

## Andreas Frommknecht

»3D Texturanalyse von Computertomographie-  
daten für die automatisierte Qualitätskontrolle  
von faserverstärkten Kunststoffen«





**Andreas Frommknecht**

»3D Texturanalyse von Computertomographiedaten für die automatisierte  
Qualitätskontrolle von faserverstärkten Kunststoffen«

**Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup>Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup>Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-1101  
info@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

**D 93**

2022

**Druck und Weiterverarbeitung:**

Fraunhofer Verlag, Mediendiensteleistungen, Stuttgart, 2022  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet,  
unter folgender Creative-Commons-Lizenz:  
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen  
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

**3D Texturanalyse von Computertomographiedaten für  
die automatisierte Qualitätskontrolle von  
faserverstärkten Kunststoffen**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von**

**Andreas Frommknecht**

**aus München**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Dezember 2021

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und  
Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart

2022



# Vorwort und Danksagung des Autors

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in der Abteilung Bild- und Signalverarbeitung entstanden. Insbesondere das BMBF Projekt FaserInspekt und das EU Projekt QualiFibre haben die thematische Arbeit der hier niedergelegten Ergebnisse massiv vorangebracht.

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater und Hauptberichter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl für die Betreuung meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer danke ich für die Übernahme der Funktion als Mitberichter und seine hilfreichen Hinweise. Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen am Fraunhofer IPA bedanken. Das gemeinsame Arbeiten und die gemeinsamen Gespräche haben entscheidend geholfen mein wissenschaftliches Vorgehen zu schärfen und stetig zu verbessern. Insbesondere danke ich meiner Kollegin Frau Dr.-Ing. Julia Denecke für ihre zahlreichen Korrekturen und hilfreichen Ratschläge. Auch Frau Dr.-Ing. Ira Effenberger und Herr Prof. Dr.-Ing. Nico Blessing waren durch ihre Korrekturen und wichtigen Hinweise eine große Hilfestellung. Frau Dr.-Ing. Ira Effenberger hat als meine langjährige Gruppenleiterin entscheidend zu meiner wissenschaftlichen Entwicklung beigetragen. Meinem ehemaligen Kollegen Herrn Sascha Getto gilt mein Dank für seine vielen hilfreichen Tipps hinsichtlich der Textsetzung und der Einhaltung der formalen Vorgaben. Meinem Kollegen Guido Kreck danke ich für die Durchführung und Zurverfügungstellung in der Arbeit genutzter  $\mu$ -CT Aufnahmen.

Auch bei meiner Familie möchte ich mich für ihre Unterstützung und Hilfe in der langen Zeit bis zur finalen Erstellung der Dissertation bedanken. Namentlich sind dies mein Vater Herr Egbert Frommknecht und meine Ehefrau Catrin Schuster.

Widmen möchte ich diese Arbeit meiner leider bereits verstorbenen Mutter Jeanette Hölzel.

Stuttgart, im März 2021

Andreas Frommknecht





# Kurzzinhalt

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Qualität von Faserverbundkunststoffen. Faserverbundkunststoffe sind moderne Leichtbaumaterialien, die sich durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auszeichnen. Aufgrund dieser Eigenschaften werden sie oft in der Automobil- und Luftfahrtindustrie eingesetzt. Die Verwendung in diesen sicherheitskritischen Bereichen erfordert umfassende zerstörungsfreie Prüfmethoden. In der Arbeit wird dargelegt, dass die röntgenbasierte industrielle Computertomographie unter den zerstörungsfreien Prüfmethoden die umfangreichsten Informationen liefert.

Die objektive und auch quantitative Auswertung von Computertomographiedaten stellt eine Herausforderung dar. Es wird auf verschiedene geeignete Methoden insbesondere zur Erkennung von Defekten und der Analyse der Faserorientierung eingegangen. Anhand der jeweiligen Schwächen dieser Verfahren wird die zu lösende Problemstellung abgeleitet. Die in der zweidimensionalen Bildverarbeitung weit verbreitete Texturanalyse stellt sich hierbei als geeignete Basis heraus, diese Probleme zu adressieren. Allerdings ist ein zweidimensionales Verfahren nicht ausreichend, um die komplexe dreidimensionale Struktur von Faserverbundkunststoffen zu erfassen. Deshalb wird in der Arbeit eine neu entwickelte 3D Texturanalyse vorgestellt, die sowohl in der Lage ist Defekte zu erkennen, als auch Faserorientierungen zu bestimmen. Auch quantitative Informationen, wie die Defektposition und -größe, sind aus den erzielten Ergebnissen des entwickelten Verfahrens ableitbar.

Die in C++ implementierte 3D Texturanalyse zeigt bei der systematischen Untersuchung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Defekterkennung und Bestimmung der Faserorientierung gute Auswertungsergebnisse. Die Laufzeit des Verfahrens kann aufgrund der großen zu verarbeitenden Datenmenge bei der Computertomographie von wenigen Minuten auf über eine Stunde ansteigen. Hier sind weitere Optimierungen notwendig. Allgemein zeigt diese Arbeit, dass das umgesetzte Verfahren, nur durch Änderung der Parametrierung, sowohl zur Analyse der Struktur in Form der Faserorientierung, als auch zur Defekterkennung geeignet ist.

# Short summary

The present thesis deals with the examination of the quality of fibre-reinforced plastics. Fibre-reinforced plastics are modern lightweight materials, which offer a high stiffness and strength. Due to these properties, they are widespread in automotive and aerospace industry. These are safety areas, which require comprehensive non-destructive testing methods. This thesis outlines, that industrial X-ray computer tomography offers the most comprehensive information compared to other non-destructive testing methods.

The objective and quantitative evaluation of computed tomography data is a challenge. Different methods especially for defect detection and analysis of fibre orientation are presented. The specific weaknesses of each of these methods leads to the addressed problems. The in 2D image processing widespread texture analysis turns out to be an appropriated base to solve these problems. However, a 2D method is not sufficient to analyse the complex 3D structure of fibre-reinforced plastics. Therefore, this thesis presents a newly developed 3D texture analysis, which detects defects and determines fibre orientation. Also quantitative information, like defect position and size, can be derived from the achieved results of the developed method.

Systematic evaluation of the in C++ implemented 3D texture analysis shows positive results considering defect detection and determination of fibre orientation. Due to the large size of computed tomography data sets, the run time of the algorithm can increase from a few minutes to more than an hour. Future optimizations are necessary to address this. In general, this thesis makes clear, that the implemented algorithm is able to analyse the structure, in form of the fibre orientation, or detect defects, only by changing the parameter set.

# Inhaltsverzeichnis

Glossar, Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	14
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	19
1 Einleitung	20
1.1 Ausgangssituation . . . . .	20
1.2 Problemstellung und Motivation . . . . .	21
1.3 Lösungsansatz und Zielsetzung . . . . .	22
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	22
2 Stand der Technik	24
2.1 Grundlagen Faserverbundkunststoffe . . . . .	24
2.1.1 Einteilung und Bezeichnungen . . . . .	25
2.1.2 Eigenschaften . . . . .	25
2.1.2.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	26
2.1.2.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften . . . . .	27
2.1.3 Einsatzbereich . . . . .	28
2.1.4 Herstellungsverfahren . . . . .	28
2.1.5 Typische Fehler . . . . .	32
2.2 Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Faserverbundkunststoffe . . . . .	35
2.2.1 Ultraschallprüfung . . . . .	35
2.2.2 Thermographie . . . . .	37
2.2.3 Shearographie . . . . .	40
2.2.4 Wirbelstromverfahren . . . . .	41
2.2.5 Terahertzprüfung . . . . .	42

---

2.2.6	Computertomographie . . . . .	43
2.2.6.1	Volumendaten . . . . .	44
2.2.6.2	CT-Systemvarianten . . . . .	45
2.2.6.3	Einsatzgebiete . . . . .	45
2.2.7	Fazit . . . . .	48
2.3	Analysemethoden für Computertomographiedaten von Faserverbundkunststoffen . . . . .	49
2.3.1	Porositätsanalyse . . . . .	49
2.3.2	Analyse der Faserorientierung . . . . .	53
2.3.2.1	Binarisierungsverfahren . . . . .	54
2.3.2.2	Eigenwertmethode . . . . .	55
2.3.2.3	Verwendung von Anisotropen Gaußfiltern . . . . .	56
2.3.3	Weitere Analyseverfahren für CT-Daten von Faserverbundkunststoffen	57
2.4	Texturanalyse . . . . .	57
2.4.1	Einsatzgebiet . . . . .	58
2.4.2	Verfahren zur Texturbestimmung . . . . .	59
2.4.2.1	Grauwertmatrizen . . . . .	59
2.4.2.2	Abgeleitete Größen . . . . .	61
2.4.2.3	Erweiterung von Grauwertmatrizen auf Volumendaten . . . . .	62
2.4.3	Analyse von Texturen . . . . .	63
2.4.3.1	Varianten . . . . .	63
2.4.3.2	2D Split-and-Merge Verfahren zur texturbasierten Segmentierung . . . . .	64
2.5	Fazit Stand der Technik . . . . .	66
3	Anforderungen, Konzeption und Systementwurf . . . . .	68
3.1	Motivation . . . . .	68
3.2	Anforderungen, Bewertung und Auswahl Prüfmethode . . . . .	69
3.2.1	Anforderungen an Prüfverfahren . . . . .	69
3.2.2	Eignung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Faserverbundkunststoffe	70
3.2.2.1	Ultraschallprüfung . . . . .	70

---

3.2.2.2	Thermographie . . . . .	71
3.2.2.3	Shearographie . . . . .	71
3.2.2.4	Wirbelstromverfahren . . . . .	72
3.2.2.5	Terahertzprüfung . . . . .	72
3.2.2.6	Computertomographie . . . . .	73
3.2.3	Auswahl Prüfmethode . . . . .	73
3.3	Anforderungen, Bewertung und Konzeption Algorithmus . . . . .	74
3.3.1	Anforderungen an Algorithmus . . . . .	74
3.3.2	Bewertung der Analyseverfahren für CT-Daten von Faserverbund- kunststoffen . . . . .	75
3.3.2.1	Fehlerdetektion . . . . .	75
3.3.2.2	Analyse der Qualitätseigenschaften . . . . .	76
3.3.2.3	Fazit . . . . .	77
3.3.3	Konzept für Algorithmus . . . . .	77
3.4	Systementwurf des Algorithmus . . . . .	79
3.4.1	Einlesen CT-Daten und Datenvorbereitung . . . . .	80
3.4.2	Texturbestimmung und Generierung Analyseinformation . . . . .	80
3.4.3	Nachbearbeitung und Speicherung . . . . .	81
4	3D Texturanalyse . . . . .	82
4.1	3D Split-and-Merge Verfahren . . . . .	82
4.1.1	Einlesen der Metainformationen . . . . .	84
4.1.2	Erstellung Baumstruktur . . . . .	84
4.1.3	Berechnung Grauwertmatrizen . . . . .	88
4.1.4	Region Growing: Zusammenfassen der Volumenteile . . . . .	88
4.1.4.1	Ähnliche Texturen . . . . .	88
4.1.4.2	Zusammenfassen von Kindsknoten . . . . .	89
4.1.4.3	Durchlaufen der Baumstruktur . . . . .	89
4.1.5	Region Growing: Gruppierung . . . . .	90
4.1.5.1	Eigenschaften der Knoten . . . . .	90
4.1.5.2	Nachbarknoten . . . . .	91

---

4.1.5.3	Gruppen-ID . . . . .	93
4.1.5.4	Diagonal angrenzende Nachbarknoten . . . . .	97
4.1.6	Region Growing: Eliminierung kleiner Volumina . . . . .	100
4.1.7	Speichern des Analyseergebnisses . . . . .	101
4.1.7.1	Speichern der Grenzflächen . . . . .	102
4.1.7.2	Speichern der Anzahl der geschlossenen Seitenflächen . . . . .	102
4.1.7.3	Maximale Ausdehnung . . . . .	103
4.1.7.4	Filterung . . . . .	106
4.2	Ergebnisse der 3D Texturanalyse und deren Darstellung . . . . .	107
4.2.1	3D Texturanalyse als Mittel zur Erkennung von Defekten in Volumendaten von Faserverbundkunststoffen . . . . .	107
4.2.1.1	Markierung der Grenzflächen . . . . .	108
4.2.1.2	Darstellung der Anzahl geschlossener Grenzflächen . . . . .	109
4.2.2	3D Texturanalyse als Mittel zur Analyse der Faserorientierung in Volumendaten von Faserverbundkunststoffen . . . . .	113
4.2.2.1	Korrespondenz zwischen maximaler Ausdehnung und Faserorientierung . . . . .	113
4.2.2.2	Filterung . . . . .	116
4.2.2.3	Darstellung und deren Interpretation . . . . .	118
4.2.2.4	Anmerkung . . . . .	119
5	Einordnung und Bewertung des entwickelten Verfahrens . . . . .	121
5.1	Einsatzmöglichkeiten der 3D Texturanalyse . . . . .	121
5.2	Grenzen und Einschränkungen . . . . .	124
5.3	Vergleich mit Stand der Technik . . . . .	126
5.4	Untersuchung der Leistungsfähigkeit . . . . .	127
5.4.1	Bestimmung der Faserorientierungen . . . . .	128
5.4.1.1	Unterscheidung der Orientierung . . . . .	128
5.4.1.2	Voxelauflösung der Volumendaten . . . . .	134
5.4.2	Lokalisation und Größenbestimmung von Defekten . . . . .	136

---

5.4.3	Laufzeitanalyse . . . . .	140
5.4.3.1	Laufzeit Faserorientierung . . . . .	140
5.4.3.2	Laufzeit Defekterkennung . . . . .	141
5.4.3.3	Vergleich Laufzeit Faserorientierung und Defekterkennung	142
5.4.3.4	Fazit und Anmerkungen . . . . .	143
6	Zusammenfassung und Ausblick	146
6.1	Zusammenfassung . . . . .	146
6.2	Ausblick . . . . .	148
6.2.1	Optimierungen . . . . .	148
6.2.2	Weiterentwicklung . . . . .	150
	Literatur	152

# Glossar, Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$\#M$	Anzahl Elemente einer Menge $M$
$\lfloor x \rfloor$	Untere Gaußklammer, gibt den abgerundeten ganzzahligen Wert der Zahl $x$ an
$\ v\ $	Euklidische Norm eines Vektors $v$
$a \sim b$	Direkte Proportionalität zwischen $a$ und $b$
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CT	Röntgen-Computertomographie
Endknoten	Knoten in Baumstruktur ohne Kindsnoten
Faserorientierung	Dreidimensionale Richtung der Fasern
FVK	Faserverbundkunststoff
Geschwisterknoten	Bezeichnung der Knoten in Baumstruktur, die zum gleichen Vaterknoten gehören
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
Grauwertmatrizen	Matrizen die zur Berechnung von Texturen verwendet werden
Grenzfläche	Geschlossene Seitenfläche eines quaderförmigen Volumenteils



---

Inlinefähig/ -tauglich	Für den Einsatz bspw. in einer Produktionslinie (Inlineeinsatz) geeignet, ohne den Produktionsprozess selbst zu behindern
IR	Infrarotstrahlung
Kavität	Negativform bei der umformenden Bearbeitung
Kindsknoten	Bezeichnung der Beziehung eines Knotens zu seinem direkt vorhergehenden Knoten in Baumstruktur
LFI	Lang-Faser Injektion
Max. Ausdehnungsdimension	Dimension, in deren Richtung die maximale Ausdehnung eines Knotens verläuft
Minimum der Dimensionen	Definiert in Kombination mit Schwellwert den Zerlegungsgrad eines Volumendatensatzes bei der 3D Texturanalyse
Nachbarknoten	Knoten, der direkt an den betrachteten Knoten angrenzt
Nachfolgeknoten	Bezeichnung der Beziehung eines Knotens zu der durch seine Aufteilung innerhalb einer Baumstruktur entstehenden Knoten
Positionsnummer	Nummer eines Kindsknoten, die die Position innerhalb seines Vaterknotens angibt
Preform	Vorformling der Faserverbundkunststoffe
ROI	Region of Interest
Rovings	Faserbündel
RTM	Resin Transfer Moulding
Segment	Ein Segment ist eine Menge zusammenhängender Knoten, bei denen jeweils benachbarte Knoten durch offene Seitenflächen verbunden sind.

US	Ultraschallprüfung bzw. Ultraschall
Vaterknoten	Bezeichnung der Beziehung eines Knotens zu seinem direkt nachfolgenden Knoten in Baumstruktur
Vorgängerknoten	Bezeichnung der Beziehung eines Knotens zu einem Knoten, zu dessen Aufteilung innerhalb einer Baumstruktur er gehört
Voxel	Dreidimensionales Analogon eines Pixels
Voxelauflösung	Kantenlänge eines Voxels

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Bedarf CFK . . . . .	21
2.1	Aufbau eines Laminats . . . . .	26
2.2	Steifigkeit und Festigkeit eines GFK abhängig von der Zugbelastungsrichtung	27
2.3	GFK mit Delamination . . . . .	32
2.4	GFK-Rotorblatt mit sichtbarer Ondulation . . . . .	32
2.5	CFK-Platte mit sichtbarem Oberflächenriss . . . . .	33
2.6	Computertomographiebild eines CFK-Bauteils mit Faserverschiebung . . . . .	33
2.7	Computertomographieschnittbild eines CFK-Rohrs mit mehreren Poren . . . . .	34
2.8	Trockenstelle einer GFK-Platte . . . . .	34
2.9	Ultraschallprüfarten . . . . .	36
2.10	Ultraschallbild einer GFK-Platte . . . . .	37
2.11	Übersicht Thermographiemethoden . . . . .	38
2.12	Thermographiebild eines CFK-Rohrs mit Schlagschaden . . . . .	40
2.13	Aufnahmeprinzip bei der Computertomographie . . . . .	44
2.14	CT-Aufnahme Faserbrüche CFK-Bauteil . . . . .	46
2.15	Computertomograph . . . . .	48
2.16	Globaler Schwellwert für Porositätsanalyse . . . . .	50
2.17	Bestimmung lokaler Schwellwert für Porositätsanalyse . . . . .	51
2.18	Vergleich zwischen ursprünglichem CT-Schnittbild und Porositätsanalyseergebnis	52
2.19	Darstellung der Faserorientierung . . . . .	53
2.20	Darstellung des Analyseergebnis der Faserorientierung . . . . .	54
2.21	Binarisierung als Methode zur Bestimmung der Faserorientierung . . . . .	55
2.22	Texturbeispiele . . . . .	58
2.23	Beispiel für Grauwertmatrix . . . . .	60
2.24	Nachbarschaftsbeziehung bei Volumendaten . . . . .	63
2.25	Segmentierung durch Split-and-Merge Verfahren . . . . .	66

---

3.1	Systementwurf . . . . .	79
4.1	Gesamtablauf . . . . .	83
4.2	Aufteilungsschritt des Volumens . . . . .	84
4.3	Baumstruktur zur Speicherung der Volumenaufteilung . . . . .	87
4.4	Nachbarknoten . . . . .	92
4.5	Nachbarknoten ist kein Geschwisterknoten . . . . .	95
4.6	Identifizierung Vorgängerknoten . . . . .	96
4.7	2D und 3D Beispiel für diagonal angrenzende Nachbarknoten . . . . .	98
4.8	2D Beispiel für ein Segment und dessen Übergänge . . . . .	104
4.9	Darstellung der Grenzflächen für Defekterkennung . . . . .	109
4.10	Darstellung anhand Anzahl geschlossener Seitenflächen für Defekterkennung	110
4.11	Darstellungs- und Ansichtsvarianten anhand Anzahl geschlossener Seitenflächen für Defekterkennung . . . . .	111
4.12	Darstellungsform: Maximale Ausdehnung, Schnittbild . . . . .	114
4.13	Darstellungsform: Maximale Ausdehnung, perspektivisch . . . . .	115
4.14	Darstellungsform: Maximale Ausdehnung, Schnittbild mit Filterung . . . . .	117
4.15	Darstellungsform: Maximale Ausdehnung, perspektivisch, Vergleich mit und ohne Filterung . . . . .	118
5.1	Erkennung von Einschlüssen . . . . .	123
5.2	Texturunterschiede im Randbereich . . . . .	125
5.3	Faserorientierung in Richtung der Hauptachsen . . . . .	131
5.4	Faserorientierung nach Transformationen . . . . .	133
5.5	Voxelauflösung und Faserorientierung . . . . .	134
5.6	Zusammenhang Voxelauflösung und Faserorientierung . . . . .	136
5.7	Defektanalyse . . . . .	138
5.8	Laufzeit in Vergleich zu Dateigröße . . . . .	142

# Tabellenverzeichnis

2.1	Bedarf CFK . . . . .	25
2.2	Eignung zerstörungsfreier Prüfmethode . . . . .	48
4.1	Maximale Ausdehnung und Orientierung . . . . .	119
5.1	Orientierung bei Transformation . . . . .	129
5.2	Orientierung und Voxelauflösung . . . . .	135
5.3	Defektanalyse . . . . .	137
5.4	Laufzeitanalyse Faserorientierung . . . . .	140
5.5	Laufzeitanalyse Defekterkennung . . . . .	141

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Faserverbundkunststoffe (FVK) stellen heutzutage und auch zukünftig ein wichtiges Material in verschiedenen industriellen Bereichen dar. Dies zeigt sich auch in und durch zahlreiche Studien und Veröffentlichungen. Hierzu gehören u.a. Leichtbau BW GmbH 2014a, Leichtbau BW GmbH 2014b, MarketsandMarkets 2017a, MarketsandMarkets 2017b, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH 2015 und Witten et al. 2018.

Faserverbundkunststoffe zeichnen sich dadurch aus, gleichzeitig leicht und stabil zu sein und gehören somit zu den Leichtbaumaterialien. Ihre Eigenschaften machen sie besonders relevant für die Automobilindustrie und die Luftfahrt, aber auch im Windkraftbereich haben sie eine hohe Bedeutung. Sowohl Airbus S.A.S. als auch die Boeing Company setzen mittlerweile auf Flugzeugmodelle, die überwiegend aus FVK (in diesem Fall aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen) anstatt aus Aluminium bestehen (Spaeth 2018). Die mit ihnen verbundene Energieeinsparung im Transportbereich wirkt sich auch positiv auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus.

Die gebräuchlichsten FVK-Varianten sind Glasfaser- (GFK) und Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Das Produktionsvolumen lag bei GFK in den Jahren von 2000 bis 2017 mit Werten um eine Millionen Tonnen pro Jahr in Europa gleichbleibend hoch, wobei Deutschland in den letzten Jahren mit über 200 Tausend Tonnen pro Jahr hierbei eine führende Rolle in Europa hat. Im Gegensatz zu den gleichbleibend hohen Werten von GFK, ist das Produktionsvolumen von CFK deutlich geringer. Dies liegt vor allem an dem vergleichsweise hohen Preisniveau der Kohlenstofffasern. Es wird aber, u.a. laut einer Studie des Carbon Composites e.V. (Witten et al. 2018), bei CFK bis 2022, wie auch in den vergangenen Jahren ein starkes Wachstum auf bis zu 199 Tausend Tonnen weltweit erwartet, siehe Abbildung 1.1. Hierbei sind die Luft- und Raumfahrt, die Verteidigung sowie die Automobilindustrie weltweit die Hauptumsatztreiber. In der Automobilindustrie wurde bis 2020 eine Steigerung auf über 59 Tausend Tonnen erwartet (Statista GmbH 2018).

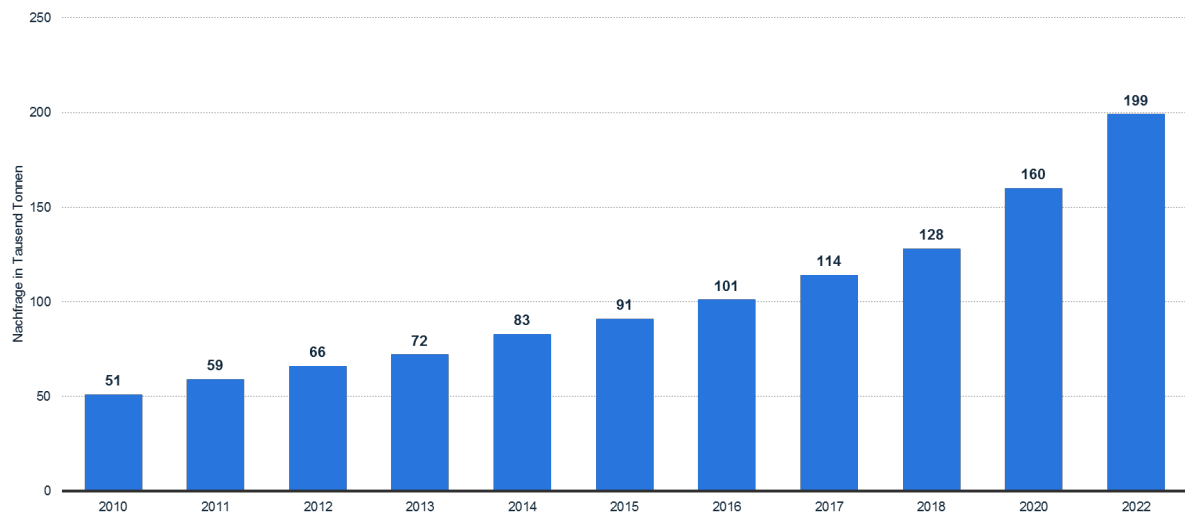


Abbildung 1.1: Bisheriger (2010–2017) und prognostizierter CFK Bedarf (Quelle: Statista GmbH 2018)

## 1.2 Problemstellung und Motivation

Trotz der Entwicklung in der Produktion von FVK von Kleinserien zu Großserien bis zur Massenfertigung werden Teilarbeitsschritte des Herstellungsprozesses nach wie vor oft manuell ausgeführt. Der Einsatz der Materialien in sicherheitskritischen Bereichen, sowie die Fehleranfälligkeit händisch durchgeführter Tätigkeiten, machen die rechtzeitige Erkennung von Defekten und Qualitätseigenschaften erforderlich. Eine der wichtigsten Qualitätseigenschaften ist hierbei die Faserorientierung. Diese ist abhängig vom gewählten Herstellungsverfahren und dessen Ergebnis ist nicht verlässlich prognostizierbar.

Durch die häufig von den Herstellern ohne technische Hilfsmittel rein optisch vorgenommene Qualitätskontrolle der Bauteile ist eine umfassende und vollständige Prüfung nicht gewährleistet. Viele relevante Defekte und Qualitätseigenschaften sind von außen nicht erkennbar. Somit sind umfassende Prüfmethode zur adäquaten Qualitätskontrolle notwendig, welche auch die inneren Strukturen der Bauteile sichtbar machen können. Diese können zerstörend oder zerstörungsfrei sein, wobei die zerstörungsfreie Prüfung zu bevorzugen ist. Diese Form der Qualitätssicherung wird u.a. vom VDI als eines der zentralen Forschungsgebiete im Leichtbau gesehen (VDI ZRE 2015). Außerdem gibt es einen Bedarf an intelligenten und automatisierten Auswerteverfahren der erzeugten Daten. Die Entwicklung solcher Verfahren ist wichtig, um Fehlstellen und Eigenschaften der Bauteile zu quantifizieren. Die Automatisierung der Qualitätskontrolle leistet einen entscheidenden Beitrag zur

objektiven Bewertung der Materialien. Aufgrund mangelnder Erfahrung und Berechnungsmöglichkeiten werden oft bei der Konstruktion und Auslegung von FVK-Bauteilen hohe Sicherheitsfaktoren angesetzt. Durch eine objektive und reproduzierbare Bewertung ließen sich diese Faktoren überprüfen und eventuell reduzieren.

### 1.3 Lösungsansatz und Zielsetzung

Das Themengebiet der vorliegenden Arbeit ist die automatisierte Qualitätskontrolle von Faserverbundkunststoffen. Zunächst muss hierfür eine möglichst umfassende Prüfmethode ausgewählt werden. Es wird dargelegt, dass die Computertomographie das geeignetste Verfahren darstellt. Die von ihr erzeugten Volumendaten sollen intelligent und automatisiert hinsichtlich ihrer Aussagekraft bezüglich der Qualität der FVK ausgewertet werden. Die regelmäßige Struktur der FVK legt nahe, hierzu texturbasierte Verfahren zu verwenden. Es wird untersucht, ob sich diese meist für zweidimensionale Daten angewandte Verfahren auf Volumendaten, insbesondere von FVK, übertragen lassen. Die Qualität der erzielbaren Auswertungsergebnisse wird anschließend beurteilt. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist somit die Entwicklung eines texturbasierten Auswertalgorithmus zur automatischen Defekterkennung und Qualitätsbestimmung von FVK auf Basis von CT-Daten. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf deren Faserorientierung als eines der wesentlichsten Qualitätsmerkmale der FVK gelegt.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im nachfolgenden Kapitel 2 auf FVK im Allgemeinen eingegangen. Hierbei stehen deren spezielle Eigenschaften und Einsatzbereiche im Vordergrund. Um das Entstehen typischer Fehler nachvollziehbar zu machen, werden die Herstellungsverfahren der FVK betrachtet.

Im Weiteren wird ein Überblick über häufig für die zerstörungsfreie Prüfung von FVK eingesetzte Methoden gegeben. Hierbei wird die Röntgen-Computertomographie (CT) detailliert betrachtet. Die von ihr erzeugten Daten stellen die Grundlage für den neu entwickelten Algorithmus dar. In diesem Zusammenhang werden speziell für CT-Daten programmierte



Auswerteverfahren sowie die allgemein einsetzbare Texturanalyse vorgestellt.

In Kapitel 3 wird auf Grundlage des dargelegten Stands der Technik die Konzeption für das zu entwickelnde Prüfverfahren entworfen. Durch den Vergleich mit anderen Verfahren und die Betrachtung deren Defizite, wird der Einsatz der CT begründet. Außerdem werden die zuvor vorgestellten Analyseverfahren bewertet. Der abschließend vorgestellte Lösungsansatz versucht die identifizierten Schwachstellen zu überwinden. Dies führt zu dem in Kapitel 4 detailliert beschriebenen 3D Texturanalyseverfahren. Hierbei wird ein bereits erfolgreich im Zweidimensionalen eingesetztes Verfahren auf die Prüfung von CT-Daten von FVK übertragen. Es werden außerdem verschiedene Ergebnisdarstellungen des Algorithmus vorgestellt. Je nach Augenmerk auf Defekte oder Faserorientierung werden passende Darstellungsformen präsentiert.

In Kapitel 5 wird das entwickelte Verfahren hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit eingeordnet und bewertet. Es werden dessen Möglichkeiten, Grenzen und Einschränkungen beleuchtet. Außerdem wird ein Vergleich zum Stand der Technik gezogen. Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wird zu dessen Validierung systematisch hinsichtlich Auflösungsfähigkeit der Faserorientierung, Größenbestimmung und Lokalisation von Defekten sowie Laufzeit untersucht.

Im abschließenden Kapitel 6 wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Optimierung und Weiterentwicklung des entwickelten Verfahrens gegeben.

## 2 Stand der Technik

In Abschnitt 2.1 dieses Kapitels soll zunächst ein Überblick über die Herstellung, Eigenschaften, Relevanz, Einsatzmöglichkeiten und typische Fehler von Faserverbundkunststoffen gegeben werden. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 auf zerstörungsfreie Prüfmethode von Faserverbundkunststoffen, insbesondere die Computertomographie, eingegangen. In Abschnitt 2.3 werden typische Analyseverfahren für Computertomographiedaten vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 das im Allgemeinen für die Analyse von 2D-Bildern eingesetzte Texturanalyseverfahren beschrieben.

### 2.1 Grundlagen Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe (oft auch Faserverbundwerkstoffe) sind Kunststoffmaterialien, die mit Fasern verstärkt werden. Einen Überblick über deren Bezeichnungen, Herstellungsverfahren, Eigenschaften und Relevanz geben u.a. Mathes & Witten 2014 und Lässig et al. 2012. Als Material für die Fasern werden Glas, Kohlenstoff oder Aramid verwendet. Teilweise werden auch Naturfasern eingesetzt. Die mit Abstand häufigsten Materialien sind Glas und Kohlenstoff, wobei Glasfasern mit ca. 90 % den Hauptanteil am heutigen Verbundwerkstoffmarkt ausmachen. Für diese beiden Materialien werden die Abkürzungen CFK (Kohlenstofffaserverstärkter bzw. Carbonfaserverstärkter Kunststoff) und GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) verwendet. Aramid hat lediglich einen geringen Anteil an der Gesamtproduktion.

Faserverbundkunststoffe sind ein Wachstumsmarkt. Insbesondere bei CFK werden große Wachstumsraten erwartet. Eine gemeinsame Studie des VDMA Forum Composite Technology und Roland Berger Strategy Consultants (Lässig et al. 2012) ging davon aus, dass die jährliche Wachstumsrate in diesem Bereich bis 2020 bei 17 % liegt. In der Automobilindustrie wurde sogar von einer jährlichen Steigerung von 30 % ausgegangen. Auch wenn sich die prognostizierte Gesamtwachstumsrate von 17 % in den letzten Jahren nicht immer in diesem Maße bestätigt hat, liegt sie doch konsequent um und über 10 % und

wird auch zukünftig in Prognosen bis 2022 auf diesem Niveau oder höher erwartet (Witten et al. 2018, MarketsandMarkets 2017b), siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Bisheriger (2010–2017) und prognostizierter Bedarf von CFK (Quelle: Witten et al. 2018)

Jahr	Nachfrage in Tausend Tonnen	Jährliche Wachstumsrate
2010	51	–
2011	59	15,69 %
2012	66	11,86 %
2013	72	9,09 %
2014	83	15,28 %
2015	91	9,64 %
2016	101	10,99 %
2017	114	12,87 %
2018	128	12,28 %
2020	160	11,80 %
2022	199	11,52 %

### 2.1.1 Einteilung und Bezeichnungen

Man unterscheidet zwischen kurz-, lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen. Kurz- und Langfasern haben eine Länge von wenigen Millimetern bis zu 50 mm. Im Gegensatz dazu spricht man von Endlosfasern, wenn deren Länge nur durch die Größe des Bauteils limitiert wird. Für nicht tragende Elemente wie beispielsweise Dekorationen werden Glasfasern mit einem Durchmesser zwischen 5 und 13  $\mu\text{m}$  verwendet. Bei Materialien, in denen die Fasern zur Verstärkung dienen, werden Durchmesser von 9 bis 24  $\mu\text{m}$  verwendet (Blanc & Westenberger 2017). Kohlenstofffasern haben einen Durchmesser zwischen 5 und 15  $\mu\text{m}$  (Dauensteiner 2002, Wirjadi 2009). Bündel von Fasern werden als Rovings und der Kunststoff, der als Bindemittel der Faserverbundkunststoffe fungiert, wird als Matrix bezeichnet. Sie spielt sowohl bei der Herstellung als auch für die Eigenschaften der Materialien eine wichtige Rolle. Der polymere Grundstoff für die verwendeten Kunststoffe wird als Kunststoffharz oder nur als Harz bezeichnet.

### 2.1.2 Eigenschaften

FVK gehören zu der Familie der Leichtbaumaterialien. Sie sind ca. 40 % leichter als Aluminium und sogar bis zu etwa 80 % leichter als Stahl (VDI ZRE 2015). Gleichzeitig sind sie

stabil und besitzen eine erhöhte Steifigkeit. Dadurch ergeben sich zahlreiche neue Einsatzmöglichkeiten, bei denen klassische Leichtbaumaterialien bisher nicht oder zumindest nicht in großem Umfang eingesetzt werden konnten. Die erhöhte Steifigkeit und Festigkeit der Materialien, in eine durch die Faserorientierung vorgegebene Richtung, wird dabei gezielt ausgenutzt.

### 2.1.2.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von FVK werden in erster Linie durch die eingesetzten Fasern bestimmt. Bei den am häufigsten verwendeten Faserarten Kohlenstoff- und Glasfasern, zeigen die Kohlenstofffasern bessere mechanische Eigenschaften als die Glasfasern, sind aber auch deutlich teurer (Leichtbau BW GmbH 2014b). Die Matrix spielt nur eine untergeordnete Rolle und dient in erster Linie der Formhaltung und der Kraftübertragung zwischen den Fasern (Li 2012).

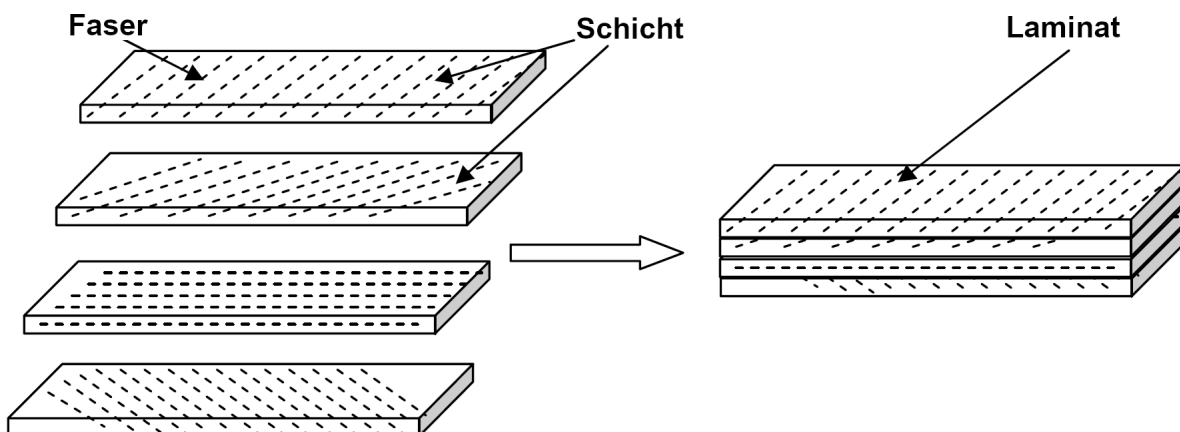


Abbildung 2.1: Beispielhafter Aufbau eines Laminats (Quelle: Li 2012, Bezeichnungen übersetzt)

Nachfolgende Aussagen beziehen sich jeweils auf unidirektionale Einzelschichten, das heißt eine Schicht eines FVK, in der alle Fasern in die gleiche Richtung laufen. Bei Verbundwerkstoffen mit verschiedenen Schichten und unterschiedlichen Faserorientierungen, sogenannten Laminaten (siehe Abbildung 2.1), ist es deutlich schwieriger allgemeine Aussagen zu Steifigkeit und Festigkeit zu treffen. Die klassische Laminattheorie befasst sich mit Aussagen über die mechanischen Eigenschaften dieser Materialien. Grundlage hierfür sind Kenntnisse über das Verhalten unidirektionaler Einzelschichten. Für diese lässt sich bezüglich Steifigkeit und Festigkeit das in Abbildung 2.2 gezeigte Verhalten festhalten. Es

handelt sich hierbei um einen GFK mit einem Faservolumenanteil von 60 %. Man erkennt, dass sowohl Steifigkeit als auch Festigkeit mit zunehmender Winkeldifferenz zwischen Zugbelastung und Faserorientierung massiv abnehmen. Die Faserorientierung ist somit ein entscheidendes Kriterium dafür, in welcher Richtung Zugkräfte aufgenommen werden können.

Im Gegensatz dazu spielt die Matrix eine wichtige Rolle bei der Aufnahme von Druck- und Schubkräften. Sie überträgt die Kräfte in die Fasern, fixiert die Lage der Fasern und dient somit der Formgebung und -erhaltung (Mathes & Witten 2014).

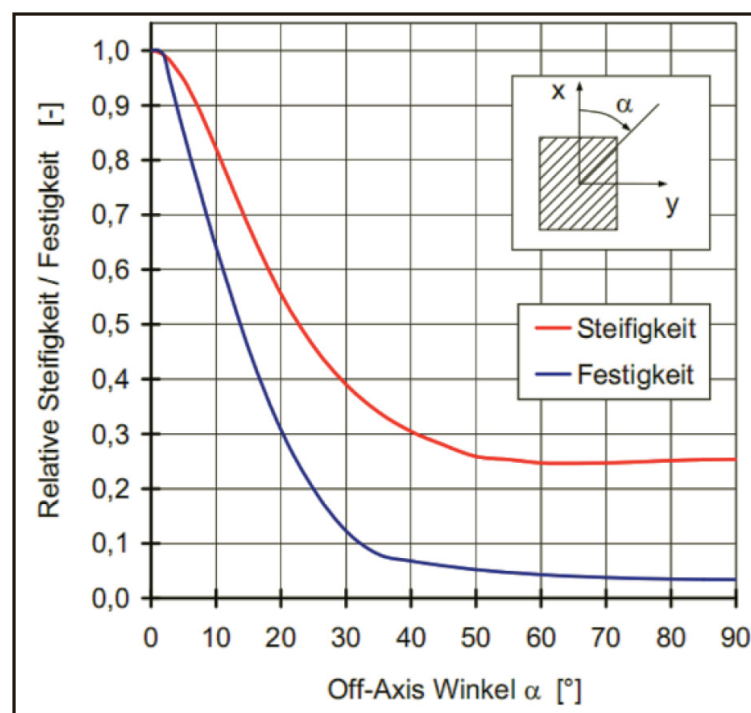


Abbildung 2.2: Darstellung der Steifigkeit und Festigkeit eines GFK abhängig von der Zugbelastungsrichtung (Quelle: Mathes & Witten 2014)

### 2.1.2.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften

Auch wenn der Einfluss der Matrix auf die mechanischen Eigenschaften der Verbundmaterialien vergleichsweise gering ist, spielt sie hinsichtlich der physikalisch-chemischen Eigenschaften eine wichtige Rolle. Dies betrifft insbesondere die Temperaturbeständigkeit, die chemische Beständigkeit und das Korrosionsverhalten (Lässig et al. 2012). Als Kunststoff werden für die Matrix häufig Duroplaste und Thermoplaste eingesetzt. Während Duroplaste

nach der Härtung nicht mehr verformbar sind, lassen sich Thermoplaste in bestimmten Temperaturbereichen verformen und härten nach dem Abkühlen wieder aus (Mathes & Witten 2014).

### 2.1.3 Einsatzbereich

Ihren Haupteinsatzbereich haben Faserverbundkunststoffe im Automobil- (beispielsweise für Fahrgastzellen aus CFK), Luftfahrt- (mit CFK-Anteilen von teilweise über 50 %) und Raumfahrtbereich. Im Bereich der Windenergie sind Rotorblätter meist aus GFK oder CFK (VDI ZRE 2015). Außerdem steigt der Anteil an faserverstärkten Materialien auch im Freizeit- und Sportbereich. Beispiele hierfür sind hochwertige Boote, Fahrradrahmen, Tennis- und Golfschläger. Selbst im Maschinen- und Anlagenbau wird Faserverbundkunststoffen mittlerweile ein hohes Innovationspotential hinsichtlich Anwendungen mit hohen dynamischen und thermischen Anforderungen zugesprochen (Lässig et al. 2012, Leichtbau BW GmbH 2014a). Ein Beispiel hierfür im Hydraulikbereich sind Zylinderrohre und Kolbenstangen aus CFK (Königsreuther 2015). In den verschiedenen genannten Einsatzgebieten sind die Materialien teils hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt.

### 2.1.4 Herstellungsverfahren

Zur Produktion der Faserverbundkunststoffe wird eine Vielzahl unterschiedlicher Herstellungsverfahren eingesetzt (Chatzigeorgiou et al. 2003, Leichtbau BW GmbH 2014b, Mathes & Witten 2014). Oft werden hierbei Fasern und Harz vor dem eigentlichen Herstellungsprozess gemischt. Im Weiteren wird dieses Gemisch als Formmasse bezeichnet.

- **Handlaminierverfahren:** Bei diesem rein manuellen Verfahren wird die vorwiegend muldenartige oder gewölbte Negativform zunächst mit Trennmittel und anschließend mit einer Oberflächenschicht versehen. Danach wird eine Verstärkungsfasermatte eingelegt, auf die zuerst ein Gemisch aus Kunststoffharz und Härter und anschließend eine weitere Oberflächenschicht aufgestrichen oder aufgerollt wird.

- **Faserspritzen:** Hier werden im Gegensatz zum Handlaminierverfahren Harz, Härter und Fasermaterialien maschinell auf die Negativform gespritzt. Trotz des maschinellen Einsatzes weist das Verfahren einen hohen handwerklichen Anteil auf.
- **Nasspressen:** Hier wird flüssiges Harz mit Verstärkungsfasern gepresst und ausgehärtet.
- **Wickelverfahren:** Dieses Verfahren wird zur Herstellung rotationssymmetrischer Formen verwendet. Hierzu werden auf einem Wickelkern mit Harz imprägnierte Fasern abgelegt.
- **Profiliziehverfahren (auch Pultrusion):** Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zur Herstellung von langen, gestreckten und einachsig belasteten Bauteilen (Einsatz beispielsweise als Angelruten, Skistöcke oder Kabelkanäle). Hierzu werden Langfasern von einer Spule einem Werkzeug in der Form des zu produzierenden Profils zugeführt. In dem Werkzeug werden die Fasern mit der Matrix durchtränkt. Die Aushärtung findet beim Durchlaufen des Werkzeugs mittels Wärmezufuhr statt.
- **Harzinjektionsverfahren RTM (Resin Transfer Moulding):** Dieses Verfahren wird zur Herstellung lang- und endlosfaserverstärkter Kunststoffe, welche für hohe Leistungen konzipiert werden, verwendet. Bei der Herstellung werden die Verstärkungsfasern als Vorformling (auch als Preform bezeichnet) in ein Werkzeug eingelegt, anschließend wird das Harz in den Vorformling injiziert. Danach findet die Aushärtung statt. Auch dieses Verfahren ist durch ein geringes Maß an Automatisierung geprägt. Dies schlägt sich nach einer exemplarischen Berechnung (Leichtbau BW GmbH 2014a) in einem Personalkostenanteil von 50 bis 60 % der Gesamtherstellungskosten nieder.
- **Spaltimprägnierverfahren:** Zunächst wird hierfür ein endkonturnaher Schaumkern mit beidseitig aufgebrauchten Verstärkungsfasern in ein Werkzeug eingelegt. Das Werkzeug besteht aus einer Unterform mit Kavität und einer beweglichen Oberform. Als nächstes wird innerhalb der Kavität ein Vakuum erzeugt und anschließend die Oberform auf einer Seite angehoben. Dadurch entsteht ein Fließspalt. Nun kann der Harzzufluss geöffnet werden. Durch die Druckdifferenz zwischen Kavität und Umgebung werden die Fasern mit Harz durchtränkt (imprägniert). Nach der bauteilab-

hängigen Komprimierung findet die Aushärtung statt. Das Verfahren ist für flächige Bauteile mit einem hohen Faservolumenanteil von über 50 % geeignet.

- **Heißpressen:** Harz und Fasern, als Harzmatte (oft auch als Prepreg oder Sheet Moulding Compound bezeichnet) oder teigige Formmasse, werden in hydraulischen Pressen mit beheizten Stahlwerkzeugen (Temperaturen über 120 °C) bei einem Pressdruck von 30 bis 140 bar verarbeitet.
- **Hochdruckpressen:** Hierbei wird die Formmasse möglichst schnell und gleichmäßig auf die notwendige Verformungstemperatur gebracht und unmittelbar der Presse zugeführt. Es werden Drücke von ca. 200 bar und Temperaturen von 200 bis 220 °C verwendet. Das Verfahren wurde in erster Linie entwickelt, um den Anforderungen der Automobilindustrie nach Kostenreduktion bei Erhaltung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften gerecht zu werden.
- **Spritzgießen:** Das Spritzgießen teilt sich in mehrere Phasen auf. Zuerst wird die Formmasse bei niedriger Temperatur (< 60 °C) dosiert (Dosierphase) und danach in die Kavität injiziert. Dieser Prozess ist zunächst geschwindigkeits- (Einspritzphase) und danach druckgeregelt (Nachdruckphase). Nach vollständiger Füllung der Kavität wird die Matrix ausgehärtet. Nach Abschluss der Härtephase kann das Bauteil entnommen werden.
- **Kontinuierliches Laminieren:** Bei diesem Verfahren läuft die Herstellung zwischen zwei Folien ab, die sowohl als Transport- und Trennmittel eingesetzt werden. Diese haben somit einen großen Einfluss auf die Oberflächenstruktur der Lamine. Das Verfahren lässt sich in drei Teilprozesse gliedern. Zunächst wird auf die untere Trägerfolie Harz aufgetragen. Als nächstes erfolgt der Auftrag von Harz mit Verstärkungsfasern (Laminierung). Als letzter Prozessschritt erfolgt die Härtung (bei 60 °C bis 120 °C) und eine eventuelle Nachbearbeitung (abhängig von der späteren Verwendung). Das Verfahren wird hauptsächlich zur Herstellung gewellter und planer Platten und Bahnen eingesetzt.
- **Automatisierte Legeverfahren:** Bei diesem Verfahren wird innerhalb einer Anlage unidirektionales faserverstärktes Material mittels eines Legekopfs abgelegt und an-



schließlich über eine Anpresseinheit (Pressprozess) kompaktiert. Ein Aufbau mehrerer Lagen ist mittels dieses Vorgehens möglich. Die Aushärtung findet in einem Ofen oder einem Autoklav statt. Dieses automatisierte Verfahren wurde hauptsächlich aufgrund des Bedarfs an großen schalenförmigen Strukturen im Luft- und Raumfahrtbereich entwickelt.

- **LFI-Verfahren (Long-Fiber-Injektion/ Lang-Faser Injektion):** Bei diesem Verfahren werden Rovings verarbeitet. Die Verarbeitung lässt sich in mehrere Schritte unterteilen. Zunächst werden die Rovings gefördert (Faseraustragsmenge  $300 \frac{g}{s}$ ) und anschließend zugeschnitten. Direkt nach dem Zuschneiden werden die Rovings im LFI-Mischkopf mit dem Kunststoffharz benetzt. Der LFI-Mischkopf wird danach mittels eines Roboters über eine Form gefahren und das Faser-Harz-Gemisch eingetragen. Zuletzt wird die Form geschlossen und das Bauteil mittels Temperierung ausgehärtet. Mit dem LFI-Verfahren ist die automatisierte Herstellung dreidimensionaler, großflächiger, komplex geformter Bauteile möglich. Es wird derzeit hauptsächlich in Großserien der Automobilindustrie eingesetzt.

### 2.1.5 Typische Fehler

Die komplexe Herstellung sowie der anspruchsvolle Einsatzbereich der FVK führen zur Entstehung zahlreicher Fehlertypen, sowohl in der Produktion als auch in der anschließenden Verwendung. Nachfolgend ist eine Auswahl der häufigsten Fehler aufgelistet (Ahrholdt 2005, Holub & Haßler 2012, Sarfels & Liebelt 2014):

- **Delamination** ist eine Ablösung zwischen Materiallagen. Dies kann einerseits durch Herstellungsfehler, aber auch durch große Hitze während des Einsatzes entstehen (Carr et al. 2003). Ein Beispiel für die sichtbaren Auswirkungen dieses Defekts auf die Materialoberfläche ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

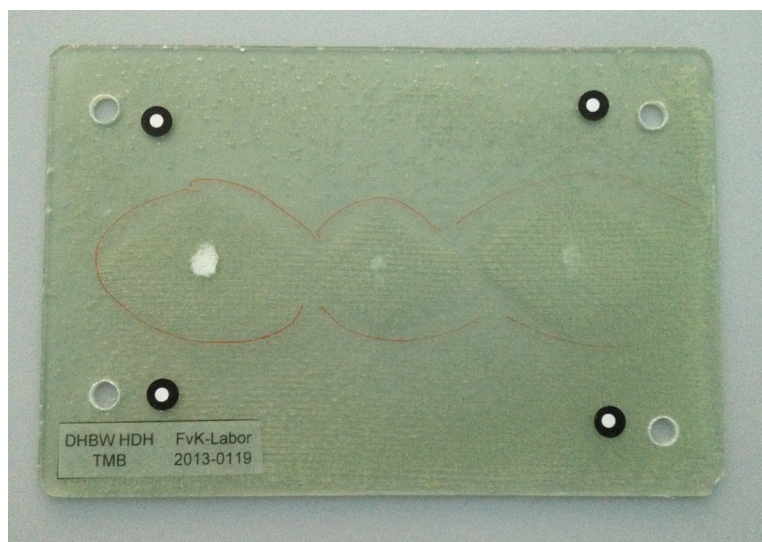


Abbildung 2.3: GFK mit Delamination (Quelle: Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer)

- **Ondulation** ist eine Krümmung oder Wellung der Fasern bzw. der Faserbündel. In Abbildung 2.4 ist dieser Fehler bei einem GFK-Rotorblatt für Windkraftanlagen zu sehen. Dieser Fehler entsteht meist während der Fertigung in der Imprägnierphase.



Abbildung 2.4: GFK-Rotorblatt mit sichtbarer Ondulation (Quelle: Holub & Haßler 2012)

- **Faserbruch/Risse:** Ein Bruch der Fasern bzw. ein Riss innerhalb des Faserverbundkunststoffes kann beispielsweise während des Einsatzes durch Schlagschäden entstehen. In Abbildung 2.5 ist ein Oberflächenriss eines Faserverbundkunststoffes dargestellt. Diese Risse können aber auch innerhalb der Materialien entstehen und von außen nicht sichtbar sein.

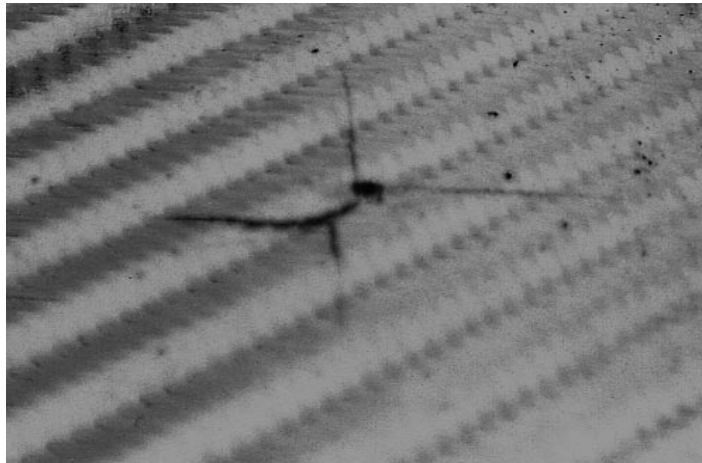


Abbildung 2.5: CFK-Platte mit sichtbarem Oberflächenriss (Quelle: Carr et al. 2003)

- **Faserverschiebung** bedeutet, dass die Orientierung der Fasern in einzelnen Bereichen bzw. in einer gesamten Lage zu ihrer vorgegebenen Ausrichtung verschoben sind. Dies kann beispielsweise durch eine fehlerhafte Herstellung entstehen. In Abbildung 2.6 ist ein Computertomographiebild (s. a. Abschnitt 2.2.6) einer Faserverschiebung innerhalb eines bestimmten Bereichs dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen besonders kritischen Fehler, da durch die Orientierung der Fasern unmittelbar die aufnehmbaren Kräfte beeinflusst werden.

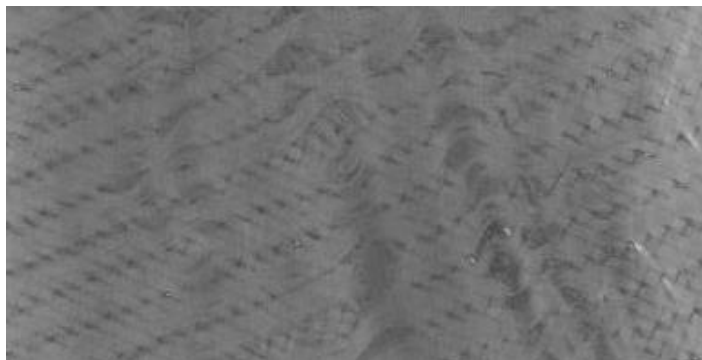


Abbildung 2.6: Computertomographiebild eines CFK-Bauteils mit Faserverschiebung (Quelle: Audi AG)

- **Porosität:** Lufteinschlüsse innerhalb der Faserverbundkunststoffe führen zu Poren, welche je nach Häufigkeit und Größe die Materialeigenschaften negativ beeinflussen können (Ahrholdt 2005). In Abbildung 2.7 ist ein CT-Schnittbild (s. a. Abschnitt 2.2.6) eines CFK-Rohrs mit mehreren Poren abgebildet.

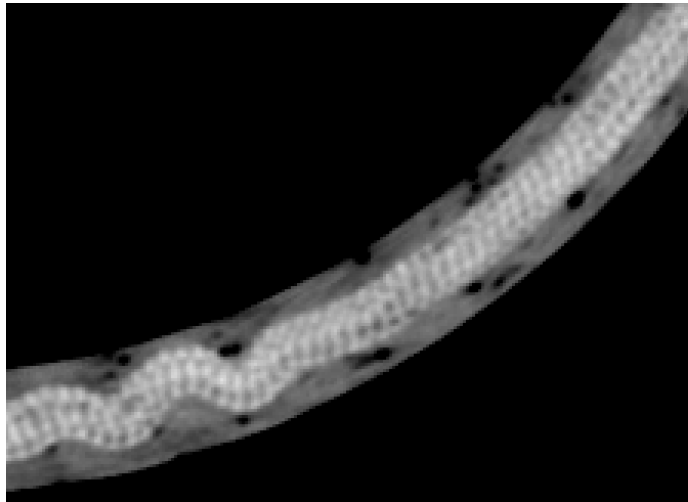


Abbildung 2.7: Computertomographieschnittbild eines CFK-Rohrs mit mehreren Poren (Quelle: Hackh 2012)

- **Trockenstellen** sind Bereiche, die während der Fertigung unzureichend mit Harz durchtränkt wurden. Dadurch fehlt der Schutz der Fasern. Ein Beispiel für diesen Defekttyp ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Auch Bereiche mit Harz aber ohne Fasern können einen Defekt darstellen, da die mechanischen Eigenschaften hiervon negativ beeinflusst werden. In diesem Fall spricht man von Harzanhäufung.

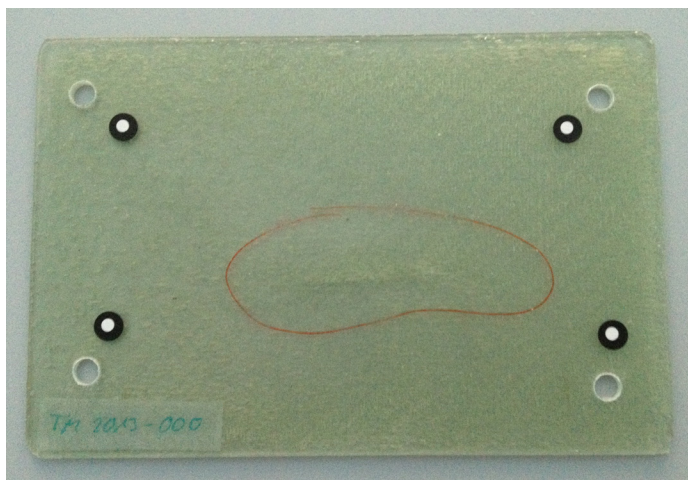


Abbildung 2.8: Trockenstelle einer GFK-Platte (Quelle: Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer)

## 2.2 Zerstörungsfreie Prüfmethode für Faserverbundkunststoffe

Die verschiedenen, oft von außen nicht erkennbaren, Fehlertypen machen umfassende zerstörungsfreie Prüfmethode während der Materialentwicklung sowie im Nachgang während der Produktion und des Einsatzes notwendig. Durch geeignete Kontrollen kann der Einsatzbereich von Faserverbundkunststoffen erweitert werden. In diesem Abschnitt soll eine Übersicht über die typischerweise aktuell eingesetzten Prüfmethode gegeben werden, welche in der Lage sind, innenliegende Fehler zu erkennen. Hier wird oft zwischen für den Inlineeinsatz geeigneten und ungeeigneten Verfahren unterschieden. Dies gibt an, ob ein Verfahren für den Einsatz innerhalb einer Produktionslinie geeignet ist oder diese vor allem durch zu lange Messzeiten zu stark behindern würde. Im Folgenden wird der Zusammenhang zu den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen typischen Fehlern dargestellt. Da optische Methoden bei nicht transparenten Objekten lediglich in der Lage sind, die Oberfläche zu inspizieren, sind sie nicht Teil der hier aufgelisteten Verfahren. Unter optischen Methoden werden hier Verfahren verstanden, die im sichtbaren Bereich des Lichts arbeiten.

### 2.2.1 Ultraschallprüfung

Informationen über die Eigenschaften und Eignung der Ultraschallprüfung (abgekürzt US) findet sich u. a. bei Ahrholdt 2005, Ullmann et al. 2010 und Schnars & Heinrich 2006. Es wird bei der US grundsätzlich zwischen zwei Aufnahmetechniken unterschieden: der Impuls-Echo-Prüfung und der Durchschallung (siehe Abbildung 2.9). Bei der Impuls-Echo-Prüfung wird für die einzelne Messung an einer bestimmten Stelle nur ein Prüfkopf verwendet, der gleichzeitig Sender und Empfänger ist. Hingegen sind bei der Durchschallung Sender und Empfänger zwei getrennte Module. Der Empfänger befindet sich bei der Messung auf der gegenüberliegenden Seite des Senders. Bei der Durchschallung kann keine und bei der Impuls-Echo-Prüfung nur eine bedingte Aussage über die Tiefe des vorliegenden Fehlers getroffen werden. Eine Aussage über die Fehlertiefe mithilfe der Impuls-Echo-Prüfung setzt gute Kenntnisse über den zu erwartenden Fehlertyp, dessen Verlauf und sein damit zu erwartendes Ultraschallecho voraus.

Die für das Verfahren notwendige Verbindung von Prüfkopf und Bauteil wird als Kopplung bezeichnet. Hierbei gibt es verschiedene Varianten. Die beiden gängigsten sind luft- und

wassergekoppelter Ultraschall. Beim luftgekoppelten Ultraschall handelt es sich um eine kontaktfreie Messmethode, die dadurch auch für Preforms geeignet ist. Im Gegensatz hierzu ist wassergekoppelter Ultraschall nur für ausgehärtete Materialien geeignet, für die Feuchtigkeit kein Problem darstellt. Diese Einschränkung verhindert in der Praxis oft den Einsatz dieser Kopplungsvariante. Die generelle Krux des Kopplungsmediums liegt darin, dass der flexibel einsetzbare Luftultraschall deutlich schlechtere Ergebnisse hinsichtlich der Datenqualität liefert als der nur unter bestimmten Voraussetzungen einsetzbare wassergekoppelte.

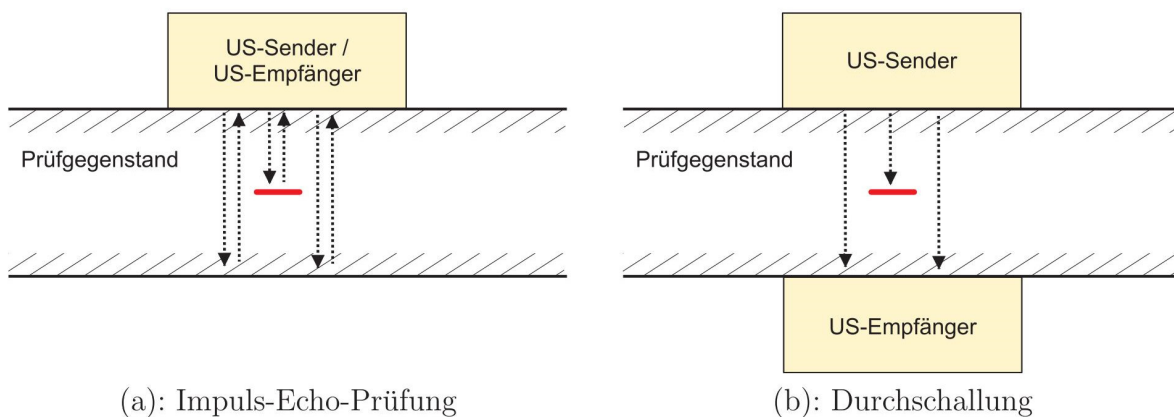


Abbildung 2.9: Ultraschallprüfarten (Quelle: Ahrholdt 2005)

Mit Ultraschall ist, unabhängig vom Kopplungsmedium, eine schnelle Einzelpunktmessung möglich. Soll jedoch ein größerer Bereich überprüft werden, muss bei klassischen Verfahren der Prüfkopf über das gesamte Bauteil bewegt werden. Dieses Vorgehen ist äußerst zeitintensiv. Man versucht diese Schwachstelle durch sogenannte Phased Arrays (Prüfköpfe bestehend aus mehreren Sendern und Empfängern) zu verringern. Für stark gekrümmte Bauteile und Rippenstrukturen können diese Phased Arrays aber ungeeignet sein. Diese Strukturen stellen bereits für einzelne herkömmliche Prüfköpfe eine größere Herausforderung dar. Aber gerade diese Strukturen treten häufig bei Faserverbundkunststoffen auf. Außerdem weisen, im Gegensatz zu konventionellen Materialien wie beispielsweise Stahl oder Aluminium, Faserverbundkunststoffe Inhomogenitäten auf, die den Einsatz von Ultraschall erschweren. Nichtsdestotrotz hat sich die Ultraschalltechnik als gängiges Prüfverfahren etabliert und ist sogar das einzige in der Luftfahrt vollständig akzeptierte

und zertifizierte nicht zerstörende Verfahren zur Qualitätssicherung. Ein Beispiel für eine Ultraschallaufnahme einer GFK-Platte ist in Abbildung 2.10 zu sehen. Die Ultraschalltechnik ist insbesondere für tieferliegende Fehler geeignet. Oberflächennahe Fehler sind mit ihr nicht zuverlässig detektierbar (Jüngert et al. 2009). Für diese Art von Fehlern wird in der Praxis auf andere Verfahren wie beispielsweise die Thermographie zurückgegriffen.

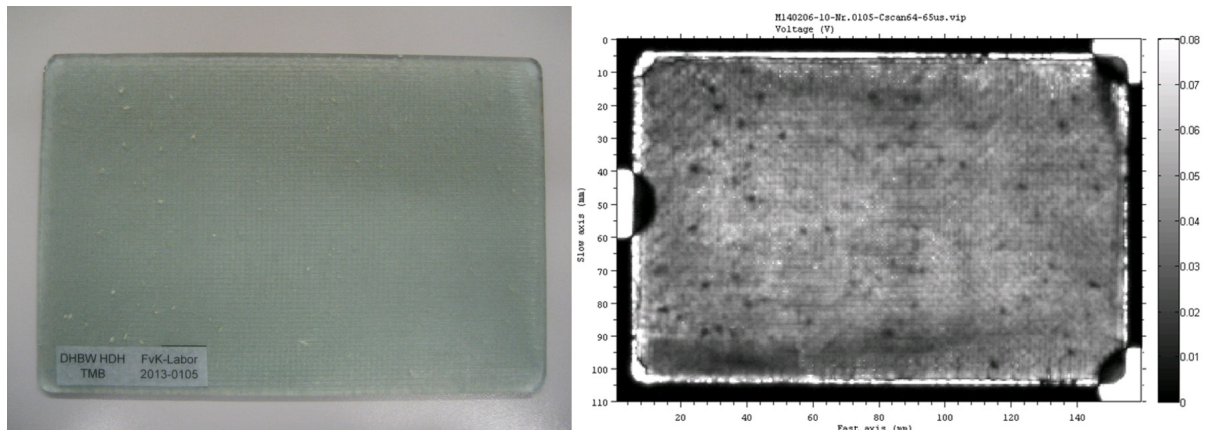


Abbildung 2.10: Links GFK-Platte mit diversen Einschlüssen (Quelle: Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer), rechts Ultraschallbild der GFK-Platte (Quelle: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt)

## 2.2.2 Thermographie

Eine Übersicht über das Funktionsprinzip und die Anwendung der Thermographie findet sich u. a. bei Riegert 2007 und Ullmann et al. 2010. Man unterscheidet bei der Thermographie zwischen aktiver und passiver Anregung (siehe Abbildung 2.11). Unabhängig von der Anregungsart wird immer eine Infrarotkamera eingesetzt. Ein bekanntes Beispiel für eine thermographische Methode mit passiver Anregung ist die Bauthermographie. Hier wird die Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und Umgebung genutzt. Die passive Thermographie ist, obwohl grundsätzlich einfacher einsetzbar, ungeeignet für die Werkstoffprüfung, da in den meisten Fällen ohne aktive Anregung keine notwendige Temperaturdifferenz vorliegt, sich also das Bauteil nicht ausreichend von seiner Umgebung unterscheidet bzw. es, aufgrund von Raumtemperaturschwankungen, nicht möglich ist das Verfahren zu standardisieren.

Mögliche Anregungsquellen bei der aktiven Thermographie sind u. a. Halogen- oder Blitzlampen (optische Anregung), Ultraschall oder Wirbelstrom (siehe Abbildung 2.11). Die

verschiedenen Anregungsarten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anwendung und Auswertung deutlich. Während eine Wirbelstromanregung im Gegensatz zu einer optischen Anregung unabhängig vom Absorptionskoeffizienten des Materials ist, ist die optische Anregung im Gegensatz zur Wirbelstromprüfung unabhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des zu untersuchenden Materials. Generell wird bei allen Anregungsarten die thermische Antwort analysiert. Im Defektbereich unterscheidet sich diese oft vom Gutbereich, was wiederum für die automatische Defekterkennung im Thermographiebild genutzt wird. Bei der optischen Anregung absorbiert der Defektbereich die Wärme stärker oder schwächer als der Gutbereich. Bei der Wirbelstromanregung kommt es bei Defekten zu einer lokalen Ausdünnung der Leistungsdichte, was zu einer stärkeren Erwärmung der Defektränder führt. Defekte werden somit durch den Wirbelstrom stärker erwärmt als unbeschädigte Bauteilbereiche. Bei Ultraschall als Anregungsquelle handelt es sich um eine mechanische Anregung. Das Bauteil wird hierbei in Schwingung versetzt. Defekte wie z. B. Risse erzeugen durch Reibung stärker Wärme als homogene Bauteilbereiche.

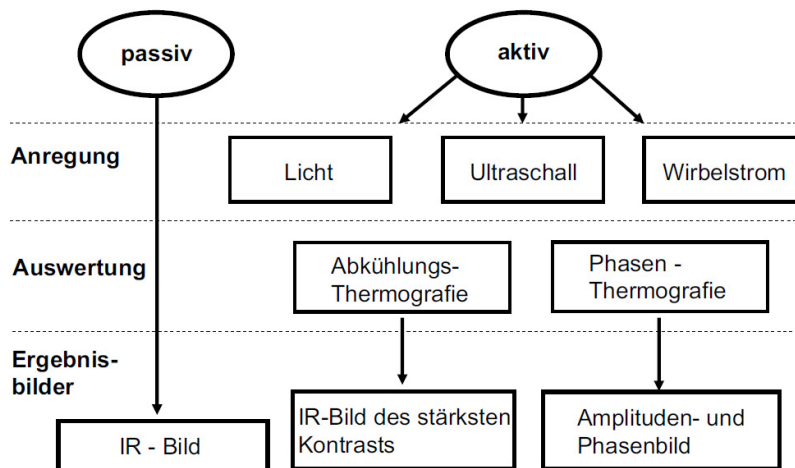


Abbildung 2.11: Übersicht Thermographiemethoden (Quelle: Riegert 2007)

Hinsichtlich der Datenauswertung wird zwischen Abkühlungs- und Phasenthermographie unterschieden (siehe Abbildung 2.11). Bei der Abkühlungsthermographie wird nach der Anregung lediglich das Abkühlungsverhalten analysiert. Im einfachsten Fall wird hierbei das thermische Verhalten der geschädigten und ungeschädigten Bereiche verglichen. Eine etwas anspruchsvollere Methode ist die Erzeugung des Infrarotbilds des stärksten Kontrasts durch Subtraktion des Wärmebilds der nicht angeregten Probe vom Abkühlungsbild.



Das Vorgehen bei der Phasenthermographie ist im Vergleich zur Abkühlungsthermographie deutlich komplexer. Bei ihr wird die Anregungsquelle (beispielsweise eine Halogenlampe) moduliert, wodurch thermische Wellen im zu untersuchenden Material erzeugt werden. Diese Modulation wird als Lockin-Frequenz bezeichnet, weshalb die Phasenthermographie auch als Lockin-Thermographie bezeichnet wird. An Materialgrenzen bzw. -übergängen werden die thermischen Wellen reflektiert und überlagern sich mit der Anregung. Diese Überlagerung wird mit einer Infrarotkamera über mehrere Anregungsperioden aufgenommen (Chatzigeorgiou et al. 2003). Mithilfe einer Fouriertransformation über die aufgenommene Bildsequenz lässt sich als Ergebnis ein Amplituden- und Phasenbild erzeugen. Die Phasenbilder sind homogener und verfügen über eine größere Tiefenreichweite als die Amplitudenbilder. Insgesamt besitzt die Phasenthermographie ein besseres Kontrast- und Signal-Rausch-Verhältnis als die Abkühlungsthermographie und ermöglicht hierdurch tieferliegende Fehler zu detektieren.

Dennoch ist die Tiefenreichweite bei allen thermographischen Methoden begrenzt. In der Praxis sind Fehlererkennungen bis zu einer Tiefe von 5 bis 6 mm möglich. Die Thermographie ist im Gegensatz zur Ultraschallprüfung somit vor allem für die vergleichsweise schnelle Untersuchung von oberflächennahen Fehlern geeignet. Hinsichtlich der Fehlererkennung in Bezug auf die Fehlertiefe sind Ultraschall und Thermographie also komplementäre Technologien, die sich sehr gut ergänzen. Ein weiterer Unterschied zur Ultraschallprüfung besteht darin, dass auch großflächige Bauteile (bis zu 1 m<sup>2</sup> bei einer Scanzeit von ein paar Minuten) oder mit einseitiger Zugänglichkeit kein Problem für die Thermographie darstellen. Durch ihre vergleichsweise hohe Schnelligkeit und Eignung für große Flächen handelt es sich bei der Thermographie um ein inlinedfähiges und gut prozessintegrierbares Verfahren.

Die Nachteile bestehen in erster Linie in der beschränkten Eindringtiefe und einer bisher nicht ausreichenden Normierung. Ein weiteres Problem besteht darin, dass meist nur qualitative, aber keine quantitativen Ergebnisse aus den Aufnahmen abgeleitet werden können (Sarfels & Liebelt 2014).

Durch die Fähigkeit innenliegende Fehler schnell und zerstörungsfrei zu erkennen, eignet sich die Thermographie sehr gut für die FVK-Prüfung (Maierhofer et al. 2018). Beispielsweise können folgende Fehlertypen erkannt werden: Schlagschäden (siehe Abbildung 2.12),

Porosität, Inhomogenitäten, Delaminationen und Einschlüsse (Chatzigeorgiou et al. 2003, Sarfels & Liebelt 2014).

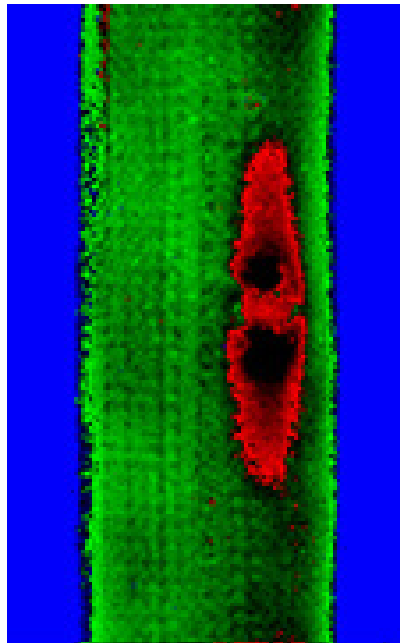


Abbildung 2.12: Thermographieauswertebild eines CFK-Rohrs mit Schlagschaden (Quelle: Fraunhofer IPA)

### 2.2.3 Shearographie

Das Messprinzip der Shearographie wird u. a. von Honlet & Walz 2002 erklärt, während die Eignung für die Prüfung von FVK u. a. bei Schnars & Heinrich 2006 beschrieben wird. Generell werden bei der Shearographie mechanische, thermische oder pneumatische Kräfte auf das Prüfobjekt ausgeübt. Gleichzeitig wird ein aufgeweitetes Laserlicht eingesetzt. Die einwirkenden Kräfte bewirken eine Verformung zwischen Referenzzustand und Messzustand. Diese Zustände werden mithilfe einer Kamera aufgezeichnet. Das Objektiv der Kamera verfügt über ein sogenanntes Shearing-Element, das aus einem Biprisma oder einem Michelson-Interferometer bestehen kann. Durch das Shearing-Element entstehen zwei geringfügig verschobene Bilder und deren interferometrische Überlagerung lässt ein Interferenzmuster entstehen. Das Interferenzmuster im unbelasteten Zustand wird anschließend mit dem Interferenzmuster im belasteten Zustand überlagert und verglichen (Yang et al. 1996). Somit ist ein interferometrischer Punktvergleich und dadurch eine Messung der Gradienten der Verformung möglich. Bereiche mit besonders starker Veränderung sind

ein Indiz für potentielle Fehler.

Mit der Shearographie können berührungslos und zerstörungsfrei größere Flächen mit hoher Empfindlichkeit inspiziert werden. Durch eine gleichzeitig geringe Messzeit von wenigen Minuten ist das Verfahren teilweise inlinefähig und prozessintegrierbar. Es ist geeignet für die Detektion von Delaminationen, Debondings (Klebefehler) und Schlagschäden von FVK (Menner et al. 2008).

Für das Erkennen von Poren ist die Shearographie nicht geeignet, da es keine ausreichende Korrelation zwischen Oberflächendeformationen und innenliegenden Poren gibt. Auch Faserbrüche können mit ihr nicht sicher erkannt werden (Oster 2012). Ähnlich wie bei der Thermographie ist auch bei der Shearographie die Tiefenreichweite beschränkt und die Detektierbarkeit abhängig vom Defektdurchmesser. Auch eine exakte Bestimmung der Defektgeometrie ist mit ihr nicht möglich. Weiterhin weist sie, verglichen mit der Ultraschallprüfung, eine geringere Defektsensitivität auf, da die bei ihr typische Ganzkörperverformung kleinere Defekte teilweise überlagert (Menner 2013).

#### 2.2.4 Wirbelstromverfahren

Das Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens und seine Eignung für CFK wird u. a. von Li 2012 und Heuer 2012 beschrieben. Bei dem Verfahren wird mit einer stromdurchflossenen Spule ein fluktuierendes Magnetfeld im Prüfbjekt induziert, welches wiederum innerhalb des zu untersuchenden Materials Wirbelströme erzeugt. An Fehlstellen erhöht sich der elektrische Widerstand. Die dadurch erzeugte Änderung des elektromagnetischen Felds wird mit einer zusätzlichen oder häufig auch mit der bereits für die Erzeugung der Wirbelströme verwendeten Spule detektiert. Hierzu wird die Änderung der Impedanz der zur Fehlererkennung verwendeten Spule gemessen (Riegert 2007, Cacciola et al. 2009). Voraussetzung hierfür ist die elektrische Leitfähigkeit des Prüflings. Dadurch ist das Verfahren zwar für das elektrisch leitfähige CFK anwendbar, nicht aber für den Isolator GFK.

Die Vorteile des Wirbelstromverfahrens bestehen in der kontakt- und kopplungsmittelfreien Messung bei gleichzeitig schneller Durchführung und Automatisierbarkeit. Zusätzlich sind die verwendeten Geräte oft klein und tragbar. Dadurch ist die Wirbelstromtechnik grundsätzlich inlinefähig und prozessintegrierbar. Dies setzt aber eine exakte und kon-

stante Führung des Messkopfs, insbesondere auch bei gekrümmten Bauteilen, voraus. Mit dem Verfahren können verschiedene Fehlertypen prinzipiell erkannt werden: falsche Faserorientierung, fehlender Faseranteil, Einschlüsse, Ondulationen, Delaminationen und Schlagschäden (Fery 2012). Für die Erkennung der Faserorientierung wird hierbei gezielt ausgenutzt, dass die Konduktivität (elektrische Leitfähigkeit) bei CFK in Faserrichtung deutlich stärker als in andere Richtungen ist.

Der bezüglich der FVK-Prüfung entscheidendste Nachteil des Wirbelstromverfahrens ist, dass es nicht für GFK geeignet ist. Auch bezüglich der Prüfung von CFK zeigt das Verfahren gewisse Schwachpunkte. Ähnlich wie bei Ultraschallverfahren sind bei einer Wirbelstromprüfung klassisch nur kleine Bereiche erfassbar. Für schnelle und großflächige Messungen sind spezielle Linien- oder Matrixsensoren notwendig (Heuer 2012). Die gemessenen Signale sind oft schwer zu interpretieren und die Tiefenreichweite ist begrenzt. Fehler wie Delaminationen und interlaminaire Risse sind zwar erkennbar, es ist aber oft schwer, diese zu unterscheiden. Delaminationen und Risse in Richtung des Wirbelstroms sind teilweise sogar gar nicht zu detektieren. Außerdem ist die Erzeugung quantitativer Informationen nur mittels Referenzmessung möglich.

### 2.2.5 Terahertzprüfung

Elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen 0,1 THz und 10 THz (entspricht im Vakuum einer Wellenlänge zwischen 3 mm und 30  $\mu\text{m}$ ) wird als Terahertzstrahlung oder oft auch als fernes Infrarot bezeichnet. Die Terahertzprüfung wird u. a. bei Vandewal et al. 2012 und Becker et al. 2012 beschrieben. Die Terahertzstrahlung ist in der Lage, nicht metallische und nicht polarisierende Materialien zu durchstrahlen, wodurch sie durch die Verwendung eines Emitters und eines Detektors für sensorische und bildgebende Verfahren genutzt werden kann. Die Messung kann dabei durch Reflexion, Transmission oder eine Kombination beider Varianten erfolgen.

Ein wichtiger Vorteil der Terahertzstrahlung liegt in ihrer gesundheitlichen Unbedenklichkeit. Denn obwohl sie in der Lage ist Objekte zu durchstrahlen, ist sie dennoch nicht ionisierend. Dies stellt einen deutlichen Unterschied zu der bei der CT verwendeten Röntgenstrahlung dar. Auch die mögliche Verwendung der Technik mittels Reflexion ist insbesondere bei

einseitigen Zugänglichkeiten vorteilhaft. Bezüglich des Einsatzes als Prüf- und Messmittel wird angenommen, dass mit der Terahertztechnik Einschlüsse von Fremdmaterialien, Delaminationen, größere Poren und Hitzeschäden erkannt werden können. Hierbei gilt, dass die genannten Fehlertypen bei nicht leitenden Materialien wie GFK besonders gut erkennbar sind. Mit bis zu 30 mm ist eine deutlich höhere Eindringtiefe als bei vielen thermographischen Anwendungen möglich. Hingegen ist bei leitenden Materialien wie CFK die Eindringtiefe deutlich begrenzter. Durch typische laterale Auflösungen im Millimeterbereich (0,5 mm bis 1,5 mm), wird ihr Anwendungsgebiet im Moment in erster Linie bei größeren Strukturen wie Radarkuppeln, Schiffshüllen, Rudern und Propellern gesehen.

Da sich ein Terahertzscan aus Einzelpunktmessungen zusammensetzt (Naftaly 2015), das Objekt also gerastert werden muss, ergeben sich im Vergleich recht hohe Scanzeiten von einigen Minuten (10 bis 20 Minuten für eine Fläche von 475 mm x 190 mm bei einer Dicke von 3 mm (Becker et al. 2012)), die im Moment einen Inlineeinsatz ausschließen. Außerdem wird die Terahertztechnik, trotz ihres hohen Potentials, noch oft als zu kompliziert und zu teuer betrachtet (Yang et al. 2013). Auch ist der aktuelle Forschungsstand und die Anzahl der Publikationen im Bereich des Einsatzes von Terahertzstrahlung zur Prüfung von FVK nicht ausreichend (Vandewal et al. 2012).

## 2.2.6 Computertomographie

Einen umfassenden Überblick über die industrielle Computertomographie (CT) gibt u. a. Christoph & Neumann 2017 und Schnell 2011. Bei der CT wird nach dem Prinzip der Elektronenstrahlröhre Röntgenstrahlung erzeugt. Hierbei werden in einem Vakuum freie Elektronen durch Glühemission erzeugt und durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Beim Auftreffen auf ein metallisches Target (Anode) werden die benötigten Röntgenstrahlen erzeugt. Die hierbei typischerweise eingesetzten Spannungen zur Beschleunigung der Elektronen liegen abhängig vom Röhrentyp zwischen 50 kV und 450 kV. Die Röntgenstrahlung durchdringt dann das zu messende Objekt, wobei die Strahlung abhängig von den Materialarten des Objekts absorbiert wird. Der nicht absorbierte Teil der Strahlung trifft anschließend auf einen Detektor, der die verbleibende Intensität misst. Dadurch entsteht ein Röntgenbild. Durch Drehung des Messobjekts (siehe Abbildung 2.13) wird diese Messung

in mehreren Winkelstellungen wiederholt. Somit entsteht eine Vielzahl (beispielsweise 800) von Röntgenbildern. Mithilfe mathematischer Verfahren der Rückprojektion kann das Volumen rekonstruiert werden.

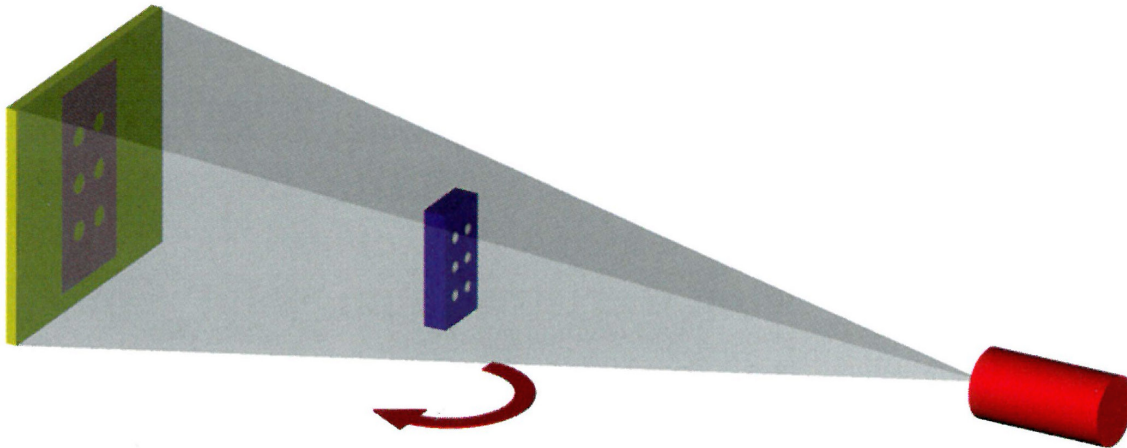


Abbildung 2.13: Aufnahmeprinzip der Computertomographie, mit Röntgenröhre rechts, Messobjekt mittig und Röntgendetektor links (Quelle: Christoph & Neumann 2017)

### 2.2.6.1 Volumendaten

Das rekonstruierte Volumen besteht aus sogenannten Voxeln. Ein Voxel ist das dreidimensionale Analogon eines Pixels. Man kann sich somit ein durch die CT rekonstruiertes Volumen als eine Menge aus Würfeln mit einer definierten Dimension und jeweils einem bestimmten Grauwert in einer festen geometrischen Anordnung vorstellen. Zur Beschreibung der Anordnung wird meist ein Koordinatensystem mit den üblichen Achsenbezeichnungen X, Y und Z definiert.

Die Dimension der Voxel wird bezüglich ihrer Kantenlänge angegeben und liegt abhängig von der Auflösung der Messung zwischen etwas unter einem Mikrometer und mehreren Mikrometern. Die Kantenlänge wird entsprechend als Voxelauflösung bezeichnet. In der Regel muss bei einer CT-Aufnahme in jedem Röntgenbild das gesamte Messobjekt im Strahlungsbereich liegen. Dies bedingt, dass die maximal erreichbare Voxelauflösung abhängig ist vom maximalen Objektdurchmesser. Um diese Einschränkung teilweise zu überwinden, werden spezielle Verfahren wie die Rastertomographie oder die ROI-CT (Region of Interest-CT) eingesetzt (Maaß et al. 2010). Beide Verfahren werden nicht von allen

CT-Systemen unterstützt und stellen teilweise eine deutliche Erhöhung des Messaufwands (u. a. Einrichtungszeit und Scanzeit) dar.

Der Grauwert des einzelnen Voxels gibt an, wie viel Röntgenstrahlung an dieser Stelle des Objekts absorbiert wurde. Je mehr Strahlung absorbiert wurde desto heller ist der Grauwert bzw. je weniger Strahlung absorbiert wurde desto dunkler. Zwei Extremfälle sind Luft, die im Volumen dunkel erscheint und Metalle, die hell erscheinen.

### 2.2.6.2 CT-Systemvarianten

Die häufigste industriell anzutreffende Variante eines CT-Systems ist die Kegelstrahltomographie. Hierbei tritt wie in Abbildung 2.13 dargestellt ein kegelförmiger (bzw. in der vereinfachten Darstellung pyramidenförmiger) Strahl aus der Röntgenröhre aus und trifft nach Durchdringen des Objekts auf einen flächigen Detektor. Neben dieser Variante gibt es auch Systeme mit zeilenförmigen Detektoren, bei denen das Bauteil schrittweise in mehreren Ebenen durchstrahlt wird. Dies kann als spezielle Form der Rastertomographie betrachtet werden. Hinsichtlich der Datenqualität sind Zeilendetektoren ideal, da die Schnittebene stets senkrecht zur Drehachse ist, aber sowohl hinsichtlich zeitlicher Aspekte, als auch der Energieausnutzung ist die Kegelstrahltomographie zu bevorzugen. Eine spezielle Variante ist die Helix- bzw. Spiral-CT bei der gleichzeitig zur Drehbewegung eine Translationsbewegung in Richtung der Drehachse erfolgt. Diese Kombination aus den Vorteilen der Kegelstrahltomographie und des Einsatzes eines Flächensensors ist aber in der technischen Umsetzung sehr aufwendig und daher noch nicht häufig in der industriellen Anwendung anzutreffen. Deshalb werden sich die weiteren Erläuterungen stets auf die Kegelstrahltomographie als verbreitetste Variante beziehen.

### 2.2.6.3 Einsatzgebiete

Einen Überblick über die Eignung und Einsatzgebiete der CT insbesondere im Bereich FVK gibt u. a. Oster 2012. Der entscheidende Vorteil der CT besteht darin, dass sie als einzige Methode ermöglicht, alle inneren Strukturen eines zu untersuchenden Objekts vollständig, räumlich und zerstörungsfrei zu erfassen. So können auch schwer zugängliche Bauteilbereiche präzise gescannt werden. Damit ist die CT, im Gegensatz zu vielen anderen

zerstörungsfreien Prüfmethode, wie z. B. Ultraschall, Thermographie oder Wirbelstrom, in der Lage direkt quantitative Informationen zu liefern.

Ein typisches Einsatzgebiet der CT ist das Aufspüren von Fehlern innerhalb eines Produktionsprozesses (Li 2012). Die Sichtbarmachung der inneren Struktur eines Bauteils, ohne es dabei zu zerstören, ermöglicht zahlreiche Rückschlüsse auf zu optimierende Produktionsschritte. Dies wird beispielsweise im Luftfahrtbereich für die Verbesserung der qualitativen Eigenschaften der dort relativ neu eingesetzten FVK-Komponenten genutzt. Durch ihre besonderen Charakteristika ist die CT in der Lage, nahezu alle typischen Fehler, wie z. B. Delamination, Porosität, Ondulation und Faserbrüche (siehe Abbildung 2.14) zu detektieren, auch wenn diese von außen nicht sichtbar sind. Da die erzeugten Volumendaten direkt in eine maßhaltige bildhafte Darstellung überführt werden können, sind auch die Ergebnisse der CT für den Laien vergleichsweise leicht zu interpretieren. Für eine exakte Bestimmung der Fehlergröße und Lokalisation sind in aller Regel keine Vorabinformation, wie z. B. bei der Thermographie, notwendig. Voraussetzung für die Defekterkennung ist lediglich, dass die Auflösung der CT-Aufnahme hinreichend hoch ist und der Defekt sich hinsichtlich der Röntgenabsorption ausreichend von seiner Umgebung unterscheidet.

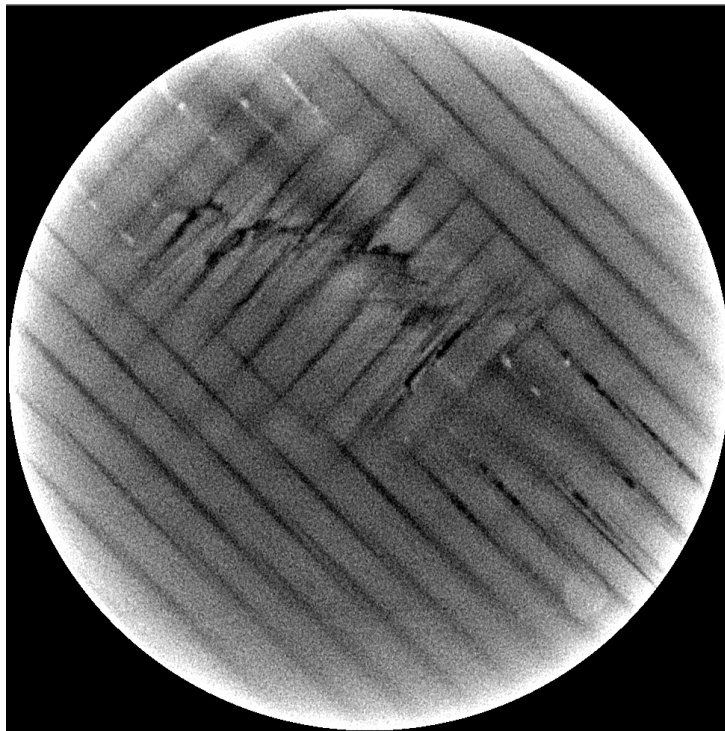


Abbildung 2.14: Computertomographiebild von Faserbrüchen innerhalb eines CFK-Bauteils (Quelle: RayScan Technologies GmbH)



Die CT eignet sich weiterhin insbesondere als Referenztechnologie für die Entwicklung anderer zerstörungsfreier Prüfmethoden. Dadurch lassen sich weniger genaue, aber inlinefähige Methoden wie z. B. Ultraschall oder Thermographie für spezielle Prüfungen qualifizieren (Ullmann et al. 2010).

Trotz dieser Vorteile müssen bestimmte Effekte bei der Beurteilung von CT-Daten berücksichtigt werden. Bei der CT kommt es prinzipbedingt zu Störungen in Form von Artefakten. Zu diesen gehören u. a. Strahlaufhärtung, Streustrahlung, Kegelstrahl- und Ringartefakte (Mihaljević 2009). Auch Rauschen der Daten kann die Interpretation des CT-Ergebnisses in gewissen Bereichen erschweren bzw. unmöglich machen.

Abgesehen von Artefakten sollte die Begrenzung der Bauteilgröße und der Auflösung berücksichtigt werden. Typische Maximalgrößen sind hierbei eine Länge von 800 mm und ein Durchmesser von 700 mm. Da die maximal erreichbare Auflösung mit der Bauteilgröße negativ korreliert, müssen für besonders hohe Auflösungen weitere Einschränkungen bei der Bauteilgröße in Kauf genommen werden.

Beim Einsatz der CT als Mess- und Prüftechnik sollten weiterhin ihre vergleichsweise langen Messzeiten und großen Datenmengen berücksichtigt werden. Die mehrere Gigabyte großen Volumendaten erschweren das Datenhandling, während Messzeiten beginnend bei einigen Minuten bis zu mehreren Stunden oft keine schnellen Ergebnisse liefern. Eine Vielzahl der Anwendungen befindet sich in einem Zeitkorridor zwischen 20 Minuten und 2 Stunden. Diese Messzeiten schließen derzeit noch einen Inlineeinsatz der CT in den allermeisten Fällen aus.

Neben dem vergleichsweise hohen Zeitaufwand ist das mit der Röntgenstrahlung verbundene gesundheitliche Risiko ein weiterer Nachteil. Der Einsatz von Röntgentechnik erfordert unumgängliche Strahlenschutzmaßnahmen. Bis zu einer Röhrenspannung von 300 kV ist der Einsatz eines Vollschutzgeräts, welches der Strahlenschutzverordnung entspricht, üblich. Bei diesen Geräten ist die Abschirmung durch in die Verkleidung integrierte Bleischichten sichergestellt. Für Sichtfenster wird Bleiglas verwendet. Ein Computertomograph dieser Bauart ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Die bei diesen Geräten auftretende Strahlenbelastung für Bediener liegt in der Größenordnung der natürlichen Strahlenbelastung auf Meereshöhe. Für Anlagen mit einer Röntgenspannung größer als 300 kV werden meist spezielle mit Blei verkleidete Schutzräume vorgesehen.

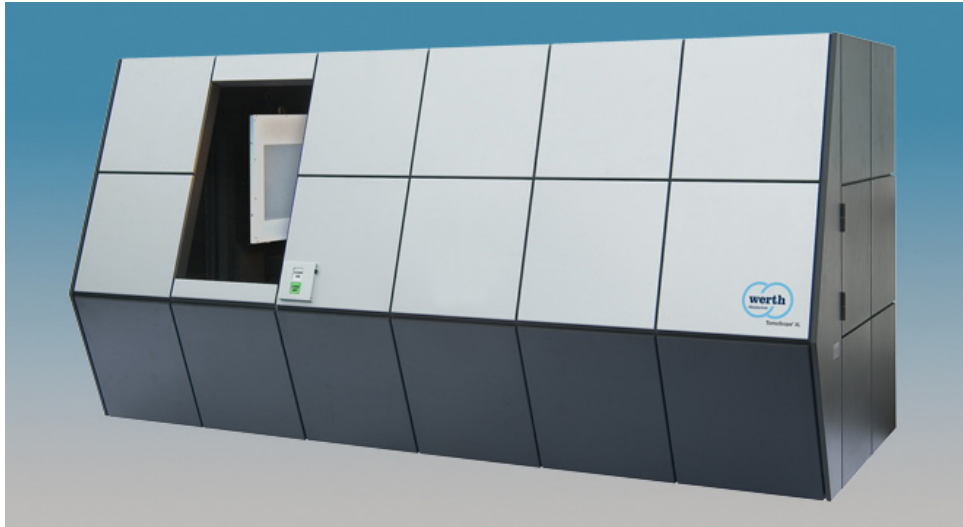


Abbildung 2.15: Vollschutz Computertomograph TomoScape® XL der Werth Messtechnik GmbH  
(Quelle: Christoph & Neumann 2017)

### 2.2.7 Fazit

Die hinsichtlich von FVK relevanten Stärken und Schwächen der zuvor betrachteten zerstörungsfreien Prüfverfahren werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Hierbei werden die bereits eingeführten Abkürzungen sowie zusätzlich IR (Infrarotstrahlung) für die Thermographie, S für die Shearographie, WS für das Wirbelstromverfahren und T für die Terahertzprüfung verwendet. Die Verfahren werden hierbei in die drei Stufen '—', 'o' und '+' eingeteilt. Die Stufen geben an, inwieweit eine Methode hinsichtlich des Bewertungskriteriums geeignet ist bzw. dieses erfüllt, wobei '—' ungeeignet bzw. nicht erfüllt, 'o' bedingt geeignet bzw. bedingt erfüllt und '+' geeignet bzw. erfüllt bedeutet.

Tabelle 2.2: Eignung zerstörungsfreier Prüfmethoden

Bewertungskriterium	Prüfmethode					
	US	IR	S	WS	T	CT
Eignung für GFK	+	+	+	—	+	+
Eignung für CFK	+	+	+	+	o	+
Tieferliegende Fehler	+	—	—	—	o	+
Oberflächennahe Fehler	—	+	+	+	+	+
Quantitativ	—	—	—	o	o	+
Inlinetauglich	+	+	o	o	—	—
Referenztechnologie	—	—	—	—	—	+
Technologischer Reifegrad	+	o	o	+	—	+
Skalierbarkeit bzgl. Bauteilgröße	o	+	+	o	+	o

## 2.3 Analysemethoden für Computertomographiedaten von Faserverbundkunststoffen

Auch wenn die mit der CT erzeugten Volumendaten mithilfe einer geeigneten Visualisierungssoftware vergleichsweise leicht für Menschen zu interpretieren sind, stellen intelligente, möglichst automatisierte Analysemethoden einen wichtigen Bestandteil der Auswertekette dar. Auswertelgorithmen dienen der Objektivierung, ermöglichen die Erzeugung quantitativer Ergebnisse und die Automatisierung des Auswerteprozesses. Es gibt mittlerweile zahlreiche unterschiedliche Methoden zur Auswertung von CT-Daten (siehe u. a. Kroll 2014, Effenberger & Denecke 2015). Im Weiteren werden Algorithmen betrachtet, die für die Beurteilung von FVK eine besondere Relevanz haben. Diese sind einerseits für einen häufigen Fehlertyp bei FVK spezialisierte Porositätsanalysen und andererseits Algorithmen für die Auswertung der für die Festigkeit entscheidenden Faserorientierung.

### 2.3.1 Porositätsanalyse

Es gibt verschiedene Arten von Lufteinschlüssen in FVK-Bauteilen; hierzu gehören: Delaminationen, diskrete Hohlräume und Poren (Birt & Smith 2004). Von einer Delamination spricht man bei einem größeren flachen Lufteinschluss zwischen Faserschichten (s. a. Abschnitt 2.1.5). Im Gegensatz dazu handelt es sich bei diskreten Hohlräumen um einzelne größere Lufteinschlüsse, welche meist auch einen Einfluss auf die mechanische Stabilität des Bauteils haben. Bei Poren hingegen handelt es sich um mehrere kleine (Größenordnung im Submillimeterbereich), oft im Bauteil verteilte, Lufteinschlüsse, welche erst durch ihre Summe mechanisch relevant werden. Die Relevanz von Poren liegt in erster Linie in der durch sie verursachten Schwächung der Druckbeständigkeit und der Scherfestigkeit der Materialien (Birt & Smith 2004).

Die CT stellt ein sehr gutes Mittel zur Erkennung von Poren dar. Die Visualisierung aller im Bauteil vorkommenden Poren hängt jedoch von der erreichbaren Voxelauflösung ab. Die reine Sichtbarkeit in der Volumendarstellung ist aber nicht ausreichend. Für die Erzeugung quantitativer und objektiver Information ist eine automatisierte Analyse der Porosität notwendig, wobei Porosität das Verhältnis zwischen dem Volumen aller Poren und dem Gesamtvolumen des Bauteils bezeichnet (Hackh 2012).

Eine besondere Schwierigkeit für den Algorithmus ist hierbei die Tatsache, dass es sich bei FVK um Kompositmaterialien handelt. Die Mischung aus Fasern und Kunststoff führt in den Grauwertdaten zu größeren Schwankungen als bei Monomaterialien. Dies erschwert die Festlegung von Schwellwerten zur Trennung von Werkstoff und Poren. In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze zur Lösung dieser Herausforderung.

Während Kiefel und Stoessel die Verwendung eines globalen Schwellwerts in Kombination mit einem Referenzdatensatz favorisieren (Stoessel et al. 2011a, Kiefel et al. 2014, Kiefel et al. 2015), werden von Hackh mehrere lokale Schwellwerte verwendet (Hackh 2012).

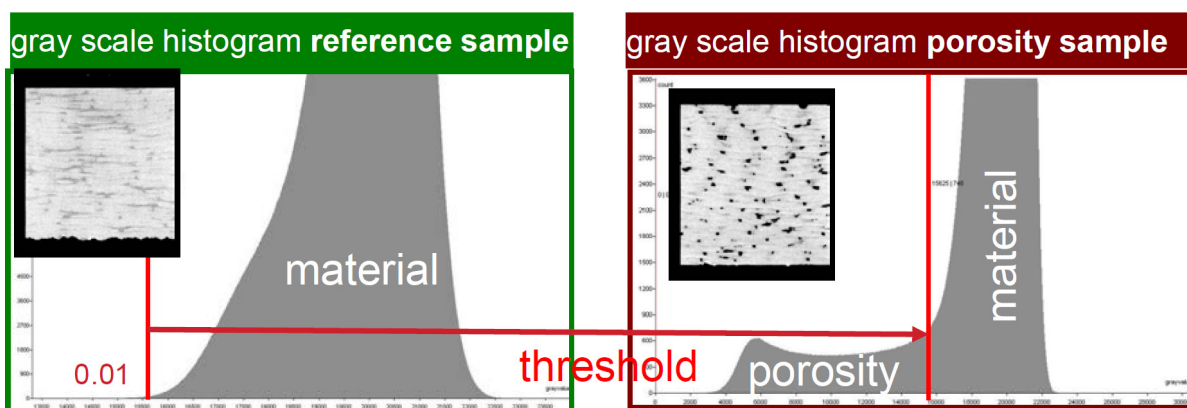


Abbildung 2.16: Bestimmung und Anwendung von globalem Schwellwert für Porositätsanalyse nach Kiefel und Stoessel (Quelle: Stoessel et al. 2011a)

Im Detail läuft das Verfahren von Kiefel und Stoessel wie folgt ab. Es wird zunächst ein Referenzdatensatz ohne Poren benötigt. Ohne Poren bedeutet in diesem Fall, dass von einer Porosität kleiner 0,01 ausgegangen wird. Dieser Wert wird auch benutzt, um aus dem Histogramm des Referenzdatensatzes den Schwellwert zur Differenzierung zwischen Poren und Material zu bestimmen. Ein Histogramm eines Volumendatensatzes zeigt die Häufigkeit der enthaltenen Grauwerte an. Die Y-Werte geben also die jeweilige Anzahl der Voxel an, während auf der X-Achse die zugehörigen Grauwerte abgelesen werden können. Im Histogramm des porenfreien Datensatzes wird nun ein X-Wert gewählt, so dass 0,01 aller Voxel einen Grauwert kleiner als diesen Schwellwert haben. Dieser Schwellwert wird nun auf den zu untersuchenden Datensatz angewandt, um dessen Porosität zu bestimmen sowie die Lage und Verteilung der Poren zu untersuchen. Das Vorgehen der Schwellwertbestimmung ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Die vertikale Linie im Histogramm des Referenzdatensatzes (reference sample) wird so gewählt, dass 0,01 aller Voxel einen

kleineren Grauwert als diesen Schwellwert haben. Im zu analysierenden Datensatz wird nun dieser Grauwert als Schwellwert benutzt, um den Bereich der möglichen Poren und des Materials zu trennen. Im Histogramm des Datensatzes (porosity sample) ist dies ebenfalls durch eine vertikale Linie dargestellt. Für die anschließende Porositätsanalyse sowie für die Schwellwertbestimmung sollte eine Region of Interest (ROI) gewählt werden. Diese Festlegung eines relevanten Auswertungsbereichs ist u. a. wichtig, um zwischen äußeren und inneren Poren zu unterscheiden. Gerade am Randbereich einer Probe ist die Trennung zwischen Umgebungsluft und zur Probe zugehöriger Pore nicht trivial. Durch eine manuell gesetzte ROI kann dieses Problem umgangen werden.

Wie bereits oben erwähnt wird von Hackh ein anderes Vorgehen favorisiert; statt eines globalen Schwellwerts werden lokale Schwellwerte verwendet. Zur Bestimmung der lokalen Schwellwerte werden zunächst lokale Grauwertminima (mögliche Kandidaten für Poren) gesucht. Für das jeweilige Minimum werden anschließend zwei Profillinien betrachtet (siehe Abbildung 2.17(a)). Diese verlaufen parallel zur X- und Y-Achse des Volumens (siehe Abschnitt 2.2.6.1, S. 44). Für beide Profillinien wird jeweils ein Schwellwert bestimmt. Der lokale Schwellwert  $S_x$  der X-Profillinie setzt sich dann aus dem absoluten Grauwert des Minimums  $G(x_m)$ , einem vom Nutzer zu wählendem Skalierungsfaktor  $\alpha$  und den lokalen Grauwertunterschieden  $\Delta G_1$  und  $\Delta G_2$  (siehe Abbildung 2.17(b)) wie folgt zusammen:

$$S_x = \alpha \min(\Delta G_1, \Delta G_2) + G(x_m)$$

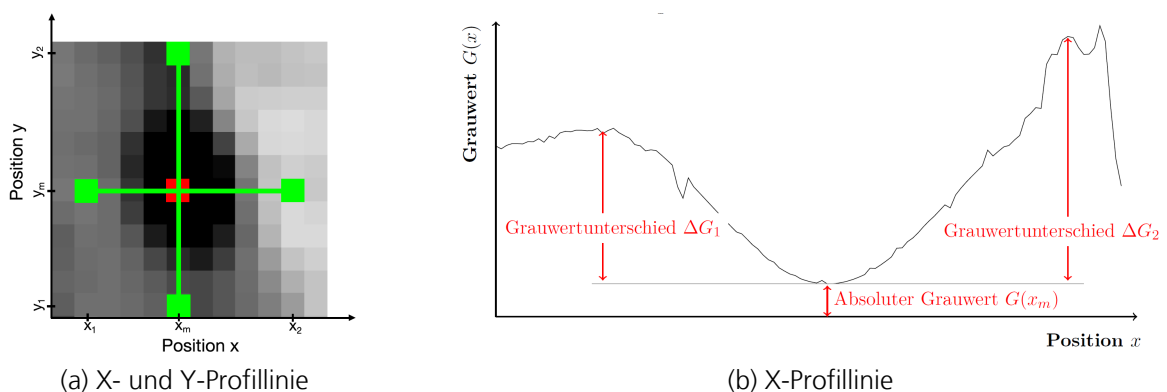


Abbildung 2.17: Bestimmung lokaler Schwellwert für Porositätsanalyse nach Hackh (Quelle: Hackh 2012)

Der Skalierungsfaktor  $\alpha$  definiert hierbei, wie stark die Pore durch den Algorithmus aus-

gefüllt wird (siehe Abbildung 2.18(b)). Die Bestimmung des Schwellwerts  $S_y$  ergibt sich analog aus der Betrachtung der Y-Profillinie. Das Minimum aus den beiden ermittelten Schwellwerten  $S_x$  und  $S_y$  der Profillinien ergibt den lokalen Schwellwert. Im anschließenden Region Growing Verfahren wird, ausgehend vom Minimum und abhängig vom ermittelten lokalen Schwellwert, die jeweilige Pore ausgefüllt. Das Ergebnis einer entsprechend durchgeführten Porositätsanalyse eines CT-Scans eines CFK-Rohrs ist in Abbildung 2.18 (Vergleich eines Schnittbilds durch den Originaldatensatz mit dem Schnittbild des Analyseergebnisses) dargestellt.

Ein weiterer Unterschied von Hackh zu dem Vorgehen von Kiefel und Stoessel besteht in der Unterscheidung zwischen inneren und äußeren Poren. Statt der festen Vorgabe einer ROI, wird bei Hackh zu Beginn der Analyse zunächst für den zu untersuchenden Datensatz ein Oberflächenmodell erstellt. Die anschließende oben beschriebene Porositätsanalyse wird dann nur noch für die innerhalb des Oberflächenmodells liegenden Voxel durchgeführt. Beim abschließenden Vergleich der beiden Verfahren lässt sich festhalten, dass das Vorgehen von Kiefel und Stoessel, durch den Verzicht von Nutzereingaben bei der Schwellwertbestimmung, eine größere Objektivität aufweist als die Methodik von Hackh. Hingegen besteht der Vorteil beim Verfahren von Hackh, durch die Verwendung adaptiver Schwellwerte und Oberflächenmodelle, in einer größeren Flexibilität.

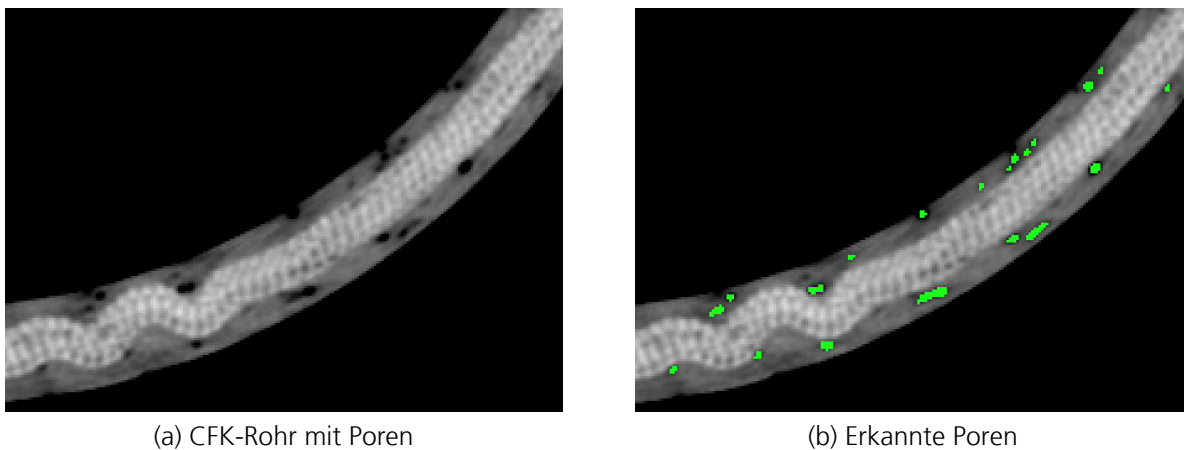


Abbildung 2.18: Vergleich zwischen ursprünglichem CT-Schnittbild und Porositätsanalyseergebnis (Quelle: Hackh 2012)

### 2.3.2 Analyse der Faserorientierung

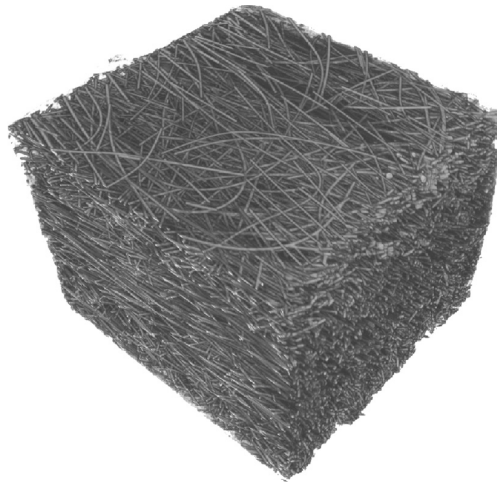


Abbildung 2.19: Sichtbare Faserorientierung in Darstellung einer CT-Aufnahme eines FVKs mit einer Auflösung von  $4,36\ \mu\text{m}$  (Quelle: Teßmann et al. 2010)

Neben eindeutigen Defekten wie Poren, Rissen oder Delaminationen (siehe Abschnitt 2.1.5) hat die Faserorientierung eine große Relevanz für die Materialeigenschaften der FVK. Sie beeinflusst in großem Maße die Festigkeit der Materialien (Salaberger et al. 2011). Während die Porosität vor allem die Druckbelastung und Scherfestigkeit beeinflusst, ist die Faserorientierung entscheidend für die Zugfestigkeit der Werkstoffe (siehe Abschnitt 2.1.2). Auch leichte Verschiebungen der Orientierung können bei den anisotropen Materialien zu großen Änderungen in der Kraftaufnahme führen. Bei ausreichender Auflösung können mittels Computertomographie die Faserorientierungen dargestellt (siehe Abbildung 2.19) und analysiert (siehe Abbildung 2.20) werden.

Im Folgenden werden Vorgehensweisen zur automatisierten Analyse der Faserorientierung auf Basis von Computertomographiedaten erläutert. Von Pfeifer, Salaberger, Teßmann und Wirjadi (Pfeifer et al. 2008, Salaberger et al. 2011, Teßmann et al. 2010, Wirjadi 2009) werden drei exemplarische Verfahren vorgestellt, bei denen das erste auf Binarisierung, das zweite auf der Verwendung von Eigenwerten und das dritte auf der Verwendung von Anisotropen Gaußfiltern basiert, wobei die Verwendung von Eigenwerten als Standardmethode zur Bestimmung von Orientierungen betrachtet wird (Wirjadi 2009).

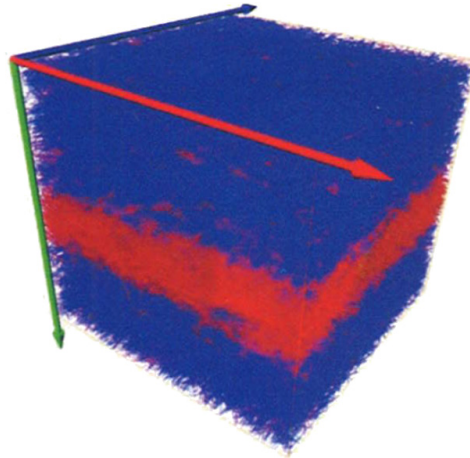


Abbildung 2.20: Entsprechend den Hauptorientierungen eingefärbte Darstellung der analysierten Faserorientierung einer CT-Aufnahme eines GFKs mit einer Auflösung von  $1,5\ \mu\text{m}$  (Quelle: Blanc & Westenberger 2017)

### 2.3.2.1 Binarisierungsverfahren

Bei der von Pfeifer vorgeschlagenen Binarisierung (Pfeifer et al. 2008) werden zunächst die Daten durch Filterung geglättet. Hierbei wird ein Filter verwendet, der zwar das Rauschen unterdrückt, die Kanten aber erhält (siehe Abbildung 2.21(a) und 2.21(b)). Anschließend erfolgt die namensgebende Binarisierung durch Anwendung eines Schwellwerts (siehe Abbildung 2.21(c)). Hierdurch wird im Idealfall die Matrix entfernt und die Fasern bleiben erhalten. Der sich nach der Binarisierung ergebende Datensatz wird anschließend einer Skelettierung unterzogen. Skelettierung bedeutet, dass alle geometrischen Objekte auf ihre Hauptachsen reduziert werden (Pfeifer et al. 2008). Wenn die Fasern als zylinderförmige Strukturen betrachtet werden, ist die Hauptachse des jeweiligen geometrischen Objekts die Achse des Zylinders. Im finalen Schritt wird für jede der extrahierten Hauptachsen die Orientierung berechnet. Die detektierten Fasern können dann mit ihren Orientierungen visualisiert werden (siehe Abbildung 2.21(d)).



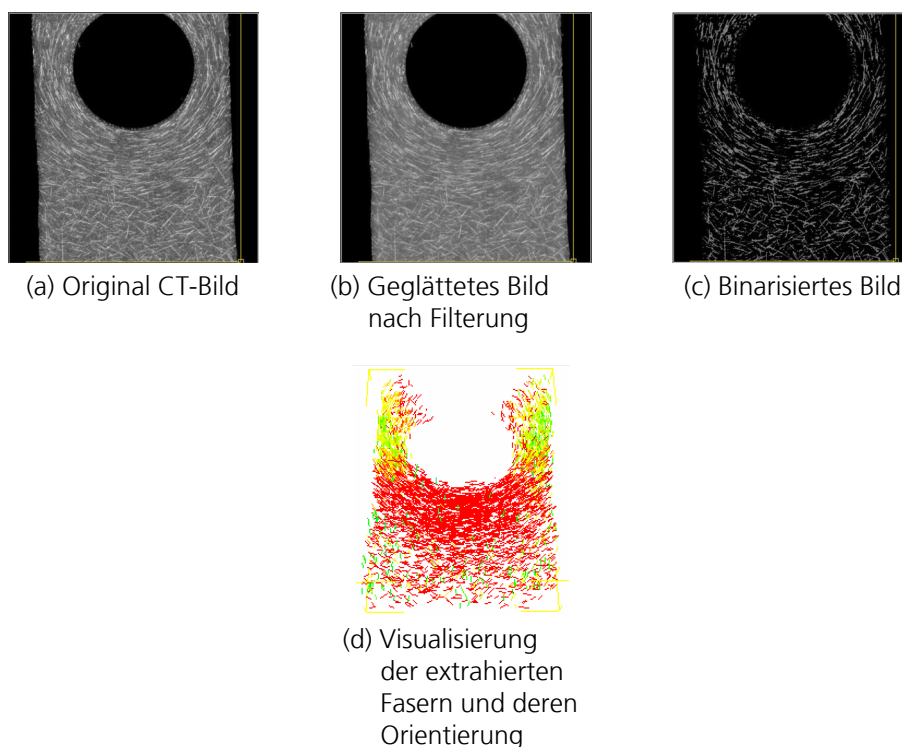


Abbildung 2.21: Schritte bei Verwendung von Binarisierung als Methode zur Bestimmung der Faserorientierung (Quelle: Pfeifer et al. 2008)

### 2.3.2.2 Eigenwertmethode

Auch die von Salaberger vorgeschlagene Methode (Salaberger et al. 2011) beginnt zunächst mit einer rauschreduzierenden und kantenerhaltenden Filterung. Der gefilterte Datensatz wird anschließend aber nicht binarisiert und skelettiert, sondern es wird für jedes Voxel die Hesse-Matrix berechnet. Diese ist im Mehrdimensionalen das Analogon zur zweiten Ableitung im Eindimensionalen und lässt im Allgemeinen Rückschlüsse auf das Krümmungsverhalten mehrdimensionaler reellwertiger Funktionen zu. Durch die nachfolgende Analyse der jeweiligen Eigenwerte lässt sich die lokale Faserorientierung bestimmen. Es wird hierbei, wie von Teßmann (Teßmann et al. 2010) beschrieben, von einer zylindrischen Form der Fasern ausgegangen. Ein ähnliches Vorgehen wird von Frangi (Frangi et al. 1999) für eine medizinische Anwendung beschrieben. Entlang der Zylinderachse treten wenig Grauwertunterschiede auf, während orthogonal zur Zylinderachse größere Grauwertvariationen auftreten. Die Eigenvektoren in Richtung großer Grauwertunterschiede bedingen auch große zugehörige Eigenwerte, während Eigenvektoren in Richtung geringer Grauwertvariationen kleine zugehörige Eigenwerte haben. Somit gibt der Eigenvektor des

kleinsten Eigenwerts die Faserorientierung an (Wirjadi 2009). Das Verfahren sieht eine Eigenwertanalyse für jedes einzelne Voxel vor. Da dieses Vorgehen sehr aufwendig ist, sind für eine effiziente Durchführung zusätzliche verfahrensspezifische Optimierungen notwendig (Teßmann et al. 2010).

Eine weitere Variante zur Bestimmung der Faserorientierung verwendet sogenannte Strukturtenoren (Krause et al. 2010). Diese werden mithilfe von Gradienten der Voxel anstelle der Hesse-Matrix berechnet. Entsprechend werden hier die Eigenwerte des Strukturtenors betrachtet, wobei, wie auch bei den zuvor beschriebenen Verfahren, gilt, dass der Eigenvektor des kleinsten Eigenwerts die Orientierung angibt.

### 2.3.2.3 Verwendung von Anisotropen Gaußfiltern

In Summe setzen sowohl das Binarisierungsverfahren als auch die Eigenwertmethode auf die Extraktion der einzelnen Fasern. Im Gegensatz hierzu wurde von Wirjadi (Wirjadi 2009) ein Verfahren vorgeschlagen, welches auf die Betrachtung der einzelnen Faser verzichtet. Wirjadi verwendet hierzu Anisotrope Gaußfilter. Diese Filter haben die Form:

$$g(x) = a \exp\left(-\frac{1}{2}x^T \Sigma^{-1} x\right),$$

wobei  $a$  ein Skalar und  $\Sigma$  eine Matrix ist.

Der Skalar  $a$  stellt hier lediglich einen Skalierungsfaktor dar. Die positiv definite Matrix  $\Sigma$  ist hingegen entscheidend für das Verhalten des Filters. Durch eine geeignete Konstruktion der Matrix können deren Eigenvektoren und Eigenwerte gezielt gewählt werden. Dies wird genutzt, um eine geeignete Kombination von Eigenvektoren und Eigenwerten der Matrix festzulegen. Hierdurch kann erreicht werden, dass die Filterantwort (Faltung zwischen Volumen und Filter  $g(x)$ ) maximal wird, wenn die Richtung der Fasern der Richtung des Eigenvektors mit dem größten Eigenwert entspricht. Für jede zu überprüfende Orientierung muss somit eine andere Matrix  $\Sigma$  verwendet werden. Allgemeiner ausgedrückt gilt, dass zur Ermittlung der Faserorientierung verschiedene richtungsabhängige Filter benötigt werden. Dies führt dazu, dass eine Diskretisierung aller in Frage kommenden Orientierungen notwendig ist. Dadurch handelt es sich, verglichen mit der oben beschriebenen Eigenwertmethode, um ein rechenintensives Verfahren (Wirjadi 2009).

### 2.3.3 Weitere Analyseverfahren für CT-Daten von Faserverbundkunststoffen

In diesem Abschnitt soll ein kurzer Überblick über weitere, im Vergleich zur Porositäts- und Faserorientierungsanalyse zwar weniger relevante, aber dennoch erwähnenswerte Verfahren für die Auswertung von CT-Daten von FVK gegeben werden. Hierzu gehört ein Soll-Ist-Vergleich u. a. zur Erkennung des Faservolumengehalts und der Faserverteilung (Diewel et al. 2011, Oster 2012). Das zuvor bereits vorgestellte Verfahren von Salaberger (Salaberger et al. 2011) wird mit entsprechenden Erweiterungen eingesetzt, um zusätzlich zu den Orientierungen auch die Faserlängen und deren Verteilung zu bestimmen.

Für die Erkennung und Bewertung von Rissen, Schlagschäden und Delaminationen wird kommerzielle Software als Hilfsmittel zur manuellen Analyse verwendet (Stoessel et al. 2011b). Neben der Verwendung verschiedener (teil)automatisierter Methoden werden nach wie vor vielfach die CT-Aufnahmen von FVK manuell, durch visuelle Betrachtung der aufgenommenen Daten, von geschulten Personen bewertet (Gholizadeh 2016).

## 2.4 Texturanalyse

Während in den vorhergehenden Abschnitten Verfahren speziell für die Analyse von FVK betrachtet wurden, soll nun auf eine allgemeinere Analysemethode eingegangen werden, welche bisher nicht für FVK eingesetzt wird. Dieses Verfahren wird als Texturanalyse bezeichnet und typischerweise für 2D Bilddaten verwendet.

Zunächst ist hierbei festzuhalten, dass es keine eindeutige und allgemeingültige Definition des Begriffs Textur gibt (Bauer 2007). Eine oft zitierte Definition lautet wie folgt: Die Textur beschreibt die Anzahl und Art von Primitiven und deren räumliche Anordnung (Haralick 1979). Diese Definition der Textur wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit beibehalten. Meist wird der Begriff der Textur auf zweidimensionale Grauwertbilder bezogen (Pannekamp 2005). Bei der Texturanalyse werden in diesem Fall die Grauwerte der Bildpixel als Primitive betrachtet, deren räumliche Anordnung untersucht wird (Haralick 1979). Räumliche Anordnung bezieht sich hierbei auf die zweidimensionale Lage der Pixel eines Bilds zueinander. Da stets das Verhältnis der Grauwerte relevant ist, ist der Texturbegriff

auf ein einzelnes Pixel nicht anwendbar (Chen & Pavlidis 1979). Beispiele für Texturen sind in Abbildung 2.22 dargestellt.

Es wird zwischen streng periodischen (deterministischen) und stochastischen Texturen unterschieden (Pannekamp 2005, Bauer 2007). Streng periodische Texturen lassen sich mittels einer Elementarzelle beschreiben. Aus der Wiederholung dieser Elementarzelle ergibt sich die Textur. Bei stochastischen Texturen muss hingegen der mustererzeugende Prozess betrachtet werden. Das heißt eine stochastische Textur besteht zwar aus ähnlichen aber nicht identischen Bereichen. Die Variation zwischen den Bereichen wird über den mustererzeugenden Prozess definiert. Natürliche Texturen sind stets stochastisch. Künstliche bzw. maschinell erzeugte Texturen, beispielsweise strukturierte Tapeten, können als streng periodisch betrachtet werden, auch wenn bei exakter Betrachtung auch hier feine Unterschiede zwischen den Bereichen auftreten.

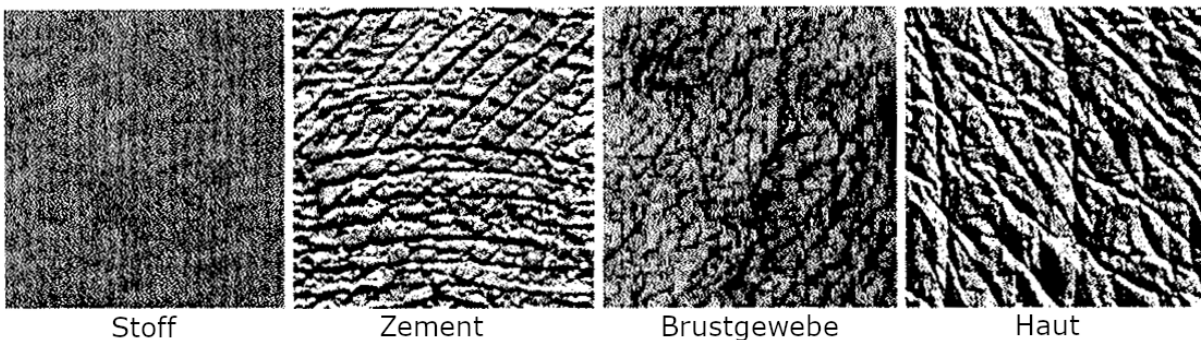


Abbildung 2.22: Beispiele für Texturen (Quelle: Handels 2009)

### 2.4.1 Einsatzgebiet

Die Analyse von Texturen ermöglicht Oberflächen zu identifizieren und zu unterscheiden. Allgemeiner gesprochen eignet sie sich generell für Klassifizierungs- und Segmentierungsaufgaben (Pratt 2001, Handels 2009). Oft wird sie im Besonderen für die Erkennung diskreter, nicht gleichmäßig über die Oberfläche des Bauteils verteilter Defekte verwendet. Insgesamt gibt es aber zahlreiche verschiedene Anwendungsgebiete. Beispiele hierfür sind (Pannekamp 2005, Bauer 2007, Handels 2009):

- Auswertung von Luft- und Satellitenbildern

- Qualitätssicherung in der Fertigungsmesstechnik zur Detektion von Fehlern in strukturierten Oberflächen
- Prüfung von Massenwaren (beispielsweise Stahlbleche, Kunststofffolien oder Holzoberflächen) im industriellen Bereich
- Gewebeklassifikation und -segmentierung in der medizinischen Bildverarbeitung
- Bestimmung von Vorzugsrichtungen, beispielsweise von Riefen

## 2.4.2 Verfahren zur Texturbestimmung

Texturen sind zwar für den Menschen zunächst einfach zu erkennen. Ihre Digitalisierung, Analyse und automatische Auswertung gestaltet sich deutlich komplexer (Haralick et al. 1973). Generell muss die Beschreibung einer Textur in der Lage sein, eine Vielzahl von Texturausprägungen zu beschreiben. Es gibt verschiedene Verfahren Texturen zu bestimmen. Eine direkte Herangehensweise besteht in der Berechnung statistischer Merkmale wie beispielsweise des Mittelwerts oder der Varianz (Bauer 2007). Eine Übersicht weiterer Verfahren findet man bei Haralick (Haralick 1979). Eines der häufigsten eingesetzten Berechnungsverfahren besteht in der Verwendung sogenannter Grauwertmatrizen (Pannekamp 2005).

### 2.4.2.1 Grauwertmatrizen

Um Texturen zu beschreiben, können Grauwertmatrizen (häufig auch als Co-occurrence oder Gray-tone spatial-dependence Matrizen bezeichnet) verwendet werden (Bauer 2007). Diese wurden erstmals von Haralick (Haralick et al. 1973) formuliert. Allgemein können sie wie folgt definiert werden. Man geht zunächst von einem Grauwertbild  $I_b$  aus. Die Grauwerte der Pixel dieses Bildbereichs nehmen ganzzahlige Werte zwischen 0 und  $G - 1$  an. Dann wird die Grauwertmatrix  $C$  als eine Matrix aus  $G$  Spalten und  $G$  Zeilen definiert, deren Elemente  $c_{ij}$ , abhängig von einem vorgegebenen Pixelabstand  $d$ , wie folgt aussehen:

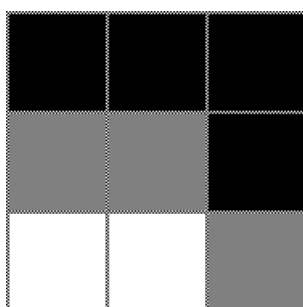
$$c_{ij} = \#\{(u, v) \in (I_b \times I_b), G_u = i, G_v = j, \|K_u - K_v\| = d\},$$

wobei  $G_u$  bzw.  $G_v$  die Grauwerte und  $K_u$  und  $K_v$  die Koordinaten des jeweiligen Pixelpaars  $u$  und  $v$  sind. Somit geben die Elemente der Grauwertmatrix  $C$  jeweils die Anzahl der Pixelpaare im Bildbereich  $I_b$  an, deren Grauwerte  $i$  und  $j$  sind und deren Abstand  $d$  ist. Oft werden die Elemente noch normiert, indem sie durch den Wert

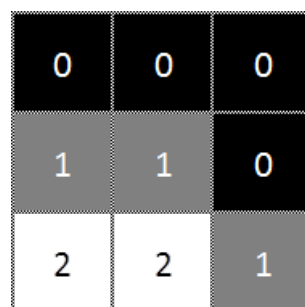
$$n = \#\{(u, v) \in (I_b \times I_b), \|K_u - K_v\| = d\}$$

geteilt werden. Dieser gibt die Gesamtanzahl der Pixelpaare mit Abstand  $d$  im Bildbereich  $I_b$  an. Sofern  $u \neq v$  werden hierbei die Pixelpaare  $(u, v)$  und  $(v, u)$  unterschieden. Durch die Normierung ergeben sich die Werte  $p_{ij} = c_{ij}/n$ . Diese geben die Wahrscheinlichkeit an, dass ausgehend von einem Pixel  $u$  mit dem Grauwert  $i$  ein Pixel  $v$  mit Abstand  $d$  zu  $u$  den Grauwert  $j$  hat. Bei dieser Definition einer Grauwertmatrix ergeben sich stets symmetrische Matrizen. Dies ist nicht der Fall, wenn der Abstand  $d$  richtungsabhängig betrachtet wird. Ein Beispiel hierfür mit  $d = 1$  ist, wenn der Übergang eines linken zu einem rechten vom Übergang eines rechten zu einem linken Pixel unterschieden wird.

Ein einfaches Beispiel für die oben gegebene Definition einer normierten Grauwertmatrix  $C_n$  ist in Abbildung 2.23 aufgeführt. Hierbei wird der Pixelabstand  $d = 1$  betrachtet. Im dargestellten Beispiel besteht der Bildbereich  $I_b$  aus drei mal drei Pixeln. Es gibt hier drei Grauwertstufen: 0, 1 und 2. Für den Pixelabstand  $d = 1$  ergeben sich somit  $n = 24$  Grauwertübergänge. In der Matrix finden wir dann beispielsweise das Element  $c_{01} = 4$  (die Zeilen und Spaltennummerierung beginnt hier bei 0), welches angibt, dass in dem betrachteten Bildbereich  $I_b$  vier Übergänge mit dem Abstand  $d = 1$  vom Grauwert 0 nach 1 vorkommen.



(a) Grauwertbild



(b) Grauwertbild + Pixelwerte

$$C_n = \frac{1}{24} \begin{pmatrix} 6 & 4 & 0 \\ 4 & 2 & 3 \\ 0 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

(c) Grauwertmatrix

Abbildung 2.23: Beispiel für Grauwertmatrix mit Pixelabstand  $d = 1$

### 2.4.2.2 Abgeleitete Größen

Statt direkt die Grauwertmatrizen für die Texturanalyse zu nutzen, können auch abgeleitete Größen verwendet werden. Eine Auswahl ist nachfolgend aufgelistet (Haralick et al. 1973, Haralick 1979):

- Energie:

$$\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} p_{ij}^2$$

- Entropie:

$$-\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

- Maximale Wahrscheinlichkeit:

$$\max_{i \in \{0, \dots, G-1\}, j \in \{0, \dots, G-1\}} p_{ij}$$

- Kontrast:

$$\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (i-j)^2 p_{ij}$$

- Korrelation:

$$\frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \left( \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} ij p_{ij} - \mu_x \mu_y \right)$$

wobei

$$\mu_x = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} i p_{ij}, \quad \mu_y = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} j p_{ij},$$

$$\sigma_x = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (i - \mu_x)^2 p_{ij} \quad \text{und} \quad \sigma_y = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (j - \mu_y)^2 p_{ij}$$

- Inverses Differenzenmoment:

$$\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{p_{ij}}{1 + (i-j)^2}$$

Die Verwendung abgeleiteter Größen anstelle der Grauwertmatrizen bedingt einen Informationsverlust (Pannekamp 2005). Dieser kann zugunsten einer besseren Laufzeit oder eines geringeren Speicherbedarfs in Kauf genommen werden.

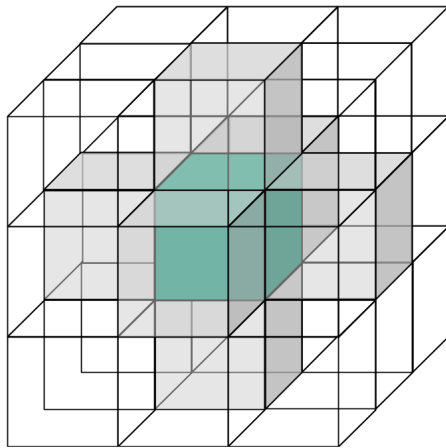
### 2.4.2.3 Erweiterung von Grauwertmatrizen auf Volumendaten

Die vorgestellten Grauwertmatrizen werden meist auf zweidimensionale Bilder bezogen. Es sind jedoch Erweiterungen auf Volumendaten (siehe Abschnitt 2.2.6.1, S. 44) bekannt. Eine simple Variante besteht darin, Volumendaten schichtweise zu analysieren. Hierbei gehen jedoch möglicherweise wichtige Informationen zwischen benachbarten Voxeln, die in den dreidimensionalen Daten enthalten sind, verloren. Deshalb wurde von Kovalev et al. (Kovalev et al. 2001) eine Erweiterung der bereits erläuterten klassischen Grauwertmatrizen vorgeschlagen. Die oben gegebene Definition der Grauwertmatrizen muss hierzu nicht geändert werden. Es muss lediglich berücksichtigt werden, dass neue Nachbarschaften betrachtet werden müssen. Während im zweidimensionalen Fall lediglich der Zusammenhang zwischen Pixeln in einer Ebene berücksichtigt wird, werden durch die zusätzliche Dimension neue Nachbarschaften eröffnet.

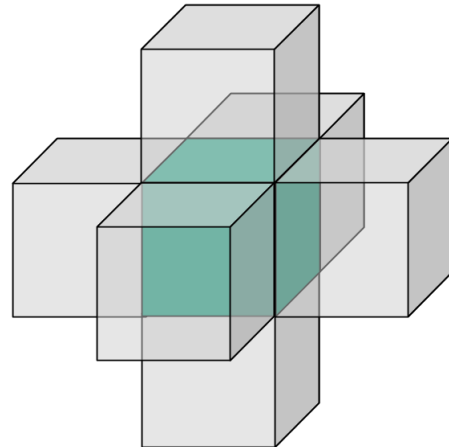
Im vorhergehenden zweidimensionalen Beispiel (siehe Abbildung 2.23) war es für das Aufstellen der Grauwertmatrix mit dem Pixelabstand  $d = 1$  notwendig, für jedes Pixel das linke, rechte, obere und untere Nachbarpixel zu betrachten. Im dreidimensionalen Fall müssen beim Voxelabstand  $d = 1$  für jedes Voxel nicht nur das linke, rechte, obere und untere Voxel betrachtet werden, sondern auch das in der vorhergehenden bzw. nachfolgenden Schicht direkt angrenzende Nachbarvoxel. Dieser Fall wird in Abbildung 2.24 veranschaulicht. Das betrachtete Voxel ist hier farblich hervorgehoben. Die relevanten Voxel für den Voxelabstand  $d = 1$  sind hellgrau markiert. In Abbildung 2.24(a) sind alle Voxel der Umgebung zu sehen, während in Abbildung 2.24(b) zur besseren Übersicht nur die relevanten Voxel dargestellt sind.

Generell ist festzuhalten, dass, unabhängig vom betrachteten Voxelabstand  $d$ , die Dimension der Grauwertmatrix im Vergleich zum 2D Fall nicht verändert wird. Es bleibt bei einer quadratischen (zweidimensionalen) Matrix, deren Spalten und Zeilenzahl sich aus der Anzahl der Grauwertstufen der Voxel ergibt.





(a) Darstellung der vollständigen Voxelumgebung



(b) Darstellung der relevanten Voxel

Abbildung 2.24: Relevante Nachbarschaftsbeziehungen für Voxelabstand  $d = 1$

## 2.4.3 Analyse von Texturen

### 2.4.3.1 Varianten

Nachdem im Vorhergehenden gezeigt wurde, wie sich Texturen mithilfe von Grauwertmatrizen beschreiben lassen, stellt sich nun die Frage, wie die eigentliche Texturanalyse durchgeführt wird. Man kann hier zwischen zwei grundlegend verschiedenen Vorgehensvarianten unterscheiden.

Bei der ersten Variante werden für Klassifizierungs- oder Segmentierungsaufgaben eingelernte Texturen verwendet. Beispielsweise kann hierzu ein Anwender eine Reihe von Gutbildern auswählen. Diese dienen dann als Trainingsdaten und werden verwendet, um eine Guttextur zu bestimmen (Pannekamp 2005, Kovalev et al. 2001). Anschließend wird diese für die Klassifizierung bzw. Segmentierung weiterer Bilder verwendet. Bei der Klassifizierung wird überprüft, ob ein neues Bild zur vorgegebenen Guttextur passt oder nicht. Bei der Segmentierung wird ein Bild in Bereiche aufgeteilt, die der Guttextur entsprechen und Bereiche, die ihr nicht entsprechen. Sowohl die Klassifizierung wie die Segmentierung können zur Fehlererkennung verwendet werden.

Bei der zweiten Variante werden keine Texturen vorgegeben. Diese Verfahren sind somit vollständig selbstlernend. Im Nachfolgenden wird auf eine Möglichkeit der Implementierung eines solchen selbstlernenden Verfahrens genauer eingegangen.

### 2.4.3.2 2D Split-and-Merge Verfahren zur texturbasierten Segmentierung

Chen und Pavlidis haben ein texturbasiertes Segmentierungsverfahren für quadratische 2D-Bilder vorgestellt, bei dem keine Vorabinformation oder Trainingsphase notwendig ist (Chen & Pavlidis 1979). Unter Segmentierung wird hier verstanden, 2D-Bilder in Bereiche zu unterteilen, die jeweils innerhalb eines Bereichs eine einheitliche Textur haben, sich aber von anderen Bereichen in ihrer Textur unterscheiden. Das Verfahren setzt sich aus vier Schritten zusammen:

1. **Vorsegmentierung (Splitting):** Zunächst wird das zu analysierende Bild in Teilbereiche zerlegt. Hierzu wird eine Baumstruktur verwendet (Pavlidis 1977). Das Originalbild stellt hierbei die Wurzel des Baums dar. Die Wurzel verfügt über vier Knoten. Jeder Knoten steht für ein Viertel des Originalbilds. Die Aufteilung in die Bildbereiche erfolgt mittels der horizontalen und vertikalen Mittellinie. Jeder Knoten  $K$  verfügt wiederum über vier weitere sogenannte Kinds-knoten, die wiederum die Aufteilung dieses Teilbereichs darstellen. Aus Sicht der Kinds-knoten wird der Knoten  $K$  als Vaterknoten bezeichnet. Die Zerlegung erfolgt jeweils analog zur Zerlegung des Ursprungsbilds. Die Zerlegung wird bis zu einer Mindestbildgröße fortgesetzt.
2. **Zusammenfügen (Merging):** Nachdem das Bild im ersten Verfahrensschritt zerlegt wurde, wird es im zweiten Verfahrensschritt, basierend auf der Textur der Teilbereiche, zu Segmenten zusammengefügt. Es wird mit den untersten Knoten (Knoten ohne Kinds-knoten) der Baumstruktur begonnen. Für jeweils vier Kinds-knoten eines Vaterknotens werden die entsprechenden Grauwertmatrizen  $C^{(1)}$ ,  $C^{(2)}$ ,  $C^{(3)}$  und  $C^{(4)}$  berechnet. Hierbei wird die Symmetrie der Grauwertmatrizen zur Speicherplatzreduzierung genutzt. Zur weiteren Speicherplatzoptimierung bei gleichzeitiger Steigerung der Laufzeit wird die Anzahl der Grauwertstufen reduziert. Falls die vier berechneten Matrizen für den vorgegebenen Schwellwert  $T$  die nachfolgende Bedingung 2.1 erfüllen, werden die vier Teilbilder zusammengefasst.

$$\sum_i \sum_j (\max(c_{ij}^{(1)}, c_{ij}^{(2)}, c_{ij}^{(3)}, c_{ij}^{(4)}) - \min(c_{ij}^{(1)}, c_{ij}^{(2)}, c_{ij}^{(3)}, c_{ij}^{(4)})) < T \quad (2.1)$$

Das heißt, dass der Vaterknoten anschließend aus einem Segment besteht. Somit können die Kinds-knoten in der Baumstruktur gelöscht werden. Die Grauwertmatrix  $C^{(k)}$  des Vaterknotens lässt sich effizient durch Summierung der Grauwertmatrizen  $C^{(1)}$ ,  $C^{(2)}$ ,  $C^{(3)}$  und  $C^{(4)}$  der Kinds-knoten wie folgt berechnen:

$$C^{(k)} = \frac{1}{4}(C^{(1)} + C^{(2)} + C^{(3)} + C^{(4)}) \quad (2.2)$$

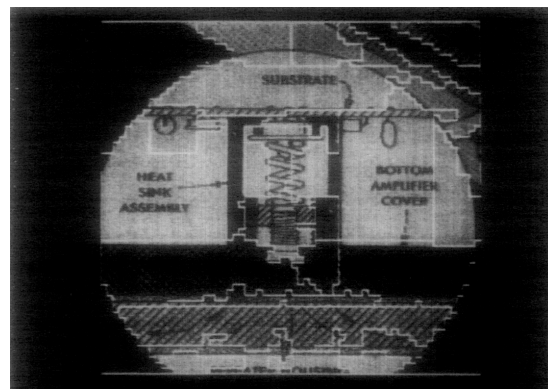
Hierbei werden die Übergänge zwischen den Knoten bei der Berechnung von  $C^{(k)}$  vernachlässigt. Da in diesem Fall die Bedingung aus Formel 2.1 erfüllt ist, werden die Matrizen als ähnlich genug betrachtet, so dass dieses Vorgehen legitim ist. Falls die Vernachlässigung vermieden werden soll, müssen die Übergänge bereits bei der Berechnung von  $C^{(1)}$ ,  $C^{(2)}$ ,  $C^{(3)}$  und  $C^{(4)}$  berücksichtigt werden.

Durch die einfache Berechnung in Formel 2.2 folgt, dass das Zusammenfassen von Bereichen auf Basis von Grauwertmatrizen sich mit geringem Rechenaufwand durchführen lässt. Das Zusammenfassen von kinderlosen Knoten wird entsprechend solange in Richtung der Baumwurzel fortgesetzt bis die Bedingung 2.1 nicht mehr erfüllt ist.

3. **Gruppierung:** Im dritten Verfahrensschritt findet eine weitere Gruppierung der verbliebenen Teilbilder statt. Hierzu wird die sich aus dem vorhergehenden Verfahrensschritt ergebende Baumstruktur nach benachbarten Teilbildern durchsucht. Für das Zusammenfügen benachbarter Teilbilder zu einem gemeinsamen Segment wird erneut die Formel 2.1 als Entscheidungskriterium verwendet. Allerdings wird die Formel hierzu auf zwei statt vier Grauwertmatrizen angepasst, was auch dazu führt, dass hier ein kleinerer Schwellwert als im vorhergehenden Verfahrensschritt verwendet werden muss.
4. **Filterung kleiner Regionen:** Nach dem Gruppierungsschritt bleiben oft kleine Regionen übrig, die unter Verwendung der Bedingung 2.1 keinem benachbarten großen Segment zugeordnet werden können. Diese Regionen sind meist nicht relevant für die texturbasierte Segmentierung. Da außerdem für kleine Regionen keine aussagekräftige Textur berechnet werden kann, werden sie dem benachbarten Segment zugeschlagen, dessen mittlerer Grauwert die geringste Abweichung zu dem mittleren Grauwert der betrachteten kleinen Region aufweist (Horowitz & Pavlidis 1976).



(a) Segmentiertes Porträt



(b) Segmentiertes technisches Bild

Abbildung 2.25: Beispiele texturbasierter Segmentierung mit Split-and-Merge Verfahren (Quelle: Chen & Pavlidis 1979)

Beispiele für Ergebnisse des beschriebenen Split-and-Merge Verfahrens sind in Abbildung 2.25 dargestellt. Die Grenzen der segmentierten Bereiche sind hier durch weiße Trennlinien markiert. Beispielsweise wurden die Haare im Portrait in Abbildung 2.25(a) als in seiner Textur einheitlicher Bereich größtenteils erkannt.

## 2.5 Fazit Stand der Technik

Die komplexe, teilweise stark durch manuelle Tätigkeiten geprägte Herstellung von FVK macht eine umfassende zerstörungsfreie Prüfung notwendig. Diese muss die Erkennung der zahlreichen, unterschiedlichen Fehlertypen sicherstellen. Insbesondere bei der Entwicklung, Erprobung und Qualifizierung neuer Herstellungsverfahren ist der Einsatz dieser Prüfmethoden unumgänglich. Da bei FVK oft innenliegende Fehler auftreten, sind klassische optische Verfahren nicht ausreichend. Es werden Methoden benötigt, die ins Bauteilinnere blicken können.

Die Verfahren Ultraschall, Thermographie, Shearographie und Wirbelstrom erfüllen diese Voraussetzung und sind gleichzeitig als Inlineverfahren einsetzbar. Jedes dieser Verfahren hat seine spezifischen Vor- und Nachteile, die in Abschnitt 2.2 ausführlich dargestellt wurden. Gemein ist den Verfahren, dass zwar qualitativ gute Informationen erzeugt werden können, aber quantitative Informationen schwierig zu extrahieren sind. Oft sind hierfür spezifische Vorabinformationen über das zu untersuchende Bauteil notwendig.

Die Terahertzprüfung stellt ein interessantes neues Verfahren dar, dessen Potential aber

erst noch vollständig erforscht werden muss. Die aktuellen spezifischen Schwierigkeiten bei dieser Methode wurden in Abschnitt 2.2.5 erläutert. Somit stellt derzeit die CT die einzige ausreichend validierte Prüfmethode dar, mit der direkt quantitative Informationen des Bauteilinneren, nahezu unabhängig von dessen Geometrie und Größe, erzeugt werden können. Gleichzeitig sollte aber berücksichtigt werden, dass es sich um eines der zeit- und kostenintensivsten Verfahren handelt.

Um das volle Potential der erzeugten CT-Daten zu nutzen, werden intelligente Analyseverfahren benötigt. Zwei für FVK besonders relevante Verfahren sind die Porositätsanalyse und die Analyse der Faserorientierung. Diese wurden in Abschnitt 2.3 anhand verschiedener Umsetzungen beschrieben. Die vorgestellten Verfahren erfüllen aber nicht alle Ansprüche, die an die Prüfung von FVK gestellt werden. Zahlreiche Fehlertypen können nicht mittels der Porositätsanalyse erkannt werden und auch die Verfahren zur Analyse der Faserorientierung kommen je nach Qualität und Voxelauflösung des CT-Datensatzes an ihre Grenzen.

Die Texturanalyse als erprobtes Verfahren für die Untersuchung von strukturierten 2D-Bildern birgt hier ein hohes Potential. Die gewebten bzw. gelegten Strukturen der FVK bieten grundsätzlich gute Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz dieser Analysemethode. Die Erweiterbarkeit von Texturanalyseverfahren auf Volumendaten wurde bereits in Abschnitt 2.4.2.3 dargestellt.

# 3 Anforderungen, Konzeption und Systementwurf

In diesem Kapitel wird zunächst die Motivation für die Prüfung von FVK und vor allem für die automatisierte und intelligente Auswertung der erzeugten Daten dargelegt. Anschließend werden die Anforderungen für das einzusetzende Prüfverfahren definiert. Die im Stand der Technik beschriebenen Prüfverfahren werden auf Basis dieser bewertet. Nachdem das Prüfverfahren ausgewählt wurde, ergibt sich auch die Datengrundlage für den zu entwickelnden Algorithmus. Hierfür werden ebenfalls die Anforderungen definiert, existierende Verfahren bewertet und ein neuer Algorithmus konzipiert. Abschließend wird der im Nachfolgenden auszuarbeitende Systementwurf des Algorithmus vorgestellt.

## 3.1 Motivation

FVK sind relativ neue Materialien, die aufwendig und komplex herzustellen sind (siehe Abschnitt 2.1.4). Gleichzeitig werden sie oft in sicherheitskritischen Bereichen, wie z. B. in der Automobilbranche oder der Luftfahrt, eingesetzt (siehe Abschnitt 2.1.3). Dadurch wird eine umfassende Prüfung benötigt. Oft sind Defekte bei FVK von außen nicht erkennbar. Insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen darf ein Bauteil beispielsweise nach einem Aufprall nicht einfach weiterverwendet werden, auch wenn von außen keine Beschädigung sichtbar ist. Die innenliegende Faserstruktur kann dennoch gebrochen sein. Da die Faserorientierung, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, entscheidend für die mechanische Festigkeit des Bauteils ist, wird eine Prüfmethode benötigt, die diese Schädigung im Inneren erkennen kann.

Für die von der Prüfmethode erzeugten Daten wird wiederum eine intelligente und automatisierte Auswertung benötigt. Die zu entwickelnde Auswertung muss in der Lage sein, die verschiedenen Herausforderungen der FVK-Prüfung abzudecken.

## 3.2 Anforderungen, Bewertung und Auswahl Prüfmethode

Zunächst werden die Anforderungen an das auszuwählende Prüfverfahren formuliert. Anschließend werden die im Stand der Technik betrachteten Verfahren hinsichtlich der Anforderungen bewertet. Auf Basis der Bewertung wird die geeignete Prüfmethode für das zu entwickelnde System ausgewählt.

### 3.2.1 Anforderungen an Prüfverfahren

Es werden folgende Anforderungen an die auszuwählende Prüfmethode gestellt:

- **Es soll eine zerstörungsfreie Prüfmethode verwendet werden.**

Hierdurch kann im Gegensatz zu einer zerstörenden Prüfung das Material bzw. Bauteil auch nach der Prüfung weiterverwendet werden. Somit können wiederholende Prüfungen beispielsweise der selben Fehlstelle durchgeführt werden. Außerdem vermeidet man den Konflikt, durch die zerstörende Prüfung neu entstehende Defekte von bereits vorhandenen Fehlern zu unterscheiden.

- **Die Prüfmethode soll in der Lage sein, möglichst alle, in Kapitel 2 genannten, relevanten Fehler und Qualitätsmerkmale von FVK zu erfassen.**

Wie bereits beschrieben weisen FVK ein breites Fehlerspektrum auf. Um eine umfassende Prüfung zu gewährleisten, muss die eingesetzte Methode in der Lage sein dieses abzubilden. Außerdem sind Qualitätsmerkmale, wie die Einhaltung der vorgegebenen Faserorientierung, entscheidend für den Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen. Deshalb ist es notwendig, dass die Prüfmethode auch die Erfassung dieser Merkmale abbilden kann.

- **Die Ergebnisse der Prüfmethode sollen eine quantitative Auswertung ermöglichen.**

Rein qualitative Ergebnisse sind oft nicht ausreichend, um eine ausreichende Bewertung von Fehlstellen oder Qualitätsmerkmalen der FVK durchzuführen. Erst eine quantitative Auswertung erlaubt eine Einordnung in kritische oder unkritische Charakteristika.

- **Es wird eine hinsichtlich der Bauteile möglichst flexible Prüfung und keine Serienprüfung angestrebt.**

Je spezieller ein Prüfverfahren und dessen Auswertung für eine Materialart, ein Bauteil und einen Fehlertyp bzw. ein Qualitätsmerkmal angepasst ist, desto eher ist der Einsatz in einer Serienprüfung möglich. Da hier aber ein bezüglich der Bauteile, des Fehlerspektrums und der Qualitätsmerkmale möglichst umfassendes Prüfsystem und Auswerteverfahren angestrebt wird, steht der flexible Einsatz im Vordergrund. Statt einer Speziallösung für den Einzelfall besteht die Zielsetzung in einem möglichst generellen Ansatz.

### 3.2.2 Eignung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Faserverbundkunststoffe

In diesem Abschnitt werden die im Stand der Technik ausführlich beschriebenen zerstörungsfreien Prüfverfahren auf ihre Eignung für die Qualitätskontrolle von FVK bewertet. Diese sind: die Ultraschallprüfung, die Thermographie, die Shearographie, das Wirbelstromverfahren, die Terahertzprüfung und die Computertomographie.

#### 3.2.2.1 Ultraschallprüfung

US ist ein weitverbreitetes und gut standardisiertes Verfahren. Es können tieferliegende Fehler zuverlässig erkannt werden. Die Aufnahme einzelner Messpunkte erfolgt schnell und das Verfahren ist bezüglich Einzelpunktmessungen inliniefähig. Bei dankbarer geometrischer Ausprägung eines Bauteils und einer begrenzten Anzahl kritischer Punkte, ist US ein geeignetes kostengünstiges Verfahren. Dankbare Geometrien weisen wenige stark gekrümmte Flächen auf und bieten hierdurch gute Zugänglichkeiten für die einzusetzenden Prüfköpfe. Nachteile bestehen darin, dass oberflächennahe Fehler nicht zuverlässig detektierbar sind und ein Komplettscan eines Bauteils sehr zeitintensiv ist. Außerdem muss für eine US-Untersuchung eine entsprechende Zugänglichkeit der Prüfköpfe sichergestellt sein. Dies führt teilweise sogar zu Designeinschränkungen, falls die spätere Prüfung bereits beim Entwurf berücksichtigt wird. Für eine gute Datenqualität wird meist ein Kopplungsmedium benötigt. Je nach Bauteil kann die Verwendung beispielsweise von Wasser als Kopp-



lungsmedium zu Problemen führen. US liefert zwar bei bekannten Bauteilen verlässliche Informationen, doch handelt es sich meist um 1D bzw. 2D Information mit einer groben Tiefenschätzung der detektierten Fehlstelle.

Hinsichtlich der oben genannten Anforderungen ist in Summe die möglichst umfassende Erfassung aller relevanten Fehler, die quantitative Detektion und der möglichst flexible Einsatz nicht ausreichend erfüllt.

### 3.2.2.2 Thermographie

Im Gegensatz zu US können bei der Thermographie direkt und schnell flächige Bereiche aufgenommen werden, was sie zu einer inlinefähigen Technik macht. Außerdem ist kein Kopplungsmedium notwendig, da es sich um ein berührungsloses Verfahren handelt. Dadurch ist die Thermographie teilweise flexibler für verschiedene Bauteile einsetzbar als US. Dennoch muss die Einschränkung hinsichtlich flächiger Bereiche berücksichtigt werden. Weiterhin verfügt sie zwar über eine begrenzte Eindringtiefe, kann dafür aber im Gegensatz zu US sehr gut oberflächennahe Fehler erkennen.

Die Hauptnachteile bestehen in der soeben genannten beschränkten Eindringtiefe und dass ohne zusätzliche Bauteilinformationen meist nur qualitative Aussagen möglich sind. Somit sind die geforderte umfassende Fehlererfassung und die quantitative Auswertung nicht ausreichend erfüllt.

### 3.2.2.3 Shearographie

Die Shearographie bietet ähnliche Vorteile wie die Thermographie. Es handelt sich auch hier um eine Technik, die in der Lage ist, schnell flächige Bereiche berührungslos zu erfassen. Bei den Nachteilen gibt es ebenfalls starke Parallelen zur Thermographie. Die Tiefenreichweite ist ebenfalls beschränkt. Es ist nicht möglich ohne zusätzliche bauteilspezifische Informationen quantitative Ergebnisse zu erzeugen. Dies trifft sowohl auf die exakte Tiefe als auch auf die Defektgeometrie zu. Außerdem handelt es sich um eine vergleichsweise empfindliche Technik, die größeres Expertenwissen des Anwenders erfordert. Dies liegt u. a. daran, dass sie auch sensitiv für Ganzkörperverformungen des Bauteils ist, was teils zu Überlagerungen der eigentlich zu detektierenden Defekte führen kann.

Hinsichtlich der Erfüllung der Anforderung ist die Shearographie also ähnlich zu bewerten wie die Thermographie. Es fehlt an der umfassenden Fehlererfassung sowie an der quantitativen Auswertbarkeit ihrer Ergebnisse. Durch ihre Empfindlichkeit müssen außerdem noch stärker als bei der Thermographie Abstriche hinsichtlich der Flexibilität gemacht werden.

#### 3.2.2.4 Wirbelstromverfahren

Bei der Wirbelstromtechnik handelt es sich ebenfalls um eine berührungslose und schnelle Technik. Sie bietet außerdem im Gegensatz zu den zuvor bewerteten Verfahren den Vorteil, dass zumindest Faserorientierungen quantitativ erfassbar sind.

Allerdings gibt es auch hier geometrische Einschränkungen. Insbesondere bei Platten kann das Verfahren sehr gut angewandt werden. Es kann aber gerade bei mehrlagigem CFK zu Überlagerungen der einzelnen Faserschichten kommen, wodurch die Zuordnung zwischen Lage und Orientierung massiv erschwert wird bzw. nicht mehr möglich ist. Die Eindringtiefe ist wie bei den zuvor bewerteten Verfahren Thermographie und Shearographie begrenzt. Außerdem verfügt die Wirbelstromtechnik über einen eingeschränkten Scanbereich. Ähnlich wie bei US ist für die Erfassung großer Bereiche eine Matrixanordnung der Prüfsysteme notwendig. Der entscheidendste Nachteil der Wirbelstromtechnik besteht aber darin, dass sie nur für leitende Materialien geeignet ist und somit u. a. GFK mit ihr nicht geprüft werden kann.

Offensichtlich können somit auch nicht die relevanten Fehler und Qualitätsmerkmale bei GFK erfasst werden. Und auch, wenn bei CFK die Forderung nach einer quantitativen Prüfung teilweise erfüllt ist, mangelt es an der gewünschten Flexibilität hinsichtlich Materialien und Bauteilgeometrie.

#### 3.2.2.5 Terahertzprüfung

Die Terahertztechnik ist im Gegensatz zu der bei der CT verwendeten Röntgenstrahlung gesundheitlich unbedenklich. Ein weiterer Vorteil ist, dass teilweise eine deutlich größere Eindringtiefe möglich ist als beispielsweise bei der Thermographie.

Aufgrund der Auflösungen im Millimeterbereich ist die Technik allerdings im Moment nur geeignet für große Strukturen mit entsprechend großer relevanter Defektgröße. Außerdem

verfügt Terahertz wie US und Wirbelstrom über einen eingeschränkten Scanbereich. Die notwendigen Einzelpunktmessungen führen zu hohen Scanzeiten. Insgesamt handelt es sich um eine vergleichsweise junge Technik, die noch nicht vollständig ausgereift ist. Hinsichtlich den Anforderungen mangelt es durch die Begrenzung auf Fehler im Millimeterbereich an der ausreichenden Abdeckung des Fehlerspektrums, auch wenn in diesem Spektrum quantitative Ergebnisse möglich sind. Gleichzeitig zeigt sich hierin die unzureichende Flexibilität gerade hinsichtlich der Untersuchung von kleineren Bauteilen.

### 3.2.2.6 Computertomographie

Die CT stellt die einzige zerstörungsfreie Prüftechnik dar, die alle inneren Strukturen vollständig und räumlich erfassen kann. Außerdem handelt es sich bei ihr um eine vollständig berührungslose Technik, die kein Kopplungsmedium benötigt. Sie ist für verschiedenste FVK-Arten und insbesondere für die beiden verbreitetsten CFK und GFK geeignet. Aufgrund relativ hoher Aufnahmezeiten ist sie aber im Gegensatz zum Großteil der bewerteten Methoden nicht inlinetauglich. Ihre Grenzen erreicht das Verfahren vor allem hinsichtlich der maximalen scannbaren Bauteilgröße und der zu erreichenden Voxelauflösung. Ein weiterer Nachteil besteht in den hohen Investitionskosten einer CT-Anlage. Die Relevanz dieser Nachteile ist abhängig vom Anwendungsszenario. Im geforderten Fall sind die Anforderungen hinsichtlich der Abdeckung des Fehlerspektrums und der Qualitätsmerkmale, der quantitativen Auswertung und der Flexibilität ausreichend erfüllt.

### 3.2.3 Auswahl Prüfmethode

Die Gesamtbewertung der gängigsten Prüfverfahren zeigt, dass die CT die beste Methode ist, um möglichst alle Fehlertypen bei FVK zu erkennen und auch geometrisch zu erfassen. Selbst für Anwendungsfälle, in denen ihr direkter Einsatz, beispielsweise aufgrund der Bauteilgröße oder der Taktzeit, nicht möglich ist, ist sie als Referenztechnologie oft unumgänglich. Insbesondere im Bereich der Materialentwicklung und Qualifizierung neuer FVK-Produkte ist sie allen betrachteten Verfahren überlegen. Sie ist als einzige Prüftechnik in der Lage, zerstörungsfrei nahezu alle typischen Fehler und Qualitätseigenschaften von FVK auch quantitativ zu erfassen. Die anderen betrachteten Verfahren liefern keine bzw.

für viele Anwendungen nicht ausreichende quantitative Informationen. Bei der CT handelt es sich außerdem um eine, beispielsweise hinsichtlich Bauteilgeometrie, äußerst flexible Prüftechnik, die u. a. für die beiden am häufigsten eingesetzten FVK (GFK und CFK) geeignet ist. Es gibt weiterhin, außer von der CT-Anlage abhängige Größenbeschränkungen, keine grundsätzlichen geometrischen Einschränkungen. Der entscheidende Nachteil der CT ist, dass sie nicht für den Inlineeinsatz geeignet ist. Da aber der Fokus auf einer möglichst flexiblen Auswertung liegt und keine Serienprüfung angestrebt wird, ist dieses Defizit zu vernachlässigen. Im Vordergrund stehen Stichprobenprüfungen und der Einsatz in der Materialentwicklung. Somit sind bei der CT alle an das Prüfverfahren gestellte Anforderungen erfüllt.

### 3.3 Anforderungen, Bewertung und Konzeption Algorithmus

Die mit der CT gewonnenen Daten müssen nach der Aufnahme analysiert werden. In diesem Abschnitt werden zunächst die zu erfüllenden Anforderungen definiert. Anschließend werden die im Stand der Technik genannten speziellen Analyseverfahren für Computertomographiedaten auf ihre Eignung für die Qualitätskontrolle von FVK bewertet. Basierend auf den Schwächen der vorhandenen Methoden wird ein Konzept für einen neuen Algorithmus entworfen.

#### 3.3.1 Anforderungen an Algorithmus

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der algorithmischen Entwicklung. Es werden folgende Anforderungen an den zu entwickelnden Algorithmus gestellt:

- **Der eingesetzte Auswertalgorithmus soll ohne Vorwissen einsetzbar sein.**  
Aufgrund der Variantenvielzahl von FVK-Bauteilen sowohl hinsichtlich Materialart und Geometrie können keine generellen Vorinformationen festgelegt werden. Außerdem wird, wie zuvor beschrieben, eine Stichprobenprüfung angestrebt. Somit muss der Algorithmus in der Lage sein auch unbekannte FVK-Bauteile zu analysieren.
- **Der zu entwickelnde Algorithmus soll möglichst für die verschiedenen typischen Fehlerarten und Qualitätseigenschaften von FVK geeignet sein.**

Es gibt bereits Speziallösungen für bestimmte Fehlertypen, wie beispielsweise Poren, und Qualitätsmerkmale. Es mangelt aber an Verfahren die das breite Fehlerspektrum abdecken. Für jeden dieser Fehlertypen einen eigenen Algorithmus zu entwickeln ist nicht zielführend. Außerdem ist es wünschenswert, dass das Auswerteverfahren zusätzlich in der Lage ist Qualitätsmerkmale, wie die Faserorientierung, zu erfassen.

- **Der Algorithmus soll so ausgelegt sein, dass er durch Erweiterung in der Lage ist, quantitative Ergebnisse zu erzeugen.**

Wie bereits bei der Auswahl des Prüfverfahrens beschrieben sind für eine ausreichende Bewertung von Fehlstellen und Qualitätseigenschaften quantitative Ergebnisse nötig. Es reicht nicht aus, dass das Prüfverfahren die Möglichkeiten hierzu bietet. Auch das Auswerteverfahren muss in der Lage sein, aus den erzeugten Daten quantitative Informationen abzuleiten.

- **Auch nicht hoch aufgelöste CT-Daten sollen möglichst umfassend ausgewertet werden.**

Auswerteverfahren die hoch aufgelöste CT-Daten voraussetzen, sind in der Praxis oft nicht ausreichend einsetzbar. Teilweise ist die Erzeugung dieser Daten zu aufwendig oder schlicht mit dem verfügbaren Computertomographen nicht möglich. Auch wenn einzelne Strukturen in nicht hoch aufgelösten CT-Daten nicht erkennbar sind, sollen deren Effekte auf die Gesamtstruktur berücksichtigt werden.

### 3.3.2 Bewertung der Analyseverfahren für CT-Daten von Faserverbundkunststoffen

Zunächst werden die bereits eingesetzten und in Abschnitt 2.3 beschriebenen Analyseverfahren hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

#### 3.3.2.1 Fehlerdetektion

Die Porositätsanalyse, als ein gängiges Fehlerdetektionsverfahren, wurde in Abschnitt 2.3.1 beleuchtet. Für den speziellen Anwendungsfall des Auffindens von Poren in FVK existieren somit bereits passende Verfahren. Diese sind aber nicht ausreichend, um das

große Fehlerspektrum (siehe Abschnitt 2.1.5) bei FVK abzudecken. Viele weitere eingesetzte Verfahren zur Fehlerdetektion stellen lediglich ein Hilfsmittel für die manuelle Auswertung dar. Somit werden vor allem neue, für möglichst verschiedene typische Fehlerarten von FVK geeignete Algorithmen für die automatisierte Auswertung benötigt.

### 3.3.2.2 Analyse der Qualitätseigenschaften

Die wichtigste Qualitätseigenschaft von FVK ist die Einhaltung der korrekten Faserorientierung. Die für ihre Analyse eingesetzten Verfahren wurden in Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Bei dem aufgeführten Binarisierungsverfahren wird eine schwellwertbasierte Trennung zwischen Matrix und Fasern vorausgesetzt. Dies ist in der Praxis nicht grundsätzlich möglich. Oft überschneidet sich das Grauwertspektrum der Fasern mit dem der Matrix. Insgesamt handelt es sich beim Binarisierungsverfahren um eine anschauliche und für bestimmte CT-Aufnahmen gut geeignete Methode, welche aber bei geringer Voxelauflösung (Verwischung zwischen Matrix und Fasern) an ihre Grenzen kommt.

Statt der bei der Binarisierung verwendeten Skelettierung wird bei der Eigenwertmethode für jedes Voxel die Hesse-Matrix und die zugehörigen Eigenwerte berechnet. Diese Methode ist komplexer und damit auch rechenintensiver. Allerdings muss auch hier die einzelne Faser, wie beim Binarisierungsverfahren, im CT-Datensatz sichtbar sein.

Bei der Verwendung von Anisotropen Gaußfiltern wird nicht die einzelne Faser betrachtet. Hier müssen verschiedene Filter verwendet werden, um eine ausreichende Abdeckung aller möglichen Orientierungen zu erreichen. Um die Anzahl der Filter überschaubar zu halten, muss ein Vorwissen über das zu untersuchende Bauteil vorausgesetzt werden. Es muss bekannt sein, welche Orientierungen beispielsweise aufgrund der Herstellung vorliegen und welche maximalen Abweichungen möglich sind. Ist dieses Vorwissen nicht vorhanden, ist es notwendig, die Anzahl der Filter entsprechend der gewünschten Orientierungsauflösung zu wählen. Die generell möglichen Orientierungen müssen also diskretisiert werden. Somit gilt: Je genauer die Orientierung bestimmt werden soll, desto größer ist die Anzahl der Filter. Dies führt dazu, dass dieses Verfahren das rechenintensivste der hier aufgeführten ist.

### 3.3.2.3 Fazit

Hinsichtlich der Fehlerdetektion werden vor allem Algorithmen benötigt, die in der Lage sind, möglichst viele der verschiedenen typischen Fehlerarten der FVK abzudecken. Bei dem wichtigsten Qualitätsmerkmal von FVK, der Faserorientierung, gibt es, wie dargestellt, mehrere Verfahren, die aber entweder auf die Betrachtung einzelner Fasern oder die Diskretisierung der möglichen Orientierungen setzen. Beide Varianten führen somit entweder zu der Notwendigkeit hoch aufgelöster CT-Daten oder hohen Rechenzeiten.

### 3.3.3 Konzept für Algorithmus

Der zu entwickelnde Algorithmus soll eine möglichst umfangreiche Prüfung von FVK ermöglichen. Als Prüfmethode wurde bereits die Computertomographie ausgewählt. Für die CT-Daten muss nun ein geeignetes Analyseverfahren festgelegt werden. Hier bietet sich u. a. aufgrund der in Abschnitt 3.3.1 geforderten Flexibilität die Texturanalyse (siehe Abschnitt 2.4.2) an. Ein typischer Einsatz der Texturanalyse ist die Defekterkennung. Hierzu wird häufig zunächst die dominierende Textur bestimmt und anschließend Abweichungen von dieser dominierenden Textur als Fehler klassifiziert. Voraussetzung hierfür ist, dass der Gutbereich auch tatsächlich dominierend ist. Wenn beispielsweise der Großteil eines zu analysierenden Bilds aus Fehlerbereichen besteht, wäre dieser Ansatz nicht zielführend. Dies ist insbesondere bei Bauteilen mit starker Porosität der Fall. Hier kann der Fall eintreten, dass die Poren als Teil der zugrunde liegenden Struktur erkannt werden und somit nicht als Fehler erfasst werden können. Da es allerdings bereits, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, passende Algorithmen für diesen speziellen Fehlertyp gibt, kann das Erkennen von Poren für den zu entwickelnden Algorithmus ausgeschlossen werden. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die Fehlerbereiche nicht Teil der dominierenden Struktur sind und außerdem deutlich kleiner sind als die Gutbereiche. Die zugrunde liegende texturierte Struktur ergibt sich bei FVK durch die Kombination aus Fasern und Matrix. Die These, dass sich Fehler als Abweichung von dieser Struktur bemerkbar machen, ist naheliegend und wird in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden. Da für die Durchführung der Texturanalyse auch stets die zugrunde liegende Struktur selbst analysiert und charakterisiert wird, besteht die Möglichkeit, dass nicht nur Fehler erkannt, sondern auch Aussagen über

Qualitätseigenschaften, insbesondere die Faserorientierung, gemacht werden können. Das zu implementierende Texturanalyseverfahren soll in der Lage sein, selbständig die dominierende Textur zu erkennen und zu charakterisieren. Das Einlernen von Texturen ist, da Einzelprüfungen und keine Serienprüfungen angestrebt werden und es eine enorme Bandbreite an verschiedenen FVK gibt, nicht zielführend. Außerdem besitzen FVK-Bauteile oft einen Aufbau mit aufgrund des Faserverlaufs komplexen räumlichen Strukturen. Dadurch ist es notwendig, einen wirklichen 3D Ansatz zu verfolgen. Eine reine 2D Analyse der einzelnen Schichten kann den vollen Umfang des dreidimensionalen Spektrums der Bauteile nicht erfassen.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein Systementwurf des zu entwickelnden 3D Texturanalyseverfahrens für CT-Daten von FVK vorgestellt.



### 3.4 Systementwurf des Algorithmus

In Abbildung 3.1 ist der Systementwurf des Algorithmus dargestellt. Es wird hier zunächst ein Überblick über die einzelnen Schritte gegeben. Die eingehende Beschreibung dieser findet sich im nachfolgenden Kapitel 4.

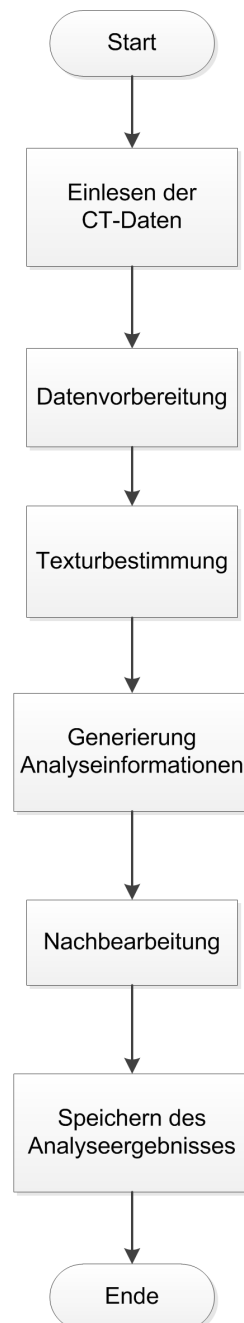


Abbildung 3.1: Systementwurf des Algorithmus

### 3.4.1 Einlesen CT-Daten und Datenvorbereitung

Beim Einlesen der CT-Daten müssen verschiedene übliche Formate berücksichtigt werden. Ein Hauptaspekt ist hierbei der Umgang mit den Meta- (siehe Abschnitt 4.1.1) und Rohdaten (Voxelwerte), aus denen sich ein CT-Datensatz zusammensetzt. Aufgrund der großen Datenmenge stellt sich auch die Frage, ob es notwendig ist, den kompletten Datensatz in den Arbeitsspeicher zu laden. Eine alternative Variante wäre hierbei bereits beim Einlesen relevante Informationen zu extrahieren und nur diese im Arbeitsspeicher abzulegen. In diesem Fall sind das Einlesen und die Vorbereitung der Daten ein gemeinsamer Schritt. Bei der Datenvorbereitung ist die Wahl einer passenden Struktur zur Ablage und Bearbeitung der relevanten Informationen besonders kritisch, da diese einen entscheidenden Einfluss auf alle nachfolgenden Schritte hat.

### 3.4.2 Texturbestimmung und Generierung Analyseinformation

Der Kern des Algorithmus stellt die Analyse der Volumeninformationen dar. Hierzu wird aus den oben beschriebenen Gründen ein 3D-Texturanalyseverfahren verwendet. Ein Hauptaspekt ist die Festlegung, ob unabhängig von der räumlichen Position einheitliche Texturbereiche gefunden werden sollen. Auch wenn hier ein gewisses Potential besteht, konzentriert sich der zu entwickelnde Algorithmus auf benachbarte Bereiche. Durch den teilweise heterogenen Aufbau der FVK (beispielsweise gekrümmte Sandwichstrukturen) sind lokal einheitliche Bereiche relevanter für die Defekterkennung und Qualitätsanalyse als Gemeinsamkeiten zwischen räumlich getrennten Bereichen.

Für die eigentliche Texturbestimmung muss festgelegt werden, ob diese direkt mit Grauwertmatrizen oder abgeleiteten Größen durchgeführt wird. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Möglichkeiten werden in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

Aus den bestimmten Texturen müssen anschließend Informationen über Defekte oder die Faserorientierung abgeleitet werden. Hierzu dient das zuvor beschriebene 2D Split-and-Merge Verfahren (siehe Abschnitt 2.4.3.2) als Grundlage. Dieses muss aber für 3D-Daten und die speziellen Herausforderungen der FVK-Prüfung entsprechend angepasst und weiterentwickelt werden.

### 3.4.3 Nachbearbeitung und Speicherung

Nachdem die Analyseinformation erzeugt wurde, muss diese ggf. noch nachbearbeitet werden. Dies kann beispielsweise den Einsatz von Filterverfahren für die Ergebnisaufbereitung bedeuten.

Das finale Ergebnis muss anschließend so abgespeichert werden, dass einerseits die gewonnenen Informationen möglichst erhalten bleiben und andererseits das Ergebnis geeignet visualisiert werden kann. Je nach Wahl der Speichervariante kann das Ergebnis mit Standardsoftware für die Visualisierung von CT-Daten dargestellt werden. Die Verwendung von Standardsoftware stellt aber eine Einschränkung dar, die die volle Ausschöpfung des Ergebnispotentials verhindert. Dies liegt daran, dass in diesem Fall auch ein standardisiertes Speicherformat gewählt werden muss. Hierdurch entfällt die Möglichkeit zusätzliche Informationen, wie beispielsweise Farbcodierungen der Analyseergebnisse, vorzuhalten. Deshalb werden im Nachfolgenden auch spezielle Speicher- und Visualisierungsvarianten entwickelt und vorgestellt. Diese müssen sowohl für die Darstellung der Defekte als auch der Faserorientierung geeignet sein.

# 4 3D Texturanalyse

In den vorhergehenden Kapiteln wurde die Notwendigkeit neuer Auswerteverfahren für FVK motiviert. In diesem Kapitel soll nun der zu entwickelnde 3D Texturanalysealgorithmus eingehend beschrieben werden. Grundzüge des zu entwickelnden Verfahrens wurden vom Autor in Frommknecht et al. 2013 und Frommknecht & Effenberger 2014 beschrieben. Als Basis werden stets mit einem Computertomographen erzeugte Volumendaten von FVK verwendet. Da eine möglichst hohe Flexibilität angestrebt wird, ist eine Methodik notwendig, die für die Analyse nicht auf eingelernte Texturen angewiesen ist. Vom Autor wird deshalb das in Abschnitt 2.4.3 beschriebene Split-and-Merge Verfahren für zweidimensionale Bilder als Ausgangspunkt verwendet. Ziel ist es, durch geeignete Erweiterungen den Algorithmus auch für Volumendaten einsetzbar zu machen.

Die Grundidee ist hierbei das Volumen zunächst zu zerlegen und anschließend die entstandenen Teilvolumina abhängig von ihrer Textur zu neuen Segmenten zusammensetzen. Die erzeugten Segmente sollen in sich jeweils eine möglichst einheitliche Textur haben und sich von angrenzenden Segmenten hinsichtlich ihrer Textur abgrenzen.

## 4.1 3D Split-and-Merge Verfahren

Der in C++ implementierte Algorithmus besteht aus dem in Abbildung 4.1 dargestellten Gesamtablauf. Die einzelnen Verfahrensschritte sind:

1. Einlesen der Metainformationen,
2. Erstellung der Baumstruktur (Split),
3. Berechnung der Grauwertmatrizen,
4. Region Growing (Merge):
  - 4.1 Zusammenfassen der Volumenteile,
  - 4.2 Gruppierung,

## 4.3 Eliminierung kleiner Volumina und

## 5. Speichern des Analyseergebnisses

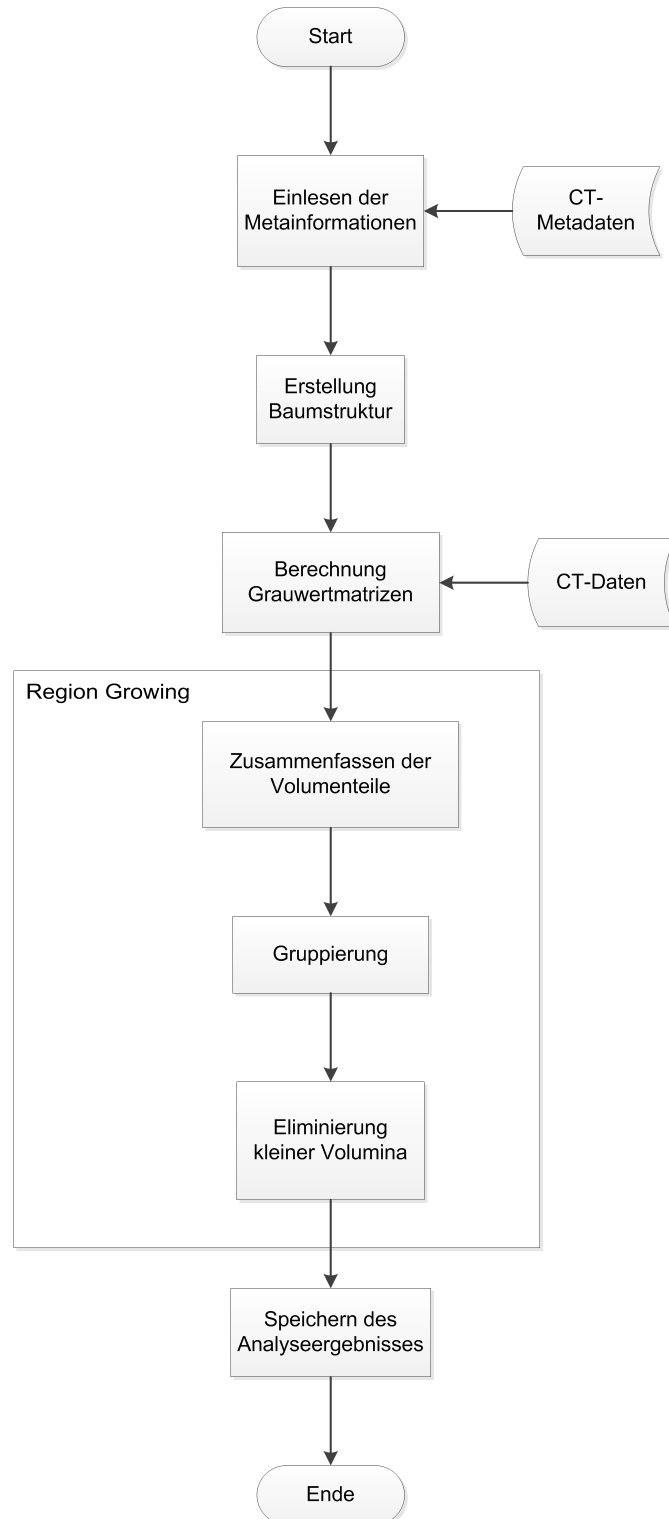


Abbildung 4.1: Gesamtablauf

Diese werden im Weiteren detailliert beschrieben. Die Nummerierung der Verfahrensschritte wird entsprechend beibehalten.

#### 4.1.1 Einlesen der Metainformationen

Zunächst werden die Metadaten der CT-Daten eingelesen. Hierzu gehören Informationen wie die Dimensionierung in den drei Raumrichtungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und die Codierung der Voxel (Datentyp und Datenbreite). Insbesondere aufgrund der verschiedenen Datentypen (u. a. 8-Bit Unsigned Integer, 16-Bit Unsigned Integer oder 32-Bit Float) zur Beschreibung eines Voxels, werden bei der Implementierung des 3D Texturanalysealgorithmus verstärkt Templates eingesetzt. Grundsätzlich werden die Metainformationen zur Interpretation der eigentlichen Volumendaten benötigt.

#### 4.1.2 Erstellung Baumstruktur

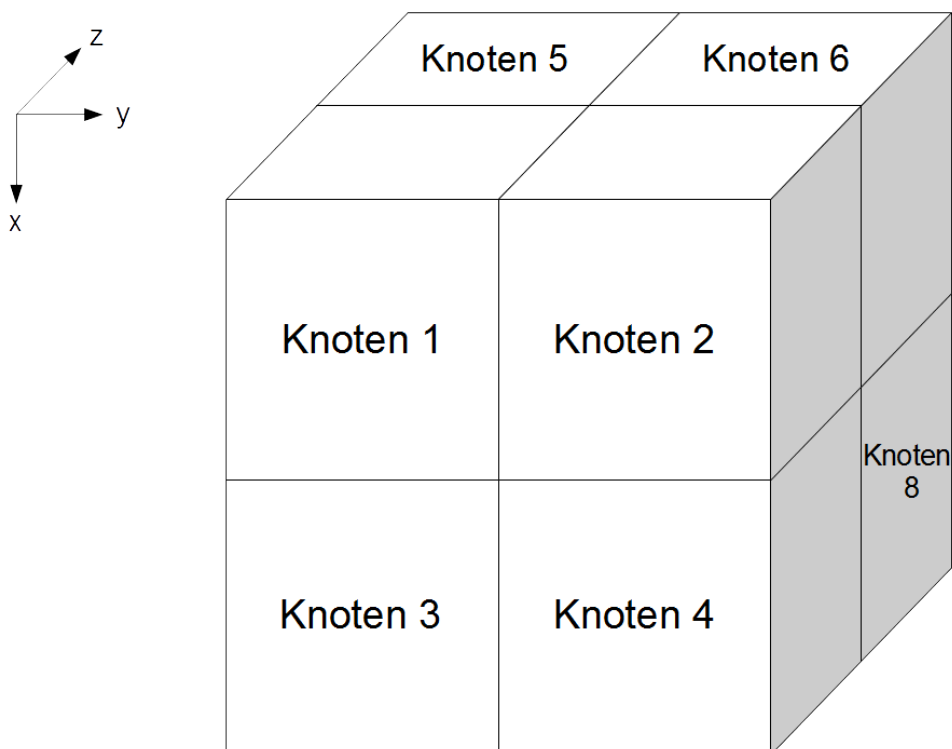


Abbildung 4.2: Erster Aufteilungsschritt des Volumens in acht Teilvolumina (Knoten 7 ist hier verdeckt)

Auf Grundlage der Metainformationen wird eine Baumstruktur erstellt, welche die Aufteilung (Split) des Volumendatensatzes darstellt. Hierzu werden Teilvolumina, wie nachfolgend beschrieben, erzeugt. Jedes Teilvolumen stellt einen Knoten, der im Arbeitsspeicher abgelegten Baumstruktur, dar. Im ersten Schritt erfolgt jeweils eine Aufteilung auf Höhe der halben  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Dimension. Somit wird das Volumen, welches als **Wurzelknoten** betrachtet wird, zunächst in acht Teilvolumina aufgeteilt (siehe Abbildung 4.2).

Wenn also von den Dimensionen  $l$ ,  $m$  und  $n$  in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung ausgegangen wird, gilt für die Koordinaten der Voxel, die zum ersten Knoten gehören, Folgendes:

$$x \in \left\{0, \dots, \left\lfloor \frac{l-1}{2} \right\rfloor\right\}, y \in \left\{0, \dots, \left\lfloor \frac{m-1}{2} \right\rfloor\right\} \text{ und } z \in \left\{0, \dots, \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor\right\}$$

Hierbei wird die untere Gaußklammer verwendet, um auch bei geraden Dimensionen ganzzahlige Grenzen zu erhalten. Der Nullpunkt des verwendeten Koordinatensystems liegt in diesem Fall an einer Ecke des Volumens und die Skalierung der Achsen entspricht einer Voxelkantenlänge. Die exakte restliche Aufteilung des Volumens im ersten Schritt kann der Abbildung 4.3 entnommen werden. Die acht durch die Aufteilung neu entstanden Knoten werden als **Kindsknoten** des Wurzelknotens bezeichnet und entsprechend der Wurzelknoten als **Vaterknoten** der acht Kindsknoten. Um die spezielle Beziehung der acht Kindsknoten eines Vaterknotens zueinander auszudrücken, werden sie als **Geschwisterknoten** bezeichnet. Die in der Abbildung 4.3 verwendete Nummerierung  $1, \dots, 8$  kann verwendet werden, um die jeweilige Position eines Kindsknoten innerhalb seines Vaterknotens anzugeben. Dementsprechend wird die jeweilige Nummer im Nachfolgenden stets als **Positionsnummer** bezeichnet.

Jeder weitere Aufteilungsschritt erfolgt für jedes Teilvolumen, also für jeden Knoten, analog zur Aufteilung des Originalvolumens. Die Bezeichnung als Kinds- bzw. Vaterknoten wird entsprechend beibehalten. Alle durch die Aufteilung eines Knoten  $K$  neu entstehenden Knoten werden als **Nachfolgeknoten** des Knotens  $K$  bezeichnet. Dementsprechend ist der Knoten  $K$  aus Sicht eines Nachfolgeknotens ein sogenannter **Vorgängerknoten**. Man beachte den Unterschied zwischen den Ausdrücken Kindsknoten und Nachfolgeknoten sowie Vaterknoten und Vorgängerknoten. Während mit den Bezeichnungen Kindsknoten und Vaterknoten stets Beziehungen über eine Generation hinweg ausgedrückt werden,

werden die Begriffe Nachfolgeknoten und Vorgängerknoten auch für Beziehungen über mehrere Generationen hinweg verwendet. Somit ist beispielsweise jeder Vaterknoten ein Vorgängerknoten eines Kinds-knoten. Aber nicht jeder Vorgängerknoten eines Kinds-knoten ist auch gleichzeitig dessen Vaterknoten.

Der Aufteilungsprozess wird in der umgesetzten Implementierung so lange rekursiv durchgeführt bis das **Minimum der Dimensionen** (also die kleinste der drei Dimensionen) des aktuell aufzuteilenden Knotens unter einem vorzugebenden Schwellwert liegt. In diesem Fall wird das aktuell betrachtete Teilvolumen nicht weiter aufgeteilt. Die entsprechenden Knoten der Baumstruktur verfügen somit nicht über Kinds-knoten und werden als **End-knoten** bezeichnet. Der zu definierende Schwellwert für das Minimum der Dimensionen bestimmt also den Zerlegungsgrad des Volumens. Bei den durchgeführten Tests hat sich ein Schwellwert in Größenordnung von 8 Voxeln als sinnvoll erwiesen. Dies liegt u. a. daran, dass für zu kleine Bereiche keine sinnvolle Textur angegeben werden kann. Allerdings sollte aus berechnungstechnischen Gründen eine zu große Rekursionstiefe vermieden werden, was auch zu einem dementsprechend größeren Schwellwert führen kann.



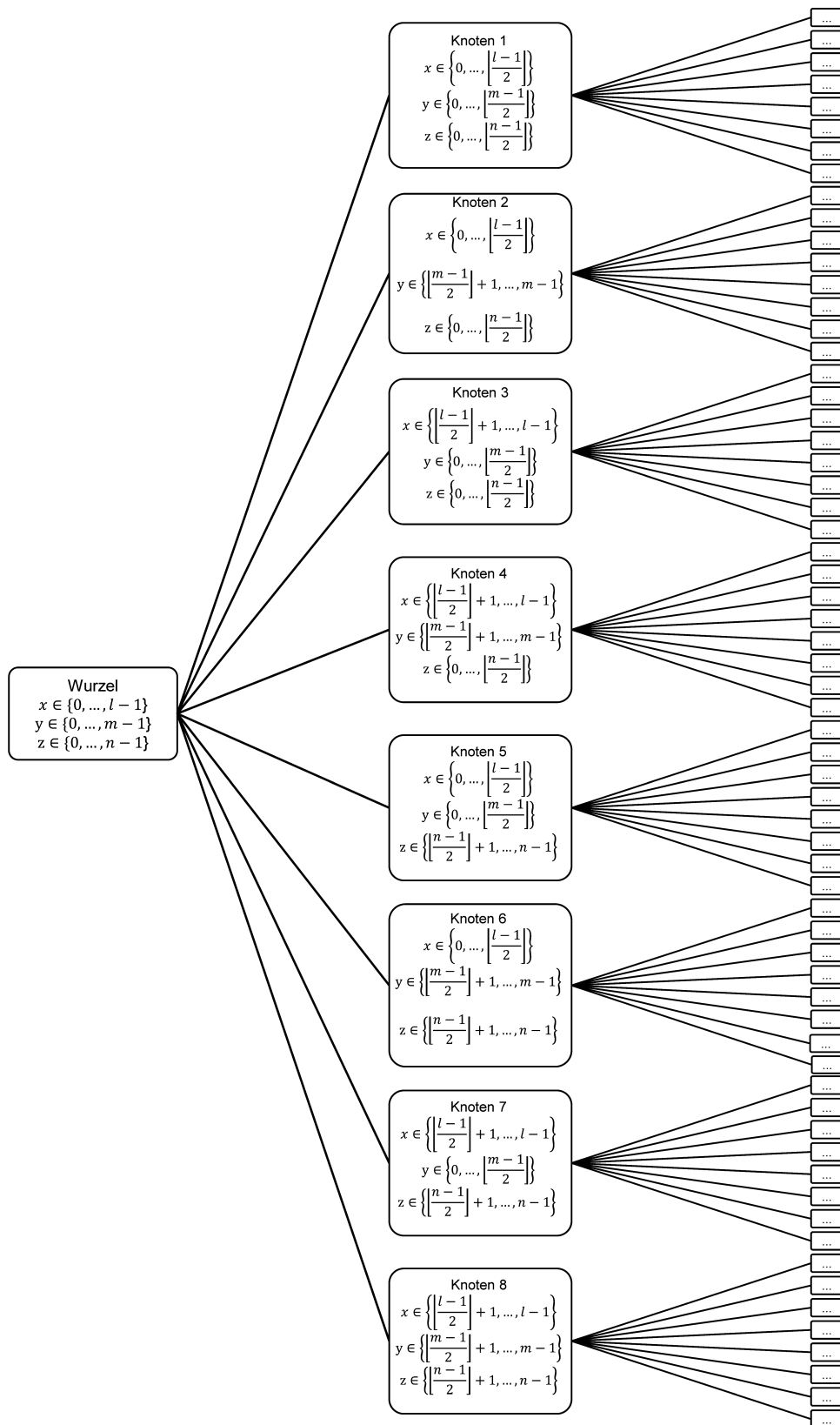


Abbildung 4.3: Baumstruktur zur Speicherung der Volumenaufteilung

### 4.1.3 Berechnung Grauwertmatrizen

Für jeden Endknoten, der im vorhergehenden Schritt erstellten Baumstruktur, wird jeweils eine Grauwertmatrix zur Beschreibung der Textur des zugehörigen Teilvolumens berechnet. Die hier verwendeten Grauwertmatrizen entsprechen der in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Erweiterung für Volumendaten. Um die Auslastung des Arbeitsspeichers durch die teilweise extrem großen Volumendaten (siehe Abschnitt 2.2.6) möglichst gering zu halten, werden die Grauwerte nur temporär zur Berechnung der Grauwertmatrizen geladen. Lediglich die Grauwertmatrizen bleiben für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte im Arbeitsspeicher. Ebenfalls aus Speicher- aber auch aus Laufzeitgründen ist es sinnvoll nicht die komplette Bittiefe des Datensatzes zu nutzen, sondern die Grauwerte der Voxel auf einen kleineren vorgegebenen Bereich zu skalieren. Beispielsweise können für einen 8-Bit Volumendatensatz die 256 möglichen Grauwerte für die Aufstellung der Grauwertmatrizen auf 10 Werte skaliert werden.

### 4.1.4 Region Growing: Zusammenfassen der Volumenteile

In dem Verarbeitungsschritt 4.1 sollen Kinds-knoten zusammengefasst (Merge) werden, sofern ihre Texturen ähnlich sind. Dies stellt den ersten Teil des Region Growings dar. Deshalb muss zunächst geklärt werden, was unter ähnlichen Texturen verstanden werden soll.

#### 4.1.4.1 Ähnliche Texturen

Um die Texturen vergleichen zu können, werden die zuvor berechneten Grauwertmatrizen verwendet. Es werden zunächst jeweils die acht Endknoten des gleichen Vaterknotens betrachtet. Die zugehörigen Grauwertmatrizen werden als  $C^{(1)}, C^{(2)}, \dots, C^{(8)}$  bezeichnet. Hier und im Weiteren sind stets die entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 2.4.2.1 normierte Version der Grauwertmatrizen gemeint. Zur vereinfachten Lesbarkeit wird auf die Verwendung des Index  $n$  verzichtet.

Die Texturen werden, in Analogie an die in Abschnitt 2.4.3 im Split-and-Merge Verfahren für zweidimensionale Bilder verwendete Vergleichsformel, als ähnlich bezeichnet, wenn für

einen vorgegebenen Schwellwert  $T$  folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\sum_i \sum_j (\max(c_{ij}^{(1)}, \dots, c_{ij}^{(8)}) - \min(c_{ij}^{(1)}, \dots, c_{ij}^{(8)})) < T \quad (4.1)$$

$c_{ij}^{(k)}$  bezeichnet hier jeweils die Komponente in der  $i$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte der Matrix  $C^{(k)}$ . Mit anderen Worten wird für jede Komponente die Differenz zwischen maximalem und minimalem Wert bestimmt. Diese Differenzen werden anschließend aufsummiert.

Falls die Bedingung der Formel 4.1 erfüllt ist, werden die Texturen der Teilvolumina als ähnlich betrachtet und die acht Kindsnoten werden zusammengefasst.

#### 4.1.4.2 Zusammenfassen von Kindsnoten

Zusammenfassen bedeutet hier, dass die Kindsnoten aus der Baumstruktur gelöscht werden. Somit wird in diesem Fall der Vaterknoten zum neuen Endknoten. Für die weiteren Verarbeitungsschritte ist es notwendig die Grauwertmatrix  $C$  des neuen Endknotens zu bestimmen. Diese kann effizient aus den Grauwertmatrizen  $C^{(1)}, \dots, C^{(8)}$  der Kindsnoten, wie folgt berechnet werden:

$$C = \frac{1}{8}(C^{(1)} + \dots + C^{(8)}) \quad (4.2)$$

Diese Berechnung ist ebenfalls analog zum zweidimensionalen Fall. Auch hier werden die Übergänge zwischen den Kindsnoten als vernachlässigbar betrachtet. Alternativ müssten bereits bei der Berechnung der Grauwertmatrizen  $C^{(1)}, \dots, C^{(8)}$  die Übergänge mit betrachtet werden. Im finalen Schritt der Zusammenfassung werden die Grauwertmatrizen  $C^{(1)}, \dots, C^{(8)}$  zur effizienten Speicherverwaltung aus dem Arbeitsspeicher gelöscht.

#### 4.1.4.3 Durchlaufen der Baumstruktur

Ausgehend von der Wurzel werden die Kindsnoten durchlaufen bis acht Geschwisterknoten gefunden werden, die jeweils ein Endknoten sind. Für diese wird dann mittels Formel 4.1 überprüft, ob deren Texturen ähnlich sind. Falls dies der Fall ist, werden sie, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, zusammengefasst.

Das Durchlaufen der Baumstruktur erfolgt rekursiv. Das heißt sobald Kinds-knoten zusammengefasst werden und somit neue Endknoten entstehen, werden auch diese, sofern die entsprechenden Bedingungen erfüllt sind, wiederum selbst zusammengefasst. Der Durchlauf für einen Zweig der Baumstruktur endet, falls eine der nachfolgenden Situationen eintritt:

- Die Bedingung aus Formel 4.1 ist nicht erfüllt.
- Es gibt einen Geschwisterknoten eines Endknotens, der selbst kein Endknoten ist und bei dem bereits durch einen vorhergehenden Durchlauf festgestellt wurde, dass sich dessen Kinds-knoten nicht zusammenfassen lassen.

Das Durchlaufen der Baumstruktur endet, wenn alle Zweige durchlaufen wurden.

#### 4.1.5 Region Growing: Gruppierung

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben besteht das Ziel des Verfahrens im Zusammenfassen der Volumenteile zu möglichst großen Segmenten mit jeweils in sich möglichst einheitlicher Textur. Da das zuvor beschriebene Zusammenfassen von Kinds-knoten nicht alle Ähnlichkeiten berücksichtigt, wird eine Gruppierung durchgeführt.

Kinds-knoten werden nur zusammengefasst, wenn alle Geschwisterknoten eine ähnliche Textur aufweisen. Dies führt dazu, dass nicht alle Ähnlichkeiten benachbarter Knoten durch den vorhergehenden Verarbeitungsschritt 4.1 ausreichend berücksichtigt werden. Zu beachten ist hierbei, dass es auch benachbarte Knoten gibt, die keine Geschwisterknoten sind. Auch dies ist ein Grund, warum nach der Zusammenfassung der Volumenteile eine texturbasierte Gruppierung notwendig ist, um alle vorhandenen Gemeinsamkeiten aneinandergrenzender Knoten ausreichend zu berücksichtigen. Die Gruppierung stellt den zweiten Teil des Region Growings dar.

##### 4.1.5.1 Eigenschaften der Knoten

Bisher waren die für einen Knoten gespeicherten relevanten Informationen in erster Linie die zugehörigen Koordinaten (damit auch dessen Dimensionen und dessen Volumen) sowie dessen Grauwertmatrix. Für die Gruppierung sind weitere Attribute notwendig. Deren

Bedeutungen werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Zu diesen Attributen gehören u. a.:

- Verweise auf Nachbarknoten
- Zustand der Seitenflächen
- Informationen über teilweise geöffnete Seitenflächen
- IDs der zugehörigen Gruppen
- Positionsnummer (gibt Position innerhalb des zugehörigen Vaterknotens an)

Die Werte der Attribute sind teilweise zunächst nicht definiert und werden erst im Laufe der Gruppierung initialisiert.

#### 4.1.5.2 Nachbarknoten

Jeder Knoten repräsentiert ein Teilvolumen, welches stets quaderförmig ist. Zwei Knoten werden als benachbart betrachtet, wenn die zugehörigen Quader zwei direkt aneinandergrenzende Seitenflächen haben. Direkt aneinandergrenzend bedeutet, dass der Betrag der Differenzen entweder der  $x$ -,  $y$ - oder  $z$ -Koordinaten der beiden Seitenflächen gleich eins ist. Dies bedeutet auch, dass jeder Knoten insgesamt mindestens sechs Nachbarknoten in den Raumrichtungen  $x$ -Plus,  $x$ -Minus,  $y$ -Plus,  $y$ -Minus,  $z$ -Plus und  $z$ -Minus hat (siehe Abbildung 4.4).

Die einzige Ausnahme hiervon stellen Knoten im Randbereich des Volumens dar. Diese haben entsprechend der Anzahl der berührenden Volumenränder weniger Nachbarknoten.

**Zustand Seitenflächen:** Die sechs Seitenflächen des jeweiligen Knotens werden zu Beginn der Gruppierung als geschlossen betrachtet. Eine **geschlossene Seitenfläche** bedeutet, dass hier eine Texturgrenze vorliegt. Im Gegensatz hierzu wird eine Seitenfläche als offen bezeichnet, wenn im Laufe der Gruppierung festgestellt wird, dass die Textur des entsprechenden Nachbarknotens ähnlich genug ist. Somit bedeutet eine **offene Seitenfläche**, dass hier keine Texturgrenze vorliegt. Der Zustand der Seitenflächen wird für jeden Knoten gespeichert.

Abhängig von der Zusammenfassung der Kindsnoten im Verarbeitungsschritt 4.1 können benachbarte Knoten unterschiedlicher Größe direkt aneinandergrenzende Seitenflächen aufweisen. Dies kann dazu führen, dass ein Knoten bezogen auf eine Seitenfläche mehr als einen Nachbarknoten und dadurch insgesamt mehr als sechs Nachbarknoten hat.

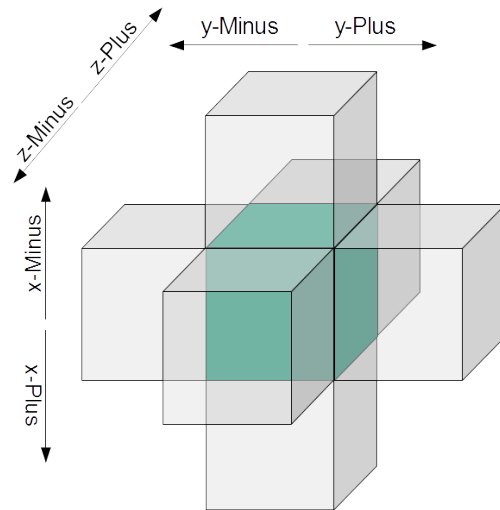


Abbildung 4.4: Betrachteter Knoten farblich hervorgehoben und dessen Nachbarknoten

Texturvergleich zwischen zwei Nachbarknoten: Für die Gruppierung wird auch hier, wie im vorhergehenden Verfahrensschritt, beginnend bei der Wurzel die Baumstruktur rekursiv durchlaufen. Ziel ist es die Texturen aller benachbarter Endknoten (Knoten die keine Kindsnoten haben) zu vergleichen. Hierfür werden für jeden Endknoten alle benachbarten Knoten überprüft. Der Vergleich der Textur benachbarter Knoten erfolgt in entsprechender Weise wie bereit in Verfahrensschritt 4.1 (siehe Formel 4.1). Hierzu wird die nachfolgende für zwei Grauwertmatrizen angepasste Formel verwendet:

$$\sum_i \sum_j (\max(c_{ij}, \tilde{c}_{ij}) - \min(c_{ij}, \tilde{c}_{ij})) < T_2 \quad (4.3)$$

Wobei  $c_{ij}$  die Einträge der zugehörigen Grauwertmatrix  $C$  des betrachteten Knotens  $K$  und  $\tilde{c}_{ij}$  die Einträge der Grauwertmatrix  $\tilde{C}$  des benachbarten Knotens  $K^*$  sind. Ist die Bedingung

aus Formel 4.3 erfüllt, werden die Texturen der benachbarten Knoten als ähnlich betrachtet. Einen Sonderfall stellen hierbei Knoten im Randbereich des Volumens dar. In diesem Fall, gibt es in bestimmten Raumrichtungen keine Nachbarknoten. Für diese Raumrichtungen wird die Formel 4.3 immer als erfüllt betrachtet. Dadurch werden vermeintliche Texturunterschiede an den Volumengrenzen vermieden.

Der in Formel 4.3 verwendete Schwellwert  $T_2$  sollte stets kleiner als der Schwellwert  $T$  in Formel 4.1 gewählt werden, da hier lediglich zwei anstatt acht Knoten verglichen werden und somit ein strengerer Vergleichswert notwendig ist. In den durchgeführten Versuchen wurde oft  $T_2 = \frac{3}{4}T$  verwendet. Da immer normierte Grauwertmatrizen verwendet werden, können auch Knoten mit unterschiedlich großen Volumina auf diese Weise verglichen werden.

Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Verfahrensteil werden im Gruppierungsschritt generell keine Knoten und dementsprechend auch keine Grauwertmatrizen zusammengefasst. Die Ähnlichkeit von Nachbarknoten wird stattdessen durch die Erstellung von Gruppen gespeichert. Eine Gruppe besteht aus einer Menge von Knoten mit der gleichen Gruppen-ID.

#### 4.1.5.3 Gruppen-ID

Ob Knoten zur gleichen Gruppe gehören und somit ähnliche Texturen haben, wird über eine Gruppen-ID (eindeutige Gruppennummer) gespeichert. Für jeden Endknoten  $K$  wird zunächst überprüft, ob er bereits eine Gruppen-ID besitzt. Falls der Endknoten noch keine Gruppen-ID erhalten hat, wird eine neue Gruppen-ID erzeugt und dem Knoten zugeordnet. Zu beachten ist das im Laufe der Gruppierung ein Knoten auch mehreren Gruppen zugeordnet werden und somit auch mehr als eine Gruppen-ID besitzen kann. Der Knoten  $K$  wird im Weiteren als Startknoten bezeichnet. Für den Vergleich mit den Nachbarknoten wird jeweils unterschieden, ob der Nachbarknoten ein Geschwisterknoten des Knotens  $K$  ist oder nicht.

**Nachbarknoten ist Geschwisterknoten:** Falls ausgehend vom Startknoten  $K$  ein Nachbarknoten  $K^*$  gleichzeitig ein Geschwisterknoten ist, wird überprüft, ob er ebenfalls ein Endknoten ist. Wenn dies der Fall ist, werden die Texturen entsprechend der Formel 4.3

verglichen. Wenn die Texturen ähnlich genug sind, wird die Ähnlichkeit über Gruppen-IDs wie folgt kenntlich gemacht:

- Falls der Nachbarknoten  $K^*$  noch keine Gruppen-ID besitzt, erhält er die gleiche Gruppen-ID wie der Startknoten  $K$ .
- Falls der Nachbarknoten  $K^*$  bereits eine Gruppen-ID besitzt, wird diese zu den Gruppen-IDs des Startknotens  $K$  hinzugefügt.

Der Zustand der aneinandergrenzenden Seitenflächen der beiden Knoten wird, wenn die Ähnlichkeit erfüllt ist, jeweils auf offen gesetzt.

Falls der Nachbarknoten  $K^*$  kein Endknoten ist, findet kein Texturvergleich statt. Der Verzicht auf den Texturvergleich ist legitim, da in diesem Fall der Nachbarknoten  $K^*$  Kindsknoten hat. Somit führt ein Durchlaufen des Zweigs des Nachbarknotens  $K^*$  in der Baumstruktur zwangsläufig zu einem Kindsknoten  $K_E^*$ , der einerseits ein Endknoten und andererseits benachbart mit dem Startknoten  $K$  ist. Hierbei muss es sich bei  $K_E^*$  nicht um einen direkten Nachfolger von  $K^*$  handeln. Generell gilt in diesem Fall, dass die benachbarten Seitenflächen unterschiedlich groß sind. Die Seitenfläche des benachbarten Endknotens  $K_E^*$  ist kleiner als die des Startknotens  $K$ . Da alle Endknoten der Baumstruktur durchlaufen werden, wird auch  $K_E^*$  zwangsläufig während des Gruppierungsablaufs zum Startknoten und  $K$  zu seinem Nachbarknoten. Der noch ausstehende Texturvergleich zwischen  $K$  und  $K_E^*$  wird in dieser Konstellation somit nachgeholt. In Summe findet der Texturvergleich vereinfacht gesagt immer von Klein nach Groß statt.

**Nachbarknoten ist kein Geschwisterknoten:** Falls der Nachbarknoten  $K^*$  kein Geschwisterknoten des Startknotens  $K$  ist, gestaltet sich dessen Identifizierung deutlich aufwendiger. Ein Beispiel für eine solche Situation ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Der Knoten 3.1 ( $K^*$ ) ist zwar Nachbarknoten des Knotens 1.3 ( $K$ ), aber nicht dessen Geschwisterknoten.

Zur Identifizierung des zunächst unbekanntes Nachbarknotens muss der Zweig des Startknotens  $K$  rückwärts durchlaufen werden. Das heißt es werden die Vorgängerknoten durchlaufen, bis ein Knoten  $K_V$  gefunden wird, dessen Nachfolgeknoten der gesuchte Nachbarknoten  $K^*$  ist. Im Beispiel aus Abbildung 4.5 ist der gemeinsame Vorgängerknoten



der Nachbarknoten 3.1 ( $K^*$ ) und 1.3 ( $K$ ) die Wurzel. Der notwendig zu durchlaufende Pfad ist im Diagramm durch rote Pfeile dargestellt.

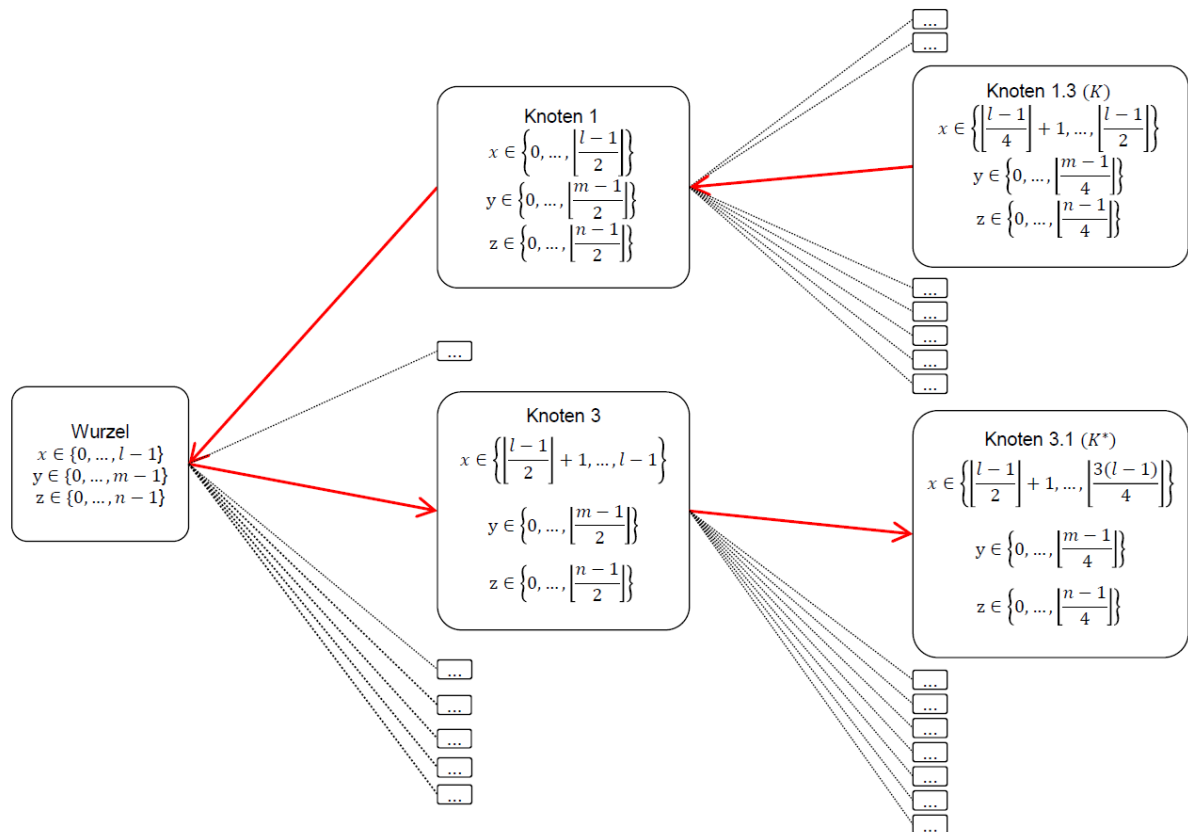


Abbildung 4.5: Beispiel für Nachbarknoten in Baumstruktur, die keine Geschwisterknoten sind

Im Allgemeinen muss beim rückwärtigen Durchlaufen zunächst jeweils festgestellt werden, ob der aktuell betrachtete Knoten ein Vorgängerknoten  $K_V$  von  $K^*$  ist. Hierfür wird ausgenutzt, dass die Knotenaufteilung bezüglich der Koordinatenachsen stets gleich von statten geht (siehe Abschnitt 4.1.2). Die Knotennummern 1, 2, ..., 8 in Abbildung 4.2 dienen in diesem Zusammenhang als Positionsnummern, die bei jeder Aufteilung eines Knoten nach dem gleichen Schema an die Kindsknoten vergeben werden. Diese Positionsnummern innerhalb der Aufteilung sind für jeden Knoten gespeichert. Wenn nun beispielsweise ein Nachbarknoten des Startknotens  $K$  in der Raumrichtung  $z$ -Minus gesucht wird, muss beim Durchlaufen der Vorgängerknoten ein Knoten  $K_V$  gefunden werden, dessen Positionsnummer, wiederum beziehend auf Abbildung 4.2, gleich 5, 6, 7 oder 8 ist. In diesem Fall grenzt der Geschwisterknoten mit der Positionsnummer 1, 2, 3 bzw. 4 in der Raumrichtung

$z$ -Minus an  $K_V$  an. Es gilt stets, dass die Geschwisterknoten mit den Positionsnummern 1 und 5, 2 und 6, 3 und 7, 4 und 8 jeweils in  $z$ -Richtung aneinander angrenzen.

In Abbildung 4.6 ist ein Beispiel für den Fall, dass zu einem Knoten  $K$  mit der Positionsnummer 2 der Nachbarknoten in Richtung  $z$ -Minus gesucht wird, dargestellt. Zur leichteren Differenzierung zwischen Kinds-knoten und Vaterknoten in der Grafik wird bei den Kinds-knoten jeweils auch die Positionsnummer des Vaterknotens angegeben. Entsprechend wird der Knoten  $K$  in der Abbildung mit der Nummer 6.2 bezeichnet. Der Knoten 6 ist somit der Vorgängerknoten des Knotens 6.2 und gleichzeitig Geschwisterknoten des Knotens 2. Da der Knoten 2 vom Knoten 6 aus betrachtet in Richtung  $z$ -Minus angrenzt, muss einer der Nachfolgeknoten des Knotens 2 an den Knoten 6.2 angrenzen. Im dargestellten Beispiel ist dies der Nachbarknoten  $K^*$  mit der Nummer 2.6.

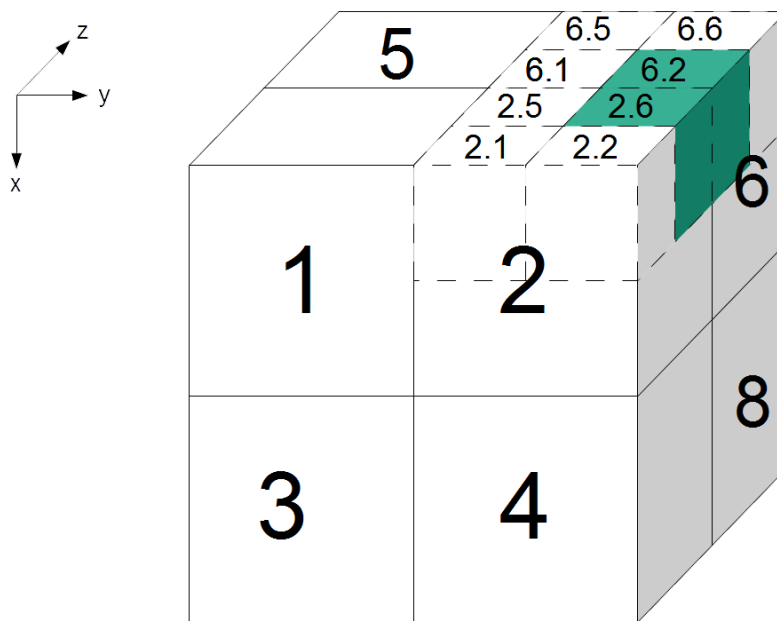


Abbildung 4.6: Beispiel für Identifizierung des Vorgängerknotens, wenn Nachbarknoten kein Geschwisterknoten ist

Wenn nun im Allgemeinen ein Vorgängerknoten  $K_V$  mit der Positionsnummer 5, 6, 7 oder 8 gefunden wurde, bedeutet dies, dass einer der Nachfolgeknoten des entsprechenden Geschwisterknotens 1, 2, 3 oder 4 der gesuchte Nachbarknoten  $K^*$  ist. Nun wird die Suchrichtung gewechselt und die Zweige der Baumstruktur ausgehend von  $K_V$  werden wieder nach vorne durchlaufen. Da die Positionsnummern der im Vorhergehenden rück-

wärts durchlaufenen Knoten zwischengespeichert wurden, können diese Informationen verwendet werden, um eindeutig die jeweiligen vorwärts zu durchlaufenden Kindsknoten zu identifizieren. Der Vorwärtsdurchlauf der Zweige endet, wenn der Knoten  $K^*$  erreicht wird (erster Fall) oder sich vorher herausstellt, dass  $K^*$  ein kleineres Volumen als  $K$  und somit auch eine kleinere Grenzfläche hat (zweiter Fall).

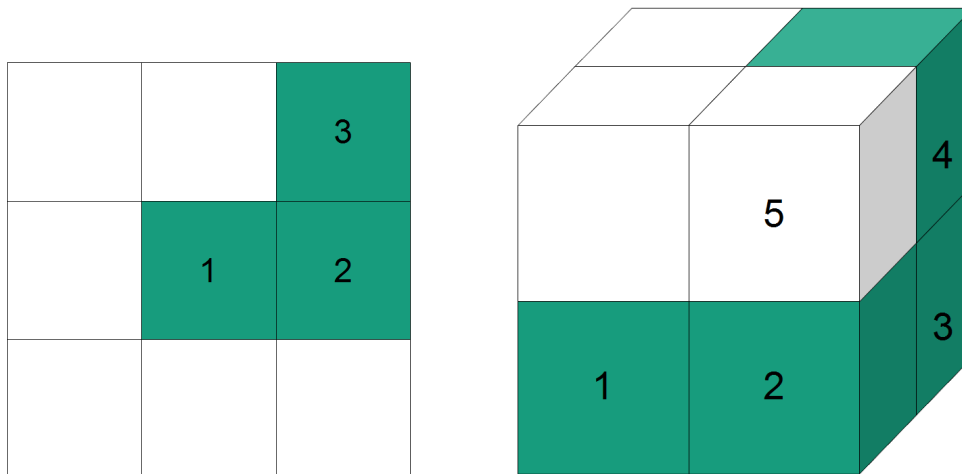
Im ersten Fall erfolgen die nachfolgenden Schritte Texturvergleich, ggf. Vergabe Gruppen-ID und Öffnung der Seitenflächen analog zur Situation „Nachbarknoten ist Geschwisterknoten“. Bei der ggf. durchzuführenden Öffnung der Seitenflächen muss berücksichtigt werden, dass die angrenzende Seitenfläche von  $K$  kleiner als von  $K^*$  sein kann. Somit kann nur die Grenzfläche von  $K$  vollständig geöffnet werden. Bei der angrenzenden Seitenfläche von  $K^*$  wird nur der von der Seitenfläche von  $K$  berührenden Bereich als offen markiert. Für dieses teilweise Öffnen der Seitenfläche, werden die Koordinaten der Seitenfläche des Knotens  $K$  verwendet und beim Knoten  $K^*$  als angepasste Attribute gespeichert. Entsprechend wird zwischen **vollständig** (wie hier im Fall von  $K$ ) und **teilweise geöffneten Seitenflächen** (wie hier im Fall von  $K^*$ ) unterschieden.

Im zweiten Fall, wenn sich also herausgestellt hat, dass  $K^*$  ein kleineres Volumen als  $K$  hat, findet kein Texturvergleich statt. Hier wird ebenfalls wie im Fall „Nachbarknoten ist Geschwisterknoten“ argumentiert, dass der Texturvergleich stets von Klein nach Groß stattfindet und somit der Texturvergleich zwischen  $K$  und  $K^*$  im weiteren Verlauf der Gruppierung nachgeholt wird. Der Grund den Texturvergleich stets von Klein nach Groß durchzuführen liegt darin andernfalls auftretende Mehrdeutigkeiten zu vermeiden.

#### 4.1.5.4 Diagonal angrenzende Nachbarknoten

Bei dem vorgestellten Verfahren werden diagonal angrenzende Nachbarknoten nicht direkt betrachtet, außer sie gehören zum gleichen Vaterknoten. Unter einem zum Knoten  $K$  diagonal angrenzenden Nachbarknoten  $K^*$  wird ein Knoten verstanden, der zwar eine gemeinsame Kante oder auch einen gemeinsamen Punkt, aber keine gemeinsame Seitenfläche mit dem Knoten  $K$  hat. Eine vereinfachte zweidimensionale Darstellung einer solchen Nachbarschaft ist in Abbildung 4.7(a) zu sehen. Hier ist der Knoten mit Nummer 3 ein diagonal angrenzender Nachbarknoten des Knotens mit Nummer 1. In dieser zweidi-

mensionalen Darstellung entspricht die zuvor erwähnte Knotenkante einem Punkt und die Seitenfläche einer Linie. Ein dreidimensionales Beispiel ist in Abbildung 4.7(b) dargestellt. Hier ist der Knoten 4 ein diagonalen Nachbarknoten des Knotens 1 (gemeinsamer Eckpunkt) und des Knotens 2 (gemeinsame Kante).



(a) 2D Beispiel für diagonal angrenzenden Nachbarknoten

(b) 3D Beispiel für diagonal angrenzenden Nachbarknoten

Abbildung 4.7: 2D und 3D Beispiel für diagonal angrenzende Nachbarknoten

Falls diagonal angrenzende Knoten nicht den gleichen Vaterknoten haben, ist es Aufgabe des Gruppierungsschritts eventuelle Texturähnlichkeiten zu berücksichtigen. Hierbei findet zwar kein direkter, aber zumindest ein indirekter Vergleich statt. Die indirekte Betrachtung der Zusammenhänge lässt sich am besten an den beiden bereits erwähnten Beispielen darstellen:

- 2D Beispiel:** In dem in Abbildung 4.7(a) dargestellten zweidimensionalen Fall wird bei Knoten 1 begonnen. Im Laufe des Region Growings werden die Texturen der beiden Nachbarknoten 1 und 2 verglichen. Es wird hier angenommen, dass deren Texturen ähnlich sind und sie somit der gleichen Gruppe zugeordnet werden. Im weiteren Verlauf des Region Growings werden wiederum die Nachbarknoten 2 und 3 verglichen, auch hier wird in diesem Beispiel eine Ähnlichkeit bezüglich der Textur festgestellt und somit auch die Knoten 2 und 3 der gleichen Gruppe zugeordnet. Somit wurden indirekt auch die Texturen des Knotens 1 und 3 verglichen. Deren Ähnlichkeit bildet sich durch die gespeicherte offene Seitenfläche zwischen dem

Knoten 1 und 2 sowie der gespeicherten offenen Seitenfläche zwischen Knoten 2 und 3 im Ergebnis des Region Growings ab.

- **3D Beispiel:** In dem in Abbildung 4.7(b) dargestellten dreidimensionalen Fall ist die Erklärung analog. Es finden jeweils paarweise Texturvergleiche zwischen den Knoten 1 und 2, 2 und 3 sowie 3 und 4 statt. Es wird hier davon ausgegangen, dass jeder dieser Vergleiche eine ausreichende Texturähnlichkeit ergibt und somit am Ende des Region Growings paarweise gleiche Gruppennummern vorliegen. Entsprechend sind dann auch die Seitenflächen zwischen den Knoten 1 und 2, 2 und 3 sowie 3 und 4 offen. In Summe wird somit auch in diesem Beispiel nicht nur die Ähnlichkeiten der Texturen zwischen dem Knoten 2 und 4, sondern auch zwischen dem Knoten 1 und 4 indirekt berücksichtigt.

Ähnlichkeit soll bei der hier beschriebenen indirekten Betrachtung nicht im strengen Sinne der Formel 4.3 verstanden werden. Außerdem werden Texturähnlichkeiten von diagonal angrenzenden Nachbarknoten ohne Bindeglieder in Form von Knotenübergängen nicht berücksichtigt. Dies ist für das 2D Beispiel aus Abbildung 4.7(a) der Fall, wenn sich beim Texturvergleich zwischen den Knoten 1 und 2 oder zwischen den Knoten 2 und 3 keine Ähnlichkeit ergibt. Es fehlt somit der Knotenübergang 2. Also auch wenn die Formel 4.3 bei einem direkten Vergleich zwischen dem Knoten 1 und 3 eine Ähnlichkeit ergeben würde, bliebe dies in diesem Szenario im implementierten Verfahren unberücksichtigt. Dies stellt aber keine wirkliche Einschränkung dar, da es das Ziel des 3D Split-and-Merge Verfahrens ist zusammenhängende Bereiche mit ähnlichen Texturen zu finden. Wenn der Zusammenhang lediglich in einer gemeinsamen Kante bzw. einem gemeinsamen Punkt besteht, ist dies vernachlässigbar.

#### Anmerkungen:

- Aufkommende Sonderfälle, wie nicht vorhandene Nachbarknoten im Grenzbereich des Volumens, müssen bei der Gruppierung beachtet und gesondert abgefangen werden.

- Auch wenn die Gruppen-ID selbst eindeutig ist, können Knoten nichtsdestotrotz mehreren verschiedenen Gruppen zugeordnet werden und somit mehrere Gruppennummern erhalten.

#### 4.1.6 Region Growing: Eliminierung kleiner Volumina

Der letzte Schritt des Region Growings besteht in der Eliminierung kleiner Volumina. Wie im zweidimensionalen Fall für kleine Bildbereiche (siehe Abschnitt 2.4.3) gilt auch im dreidimensionalen Fall für kleine Volumenbereiche, dass in ihnen oft keine ausreichende Texturinformation enthalten ist. Dies führt dazu, dass, auch nach der vorhergehenden Zusammenfassung, kleine Knoten übrig bleiben, die nicht mit ausreichender Sicherheit einer großen Gruppe zugeordnet werden konnten. Die Abspaltung dieser kleinen Volumina liegt in der zuvor erwähnten Schwäche der Texturanalyse bezüglich kleiner Elemente und hat somit selbst keinen relevanten Informationsgehalt für die angestrebte Auswertung von Volumendaten. Diese Elemente können also nicht als Indikatoren für eventuelle Fehlstellen oder Qualitätseigenschaften der FVK verwendet werden. Deshalb ist das Ziel des letzten Verfahrensschritts des Region Growings, diese kleinen Knoten größeren Bereichen zuzuordnen. Diese Zuordnung geschieht über die bereits bei der Gruppierung verwendete Öffnung von Seitenflächen.

Zunächst wird ein weiteres Mal die Baumstruktur durchlaufen und Knoten mit kleinen Volumina werden identifiziert. Die Identifizierung erfolgt über die Betrachtung der Dimensionen der quaderförmigen Volumina. Es wird für jeden Endknoten das Minimum der Dimensionen des zugehörigen Volumens in  $x$ ,  $y$  und  $z$  mit einem vorgegebenen Schwellwert verglichen. Falls das Minimum der Dimensionen kleiner gleich dem Schwellwert ist, wird das Volumen als klein betrachtet. Dieses Minimum wurde bereits bei der Aufteilung des Gesamtvolumens als Kriterium verwendet. Statt des Minimums der Dimensionen könnte alternativ auch das tatsächliche Volumen verwendet werden.

Offensichtlich muss der hier verwendete Schwellwert größer gleich als der Schwellwert bei der Aufteilung sein, da ansonsten kein Endknoten das oben beschriebene Identifizierungskriterium erfüllt. In der umgesetzten Implementierung wurde entsprechend der Schwellwert gleich bzw. etwas größer als das Dimensionsminimum bei der Aufteilung gewählt.

Nach der Identifizierung eines Knotens  $K$  mit kleinem Volumen werden, wie bereits bei der Gruppierung, die Nachbarknoten in den Raumrichtungen  $x$ -Plus,  $x$ -Minus,  $y$ -Plus,  $y$ -Minus,  $z$ -Plus und  $z$ -Minus mit der Textur des Knotens  $K$  verglichen. Der Vergleich erfolgt mit der ebenfalls bereits bei der Gruppierung verwendeten Formel 4.3. Allerdings muss hier aufgrund der reduzierten Texturinformation bei kleinen Volumina ein neuer erhöhter Schwellwert  $T_3$  verwendet werden, um eine möglichst optimale Reduktion kleiner Volumina zu erreichen. In den durchgeführten Tests wurden des Öfteren die Parameter wie folgt gewählt:  $T_3 = \frac{4}{5}T > \frac{3}{4}T = T_2$ . Statt der Vergleichsformel 4.3 können wahlweise auch der jeweilige mittlere Grauwert des Knotens  $K$  und dessen Nachbarknotens verglichen werden. Hier muss abgewägt werden, ob die kleinen Volumina noch genügend Information für einen Texturvergleich mit höherem Schwellwert besitzen. Ist dies nicht der Fall, bietet sich die Verwendung des mittleren Grauwerts an.

Unabhängig vom Vergleichskriterium werden, falls die Ähnlichkeit (Textur- bzw. Grauwertvergleich) zwischen dem Knoten  $K$  und seinem Nachbarknoten ausreichend ist, die entsprechenden Seitenflächen analog zum Vorgehen im Gruppierungsschritt geöffnet.

**Anmerkung:** Wahlweise können zur Effizienzsteigerung die Verfahrensschritte „Gruppierung“ und „Eliminierung kleiner Volumina“ des Region Growing Verfahrens zu einem Verfahrensschritt kombiniert werden. Hierdurch kann ein erneutes Durchlaufen der Baumstruktur vermieden werden.

#### 4.1.7 Speichern des Analyseergebnisses

Der letzte Verfahrensschritt des Gesamtverfahrens besteht in der Speicherung des Analyseergebnisses. Dieser Punkt ist eng mit der späteren Darstellung (siehe Abschnitt 4.2) des Resultats verknüpft. Es wurden drei Speichervarianten implementiert. In der ersten Speichervariante werden die Grenzflächen markiert und in der zweiten wird die Anzahl der geschlossenen Seitenflächen in den Ergebnisdatensatz geschrieben. In der dritten Variante wird die Ausdehnungsrichtung der durch das Split-and-Merge Verfahrens entstehenden Segmente gespeichert.

#### 4.1.7.1 Speichern der Grenzflächen

Das Volumen jedes Knotens verfügt über sechs Seitenflächen. Diese werden vor dem Region Growing als geschlossen betrachtet und stellen somit Grenzflächen dar. Im Laufe des Region Growings wird ein Teil dieser Grenzflächen geöffnet. Durch das Zusammenfassen der Volumenteile werden Knoten gelöscht und mit ihnen die entsprechenden Grenzflächen. Bei der Gruppierung und der Eliminierung kleiner Volumina werden Seitenflächen vollständig bzw. teilweise geöffnet. Die am Ende des Region Growing Verfahrens übrig gebliebenen Grenzflächen können anschließend in die auszugebende Datei geschrieben werden. Die Ausgabedatei ist zunächst eine Kopie der ursprünglichen Volumendaten. Die Grenzflächen werden durch Überschreiben der Volumendaten an der Position der Grenzflächen markiert. Hierzu werden die in der Datei an der Grenzfläche vorhandenen Voxelwerte durch einen vorgegebenen Grauwert ersetzt. Für 8-Bit und 16-Bit Unsigned Integer Volumendaten bietet sich der jeweilige Maximalwert  $2^8 - 1 = 255$  bzw.  $2^{16} - 1 = 65535$  an. Bei Float Voxelwerten muss ein spezieller Wert definiert werden. Hier besteht aber eine noch stärkere Verwechslungsgefahr mit vorhandenen Voxelwerten als bei Integer Datensätzen. Neben der Verwechslungsgefahr besteht ein weiterer Nachteil dieser Speicherform darin, dass vorhandene Voxelwerte überschrieben werden und somit ein Informationsverlust stattfindet. Dies könnte zwar durch Vorhalten des Originaldatensatzes kompensiert werden, dadurch würde aber wiederum ein Großteil der Vorteile dieser Speicherform verloren gehen. Diese bestehen darin, dass alle zunächst wesentlichen Informationen wie die Originalvoxelwerte und die verbliebenen Grenzflächen in einem Datensatz vorliegen. Jede Software, die in der Lage ist Volumendaten anzuzeigen, kann diese Datensätze ohne Zusatzinformationen darstellen. Ein Beispiel für die Darstellung eines mit Grenzflächen gespeicherten Datensatzes ist in Abschnitt 4.2 in Abbildung 4.9(b), S. 109 zu sehen.

#### 4.1.7.2 Speichern der Anzahl der geschlossenen Seitenflächen

Statt die Grenzflächen selbst zu speichern, kann die Anzahl der geschlossenen Seitenflächen bestimmt und diese Information gespeichert werden. Dies läuft wie folgt ab. Zu Beginn des Split-and-Merge Verfahrens wird davon ausgegangen, dass alle Seitenflächen geschlossen sind. Die Anzahl der geschlossenen Seitenflächen des Volumens eines Knotens werden



für jeden Knoten gespeichert. Bei jedem kompletten Öffnen einer Grenzfläche wird die Anzahl der geschlossenen Seitenflächen des Volumens eines Knotens um eins reduziert. Somit liegt am Ende des Region Growings die Information vor, wie viele geschlossene Grenzflächen bei jedem Knoten noch übrig geblieben sind. Gleichzeitig sind für jeden Knoten die Koordinaten des entsprechenden Volumens gespeichert. Für jeden Knoten werden nun in eine neue Volumendatei mit gleichen Dimensionen wie das Originalvolumen die Anzahl der geschlossenen Grenzflächen (maximal sechs, minimal null) an jede zugehörige Voxelposition geschrieben. Eine Darstellungsform dieser neu geschriebenen Datei ist in Abbildung 4.10(a), S. 110 zu sehen. Hier wurde für jede Grenzflächenanzahl eine andere Farbgebung gewählt. Eine genauere Beschreibung der Darstellungsform und deren Interpretation wird in Abschnitt 4.2.1 gegeben.

Da ein komplett neuer Datensatz geschrieben wird, der ausschließlich aus den Informationen des Analyseergebnisses besteht, ist für eine umfassende Interpretation die Vorhaltung des Originaldatensatzes notwendig. Somit werden im Gegensatz zur Speicherung der Grenzflächen (siehe oben) stets zwei Datensätze für den vollständigen Informationserhalt benötigt. Ein Vorteil im Vergleich zur Speicherung der Grenzflächen besteht darin, dass durch das Vorhalten beider Datensätze kein Informationsverlust entsteht.

Eine zusätzliche Option ist, nicht für jeden Knoten die Anzahl der geschlossenen Grenzflächen in die Ausgabedatei zu schreiben. Stattdessen kann ein vom Nutzer gewählter Schwellwert gesetzt werden, der das Maximalvolumen eines zu speichernden Knotens angibt. In diesem Fall werden nur Knoten, deren Volumen das Maximalvolumen nicht überschreiten, in die Ausgabedatei geschrieben. Die Darstellung eines entsprechend analysierten Datensatzes ist in Abbildung 4.10(b), S. 110 zu sehen.

#### 4.1.7.3 Maximale Ausdehnung

Ein weiteres Ausgabeformat besteht in der Speicherung der maximalen Ausdehnung eines Segments. Ein Segment ist eine Menge von Knoten, bei denen jeweils benachbarte Knoten durch offene Grenzflächen verbunden sind. Die Knoten eines Segments müssen zusammenhängend sein. Dies bedeutet, dass es für zwei beliebige Knoten eines Segments stets Knoten innerhalb des Segments gibt, die die beiden Knoten verbinden.

Eine vereinfachte zweidimensionale Veranschaulichung eines Segments ist in Abbildung 4.8(a) zu sehen. Die Knoten sind in Form von Quadraten dargestellt. Durchgezogene Linien bedeuten geschlossene, gestrichelte Linien offene Grenzflächen. Das dargestellte Segment ist in grün hervorgehoben.

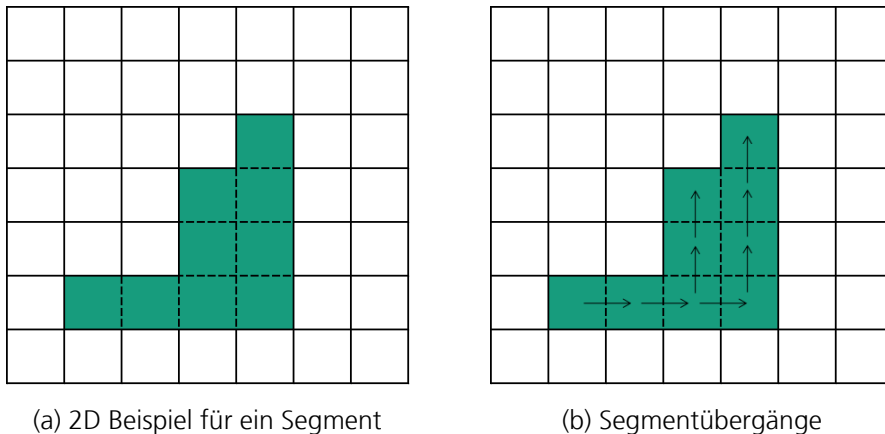


Abbildung 4.8: 2D Beispiel für ein Segment und dessen Übergänge

Generell erfolgt die Berechnung der Segmentausdehnungen knotenweise. Zunächst werden hierfür alle Endknoten durchlaufen. Für jeden Endknoten werden die Ausdehnungen in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung berechnet. Der jeweils aktuell betrachtete Endknoten wird im Folgenden als Ausgangsknoten bezeichnet. Zunächst wird eine Ausgangsgröße für die Berechnung der Ausdehnung des betrachteten Endknotens in Richtung einer vorgegebenen Dimension gewählt. Diese ist jeweils die Größe der entsprechenden Dimension des zugehörigen Volumens. Das heißt also, wenn beispielsweise die Ausdehnung in  $x$ -Richtung berechnet werden soll, wird die  $x$ -Dimension des Knotens als Basis der Berechnung gewählt. Anschließend wird in der betrachteten Dimension überprüft, ob die entsprechenden Seitenflächen vollständig offen sind. Für jede Dimension gibt es hierzu zwei Seitenflächen, die betrachtet werden müssen: einmal in positiver und einmal in negativer Dimensionsrichtung. Wenn man also bei dem Beispiel der  $x$ -Richtung bleibt:  $x$ -Plus und  $x$ -Minus. Falls die jeweils betrachtete Seitenfläche offen ist, wird die Dimension des Nachbarknotens zum Basiswert hinzuaddiert. Anschließend werden die Seitenflächen des Nachbarknotens betrachtet. In diesem Fall ist nur noch eine Seitenfläche zur Bestimmung der Ausdehnung in der vorgegebenen Richtung relevant. Dies liegt daran, dass, wenn beispielsweise aktuell die Ausdehnung in  $x$ -Plus Richtung bestimmt wird, die Seitenfläche in  $x$ -Minus beim Übergang

vom Ausgangsknoten zum Nachbarknoten bereits betrachtet worden ist. Es bleibt somit nur noch die Seitenfläche in  $x$ -Plus Richtung zu untersuchen. Auch hier wird wiederum überprüft, ob diese vollständig geöffnet ist. Falls ja, wird hier analog vorgegangen und das Verfahren rekursiv fortgesetzt bis die relevante Seitenfläche zumindest teilweise geschlossen ist oder es keinen Nachbarknoten gibt. Auch hier gilt wiederum wie in Abschnitt 4.1.5, dass nur dann die Nachbarknoten betrachtet werden, wenn sie gleich große oder größere Seitenflächen haben. Hierdurch werden Mehrdeutigkeiten vermieden. Ist dies nicht der Fall, wird der Durchlauf in der entsprechenden Ausdehnungsrichtung ebenfalls beendet.

In dem bereits eingangs erwähnten 2D Beispiel stellt sich die Situation wie in Abbildung 4.8(b) zu sehen dar. Hier wird vom linken unteren grünen Quadrat ausgegangen. Der Verlauf des Segmentwachstums ist durch Pfeile dargestellt. Die einzige offene Seitenfläche des Ausgangsquadrats befindet sich auf der rechten Seite. Anschließend wird das rechts angrenzende Quadrat betrachtet. Hier gibt es zwei offene Seiten. Da die linke Seite bereits betrachtet wurde, wird das Segmentwachstum wiederum rechts fortgesetzt. Anschließend wird das neu hinzugefügte Quadrat untersucht. Hier wird das Segmentwachstum aufgrund der noch nicht betrachteten offenen Seitenflächen nach oben und rechts fortgesetzt. Das Wachstum endet hier bei den oberen Quadraten, die in keine Raumrichtung eine noch nicht betrachtete offene Seitenfläche aufweisen.

Generell gilt, dass, nachdem alle Endknoten durchlaufen wurden, für jeden Knoten die Ausdehnungen des zugehörigen Segments in allen drei Raumrichtungen  $x$ ,  $y$  und  $z$  vorliegen. Diese Information kann genutzt werden, um einen Orientierungsvektor zu bestimmen. Wenn die Ausdehnungen mit  $x_a$ ,  $y_a$  und  $z_a$  bezeichnet werden, ergibt sich der normierte Orientierungsvektor als  $\frac{(x_a, y_a, z_a)^T}{\|(x_a, y_a, z_a)^T\|}$ . Diese Information kann knotenweise in die Ausgabedatei geschrieben werden.

Statt die normierten Orientierungsvektoren zu speichern, kann diese kontinuierliche Information auch wie folgt diskretisiert werden. Hierbei wird jeweils die zugehörige Dimension (also  $x$ ,  $y$  oder  $z$ ) der betragsmäßig maximalen Komponente des Orientierungsvektors in die Ausgabedatei geschrieben. Diese Größe wird im Weiteren als **Maximale Ausdehnungsdimension** bezeichnet.

Hier sind die Sonderfälle zu beachten, in denen mehr als eine Komponente den Maximalwert hat. Damit ist nicht gemeint, dass die jeweiligen Maximalwerte exakt identisch sind,

sondern dass sie bis auf eine vom Nutzer gesetzte Differenz übereinstimmen. Insgesamt ergeben sich somit als mögliche Ausgabewerte, dass die maximale Ausdehnung in folgende Richtungen geht:

- $x$ -Richtung,
- $y$ -Richtung,
- $z$ -Richtung,
- $x$ - und  $y$ -Richtung,
- $x$ - und  $z$ -Richtung,
- $y$ - und  $z$ -Richtung oder
- $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung.

Dies sind auch die Werte, die die Maximale Ausdehnungsdimension annehmen kann. Bei dieser Speicherform wird eine Ausdehnung in negativer und positiver Richtung nicht unterschieden. Somit spielt das Vorzeichen der betragsmäßig maximalen Komponente des Orientierungsvektors keine Rolle für den Wert der Maximalen Ausdehnungsdimension. Warum dieses Vorgehen legitim ist, wird in Abschnitt 4.2.2 begründet.

Ein Beispiel für die Darstellung einer solchen Ausgabedatei ist in Abbildung 4.12(b), S. 114 zu sehen. Es zeigt sich beispielhaft in dieser Abbildung, dass hier eine starke Schwankung innerhalb des Volumens vorliegt. Abhängig von der Zielsetzung der Analyse kann dies unerwünscht sein (vgl. hierzu Abschnitt 4.2.2).

#### 4.1.7.4 Filterung

Um diese Schwankungen auszugleichen wurde eine zusätzliche Filterung implementiert. Hierbei werden für Knoten, deren maximale metrische Ausdehnung unterhalb eines wählbaren Schwellwerts liegt, die direkten Nachbarknoten betrachtet. Der Ausgabewert der Maximalen Ausdehnungsdimension wird dann an diese Nachbarknoten angepasst. Hierzu wird gezählt, welche Maximale Ausdehnungsdimension bei der Mehrheit der direkten Nachbarknoten vorliegt. Diese wird dann als neuer Ausgabewert des Knotens definiert. Falls es keine eindeutige Mehrheit gibt, wird die Maximale Ausdehnungsdimension aus den sich in der Mehrheit befindenden Maximalen Ausdehnungsdimensionen der direkten

Nachbarknoten randomisiert gewählt. Alternativ kann der Vergleich der metrischen Größen der Ausdehnungen zur Mehrheitsfindung genutzt werden. Allerdings kann es auch hierbei zu Uneindeutigkeiten kommen.

**Anmerkungen:** Generell werden bei der implementierten 3D Texturanalyse alle vorgestellten Ergebnisformen direkt auf die Festplatte geschrieben. Dadurch kann der benötigte Arbeitsspeicher reduziert werden. Außerdem wird hierdurch eine Unabhängigkeit von speziellen Softwarewerkzeugen für die Darstellung erreicht.

Andererseits wirkt sich diese Form der Ergebnisverwaltung negativ auf die Laufzeit aus. Wenn hier eine Laufzeitoptimierung gewünscht ist, kann, auf Kosten der Flexibilität, eine direkte Ankopplung an eine Darstellungssoftware vorgenommen werden. Die Ergebnissicherung würde in diesem Fall in eine extra Speicherfunktion ausgelagert werden.

## 4.2 Ergebnisse der 3D Texturanalyse und deren Darstellung

Während im vorhergehenden Abschnitt 4.1 der Fokus rein auf das algorithmische Vorgehen gelegt wurde, soll in diesem Abschnitt auf die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse des implementierten Verfahrens eingegangen werden. Mit Interpretation ist hier in erster Linie gemeint, welche Aussagen über mögliche Fehler und Qualitätseigenschaften der FVK auf Grundlage der 3D Texturanalyseergebnisse gemacht werden können. Zunächst wird auf die Defekterkennung und anschließend auf die Bestimmung der Faserorientierung eingegangen.

### 4.2.1 3D Texturanalyse als Mittel zur Erkennung von Defekten in Volumendaten von Faserverbundkunststoffen

Zunächst wird betrachtet inwieweit, mithilfe des umgesetzten Algorithmus, Informationen über mögliche Defekte gewonnen werden können. Dies stellt den Standardanwendungsfall jeder Texturanalyse dar (vgl. hierzu Abschnitt 2.4.1). Wenn die 3D Texturanalyse zur Defekterkennung genutzt werden soll, wird davon ausgegangen, dass bei den FVK erstens die Gutbereiche im Vergleich zu den Defektbereichen überwiegen und zweitens diese Gutbereiche sich durch eine in sich einheitliche 3D Textur auszeichnen. Mit diesen Annahmen

gilt, dass kleine Bereiche, die sich in ihrer Textur von der Umgebung unterscheiden, starke Indizien für Defekte sind.

Somit muss das Ziel der Darstellung sein, diese Bereiche entsprechend herauszuarbeiten. Die Visualisierung soll dem Benutzer unmittelbar die potentiellen Defektbereiche anzeigen. Je nachdem, welche Speicherform gewählt wurde, sind verschiedene Darstellungsformen möglich. Die implementierten Darstellungen und deren Interpretation sind nachfolgend beschrieben.

#### 4.2.1.1 Markierung der Grenzflächen

Wenn, wie in Abschnitt 4.1.7.1 beschrieben, die Grenzflächen gespeichert wurden, bietet es sich an, diese direkt in der Visualisierung anzuzeigen. Bei der Speicherung der Grenzflächen wurde vorgeschlagen, den Maximalwerte der Voxelwerte (abhängig vom Datenformat des Volumendatensatzes) zur Markierung zu verwenden. Bei jeder Standarddarstellung von Volumendaten führt dies zu einer Visualisierung, wie sie beispielhaft in Abbildung 4.9(b) zu sehen ist. Hier sind die Grenzflächen entsprechend weiß dargestellt. Wenn von der Standarddarstellung abgewichen wird, ist abhängig von der Visualisierungssoftware auch eine farbliche Hervorhebung möglich.

Die Linien bzw. Flächen zeigen den Übergang zwischen verschiedenen Texturen an. Sie stellen somit Grenzlinien bzw. -flächen zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Texturen dar. Hierdurch werden Bereiche, die sich von ihrer Umgebung durch ihre Textur unterscheiden, abgegrenzt. Je nach Größe der segmentierten Bereiche bestehen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für Defekte bei diesen Positionen. Insbesondere bei vergleichsweise kleinen Bereichen liegt eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine Defektstelle vor.

Dies zeigt sich auch im betrachteten Beispiel. Da in Abbildung 4.9(b) ein Schnittbild des Volumendatensatzes dargestellt ist, sind von den Grenzflächen lediglich Linien zu sehen. Im Originalschnittbild (siehe Abbildung 4.9(a)) sind drei Risse erkennbar. Diese spiegeln sich auch im Analyseergebnis in Form der dargestellten Grenzflächen wider. Die Grenzflächen markieren jeweils Übergänge zwischen verschiedenen Texturen. Somit zeigt sich, dass die Risse und ihre Umgebung sich in ihrer Textur unterscheiden. Generell kann die Texturanaly-

se als Mittel zur Erkennung und Abgrenzung von Defekten genutzt werden. Im Beispiel können die Risse erkannt sowie ihre Position und Ausdehnung bestimmt werden.

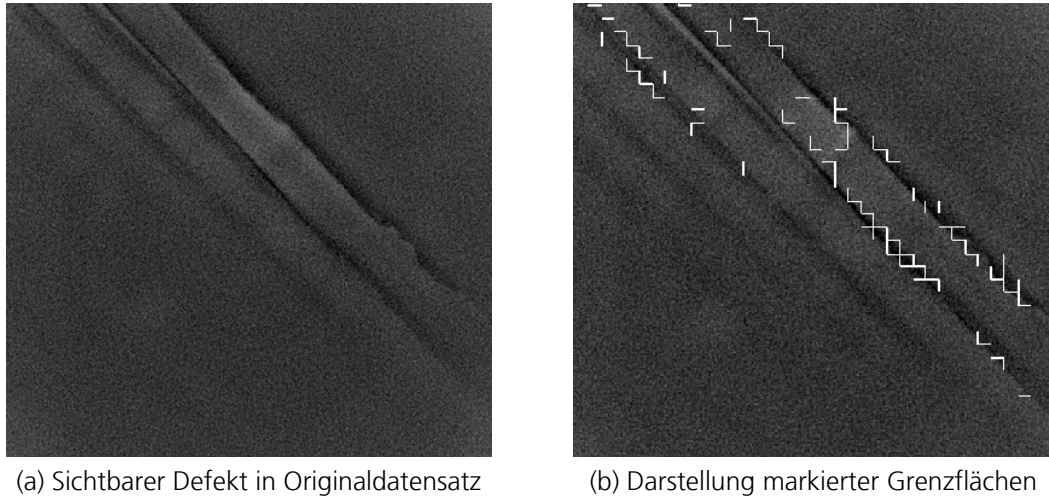


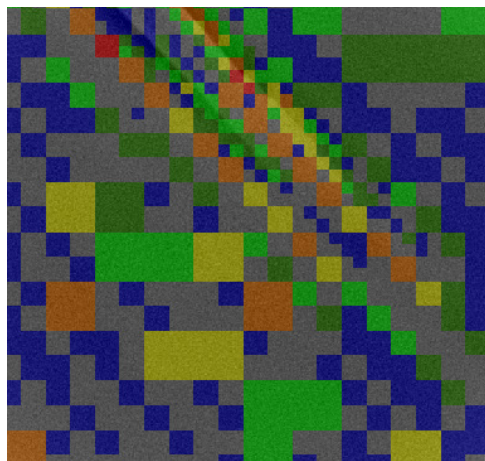
Abbildung 4.9: Schnittbild des Originaldatensatzes und Darstellung des Texturanalyseergebnisses in Form von markierten Grenzflächen für CT-Volumendatensatz eines CFK mit Voxelauflösung  $29,873 \mu\text{m}$  (Originaldatensatz mit einem Volumen von  $9,878 \text{ cm}^3$  zur Verfügung gestellt von der RayScan Technologies GmbH)

#### 4.2.1.2 Darstellung der Anzahl geschlossener Grenzflächen

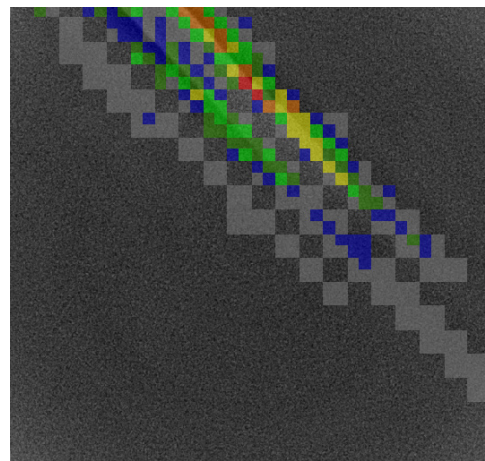
Statt der Grenzflächen selbst wurde in Abschnitt 4.1.7.2 alternativ vorgeschlagen, für jeden Knoten die Anzahl der geschlossenen Grenzflächen zu speichern. In diesem Fall gibt es keine passende Standarddarstellung. In Abbildung 4.10(a) wurden, abhängig von der Anzahl der geschlossenen Grenzflächen, verschiedene Farbwerte für die Knoten verwendet. Die Farbgebungen stellen eine Bewertung der einzelnen Knoten dar und signalisieren hierdurch verschieden starke Texturunterschiede und -übergänge.

Die Zuordnung zwischen Farbgebung und Anzahl ist aus der unter der Abbildung befindlichen Skala ersichtlich. Wenn jeder Knoten entsprechend eingefärbt wird, gestaltet sich die Identifizierung möglicher Defektbereiche für den Anwender als schwierig. Um dies zu vermeiden, wurde, wie ebenfalls in Abschnitt 4.1.7.2 beschrieben, eine Speichervariante abhängig von einem vorgegebenen Maximalvolumen der Knoten eingeführt. Bei entsprechender Wahl des zu speichernden Maximalvolumens ergibt sich die Abbildung 4.10(b). Diese Speichervariante kann als Filterung des in Abbildung 4.10(a) dargestellten Ergebnisses

betrachtet werden. Durch die Eliminierung großer Knoten in der Darstellung ist erkennbar, dass sich kleine Knoten, die sich in ihrer Textur von der Umgebung unterscheiden, entlang der Risse bewegen. Der Verlauf und die Position der Risse kann somit anhand der markierten Bereiche bestimmt werden. Außerdem ist zu erwähnen, dass sich auch die Rissstärke in der Farbgebung widerspiegelt. Der Skalenverlauf von grau nach rot gibt zunächst die steigende Anzahl geschlossener Grenzflächen wieder. Gleichzeitig entspricht die Farbgebung der Stärke des Texturunterschieds zur Umgebung. In der Abbildung 4.10(b) sind deutliche Differenzen zwischen den Farbwerten der drei Risse erkennbar. Durch den Vergleich mit dem Originaldatensatz (siehe Abbildung 4.9(a)) ist ersichtlich, dass die stärker ausgeprägten Risse sich auch durch eine stärkere Heterogenität in ihrer Textur auszeichnen.



(a) Darstellung der Anzahl der geschlossenen Seitenflächen



(b) Darstellung Anzahl geschlossener Seitenflächen mit beschränktem Maximalvolumen



Abbildung 4.10: Darstellungen des Texturanalyseergebnisses zu Originaldatensatz aus Abbildung 4.9(a) anhand Anzahl der geschlossenen Seitenflächen

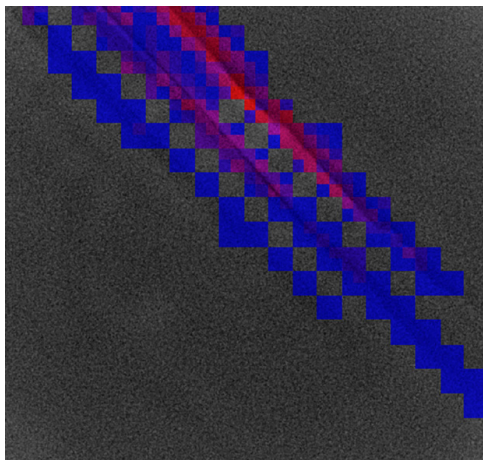
Die Abbildung 4.11(a) stellt lediglich eine weitere Visualisierungsvariante des eben beschriebenen Analyseergebnisses dar. Die hier gewählte Farbskala befindet sich ebenfalls direkt unter den zugehörigen Abbildungen. Während mit der ersten Farbskala eine starke Differenzierung der einzelnen Knoten ermöglicht wird, wird bei der zweiten ein kontinuierlicher Farbverlauf verwendet. Dieser kontinuierliche Verlauf erschwert zwar die Unterscheidung einzelner Knoten, bietet dem Nutzer dafür aber ein besseres direktes Verständnis. Generell



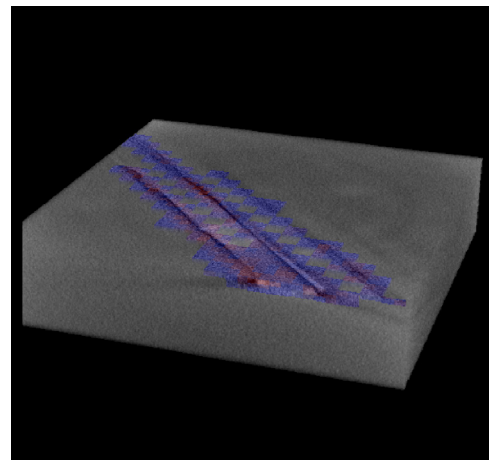
ist die Verwendung verschiedener für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneter Farbschemata möglich.

Ein weiterer Unterschied der Darstellung 4.11(a) zur Darstellung 4.10(b) besteht darin, dass hier die eingefärbten Knoten die Originaldaten schwächer überlagern. Diese Option ist unabhängig vom gewählten Farbverlauf. Relevant für die Überlagerung der Daten in der Visualisierung ist, dass das Analyseergebnis, wie in Abschnitt 4.1.7.2 beschrieben, als zusätzlicher Datensatz zum Originaldatensatz vorliegt. Da somit für die Überlagerung die Vorhaltung von zwei Datensätzen statt einem Datensatz nötig ist, hat diese Darstellungsform bezüglich des Speicherbedarfs einen Nachteil. Ein Vorteil im Gegensatz zum Überschreiben der Originaldaten besteht darin, dass die Informationen des Originals vollständig erhalten bleiben und keine Informationen verloren gehen.

In Abbildung 4.11(b) ist eine perspektivische Ansicht der Darstellung mit kontinuierlichem Farbverlauf zu sehen. Hier wird deutlich, dass es sich bei der implementierten Texturanalyse um ein dreidimensionales Verfahren handelt.



(a) Darstellung der Anzahl geschlossener Seitenflächen mit kontinuierlichem Farbverlauf



(b) Perspektivische Darstellung der Anzahl geschlossener Seitenflächen

Anzahl der geschlossenen Seitenflächen ...



Abbildung 4.11: Darstellungs- und Ansichtsvarianten des Texturanalyseergebnisses zu Originaldatensatz aus Abbildung 4.9(a) anhand Anzahl der geschlossenen Seitenflächen

Unabhängig von der genauen Wahl der Darstellungsvariante zeigt sich, dass 3D Texturunterschiede erkannt und auch für den Nutzer leicht verständlich dargestellt werden können.

In Bezug zur Defekterkennung gilt hier für die strukturierten FVK, dass kleine Bereiche, die einen starken Texturunterschied zu ihrer Umgebung aufweisen, Hinweise auf Defekte sind. Die FVK weisen zwar zu einem großen Teil einheitliche Texturen auf, sind aber in Summe zu heterogen aufgebaut, um jeden Texturunterschied als möglichen Defekt zu interpretieren. An dem dargestellten Beispiel zeigt sich dieses Verhalten insbesondere im Vergleich zwischen Abbildung 4.10(a) und 4.10(b). Nur kleinere Knoten haben hier eine Relevanz für die Defekterkennung. Somit ist es nicht nur eine Frage der Darstellung, größere Knoten mit starken Texturunterschieden zu filtern, sondern auch relevant für eine automatisierte Defekterkennung und eine eventuelle anschließende Größenbestimmung des Defektbereichs. Nach dieser Filterung können die in Abbildung 4.10 und 4.11 dargestellten Skalen, statt als Angabe des Texturunterschieds, als Angabe der Defektwahrscheinlichkeit bzw. Defektstärke in diesem Bereich interpretiert werden. Dies spiegelt sich im betrachteten Beispiel im Analyseergebnis des untersuchten Datensatzes wider. Die unterschiedlich stark ausgeprägten Risse (siehe Abbildung 4.9(a)) werden farblich auch unterschiedlich stark hervorgehoben. Die Stärke der Farbgebung entspricht der Stärke der Ausprägung der Risse (siehe Abbildung 4.10(b) und 4.11(a)). Somit korrespondiert die durch das Analyseverfahren bestimmte Defektstärke mit der tatsächlich vorliegenden Rissstärke.

Generell gilt, dass bei der Defekterkennung die richtige Wahl des zur Texturunterscheidung verwendeten Parameters  $T$  (siehe Abschnitt 4.1.4) ein kritischer Faktor ist. Wird der Wert des Parameters zu hoch gewählt, werden Defekte nicht erkannt. Wird er zu niedrig gewählt, werden Gutbereiche fälschlicherweise als Defekte erkannt.

In Summe handelt es sich bei dem vorgestellten Verfahren zur Defekterkennung um ein Segmentierungsverfahren. Defekte werden als Segmente vom Rest des Volumens getrennt, erkannt und dargestellt. Es wurde somit gezeigt, dass der klassische Einsatz der Texturanalyse als Mittel zur Erkennung von Fehlstellen im Zweidimensionalen sich auch auf den dreidimensionalen Raum übertragen lässt. Im nachfolgenden Abschnitt wird das implementierte Verfahren nicht für die Defekterkennung, sondern für die Erkennung typischer Qualitätseigenschaften der FVK eingesetzt.

## 4.2.2 3D Texturanalyse als Mittel zur Analyse der Faserorientierung in Volumendaten von Faserverbundkunststoffen

Bisher lag der Fokus auf der Erkennung von Unregelmäßigkeiten. In diesem Abschnitt wird stattdessen der Schwerpunkt auf die Erkennung der regelmäßigen Strukturen der FVK gesetzt. Namentlich soll hier betrachtet werden, inwieweit das implementierte 3D Texturanalyseverfahren in der Lage ist, die Faserorientierung innerhalb der gescannten Bauteile zu bestimmen. Die Untersuchung der Faserorientierung ist eine zentrale Aufgabenstellung bei der Bewertung von FVK. Die Einhaltung der angestrebten Faserorientierung ist, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, ein entscheidendes Qualitätsmerkmal.

Da für die einzelnen Fasern keine Start- und Endpunkte festgelegt werden, können zur Beschreibung ihrer Orientierung stets mindestens zwei Vektoren angegeben werden:

$$r^T = (x, y, z) \text{ und } \tilde{r}^T = (-x, -y, -z)$$

Diese Aussage gilt auch, wenn für die Richtungsbeschreibung Einheitsvektoren verwendet werden. Für alle folgenden Ausführungen gilt somit, dass die Aussage, dass die Orientierung einer Faser in Richtung des Vektors  $r^T = (x, y, z)$  geht, identisch ist mit der Aussage, dass die Orientierung in Richtung des Vektors  $\tilde{r}^T = (-x, -y, -z)$  geht. Bezüglich der Orientierungsaussage ist somit die Angabe des Richtungsvektors  $r$  oder  $\tilde{r}$  identisch.

### 4.2.2.1 Korrespondenz zwischen maximaler Ausdehnung und Faserorientierung

Als Ausgangsbasis dient hier die in Abschnitt 4.1.7.3 beschriebene Speicherung der maximalen Ausdehnung. Im Folgenden wird beschrieben, welche Korrespondenz zwischen der maximalen Ausdehnung eines Segments und der Faserorientierung besteht. Als Beispiel dient hier der in Abbildung 4.12(a) und 4.13(a) dargestellte Datensatz (Originaldaten) eines CFK-Würfels.

In Abbildung 4.12 und 4.14 sind jeweils Schnittbilder der gleichen Position innerhalb des Originalvolumendatensatzes bzw. des jeweiligen Analyseergebnisses zu sehen. Die Schnitte verlaufen entlang der XY-Ebene. Dies wird durch die angegebenen Koordinatensysteme

verdeutlicht. Die Z-Achse des Koordinatensystems macht lediglich klar, dass die Schnitte entsprechend dieser Richtung (sowohl in positiver, als auch in negativer) fortgesetzt werden können. In Abbildung 4.13 und 4.15 sind jeweils perspektivische Darstellungen der Originaldaten und der Analyseergebnisse zu sehen. Da es sich bei diesen Darstellungen nicht um Parallel- sondern um Zentralprojektionen handelt, ist die einfache Kenntlichmachung eines Koordinatensystems nicht möglich. Die eingezeichneten Koordinatensysteme dienen hier somit also nur zur groben Orientierung für den Leser.

Die vorliegenden Faserorientierungen sind in den dargestellten Bildern der Originaldaten sichtbar. Die Hauptorientierungen gehen einerseits in  $x$ -Richtung und andererseits in  $z$ -Richtung. Die Fasern mit Orientierung in  $x$ -Richtung sind in Abbildung 4.12(a) im oberen bzw. unteren Bereich des Bilds zu sehen. Die Fasern mit Orientierung in  $z$ -Richtung sind in der vertikalen Bildmitte zu sehen. In der perspektivischen Darstellung (Abbildung 4.13(a)) sind die Fasern mit Orientierung in  $x$ -Richtung rechts und links zu sehen und die Fasern mit Orientierung in  $z$ -Richtung in der horizontalen Bildmitte.

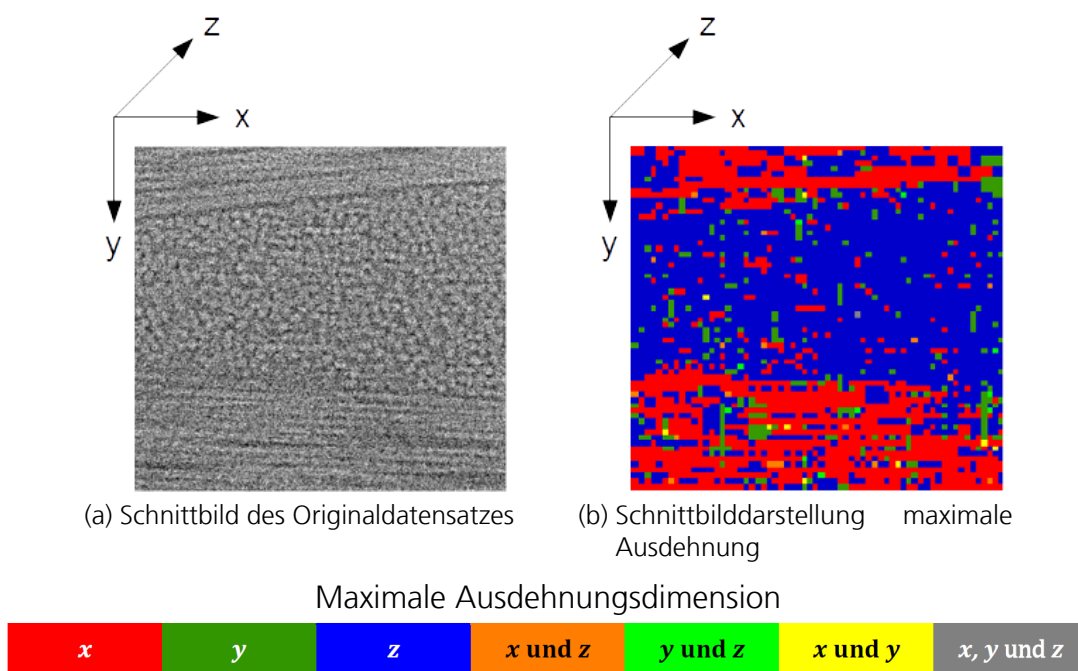


Abbildung 4.12: Schnittbilddarstellung des Originaldatensatzes und des Texturanalyseergebnisses hinsichtlich maximaler Ausdehnung (CT-Datensatz eines CFK mit einer Voxelauflösung von  $0,7 \mu\text{m}$  und einem Volumen von  $0,01 \text{ mm}^3$ , zur Verfügung gestellt von der RayScan Technologies GmbH)

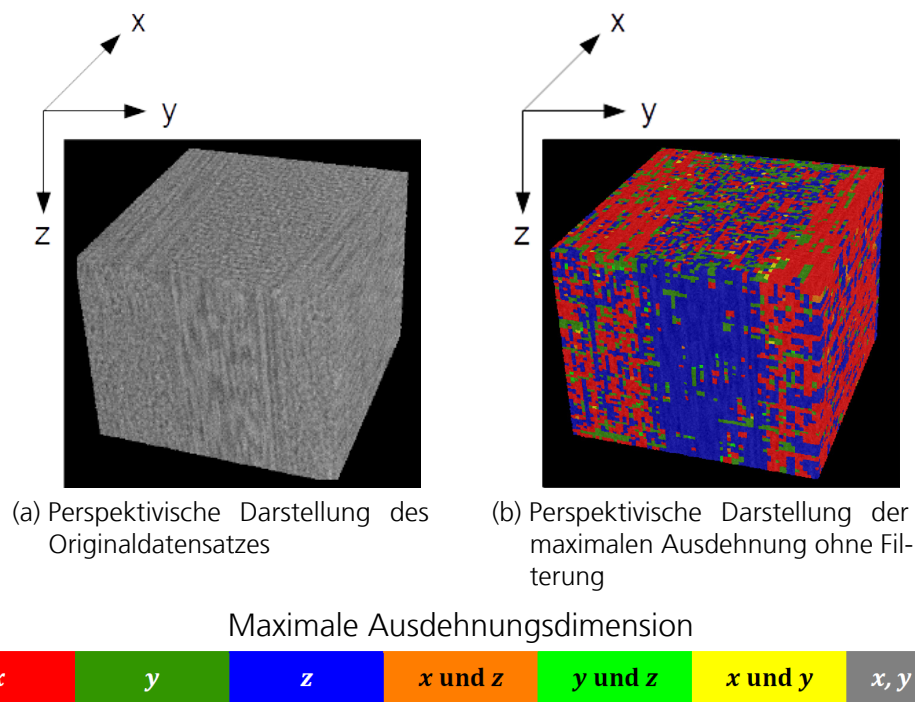


Abbildung 4.13: Perspektivische Darstellung des Originaldatensatzes und des Texturanalyseergebnisses hinsichtlich maximaler Ausdehnung (Beschreibung Originaldatensatz siehe Bildunterschrift von Abbildung 4.12)

Es ist nun möglich das in Abschnitt 4.1 beschriebene 3D Texturanalyseverfahren zur automatischen Erkennung der Faserorientierung zu nutzen. Mit der passenden Speichervariante liegen für jeden Knoten die maximale Ausdehnung des zugehörigen Segments vor. Der Zusammenhang zu den Segmenten wird besonders deutlich, wenn die Knoten entsprechend ihrer maximalen Ausdehnung eingefärbt werden (siehe Abbildung 4.12(b) und 4.13(b)). Dadurch, dass bei der farblichen Darstellungsform die einzelnen Knoten nicht mehr direkt erkennbar sind, verschmelzen benachbarte Knoten mit gleicher maximaler Ausdehnung zu gemeinsamen Bereichen. Diese Bereiche enthalten dann auch die jeweiligen Segmente. Ein optisch einheitlicher Bereich kann somit auch aus mehreren Segmenten bestehen. In diesem Fall haben die Segmente des Bereichs alle die gleiche maximale Ausdehnung. Ein Vergleich des Originalschnittbilds (Abbildung 4.12(a)) und der Darstellung der maximalen Ausdehnung (Abbildung 4.12(b)) zeigt, dass eine Korrespondenz der Fasern in  $x$ -Richtung mit den roten Bereichen und der Fasern in  $z$ -Richtung mit den blauen Bereichen vorliegt. Gleiches gilt beim Vergleich der perspektivischen Ansichten 4.13(a) und 4.13(b). Bei einer maximalen Ausdehnung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, wenn also die Ausdehnungen

in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung quasi identisch sind, wird kein Farbwert, sondern ein Grauwert zur Markierung verwendet. Bei einer maximalen Ausdehnung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung handelt es sich häufig um Knoten, die nicht mit anderen Knoten zusammengefasst wurden. Diese spiegeln häufig nur die bei der Erstellung der Baumstruktur entstehenden Segmente wider, aber nicht eine sich aus der Struktur der Volumendaten ergebende Ausdehnung eines Segments.

Generell lässt sich die Korrespondenz zwischen den maximalen Ausdehnungen der Segmente und der Faserorientierung wie folgt erklären. Entlang der Fasern besteht eine einheitliche Textur. Dies führt dazu, dass während des Split-and-Merge Verfahrens die Grenzflächen entlang der Faserorientierung geöffnet werden. Zwischen den einzelnen Fasern wird die einheitliche Textur unterbrochen, das heißt die Grenzflächen am Rand der Fasern bleiben als geschlossene Seitenflächen erhalten. Ob Grenzflächen geöffnet werden oder erhalten bleiben, wird über den in Abschnitt 4.1.4 eingeführten Parameter  $T$  geregelt. Wird dieser Parameter zu klein gewählt werden die Fasern in ihrem Verlauf unterbrochen. Wird er zu hoch gewählt verschwimmen die Grenzen zwischen den Orientierungen.

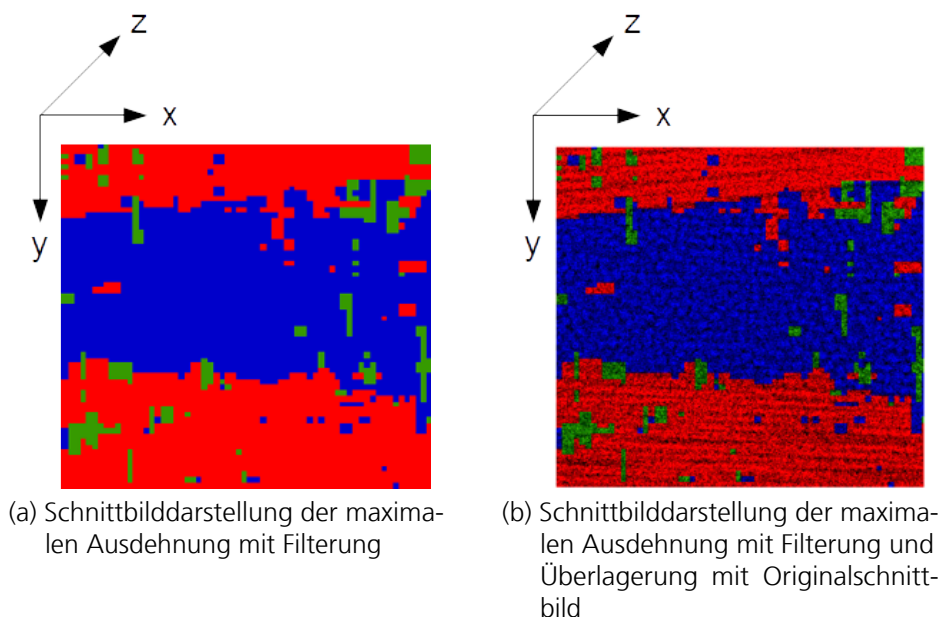
Die entstehenden Segmente bestehen aus zusammenhängenden Knoten (paarweise benachbarte Knoten mit geöffneten Seitenflächen). Die Wahrscheinlichkeit, dass die maximale Ausdehnung der Segmente bei passender Wahl des Parameters  $T$  mit der Richtung der Faserorientierungen korrespondiert, ist dementsprechend sehr hoch.

#### 4.2.2.2 Filterung

Wie in den Abbildungen 4.12(b) und 4.13(b) zu sehen, ist die Übereinstimmung zwischen maximaler Ausdehnung und Orientierung nicht vollständig gegeben. Zur Verbesserung des Ergebnisses wurde eine Filterung für den Ausgleich von Ausreißern implementiert (siehe Abschnitt 4.1.7.4). Hierbei werden Knoten mit einer kleinen (parametrierbar über Schwellwert) maximalen Ausdehnung ihrer Umgebung angepasst. Zur Erinnerung: Die maximale Ausdehnung stellt jeweils einen Absolutwert dar. Erst bei der Umrechnung in einen Orientierungsvektor findet eine Normierung statt. Durch die Filterung findet für kleine Bereiche eine Glättung statt.

Die Motivation hierfür ergibt sich, wie folgt. Die oben beschriebene Öffnung der Grenzflä-

chen entlang der Faserorientierung setzt voraus, dass die Daten in idealer Form vorliegen. Mit idealer Form ist gemeint, dass die Daten hoch aufgelöst sind und keinerlei Störungen beispielsweise in Form von Artefakten aufweisen. Offensichtlich ist dies bei realen CT-Daten nicht der Fall. Durch die Filterung kann diese Schwäche der Daten teilweise ausgeglichen werden. Das entsprechende Ergebnis ist in Abbildung 4.14(a) zu sehen. Ein erneuter Vergleich mit den Originaldaten (Abbildung 4.12(a)) zeigt, dass die Übereinstimmung zwischen der sichtbaren Orientierung und den entsprechend eingefärbten Bereichen im Gegensatz zum ungefilterten Ergebnis (Abbildung 4.12(b)) verbessert werden konnte. Gleiches zeigt sich beim Vergleich der perspektivischen Ansichten (siehe Abbildung 4.13(a), 4.15(a) und 4.15(b)). Bei der Darstellung 4.15(b) ist das Analyseergebnis mit den Originaldaten überlagert worden. Eine ebenfalls überlagerte Schnittdarstellung ist in Abbildung 4.14(b) zu sehen.



Maximale Ausdehnungsdimension

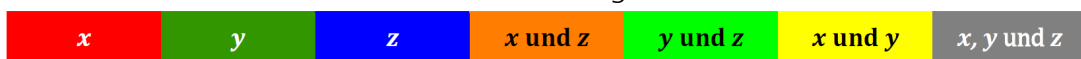
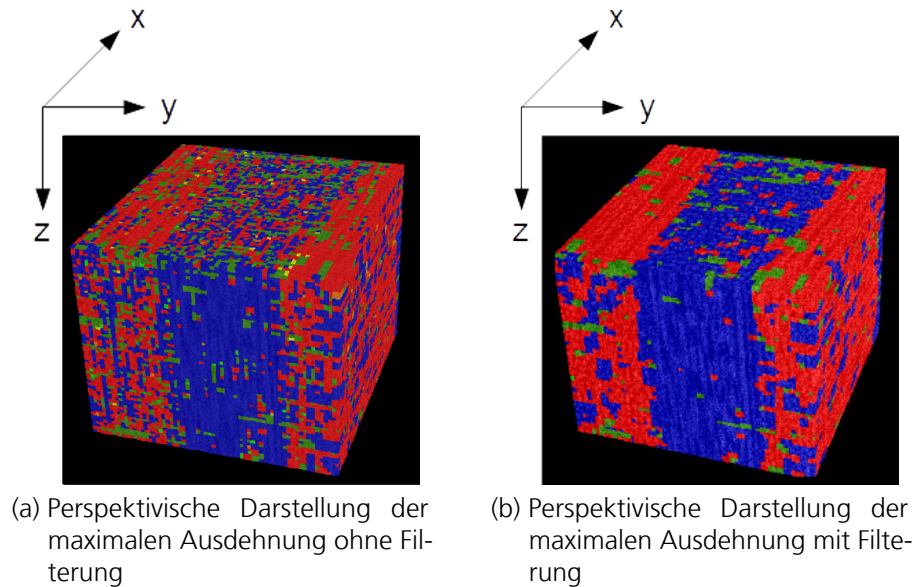


Abbildung 4.14: Originaldatensatz und gefilterte Darstellungsformen des Texturanalyseergebnisses hinsichtlich maximaler Ausdehnung (Beschreibung Originaldatensatz siehe Bildunterschrift von Abbildung 4.12)

Generell besteht bei einer zu starken Filterung die Gefahr eines Informationsverlustes. Im dargestellten Beispiel wurde der Schwellwert passend eingestellt, so dass die Glättung in aus-

reichendem Maße zum Tragen kommt, aber gleichzeitig kein relevanter Informationsverlust entsteht.



Maximale Ausdehnungsdimension



Abbildung 4.15: Perspektivische Darstellung des Originaldatensatzes und des Texturanalyseergebnisses ohne und mit Filterung hinsichtlich maximaler Ausdehnung (Beschreibung Originaldatensatz siehe Bildunterschrift von Abbildung 4.12)

#### 4.2.2.3 Darstellung und deren Interpretation

Bei Bewertung der beiden Darstellungsvarianten (überlagert oder nicht) bietet sich bei der Faserorientierung lediglich die Visualisierung der überlagerten Daten an. Dies steht im Gegensatz zu verschiedenen sinnvollen Darstellungsvarianten bei der Erkennung von Defekten. Für die überlagerte Darstellung müssen sowohl die Originaldaten als auch das gespeicherte Analyseergebnis vorgehalten werden. Die alleinige Vorhaltung des Analyseergebnisses ist nur sinnvoll, falls lediglich die extrahierten Orientierungen gespeichert und kein Vergleich mehr zu den Originaldaten gezogen werden soll.

Wie in diesem Abschnitt ausgeführt, spiegeln sich in den maximalen Ausdehnungen die Orientierungen der Fasern wider. Entsprechend kann die Farbskala in den Abbildungen 4.12, 4.13, 4.14 und 4.15 als Angabe der Faserorientierung interpretiert werden. Die



allgemein möglichen Orientierungen werden in die in der Tabelle 4.1 angegebenen Richtungen diskretisiert. Diese Diskretisierung ist analog zu der Diskretisierung der maximalen Ausdehnungen in Abschnitt 4.1.7.3.

Tabelle 4.1: Zusammenhang maximale Ausdehnung und Orientierungsvektor

Maximale Ausdehnung	Orientierungsvektor	Kurzbezeichnung
$x$	$(1, 0, 0)^T$	$x$
$y$	$(0, 1, 0)^T$	$y$
$z$	$(0, 0, 1)^T$	$z$
$x$ und $z$	$(1, 0, 1)^T$ oder $(1, 0, -1)^T$	$xz$
$y$ und $z$	$(0, 1, 1)^T$ oder $(0, 1, -1)^T$	$yz$
$x$ und $y$	$(1, 1, 0)^T$ oder $(1, -1, 0)^T$	$xy$
$x, y$ und $z$	$(1, 1, 1)^T, (1, -1, 1)^T, (-1, -1, 1)^T$ oder $(1, -1, -1)^T$	$xyz$

Zu beachten ist, dass, wie bereits zuvor erwähnt, nicht zwischen den beiden Richtungsvektoren  $r^T = (x, y, z)$  und  $\tilde{r}^T = (-x, -y, -z)$  unterschieden wird. Mit jedem in der Tabelle angegebenen Richtungsvektor  $r^T = (x, y, z)$  ist also automatisch auch der Richtungsvektor  $\tilde{r}^T = (-x, -y, -z)$  gemeint. Wenn man die Faser als zylindrisches Objekt betrachtet und den Richtungsvektor als Orientierungsvektor der Zylinderachse, ist klar, dass hier eine Unterscheidung zwischen den beiden Vektoren keinen Sinn ergibt und beide Angaben analog sind.

Einen Spezialfall stellt die maximale Ausdehnung eines Segments in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung dar. Hier hat das Segment in alle Achsrichtungen die gleiche Ausdehnung. In diesem Fall kann dies einerseits tatsächlich ein Indiz auf die in der entsprechenden Zeile der Tabelle 4.1 angegebenen Orientierungen der Fasern sein oder aber lediglich die Aufteilung des Volumendatensatzes bei Erstellung der Baumstruktur widerspiegeln. Somit kann hier kein verlässlicher Rückschluss auf die Faserorientierung gezogen werden.

Die in der Tabelle angegebenen Kurzbezeichnungen dienen der einfachen Benennung in den nachfolgenden Kapiteln.

#### 4.2.2.4 Anmerkung

Generell ist anzumerken, dass die in diesem Abschnitt beschriebene Verwendung der Texturanalyse zur Erkennung der Faserorientierung kein typischer Anwendungsfall für

die Texturanalyse ist. Standardmäßig wurde, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, bisher die Texturanalyse meist für das Erkennen von Strukturabweichungen, beispielsweise in Form von Defekten, aber selten für die Erfassung und Beschreibung der vorhandenen (Gut-)Strukturen eingesetzt. Mit der vorliegenden Arbeit wird somit der Einsatzbereich der Texturanalyse erweitert.

# 5 Einordnung und Bewertung des entwickelten Verfahrens

Im vorhergehenden Kapitel wurde beschrieben, dass das entwickelte 3D Texturanalyseverfahren sowohl zur Defekterkennung als auch zur Analyse der Faserorientierung eingesetzt werden kann. Die Unterschiede liegen lediglich in der Parametrierung und der Visualisierung. Insbesondere die Verwendung zur Erkennung der Faserorientierung stellt im Vergleich zum Stand der Technik ein neues Einsatzgebiet der 3D Texturanalyse dar.

In diesem Kapitel werden anhand von konkreten Anwendungsbeispielen die Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Verfahrens sowohl bezüglich der Defekterkennung, als auch bezüglich der Analyse der Faserorientierung beleuchtet.

## 5.1 Einsatzmöglichkeiten der 3D Texturanalyse

Zunächst wird der Fokus auf die grundsätzlichen Möglichkeiten der entwickelten 3D Texturanalyse gelegt. In Summe handelt es sich um ein Segmentierungsverfahren. Einerseits werden Defekte und Gutbereiche, andererseits Fasern mit unterschiedlichen Orientierungen voneinander segmentiert.

Bezüglich der Defekterkennung eignet sich das Verfahren aufgrund der Segmentierungseigenschaften insbesondere für folgende, der in Abschnitt 2.1.5 genannten, typischen Defekte von FVK: Delamination, Faserbruch, Risse (siehe Abbildung 4.9, 4.10 und 4.11) und Trockenstellen.

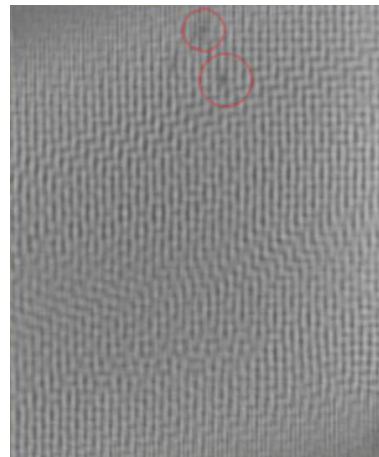
Weiterhin lassen sich auch Einschlüsse erkennen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5.1 zu sehen. In Abbildung 5.1(a) ist das Foto einer GFK-Platte mit von Hand markierten größeren Einschlüssen dargestellt. In Abbildung 5.1(b) folgt ein Schnittbild durch den zugehörigen CT-Datensatz. Hier sind die Einschlüsse bei genauer Betrachtung zu erahnen. Zur besseren Sichtbarkeit wurden sie hier manuell mit roten Kreisen markiert. Die dritte Abbildung 5.1(c) zeigt einen Schnitt durch das Analyseergebnis. Es wird deutlich, dass die beiden Einschlüs-

se automatisiert erkannt wurden. Die entsprechende perspektivische Darstellung ist in Abbildung 5.1(d) zu sehen. Für die Visualisierung wurde die Darstellung der Anzahl der geschlossenen Grenzflächen mit kontinuierlicher Farbskala gewählt (siehe Abschnitt 4.2.1.2). Dadurch, dass die Einschlüsse bei dem Testteil bereits mit bloßem Auge bei aufmerksamer Betrachtung erkennbar sind, wird ein direkter Vergleich zwischen den CT-Daten und dem Analyseergebnis ermöglicht. Dieses positive Ergebnis lässt sich auch auf undurchsichtige CFK-Bauteile übertragen. Für das entwickelte 3D Texturanalyseverfahren spielt hinsichtlich der Defekterkennung der Unterschied zwischen GFK und CFK nur eine untergeordnete Rolle. Aus den Ergebnissen der Defekterkennung können anschließend die Positionen und die Orientierung von Fehlstellen abgeleitet werden.

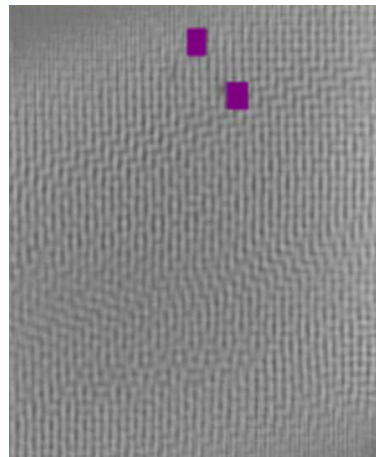
Für den ebenfalls in Abschnitt 2.1.5 genannten typischen Fehler der Faserverschiebung ist die implementierte Defektanalyse nicht sonderlich geeignet. Hier bietet sich die Faserorientierungsanalysevariante der 3D Texturanalyse an. Generell stellt die Faserorientierung, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Neben der Bestimmung der eigentlichen Orientierung können die Ergebnisse der Analyse außerdem genutzt werden, Faserschichten (mit unterschiedlichen Orientierungen) voneinander zu trennen (siehe Abbildung 4.12, 4.13, 4.14 und 4.15). Diese getrennten Schichten, mit jeweils zugehöriger Hauptorientierung der enthaltenen Fasern, können wiederum als Eingangsdaten für mechanische Simulationen oder Schichtdickenbestimmungen verwendet werden.



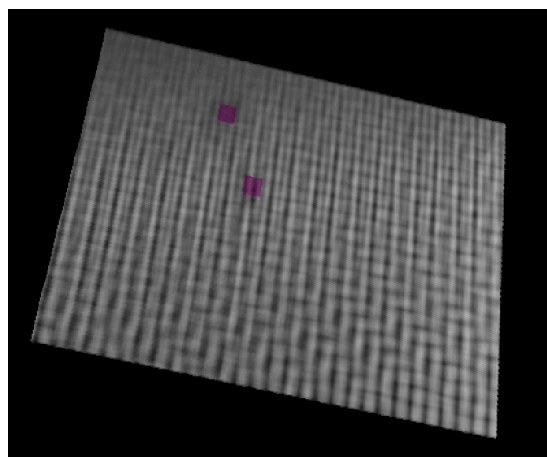
(a) Foto von GFK-Platte mit sichtbaren Einschlüssen



(b) Schnittbild durch CT-Datensatz mit Einschlüssen manuell markiert



(c) Schnittbild mit automatisch erkannten und markierten Einschlüssen



(d) Perspektivische Darstellung der erkannten Einschlüsse

Abbildung 5.1: Automatische Erkennung von Einschlüssen innerhalb eines CT-Datensatzes (Voxelauflösung  $84\ \mu\text{m}$ ) einer GFK-Platte (gefertigt von Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer)

## 5.2 Grenzen und Einschränkungen

Grenzen in der Defekterkennung liegen in den grundsätzlichen Eigenschaften der Texturanalyse. Wenn viele ähnliche Defekte gleichmäßig über das Bauteil verteilt sind, können sie Teil der zugrunde liegenden Struktur werden. In diesem Fall können diese Fehler nicht mehr von den Gutbereichen getrennt werden. Ein typisches Beispiel für ein solches Defektbild ist die Porosität. Gleichmäßig über das Bauteil verteilte Poren in ähnlicher Größenordnung können aus Sicht des Algorithmus zum Teil der Struktur werden. Statt der 3D Texturanalyse sollten hier spezialisierte Verfahren, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, eingesetzt werden. Eine andere Beschränkung ergibt sich, wenn im Untersuchungsbereich die Größe der Defekte die der Gutbereiche übersteigt. In diesem Fall ist es für den Algorithmus nicht möglich eine zugrunde liegende Struktur zu finden. Die These, dass sich Fehler durch Texturabweichungen kleinerer Bereiche von der Grundstruktur erkennen lassen, ist hier nicht erfüllt. Aber auch wenn von der Situation ausgegangen wird, dass die Defektbereiche in der Minderheit sind, kann es zur falschen Erkennung vermeintlicher Defekte kommen. Jede Änderung der Grundstruktur kann potentiell von der 3D Texturanalyse wahrgenommen werden. Hierzu können beispielsweise Artefakte der CT-Rekonstruktion gehören. Ein typisches Beispiel hierfür sind Ringartefakte (siehe Abschnitt 2.2.6). Aufgrund der komplexen Geometrien und Aufbauten von FVK gibt es aber auch ohne Artefakte zahlreiche Texturunterschiede, die keine Defekte, sondern lediglich Übergänge zwischen verschiedenen Bereichen darstellen. Ein Beispiel hierfür sind Übergänge zwischen einem Bauteil und der umgebenden Luft im Bereich der Bauteilränder. Hier kommt es stets zu einer Texturänderung, welche auch algorithmisch erkannt wird (siehe Abbildung 5.2). In den meisten Fällen wird hier lediglich der defektfreie Texturübergang im Randbereich wahrgenommen. Die in Abschnitt 4.2.1.2 beschriebene Filterung großer Segmente stellt in vielen Fällen eine Verbesserung dar, da gerade am Bauteilrand oft größere Texturbereiche auftreten. Dies stellt aber keine umfassende Lösung für diese Problematik dar. Ein möglicher Ansatz wäre beispielsweise, Randbereiche gesondert zu behandeln. Sie könnten von der Analyse ausgeschlossen werden. Hierbei besteht aber die Gefahr tatsächliche Defekte im Randbereich zu ignorieren.

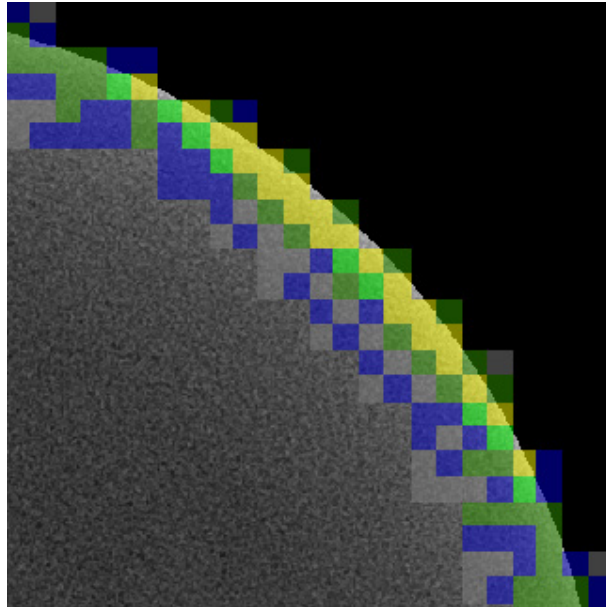


Abbildung 5.2: Erkannter Texturunterschied im Randbereich (Originaldaten zur Verfügung gestellt von RayScan Technologies GmbH)

Bezüglich der Faserorientierung besteht die Einschränkung in erster Linie in der Auflösung des zu analysierenden Volumendatensatzes. Die Durchmesser der Verstärkungsfasern betragen bei Glasfasern typischerweise 9 bis 24  $\mu\text{m}$  und bei Kohlenstofffasern 5 bis 15  $\mu\text{m}$  (siehe Abschnitt 2.1.1). Für die Erfassung einzelner Fasern werden in der Praxis entsprechend Voxelauflösungen im Bereich zwischen 0,5 und 2,4  $\mu\text{m}$  benötigt. Diese Erfahrungswerte entsprechen auch der goldenen Regel der Messtechnik (Keferstein et al. 2018). Bei einer geringeren Auflösung verschwimmen die Grenzen zwischen den Fasern. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass das entwickelte Faserorientierungsanalyseverfahren nicht einzelne Fasern untersucht, sondern die zugrunde liegende Struktur. Dadurch bestehen auch bei einer geringeren Voxelauflösung Chancen sinnvolle Ergebnisse zu erhalten. Dies ist aber abhängig davon, ob die Orientierungen der einzelnen Fasern sich in größeren Strukturen (wie beispielsweise Rovings) widerspiegeln (siehe hierzu auch Abschnitt 5.3).

Bei beiden Varianten (Defekterkennung und Faserorientierungsanalyse) stellt sich die Parametrierung als Herausforderung dar. Momentan ist ein ausreichendes Verständnis des zugrunde liegenden Algorithmus notwendig, um effizient den passenden Parametersatz zu setzen.

### 5.3 Vergleich mit Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird das entwickelte 3D Texturanalyseverfahren mit dem Stand der Technik verglichen. Bekannte Verfahren für die Analyse von CT-Daten und insbesondere von FVK wurden in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Die genannte Porositätsanalyse (siehe Abschnitt 2.3.1) hat, wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, eine andere Ausrichtung. Die Texturanalyse ist grundsätzlich nicht für gleichmäßig verteilte Defekte ausgelegt. Somit kann das implementierte Verfahren nicht als Ersatz für Porositätsanalysealgorithmen dienen. Gleichzeitig sind diese Analyseverfahren speziell auf einen Defekttyp zugeschnitten und nicht darauf ausgerichtet, typische Fehler wie Faserbrüche, Risse, Einschlüsse, Delaminationen oder Trockenstellen zu erkennen. Hierfür ist das 3D Texturanalyseverfahren deutlich besser geeignet.

Generell sind die im Stand der Technik beschriebenen Auswerteverfahren für verschiedene Defektausprägungen ungeeignet die Faserorientierung zu bestimmen. Dies stellt auch einen entscheidenden Unterschied zur 3D Texturanalyse dar. Viele Algorithmen sind auf eine spezifische Aufgabe zugeschnitten, wie beispielsweise das Erkennen von Defekten oder die Analyse der Faserorientierung. Das hier entwickelte Verfahren ist so allgemein auf die Erfassung von Strukturen ausgelegt, dass sowohl Defekte erkannt, als auch die Orientierungen der Fasern analysiert werden können.

Da die Faserorientierung ein entscheidendes Qualitätsmerkmal darstellt, wurden im Stand der Technik mehrere Verfahren speziell für deren Analyse vorgestellt (siehe Abschnitt 2.3.2). Sie lassen sich entweder dadurch charakterisieren, dass sie auf die Betrachtung der einzelnen Fasern setzen oder vergleichsweise rechenintensiv sind.

Das Herausarbeiten der einzelnen Fasern setzt eine entsprechend hohe Voxelauflösung voraus. Die Erreichung dieser ist aufgrund von Beschränkungen der CT-Systeme nicht oder nur mit einem teilweise nicht zu vertretenden Aufwand zu erreichen (siehe Abschnitt 2.2.6). Die 3D Texturanalyse hingegen setzt auf die sich durch den Faserverlauf ergebenden Strukturen und nicht auf die Erkennung der einzelnen Faser. Dadurch ist das Verfahren auch bei nicht hoch aufgelösten CT-Datensätzen, bei denen die einzelnen Fasern nicht zu erkennen sind, sich aber aufgrund des Faserverlaufs eine in den CT-Daten sichtbare Struktur abzeichnet, anwendbar. Dieser Fall kann beispielsweise eintreten, wenn die Auflösung ausreichend ist



Rovings, aber nicht die einzelnen Fasern sichtbar zu machen. Außerdem ist das Verfahren durch das Herausarbeiten der Struktur auch robuster gegenüber gleichmäßigem Rauschen. Solange dadurch nicht die Faserstruktur oder Defekte überdeckt werden, wird es durch die 3D Texturanalyse lediglich als Teil der zugrunde liegenden Struktur betrachtet.

Weiterhin wird bei dem implementierten Verfahren zur Bestimmung der Faserorientierung auf die teilweise im Stand der Technik eingesetzte aufwendige Berechnung von Eigenwerten und Eigenvektoren verzichtet. Die Orientierungen ergeben sich stattdessen direkt aus der texturbasierten Segmentierung.

Die ebenfalls auf die Analyse der Struktur statt der einzelnen Faser abzielende Anwendung von Anisotropen Gaußfiltern (siehe Abschnitt 2.3.2), setzt eine Diskretisierung voraus, die sich negativ auf die Berechnungszeit auswirkt. Eine solche Diskretisierung ist bei dem Einsatz der 3D Texturanalyse zur Bestimmung der Faserorientierung nicht notwendig, da hier Segmente bestimmt werden und sich die Orientierung aus der Ausdehnung der Segmente ergibt (siehe Abschnitt 4.1.7.3). Dadurch ist die Berechnung kontinuierlicher Werte für die Orientierungsvektoren möglich. Lediglich für die Visualisierung wurden die Orientierungen diskretisiert. Dies hat allerdings keinen negativen Einfluss auf die Laufzeit.

Im Unterschied zu vielen klassisch eingesetzten Texturanalyseverfahren (siehe Abschnitt 2.4.3) ist für den Einsatz der implementierten 3D Texturanalyse kein Einlernen von Gutturen notwendig. Es werden somit keine Trainingsdaten benötigt. Dies ist relevant, da die CT nach wie vor meist zur Stichprobenprüfung eingesetzt wird. Hieraus ergibt sich ein sehr variables Bauteilspektrum. Das umgesetzte Verfahren ist in der Lage, ohne Vorabinformation bei passender Schwellwertwahl sinnvolle Ergebnisse zu erzeugen.

In Summe stellt die 3D Texturanalyse eine für viele typische Fragestellungen bei der Untersuchung von FVK geeignete Ergänzung des Stands der Technik dar.

## 5.4 Untersuchung der Leistungsfähigkeit

In diesem Abschnitt soll die Leistungsfähigkeit des implementierten Verfahrens untersucht werden. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf die Fähigkeit zur Unterscheidung verschiedener Faserorientierungen, die Lokalisierung und Größenbestimmung von Defekten sowie

die Laufzeit gelegt. Weiterhin soll untersucht werden bis zu welcher Voxelauflösung eine Analyse möglich ist.

#### 5.4.1 Bestimmung der Faserorientierungen

Hier werden zwei Aspekte betrachtet:

1. Unter der Voraussetzung, dass die Voxelauflösung ausreichend für die Analyse der Orientierung ist, können welche Orientierungen in welcher Qualität unterschieden werden?
2. Wie gut muss das Volumen aufgelöst werden? Das heißt, bis zu welcher Voxelgröße kann die Faserorientierung bestimmt werden?

##### 5.4.1.1 Unterscheidung der Orientierung

Für die Untersuchung wird ein CT-Datensatz eines FVK mit einer größtenteils einheitlicher Faserorientierung genutzt. Die Materialprobe wurde mit freundlicher Unterstützung von Herrn Prof. Andrzej Bledzki und M. Sc. Eng. Piotr Fanciszczak (West Pomeranian University of Technology Szczecin) zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Fasern haben einen Durchmesser von 12 bis 21  $\mu\text{m}$  und eine Länge von 14 bis 2093  $\mu\text{m}$ . Der durchschnittliche Durchmesser beträgt 17  $\mu\text{m}$  und die durchschnittliche Länge 1185  $\mu\text{m}$ .

Zur Validierung wird der Datensatz mehrfach durch Rotationen unterschiedlich virtuell transformiert, um künstlich die Hauptorientierung der Fasern zu ändern. Diese neuen Orientierungen werden im Weiteren als Sollorientierungen bezeichnet. Bei den Transformationen ist das Koordinatensystem stets fixiert und wird nicht transformiert. Alle Transformationsangaben beziehen sich somit auf ein fixes Koordinatensystem. Aus Sicht der 3D Texturanalyse handelt es sich durch die veränderte Orientierung in Bezug auf das Koordinatensystem stets um neue Datensätze. Der Algorithmus kann somit nicht auf Wissen aus der vorhergehenden Analyse zurückgreifen. So soll getestet werden, inwieweit der Algorithmus in der Lage ist, die in diesem Fall aus der Transformation bekannte Sollorientierung selbstständig zu erkennen. Es werden, unter Verwendung der Kurzbezeichnungen aus Tabelle 4.1, folgende Sollorientierungen erzeugt:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $xz$ ,  $yz$  und  $xy$ . Auch im weiteren Verlauf werden diese

Kurzbezeichnung verwendet. Die Orientierung  $xyz$  ist als Testfall ungeeignet, da hier keine zuverlässige Unterscheidung zwischen erkannter Faserorientierung und Erkennung der Aufteilung des Volumens innerhalb der Baumstruktur vorgenommen werden kann (siehe Abschnitt 4.2.2).

Bei der Analyse der Faserorientierung werden Volumenbereiche entsprechend ihrer maximalen Ausdehnung eingeteilt und damit einer Orientierung zugeordnet. Die Zuordnung der Segmente zu einer bestimmten Orientierung kann auch auf jedes Voxel des Segments bezogen werden. Somit kann statistisch erfasst werden, welcher Prozentsatz des Volumens welcher Orientierung zugeordnet wurde. Hierbei wird für die Interpretation des Analyseergebnisses die gleiche Diskretisierung der Orientierung wie in Abschnitt 4.2.2 verwendet. Dies sind namentlich:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $xz$ ,  $yz$ ,  $xy$  und  $xyz$ . Die Ergebnisse für die durchgeführten Tests sind in Tabelle 5.1 bezüglich der jeweiligen Sollorientierung aufgelistet.

Tabelle 5.1: Analyzierte Orientierung nach Transformation

Sollorientierung	Anteile auf Basis des Analyseergebnisses [%]						
	$x$	$y$	$z$	$xz$	$yz$	$xy$	$xyz$
$x$	<b>66,11</b>	1,64	5,54	15,09	2,29	8,53	0,79
$y$	1,45	<b>66,19</b>	5,45	2,29	15,58	8,30	0,75
$z$	1,39	1,53	<b>78,27</b>	7,73	8,57	1,86	0,64
$xz$	19,24	3,11	7,44	<b>37,27</b>	14,70	14,48	3,75
$yz$	7,22	13,04	7,84	10,63	<b>44,71</b>	12,90	3,65
$xy$	12,35	13,13	2,39	12,20	18,48	<b>37,46</b>	4,00

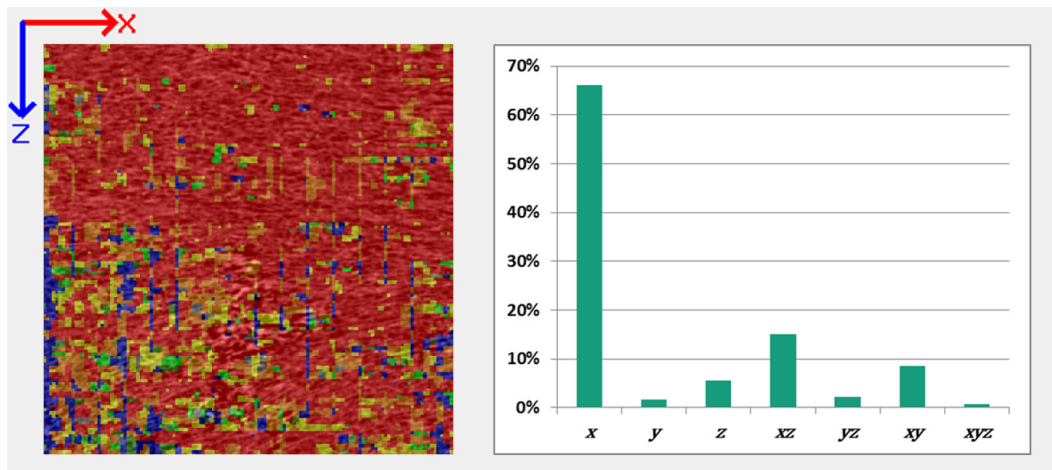
In Abbildung 5.3 und 5.4 sind repräsentative Schnittbilder des 3D Analyseergebnisses sowie das jeweils zugehörige Histogramm der erkannten Orientierungen für das Gesamtvolumen dargestellt. Die Segmente wurden entsprechend dem gleichen Farbschema, wie in Abschnitt 4.2.2, markiert. Durch die Überlagerung mit den Grauwerten der Voxel treten die Farben hierbei nicht in Reinform auf.

Im untransformierten Zustand zeigt der verwendete Datensatz eine klare Hauptorientierung der Fasern in  $z$ -Richtung. Dies entspricht auch der bei der Herstellung der Probe angestrebten Faserorientierung. Die Einhaltung dieser lässt sich wiederum durch menschliche Sichtung und Bewertung der aufgenommenen CT-Daten bestätigen. Auch die automatisierte Faserorientierungsanalyse erkennt die Orientierung mehrheitlich korrekt (siehe Abbildung 5.3(c)). 78,27 % des Volumens werden der  $z$ -Richtung zugeordnet (siehe Tabelle 5.1). Die zweit- und dritthäufigste Zuordnung ist hier  $yz$  mit 8,57 % und  $xz$  mit 7,73 %. Somit

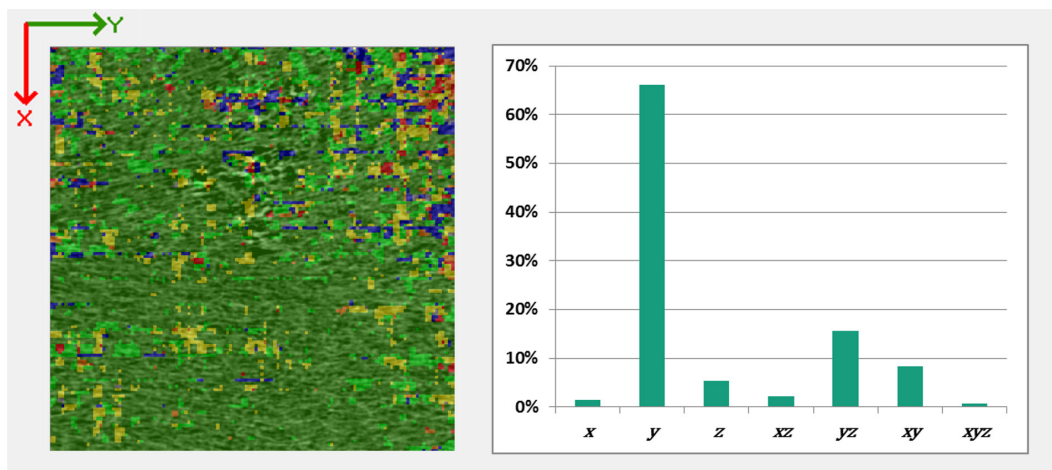
werden 94,57 % des Volumens durch den Algorithmus eindeutig bzw. zumindest anteilig der  $z$ -Richtung zugeordnet.

Um eine Hauptorientierung in  $x$ -Richtung zu erzeugen, wird das Volumen des Originaldatensatzes  $90^\circ$  um die  $Y$ -Achse rotiert. Bei Betrachtung des passenden  $XZ$ -Schnittbilds durch den Volumendatensatz ist die entsprechend transformierte Ansicht der Abbildung 5.3(c) zu sehen. Da nun aber eine andere Hauptorientierung vorliegt, werden die Fasern im Analyseergebnis in diesem Fall hauptsächlich rot markiert (siehe Abbildung 5.3(a)). Hier ergeben sich die höchsten Zuordnungswerte in den Richtungen  $x$  (66,11 %),  $xz$  (15,09 %) und  $xy$  (8,53 %). Somit werden auch hier knapp 90 % des Volumens vollständig oder zumindest anteilig der  $x$ -Richtung zugeordnet. Der Algorithmus hat somit die durch die Transformation neu entstandene Hauptorientierung mehrheitlich korrekt erkannt.

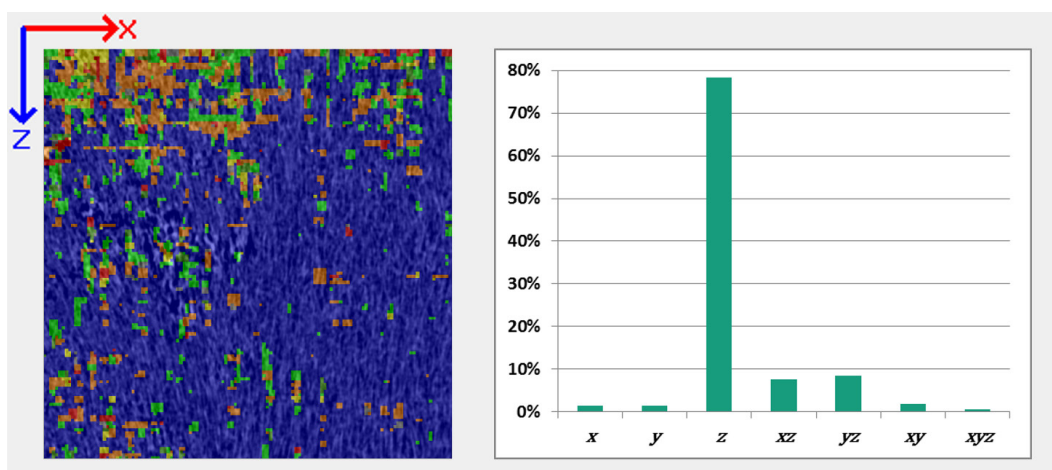
Für die Betrachtung der Orientierung in Richtung der noch fehlenden Hauptachse  $Y$  des Koordinatensystems, wird der Originaldatensatz  $-90^\circ$  um die  $X$ -Achse rotiert. Die zugehörige Markierungsfarbe ist entsprechend der Skala dunkelgrün. Die mehrheitlich korrekte Erkennung ist in Abbildung 5.3(b) zu sehen. Die Betrachtung der Zuordnungswerte ergibt hier ein ähnliches Bild wie bei den Hauptachsen  $X$  und  $Z$ . Über 90 % des Volumens werden direkt (66,19 %) bzw. indirekt ( $yz$  15,58 %,  $xy$  8,30 %)  $y$  zugeordnet.



(a) Nach Rotation des Originaldatensatzes um  $90^\circ$  um die Y-Achse



(b) Nach Rotation des Originaldatensatzes um  $-90^\circ$  um die X-Achse



(c) Untransformierter Datensatz

Orientierung in Richtung ...

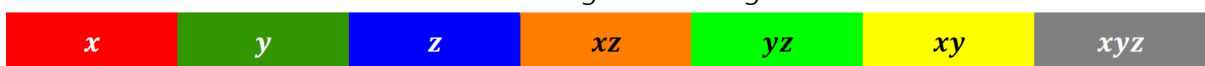


Abbildung 5.3: Ergebnisse der Faserorientierungsanalyse nach verschiedenen Transformationen des Originaldatensatzes (Probengröße  $8,3 \text{ mm}^3$ , Voxelauflösung  $2,57 \mu\text{m}$ )

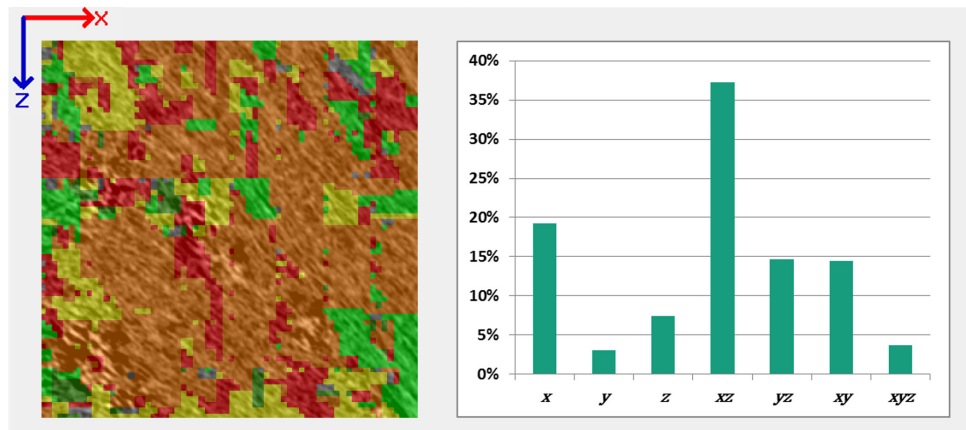
Auch für die Tests der Erkennung der Orientierung in Richtung der Winkelhalbierenden des Koordinatensystems  $xz$ ,  $yz$  und  $xy$  werden Transformationen, die den Bildunterschriften entnommen werden können (siehe Abbildung 5.4), durchgeführt.

Bei diesen Sollorientierungen sind die Ergebnisse nicht so eindeutig wie bei Ausrichtung entlang der Hauptachsen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ . Eine Erklärung dieses Verhaltens wird in Abschnitt 6.2.1 gegeben. Im gleichen Abschnitt werden Verbesserungsoptionen und auch Methoden zum Umgang mit Orientierungen, die nicht entlang der Hauptachsen verlaufen, beschrieben.

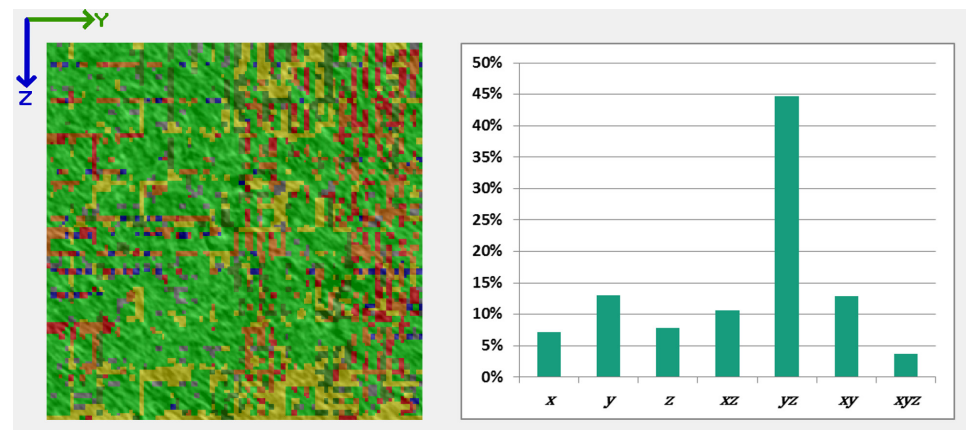
Dennoch geben die jeweiligen Maximalwerte der Auswertungen mit 37,27 %, 44,71 % und 37,46 % die korrekte Hauptorientierung in Richtung  $xz$ ,  $yz$  bzw.  $xy$  an. Wenn man die Anteile in Richtung der Hauptachsen ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ) betrachtet zeigt sich, dass jeweils die nicht relevante Orientierung in der Minderheit ist. Beispielsweise ist für die Sollorientierung  $xz$ , im Vergleich der Anteile der  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, der  $y$ -Anteil am geringsten. Für Aussagen bezüglich einer Gesamtorientierung in Richtung der jeweiligen Winkelhalbierenden ist es sinnvoll auch die jeweiligen Komponenten der Hauptachsen mit einzubeziehen. Konkret bedeutet das beispielsweise für den Volumenanteil der Winkelhalbierenden  $xz$  zusätzlich den  $x$ - und  $z$ -Anteil zu berücksichtigen. In Summe ergibt sich hier ein Wert von 63,95 %. Bei analoger Vorgehensweise für die Winkelhalbierenden  $yz$  und  $xz$  ergeben sich ebenfalls jeweils Werte über 60 %.

Auch wenn die 3D Texturanalyse für Ausrichtungen in Richtung der Winkelhalbierenden die Orientierungen nicht so eindeutig bestimmt wie im Fall der Ausrichtung in Richtung der Koordinatenachsen, kann der korrekte Sollwert aus dem Analyseergebnis abgeleitet werden.

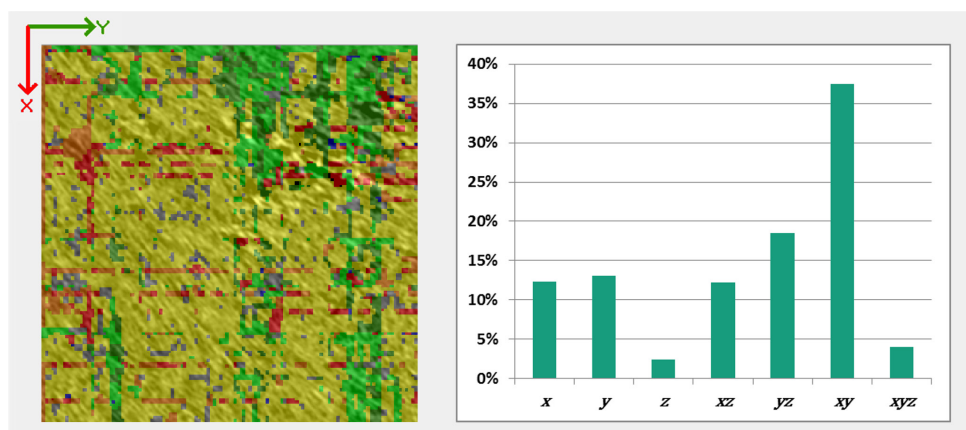
Insgesamt wurde gezeigt, dass der entwickelte Algorithmus bei ausreichender Auflösung (in diesem Fall 2,57  $\mu\text{m}$ ) die dominierende Faserorientierung eindeutig erkennt. Dadurch wurde die Fähigkeit des Algorithmus zwischen den für die Tests diskretisierten Orientierung zu differenzieren demonstriert.



(a) Hauptorientierung in Richtung  $xz$  nach Rotation des Originaldatensatzes um  $45^\circ$  um die Y-Achse



(b) Hauptorientierung in Richtung  $yz$  nach Rotation des Originaldatensatzes um  $-45^\circ$  um die X-Achse



(c) Hauptorientierung in Richtung  $xy$  nach Rotation des Originaldatensatzes um  $-90^\circ$  um die X-Achse und anschließende Rotation um  $-45^\circ$  um die Z-Achse

Orientierung in Richtung ...

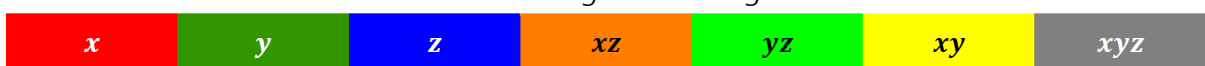
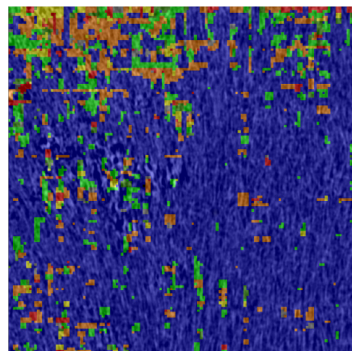
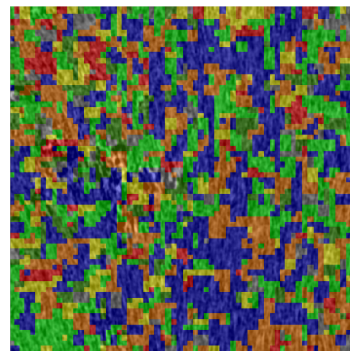


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Faserorientierungsanalyse nach verschiedenen Transformationen des Originaldatensatzes (Probengröße  $2,9 \text{ mm}^3$ , Voxelauflösung  $2,57 \mu\text{m}$ )

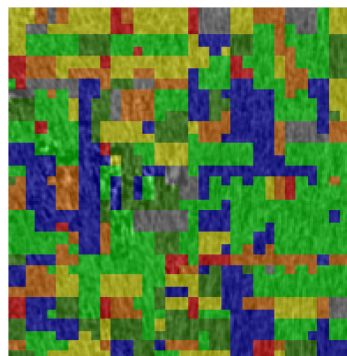
### 5.4.1.2 Voxelauflösung der Volumendaten



(a) Analyisierte Faserorientierung bei Voxelauflösung 2,57  $\mu\text{m}$



(b) Analyisierte Faserorientierung bei Voxelauflösung 4,52  $\mu\text{m}$



(c) Analyisierte Faserorientierung bei Voxelauflösung 10,28  $\mu\text{m}$

Orientierung in Richtung ...

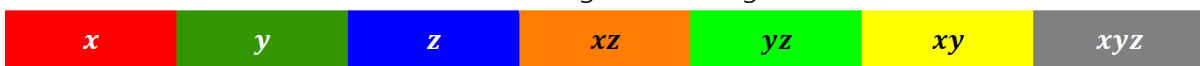


Abbildung 5.5: Zusammenhang Voxelauflösung und Bestimmung der Faserorientierung

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, welche Faserorientierungen unterschieden werden können, soll hier untersucht werden, bis zu welcher Voxelauflösung die Faserorientierungen noch bestimmt werden können. Es wird weiterhin der gleiche Basisdatensatz verwendet. Die Voxelauflösung wird nun künstlich durch Skalierung des Datensatzes von ursprünglich 2,57  $\mu\text{m}$  sukzessive bis auf 10,28  $\mu\text{m}$  reduziert. Dies ist ein praktikables Vorgehen, um CT-Aufnahmen mit verschiedenen Auflösungen zu simulieren. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in der Regel die durch die Skalierung erzeugten Datensätze eine bessere Datenqualität aufweisen als Datensätze, die direkt mit einer geringeren Auflösung aufgenommen wurden.

Wie in Abbildung 5.5 und Tabelle 5.2 zu sehen, wird die Erkennung der vorliegenden



Faserorientierung in  $z$ -Richtung mit zunehmend höheren Werten der Voxelauflösung sukzessive schlechter. Die in der Abbildung ausgewählten Bilder sind repräsentative Beispiele für relevante Veränderungen der Güte der Erkennung. Wie auch in Tabelle 5.1 wird in Tabelle 5.2 die Zuordnung der prozentualen Volumenanteile zu den diskretisierten Orientierungen angegeben. Die Kurzbezeichnungen ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $xz$ ,  $yz$ ,  $xy$  und  $xyz$ ) werden auch hier entsprechend Tabelle 4.1 verwendet. Während beim Übergang von  $2,57\ \mu\text{m}$  (siehe Abbildung 5.5(a)) zu  $3,16\ \mu\text{m}$  die Erkennung stabil bleibt, zeigt sich bei einer Auflösung von  $4,52\ \mu\text{m}$  (siehe Graph in Abbildung 5.6) ein rapider Abfall. Trotz dieses Abfalls stellt der prozentuale  $z$ -Wert zunächst noch den Maximalwert der diskretisierten Orientierungen dar (siehe Tabelle 5.2). Dies spiegelt sich auch in Abbildung 5.5(b) wider. Ab einer Voxelauflösung von  $10,28\ \mu\text{m}$  (siehe Abbildung 5.5(c)) wird der  $z$ -Anteil vom  $yz$ -Anteil als Maximalwert überschritten.

Tabelle 5.2: Analytierte Orientierungen in Abhängigkeit der Voxelauflösung

Voxelauflösung [ $\mu\text{m}$ ]	Anteile auf Basis des Analyseergebnisses [%]							
	$x$	$y$	$z$	$xz$	$yz$	$xy$	$xyz$	
2,57	1,39	1,53	<b>78,27</b>	7,73	8,57	1,86	0,64	
3,16	1,25	1,39	<b>79,80</b>	7,16	8,12	7,16	0,60	
4,52	6,32	6,14	<b>30,68</b>	21,63	21,32	8,77	5,14	
5,14	6,26	6,66	<b>30,31</b>	22,28	21,77	8,89	3,83	
9,04	6,95	8,25	<b>24,43</b>	21,61	22,58	12,34	3,85	
10,28	6,58	9,53	<b>23,32</b>	20,43	24,70	12,21	3,24	

Der rapide Abfall lässt sich mit dem Verhältnis zwischen Voxelauflösung und Faserdurchmesser (Auflösungsfaktor) erklären. Wie zu Beginn des Abschnitts 5.4.1.1 erwähnt, beträgt der Faserdurchmesser  $f_d$  beim betrachteten Datensatz 12 bis  $21\ \mu\text{m}$ . Bei einer Voxelauflösung  $v_a$  von  $3,16\ \mu\text{m}$ , beträgt das Verhältnis ( $\frac{f_d}{v_a}$ ) zum Faserdurchmesser 3,8 bis 6,6. Wie im Graph in Abbildung 5.6 zu erkennen, ist hiermit eine ausreichende Erkennungsrate erreichbar (im Graph wird stets das Verhältnis in Bezug zum gemittelten Faserdurchmesser  $16,5\ \mu\text{m}$  angegeben). Bei einer Voxelauflösung von  $4,52\ \mu\text{m}$  sinkt das Verhältnis auf einen Wert zwischen 2,7 und 4,6. Dies hat eine massive Auswirkung auf die Erkennungsrate. Für die 3D Texturanalyse ist ab diesem Verhältnis die durch den Faserverlauf erzeugte Struktur nicht mehr ausreichend aufgelöst, um akzeptable Erkennungsraten sicherzustellen. Dies deckt sich mit Erfahrungswerten aus anderen Bereichen der Bildverarbeitung, bei denen ein Auflösungsfaktor von 5 bis 10 für Messaufgaben erforderlich ist. Diese Faktoren

entsprechen auch wiederum der goldenen Regel der Messtechnik (Keferstein et al. 2018). Für den gemittelten Faserdurchmesser  $16,5 \mu\text{m}$  und einen Auflösungsfaktor von 5 ergibt sich eine Voxelauflösung von  $3,3$ . Diese Grenze ist im Graph in Abbildung 5.6 durch eine vertikale Linie kenntlich gemacht.

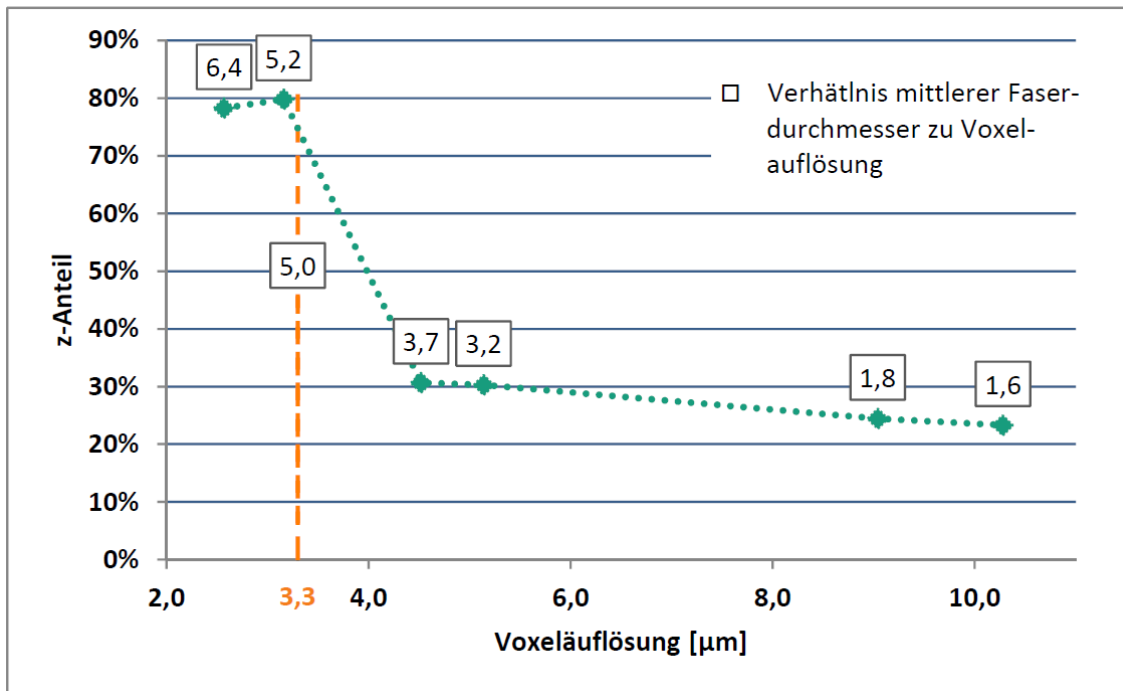


Abbildung 5.6: Zusammenhang zwischen Voxelauflösung und Erkennung der Faserorientierung in  $z$ -Richtung

#### 5.4.2 Lokalisation und Größenbestimmung von Defekten

Es wurde bereits gezeigt, dass das implementierte Verfahren in der Lage ist, reale Defekte zu erkennen. Nun soll untersucht werden, inwieweit im Allgemeinen Position und Größe von Defekten bestimmbar sind. Da die Analysefähigkeit der Orientierung bereits im vorhergehenden Abschnitt betrachtet wurde, wird sie hier nicht erneut speziell für Fehlstellen untersucht.

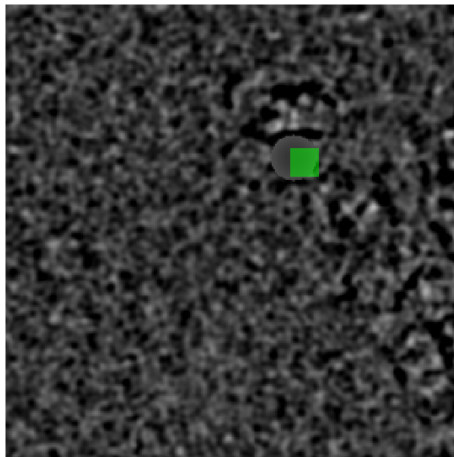
Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, liefert die Computertomographie die detaillierteste Information der zerstörungsfreien Prüfmethode. Deshalb ist die Bewertung anhand einer Referenztechnologie nicht praktikabel. Auch durch die komplexen Herstellungsverfahren der FVK (siehe Abschnitt 2.1.4) ist das gezielte Einbringen von Fehlern an vorgegebenen Positionen mit einer definierten Größe während der Produktion kaum praktikabel möglich.

Aus diesen Gründen werden zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit des implementierten Algorithmus künstliche Defekte an freigewählten Positionen und mit vorgegebener Größe in einen realen und zunächst defektfreien Datensatz eingebracht. Die Defekte werden somit im zu untersuchenden Datensatz simuliert. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Sollwerte zur Beurteilung des Algorithmus klar definiert sind. Da bereits gezeigt wurde, dass reale Defekte erkannt werden können, stellen die hier erzielten Ergebnisse Referenzwerte dar, die auch auf tatsächliche CT-Daten von FVK anwendbar sind. Als Basis wird auch hier der im vorhergehenden Abschnitt 5.4.1 verwendete, zunächst defektfreie, Datensatz genutzt. Es werden nun gezielt kugelförmige Defekte eingebracht. Die Koordinaten  $x_s$ ,  $y_s$  und  $z_s$  der Mittelpunkte dieser Defekte sind in der Tabelle 5.3 als Sollpositionen angegeben. Die Angaben beziehen sich auf das Koordinatensystem des Volumendatensatzes. Die Defektgröße ist bei den durchgeführten Versuchen stets identisch und hat einen Durchmesser  $D$  von  $77,1 \mu\text{m}$  (dies entspricht hier der Summe der Kantenlängen von 30 Voxeln) und einen Sollvolumen  $V_s$  von  $24 \cdot 10^4 \mu\text{m}^3$ .

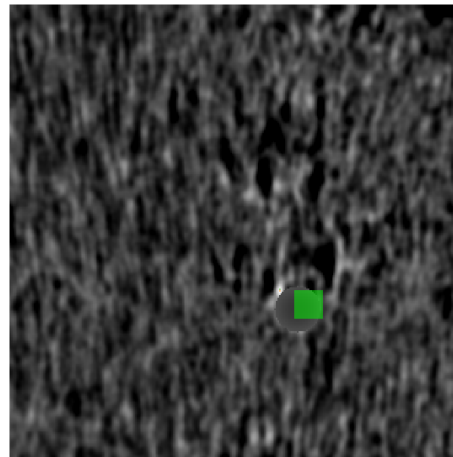
Tabelle 5.3: Defektposition und Größe

Nr.	Sollposition			Analyseergebnis						
	$x_s$	$y_s$	$z_s$	Position			$V_a$ [ $10^4 \mu\text{m}^3$ ]	$\Delta d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta V$ [ $10^4 \mu\text{m}^3$ ]	$\Delta V/V_s$ [%]
1	100	100	100	103	103	103	15,9	13,4	8,1	33,7
2	90	100	100	84	103	103	13,2	18,9	10,9	45,5
3	100	190	100	103	197	103	14,3	21,0	9,7	40,6
4	210	100	100	215,5	103	103	11,0	17,9	13,0	54,0
5	200	210	100	197	215,5	103	13,6	17,9	10,4	43,2
6	150	150	150	145	154,5	145	8,6	21,5	15,4	64,3
7	100	100	190	117,5	108	183	33,7	52,6	9,7	40,6
8	190	100	200	197	103	197	15,8	21,0	8,2	34,2
9	100	200	210	103	197	215,5	16,8	17,9	7,2	29,9
10	210	200	200	215,5	197	197	16,5	17,9	7,5	31,1

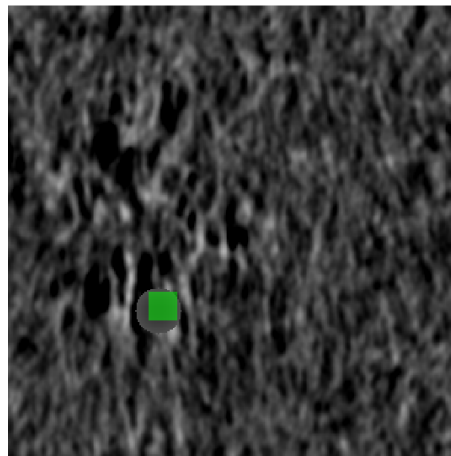
Für den Grauwertverlauf des Defekts wird der mittlere Grauwert  $g_m$  und die Standardabweichung  $\sigma$  des Originaldatensatzes verwendet. Als minimaler Grauwert des Defekts wird  $g_m$  und als maximaler  $g_m + \sigma$  gewählt. Dadurch ergibt sich ein Defektbild, welches sich in die Umgebung einpasst und nicht über einfache Schwellwertsetzung separierbar ist. Ein Beispiel verschiedener Ansichten für einen in dieser Form eingebrachten, automatisch detektierten und markierten Fehler ist in Abbildung 5.7 dargestellt.



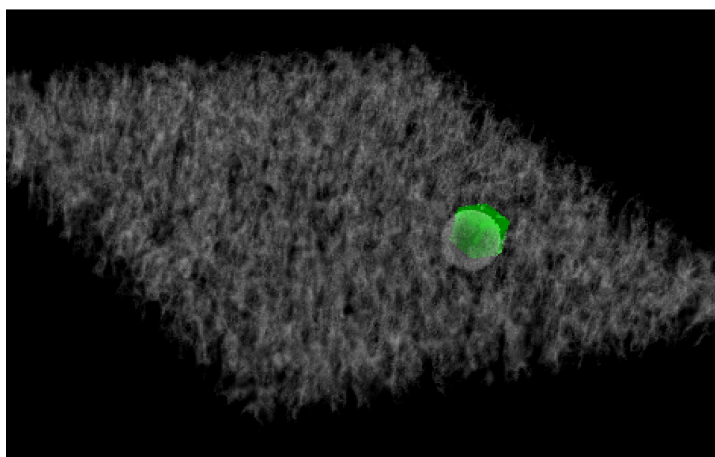
(a) XY-Ansicht



(b) XZ-Ansicht



(c) YZ-Ansicht



(d) Perspektivische Ansicht

Abbildung 5.7: Markierter Defekt aus verschiedenen Ansichten (Probengröße  $0,46 \text{ mm}^3$ , Voxelauflösung  $2,57 \text{ }\mu\text{m}$ )

Es soll nun untersucht werden, inwieweit die 3D Texturanalyse in der Lage ist, die Position und das Volumen der eingebrachten Defekte zu erkennen. Die Ergebnisse, bestehend aus bestimmter Position und bestimmtem Volumen, sind ebenfalls in Tabelle 5.3 gelistet. Die erkannte Position wird anhand des geometrischen Schwerpunkts  $(x_a, y_a, z_a)$  des erkannten Defekts angegeben. Das Volumen  $V_a$  des Fehlers setzt sich aus der Summe der Volumina mit gleicher Gruppen-ID zusammen. Die aus dem Gruppierungsschritt (siehe Abschnitt 4.1.5) stammenden IDs drücken aus, dass es sich um zusammenhängende Bereiche handelt. Der Differenzbetrag des Sollvolumens zum gemessenen wird mit  $\Delta V = |V_s - V_a|$  bezeichnet. In der Tabelle wird außerdem der relative Fehler  $\Delta V/V_s$  in Prozent aufgelistet. Zusätzlich wird der Abstand  $\Delta d = \|p_s - p_a\|$  zwischen der Sollposition  $p_s = (x_s, y_s, z_s)^T$  und der sich aus der Analyse ergebenden Position  $p_a = (x_a, y_a, z_a)^T$  angegeben.

Es zeigt sich, dass die Bestimmung der Defektposition eine gute Genauigkeit und Stabilität aufweist. Der Fehler bewegt sich im Bereich von 13,4 bis 52,6  $\mu\text{m}$ , wobei der Wert 52,6  $\mu\text{m}$  einen Ausreißer darstellt. Beim Großteil der Defekte übersteigt der maximale Fehler nicht den Wert von 21,5  $\mu\text{m}$ . Im Verhältnis zum Defektdurchmesser  $D = 77,1 \mu\text{m}$  sind dies hinsichtlich der Prüfung der Bauteilqualität akzeptable Werte. Auch ermöglichen die berechneten Volumenwerte die Bestimmung der Größenordnung des Sollvolumens, zeigen aber im Vergleich zur Positionsbestimmung eine höhere Instabilität.

Der Vergleich der verschiedenen Werte zeigt weiterhin das Auftreten systematischer Fehler. Die Defekte mit den Nummern 4, 5, 9 und 10 haben alle einen einheitlich Positionsfehler  $\Delta d$  von 17,9  $\mu\text{m}$ . Ursache hierfür ist der Zerlegungsgrad im Split-Schritt des Verfahrens (siehe Minimum der Dimensionen in Abschnitt 4.1.2). Dieser sollte nicht zu groß gewählt werden, damit noch die 3D Textur sinnvoll bestimmt werden kann, hat aber gleichzeitig einen starken Einfluss auf die Auflösungsfähigkeit der Defekterkennung. Hier sind Verbesserungen der Genauigkeit auf Kosten der Stabilität möglich.

**Anmerkung:** Bei der Defekterkennung ist die eigentliche Voxelauflösung des Datensatzes nicht in dem Maße entscheidend, wie im Fall der Faserorientierungsanalyse (siehe Abschnitt 5.4.1.2). Stattdessen ist die Auflösung des Defektes selbst entscheidend. Die Anzahl der Voxel aus denen der Defekt besteht, sollte nicht kleiner sein als die notwendige Voxelanzahl zur Bestimmung der vorliegenden defektfreien Textur.

### 5.4.3 Laufzeitanalyse

Neben der grundsätzlichen Fähigkeit Defekte oder Faserorientierungen zu bestimmen, ist auch die Laufzeit des Algorithmus entscheidend für die Anwendbarkeit und den Einsatzbereich der implementierten Software. In diesem Abschnitt wird diese untersucht. Alle Tests der Laufzeit wurden auf Laptops mit einer maximalen Leistung eines Intel Core i7 2,8 GHz Prozessors mit 16 GB Arbeitsspeicher und SSD Festplatte durchgeführt. Eine vollständige Untersuchung besteht aus Einlesen, der eigentlichen Analyse und Speicherung der Daten. Die betrachtete Laufzeit inkludiert deshalb immer das komplette Lesen der Eingangsdaten von der Festplatte und Schreiben des Analyseergebnisses auf die selbige.

#### 5.4.3.1 Laufzeit Faserorientierung

In Tabelle 5.4 sind die Laufzeiten für verschiedene Voxelauflösungen des bereits im Abschnitt 5.4.1 hinsichtlich der Faserorientierung untersuchten Datensatzes aufgelistet.

Tabelle 5.4: Laufzeit bei Faserorientierungsanalyse

Voxelauflösung [ $\mu\text{m}$ ]	10,28	9,04	5,14	4,52	3,16	2,57
Dateigröße $D$ [MB]	8	11	61	90	262	489
Laufzeit [min]	0,70	0,78	5,80	6,23	78,88	106,80

Die Probengröße  $P$  ist hier für alle Auflösungen identisch und beträgt  $2,9 \text{ mm}^3$ . Die unterschiedlichen Voxelauflösungen bedingen aber unterschiedliche Dateigrößen. Die Dateigröße  $D$  ist direkt proportional zur Anzahl  $n$  der Voxel des Volumens. Wenn  $v$  die Voxelauflösung des Volumens ist, gilt  $n = \frac{P}{v^3}$  und somit  $D \sim \frac{P}{v^3}$ . Bei identischer Analysemethode (hier Untersuchung der Faserorientierung) stellt die Dateigröße den eigentlichen Einflussfaktor auf die Laufzeit dar. Die Voxelauflösung beeinflusst nur im Zusammenhang mit der Probengröße die Laufzeit. Dementsprechend ist sie im Graph in Abbildung 5.8 in Abhängigkeit der Dateigröße und nicht der Voxelauflösung (in Form von grünen Rautenpunkten) dargestellt. In Abschnitt 5.4.1 wurde dargelegt, dass beim Übergang der Voxelauflösung von  $2,57 \mu\text{m}$  auf  $3,16 \mu\text{m}$  hinsichtlich des Analyseergebnis kein Qualitätsunterschied zu verzeichnen ist. Hingegen ergibt sich bei der Laufzeit eine merkliche Verbesserung von  $106,80 \text{ min}$  auf  $78,88 \text{ min}$ . Dies zeigt, dass auch mit einer leichten Reduzierung der Voxelauflösung

eine gute Ergebnisqualität erreicht und dadurch gleichzeitig die Laufzeit relevant reduziert werden kann.

### 5.4.3.2 Laufzeit Defekterkennung

Neben der Laufzeit für die Faserorientierungsanalyse wurde auch die Laufzeit der Defekterkennung untersucht. Hierfür wurde einer der in Abschnitt 5.4.2 verwendeten Datensätze skaliert. Dessen Probengröße beträgt  $0,46 \text{ mm}^3$ . Die metrische Größe ist lediglich ein Umrechnungsfaktor, der für die Untersuchung der Laufzeit aber keine wesentliche Rolle spielt. Entscheidend ist die Anzahl der Voxel, die sich wiederum in der Dateigröße widerspiegelt. Durch die Skalierung wurden neue, größere Dateien erzeugt. Auch wenn sich die Kantenlänge der Voxel hierdurch ändert, wird die tatsächliche Auflösung (also der Detailgrad der Daten) nicht verbessert und bleibt somit beim Ausgangswert von  $2,57 \mu\text{m}$ . Für die Analyse wurde der Zerlegungsgrad des Datensatzes beibehalten, das heißt der Schwellwert für das Minimum der Dimensionen entsprechend an die jeweils neue Dateigröße angepasst. Dies hat keinen Einfluss auf die Qualität der Erkennung, da der Defekt ebenfalls skaliert wird und somit auch mitwächst. Die erzielten und in Tabelle 5.5 aufgelisteten Zeiten zeigen, dass hier, ganz im Gegensatz zu den Laufzeiten bei der Faserorientierungsanalyse, kein massiver Anstieg in Abhängigkeit der Dateigröße zu verzeichnen ist.

Tabelle 5.5: Laufzeit bei Defekterkennung

Dateigröße [MB]	27	64	216	343	422	512
Laufzeit [min]	1,07	4,72	10,28	12,85	9,13	11,22

Auch der entsprechende Graph in Abbildung 5.8 zeigt durch blaue Quadrate als Datenpunkte, dass die Laufzeit zwar zunächst ansteigt, anschließend (ab 216 MB) aber nahezu konstant bleibt. Dass die Laufzeit teilweise sogar trotz steigender Dateigröße leicht absinkt, hat stochastische Ursachen, welche sich aus der Zerlegung der Datensätze ergeben. Diese marginalen Rückgänge sind somit nicht repräsentativ und können vernachlässigt werden.

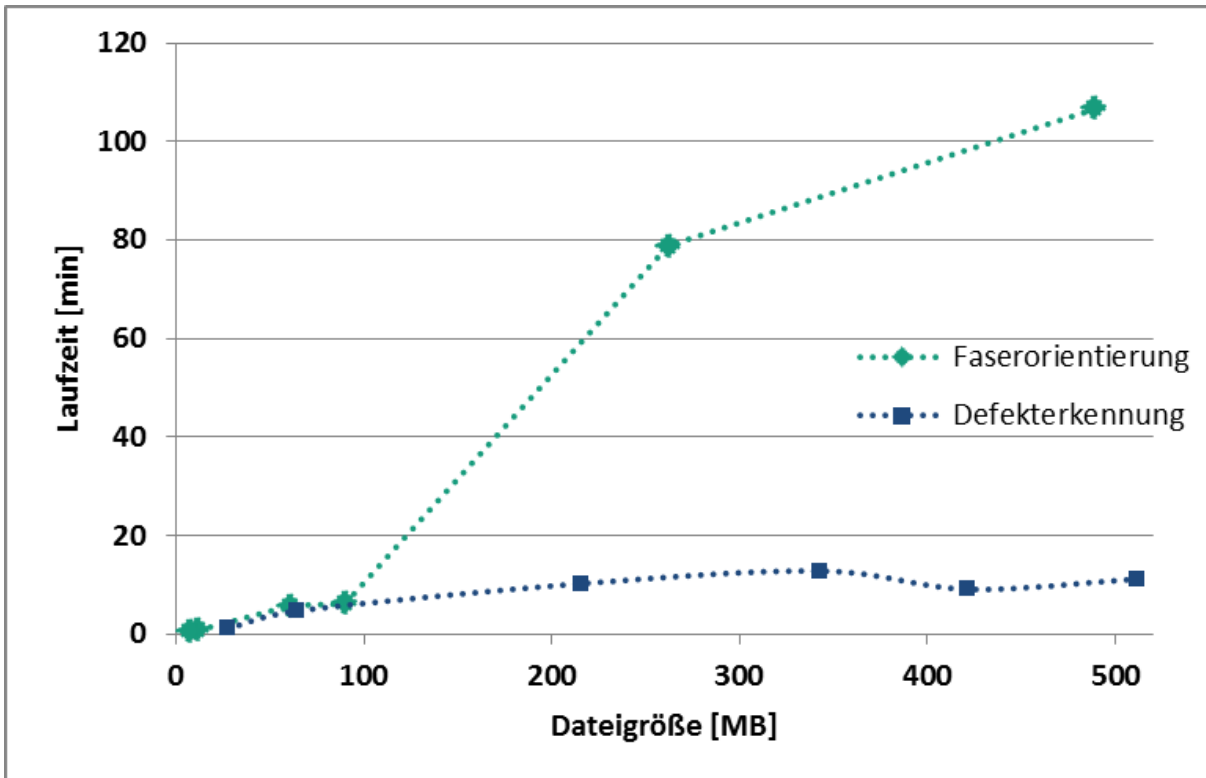


Abbildung 5.8: Laufzeit in Vergleich zu Dateigröße

### 5.4.3.3 Vergleich Laufzeit Faserorientierung und Defekterkennung

Wenn der Verlauf der Laufzeit bei der Faserorientierung mit dem Verlauf der Laufzeit bei der Defekterkennung (siehe Abbildung 5.8) verglichen wird, zeigt sich, dass die Analyse-dauer nicht ausschließlich von der Dateigröße beeinflusst wird und insbesondere nicht zwangsläufig entsprechend ansteigt. Sehr entscheidend ist der Detailgrad der Untersuchung, der wiederum massiv vom gewählten Zerlegungsgrad des Datensatzes beeinflusst wird. Während der Zerlegungsgrad bei der Defekterkennung durch die relevante Defektgröße bestimmt wird, ergibt er sich bei der Analyse der Faserorientierung aus der Größe der sich durch die Orientierung ergebenden Struktur.

Bei den hier betrachteten Defekterkennungen kann der Zerlegungsgrad konstant gehalten werden. Dies ist möglich, da in der betrachteten Datenreihe der Defekt in gleichem Maße skaliert wird wie der Datensatz selbst. Entsprechend bleibt auch die Laufzeit quasi konstant. Bei dem betrachteten repräsentativen Beispiel der Faserorientierungsanalyse stellt sich dies anders dar. Da der Algorithmus in der Lage sein muss, die sich aus dem Verlauf der Fasern ergebende Struktur aufzulösen, wurde der Zerlegungsgrad soweit wie nötig erhöht.



Außerdem gilt, dass je kleiner die Datei ist, desto weniger stark darf der Datensatz zerlegt werden, damit noch eine Texturbestimmung möglich ist. Deshalb steigt in den betrachteten Beispielen der Zerlegungsgrad mit der Dateigröße an. Dies stellt den eigentlichen Einfluss auf die Laufzeit dar. Eine pragmatische Möglichkeit auch bei der Faserorientierung die Laufzeit niedrig zu halten, ist die Wahl eines repräsentativen oder besonders relevanten Ausschnitts des Datensatzes. Dies kann manuell durch den Einsatz handelsüblicher CT-Software mithilfe einer geeigneten Visualisierung umgesetzt werden.

Ein zusätzlicher Einfluss auf die Laufzeit ist die Anzahl der zu schreibenden Voxel. Bei der Defekterkennung wird lediglich der entsprechende Defektbereich in die Ergebnisdatei zur Speicherung und Visualisierung der Analyse (siehe Abschnitt 4.2.1) geschrieben. Bei der Faserorientierungsanalyse hingegen wird stets ein komplett neuer Datensatz geschrieben, da für jedes Voxel die entsprechende Orientierungsinformation abgespeichert werden muss (siehe Abschnitt 4.2.2).

#### 5.4.3.4 Fazit und Anmerkungen

Wie im Vorhergehenden gezeigt wird die Laufzeit somit nicht nur von der Dateigröße beeinflusst. Entscheidend ist auch der Detailgrad der Untersuchung. Dieser ergibt sich einerseits daraus, wie fein Texturen unterschieden werden und andererseits aus dem Zerlegungsgrad im Split-Schritt des Verfahrens. Der Zerlegungsgrad ergibt sich aus dem frei wählbaren Schwellwert für das Minimum der Dimensionen bei der Erstellung der Baumstruktur (siehe Abschnitt 4.1.2). Eine Verringerung dieses Schwellwerts und eine damit einhergehende Erhöhung des Zerlegungsgrads führt beim gleichen Datensatz zu einer Erhöhung der Laufzeit. Die Feinheit der Texturunterscheidung wird über den in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Schwellwert  $T$  für die Festlegung der Ähnlichkeit von Texturen bestimmt. Je kleiner dieser Wert gewählt wird, desto weniger zuvor zerlegte Segmente werden in den Schritten „Zusammenfassen der Volumenteile“ und „Gruppierung“ vereinigt. Dies hat sowohl hinsichtlich der nachfolgenden Auswertungsschritte („Eliminierung kleiner Volumina“ und eventuellen zusätzlichen Filterungen) als auch der Speicherung einen negativen Einfluss auf die Laufzeit.

Insgesamt haben die Größen Zerlegungsgrad und Feinheit der Texturunterscheidung beide

einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer der Speicherung. Wird die Datei im Split-Schritt stark zerlegt und die Textur fein unterschieden, entstehen in den meisten Fällen auch viele zu schreibende Segmente. Deren Speicherung auf die Festplatte beansprucht entsprechend Zeit. Dies führt dazu, dass die Laufzeit bei ungünstiger Parametrierung schnell beträchtlich steigen kann ohne dabei ein verwertbares Ergebnis zu erreichen.

Die Wahl des Zerlegungsgrads und des Parameters  $T$  ist abhängig davon, welche Struktur hinsichtlich ihrer Textur aufgelöst werden soll. Hier ist bei der Defekterkennung die Defektgröße und bei der Faserorientierungsanalyse die Größe der sich aus dem Faserverlauf ergebenden Struktur relevant. Bezüglich des Zerlegungsgrads spielt bei der Defektuntersuchung somit die Defektgröße im Vergleich zum Gesamtvolumen eine Rolle, während bei der Analyse der Faserorientierung das Verhältnis von Faserdurchmesser zum Gesamtvolumen relevant ist. Die Größenordnung des Parameters  $T$  ist wiederum abhängig davon wie stark die Texturunterschiede der Defekte zur Umgebung sind bzw. wie stark der Texturunterschied zwischen Fasern oder Faserbündeln ist.

Auch die Wahl der Speichervariante kann einen entscheidenden Einfluss auf die Laufzeit haben. Beispielsweise kann im Fall der Speicherung der Anzahl geschlossener Grenzflächen (siehe Abschnitt 4.2.1.2) gewählt werden, dass nicht jede Anzahl, sondern nur ab einem bestimmten Minimum geschlossener Grenzflächen die Anzahl gespeichert wird. Durch den Zusammenhang zur Textur werden in diesem Fall nur Bereiche markiert, die einen besonders starken Texturunterschied aufweisen. Bei Erhöhung des Minimums der geschlossenen Grenzfläche kann es zu einer deutlichen Reduzierung der Laufzeit kommen.

Generell ist anzumerken, dass bei dem implementierten Verfahren der Fokus auf die Funktionalität gelegt wurde. Eine Optimierung der Laufzeit war nicht Teil der gesteckten Zielsetzung. Dementsprechend ist von einem hohen Optimierungspotential auszugehen.

Ansätze zur Verbesserung der Laufzeit ohne Änderung des Algorithmus bestehen in der Analyse von skalierten Datensätzen oder relevanter bzw. repräsentativer Ausschnitte:

- Dass auch durch Skalierung in ihrer Größe reduzierte Datensätze weiterhin ausreichend Information für die Analyse aufweisen können, wurde bereits in Abschnitt 5.4.1.2 gezeigt.

- Mit relevanten Ausschnitten ist gemeint, dass das Volumen vor der Analyse auf besonders kritische Bereiche zugeschnitten wird und dadurch ebenfalls die Größe der zu untersuchenden Datei reduziert wird. Diese kritischen Bereiche können beispielsweise Areale eines Bauteils sein, welche besonders stark mechanischen Belastungen unterliegen.
- Falls beispielsweise bei einem Datensatz von einer homogenen aber unbekanntem Faserorientierung ausgegangen werden kann, bietet es sich an die Faserorientierungsanalyse lediglich für einen repräsentativen Ausschnitt der Volumendaten durchzuführen.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

## 6.1 Zusammenfassung

In der Einleitung in Kapitel 1 wurde zunächst die Relevanz von FVK dargelegt. Diese sind insbesondere in ihren Ausprägungen CFK und GFK wichtige Materialien u. a. für die Automobil- und Luftfahrtindustrie, was nach wie vor zu einem starken Wachstum bei FVK führt. Außerdem wurde die Entwicklung neuer, möglichst umfassender Prüf- und Evaluierungsmethoden motiviert und daraus die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet.

In Kapitel 2 wurde auf die für den entwickelten Algorithmus notwendigen Grundlagen von FVK eingegangen. Sie zeichnen sich durch eine besondere mechanische Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht aus. Dadurch werden sie vielfach im Mobilitätssektor eingesetzt und somit oft in sicherheitskritischen Bereichen. Die Herstellungsverfahren sind nach wie vor komplex und stark von manuellen Arbeitsschritten geprägt. Dies führt zu einem großen Fehlerspektrum, auf welches im Einzelnen in Abschnitt 2.1.5 eingegangen wurde. Der Einsatz in sicherheitskritischen Bereichen und die fehleranfälligen Herstellungsverfahren erfordern zerstörungsfreie Prüfmethoden. Hierfür wurden in Abschnitt 2.2 verschiedene Prüfverfahren betrachtet. Der Vergleich der Verfahren hat ergeben, dass die Computertomographie die umfassendste Prüfmethode darstellt. Mit ihr können Fehler unabhängig von ihrer Tiefe erkannt werden. Sie ist für alle FVK geeignet und insbesondere für CFK und GFK. Außerdem liefert sie metrische Daten.

Für die effiziente Auswertung der Daten werden passende Algorithmen benötigt. In Abschnitt 2.3 wurde eine Reihe geeigneter Auswerteverfahren vorgestellt. Neben den speziell für CT-Daten geeigneten Verfahren, wurde in Abschnitt 2.4 die allgemein in der Bildverarbeitung einsetzbare und dort weitverbreitete Texturanalyse vorgestellt. Spezielle 3D-Varianten ermöglichen, sie auch für mittels CT erzeugte Volumendaten einzusetzen.

In Kapitel 3 wurde auf dieser Basis die Konzeption entworfen. Zielsetzung war hierbei die Auswahl einer zerstörungsfreien Prüfmethode, die eine möglichst große Anzahl an typischen Defekten und Qualitätseigenschaften von FVK erfasst. Dies führt zwangsläufig zur

Verwendung der CT, was wiederum einen Einsatz in der Stichprobenprüfung, beispielsweise im Bereich der Materialentwicklung oder der Bauteilfertigung, bedingt. Dadurch, dass nicht von einer Serienprüfung ausgegangen wird, musste der zu entwickelnde Algorithmus flexibel für verschiedene, wechselnde Bauteile und Proben einsetzbar sein. Außerdem sollten die zahlreichen Fehlertypen und Qualitätseigenschaft der FVK möglichst umfassend erfasst und quantitativ bewertet werden können. Der strukturierte Aufbau aus Kunststoff und Fasern ermöglicht den Einsatz von Texturanalyseverfahren. Die Texturanalyse erfüllt grundsätzlich die Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Erfassungsmöglichkeiten. Aufgrund der komplexen dreidimensionalen Geometrie ist aber eine schichtweise Analyse nicht zielführend. Somit war der Einsatz einer 3D-Variante zur Texturbestimmung notwendig.

In Kapitel 4 wurde die unter diesen Voraussetzungen entwickelte 3D Texturanalyse detailliert beschrieben. Der implementierte Algorithmus kombiniert klassische Methoden aus der 2D Texturanalyse mit Ansätzen zur Bestimmung einer 3D Textur. Im Kern handelt es sich um ein Split-and-Merge Verfahren (siehe Abschnitt 4.1). Hierbei wird das Volumen zunächst aufgeteilt und anschließend wieder zu Segmenten zusammengesetzt, die in sich jeweils eine einheitliche Textur aufweisen. In Abschnitt 4.2 wurde auf die erzielbaren Ergebnisse und deren Darstellungsmöglichkeiten anhand realer Beispiele eingegangen. Abhängig von der zu beantwortenden Fragestellung bieten sich hier verschiedene Visualisierungsvarianten an.

Die implementierten Analyse- und Darstellungsvarianten wurden in Kapitel 5 verwendet, um das entwickelte Verfahren einzuordnen und systematisch zu bewerten. Die Hauptanwendungsmöglichkeiten der 3D Texturanalyse bestehen in der Defekterkennung und der Analyse der Faserorientierung. Generell können Defekte, die sich durch eine Abweichung ihrer Textur von der Umgebung auszeichnen, detektiert werden. Hierzu gehören u. a. Einschlüsse, Faserbrüche, Risse, Delaminationen oder Trockenstellen. Die entlang der Fasern bzw. Faserbündeln einheitlichen Texturen und die Texturunterschiede zwischen den Fasern bzw. Bündeln ermöglichen es, das Verfahren auch für die Analyse ihrer Orientierung zu verwenden. Die Haupteinschränkung des Verfahrens liegt darin, dass nicht jeder Texturunterschied ein Defekt bzw. eine relevante Struktureigenschaft ist und somit u. a. Gutbereiche fälschlicherweise als Fehler erkannt und markiert werden. Bei geeigneter Parametrierung und Interpretation ist die 3D Texturanalyse generell für die Erkennung von Defekten und

die Orientierungsanalyse der Fasern geeignet. Dies hebt den implementierten Algorithmus vom Stand der Technik ab. Dem Autor ist kein anderes Verfahren bekannt, das für beide Aufgabenstellungen geeignet ist.

Außerdem wurde in Kapitel 5 die Leistungsfähigkeit des implementierten Verfahrens sowohl für die Analyse der Faserorientierung als auch der Defekterkennung an repräsentativen Beispielen evaluiert. Es wurde gezeigt, dass mit ausreichender Datenqualität die Hauptorientierung der Fasern und Defekte in ihrer Position und Größe bestimmt werden können. Auch die Laufzeit wurde anhand dieser Beispiele untersucht. Als Hauptergebnis ist festzuhalten, dass nicht die eigentliche Dateigröße den entscheidenden Einfluss auf die Laufzeit hat, sondern der notwendige Detailgrad der Untersuchung. Insbesondere im Vergleich zur relativ langen Aufnahmezeit bei der CT können je nach Aufgabenstellung akzeptable Laufzeitwerte des Algorithmus erreicht werden.

## 6.2 Ausblick

Ansatzpunkte für mögliche Fortsetzungen der hier beschriebenen Arbeiten bestehen in der Optimierung der Ergebnisse der 3D Texturanalyse sowie der Weiterentwicklung des Verfahrens.

### 6.2.1 Optimierungen

In Abschnitt 5.2 wurde auf aktuelle Grenzen und Einschränkungen des implementierten Verfahrens hingewiesen. Diese sind teilweise grundsätzlicher Natur, beispielsweise die mangelnde Eignung für die Analyse der Porosität. Es gibt aber auch diverse Herausforderungen, für die das Auffinden von Lösungen möglich und teils auch wahrscheinlich ist.

Hierzu gehört u. a. der an Randbereichen häufig auftretende Texturunterschied. Eine Herangehensweise zur Lösung dieses Randproblems bestünde in der Auswertung des Texturanalyseergebnisses in Kombination mit einem erstellten Oberflächenmodell. Dadurch könnten gezielt Texturunterschiede in Randbereichen ausgeblendet werden. Dies würde die Nutzerfreundlichkeit und das direkte Verständnis der Ergebnisdarstellung erhöhen. Man läuft aber an dieser Stelle Gefahr, Defekte im Randbereich zu ignorieren. Hierin liegt die wesentliche Herausforderung zur Lösung des Randproblems.

Neben diesem Ansatzpunkt gibt es auch noch weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Ergebnisqualität und deren Darstellung. Derzeit konzentriert sich die implementierte Version des entwickelten Verfahrens beim Region Growing auf die Hauptachsen ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ). Dies führt dazu, dass die quaderförmige Ausgangsstruktur, wie sie nach dem Aufteilungsschritt (Split-Schritt) vorliegt, oft auch beim Ergebnis erhalten bleibt. Dies bedingt außerdem, dass die Erkennung von Orientierungen entlang der Hauptachsen deutlich besser ist als bei Faserverläufen in andere Raumrichtungen (siehe Abschnitt 5.4.1). Mögliche Ansatzpunkte für Verbesserungen an dieser Stelle bestehen in der Betrachtung weiterer über die Hauptachsen hinausgehender Raumrichtungen beim Region Growing und einer sich an das Region Growing anschließenden Untersuchung identifizierter Bereiche auf Voxel Ebene. Durch Einbeziehung neuer ggf. vorgegebener Raumrichtungen könnte auch gezielt die Einhaltung der angestrebten Faserorientierungen untersucht werden. Dies ist auch schon mit der aktuellen Implementierung möglich, allerdings sollte hierfür der Datensatz zunächst so transformiert werden, dass die Orientierung entlang einer der drei Hauptachsen verläuft. Die notwendige Transformation kann aus einer ersten Faserorientierungsanalyse des untransformierten Datensatzes anhand der Ergebnisse für die diskretisierten Orientierungen abgeleitet werden. Hier kann iterativ vorgegangen werden, bis die passende Transformation bestimmt wurde.

Die in dieser Arbeit dargestellten bzw. die bei Betrachtung weiterer Raumrichtungen erzielbaren Ergebnisse würden für die oben genannte Untersuchung auf Voxel Ebene, also die Betrachtung einzelner Voxel, als Basis dienen. Dadurch könnten beispielsweise Defektbereiche oder Faserorientierungen exakter bestimmt werden. Dies kann wiederum sowohl hinsichtlich der Visualisierung als auch bei der quantitativen Bestimmung des Volumens der Defekte zu einer Verbesserung führen. Hinsichtlich der Faserorientierung können auf Basis genauerer Segmente Orientierungsvektoren abgeleitet werden, die eine detailliertere Differenzierung des Faserverlaufs ermöglichen.

Ein weiterer Optimierungsansatz betrifft die Laufzeit. Sie kann durch Parallelisierung und somit Ausnutzung moderner Mehrkernrechnersysteme verbessert werden. Hinsichtlich der Laufzeit ist es auch sinnvoll, statt der Grauwertmatrizen abgeleitete Texturmerkmale (siehe Abschnitt 2.4.2.2) zu verwenden, somit kann die Anzahl der vorzuhaltenden Werte zur Texturbestimmung stark reduziert werden. Die Reduktion der Werteanzahl wirkt sich

hinsichtlich der Laufzeit direkt positiv in allen nachfolgenden Operationen (insbesondere dem Merge-Schritt und dem Texturvergleich) aus. Außerdem verbessert sich hierdurch die Auslastung des Arbeitsspeichers. Man riskiert aber an dieser Stelle einen Informationsverlust durch die Umwandlung der Basisgrößen. Ob dieser Informationsverlust relevant ist und inwieweit sich hierdurch die Laufzeit und der Speicherbedarf optimieren lassen, muss nach einer entsprechenden Implementierung evaluiert werden.

### 6.2.2 Weiterentwicklung

Viele FVK-Bauteile zeichnen sich durch gekrümmte Bereiche aus. Falls es hierbei auch zu einer Krümmung der Fasern kommt, ist eine Bestimmung deren Orientierung mit der hier vorgestellten Methode nur noch abschnittsweise möglich. In wie weit der Algorithmus geeignet ist, die hierfür notwendige Aufteilung selbst vorzunehmen bzw. welche Weiterentwicklungen für diesen Anwendungsfall notwendig sind, muss gesondert an repräsentativen Beispielen betrachtet werden.

Ein Ausbausschritt des Verfahrens besteht in der Erweiterung auf andere Materialien, die sich durch eine regelmäßige Grundstruktur auszeichnen. Hierzu gehört beispielsweise Faserbeton und Schäume. Auch biologische Produkte wie Holz weisen eine 3D Textur auf. Ebenfalls ist eine Übertragung auf medizinische Anwendungen wie die Analyse von Zellstrukturen denkbar. Für FVK wurde dargelegt, dass eine Materialtrennung zwischen verschiedenen Faserschichten möglich ist. Bei anderen Materialien kann das beschriebene Analyseverfahren ebenfalls dazu eingesetzt werden, Bestandteile mit unterschiedlichen Texturen automatisiert zu trennen. Wie geeignet die Methodik im Allgemeinen für die beispielhaft genannten Stoffe und Anwendungsfälle ist bzw. wie weit der Anpassungs- und ggf. der Erweiterungsbedarf des entwickelten Algorithmus ist, ist aktuell schwer abzuschätzen und muss durch zusätzliche Tests überprüft werden.

Auf die, wie bei vielen anderen Analyseverfahren auftretenden, Schwierigkeiten der Parametrierung des Algorithmus und das hierfür notwendige Expertenwissen wurde bereits in Abschnitt 5.2 hingewiesen. Ein Ansatzpunkt zum schnelleren Auffinden des richtigen Parametersatzes wäre die Einführung einer Vorschauanzeige. Dieses Konzept wurde u. a. für die Analyse von CT-Daten von Hackh 2012 in der von ihm implementierte Porositäts-



analyse (siehe Abschnitt 2.3.1) umgesetzt. Die Idee hierbei ist, die aktuelle Parameterwahl des Nutzers nur auf eine geringe Anzahl von Schnittbildern anzuwenden und nicht direkt auf den kompletten Datensatz. Dadurch kann sehr schnell ein Feedback über die Eignung des gewählten Parametersatzes an den Nutzer erfolgen. Ein deutlich automatisierteres Vorgehen bestünde darin, Korrelationen zwischen Parameterwahl und Eingangsdaten aufzufinden und diese entsprechend zu hinterlegen. Dies würde es ermöglichen, nur auf Basis der Eingangsdaten die Parameter automatisch zu setzen oder zumindest automatisch eine geeignete Parametrierung vorzuschlagen. Zum Auffinden der Korrelationen bieten sich moderne Machine Learning Verfahren an. Hierbei ist es aber notwendig, zunächst durch manuelle Parametrierung einen ausreichenden Datenbestand für die Lernverfahren sicherzustellen.

In Summe gibt es zahlreiche Ansatzpunkte, um auf dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren aufzubauen, es zu optimieren und weiterzuentwickeln. Es wurden die grundsätzlichen Möglichkeiten und Potentiale dargelegt. Entsprechende zukünftige Schritte zur Ausschöpfung dieser sollten umgesetzt werden.

# Literatur

- Ahrholdt 2005** Ahrholdt, Malte, 2005.  
*Ein System zur automatischen Auswertung von Ultraschall-Messdaten.* Göttingen: Cuvillier.  
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss. 2005.  
ISBN: 978-3-86537-581-0
- Bauer 2007** Bauer, Norbert (Hrsg.), 2007.  
*Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.  
ISBN: 978-3-8167-7386-3
- Becker et al. 2012** Becker, Stefan; Ullmann, Thomas; Busse, Gerd, 2012.  
3D terahertz imaging of hidden defects in oxide fibre reinforced ceramic composites.  
In: *4th International Symposium on NDT in Aerospace.* Augsburg, 13.11.2012-15.11.2012, Berlin: DGZfP, S. 1-6.  
ISBN: 978-3-940283-46-7
- Birt & Smith 2004** Birt, E. Anne; Smith, Robert A., 2004.  
A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites.  
*Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* **46** (11), 2004, S. 681–686.  
DOI: 10.1784/insi.46.11.681.52280
- Blanc & Westenberger 2017** Blanc, Rémi; Westenberger, Peter, 2017.  
Auf Fasernsuche: Ein Vergleich von Methoden zur Analyse der Faserorientierung.  
*inspect* **18** (5), 2017, S. 8–10
- Cacciola et al. 2009** Cacciola, Matteo; Calcagno, Salvatore; Megali, Giuseppe; Pellicanó, Diego; Versaci, Mario; Morabito, Francesco Carlo, 2009.  
Eddy Current Modeling in Composite Materials.  
*PIERS Online* **5** (6), 2009, S. 591–595
- Carr et al. 2003** Carr, Chris; Graham, Duncan; Macfarlane, John C.; Donaldson, Gordon B., 2003.  
SQUID-based nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer.  
*IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **13** (2), 2003, S. 196–199.  
DOI: 10.1109/TASC.2003.813682

- Chatzigeorgiou et al. 2003** Chatzigeorgiou, Lazarula; Feiler, Markus; Aoki, Rodolfo, 2003. Machbarkeitsstudie zum Prozessmonitoring von Vakuuminfusionsverfahren mittels Lockin Thermografie. In: *Thermografie-Kolloquium 2003*. Berlin: DGZfP, S. 83–90. ISBN: 393138151X
- Chen & Pavlidis 1979** Chen, Patrick C.; Pavlidis, Theodosios, 1979. Segmentation by Texture Using a Co-Occurrence Matrix and a Split-and-Merge Algorithm. *Computer graphics and image processing* **10** (2), 1979, S. 172–182
- Christoph & Neumann 2017** Christoph, Ralf; Neumann, Hans Joachim, 2017. *Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik: Präzise, wirtschaftlich und universell*. 3., überarbeitete Auflage. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie. ISBN: 978-3-86236-111-3
- Dauensteiner 2002** Dauensteiner, Alexander, 2002. *Der Weg zum Ein-Liter-Auto: Minimierung aller Fahrwiderstände mit neuen Konzepten*. Berlin und New York: Springer. ISBN: 978-3-540-42014-9
- Diewel et al. 2011** Diewel, Björn; Oster, Reinhold; Dierig, Tobias; Günther, Thomas, 2011. Computed Tomography Image Processing - Automated Analysis on GFRP Helicopter Rotor Blades: Poster 30. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, S. 1–2. Berlin, 20.06.2011–22.06.2011, Berlin: DGZfP. ISBN: 978-3-940283-34-4
- Effenberger & Denecke 2015** Effenberger, Ira; Denecke, Julia, 2015. Intelligente Verfahren zur messtechnischen Auswertung von Computertomographiedaten. In: Sackewitz, Michael (Hrsg.): *Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 47-48. ISBN: 978-3-8396-0913-2
- Fery 2012** Fery, Jens-Holger, 2012. Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundkunststoffen im Automobil. In: Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (Hrsg.): *Jahresbericht 2011*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 52-53

- Frangi et al. 1999** Frangi, Alejandro F.; Niessen, Wiro J.; Hoogeveen, Romhild M.; Walsum, Theo van; Viergever, Max A., 1999.  
Model-based quantitation of 3-D magnetic resonance angiographic images.  
*IEEE Transactions on medical imaging* **18** (10), 1999.  
DOI: 10.1109/42.811279
- Frommknecht et al. 2013** Frommknecht, Andreas; Effenberger, Ira; Verl, Alexander, 2013.  
Using 3D Texture for Analysing Fibre Reinforced Plastic.  
In: Cnudde, Veerle; Bernard, Dominique (Hrsg.): *Book of Abstracts Posters*.  
Ghent, 01.07.2013-05.07.2013, Ghent: University press, S. 155–158.  
ISBN: 978-9-4619713-0-2
- Frommknecht & Effenberger 2014** Frommknecht, Andreas; Effenberger, Ira, 2014.  
Texture Based Algorithm for Analysing Defects and Fibre Orientation of Fibre Reinforced Plastics.  
In: Kastner, Johann (Hrsg.): *Proceedings Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) 2014*.  
Wels, 25.02.2014-28.02.2014, Aachen: Shaker, S. 389–394.  
ISBN: 978-3-8440-2557-6
- Gholizadeh 2016** Gholizadeh, Samira, 2016.  
A review of non-destructive testing methods of composite materials.  
*Procedia Structural Integrity* **1**, 2016, S. 50–57.  
DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.008
- Hackh 2012** Hackh, Patrick, 2012.  
*3D-Porositätsanalyse für Faserverbundbauteile mit Hilfe industrieller Computertomographie*.  
Stuttgart, Univ., Bachelorarbeit, 2012
- Handels 2009** Handels, Heinz, 2009.  
*Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie. 2.*, überarbeite und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.  
ISBN: 978-3-8351-0077-0
- Haralick et al. 1973** Haralick, Robert Martin; Shanmugam, Kumarasamy; Dinstein, Its'Hak, 1973.  
Textural Features for Image Classification.  
*IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **SMC-3** (6), 1973, S. 610–621.  
DOI: 10.1109/TSMC.1973.4309314
- Haralick 1979** Haralick, Robert Martin, 1979.  
Statistical and structural approaches to texture.  
*Proceedings of the IEEE* **67** (5), 1979, S. 786–804.  
DOI: 10.1109/PROC.1979.11328

- Heuer 2012** Heuer, Henning, 2012.  
Abbildende Wirbelstromsensoren zur hochauflösenden berührungslosen Abbildung von elektrischen Eigenschaften schlecht leitender Objekte.  
In: Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (Hrsg.): *Jahresbericht 2011*.  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 39-44
- Holub & Haßler 2012** Holub, Wolfgang; Haßler, Ulf, 2012.  
Detection and Evaluation of Ondulations in Glass-Fiber Reinforced Materials.  
In: Kastner, Johann (Hrsg.): *Proceedings Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) 2012*.  
Wels, 19.09.2012-21.09.2012, Aachen: Shaker, S. 49–54.  
ISBN: 978-3-8440-1281-1
- Honlet & Walz 2002** Honlet, Michel; Walz, Thomas, 2002.  
Shearografie: Stand der Technik eines optischen Verfahrens für die ZfP.  
*ZfP-Zeitung* (78), 2002, S. 39–42
- Horowitz & Pavlidis 1976** Horowitz, Steven Leslie; Pavlidis, Theodosios, 1976.  
Picture Segmentation by a Tree Traversal Algorithm.  
*Journal of the Association for Computing Machinery* **23** (2), 1976, S. 368–388.  
DOI: 10.1145/321941.321956
- Jüngert et al. 2009** Jüngert, Anne; Große, Christian; Aderhold, Jochen; Meinschmidt, Pia; Schlüter, Friedrich; Förster, Tilo; Felsch, Torsten; Elkmann, Norbert; Krüger, Michael; Lutz, Otto, 2009.  
Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie.  
*ZfP-Zeitung* (115), 2009, S. 43–49
- Keferstein et al. 2018** Keferstein, Claus P.; Marxer, Michael; Bach, Carlo, 2018.  
*Fertigungsmesstechnik: Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*. 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.  
ISBN: 978-3-658-17755-3
- Kiefel et al. 2014** Kiefel, Denis; Stoessel, Rainer; Plank, Bernhard; Heinzl, Christoph; Kastner, Johann, 2014.  
CFRP porosity characterisation using  $\mu$ -Computed Tomography with optimized test parameters supported by XCT-simulation.  
In: Kastner, Johann (Hrsg.): *Proceedings Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) 2014*.  
Wels, 25.02.2014-28.02.2014, Aachen: Shaker, S. 35–43.  
ISBN: 978-3-8440-2557-6

- Kiefel et al. 2015** Kiefel, Denis; Stoessel, Rainer; Dominguez, Nicolas, 2015. Reliability Optimization of Quantitative CFRP Porosity Characterization Using  $\mu$ -CT. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*. Ghent, 22.06.2015-25.06.2015, S. 133–142
- Königsreuther 2015** Königsreuther, Peter, 2015. *Composites im Maschinenbau: Abspecken im Maschinenbau*, URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/compositesworld/articles/502328/>  
Zugriff am: 25.02.2020
- Kovalev et al. 2001** Kovalev, Vassili A.; Kruggel, Frithjof; Gertz, Hermann-Josef; von Cramon, Detlev Yves, 2001. Three-dimensional texture analysis of MRI brain datasets. *IEEE transactions on medical imaging* **20** (5), 2001, S. 424–433. DOI: 10.1109/42.925295
- Krause et al. 2010** Krause, Michael; Hausherr, Jan-Marcel; Burgeth, Bernhard; Herrmann, Christoph; Krenkel, Walter, 2010. Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform. *Journal of Materials Science* **45** (4), 2010, S. 888–896. DOI: 10.1007/s10853-009-4016-4
- Kroll 2014** Kroll, Julia, 2014. *Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computertomographiedaten*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgart, Univ., Diss. 2014. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 27. ISBN: 978-3-8396-0672-8
- Lässig et al. 2012** Lässig, Ralph; Eisenhut, Martin; Mathias, Arne; Schulte, Rolf T.; Peters, Frank; Kühmann, Thorsten; Waldmann, Thomas; Begemann, Walter, 2012. *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektive für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. URL: [https://www.scope-online.de/upload\\_weka/Studie\\_894791.pdf](https://www.scope-online.de/upload_weka/Studie_894791.pdf)  
Zugriff am: 25.02.2020
- Leichtbau BW GmbH 2014a** Leichtbau BW GmbH, 2014. *Leichtbau - Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg*. Reutlingen., URL: [http://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/RZ\\_LeichtbauBW\\_Studie\\_Trends\\_Zukunftsmaerkte\\_Web.pdf](http://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/PDF/RZ_LeichtbauBW_Studie_Trends_Zukunftsmaerkte_Web.pdf)  
Zugriff am: 26.02.2020

- Leichtbau BW GmbH 2014b** Leichtbau BW GmbH, 2014.  
*Wertschöpfungspotentiale im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg.*  
Stuttgart., URL: [http://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/RZ\\_LeichtbauBW\\_Studie\\_WSK\\_Web.pdf](http://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/Downloads/RZ_LeichtbauBW_Studie_WSK_Web.pdf)  
Zugriff am: 26.02.2020
- Li 2012** Li, Xin, 2012.  
*Eddy Current Techniques for Non-destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP).*  
Manchester, Univ., Diss., 2012.  
URL: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:167388>  
Zugriff am: 26.02.2020
- Maaß et al. 2010** Maaß, Clemens; Knaup, Michael; Sawall, Stefan; Kachelrieß, Marc, 2010.  
ROI-Tomografie (Lokale Tomografie).  
In: Kastner, Johann (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie: Eine Veranstaltung im Rahmen des K-Projektes ZPT (Zerstörungsfreie Prüfung und Tomografie).*  
Wels, 27.09.2010-29.09.2010, Aachen: Shaker, S. 251-260.  
ISBN: 978-3-8322-9418-2
- Maierhofer et al. 2018** Maierhofer, Christiane; Krankenhagen, Rainer; Röllig, Mathias; Unnikrishnakurup, Sreedhar; Monte, Christian; Adibekyan, Albert; Gutschwager, Berndt; Knazowicka, Lenka; Blahut, Ales; Gower, Mike; Lodeiro, Maria; Baker, Graham; Aktas, Alper, 2018.  
Einfluss thermischer und optischer Materialeigenschaften auf die Charakterisierung von Fehlstellen in Faserverbundwerkstoffen mit aktiven Thermografieverfahren.  
*tm - Technisches Messen* **85** (1), 2018, S. 13–27.  
DOI: 10.1515/teme-2017-0078
- MarketsandMarkets 2017a** MarketsandMarkets, 2017.  
*Advanced Composites Market by Fiber Type (Carbon, S-Glass, Aramid), Resin Type (Thermosetting, Thermoplastic), Manufacturing Process (Filament Winding, Injection Molding, Pultrusion), End-use Industry, Region: Global Forecast to 2022,*  
URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/advanced-composites-market-3930953.html>  
Zugriff am: 12.02.2019

- MarketsandMarkets 2017b** MarketsandMarkets, 2017.  
*CF & CFRP Market by End-Use Industry (A&D, Wind Energy, Automotive, Sports, Civil Engineering, Pipe & Tank, Marine, Medical, E&E), Resin Type (Thermosetting, Thermoplastic), Manufacturing Process, Raw Material, and Region: Global Forecast to 2022*,  
URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carbon-fiber-composites-market-416.html>  
Zugriff am: 12.02.2017
- Mathes & Witten 2014** Mathes, Volker; Witten, Elmar (Hrsg.), 2014.  
*Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.  
ISBN: 978-3-658-02755-1
- Menner et al. 2008** Menner, Philipp; Gerhard, Henry; Busse, Gerhard, 2008.  
Lock-in-Shearografie: Prinzip und Anwendung (Lock-in Shearography: Principle and Application).  
*tm - Technisches Messen* **75** (6), 2008, S. 390–397.  
DOI: 10.1524/teme.2008.0861
- Menner 2013** Menner, Philipp, 2013.  
*Zerstörungsfreie Prüfung von modernen Werkstoffen mit dynamischen Shearografie-Verfahren*.  
Stuttgart, Univ., Diss., 2013.  
DOI: 10.18419/opus-2158
- Mihaljević 2009** Mihaljević, Michael; Kramer, Martin; Gomerčić, Hrvoje (Hrsg.), 2009.  
*CT- und MRT-Atlas: Transversalanatomie des Hundes*. Stuttgart: Parey Verlag.  
ISBN: 978-3-8304-4183-0
- Naftaly 2015** Naftaly, Mira, 2015.  
*Terahertz Metrology*. Boston: Artech House.  
ISBN: 978-1-60807-777-9
- Oster 2012** Oster, Reinhold, 2012.  
Non-destructive testing methodologies on helicopter fiber composite components challenges today and in the future.  
In: *Proceedings 18th World Conference on Non-Destructive Testing*.  
Durban, South Africa, 16.04.2012-20.04.2012, South African Institute for Non-Destructive Testing (SAINT), S. 1–10.  
ISBN: 978-0-620-52872-6
- Pannekamp 2005** Pannekamp, Jens, 2005.  
*Adaptive Verfahren zur Bewertung texturierter Oberflächen*. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag. Stuttgart, Univ., Diss. 2005.  
IPA-IAO Forschung und Praxis 414.  
ISBN: 3-936947-53-8



- Pavlidis 1977** Pavlidis, Theodosios, 1977.  
*Structural pattern recognition*. Berlin und Heidelberg: Springer.  
Springer series in electrophysics.  
ISBN: 3-540-08463-0
- Pfeifer et al. 2008** Pfeifer, Franz; Kastner, Johann; Freytag, Rotraud, 2008.  
Method for three-dimensional evaluation and visualisation of the distribution of fibres in glass-fibre reinforced injection molded parts by  $\mu$ -X-ray computed tomography.  
In: *Proceedings of 17th World Congress on Non-Destructive Testing*.  
Shanghai, China, 25.10.2008-28.10.2008, International Committee for Non-Destructive Testing (ICNDT), S. 1-7.  
ISBN: 978-1-617-82886-7
- Pratt 2001** Pratt, William K., 2001.  
*Digital image processing: PIKS inside*. 3rd ed. New York: Wiley.  
ISBN: 978-0-471-37407-7
- Riegert 2007** Riegert, Gernot, 2007.  
*Induktions-Lockin-Thermografie: Ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*.  
Stuttgart, Univ., Diss., 2007.  
DOI: 10.18419/opus-1734
- Salaberger et al. 2011** Salaberger, Dietmar; Kannappan, Kana Arunachalam; Kastner, Johann; Reussner, Jens; Auinger, Thomas, 2011.  
Evaluation of Computed Tomography Data from Fibre Reinforced Polymers to Determine Fibre Length Distribution.  
*International polymer processing* **26** (3), 2011, S. 283–291.  
DOI: 10.3139/217.2441
- Sarfels & Liebelt 2014** Sarfels, Joachim; Liebelt, Frank, 2014.  
Katastrophen verhindern: Lock-In-Thermografie für Faserverbundbauteile.  
*inVISION* **3** (5), 2014, S. 106–107.  
Zugriff am: 04.10.2015
- Schnars & Heinrich 2006** Schnars, Ulf; Heinrich, Rudolf, 2006.  
Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry.  
In: *CDCM 2006 - Conference on Damage in Composite Materials 2006*,  
S. 1–8.  
Stuttgart, 18.09.2006-19.09.2006.  
Zugriff am: 26.01.2014
- Schnell 2011** Schnell, Holger, 2011.  
*Hochgeschwindigkeits-Computertomografie zur schnellen, zerstörungsfreien und intelligenten Inspektion und Prozessoptimierung von Aluminium-Gussteilen*.  
Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss. 2011.  
urn:nbn:de:bvb:29-opus-22738

- Spaeth 2018** Spaeth, Andreas, 2018.  
Wettbewerb langer Röhren: Airbus kommt mit dem verlängerten A350-1000 als Antwort auf Boeings 777-Reihe auf den Markt.  
*Neue Zürcher Zeitung Auswahl für Deutschland* **239** (102), 2018, S. 32
- Statista GmbH 2018** Statista GmbH, 2018.  
*Statista-Dossier zum Leichtbau*,  
URL: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/40838/dokument/leichtbau-statista-dossier/>  
Zugriff am: 12.02.2019
- Stoessel et al. 2011a** Stoessel, Rainer; Kiefel, Denis; Oster, Reinhold; Diewel, Björn; Llopart Prieto, Llorenç, 2011.  
 $\mu$ -Computed Tomography for 3D Porosity Evaluation in Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP).  
In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*,  
S. 1–7.  
Berlin, 20.06.2011–22.06.2011, Berlin: DGZfP.  
ISBN: 978-3-940283-34-4
- Stoessel et al. 2011b** Stoessel, Rainer; Guenther, Thomas; Dierig, Tobias; Schladitz, Katja; Godehardt, Michael; Kessling, Petra-Maria; Fuchs, Theobald, 2011.  
 $\mu$ -Computed Tomography for Micro-Structure Characterization of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP).  
In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*,  
S. 461–468.  
DOI: 10.1063/1.3591888
- Teßmann et al. 2010** Teßmann, Matthias; Mohr, Stephan; Gayetskyy, Svitlana; Haßler, Ulf; Hanke, Randolph; Greiner, Günther, 2010.  
Automatic Determination of Fiber-Length Distribution in Composite Material Using 3D CT Data.  
*EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* **2010** (1), 2010, S. 1–9.  
DOI: 10.1155/2010/545030
- Ullmann et al. 2010** Ullmann, Thomas; Schmidt, Thomas; Hofmann, Severin; Jemmali, Raouf, 2010.  
In-line quality assurance for the manufacturing of carbon fiber reinforced aircraft structures.  
In: *2nd International Symposium on NDT in Aerospace*.  
Hamburg, 22.11.2010–24.11.2010, Berlin: DGfZP, S. 1–8.  
ISBN: 978-3-940283-28-3

- Vandewal et al. 2012** Vandewal, Marijke; Depauw, Jan; Rombaut, Koenraad; Beigang, Rene; Jonuscheit, Joachim; Mounaix, P.; Sáez de Ocariz, I.; Martínez Edo, R.; Priegue, A.; Sternberg, Y., 2012. Development and optimization of THz NDT on aeronautics composite multilayered structures. In: *SPIE Defense, Security, and Sensing*, S. 1–9. SPIE Proceedings. DOI: 10.1117/12.928287
- VDI ZRE 2015** VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2015. *Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland: Kurzstudie*. Berlin, Düsseldorf, URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/bestandsaufnahme-leichtbau-in-deutschland.html> Zugriff am: 22.12.2017
- Wirjadi 2009** Wirjadi, Oliver, 2009. *Models and Algorithms for Image-Based Analysis of Microstructures*. Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss. 2009. urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-23231
- Witten et al. 2018** Witten, Elmar; Mathes, Volker; Sauer, Michael; Kühnel, Michael, 2018. *Composites Market Report 2018: Market developments, trends, outlooks and challenges*, URL: [https://www.avk-tv.de/files/20181115\\_avk\\_ccev\\_market\\_report\\_2018\\_final.pdf](https://www.avk-tv.de/files/20181115_avk_ccev_market_report_2018_final.pdf) Zugriff am: 07.05.2019
- Yang et al. 1996** Yang, Lianxiang; Steinchen, Wolfgang; Kupfer, Gerhard, 1996. Digitale Shearografie für die direkte Messung der Biege- und Scherdehnungen von dünnen Platten. *Forschung im Ingenieurwesen* **62** (6), 1996, S. 168–174. DOI: 10.1007/BF02601420
- Yang et al. 2013** Yang, Seung-Hwan; Kim, Ki-Bok; Oh, Hyun Geun; Kang, Jin-Seob, 2013. Non-contact detection of impact damage in CFRP composites using millimeter-wave reflection and considering carbon fiber direction. *NDT & E International* **57**, 2013, S. 45–51. DOI: 10.1016/j.ndteint.2013.03.006





