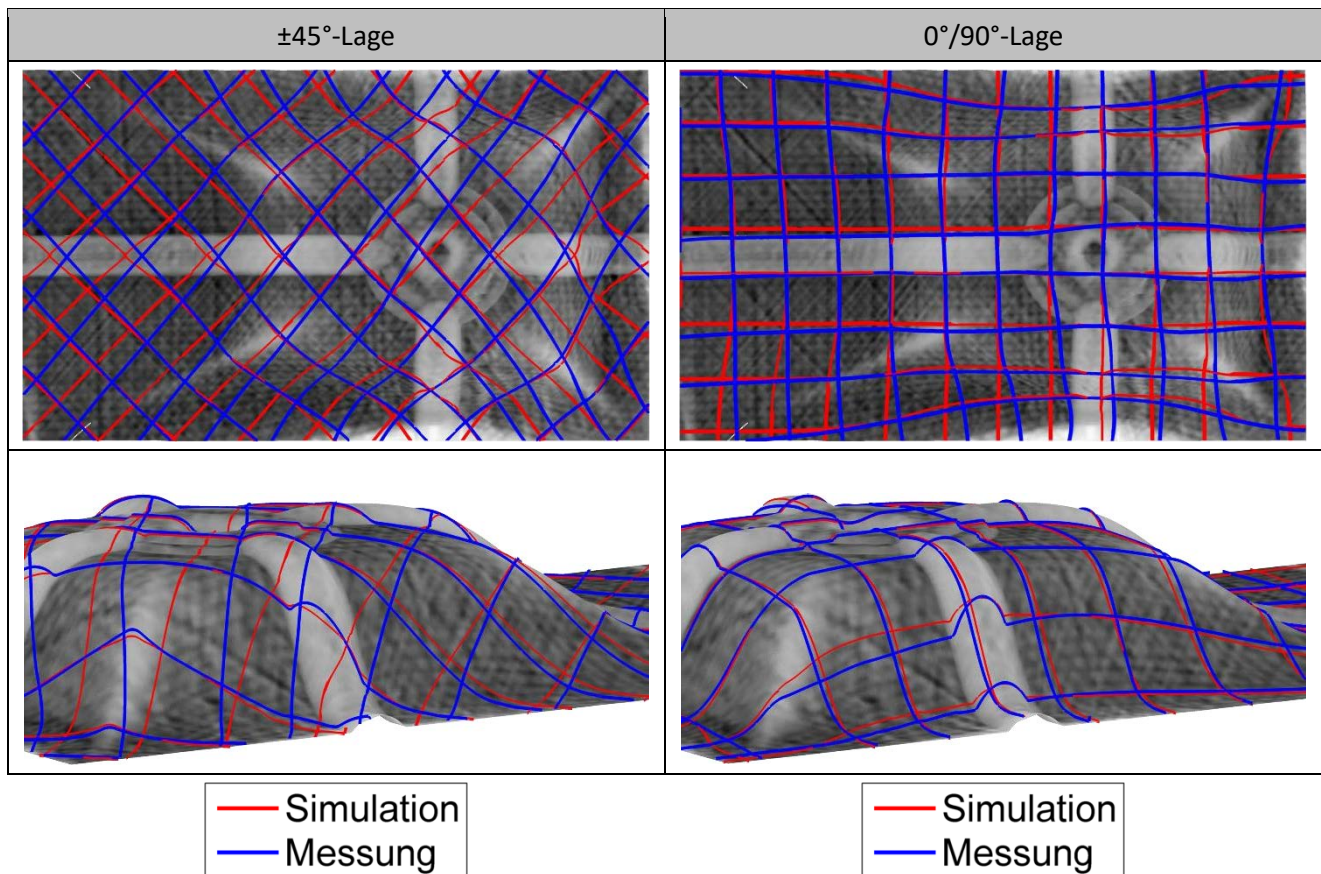


Abb. 8-5: Vergleich der Fadenverläufe FE-Simulation und Messung

Für einen quantitativen Vergleich sind in Abb. 8-6 die simulierten und berechneten Scherwinkel gezeigt. Die Scherwinkeldifferenz ist in der Form *Scherwinkel Simulation minus Scherwinkel Messung* berechnet. Eine blaue Färbung zeigt Bereiche an, in denen der *gemessene* Scherwinkel *größer* ist als der simulierte, in roten Bereichen ist der gemessene Scherwinkel hingegen kleiner. Die bereits anhand der Fadenverläufe diskutierten Scherwinkelabweichungen für die ±45°-Lagen sind hier deutlich erkennbar, sie betragen an den schrägen Seitenflächen 5-15°. Ebenso sind die bereits diskutierten Abweichungen von ca. 5° im flachen, nicht-draپیerten Bereich erkennbar. Aufgrund der deutlichen Abweichungen an den Seitenflächen empfehlen sich die bereits in Kapitel 7 angesprochenen Maßnahmen zur reproduzierbareren Bauteilherstellung (Vorgabe von Kraft und Richtung beim Glattstreichen). Für die 0°/90°-Lage hingegen zeigen sich Abweichungen vor allem im Bereich der diagonalen Kanten, wo die gemessene Scherung deutlich *kleiner* ist als die simulierte. An den Kanten tritt eine starke Krümmung der Fäden auf und in den Experimenten konnte ein lokales Gleiten der Fadenlagen (Fadenkompaktierung und Gassenbildung) festgestellt werden, das in der Makrosimulation (Betrachtung der Textilstruktur als Kontinuum) nicht abgebildet wird.

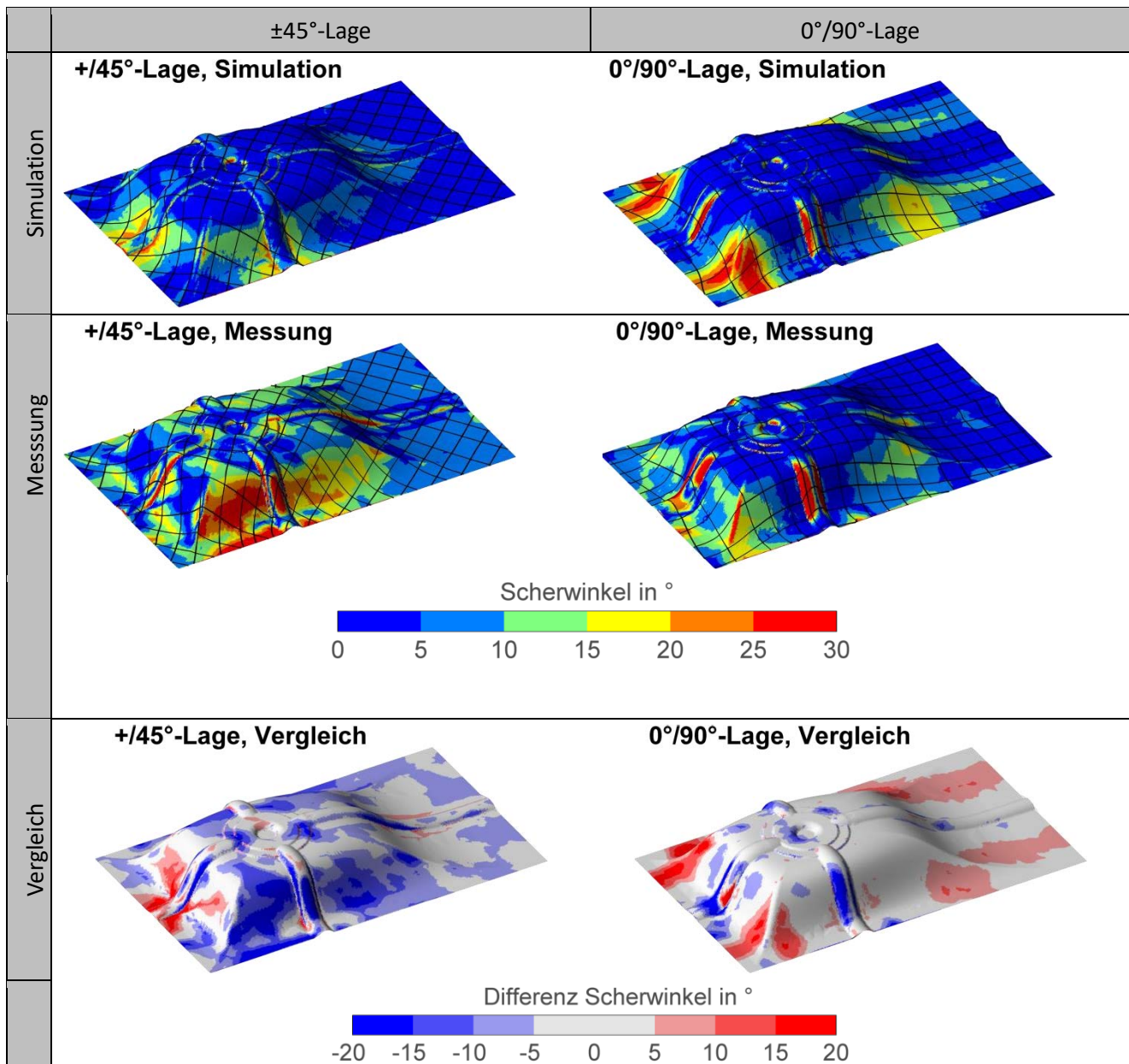


Abb. 8-6: Vergleich der simulierten und gemessenen Scherwinkel (Differenz simulierter minus gemessener Scherwinkel)

Es konnte damit gezeigt werden, dass die entwickelte Faserorientierungsmessung in der Lage ist, die für die Validierung von Drapiersimulationen benötigten Fadenverläufe und Scherwinkel in mehreren Lagen bereit zu stellen und eine quantitative Validierung durchzuführen, aus der Abweichungen identifiziert und Hinweise für Modellverbesserungen (z.B. bei lokal abweichender Scherverformung) abgeleitet werden können.

8.2 Integration mit FE-Struktursimulationen

Eine FE-Struktursimulation mit den gemessenen Faserorientierungen ermöglicht eine präzise Vorhersage der Bauteilverformung und -festigkeit und kann einen wesentlichen Beitrag leisten, die Bauteileigenschaften korrekt abzuschätzen und Überdimensionierungen zu vermeiden.

Für den Export der gemessenen Faserorientierungen in die FE-Simulation wurde eine zweite Schnittstelle geschaffen, die die Faserorientierungen lagenweise als 3D-Vektorfelder (.dvm-Dateien) abspeichert, die in der FE-Simulation als lokale Lagenorientierungen eingelesen werden können. Hierfür ist es nicht notwendig, dass die Ausgabe dem tatsächlichen Netz der FE-Simulation entspricht, da der Preprozessor die Orientierung der einzelnen finiten Elemente durch Interpolation aus den eingelesenen Richtungen ermittelt. Abb. 8-7 zeigt exemplarisch für die -45° -Lage die in ANSYS LS-DYNA eingelesenen lokalen Faserorientierungen.

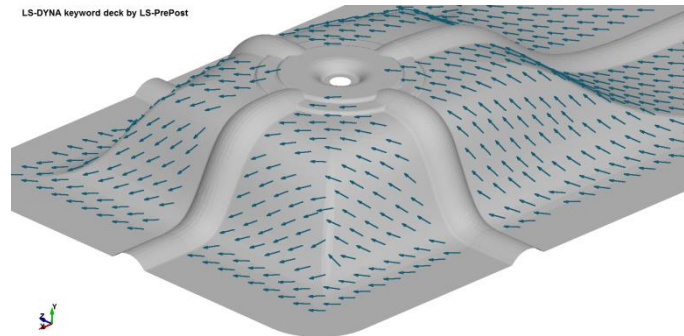


Abb. 8-7: Mapping der gemessenen Faserorientierungen in ANSYS/LS-DYNA

Mit den eingelesenen Faserorientierungen für jede Lage wird anschließend eine Struktursimulation des mehrlagigen Bauteils durchgeführt.³³ Da in den hier durchgeführten Untersuchungen die Lagenzahl auf vier beschränkt wurde, wird als exemplarischer Anwendungsfall die Verformung bei einer von unten wirkenden Druckkraft von 500 N auf den inneren Flansch (Domlager) untersucht. Abb. 8-8 zeigt die Ergebnisse für die Verformungssimulation mit den gemessenen Faserorientierungen.

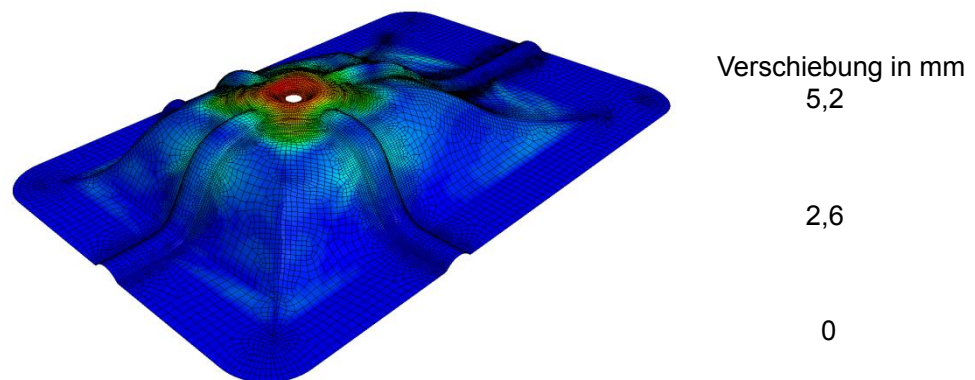


Abb. 8-8: Mit gemessenen Faserorientierungen parametrisierte Verformungssimulation

Ausschlaggebend für die konstruktive Auslegung ist die maximale Verschiebung am zentralen Flansch, an dem das Federdomlager sitzt. Diese entspricht zugleich der maximalen lokalen Verschiebung im Bauteil und wurde mit 5,2 mm berechnet.

Damit konnte exemplarisch gezeigt werden, wie die Wirbelstromprüfung direkt als Validierungswerkzeug in die CFK-Auslegung integriert werden kann. Ausgehend von den auf Grundlage der Ist-Orientierung berechneten Verformungen können in nachfolgenden Schritten Anpassungen z.B. bei der Definition von Lagenzahl und Lagenorientierung erfolgen.

³³ Erneut danke ich meinem Kollegen Matthias Hübner für die Durchführung der Simulation.

8.3 Perspektive: Validierung des virtuellen CFK-Entwicklungsprozesses

Die in diesem Kapitel dargestellten Schnittstellen verbinden das entwickelte Verfahren zur Faserorientierungsmessung mit Hochfrequenz-Wirbelstromprüftechnik mit den derzeit entscheidenden Schritten der virtuellen Prozessentwicklung, der Drapier- und der Struktursimulation. Sie zeigen die angestrebte Integration zwischen *Prozessentwicklung des Preformingprozesses*, *experimenteller Validierung durch Faserorientierungsmessung* und *Struktursimulation* auf. Abb. 8-9 stellt den Gesamtprozess dar.

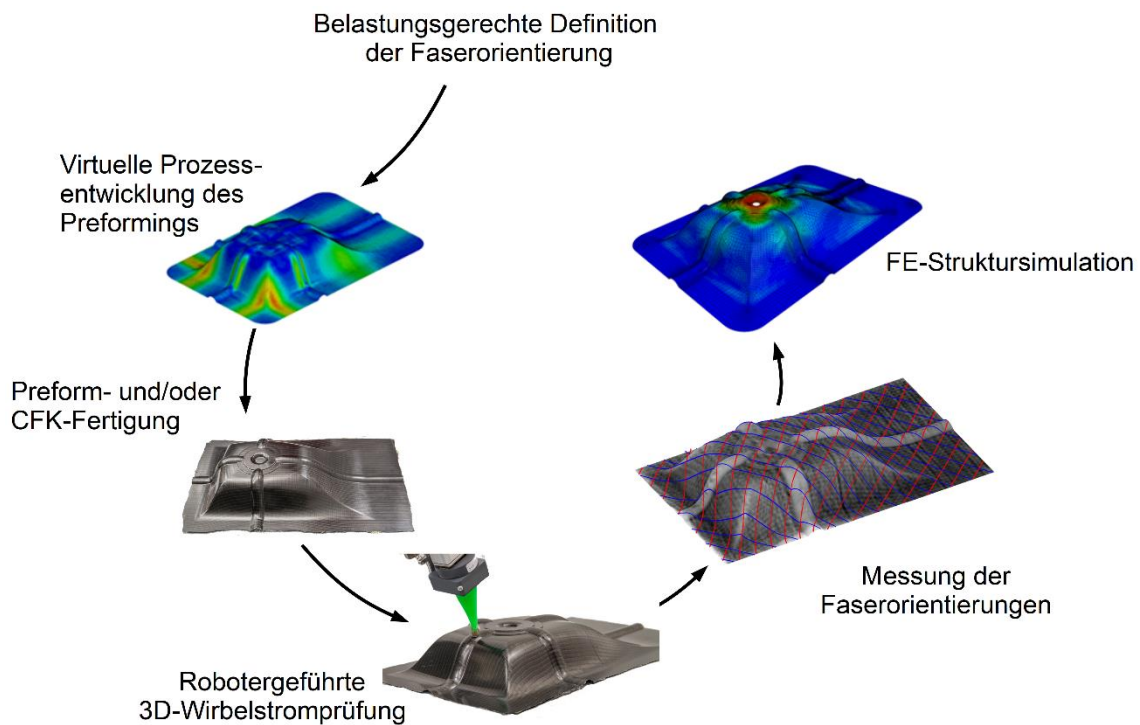


Abb. 8-9: Wirbelstromvalidierter CFK-Entwicklungsprozess

9 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Entwicklung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen mit belastungsgerechten Faserverläufen wird ein Verfahren benötigt, das in der Lage ist, die Faserorientierungen in mehrlagigen, dreidimensional umgeformten Preforms und CFK-Strukturen zerstörungsfrei zu messen. Da für die Herstellung komplex geformter dreidimensionaler Preforms in der Regel mehrere textile Halbzeuglagen gemeinsam umgeformt werden und sich das Umformverhalten mehrlagiger Halbzeugstapel von dem einlagiger deutlich unterscheidet, ist eine optische, auf die oberste Lage beschränkte Faserorientierungsmessung nicht ausreichend.

In vorausgehenden Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die bildgebende Wirbelstromprüfung mit Frequenzen im Megahertz-Bereich in der Lage ist, die Fadenstruktur in mehrlagigen zwei- und dreidimensionalen Carbonfaser-Strukturen abzubilden. Eine Faserorientierungsmessung erfolgte bisher jedoch ausschließlich an zweidimensionalen, großflächigen Prüfkörpern, so dass für die 3D-Faserorientierungsmessung sowohl hinsichtlich des 3D-Prüfvorgangs wie der 3D-Auswertung grundlegende Neuentwicklungen durchzuführen waren.

In dieser Arbeit wurde daher, über den Stand der Technik hinausgehend, erstens ein Verfahren entwickelt, das eine Roboter-Bahnplanung zur vollständigen Erfassung beliebig geformter 3D-Oberflächen vollautomatisch generiert. Hierbei werden, als wichtigste Anforderungen an den Prüfvorgang, ein konstanter Sensorabstand und eine stets senkrechte Sensorführung zur Oberfläche, ebenso wie ein konstanter Abstand der Messbahnen auf der Oberfläche eingehalten.

Zweitens wurde ein Verfahren entwickelt, das aus den 3D-Wirbelstromdaten mehrlagiger Preforms und CFK die lokale Faserorientierung misst. Hierfür wurden automatische Routinen zur Phasendrehung der komplexen Wirbelstromdaten, zur Aufbereitung der Wirbelstrombilder, zur Messung der lokalen Faserorientierung und zur Zuordnung der Faserorientierungen zu den Einzellagen entwickelt. Ebenso wie der Bahnplanungs- und Prüfvorgang läuft der Auswertevorgang vollautomatisch ab.

In einem dritten Schritt wurde für das entwickelte Verfahren die Messunsicherheit in Abhängigkeit der wichtigsten Prozess- und Materialparameter ermittelt. Hierfür wurden experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Spulenanordnungen, Spulendurchmessern, Sensororientierungen und Messfrequenzen an ebenen, bis zu 8-lagigen Gelegestapeln durchgeführt. Als Gelege wurden zwei, in ihren Eigenschaften stark unterschiedliche Halbzeuge untersucht, ein Biaxialgelege mit deutlich ausgeprägter Fadenstruktur und ein UD-Gelege, bei dem die für die Auswertung genutzte Fadenstruktur nur sehr gering ausgeprägt ist. Es konnte gezeigt werden, dass die Faserorientierungsmessung für die obersten vier Lagen eines Stapels mit erweiterten Messunsicherheiten (95 %-Vertrauensbereichen) von 1° für das Biaxialgelege und $1,2^\circ$ für das UD-Gelege möglich ist.

Viertens erfolgte eine Erprobung des entwickelten Verfahrens an zwei 3D-Anwendungsfällen, einem komplexen vierlagigen CFK-Bauteil („Federdom“) und einem automatisierten Drapiervorgang mit ein-, zwei- und vierlagigen Halbzeugen. Es wurde gezeigt, dass die entwickelte Faserorientierungsmessung die Faserorientierungen aller vier Lagen der CFK-Bauteile bzw. drapierten

Halbzeuge (Preforms) zerstörungsfrei in einem vollautomatischen Prozess messen kann. Die Faserorientierungen können dabei als rekonstruierte Fadenverläufe für jede Lage visualisiert werden, und lokale Differenzen zwischen verschiedenen Bauteilen und Preforms können als Farbkarten quantifiziert werden. Beispielhaft wurde gezeigt, wie mit den gemessenen Faserorientierungen der Einzellagen die Reproduzierbarkeit des CFK-Herstellungsprozesses bewertet werden kann, ebenso die Auswirkung des mehrlagigen textilen Halbzeugs sowie der Stapelung mehrerer Halbzeuge auf die sich nach dem Drapierprozess ausbildenden Faserorientierungen der Einzellagen. Die Ergebnisse können unmittelbar zur Optimierung des Fertigungsprozesses mehrlagiger Preforms und CFK verwendet werden.

In einem fünften und letzten Schritt wurde die entwickelte Faserorientierungsmessung in den CFK-Entwicklungsprozess integriert. Hierfür wurden Schnittstellen zu kommerzieller FE-Software geschaffen, die zum einen eine Validierung der mit FE-Drapiersimulationen berechneten Faserorientierungen ermöglichen. Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Faserorientierungen erlauben Rückschlüsse auf die korrekte Abbildung des realen Fertigungsprozesses in der Simulation und können für ein besseres Prozessverständnis genutzt werden. Zum anderen wurde eine Schnittstelle geschaffen, um die gemessenen Faserorientierungen in FE-Struktursimulationen zu exportieren. Für jede einzelne Lage werden die gemessenen lokalen Faserorientierungen abgespeichert und in der FE-Software zur Parametrierung der lokalen Orientierung der Einzellagen benutzt. Die Strukturbewertung kann dann ausgehend von den tatsächlich vorliegenden Ist-Faserorientierungen erfolgen, womit eine wesentlich präzisere Abschätzung des Bauteilverhaltens unter Last möglich ist. Unsicherheiten und Überdimensionierungen können hierdurch vermieden und Material und Kosten eingespart werden. Für die aktuell weltweit angestrebte Abbildung des CFK-Entwicklungsprozesses als virtuelle Prozesskette – von der Drapier- über die Infusions- zur Struktursimulation – kann die 3D-Faserorientierungsmessung ein Werkzeug zur experimentellen Validierung bei der Herstellung mehrlagiger CFK-Strukturen liefern.

Für folgende Untersuchungen empfiehlt sich zum einen die Entwicklung und Untersuchung von Sensoren für die materialangepasste Faserorientierungsmessung. Wie gezeigt werden konnte, ergibt sich je nach Material und untersuchter Lagenzahl ein Optimum der Sensorparameter, das die notwendige Eindringtiefe mit einer niedrigen Messunsicherheit kombinieren kann. Zum anderen empfiehlt sich die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Lagenreihenfolge und zur Separierung mehrerer, gleichsinnig oder in sehr kleinem Winkelversatz orientierter Lagen. Nahe liegt hierfür die Ausnutzung der frequenzabhängigen Eindringtiefe der Wirbelströme (Skin-Effekt), ebenso wie die Nutzung mehrerer Messspulen mit verschiedenen Durchmessern und daher verschiedener Eindringtiefe, was bisher noch nicht untersucht wurde. Hierzu wäre jeweils ein geeignetes Messregime zu entwickeln und mit einem geeigneten Auswerteverfahren zu kombinieren. Fernziel wäre hier die Entwicklung einer „Wirbelstromtomographie“ zur vollständigen Analyse des Lagenaufbaus und der Lagenorientierung von CFK-Bauteilen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das entwickelte Verfahren es erstmals ermöglicht, die Faserorientierung in mehrlagigen 3D-Carbonfaser-Preforms und -CFK zerstörungsfrei zu messen und dadurch den Fertigungsprozess von 3D-Preforms und CFK systematisch hinsichtlich der bewussten Einstellung eines belastungsgerechten Fadenverlaufs zu optimieren. Das Resultat sind CFK-Strukturen mit exakt auf die äußeren Lasten angepassten Faserorientierungen, die das durch den Werkstoff CFK gegebene Leichtbaupotenzial ausschöpfen.

Literaturverzeichnis

- [1] CHERIF, C. (Hg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Berlin: Springer, 2011
- [2] AERO MAGAZINE: Boeing 787 from the Ground Up. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html (20.9.2017)
- [3] AIRBUS: Airbus launches new Ultra-Long Range version of the A350-900. <http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2015/10/airbus-launches-new-ultra-long-range-version-of-the-a350-900.html> (20.9.2017)
- [4] AVIATIONWEEK: Operators Reporting Positive 787 Fuel-Burn Results. <http://aviationweek.com/awin/operators-reporting-positive-787-fuel-burn-results> (20.9.2017)
- [5] BOEING: Boeing 787 Dreamliner Sets Speed, Distance Records. <http://boeing.mediaroom.com/2011-12-08-Boeing-787-Dreamliner-Sets-Speed-Distance-Records> (20.9.2017)
- [6] VDI-NACHRICHTEN: Produktion des BMW i3 setzt neue Maßstäbe. <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Produktion-BMW-i3-setzt-neue-Massstaebe> (20.9.2017)
- [7] AUTOZEITUNG: BMW i3 2013: Produktion der Carbon-Karosserie. <http://www.autozeitung.de/bmw-i3-2013-carbon-karosserie-fertigung-cfk-karbon-technik-elektro-gn-401371-62184.html> (20.9.2017)
- [8] COMPOSITES WORLD; WOOD, K.: Wind turbine blades: Glass vs. carbon fiber. <http://www.compositesworld.com/articles/wind-turbine-blades-glass-vs-carbon-fiber> (20.9.2017)
- [9] COMPOSITES WORLD; GARDINER, G.: Carbon Fiber in the Wind. <http://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-in-the-wind> (20.9.2017)
- [10] TEXTILE WORLD; BORNEMAN, J.: Use Of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) In Karl Mayer's Warp Knitting Machines Reduces Energy Consumption | Textile World. <http://www.textileworld.com/textile-world/knitting-apparel/2015/06/use-of-carbon-fiber-reinforced-plastic-cfrp-in-karl-mayers-warp-knitting-machines-reduces-energy-consumption/> (20.9.2017)
- [11] TITUS SKATESHOP: Decks. <https://www.titus.de/wiki/skateboard-guide/decks/> (20.9.2017)
- [12] ROAD CYCLING UK; SCOTT, G.: Eight of the lightest road bikes for 2016. <https://roadcyclinguk.com/gear/eight-of-the-lightest-road-bikes-for-2016.html> (20.9.2017)
- [13] COMPOSITES MANUFACTURING MAGAZINE; MILBERG, E.: Emirates Team New Zealand Wins 35th America's Cup. <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/07/emirates-new-zealand-wins-35th-americas-cup/> (20.9.2017)
- [14] MOTORSPORT MAGAZIN: Porsche 918 Spyder: Performance und Effizienz. <https://www.motorsport-magazin.com/auto-tuning/news-168889-porsche-918-spyder-performance-und-effizienz/> (20.9.2017)
- [15] BOEING: Boeing: 787 Dreamliner. <http://www.boeing.com/commercial/787/> (18.1.2018)
- [16] EXTREMETECH: BMW i3: Cheap, mass-produced carbon fiber cars finally come of age - ExtremeTech. <https://www.extremetech.com/extreme/162582-bmw-i3-will-bmws-new-ev-finally-be-the-breakthrough-for-carbon-fiber-cars> (18.1.2018)
- [17] SOUTHERN SPARS: Emirates Team New Zealand through to America's Cup Match. <http://www.southernspars.com/emirates-team-new-zealand-americas-cup-match/> (18.9.2017)
- [18] MATHES, V. ET AL. (Hg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [19] KAUFMANN, M.: Cost/weight optimization of aircraft structures. Stockholm: KTH, 2008. - PhD thesis, University of Stockholm
- [20] HEUSS, R.; MÜLLER, N.; VAN SINERN, W.; STARKE, A.; TSCHIESNER, A.: Light weight, heavy impact: How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive. McKinsey & Company, 2012

- [21] Jaguar Land Rover and the quest for cost-neutral weight saving - Automotive World. <https://www.automotiveworld.com/analysis/jlr-quest-cost-neutral-weight-saving/> (18.1.2018)
- [22] ISENSTADT, A.; GERMAN, J.; BUBNA, P.; WISEMAN, M.; ET AL.: Lightweighting technology development and trends in U.S. passenger vehicles. icct: The international council on clean transportation, 2016
- [23] LÄSSIG, R.; EISENHUT, M.; MATHIAS, A.; SCHULTE, R.T.; PETERS, F.; KÜHLMANN, T.; WALDMANN, T.; BEGEMANN, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger Strategy Consultants, 2012
- [24] SCHMIDT, A.: New developments for mass production of epoxy automotive composites. Vortrag, Composites Europe Forum, Stuttgart, 12.1 2016
- [25] NEZAMI, F.N.: Automatisiertes Preforming von Kohlefaserhalbzeugen mit aktiven Materialführungssystemen zur Herstellung komplexer Faserverbundstrukturen. Berlin: epubli GmbH, 2015. - Zugl. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [26] WEIMER, C.; MITSCHANG, P.: Preformverfahrenaa. In: NEITZEL, M. ET AL. (Hg.): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2., aktualisierte und erweiterte. Auflage München: Hanser, 2014. - ISBN 978-3-446-43696-1, pp.73–104
- [27] SGL GROUP: Carbon in Mobility | SGL CARBON. https://www.sglgroup.com/cms/international/innovation/carbon-in-mobility/index.html?__locale=en (22.12.2017)
- [28] BIRKEFELD, K.: Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten. 1. Auflage, München: Verlag Dr. Hut, 2013. - Dissertation, Universität Stuttgart, IFB Institut für Flugzeugbau
- [29] LENGERSDORF, M.: Produktorientiertes Geflecht-Preforming für Druckbehälter in Faserverbundbauweise. Aachen: Shaker Verlag, 2017
- [30] BÜSGEN, A.: Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen. RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1993
- [31] GIRDAUSKAITE, L.: Lokale Strukturfixierung im Preformherstellungsprozess für komplex gekrümmte Faserkunststoffverbundbauteile. Dresden: TUDpress, 2011. - Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [32] BARDL, G.: Strukturmodellierung und Berechnung von Steuerungsdaten zur Fertigung mehrfach gekrümmter Fadenlagennähwerkstoffe. Dresden: TU Dresden, Diplomarbeit, 2012
- [33] LIN, H.: Entwicklung einer Prozesskette zur Umsetzung komplexer Geometrien in formgerechte 2D/3D Hybridgarn-Mehrlagengestricke für Faserkunststoffverbundanwendungen. Dresden: TUDpress, Verl. der Wiss, 2015. - Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [34] TRÜMPER, W.: Entwicklung einer unikalen Technologie für das direkte 2D- und 3D-Preforming von Mehrlagengestricken. 2015. - Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [35] SANKARAN, V.: Development of a novel multiaxial warp knitting based technology for production of 3D near net shape preforms. 1. Auflage, München: Verlag Dr. Hut, 2016. - Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [36] SCHUR, N.: Drapieren und Handhaben von unidirektionalen Faserhalbzeugen in einer automatisierten Prozesskette zur Herstellung komplexer Preforms. 1. Auflage, München: Verlag Dr. Hut, 2016
- [37] BMW GROUP: BMW i3 Produktion BMW Werk Leipzig: CFK-Seitenrahmen (09/13). <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90127357/bmw-i3-produktion-bmw-werk-leipzig:-cfk-seitenrahmen-09/13> (21.9.2017)
- [38] ALBANY ENGINEERED COMPOSITES: 787-Dreamliner-Main-Landing-Gear-Brace. <http://www.albint.com/business/aec/en-us/aerospace/Pages/787-Dreamliner-Main-Landing-Gear-Brace.aspx> (21.9.2017)
- [39] JT VELO: Technology - Resin Transfer Moulding. <https://jtvelo.dk/resin-technology> (21.9.2017)
- [40] CEBULLA, H.: Formgerechte zwei- und dreidimensionale Mehrlagengestricke mit biaxialer Verstärkung. Dresden: TUDpress, 2005. - Dissertation TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen
- [41] HARRISON, P.; YU, W.-R.; LONG, A.C.: Modelling the deformability of biaxial non-crimp fabric compositesaa. In: LOMOV, S.V. (Hg.): Non-crimp fabric composites: manufacturing, properties and applications, Cambridge, UK; Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2011. - ISBN 978-1-84569-762-4, pp.144–165
- [42] LONG, A.C.; WIGGERS, J.; HARRISON, P.: Modelling the effects of blank-holder pressure and material variability on forming of textile preforms. In: Proceedings. 9th International ESAFORM Convergence on Material Forming, Cluj-Napoca, Romania, 2005, pp. 939–942

- [43] CAPELLE, E.; OUAGNE, P.; SOULAT, D.; DURATTI, D.: Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects. *Composites Part B: Engineering* 62(2014) S.29–36
- [44] ALLAOUI, S.; HIVET, G.; WENDLING, A.; OUAGNE, P.; SOULAT, D.: Influence of the dry woven fabrics meso-structure on fabric/fabric contact behavior. *Journal of Composite Materials* 46(2012) 6, S.627–639
- [45] HIVET, G.; ALLAOUI, S.; CAM, B.T.; OUAGNE, P.; SOULAT, D.: Design and Potenziality of an Apparatus for Measuring Yarn/Yarn and Fabric/Fabric Friction. *Experimental Mechanics* 52(2012) 8, S.1123–1136
- [46] NOSRAT NEZAMI, F.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Analyses of interaction mechanisms during forming of multilayer carbon woven fabrics for composite applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 84(2016) S.406–416
- [47] ALLAOUI, S.; CELLARD, C.; HIVET, G.: Effect of inter-ply sliding on the quality of multilayer interlock dry fabric preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 68(2015) S.336–345
- [48] THOMPSON, A.; BELNOUE, J.P.-H.; HALLETT, S.R.: Numerical Modelling of Defect Generation During Preforming of Multiple Layers of 2D Woven Fabrics. In: *ECCM17-17th European Conference on Composite Materials*. 2016, pp. 26–30
- [49] NONN, A.; SCHMIDT, E.; ULRICH, M.; GRIES, T.: Non-destructive testing of flat carbon fiber semi-finished products. In: *CD-Rom und Kurzreferateband*. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Dresden, 24.11.2016, p. P-60
- [50] ÅKERMO, M.; LARBERG, Y.; SJÖLANDER, J.; HALLNADER, P.: Influence of interply friction on the forming of stacked prepreg. In: *The 19th International Conference on Composite Materials (ICCM19)*, July 28 to August 2, 2013 in Montreal, Canada. 2013, pp. 919–928
- [51] LARBERG, Y.; ÅKERMO, M.: In-plane deformation of multi-layered unidirectional thermoset prepreg – Modelling and experimental verification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 56(2014) S.203–212
- [52] HALLANDER, P.; SJÖLANDER, J.; ÅKERMO, M.: Forming induced wrinkling of composite laminates with mixed ply material properties; an experimental study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 78(2015) S.234–245
- [53] HALLANDER, P.; SJÖLANDER, J.; PETERSSON, M.; ÅKERMO, M.: Interface manipulation towards wrinkle-free forming of stacked UD prepreg layers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 90(2016) S.340–348
- [54] LOMOV, S.V.; BOISSE, P.; DELUYCKER, E.; MORESTIN, F.; VANCLOOSTER, K.; VANDEPITTE, D.; VERPOEST, I.; WILLEMS, A.: Full-field strain measurements in textile deformability studies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(2008) 8, S.1232–1244
- [55] MARGOSSIAN, A.; BEL, S.; BALVERS, J.M.; LEUTZ, D.; FREITAS, R.; HINTERHOELZL, R.: Finite element forming simulation of locally stitched non-crimp fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 61(2014) S.152–162
- [56] LEUTZ, D.; VERMILYEA, M.; BEL, S.; HINTERHÖLZL, R.: Forming Simulation of Thick AFP Laminates and Comparison with Live CT Imaging. *Applied Composite Materials* 23(2016) 4, S.583–600
- [57] CHEN, S.; MCGREGOR, O.P.L.; HARPER, L.T.; ENDRUWEIT, A.; WARRIOR, N.A.: Defect formation during preforming of a bi-axial non-crimp fabric with a pillar stitch pattern. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 91(2016) S.156–167
- [58] 9000:2015. Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe
- [59] VDI/VDE/VDMA-Richtlinie 2632-3:2017-10. Industrielle Bildverarbeitung - Abnahme klassifizierender Bildverarbeitungssysteme
- [60] MERSMANN, C.: *Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau*. Aachen: Apprimus-Verlag, 2012. - Dissertation, RWTH Aachen
- [61] VDI/VDE 2600-1:2013. Prüfprozessmanagement - Identifizierung, Klassifizierung und Eignungsnachweise von Prüfprozessen
- [62] ISO/IEC 98-3:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [63] HUFENBACH, W.; HELMS, O.: *Leitfaden zum methodischen Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Dresden: Leichtbau Zentrum Sachsen GmbH, 2010
- [64] 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

- [65] LONG, A.C.; RUDD, C.D.; BLAGDON, M.; SMITH, P.: Characterizing the processing and performance of aligned reinforcements during preform manufacture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27(1996) 4, S.247–253
- [66] VANCLOOSTER, K.; LOMOV, S.V.; VERPOEST, I.: Experimental validation of forming simulations of fabric reinforced polymers using an unsymmetrical mould configuration. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(2009) 4, S.530–539
- [67] ALLAOUI, S.; BOISSE, P.; CHATEL, S.; HAMILA, N.; HIVET, G.; SOULAT, D.; VIDAL-SALLE, E.: Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42(2011) 6, S.612–622
- [68] ALLAOUI, S.; HIVET, G.; SOULAT, D.; WENDLING, A.; OUAGNE, P.; CHATEL, S.: Experimental preforming of highly double curved shapes with a case corner using an interlock reinforcement. *International Journal of Material Forming* 7(2012) 2, S.155–165
- [69] BEL, S.; HAMILA, N.; BOISSE, P.; DUMONT, F.: Finite element model for NCF composite reinforcement preforming: Importance of inter-ply sliding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43(2012) 12, S.2269–2277
- [70] HAANAPPEL, S.P.; TEN THIJE, R.H.W.; SACHS, U.; RIETMAN, B.; AKKERMAN, R.: Formability analyses of uni-directional and textile reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 56(2014) S.80–92
- [71] TANAKA, K.; USHIYAMA, R.; KATAYAMA, T.; ENOKI, S.; SAKAMOTO, H.: Evaluation of blank holder force effects on carbon fiber non-crimp fabric formability by a non-contact 3D strain measurement system. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering* 88(2015) S.63–42
- [72] ZACHARIAS, F.; ZERWER, M.; RASCHE, S.: *Optical Forming Analysis of the Preforming Process*. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2016
- [73] KRIEGER, H.; GRIES, T.; STAPLETON, S.E.: Shear and drape behavior of non-crimp fabrics based on stitching geometry. *International Journal of Material Forming* (2017) S.1–13
- [74] CABRERA, N.O.; REYNOLDS, C.T.; ALCOCK, B.; PEIJS, T.: Non-isothermal stamp forming of continuous tape reinforced all-polypropylene composite sheet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(2008) 9, S.1455–1466
- [75] PAZMINO, J.; CARVELLI, V.; LOMOV, S.V.: Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 61(2014) S.76–83
- [76] PAZMINO, J.; MATHIEU, S.; CARVELLI, V.; BOISSE, P.; LOMOV, S.V.: Numerical modelling of forming of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 72(2015) S.207–218
- [77] VANLEEUEW, B.; CARVELLI, V.; BARBURSKI, M.; LOMOV, S.V.; VAN VUURE, A.W.: Quasi-unidirectional flax composite reinforcement: Deformability and complex shape forming. *Composites Science and Technology* 110(2015) S.76–86
- [78] GOM GMBH: ARAMIS - 3D-Bewegungs- und -Verformungssensor. <http://www.gom.com/de/messsysteme/aramis.html> (17.9.2017)
- [79] MIENE, A.; HERMANN, A.; GÖTTINGER, M.: Quality assurance by digital image analysis for the preforming and draping process of dry carbon fiber material. In: *Proceedings. 27th International SAMPE Europe Conference, Paris, 2008*
- [80] MIENE, A.: Genau in die Textur geschaut. *Kunststoffe* 43(2009) 5, S.62–65
- [81] MIENE, A.: Bildanalytische Qualitätssicherung in der Preformfertigung. Vortrag, 5. Sitzung der Arbeitsgruppe 'Werkstoff- und Bauteilprüfung' des Carbon Composites e.V. Thementag: 'ZFP in der Produktion', Augsburg, 3.5 2010
- [82] BRAUNER, C.; MIENE, A.; BRUYNEEL, M.; PASCON, F.; HJERMANN, A.: Advances in virtual process chain and connection with online monitoring methods for first time tight manufacturing of thermoset laminated composites. In: *NAFEMS World Congress 2015*. 2015
- [83] NEZAMI, F.; FUHR, J.-P.; SCHIERLE, D.; CHERIF, C.; MIDDENDORF, P.: Holistic development of high-quality composite parts based on automated preforming. *Lightweight Design* 9(2016) 2, S.52–58
- [84] NOSRAT NEZAMI, F.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Active forming manipulation of composite reinforcements for the

- suppression of forming defects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 99(2017) S.94–101
- [85] MÖRSCHER, U.: Automatischer Drapierbarkeitsprüfer. *Technische Textilien* 54(2011) 4, S.199
- [86] CHRIST, M.; MIENE, A.; MOERSCHER, U.: Characterization of the drapability of reinforcement fabrics by means of an automated tester. In: *Proceedings. 12th annual automotive composites conference and exhibition, Troy, USA, 2012*
- [87] CHRIST, M.; MIENE, A.; MÖRSCHER, U.: Measurement and Analysis of Drapeability Effects of Warp-Knit NCF with a Standardised, Automated Testing Device. *Applied Composite Materials* 24(2017) 4, S.803–820
- [88] BEL, S.; MARGOSSIAN, A.; LEUTZ, D.; BEIER, U.; HINTERHOELZL, R.; DRECHSLER, K.: Validation of local stitching simulation for stitched NCF ply stacks. In: *The 19th international conference on composite materials. 2013*
- [89] SCHMITT, R.; PFEIFER, T.; MERSMANN, C.; ORTH, A.: A method for the automated positioning and alignment of fibre-reinforced plastic structures based on machine vision. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(2008) 1, S.501–504
- [90] SCHMITT, R.; MERSMANN, C.; SCHÖNBERG, A.: Machine-Vision zur Messung der Faserorientierung bei der textilbasierten FVK-Herstellung. *tm - Technisches Messen* 77(2010) 4,
- [91] MERSMANN, C.: Industrializing metrology—Machine vision integration in composites production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60(2011) 1, S.511–514
- [92] APODIUS GMBH: Produkte | Apodius 3D. <http://apodius.de/de/produkte#apodius3d> (17.9.2017)
- [93] HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENCE: Composite Inspection System. <http://www.hexagonmi.com/products/portable-measuring-arms/composite-inspection-system> (17.9.2017)
- [94] PALFINGER, W.; THUMFART, S.; EITZINGER, C.: Photometric stereo on carbon fiber surfaces. In: *35th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition, Graz. 2011*
- [95] THUMFART, S.; PALFINGER, W.; STÖGER, M.; EITZINGER, C.: Accurate Fibre Orientation Measurement for Carbon Fibre Surfaces. In: WILSON, R. ET AL. (Hg.): *Computer Analysis of Images and Patterns*, Springer Berlin Heidelberg, 2013. - ISBN 978-3-642-40245-6, pp.75–82
- [96] ZAMBAL, S.; PALFINGER, W.; STÖGER, M.; EITZINGER, C.: Accurate fibre orientation measurement for carbon fibre surfaces. *Pattern Recognition* 48(2015) 11, S.3324–3332
- [97] COLMARS, J.; RUSANOV, A.; TA, A.T.; NAOUAR, N.; BOISSE, P.; CHINESTA, F.; CUETO, E.; ABISSET-CHAVANNE, E.: Fibre mapping analysis in composite forming: Experimental and numerical comparison. *AIP Conference Proceedings* 1769(2016) 1, S.170027
- [98] MAYER, N.; PROWE, J.; HAVAR, T.; HINTERHÖLZL, R.; DRECHSLER, K.: Structural analysis of composite components considering manufacturing effect. *Composite Structures* 140(2016) S.776–782
- [99] ZAMBAL, S.; PALFINGER, W.; EITZINGER, C.: Robotic inspection of 3D CFRP surfaces. In: *Proceedings. 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 06.2016*, pp. 197–202
- [100] PROFACOR GMBH: Composite Parts | Profactor. <https://www.profactor.at/en/solutions/machine-vision/composite-parts/> (17.9.2017)
- [101] EITZINGER, C.: *FibreMap: Automatic Mapping of Fibre Orientation for Draping of Carbon Fibre Parts. Deliverable D6.3: "Final demonstration", 2016*
- [102] KOCHAN, A.: *Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau. Aachen: Shaker, 2012. - Dissertation, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen*
- [103] SUTCLIFFE, M.P.F.; LEMANSKI, S.L.; SCOTT, A.E.: Measurement of fibre waviness in industrial composite components. *Composites Science and Technology* 72(2012) 16, S.2016–2023
- [104] CZABAJ, M.W.; RICCIO, M.L.; WHITACRE, W.W.: Numerical reconstruction of graphite/epoxy composite microstructure based on sub-micron resolution X-ray computed tomography. *Composites Science and Technology* 105(2014) S.174–182
- [105] SKET, F.; ENFEDAQUE, A.; ALTON, C.; GONZÁLEZ, C.; MOLINA-ALDAREGUIA, J.M.; LLORCA, J.: Automatic quantification of matrix cracking and fiber rotation by X-ray computed tomography in shear-deformed carbon fiber-reinforced laminates. *Composites Science and Technology* 90(2014) S.129–138
- [106] GOMMER, F.; WEDGWOOD, K.C.A.; BROWN, L.P.: Stochastic reconstruction of filament paths in fibre bundles based on two-dimensional input data. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 76(2015) S.262–271

- [107] SENCU, R.M.; YANG, Z.; WANG, Y.C.; WITHERS, P.J.; RAU, C.; PARSON, A.; SOUTIS, C.: Generation of micro-scale finite element models from synchrotron X-ray CT images for multidirectional carbon fibre reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 91(2016) S.85–95
- [108] EMERSON, M.J.; JESPERSEN, K.M.; DAHL, A.B.; CONRADSEN, K.; MIKKELSEN, L.P.: Individual fibre segmentation from 3D X-ray computed tomography for characterising the fibre orientation in unidirectional composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 97(2017) S.83–92
- [109] BADEL, P.; VIDAL-SALLÉ, E.; MAIRE, E.; BOISSE, P.: Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale. *Composites Science and Technology* 68(2008) 12, S.2433–2440
- [110] REVOL, V.; PLANK, B.; KAUFMANN, R.; KASTNER, J.; KOTTLER, C.; NEELS, A.: Laminate fibre structure characterisation of carbon fibre-reinforced polymers by X-ray scatter dark field imaging with a grating interferometer. *NDT & E International* 58(2013) S.64–71
- [111] NAOUAR, N.; VIDAL-SALLÉ, E.; SCHNEIDER, J.; MAIRE, E.; BOISSE, P.: Meso-scale FE analyses of textile composite reinforcement deformation based on X-ray computed tomography. *Composite Structures* 116(2014) S.165–176
- [112] STRAUMIT, I.; LOMOV, S.V.; WEVERS, M.: Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 69(2015) S.150–158
- [113] BARBURSKI, M.; STRAUMIT, I.; ZHANG, X.; WEVERS, M.; LOMOV, S.V.: Micro-CT analysis of internal structure of sheared textile composite reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 73(2015) S.45–54
- [114] GOMMER, F.; BROWN, L.P.; BROOKS, R.: Quantification of mesoscale variability and geometrical reconstruction of a textile. *Journal of Composite Materials* 50(2016) 23, S.3255–3266
- [115] LIU, Y.; STRAUMIT, I.; VASIUKOV, D.; LOMOV, S.V.; PANIER, S.: Prediction of linear and non-linear behavior of 3D woven composite using mesoscopic voxel models reconstructed from X-ray micro-tomography. *Composite Structures* 179(2017) S.568–579
- [116] KÄRGER, L.; BERNATH, A.; FRITZ, F.; GALKIN, S.; MAGAGNATO, D.; OECKERATH, A.; SCHÖN, A.; HENNING, F.: Development and validation of a CAE chain for unidirectional fibre reinforced composite components. *Composite Structures* 132(2015) S.350–358
- [117] LIGHTFOOT, J.S.; WISNOM, M.R.; POTTER, K.D.: Examination of drape-induced defects using computer x-ray tomography. In: *Proceedings. 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, Canada, 07.-02.08.2013*
- [118] RAYSCAN: RayScan 130 - 3D-Mikro-CT. http://www.rayscan.eu/RayScan_130.html (26.9.2017)
- [119] RAYSCAN: RoboTom - Konsequente Umsetzung einer nahtlosen Verzahnung von industrieller Robotik und hochauflösender Röntgen-Computertomographie. <http://www.rayscan.eu/RoboTom.html> (26.9.2017)
- [120] HSU, D.K.; IM, K.-H.; CHO, Y.-T.; PARK, J.-W.; SIM, J.-K.; YANG, I.-Y.: Characterization of CFRP Laminates' layups using through-Transmitting ultrasound waves. *KSME International Journal* 16(2002) 3, S.292–301
- [121] YANG, I.-Y.; IM, K.-H.; HSU, D.K.; DAYAL, V.; BARNARD, D.; KIM, J.-H.; CHA, C.-S.; CHO, Y.-T.; KIM, D.-J.: Feasibility on fiber orientation detection of unidirectional CFRP composite laminates using one-sided pitch-catch ultrasonic technique. *Composites Science and Technology* 69(2009) 13, S.2042–2047
- [122] IM, K.-H.; HSU, D.K.; SONG, S.-J.; PARK, J.-W.; SIM, J.-K.; YANG, I.Y.: Ultrasonic characterization on sequences of CFRP composites based on modeling and motorized system. *KSME International Journal* 18(2004) 1, S.65–73
- [123] POST, M.; ZHU, Z.H.; CLARKSON, G.: Characterization of fibre orientation in FRP using pitch-catch ultrasonic technique. *International Journal for Multiscale Materials Modeling* 1(2010) 1, S.53–61
- [124] SMITH, R.A.; MUKHOPADHYAY, S.; LAWRIE, A.; HALLETT, S.R.: Applications of ultrasonic NDT to aerospace composites. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Aerospace NDT, Singapore, 2013*
- [125] NELSON, L.J.; SMITH, R.A.: Three-dimensional fiber-orientation characterisation in monolithic carbon-fiber composites. In: *Proceedings. European Conference on NDT, Prague, 2014*
- [126] SMITH, R.A.; XIE, N.; NELSON, L.J.; HALLETT, S.R.: Modelling the mechanical properties of as-manufactured composite components based on 3D non-destructive characterisation. In: *Proceedings. European Conference on NDT, Prague, 2014*

- [127] SMITH, R.A.: Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fibre-reinforced composites. Nottingham, UK: 2010. - PhD thesis, University of Nottingham
- [128] SCHMIDT, T.; DUTTA, S.: CFRP manufacturing process chain observation by means of automated thermography. In: Proceedings. Composites Conference Australia, Newcastle, Australia, 09.04.2014
- [129] MAIERHOFER, C.; RÖLLIG, M.; EHRIG, K.; MEINEL, D.; CÉSPEDES-GONZALES, G.: Validation of flash thermography using computed tomography for characterizing inhomogeneities and defects in CFRP structures. *Composites Part B: Engineering* 64(2014) S.175–186
- [130] AINDOW, J.D.; MARKHAM, M.F.; PUTTICK, K.E.; RIDER, J.G.; RUDMAN, M.R.: Fibre orientation detection in injection-moulded carbon fibre reinforced components by thermography and ultrasonics. *NDT International* 19(1986) 1, S.24–29
- [131] KRAPEZ, J.C.; CIELO, P.; MALDAGUE, X.; UTRACKI, L.A.: Optothermal analysis of polymer composites. *Polymer Composites* 8(1987) 6, S.396–407
- [132] KRAPEZ, J.-C.: Thermal Ellipsometry: A Tool Applied for in-Depth Resolved Characterization of Fibre Orientation in Composites. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Springer, Boston, MA, 1996. - ISBN 978-1-4613-8027-6, pp.533–540
- [133] FERNANDES, H.; ZHANG, H.; MALDAGUE, X.: An active infrared thermography method for fiber orientation assessment of fiber-reinforced composite materials. *Infrared Physics & Technology* 72(2015) S.286–292
- [134] WANG, F.; LIU, J.; LIU, Y.; WANG, Y.: Research on the fiber lay-up orientation detection of unidirectional CFRP laminates composite using thermal-wave radar imaging. *NDT & E International* 84(2016) S.54–66
- [135] FERNANDES, H.-C.; MALDAGUE, X.: Fiber orientation assessment in complex shaped parts reinforced with carbon fiber using infrared thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 12(2015) 1, S.64–79
- [136] PREDAK, S.: Mikrowellen-Orientierungsmessungen zur zerstörungsfreien Charakterisierung kurzfaserverstärkter Kunststoffe. Stuttgart: 2007. - Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Kunststofftechnik
- [137] KHARKOVSKY, S.: Application of Near-Field Microwave and Millimeter Wave Nondestructive Testing for Evaluation of Fiber Breakage and Orientation Evaluation in CFRP Composite Patches. In: 2005, pp. 554–561
- [138] WILSON, W.C.; MOORE, J.P.; JUAREZ, P.D.: Carbon fiber tow angle determination using microwave reflectometry. In: 10.2016. - ISBN 978-1-4799-8287-5, pp. 1–3
- [139] URABE, K.: Rotative Polarization System of Millimetric Wave for Detecting Fiber Orientation in CFRP. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 11(1992) 2, S.179–197
- [140] HEPTNER, H.; STROPPE, H.: Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung. 3., überarbeitete und erweiterte. Auflage, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1973
- [141] SHULL, P.J. (Hg.): *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. New York: M. Dekker, 2002
- [142] GARCÍA-MARTÍN, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E.: Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors* 11(2011) 3, S.2525–2565
- [143] DIN EN ISO 12718:2008. Zerstörungsfreie Prüfung – Wirbelstromprüfung – Terminologie
- [144] STEGEMANN, D.: *Der Einsatz von Wirbelströmen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. 1. Auflage, Düsseldorf: DVS Media, 2010
- [145] JONEIT, D.; NADLER, M.; HEUER, H.: Correction of eddy current measurements to obtain accordance with simulation results. *NDT & E International* 62(2014) S.167–171
- [146] BLITZ, J.: *Electrical and magnetic methods of non-destructive testing*. 2. Auflage, London: Chapman & Hall, 1997
- [147] MOTTI, Z.: The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing. *NDT International* 23(1990) 1, S.11–18
- [148] VAN DRUNEN, G.; CECCO, V.S.: Recognizing limitations in eddy-current testing. *NDT International* 17(1984) 1, S.9–17
- [149] RAMOS, H.M.G.; POSTOLACHE, O.; ALEGRIA, F.C.; RIBEIRO, A.L.: Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures. In: 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 05.2009, pp. 1361–1366
- [150] VERNON, S.N.: Parametric eddy current defect depth model and its application to graphite epoxy. *NDT*

- International 22(1989) 3, S.139–148
- [151] BOSSHARD, R.; MÜHLEHALER, J.; KOLAR, J.W.; STEVANOVIĆ, I.: Optimized magnetic design for inductive power transfer coils. In: Proceedings. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 03.2013, pp. 1812–1819
- [152] INAGAKI, M.; KANG, F.: Materials science and engineering of carbon: fundamentals. 2.ed. Auflage, Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014
- [153] BENNETT, S.C.; JOHNSON, D.J.: In: Proceedings. Fifth London International Carbon and Graphite Conference, London, 1978, p. 377
- [154] BENNETT, S.C.; JOHNSON, D.J.; JOHNSON, W.: Strength-structure relationships in PAN-based carbon fibres. Journal of Materials Science 18(1983) 11, S.3337–3347
- [155] KUMAR, S.; ANDERSON, D.P.; CRASTO, A.S.: Carbon fibre compressive strength and its dependence on structure and morphology. Journal of Materials Science 28(1993) 2, S.423–439
- [156] MINUS, M.; KUMAR, S.: The processing, properties, and structure of carbon fibers. JOM 57(2005) 2, S.52–58
- [157] TUNAKOVA, V.; GREGR, J.: Electrical conductivity measurement of fibers and yarns. (2010)
- [158] JÄGER, H.; CHERIF, C.; KIRSTEN, M.; BEHNISCH, T.; WOLZ, D.S.; BÖHM, R.; GUDE, M.: Influence of processing parameters on the properties of carbon fibres – an overview. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 47(2016) 11, S.1044–1057
- [159] NEWCOMB, B.A.: Processing, structure, and properties of carbon fibers. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 91(2016) Part 1, S.262–282
- [160] OWSTON, C.N.: Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced epoxy resins. Materials Evaluation 34(1976) S.237–244
- [161] PRAKASH, R.; OWSTON, C.N.: Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-ply crfp laminates. Composites 7(1976) 2, S.88–92
- [162] LANGE, R.; MOOK, G.: Structural analysis of CFRP using eddy current methods. NDT&E International 27(1994) 5, S.241–248
- [163] ZHANG, J.: Different surface treatments of carbon fibers and their influence on the interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites. 2012. - PhD thesis, Ecole Centrale Paris, Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux
- [164] ATHANASOPOULOS, N.; KOSTOPOULOS, V.: Prediction and experimental validation of the electrical conductivity of dry carbon fiber unidirectional layers. Composites Part B: Engineering 42(2011) 6, S.1578–1587
- [165] ATHANASOPOULOS, N.; SIKOUTRIS, D.; SIAKAVELLAS, N.J.; KOSTOPOULOS, V.: Electrical resistivity prediction of dry carbon fiber media as a function of thickness and fiber volume fraction combining empirical and analytical formulas. Composites Part B: Engineering 81(2015) Supplement C, S.26–34
- [166] DE GOEJE, M.P.; WAPENAAR, K.E.D.: Non-destructive inspection of carbon fibre-reinforced plastics using eddy current methods. Composites 23(1992) 3, S.147–157
- [167] CHENG, J.; JI, H.; QIU, J.; TAKAGI, T.; UCHIMOTO, T.; HU, N.: Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method. NDT & E International 68(2014) S.1–12
- [168] ATHANASOPOULOS, N.; KOSTOPOULOS, V.: A comprehensive study on the equivalent electrical conductivity tensor validity for thin multidirectional carbon fibre reinforced plastics. Composites Part B: Engineering 67(2014) Supplement C, S.244–255
- [169] LEONG, C.-K.; WANG, S.; CHUNG, D.D.L.: Effect of through-thickness compression on the microstructure of carbon fiber polymer-matrix composites, as studied by electrical resistance measurement. Journal of Materials Science 41(2006) 10, S.2877–2884
- [170] HÄNTZSCHE, E.; MATTHES, A.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: Characteristics of carbon fiber based strain sensors for structural-health monitoring of textile-reinforced thermoplastic composites depending on the textile technological integration process. Sensors and Actuators A: Physical 203(2013) S.189–203
- [171] ABRY, J.C.; BOCHARD, S.; CHATEAUMINOIS, A.; SALVIA, M.; GIRAUD, G.: In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements. Composites Science and Technology 59(1999) 6, S.925–935
- [172] SCHUELER, R.; JOSHI, S.P.; SCHULTE, K.: Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping. Composites

- Science and Technology 61(2001) 6, S.921–930
- [173] 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* (2014) S.0021998314521475
- [174] SALSKI, B.; GWAREK, W.; KORPAS, P.: Electromagnetic Inspection of Carbon-Fiber- Reinforced Polymer Composites With Coupled Spiral Inductors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 62(2014) 7, S.1535–1544
- [175] MOOK, G.; LANGE, R.; KOESER, O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites Science and Technology* 61(2001) 6, S.865–873
- [176] 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) S.141–152
- [177] BARDL, G.; NOCKE, A.; CHERIF, C.; KUPKE, R.; KLEIN, M.; HEUER, H.: Zerstörungsfreie Fehlerdetektion in Carbonfaser-Gelegen und CFK mit hochfrequenter Wirbelstrom-Messtechnik. *Technische Textilien* 57(2014) 5, S.198–199
- [178] SCHULZE, M.H.; HEUER, H.; KÜTTNER, M.: High-resolution eddy current sensor system. In: 2009, p. 73621A–73621A–8
- [179] MOOK, G.; MICHEL, F.; SIMONIN, J.: Electromagnetic Imaging Using Probe Arrays. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57(2011) 3, S.227–236
- [180] SCHMIDT, C.; SCHULTZ, C.; WEBER, P.; DENKENA, B.: Evaluation of eddy current testing for quality assurance and process monitoring of automated fiber placement. *Composites Part B: Engineering* 56(2014) S.109–116
- [181] SURAGUS GMBH: SURAGUS Carbonfaser Prüfung - automatisierte Auswertung von Strukturen und Defekten. <https://www.suragus.com/de/produkte/karbonfaser-pruefung/struktur-und-defekte/auswertungssoftware-eddyeva/> (5.10.2017)
- [182] GRIMBERG, R.; SAVIN, A.; ROTUNDU, C.R.: Eddy current microscopy applied to graphite-epoxy composite. *Sensors and Actuators A: Physical* 91(2001) 1, S.73–75
- [183] SCHULZE, M.H.; HEUER, H.: Textural analyses of carbon fiber materials by 2D-FFT of complex images obtained by high frequency eddy current imaging. In: *Proceedings Vol. 8347. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2012, p. 83470S–83470S
- [184] HEUER, H.; SCHULZE, M.; POOCH, M.; GÄBLER, S.; ET AL.: 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
- [185] KOSEKUGAWA, H.; YOSHIKAWA, Y.; URAYAMA, R.; UCHIMOTO, T.; TAKAGI, T.: Non-Destructive Assessment of Fiber Alignment in CFRP using Eddy Current Testing with Differential Type Probe. In: *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, München, 2016
- [186] MENANA, H.; FÉLIACHI, M.: Modeling the response of a rotating eddy current sensor for the characterization of carbon fiber reinforced composites. *The European Physical Journal - Applied Physics* 52(2010) 2, S.23304
- [187] YIN, W.; WITHERS, P.J.; SHARMA, U.; PEYTON, A.J.: Noncontact Characterization of Carbon-Fiber-Reinforced Plastics Using Multifrequency Eddy Current Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 58(2009) 3, S.738–743
- [188] 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) 10, S.105708
- [189] DINGWALL, P.F.; MEAD, D.L.: Non-destructive inspection and volume fraction determination of CFRP using an eddy current method. Report for the Royal Aircraft Establishment Farnborough (United Kingdom), 1976
- [190] MIZUKAMI, K.; MIZUTANI, Y.; TODOROKI, A.; SUZUKI, Y.: Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing. *Composites Part B: Engineering* 86(2016) S.84–94
- [191] MIZUKAMI, K.; MIZUTANI, Y.; KIMURA, K.; SATO, A.; TODOROKI, A.; SUZUKI, Y.: Detection of in-plane fiber waviness in cross-ply CFRP laminates using layer selectable eddy current method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 82(2016) S.108–118
- [192] MIZUKAMI, K.: Eddy current technique for detection and size estimation of fiber waviness in carbon fiber

- reinforced composites. Tokyo: 2016. - PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, Department of Mechanical Sciences and Engineering
- [193] SALSKI, B.; GWAREK, W.; KOPYT, P.; THEODORAKEAS, P.; ET AL.: Portable Automated Radio-Frequency Scanner for Non-destructive Testing of Carbon-Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Nondestructive Evaluation* 35(2016) 2, S.25
- [194] FRAUNHOFER IKTS DRESDEN: Wirbelstromscanner EddyCus (R) MPECS. https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/forschung/el-elektronik_mikrosystemtechnik/pruef_und_analysesysteme/IKTS_EddyCus_MPECS_2014.pdf (5.10.2017)
- [195] FRAUNHOFER IKTS DRESDEN: 3D-Freiformscanner für bildgebendes Abrastern. https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/downloads/electronics_and_microsystems/systems_testing_analysis/IKTS_343_W_3D_Freiformscanner_2015-04-28_x.pdf (5.10.2017)
- [196] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. 3. Auflage, Berlin: Springer, 1993
- [197] XU, B.; YU, L.: Determining Fiber Orientation Distribution in Nonwovens with Hough Transform Techniques. *Textile Research Journal* 67(1997) 8, S.563–571
- [198] POURDEYHIMI, B.; KIM, H.S.: Measuring Fiber Orientation in Nonwovens: The Hough Transform. *Textile Research Journal* 72(2002) 9, S.803–809
- [199] ZHOU, G.-Q.; CHAN, P.; ZHENG, Y.-P.: Automatic measurement of pennation angle and fascicle length of gastrocnemius muscles using real-time ultrasound imaging. *Ultrasonics* 57(2015) Supplement C, S.72–83
- [200] POURDEYHIMI, B.; DENT, R.: Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part IV: Flow Field Analysis. *Textile Research Journal* 67(1997) 3, S.181–187
- [201] SIMONCELLI, E.P.; FARID, H.: Steerable wedge filters for local orientation analysis. *IEEE transactions on Image Processing* 5(1996) 9, S.1377–1382
- [202] ROBB, K.; WIRJADI, O.; SCHLADITZ, K.: Fiber Orientation Estimation from 3D Image Data: Practical Algorithms, Visualization, and Interpretation. In: *Proceedings. 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2007)*, 09.2007, pp. 320–325
- [203] WIRJADI, O.; SCHLADITZ, K.; RACK, A.; BREUEL, T.: Applications of anisotropic image filters for computing 2D and 3D-fiber orientations. In: *Stereology and Image Analysis–10th European Congress of ISS. 2009*, pp. 107–112
- [204] GERMAIN, C.: *Contribution à la caractérisation multi-échelle de l'anisotropie des images texturées*. Bordeaux: 1997. - PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I
- [205] JASPER, W.J.; POTLAPALLI, H.: Image Analysis of Mispicks in Woven Fabric. *Textile Research Journal* 65(1995) 11, S.683–692
- [206] RAVANDI, S.A.H.; TORIUMI, K.: Fourier Transform Analysis of Plain Weave Fabric Appearance. *Textile Research Journal* 65(1995) 11, S.676–683
- [207] XU, B.: Identifying Fabric Structures with Fast Fourier Transform Techniques. *Textile Research Journal* 66(1996) 8, S.496–506
- [208] TSAI, D.-M.; HSIEH, C.-Y.: Automated surface inspection for directional textures. *Image and Vision Computing* 18(1999) 1, S.49–62
- [209] SAKAGUCHI, A.; KIM, H.; MATSUMOTO, Y.-I.; TORIUMI, K.: Woven Fabric Quality Evaluation Using Image Analysis. *Textile Research Journal* 70(2000) 11, S.950–956
- [210] POURDEYHIMI, B.; DENT, R.; DAVIS, H.: Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part III: Fourier Transform. *Textile Research Journal* 67(1997) 2, S.143–151
- [211] JAFARI-KHOUZANI, K.; SOLTANIAN-ZADEH, H.: Radon transform orientation estimation for rotation invariant texture analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 27(2005) 6, S.1004–1008
- [212] TÁPIAS, M.; RALLÓ, M.; ESCOFET, J.: Automatic measurements of partial cover factors and yarn diameters in fabrics using image processing. *Textile Research Journal* 81(2011) 2, S.173–186
- [213] SCHAUB, N.J.; GILBERTA, R.J.; KIRKPATRICKA, S.J.: Electrospun fiber alignment using the radon transform. In: *Proc. of SPIE Vol. 2011*, p. 78971D–1
- [214] SCHAUB, N.J.; KIRKPATRICK, S.J.; GILBERT, R.J.: Automated Methods to Determine Electrospun Fiber Alignment and Diameter Using the Radon Transform. *BioNanoScience* 3(2013) 3, S.329–342

-
- [215] PRESS, W.; TEUKOLSKY, S.; VETTERLING, W.; FLANNERY, B.: Numerical Recipes in C. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- [216] BUZUG, T.M.: Einführung in die Computertomographie: mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [217] GROßMANN, K.: Projekt EFFEKT - Effiziente Fertigungsprozesse für endkonturnahe Thermoplastverbundbauteile. Dresden: Kolloquium an der TU Dresden, 2010
- [218] MODIFIED PLANET: Edelbrock Strut Bar for 2005 to 2010 Ford Mustang GT. <http://www.modifiedplanet.com/edelbrock-strut-bar-2005-2010-ford-mustang-gt/> (9.12.2017)
- [219] BARDL, G.; NOCKE, A.; HÜBNER, M.; GEREKE, T.; ET AL.: Analysis of the 3D draping behavior of carbon fiber non-crimp fabrics with eddy current technique. Composites Part B: Engineering (2017)
- [220] DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; DIESTEL, O.; KRZYWINSKI, S.; CHERIF, C.: Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation. Journal of Industrial Textiles (2013)
- [221] HÜBNER, M.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Modeling of multiaxial non-crimp fabrics. Vortrag, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, 20.7 2014

In dieser Dissertation wird ein Verfahren zur Messung der Faserorientierung in mehrlagigen, dreidimensionalen Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und den zu ihrer Herstellung verwendeten, trockenen Carbonfaser-Vorformlingen (Preforms) entwickelt.

Grundlage hierfür ist die Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung, die eine Darstellung der leitfähigen Carbonfäden in den einzelnen Lagen erlaubt. Hierauf aufbauend wird in einem ersten Schritt ein Roboter-Bahnplanungsverfahren zur vollständigen Erfassung beliebiger 3D-Oberflächen entwickelt, mit dem eine 3D-Wirbelstrommessung durchgeführt wird.

Aus dem erhaltenen 3D-Wirbelstrombild wird anschließend die lokale Faserorientierung in den einzelnen Lagen mit einem Bildverarbeitungsverfahren gemessen und die 3D-Verläufe einzelner Fäden werden rekonstruiert. Die gemessenen Faserorientierungen werden als Input für die Struktursimulation sowie zur Prozessoptimierung verwendet.